



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYO PARA HÉLICES DE BARCO

POR

Franco Paolo Caraboni Burgos

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:
PhD Frank Tinapp Dautzenberg

Septiembre 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Franco Paolo Caraboni Burgos

© 2024 Franco Paolo Caraboni Burgos

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

Dedico esta memoria a quien pueda obtener motivación, inspiración o aprendizaje de ella.

Gracias a quienes estuvieron, están y estarán.

Resumen

La asignatura “Integración a través de CDIO”, impartida a los estudiantes de Ingeniería Civil Aeroespacial y Mecánica, busca aplicar conocimientos ingenieriles adquiridos hasta la fecha, en la construcción de un buque carguero, el cual debe ser concebido, diseñado, implementado y operado, y cumplir una misión, buscando optimizar el tiempo en realizarla, la capacidad de carga y los costos asociados. Actualmente, el sistema de propulsión a utilizar no es elegido por algún criterio específico. Esta necesidad impulsa el diseño de un banco de ensayo para comparar sistemas de propulsión y conocer su empuje y consumo eléctrico de conjuntos hélice – motor. El banco de ensayo que se diseña en este proyecto sigue la metodología CDIO durante su desarrollo.

Al concebir, se determina que el banco medirá el empuje producido por el sistema de propulsión hélice – motor, voltaje y corriente consumidos, y RPM en el eje de transmisión. Además, debe ser sumergible en agua, por lo que se propone un sello estanco para la salida del eje de transmisión.

En la etapa de diseño se planifica el sistema de medición y las conexiones, se realizan los modelos CAD del banco de ensayo para luego ser mecanizados con una maquina fresadora CNC.

En la implementación el banco de ensayo es fabricado, ensamblado, nivelado con la horizontal e instalado en el canal de pruebas para su operación. Se realiza la calibración de los sensores. Se desarrolla un sistema de control de RPM y el código de Arduino. Se realizan modificaciones en el banco y sus sistemas para solucionar limitantes que acontecen durante esta etapa.

Es posible comprobar mediante un análisis de estabilidad para cuerpos flotantes, que el banco de ensayo tiene una flotación estable ya que su metacentro se encuentra sobre su centro de gravedad.

Se realiza el ensayo de dos hélices de paso 80 [mm], de $\text{Ø}55$ y $\text{Ø}52$ [mm], con un motor de corriente continua de 100 [W] de potencia. Existe ruido en las mediciones, pero se observa una tendencia que responde a las variaciones de potencia entregada al motor. Utilizando criterios de comparación, se concluye que, si bien ambas hélices consumen una potencia parecida durante las pruebas, la hélice de mayor diámetro tiene una mayor capacidad de producir empuje que la de $\text{Ø}52$ [mm] en condiciones similares de operación. La precisión de las mediciones depende de una correcta nivelación.

Con el banco de ensayo implementado, operativo y validado, los objetivos de trabajo propuestos son cumplidos y se logra satisfacer la necesidad de seleccionar un sistema propulsor hélice – motor según su desempeño, en la asignatura “integración a través de CDIO”.

Palabras clave: empuje, potencia, banco de ensayo, hélice.

Abstract

The course "Integration through CDIO", offered to Aerospace and Mechanical Engineering students, aims to apply engineering knowledge acquired to date in the construction of a cargo ship. This ship must be conceived, designed, implemented, and operated to fulfill a mission, focusing on optimizing the time required to complete it, the cargo capacity, and associated costs. Currently, the propulsion system to be used is not chosen based on any specific criterion. This need drives the design of a test bench to compare propulsion systems through thrust and electrical consumption measures of propeller-motor combinations. The test bench is developed follows the CDIO methodology.

It is conceived that the test bench will measure thrust produced, voltage and current consumed, and RPM of the transmission shaft. Additionally, it must be submersible in water, so a watertight seal is designed for the transmission shaft exit.

In the design phase, the measurement system and connections are planned, and CAD models of the test bench are created to later be machined using a CNC milling machine. The watertight seal is designed too.

During the implementation phase, the test bench is manufactured, assembled, leveled horizontally, and installed in the test channel for operation. Sensor calibration is performed. A RPM control system and Arduino code is developed. Modifications are made to the bench and its systems to address limitations encountered during this phase.

Through a stability analysis of floating bodies, it was verified that the test bench has stable flotation as its metacenter is above its center of gravity.

Two propellers with 80 [mm] pitch and $\text{Ø}55$ y $\text{Ø}52$ [mm] are tested using a 100 [W] direct current motor to compare their performance. There is noise in the measurements, but a trend is observed that responds to variations of power delivered to the motor. Using comparison criteria, it is concluded that, although both propellers consume similar power during tests, the larger diameter propeller has greater capacity to produce thrust than the $\text{Ø}52$ [mm] one, under similar operating conditions. The precision of measurements depends on correct leveling.

With the test bench implemented, operational and validated, the proposed work objectives are met, and the need to select a propeller – motor propulsion system based on its performance in the "Integration through CDIO" course, is fulfilled.

Keywords: thrust, power, test bench, propeller.

Tabla de Contenidos

| | |
|---|-----------|
| Tabla de Contenidos _____ | iii |
| Lista de Figuras _____ | vii |
| Lista de Tablas _____ | xi |
| Glosario _____ | xii |
| 1 CAPÍTULO 1: Introducción _____ | 1 |
| 1.1 Descripción del problema _____ | 1 |
| 1.2 Objetivos _____ | 2 |
| 1.2.1 Objetivo general _____ | 2 |
| 1.2.2 Objetivos específicos _____ | 3 |
| 1.3 Hipótesis _____ | 3 |
| 1.3.1 Alcances _____ | 3 |
| 1.3.2 Limitaciones _____ | 4 |
| 1.4 Metodología _____ | 4 |
| 2 CAPÍTULO 2: Concepción del banco de ensayo _____ | 6 |
| 2.1 Componentes disponibles para el diseño _____ | 6 |
| 2.2 Ideación del sistema de medición y propulsión _____ | 6 |
| 2.3 Ideación y propuestas estructurales del banco de ensayo _____ | 7 |
| 2.3.1 Bocetos e ideas propuestas _____ | 8 |
| 2.3.2 Espacio de medición y dirección del empuje producido _____ | 11 |
| 2.4 Selección de la idea a diseñar _____ | 12 |
| 2.5 Detalles de la propuesta de banco de ensayo concebida _____ | 13 |
| 3 CAPÍTULO 3: Diseño del banco de ensayo _____ | 15 |
| 3.1 Descripción y decisiones generales de diseño _____ | 15 |
| 3.2 Planificación del orden de diseño _____ | 16 |
| 3.3 Consideraciones para manufactura _____ | 17 |
| 3.4 Diseño de sistemas de medición y propulsión _____ | 17 |
| 3.4.1 Fuente de alimentación _____ | 17 |
| 3.4.2 Propulsión _____ | 17 |
| 3.4.3 Controlador electrónico de velocidad (ESC) _____ | 18 |
| 3.4.4 Microcontrolador Arduino UNO R3 _____ | 18 |

| | |
|--|----|
| 3.4.5 Potenciómetro | 19 |
| 3.4.6 Celda de carga 3 kg y módulo amplificador HX711 | 19 |
| 3.4.7 Sensor de corriente de efecto Hall | 19 |
| 3.4.8 Buck boost (step-up) | 20 |
| 3.4.9 Divisor de voltaje | 20 |
| 3.4.10 Sensor de RPM óptico infrarrojo | 20 |
| 3.4.11 Módulo HC-05 bluetooth | 21 |
| 3.4.12 Sistema de medición | 21 |
| 3.5 Diseño estructural base soporte de propulsión – celda de carga (BSPC) | 23 |
| 3.5.1 Caja contenedora | 23 |
| 3.5.2 Sistema de propulsión | 23 |
| 3.5.3 Soportes de eje | 24 |
| 3.5.4 Soporte de celda de carga | 25 |
| 3.5.5 Extensión de la celda de carga | 25 |
| 3.5.6 Base soporte propulsión – celda de carga | 26 |
| 3.5.7 Base principal | 26 |
| 3.5.8 Ensamble base soporte de propulsión – celda de carga | 27 |
| 3.5.9 Soporte de placa y placa motor | 28 |
| 3.5.10 Soporte de sensor de RPM | 28 |
| 3.5.11 Repisa para electrónica del sistema de medición y propulsión | 29 |
| 3.5.12 Esquineros para baterías | 29 |
| 3.5.13 Base C portamotor y sobrebase C | 30 |
| 3.5.14 Ensamble base portamotor y sistema de medición y propulsión | 30 |
| 3.5.15 Ensamble base soporte propulsión – celda de carga y base portamotor – sistema de medición y propulsión. | 31 |
| 3.6 Diseño estructural marco de soporte con rieles (MSR) | 31 |
| 3.6.1 Soportes laterales | 31 |
| 3.6.2 Espaciadores de soporte | 32 |
| 3.6.3 Ensamble soporte de caja | 32 |
| 3.6.4 Marco inferior | 32 |
| 3.6.5 Puentes | 33 |
| 3.6.6 Rieles | 33 |
| 3.6.7 Anclaje | 33 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.7 | Ensamble caja contenedora y MSR | 34 |
| 3.8 | Diseño sello estanco | 34 |
| 3.9 | Canal del modelo hidráulico de Ingeniería Civil | 35 |
| 3.10 | Consideraciones de uso | 36 |
| 3.11 | Diseño del proceso de fabricación del banco de ensayo | 36 |
| 4 | CAPÍTULO 4: Implementación del banco de ensayo | 37 |
| 4.1 | Fresado CNC | 37 |
| 4.2 | Imprimación de MDF con sellante | 37 |
| 4.3 | Ensamblaje del banco de ensayo | 38 |
| 4.3.1 | Ensamblaje estructural | 38 |
| 4.3.2 | Instalación de componentes electrónicos | 38 |
| 4.4 | Montaje en el canal de pruebas | 40 |
| 4.5 | Flotación, nivelación y estabilidad del banco de ensayo | 40 |
| 4.5.1 | Flotación del banco de ensayo | 40 |
| 4.5.2 | Estabilidad de un cuerpo flotante | 41 |
| 4.5.3 | Centro de gravedad en el plano y nivelación | 41 |
| 4.5.4 | Altura del centro de gravedad | 42 |
| 4.5.5 | Centro de flotación y metacentro | 43 |
| 4.6 | Calibración de sensores | 44 |
| 4.6.1 | Calibración de celda de carga | 44 |
| 4.6.2 | Calibración de sensor de corriente | 45 |
| 4.6.3 | Calibración de divisor de voltaje | 45 |
| 4.6.4 | Calibración de sensor de RPM | 46 |
| 4.7 | Uso del banco de ensayo | 46 |
| 4.7.1 | Control manual del banco de ensayo | 47 |
| 4.7.2 | Control automático del banco de ensayo | 47 |
| 4.8 | Sistema de control | 47 |
| 5 | CAPÍTULO 5: Mediciones, análisis y resultados | 50 |
| 5.1 | Condiciones del ensayo | 50 |
| 5.2 | Mediciones | 50 |
| 5.3 | Criterios de comparación | 54 |
| 5.3.1 | Empuje específico por unidad de potencia | 54 |

| | |
|--|----|
| 5.3.2 Coeficientes de empuje y de potencia | 55 |
| 5.4 Resultados | 57 |
| 6 CAPÍTULO 6: Evaluación económica | 58 |
| 6.1 Evaluación económica | 58 |
| 7 CAPÍTULO 7: Conclusiones | 59 |
| 7.1 Oportunidades y trabajos futuros | 60 |
| 8 Referencias | 61 |
| 9 Anexos | 62 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Esquema de sistema de medición y propulsión | 7 |
| Figura 2.2: Boceto de soporte de eje | 8 |
| Figura 2.3: Boceto de placa motor y soporte placa | 8 |
| Figura 2.4: Boceto propuesta 1 | 9 |
| Figura 2.5: Boceto propuesta 2 | 10 |
| Figura 2.6: Boceto propuesta 3 | 10 |
| Figura 2.7: Boceto propuesta 4 | 11 |
| Figura 2.8: Canal de cemento al costado del LTA | 12 |
| Figura 2.9: Canal del modelo hidráulico de Ingeniería Civil | 12 |
| Figura 2.10: Depósito para agua..... | 12 |
| Figura 2.11: Idea a diseñar | 12 |
| Figura 2.12: Boceto marco de soporte con rieles | 13 |
| Figura 2.13: Boceto rodamientos unidos a la caja | 13 |
| Figura 2.14: Base soporte de propulsión y celda de carga | 13 |
| Figura 2.15: Boceto de corte longitudinal de sello estanco para el eje y la caja | 14 |
| Figura 3.1: Ensamble con arcos en esquinas y desfase en contornos..... | 17 |
| Figura 3.2: Batería de 12 [V] y 2.6 [Ah] | 17 |
| Figura 3.3: Motor RS-550 | 18 |
| Figura 3.4: ESC New Rain 480A | 18 |
| Figura 3.5: Microcontrolador Arduino UNO R3..... | 18 |
| Figura 3.6: Potenciómetro | 19 |
| Figura 3.7: Celda de Carga..... | 19 |
| Figura 3.8: Módulo amplificador HX711 | 19 |
| Figura 3.9: Sensor de corriente de efecto Hall JXK -14 8 | 19 |
| Figura 3.10: Buck boost (step-up)..... | 20 |
| Figura 3.11: Diagrama eléctrico del divisor de voltaje. Fuente: La Electrónica..... | 20 |
| Figura 3.12: Sensor de RPM óptico infrarrojo | 21 |
| Figura 3.13: Módulo HC-05 bluetooth..... | 21 |
| Figura 3.14: Diagrama ilustrativo de conexión del sistema de medición | 22 |
| Figura 3.15: Elevación y planta de caja contenedora..... | 23 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.16: Isométrico de caja contenedora | 23 |
| Figura 3.17: Isométrico de sistema de propulsión..... | 23 |
| Figura 3.18: Elevación de soporte de eje | 24 |
| Figura 3.19: Elevación de soporte de eje tope y escuadra..... | 24 |
| Figura 3.20: Isométrico de soporte de eje tope ensamblado | 24 |
| Figura 3.21: Isométrico de soportes eje y travesaño ensamblado | 24 |
| Figura 3.22: Elevación de soporte de celda de carga con ranuras para escuadra | 25 |
| Figura 3.23: Elevación de escuadra..... | 25 |
| Figura 3.24: Isométrico de soporte de celda de carga ensamblado | 25 |
| Figura 3.25: Isométrico de extensión de la celda de carga..... | 25 |
| Figura 3.26: Planta de base de propulsión..... | 26 |
| Figura 3.27: Isométrico base de propulsión | 26 |
| Figura 3.28: Isométrico zoom de ensamble soportes eje - travesaño - base soporte propulsión | 26 |
| Figura 3.29: Isométrico zoom ensamble soporte de celda de carga - base soporte de propulsión..... | 26 |
| Figura 3.30: Planta de base principal | 27 |
| Figura 3.31: Isométrico base principal | 27 |
| Figura 3.32: Isométrico base soporte de propulsión – celda de carga ensamblado con y sin caja..... | 27 |
| Figura 3.33: Elevación de soporte de placa y escuadra..... | 28 |
| Figura 3.34: Elevación de placa motor..... | 28 |
| Figura 3.35: Isométrico soporte motor escuadras y placa motor ensamblados..... | 28 |
| Figura 3.36: Elevación de soporte de sensor de RPM..... | 28 |
| Figura 3.37: Soporte ensamblado con sensor de rpm..... | 29 |
| Figura 3.38: Vista inferior de repisa..... | 29 |
| Figura 3.39: Isométrico de repisa y baranda | 29 |
| Figura 3.40: Elevación de pata lateral repisa | 29 |
| Figura 3.41: Isométrico de repisa y patas ensamblados | 29 |
| Figura 3.42: Elevación de pata central repisa..... | 29 |
| Figura 3.43: Elevación de esquinero A y B..... | 29 |
| Figura 3.44: Isométrico de esquinero batería ensamblado | 29 |
| Figura 3.45: Vista inferior de base C portamotor..... | 30 |
| Figura 3.46: Planta de sobrebase C | 30 |
| Figura 3.47: Isométrico de base C portamotor pegado a sobrebase C | 30 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.48: Isométrico de base portamotor y sistema de medición y propulsión ensamblado..... | 30 |
| Figura 3.49: Isométrico de base soporte propulsión – celda de carga y base portamotor – sistema de medición y propulsión ensamblados con y sin caja | 31 |
| Figura 3.50: Elevación de soporte lateral y zoom de fijación de rodamiento | 31 |
| Figura 3.51: Isométrico de espaciadores de soportes laterales..... | 32 |
| Figura 3.52: Isométrico de soporte de caja con y sin caja..... | 32 |
| Figura 3.53: Planta de marco inferior..... | 32 |
| Figura 3.54: Planta de puente lateral | 33 |
| Figura 3.55: Planta de puente central | 33 |
| Figura 3.56: Isométrico zoom de rieles instalados en el marco de soporte..... | 33 |
| Figura 3.57: Isométrico de soporte de anclaje..... | 33 |
| Figura 3.58: Isométrico de marco montado en las cuatro piezas de anclaje | 33 |
| Figura 3.59: Isométrico ensamble de caja contenedora con MSR | 34 |
| Figura 3.60: Ajuste neolite | 34 |
| Figura 3.61: O – ring | 34 |
| Figura 3.62: Niple PVC..... | 34 |
| Figura 3.63: Terminal PVC..... | 34 |
| Figura 3.64: Mecanizado de niple de ½” | 35 |
| Figura 3.65: Despiece de sello estanco para la salida del eje a través de la caja | 35 |
| Figura 3.66: Corte y aumento de diametro interno de niple de ¾” | 35 |
| Figura 3.67: Isométrico de banco de ensayo instalado en canal de agua | 35 |
| Figura 3.68: Elevación de banco de ensayo instalado en canal de agua | 35 |
| Figura 3.69: Isométrico del banco de ensayo | 36 |
| Figura 4.1: Mecanizado de piezas del BSPC | 37 |
| Figura 4.2: Mecanizado de piezas del MSR..... | 37 |
| Figura 4.3: Piezas imprimadas con sellante | 38 |
| Figura 4.4: Banco de ensayo montado | 38 |
| Figura 4.5: Espaciadores rellenos con terciado | 38 |
| Figura 4.6: Shield de conexiones para Arduino | 39 |
| Figura 4.7: Distribucion de componentes electronicos en repisa..... | 39 |
| Figura 4.8: Bases ensambladas y componentes electrónicos | 39 |
| Figura 4.9: Celda en soporte lateral y perno de carga..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.10: Soportes de anclaje instalados en la pared del canal | 40 |
| Figura 4.11: Banco de ensayo instalado en el canal..... | 40 |
| Figura 4.12: Centros relacionados a la estabilidad [9] | 41 |
| Figura 4.13: Banco de ensayo colgando de su centro de gravedad en el eje X..... | 41 |
| Figura 4.14: Nivelación del banco de ensayo con cuerdas en el eje X (gris), y en el eje Z (naranja) del centro de gravedad..... | 41 |
| Figura 4.15: Ilustración de la inclinación controlada | 42 |
| Figura 4.16: Diagrama de cuerpo libre del banco inclinado | 42 |
| Figura 4.17: Sección transversal de la caja a 120 [mm] de su base | 43 |
| Figura 4.18: División de la sección transversal en formas conocidas..... | 43 |
| Figura 4.19: Puntos del análisis de estabilidad en el banco de ensayo | 43 |
| Figura 4.20: Calibración de la celda de carga | 44 |
| Figura 4.21: Calibración del sensor de corriente..... | 45 |
| Figura 4.22: Calibración del divisor de voltaje | 46 |
| Figura 4.23: Esquema de sistema de control de lazo cerrado | 47 |
| Figura 4.24: Comparación de K_p con objetivo de control 1000 RPM..... | 48 |
| Figura 4.25: Comprobación sistema de control con $K_p = 0.005$ | 48 |
| Figura 5.1: Mediciones de RPM de ambas hélices | 51 |
| Figura 5.2: Mediciones de empuje de ambas hélices | 51 |
| Figura 5.3: Mediciones de corriente de ambas hélices..... | 52 |
| Figura 5.4: Mediciones de voltaje de ambas hélices..... | 52 |
| Figura 5.5: Comparación de potencia en hélice de $\varnothing 55$ [mm]..... | 53 |
| Figura 5.6: Potencia de ambas hélices..... | 53 |
| Figura 5.7: Comparación de empuje específico por unidad de potencia..... | 54 |
| Figura 5.8: Comparación de coeficientes de empuje | 55 |
| Figura 5.9: Comparación de coeficientes de potencia..... | 56 |
| Figura 5.10: Comparación de CT/CP | 56 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Decisiones de diseño..... | 16 |
| Tabla 2: Pines de conexión entre microcontrolador y componentes..... | 22 |
| Tabla 3: Costos totales del proyecto..... | 58 |

Glosario

| | | |
|-----|---|--|
| BPC | : | Base de Propulsión y Celda de carga |
| CAD | : | Computer Aided Design |
| CAM | : | Computer Aided Manufacturing |
| CNC | : | Computer Numerical Control |
| DC | : | Direct Current |
| ESC | : | Electronic Speed Controller |
| GND | : | Ground |
| LTA | : | Laboratorio de Técnicas Aeroespaciales |
| MDF | : | Medium Density Fibreboard |
| MSR | : | Marco de Soporte con Rieles |
| PWM | : | Pulse Width Module |
| RPM | : | Revoluciones Por Minuto |
| RPS | : | Revoluciones Por Segundo |
| VCC | : | Voltaje Common Collector |
| | : | |

Símbolos

| | | |
|---------------|---|---------------|
| ρ | : | Densidad |
| \varnothing | : | Diámetro |
| μ | : | Prefijo micro |
| Ω | : | Ohm |

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Descripción del problema

La asignatura “Integración a través de CDIO”, impartida a las carreras de Ingeniería Civil Aeroespacial y Mecánica busca aplicar los conocimientos ingenieriles, adquiridos hasta la fecha, a un desafío real y tangible. Para hacer esto posible se utiliza la metodología CDIO, una iniciativa que busca potenciar las habilidades de los estudiantes, donde se logren combinar armónicamente el saber con el ser y el hacer [1]. De esta manera, se puede acoplar la teoría (concebir y diseñar) con la práctica y/o aplicaciones (implementar y operar) [1].

Para poder aplicar esta metodología se pueden utilizar modelos a escala que emulan en operación a los modelos reales. Uno de los desafíos propuestos en la asignatura corresponde a la construcción de un buque carguero, un medio que permite transportar una gran carga útil con poca energía. Según la UNCTAD, el transporte marítimo representa más de un 80% del volumen del comercio mundial, y continúa expandiéndose. Los suministros mundiales tienen una gran cobertura gracias a este medio, y por ello es necesario invertir en infraestructura y sostenibilidad como paliativo ante futuras crisis mundiales, el cambio climático y la transición a energías más limpias [2], aprovechando la eficiencia del transporte marítimo. Estas mejoras son aplicadas en la gestación de las naves, donde la ingeniería tiene relevancia.

Si bien hay puntos críticos en un buque, como la flotabilidad, estabilidad y control de trayectoria, el sistema de propulsión es lo que hace de este medio tan útil y rentable en la economía mundial, y es el tópico que podría ayudar a neutralizar la contaminación ambiental. Aquí radica la importancia de poder entender en un modelo a escala como afecta la selección de propulsión adecuada, para dimensionar cuán importante es esto en una problemática de real envergadura.

El desafío propuesto en la asignatura consiste en dar la misión al buque carguero de transportar la mayor cantidad de masas de carga estandarizadas, con el menor presupuesto y tiempo posibles. Sin embargo, el nivel conocimiento que poseen al cursar esta asignatura no es suficiente para calcular el empuje generado por un sistema de propulsión con hélice. En semestres anteriores existió la incertidumbre de que motor utilizar para construir el prototipo. El método de selección de sistema de propulsión utilizado por los estudiantes fue la intuición, puesto que no existían más criterios que revisar motores que parecieran adecuados en tamaño y peso, y hélices para barcos radiocontrolados.

Es por esto que se propone fabricar un banco de ensayo con la capacidad de medir el empuje producido por sistemas de propulsión hélice – motor, disponibles en el laboratorio. Joaquín Guevara, su proyecto de título profesional, diseña un banco de ensayo para hélices capaz de medir empuje por medio de celdas de carga y una estructura de aluminio [3], siendo inspiración en cómo abordar la concepción y diseño que se llevará a cabo en el presente proyecto. El banco de ensayo diseñado por Fernando Ortíz [4], para el mismo fin, ofrece otra opción que podría ser de utilidad. Finalmente, Herwin Salcedo, en su tesis de maestría, hace un estudio sobre sistemas de propulsión náutica [5], que posee información valiosa, tanto para la mejora de eficiencia, como para ayudar a concebir el diseño de un banco de ensayo.

Es importante comparar el desempeño entre dos sistemas propulsores distintos. Por lo tanto, se busca medir igualmente la potencia requerida para hacer funcionar el sistema en cada condición. Así, se puede establecer un factor de comparación, es decir, una pseudo eficiencia de cada sistema hélice – motor.

Además, se propone incluir un sistema de control de revoluciones por minuto (RPM) del motor que permita vincular una velocidad de rotación a un empuje. El trabajo realizado por Matías Meza [6] acerca de un banco de ensayo para hélice de paso variable, puede ser un buen cimiento para comprender las características de un banco de ensayo ya construido, y conocer el funcionamiento, calibración y uso de un sistema de control PID de RPM.

Con ayuda de un banco de ensayo con estas características, el estudiante utilizará el análisis de los datos que recopile para sustentar la selección de su motor según el empuje que requiera. Dar selección cimentada en mediciones y análisis permite a los ingenieros futuros aportar a la sociedad soluciones a partir de una sólida comprensión de los desafíos que se les presenten y tomar decisiones certeras y eficaces en base a estos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Concebir, diseñar e implementar un banco de ensayo para un sistema de propulsión con motor eléctrico y hélice, capaz de medir RPM, empuje producido y potencia consumida.

1.2.2 Objetivos específicos

- Concebir y proponer al menos dos opciones de banco de ensayo que cumplan con requisitos de medición establecidos
- Diseñar el banco de ensayo según la propuesta seleccionada
- Diseñar un sistema de medición de empuje, potencia consumida y RPM.
- Diseñar un sistema de control de RPM
- Implementar y construir el banco de ensayo para medición de empuje
- Calibrar los sensores y realizar ensayos para al menos 2 hélices distintas.

1.3 Hipótesis

El banco de ensayo, diseñado para motores eléctricos y hélices de distintas características, permite medir las RPM, el empuje producido y la potencia consumida.

1.3.1 Alcances

- El banco de ensayo y/o algunas de sus partes deben ser sumergibles en agua, por lo que deben ser impermeables o herméticas para mantener las partes electrónicas aisladas del agua.
- El enfoque del banco de ensayo es que llegue exitosamente a la implementación y operación cumpliendo los objetivos propuestos de medición.
- El banco de ensayo debe medir el empuje producido y la potencia eléctrica consumida por el sistema de propulsión para establecer comparaciones entre los sistemas ensayados.
- El banco de ensayo debe permitir al usuario obtener RPM deseadas a través de un sistema de control.
- El banco de ensayo es pensado con un fin didáctico y académico, en el contexto de la asignatura “Integración a través de CDIO”.
- El banco de ensayo debe permitir cambiar y ajustar a él, tanto hélices como motores eléctricos, con dimensiones límites a definir.
- El diseño se debe adaptar a los componentes y materiales disponibles para este proyecto.
- El tamaño de los vehículos acuáticos implementados es más bien pequeño, el sistema de propulsión relativamente liviano, y las cargas producidas de magnitud acorde a lo anterior. Considerando esto, se omitirán cálculos asociados a cargas estructurales, y además se espera que los materiales a utilizar para la estructura a diseñar sean económicos.

- Se considera favorable, para posteriores reemplazos de componentes, que el banco de ensayo, en su estructura, sea lo más desmontable o modificable posible.

1.3.2 Limitaciones

- Se debe contar con un espacio capaz de almacenar agua, en donde será montado el sistema de medición y propulsión. Asimismo, es importante que tenga una longitud adecuada para que las perturbaciones generadas por la hélice en el fluido no se vean afectadas por las paredes, y las mediciones sean lo más exactas y precisas posible, teniendo en cuenta la calidad de los sensores utilizados.
- El banco de ensayo cuenta con componentes que ya se encuentran a disposición en el laboratorio y están destinados a este proyecto. Por lo tanto, la concepción y diseño del banco será en función de ellos. Se espera adquirir los que se necesiten posteriormente.
- Se deben determinar métodos o instrumentos de medición independientes al banco, que permitan comparar las mediciones de este último y así, poder calibrarlo y validarlo.

1.4 Metodología

Con la finalidad de obtener un resultado eficaz, esta memoria de título cuenta con un enfoque de investigación experimental, analítico y cuantitativo, complementado con el modelo CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar) como marco estructural para abordar el proyecto coherente y progresivamente.

La aplicación de esta metodología resulta en las siguientes etapas:

1. Investigación sobre variables relevantes, instrumentos y materiales adecuados para cumplir con el objetivo de trabajo.
2. Análisis de los elementos disponibles para realizar el proyecto y evaluación de cual podría ser su utilidad en el banco de ensayo.
3. Concepción de opciones que satisfagan el objetivo de trabajo para luego seleccionar una según viabilidad y rentabilidad.
4. Diseño de banco de ensayo y sistemas anexos para medir empuje, potencia y controlar RPM según características concebidas previamente.
5. Construcción e implementación de la estructura y sistemas requeridos para que el banco de ensayo cumpla con el objetivo de trabajo.

6. Calibración y validación del banco de ensayo a partir de mediciones y pruebas experimentales con determinadas hélices.

Dentro de los puntos 1, 2 y 3 se espera concebir ideas efectivas que cumplan con los objetivos propuestos, para luego poder llevar a cabo mejoras durante el proceso de diseño e implementación, haciendo aún mas efectivo el banco de ensayo y su función.

Para la calibración y validación se busca realizar ensayos y experimentos con al menos dos hélices de distintas características para comparar sus performances a través del empuje producido y potencia requerida. Además se espera que estas pruebas permitan integrar el modo de empleo del banco, para posteriormente hacer un manual de uso del mismo.

Se espera que con el banco de ensayo, los estudiantes que cursen la asignatura para la cual fue diseñado, tengan la posibilidad de experimentar con motores electricos, visualizando como se comportan en distintas condiciones de funcionamiento y, a través de las mediciones que se recopilen, poder utilizar el pensamiento crítico y análisis para seleccionar el mas adecuado para la misión en la cual será utilizado.

CAPÍTULO 2: Concepción del banco de ensayo

El banco de ensayo tiene su origen en la necesidad de medir el empuje producido por un sistema propulsor compuesto por un motor de corriente continua (DC) y una hélice de barco. El banco también debe ser capaz de medir la potencia eléctrica de consumo, y las RPM del sistema. Los componentes y sensores necesarios serán presentados en este capítulo.

A partir del conocimiento de los componentes, es posible realizar una organización y definición de su función dentro del sistema a diseñar. Los bocetos son parte esencial de las propuestas de diseño, ya que permiten visualmente discriminar la viabilidad de un diseño y posterior a esto, un primer acercamiento al diseño que dará solución a la problemática. Para seleccionar entre propuestas de diseño se definen criterios de diseño, que, combinados, darán origen a la concepción del sistema a diseñar.

2.1 Componentes disponibles para el diseño

Se dispone de algunos componentes para el banco de ensayo. En el anexo B se presentan los componentes asignados a este proyecto y se pueden apreciar imágenes de los componentes, para facilitar su reconocimiento. La concepción del banco de ensayo se limita a estos componentes para satisfacer las funciones relacionadas con ellos.

2.2 Ideación del sistema de medición y propulsión

El sistema de medición y propulsión es independiente del diseño estructural, es decir, no lo modifican, ni la disposición, ni el montaje de este sistema en la estructura del banco. La medición de cada variable estará sujeta a los sensores disponibles.

Los componentes básicos del banco son el motor y la hélice que se ensayará en él. El nexo entre ambas es un eje sellado y estanco. En un extremo se encuentra la hélice, que estará en contacto con el agua, y en el otro, una unión cardánica unida al eje del motor, transmitiendo la energía mecánica.

El motor eléctrico de corriente continua requiere a su vez de un controlador electrónico de velocidad (ESC) que funciona con modulación de anchos de pulso (PWM) para dar la velocidad variable al motor. La modulación del motor con la ESC se realiza por medio de un microcontrolador. El microcontrolador será el medio de comunicación entre el usuario y el sistema. Todos los sensores estarán conectados a él y permitirán conocer las variables a medir. El empuje se medirá a través de

una celda de carga, ubicada de manera que el sistema propulsor transmita su fuerza a ella. Esta se conectará a un módulo amplificador para celdas de carga, que permite al microcontrolador recibir la señal de voltaje de las galgas de la celda. La corriente será medida a través de un sensor de corriente de efecto Hall, a través del cual pasará la alimentación positiva del ESC. El sensor del que se dispone debe alimentarse con 24V. Se propone utilizar un Buck boost (step up), para aumentar el voltaje de las baterías y alimentarlo. El voltaje será medido por un divisor de voltaje de la alimentación del ESC a 5 V para recibir la señal en el microcontrolador. Las RPM serán medidas con un sensor de RPM instalado en el eje sellado del sistema propulsor y permitirá medir la velocidad de rotación de este.

El sistema contará con dos modalidades de uso, seleccionables con un interruptor

- Manual, por medio de un potenciómetro
- Automático, por medio de un sistema de control de velocidad de rotación.

Todos los datos recopilados por el microcontrolador pueden ser recopilados a través de comunicación remota vía bluetooth. Esta característica permite operar el banco de ensayo y recibir datos, evitando el riesgo para los dispositivos de conectarse vía serial en lugares cercanos al agua.

Las baterías de 12 V y 5.6 Ah en serie energizan el banco completo.

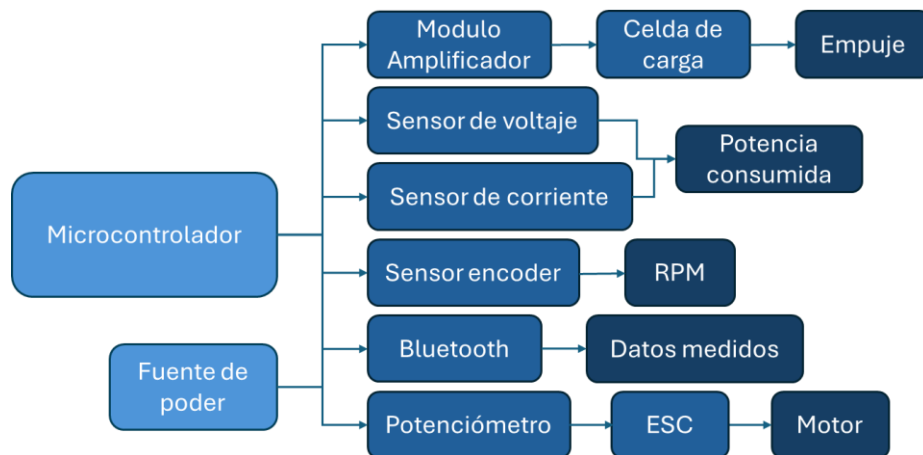


Figura 2.1: Esquema de sistema de medición y propulsión

2.3 Ideación y propuestas estructurales del banco de ensayo

El banco de ensayo operará con parte del sistema propulsor sumergido en agua. Uno de los desafíos más grandes, por ende, es el de mantener su hermeticidad y estanqueidad de lo que no está en contacto con el agua. Los sistemas electrónicos de medición se deben mantener aislados del agua.

La estructura del banco tiene su foco en la disposición fundamental de los componentes propulsores y en la medición del empuje generado, adecuadamente, a través de una correcta ubicación de la celda de carga. El sistema electrónico y los demás sensores se posicionan en la etapa de diseño y su distribución no tiene relevancia en su capacidad de medición.

2.3.1 Bocetos e ideas propuestas

Los bocetos e ideas para la estructura del banco de ensayo visualizan preliminarmente el proyecto y se basan en los requisitos previamente definidos. Conlleva a explorar diferentes opciones y soluciones para concebir eficazmente el banco de ensayo y que la propuesta seleccionada de sustento a la fase de diseño en su enfoque.

Antes de presentar y describir estas propuestas para la estructura del banco de ensayo individualmente, se presentan descripciones de elementos comunes que se conservan en todas ellas.

Los bocetos utilizan en común un espacio contenedor de agua, la estructura principal que una el sistema propulsor y la celda de carga, celda de carga y soporte, motor y soporte, eje y soporte, hélice, y la unión cardánica.

Cabe mencionar que las opciones 2 y 3 comparten con la 1 la idea de una caja contenedora y la idea de soporte de motor y eje, que se encuentran unidos a la estructura principal, y solo varía la posición de la celda de carga y soporte del contenedor del banco. El motor se une al eje con unión cardánica.

La idea de soporte de eje consiste en piezas ancladas a la estructura principal que permiten ubicar en ellas el eje, a modo de cojinete, manteniéndolo paralelo a la horizontal. El eje posee el vástago interior que rota y un recubrimiento de diámetro mayor y estático. Los cojinetes deben tener el diámetro exterior del eje para instalarlo, y el último, una reducción de diámetro en este agujero para que limite axialmente el movimiento del eje.

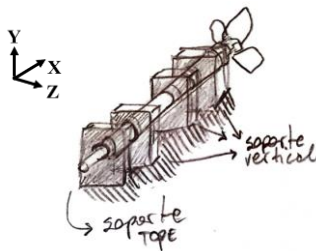


Figura 2.2: Boceto de soporte de eje

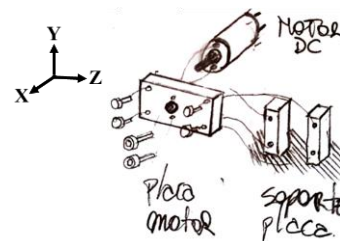


Figura 2.3: Boceto de placa motor y soporte placa

El soporte del motor se ancla también a la estructura principal. El banco de ensayo debe permitir el uso de motores DC con distintas prestaciones, tamaños y formas. Así se propone una placa personalizada a la forma de cada motor y unida a él, que permite apernarlo al soporte.

- 1) Se propone un espacio de prueba horizontal. Caja contenedora del sistema de propulsión abierta en cara superior, montada con rodamientos unidos a ella en rieles empotrados en un marco. Celda de carga montada en una estructura que soporta también el sistema propulsor. El sistema de medición y propulsión va dentro de la caja contenedora. Sección inferior hundida con la hélice en contacto con el agua. El motor se une al eje con unión cardánica.

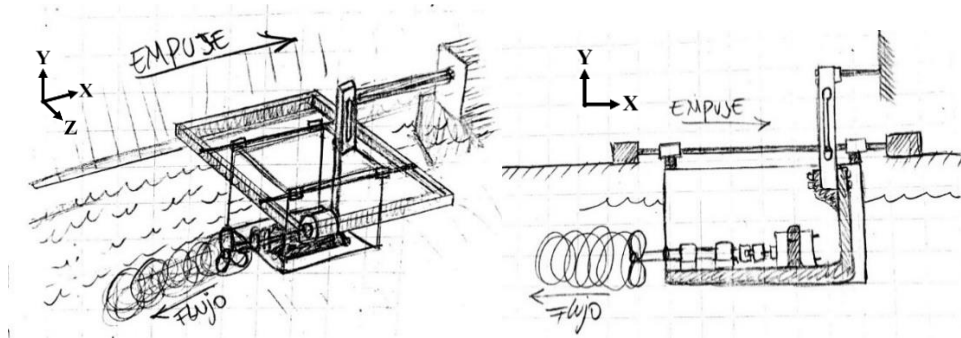


Figura 2.4: Boceto propuesta 1

El marco que alinea los rieles está fijo en el área de prueba, ya sea por medio de patas o fijaciones ajustables al suelo o a las paredes del contenedor de agua.

Ventajas:

- Los rieles permiten confinar al sistema a un movimiento lineal sin que altere la dirección de medición de la celda de carga.
- Al ser un cuerpo rígido compuesto por el sistema de propulsión, la celda de carga y la caja contenedora, el empuje generado por la hélice se transmite directamente a la celda de carga.

Desventajas:

- Una incorrecta alineación o montaje puede generar roce entre rodamientos y rieles, y afectaría las mediciones de empuje.

- 2) Se propone un espacio de prueba horizontal. Caja contenedora pende de un pivote. La celda de carga se encuentra fija en punto fijo fuera del banco de ensayo. Sección inferior hundida con la hélice en contacto con el agua. El motor se une al eje con unión cardánica. De esta manera, cuando el banco de ensayo genera empuje, el movimiento angular del banco permite accionar la celda de carga a través de extensiones de contacto entre la caja y la celda.

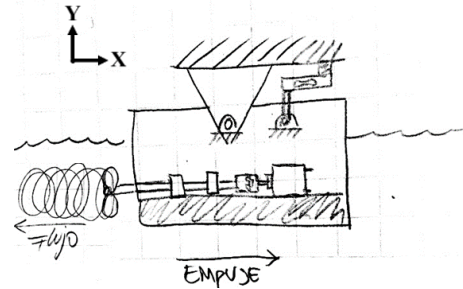


Figura 2.5: Boceto propuesta 2

Ventajas:

- Un punto de contacto único evita la necesidad alineación del banco en alguna dirección como la horizontal.

Desventajas:

- La dirección de aplicación de la fuerza, sobre la celda de carga puede variar y afectar la medición.
- Al no estar alineado horizontalmente puede generar una reflexión del flujo con el suelo.

- 3) Se propone un espacio de prueba horizontal. Caja contenedora del sistema de propulsión abierta, montada directamente sobre la celda de carga, que se encuentra fija en el otro extremo. Sección inferior hundida con la hélice en contacto con el agua. El empuje generado se transmitiría por el banco de ensayo directamente a la celda de carga. En esta idea se aprecian cojinetes para el eje y una idea de fijación para el motor, que permita la alineación de ambos.

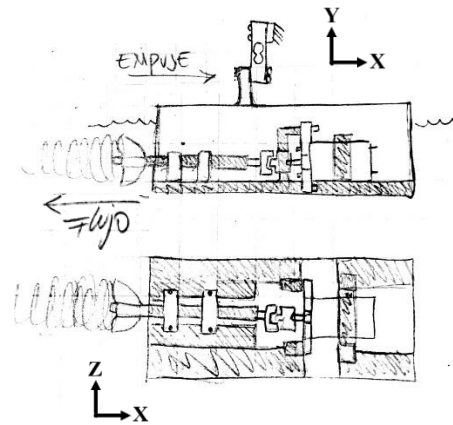


Figura 2.6: Boceto propuesta 3

Ventajas:

- Transmite directamente el empuje a la celda de carga.

Desventajas:

- La celda de carga puede recibir deformaciones, al soportar la caja, que afecten la medición.

4) Se propone un espacio de prueba vertical con columna de agua. Sistema propulsor instalado en estructura con una parte deslizante y una parte rígida, directamente sobre el espacio de prueba. Una parte del eje se encuentra en el espacio que confina el agua. Sobre la estructura y sobre las patas estabilizadoras se ubica el sistema de medición y propulsión. Se necesitan espaciadores fijos al eje que se adapten al contenedor para mantenerlo alineado. La idea supone que el eje se desplace verticalmente, a través de un rodamiento lineal, para accionar la celda de carga. El motor se une al eje con unión cardánica.

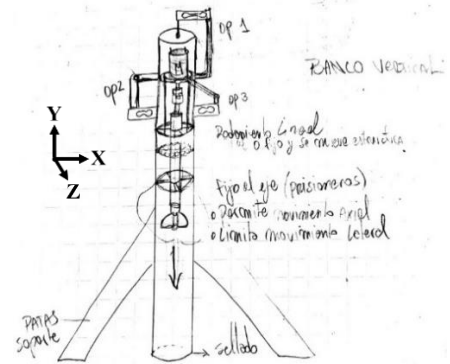


Figura 2.7: Boceto propuesta 4

En la Figura 2.7 se pueden ver tres opciones de transmisión de fuerza hacia la celda de carga. Una está alineada con el eje de rotación del sistema propulsor y a través de rieles se desplaza. Las otras dos se accionan por medio de palancas. La opción 2 requiere de fijar el punto de pivote.

Ventajas:

- No necesita de una gran extensión horizontal de agua para hacer las pruebas.

Desventajas:

- No representa la posición de funcionamiento que tendrá en los modelos a escala.
- Tiene la dificultad de estabilizar la columna de agua

2.3.2 Espacio de medición y dirección del empuje producido

Es importante que el agua impulsada por la hélice tenga el espacio suficiente para que no sea reflejada y para que el agua desplazada por la hélice sea reemplazada por más para seguir operando. Por lo que el espacio debe tener una gran cantidad de agua, y así, poder despreciar perturbaciones por reflexión del flujo en las paredes.

El espacio de uso de los buques a escala es la piscina ubicada en el foro de la Universidad de Concepción, un espacio que tiene una profundidad de agua de 200 [mm] aproximadamente. La superficie de la piscina es vasta.

Las pruebas del banco de ensayo se harán en profundidades similares en un espacio a definir. Se condiciona un largo mínimo de 2 [m] para evitar reflexión longitudinal del flujo.

Para asegurar estas condiciones, se identifican posibles los lugares o estructuras disponibles para el proyecto.

El canal abierto de cemento ubicado en un costado del LTA (Figura 2.8), y el canal estanco de modelo hidráulico de Ingeniería Civil (Figura 2.9) tienen una extensión mayor a 2 [m] y tienen más de 200 [mm] de profundidad. Se cuenta con un depósito rectangular de 1065 x 560 x 510 [mm] (Figura 2.10), que no cumple con la extensión.



Figura 2.8: Canal de cemento al costado del LTA



Figura 2.9: Canal del modelo hidráulico de Ingeniería Civil



Figura 2.10: Depósito para agua

2.4 Selección de la idea a diseñar

Por medio de las ventajas y desventajas se espera discriminar cuál propuesta es la que mejor se adapta a la problemática. Se visualiza en las propuestas 2 y 4 existen más desventajas que ventajas y en la propuesta 3 se presenta una desventaja crítica. De las propuestas concebidas se identifica la idea 1 como la más viable para diseñar, debido a que los rieles permiten una mejor transmisión del empuje hacia la celda de carga, manteniendo la dirección de aplicación de la fuerza paralela a la dirección del flujo. Además, la desventaja que se identifica es solucionable completamente.

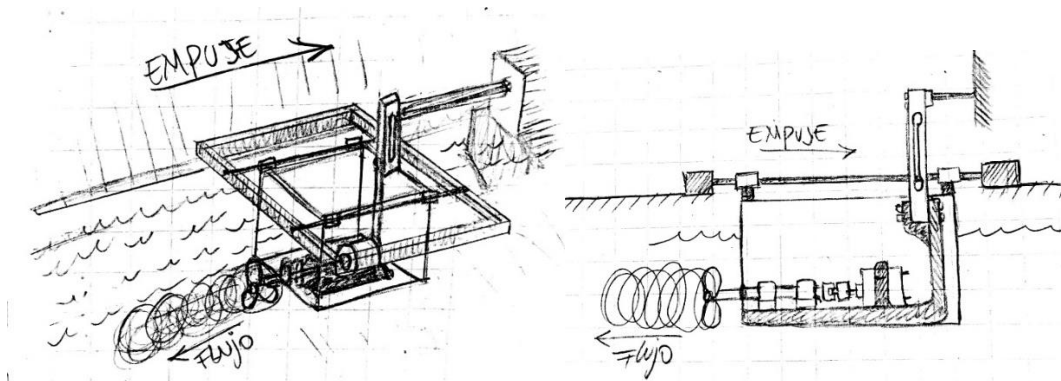


Figura 2.11: Idea a diseñar

Se establece que el espacio más adecuado para llevar a cabo la experimentación es el canal del modelo hidráulico, debido a su estanqueidad comprobada y se propone utilizar anclajes desmontables en las paredes del canal para fijar el marco con rieles.

2.5 Detalles de la propuesta de banco de ensayo concebida

Se definirán 2 secciones del banco:

- Marco de soporte con rieles (MSR)
- Base soporte propulsión y celda de carga (BSPC)

En el MSR, cuyo boceto se muestra en la Figura 2.12, se debe unir tanto a los soportes de anclaje en las paredes del canal como a los rieles que soportan la caja contenedora de la BSPC, que se presenta en la Figura 2.14. Se debe diseñar una estructura que contenga los rodamientos y los mantenga unidos a la caja contenedora, permitiendo reemplazarlos en caso de deterioro.

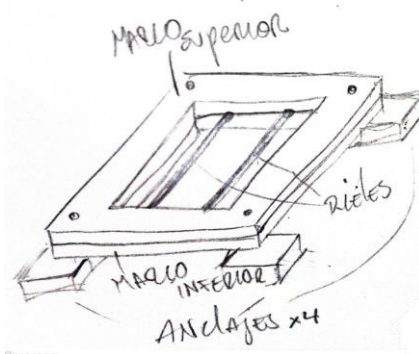


Figura 2.12: Boceto marco de soporte con rieles

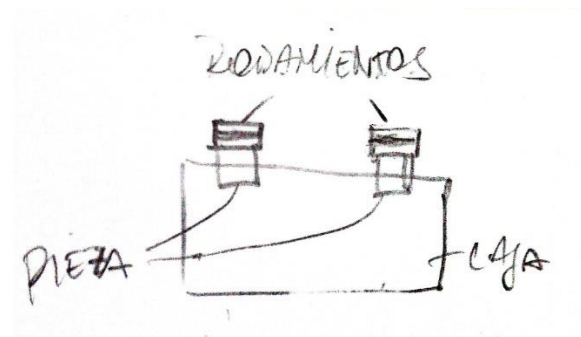


Figura 2.13: Boceto rodamientos unidos a la caja

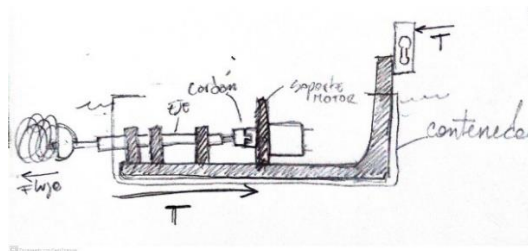


Figura 2.14: Base soporte de propulsión y celda de carga

La BSPC tiene como prioridad soportar rígidamente el eje, el motor, y la celda de carga y permitir la correcta operación de ellos, considerando el espacio restante disponible para el sistema de medición y propulsión. Corresponde a una sección ubicada al interior de la caja contenedora a la cual el eje debe atravesar, para que la hélice este en contacto con el agua, evitando que ingrese. Para ello se buscan sellos comerciales, pero no cumplen con lo necesario. Se propone diseñar un sello mecánico que no permita el ingreso de agua al banco de ensayo cuando esté sumergido. En la Figura 2.15 se observa un boceto del sello compuesto por dos piezas. Sugiere que se debe poner un O-ring en contacto con el agujero de la caja, y otro O-ring que se selle contra el eje. Los O-ring deben estar confinados en espacios para que se expandan y sellen los espacios. Se estipula que el sello se construirá con modificaciones a piezas de gasfitería de PVC.

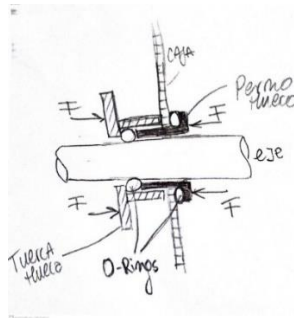


Figura 2.15: Boceto de corte longitudinal de sello estanco para el eje y la caja

CAPÍTULO 3: Diseño del banco de ensayo

Con la concepción del banco de ensayo se adquiere una línea de trabajo que permite dirigir los esfuerzos a los detalles ya identificados. Esta base de diseño permite crear sobre sí misma nuevas soluciones, incluso mejorando las ideas preliminares.

En este capítulo se diseñará la estructura y el sistema de medición y propulsión y se describirá a cabalidad el banco de ensayo, en cuanto a partes, funciones, decisiones de diseño, procesos de fabricación, etc., para posteriormente implementarlo.

3.1 Descripción y decisiones generales de diseño

El banco de ensayo es diseñado para medir empuje, voltaje, corriente y RPM de sistemas de propulsión hélice – motor intercambiables. La hélice debe estar sumergida en el agua, por lo que el eje que la conecta al motor debe estar en contacto con el agua y debe ser impermeable.

Se descubre que una caja organizadora plástica de 13 L sería una opción ventajosa como contenedor del banco, por lo simple de su adquisición. Esta caja tiene un único punto posible de filtración, que sería el agujero de salida del eje. Ese agujero es asegurado con un sello a diseñar, que, a su vez, sella el exterior del eje.

El material que se utilizará para fabricar el BSPPC será el fibropanel de densidad media (MDF), y para el MSR, se utilizará terciado estructural. El proceso de fabricación de BSPPC y MSR será realizado por medio de una fresadora de control numérico por computadora (CNC) en gran medida. Algunas piezas serán pegadas con cola fría o resina epóxica. Además, se contempla el uso de herramientas de taller como caladora, lijadora, limas, taladro y sierra de banco, etc.

Para el diseño del banco de ensayo se utilizará Fusion 360, software de diseño y manufactura asistido por computadora (CAD y CAM), como herramienta de desarrollo y producción.

Se define que las piezas del banco de ensayo deben ser desmontables o ensamblables entre ellas, para lo cual se considera la posibilidad de utilizar uniones mecánicas, adhesivas o ajuste a presión en el proceso de implementación. En la Tabla 1, se presentan las decisiones de diseño.

Tabla 1: Decisiones de diseño

| | |
|------------------------|--|
| Objetivo de diseño | Medir empuje, voltaje, corriente y RPM de sistemas de propulsión intercambiables |
| Contenedor del banco | Caja organizadora plástica 13 L |
| Material BSPC | MDF 5.5 [mm] de espesor |
| Material MSR | Terciado estructural 18 y 20 [mm] de espesor |
| Proceso de fabricación | Fresadora CNC, adhesivos, herramientas de taller. |
| Software CAD/CAM | Fusion 360 |
| Estructura | Piezas desmontables o ensamblables |

3.2 Planificación del orden de diseño

El planificar el orden en el cual se realizan acciones y decisiones en la etapa de diseño puede mejorar el resultado final, por lo que se decide definir un orden de diseño como método para cubrir las necesidades tratadas eficazmente.

Se determina que la mejor manera de empezar el diseño es realizando modelos CAD de los componentes disponibles para el proyecto, puesto que el diseño de las nuevas piezas será sustentado en sus dimensiones. Por consiguiente, es crucial para el modelado CAD basado en mediciones que estas últimas sean realizadas con la mayor exactitud posible.

Como se mencionó en el capítulo 2, el conjunto hélice – motor y la celda de carga son componentes que están ligados y deben ubicarse de manera que se puedan obtener mediciones confiables.

El diseño del BSPC incorporado en la caja contenedora comienza con el modelado de la caja. Luego se crea un ensamblaje del sistema propulsor, compuesto por hélice, eje, cardán y motor. Con respecto a este, se diseña la estructura de soporte del sistema propulsor y se explora una manera de adaptarla a la caja, y añadir la celda de carga rígidamente a ella.

Al tener estos elementos ubicados, se define todo el espacio restante como disponible para el sistema de medición y propulsión y sus componentes electrónicos que podrán ser distribuidos a continuación.

El diseño del MSR unido a la caja contenedora y considerando el anclaje a las paredes solo depende del modelo de la caja y se realiza en relación a sus dimensiones. Con el diseño completo se procede a diseñar los procesos de manufactura del banco de ensayo.

3.3 Consideraciones para manufactura

Existen piezas que se ensamblarán por presión, por lo que debe considerarse en el diseño la tolerancia que permite que sea posible que el ensamble se mantenga firme, pero sea desarmable. Por medio de pruebas de ensayo y error, mecanizando un ensamble de prueba de MDF en fresadora CNC, se define un desfase de contorno de 0.1 [mm].

Por otra parte, la fresadora CNC tiene herramientas de revolución que no pueden hacer esquinas de 90° en ranuras, en otras palabras, quedarán redondeadas y no permitirán el ingreso de la otra pieza. Es el motivo por el que se añade un arco en cada esquina según el diámetro de la herramienta que se utilizará.

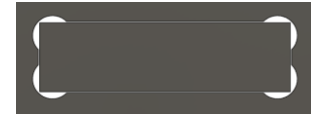


Figura 3.1: Ensamble con arcos en esquinas y desfase en contornos

3.4 Diseño de sistemas de medición y propulsión

El sistema de medición y propulsión es el encargado de recopilar datos acerca del empuje, voltaje, corriente y RPM del sistema propulsor del banco de ensayo. El diseño de conexiones es importante para la etapa de implementación, obviando la distribución específica de los componentes. A continuación, se presentan los sensores utilizados, para esquematizar luego las conexiones.

3.4.1 Fuente de alimentación

El sistema de medición es alimentado por dos baterías de plomo, de 12 [V] y 2.6 [Ah], conectadas en paralelo, manteniendo los 12 [V] de tensión, pero aumentando a 5.2 [Ah] la intensidad del circuito, y con ello, su autonomía.



Figura 3.2: Batería de 12 [V] y 2.6 [Ah]

3.4.2 Propulsión

La piedra angular del sistema de propulsión es el motor, componente que produce el torque necesario para hacer girar la hélice y producir empuje. En la Figura 3.3 a continuación se puede observar motor seleccionado para el proyecto, con una potencia nominal de 100 [W].



Figura 3.3: Motor RS-550

Es el motor el que tendrá un consumo de energía que será medido por los sensores de potencia eléctrica (voltaje y corriente).

3.4.3 Controlador electrónico de velocidad (ESC)

Debido a que el motor solo tiene la posibilidad de estar en modo encendido/apagado, se añade un ESC, el cual modula el motor a través de señales de ancho de pulso (PWM), de forma tal que es posible variar las velocidades del motor. Este elemento debe ser alimentado por 12 [V].



Figura 3.4: ESC New Rain 480A

Además, tiene una señal de control que debe ser conectada a 5 [V], GND y al pin digital 9. El motor se conecta a él, recibiendo, pulsos y energizándose. Los pulsos deben ser producidos por una fuente que, en este caso, será un microcontrolador Arduino.

3.4.4 Microcontrolador Arduino UNO R3

Este dispositivo permitirá controlar tanto la ESC como el banco de ensayo y sus sensores.

Será alimentado por la batería de 12 [V] para evitar cualquier cable de alimentación externo que pueda perturbar las mediciones de empuje.

Los sensores se alimentan de 5 [V] y GND provenientes del microcontrolador y son conectados a él por medio de cables. Los datos medidos por ellos son transmitidos a un dispositivo receptor, ya sea computador o celular, el cual puede enviar señales de vuelta para realizar acciones. Estas señales van de 0 a 5 [V].



Figura 3.5: Microcontrolador Arduino UNO R3

3.4.5 Potenciómetro

El potenciómetro fue designado para satisfacer dos misiones; variar la velocidad de rotación del motor y, al tener el cursor en un rango mínimo, ser el interruptor para activar el sistema de control de RPM. El potenciómetro se conecta a 5 [V], GND y al pin A2.



Figura 3.6: Potenciómetro

3.4.6 Celda de carga 3 kg y módulo amplificador HX711

La celda de carga es el sensor principal para el proyecto. A través de sus galgas extensiométricas, produce pequeños voltajes que son amplificados por el módulo HX711 para poder ser interpretados por el microcontrolador, y así obtener valores de empuje asociados. Ambos componentes deben estar conectados entre sí por medio de cuatro cables. El módulo se conecta a 5 [V], a GND, se conecta DT con el pin 6, y SCK, con el 7.



Figura 3.7: Celda de Carga



Figura 3.8: Módulo amplificador HX711

3.4.7 Sensor de corriente de efecto Hall

El sensor de corriente mide el campo eléctrico por medio de una bobina, a través de la cual pasa el cable de alimentación positiva de la ESC.

El sensor debe ser energizado con 24 [V]. Se conectará a las baterías de 12 [V] por medio de un buck boost (step-up).

La salida positiva va al pin A0, y la otra se conecta a GND.



Figura 3.9: Sensor de corriente de efecto Hall JXK -14

3.4.8 Buck boost (step-up)

Este componente tiene la capacidad de aumentar el voltaje de entrada. Se conecta directamente a las baterías en serie. Y en la salida, se conecta al sensor de corriente



Figura 3.10: Buck boost (step-up)

3.4.9 Divisor de voltaje

El divisor de voltaje está compuesto por dos resistencias que deberán ser conectadas en serie como se muestra en la Figura 3.11. El voltaje reducido se podrá obtener entre las dos resistencias.

El voltaje de entrada es 12 [V] y de salida se espera obtener como máximo 5 [V]. Se comprueba que la batería, al estar 100% cargada, tiene un voltaje de hasta 13 [V], por

lo que ese valor máximo será el equivalente a 5 [V]. A través de la Ecuación 1 se puede calcular la relación entre las resistencias y los voltajes de entrada y salida, y definir los valores de las resistencias.

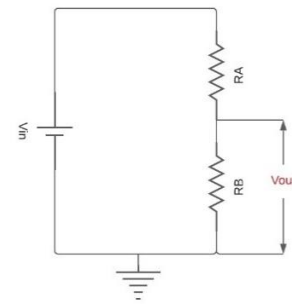


Figura 3.11: Diagrama eléctrico del divisor de voltaje.

Fuente: La Electrónica

$$V_{out} = V_{in} \frac{RB}{RA + RB} \quad (1)$$

De esta manera se determina que la resistencia A (R_A) debe ser de 12 [k Ω] y la resistencia B, 6.8 [k Ω] para obtener una salida que no exceda los 5 [V]. El pin que emite esta señal va conectado al pin A1.

3.4.10 Sensor de RPM óptico infrarrojo

El sensor detecta cuando la señal infrarroja que emite es interrumpida por el disco, de esta manera se puede estimar el tiempo que demora en dar una revolución.

El sensor de RPM se debe ubicar de tal manera que el disco esté en el centro.

Se conecta a 5 [V] y GND. La salida va al pin 2.

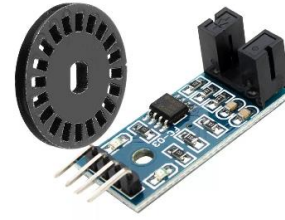


Figura 3.12: Sensor de RPM óptico infrarrojo

3.4.11 Módulo HC-05 bluetooth

El módulo de comunicación remota permite que el banco de ensayo pueda estar en el área de prueba sin ser perturbado por algún cable de conexión, comunicándose con un dispositivo que reciba y emita señales al microcontrolador vía bluetooth, como un teléfono celular.



Figura 3.13: Módulo HC-05 bluetooth

El HC-05 se conecta con TXD en el pin 10, y RXD en el 11, y se conecta a 5 [V] y GND del mismo. El pin de RXD, recepta mensajes desde Arduino, y es recomendado por el fabricante alimentarlo con 3.3 [V]. A partir de la Ecuación 1 se calcula un divisor de voltaje con RA de 1.8 [k Ω], y con RB de 1.2 [k Ω], obteniendo a la salida un valor de voltaje cercano a 3.3 [V]

3.4.12 Sistema de medición

En la Figura 3.14 se pueden apreciar las conexiones de los componentes mencionados anteriormente. La premisa de estas conexiones es ser autodestructivas y didácticas, para lo cual se eligen colores relacionados a los componentes y sus funciones como se presenta en la Tabla 2, junto al pin de conexión de cada sensor.

De esta manera, es posible que los usuarios comprendan fácilmente el sistema electrónico.

Tabla 2: Pines de conexión entre microcontrolador y componentes

| Sensor | Pines | Color |
|------------------------|-------------|----------|
| Sensor de corriente | A0 | Amarillo |
| Divisor de voltaje | A2 | Café |
| Potenciómetro | A3 | Blanco |
| Sensor de RPM | OUT → 2 | Morado |
| HX711 | DT → 6 | Gris |
| | SCK → 3 | |
| ESC | CONTROL → 9 | Blanco |
| Módulo HC-05 Bluetooth | TXD → 10 | Azul |
| | RXD → 11 | |

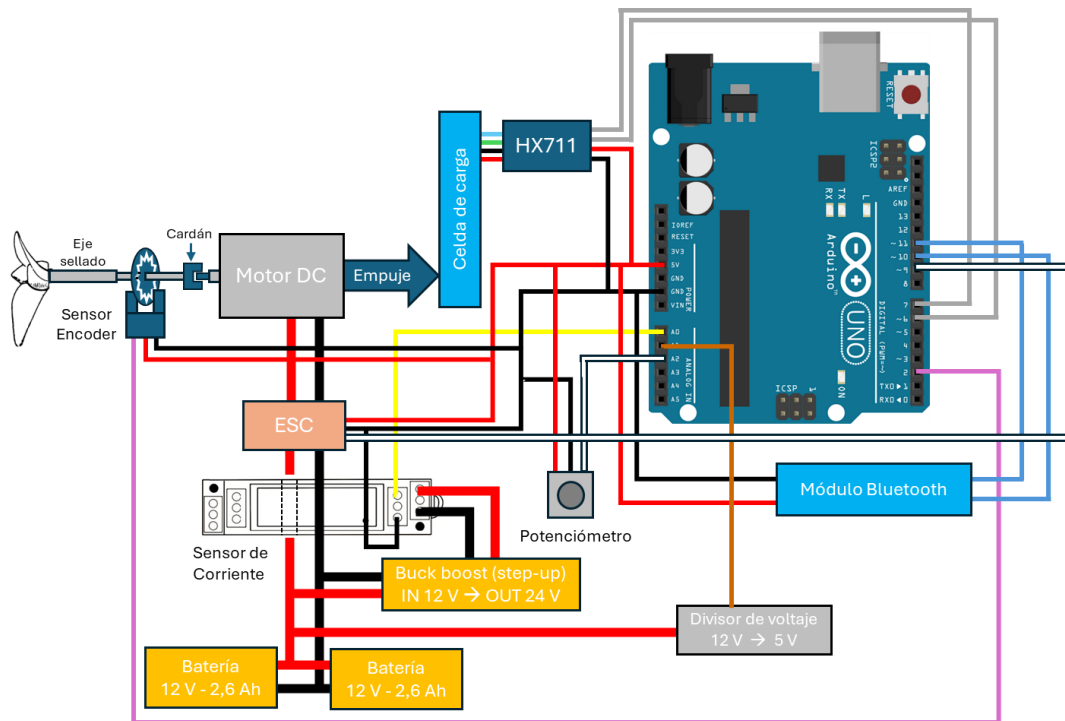


Figura 3.14: Diagrama ilustrativo de conexión del sistema de medición

Las conexiones deben complementarse con el desarrollo de un script para ejecutar y controlar el banco de ensayo, por medio del microcontrolador. Se diseña un código que se encuentra en el anexo B. Corresponde al código que ejecuta el banco de ensayo a través del módulo bluetooth.

3.5 Diseño estructural base soporte de propulsión – celda de carga (BSPC)

En esta sección se presentan y describen los modelos CAD relevantes para el diseño del banco de ensayo. A partir de la subsección 3.4.3, se encuentran los nuevos diseños a fabricar en MDF de 5.5 [mm] de espesor.

Se define que en la BSPC se tendrán 2 superficies que encajan entre sí. Una corresponde a la base soporte propulsión – celda de carga, y la otra, a la base portamotor – sistema de medición y propulsión.

3.5.1 Caja contenedora

La caja contenedora del banco de ensayo es la piedra angular del proyecto. Es el componente que debe mantener aislado del agua al sistema de medición y propulsión y propulsión y es parte de la estructura interna del banco. Se considera que existirá una base de MDF en la cara inferior interna de la caja, a la cual se añadirán otras estructuras.

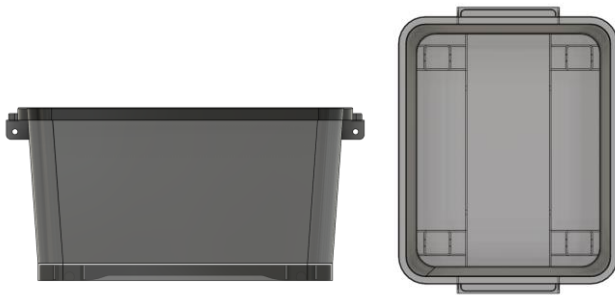


Figura 3.15: Elevación y planta de caja contenedora



Figura 3.16: Isométrico de caja contenedora

3.5.2 Sistema de propulsión

Con este ensamble, es posible diseñar la base soporte a medida del sistema de propulsión real, destacando así la importancia de modelar con medidas exactas. Está compuesto por un motor, una unión cardánica, el eje, y una hélice. Cabe mencionar que el motor, el cardán y la hélice son intercambiables. El eje será intercambiable en caso de falla, pero se considera fijo en la estructura.



Figura 3.17: Isométrico de sistema de propulsión

Se determina que, para reservar espacio para el motor, el eje sobresalga menos de la mitad de su longitud, y a una distancia de 60 [mm] de la base de la caja, para contar con espacio suficiente para un motor de $\varnothing 40$ [mm].

3.5.3 Soportes de eje

Los soportes de eje fueron creados a partir del modelo de la Figura 3.17. Su función es fijar el eje en su posición horizontal y alineado con el eje de rotación del motor. Es de esperar que el eje tenga la menor longitud posible en voladizo, por lo que se dispone tres soportes equiespaciados, aproximadamente desde la mitad del eje, en dirección contraria a la hélice, y uno en un extremo del eje, como se observa en la

Figura 3.21. Se añade un travesaño a través de los soportes para rigidizar su ensamble con el eje.



Figura 3.18: Elevación de soporte de eje

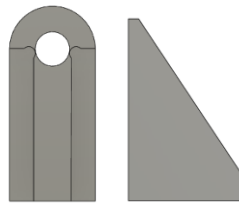


Figura 3.19: Elevación de soporte de eje tope y escuadra



Figura 3.20: Isométrico de soporte de eje tope ensamblado

Justo a continuación del soporte del extremo, se ubica el soporte tope de la Figura 3.20, que tiene un diámetro interior menor a los demás soportes, limitando el paso del diámetro exterior, pero permitiendo el del interior. Las escuadras que posee lo ayudan a soportar las fuerzas axiales producidas por el sistema de propulsión. Su altura es la del eje de aplicación de la fuerza con respecto a la base que sostiene los soportes. El soporte tope debe unirse adhesivamente a las escuadras y al soporte del extremo. Y es ensamblado en la base a diseñar.

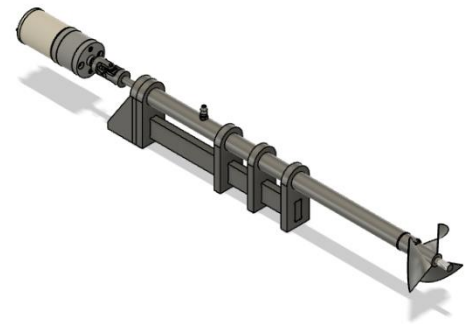


Figura 3.21: Isométrico de soportes eje y travesaño ensamblado

3.5.4 Soporte de celda de carga

La altura de la caja limita a posicionar la zona de medición de la celda sobre ella. Para esto se diseña una estructura con agujeros a altura suficiente para fijar la celda sobre la caja. Se trata de dos arcos (Figura 3.22), cuya forma inferior permite obtener espacio detrás del motor para su manipulación. Los radios añadidos en el interior del arco evitan concentradores de esfuerzo. Uno de los arcos tiene ranuras para posicionar escuadras (Figura 3.23), y el otro es un refuerzo del anterior y va unido adhesivamente a él.

Las dos escuadras que se incluyen tienen la función de resistir la fuerza de reacción de la celda de carga a la superficie fija que la detiene, y se posiciona de modo que su altura coincide con la zona de unión de la celda con los soportes de la celda.

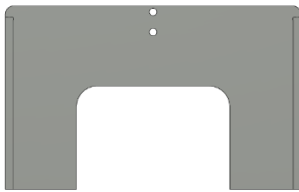


Figura 3.22: Elevación de soporte de celda de carga con ranuras para escuadra

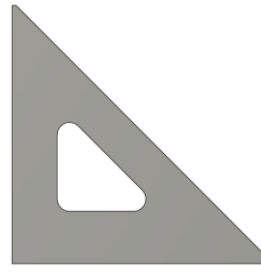


Figura 3.23: Elevación de escuadra

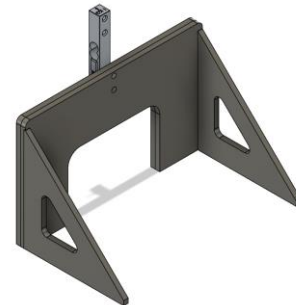


Figura 3.24: Isométrico de soporte de celda de carga ensamblado

Se deben unir adhesivamente las escuadras al soporte con ranura, y este último a su refuerzo, para ensamblarlo en la base a diseñar.

3.5.5 Extensión de la celda de carga

Para que la celda de carga pueda tener contacto con una superficie fija, se utiliza una extensión apernada a ella.

La extensión está compuesta por dos soportes iguales, unidos por unión apernada a la celda, y una viga que se introduce a presión en el agujero superior de los soportes.

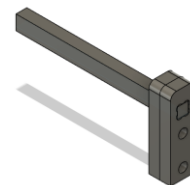


Figura 3.25: Isométrico de extensión de la celda de carga

3.5.6 Base soporte propulsión – celda de carga

Es el cuerpo que une estructuralmente la celda de carga con el sistema de propulsión. Posee ranuras para ensamble por presión de los soportes del eje y para el soporte de la celda de carga, y agujeros avellanados para ocho pernos M3 distribuidos, como se evidencia en la Figura 3.26.

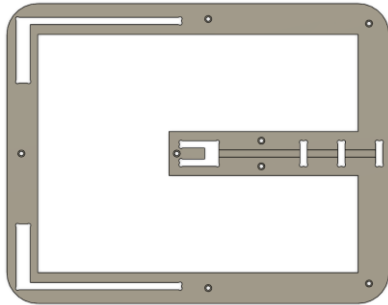


Figura 3.26: Planta de base de propulsión

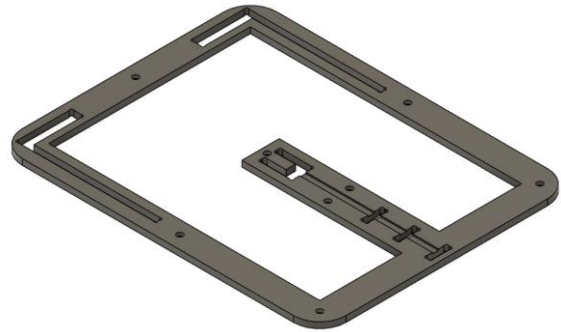


Figura 3.27: Isométrico base de propulsión

La base soporte propulsión – celda de carga es desmontable al retirar los pernos, pero solo en caso de reemplazo de estructuras o reparaciones. El conjunto propulsión – celda de carga se mantendrá fijo en la caja contenedora

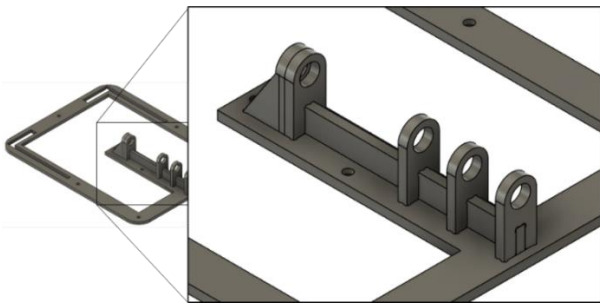


Figura 3.28: Isométrico zoom de ensamble soportes eje - travesaño - base soporte propulsión

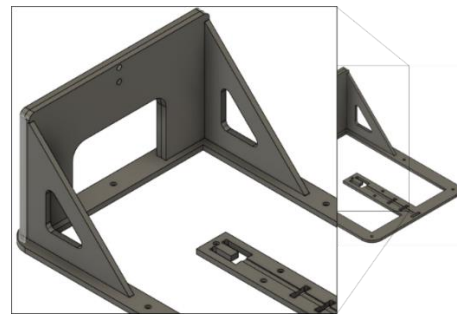


Figura 3.29: Isométrico zoom ensamble soporte de celda de carga - base soporte de propulsión

3.5.7 Base principal

Esta base posee agujeros, concéntricos a los de la base de propulsión, para los pernos M3 y posee avellanados para tuercas araña M3, para unir con base soporte propulsión.

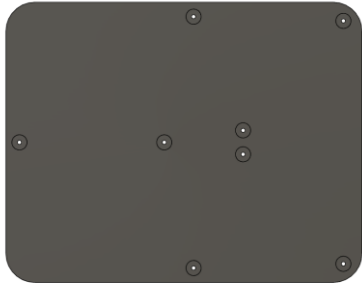


Figura 3.30: Planta de base principal

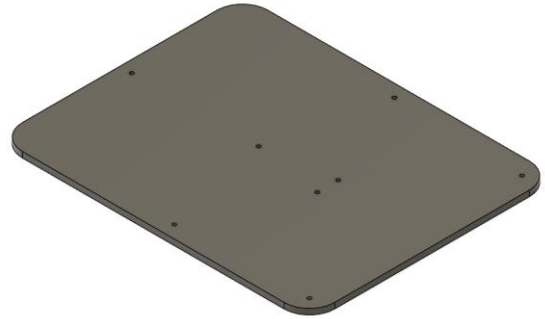


Figura 3.31: Isométrico base principal

Se ubica en contacto directo con la cara inferior interna de la caja, ya que tiene su forma, con un pequeño desfase de contorno negativo, y será unida adhesivamente a ella. De esta manera, la base soporte de propulsión podrá apertarse y retirarse de la estructura.

3.5.8 Ensamble base soporte de propulsión – celda de carga

En la Figura 3.32 se puede apreciar un ensamble de las piezas de la base soporte de propulsión – celda de carga, presentadas desde la subsección 3.5.1 a la 3.5.7. En la zona que se encuentra bajo el nivel de la base soporte de propulsión se ubicará una segunda base que contendrá los soportes del motor y los demás sistemas de medición.

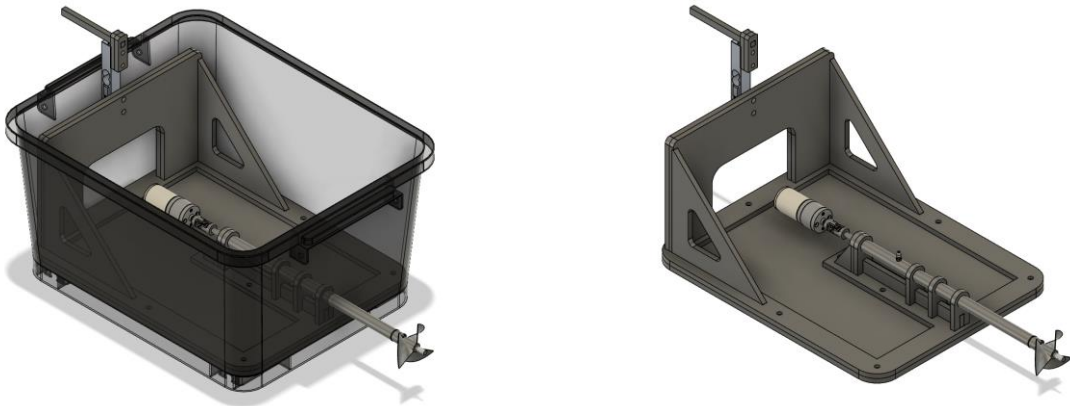


Figura 3.32: Isométrico base soporte de propulsión – celda de carga ensamblado con y sin caja

3.5.9 Soporte de placa y placa motor

Como en el boceto de los soportes de placa y de motor de la Figura 2.3, se diseñan, una plantilla de placa para motor que debe ser modificada según el motor ensayado, y un soporte para la placa, con escuadras que contendrán el momento generado por el motor en el soporte.

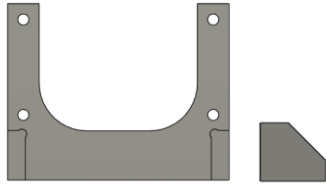


Figura 3.33: Elevación de soporte de placa y escuadra

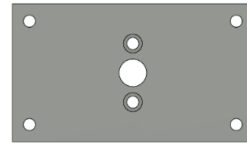


Figura 3.34: Elevación de placa motor

El soporte del motor tiene cuatro agujeros que permitirán fijar la placa motor. Cuenta con las ranuras para las escuadras, las que además fueron diseñadas con una cara extendida que permite apoyar la placa del motor al momento de apertarla a la base. La placa del motor tiene dos agujeros concéntricos con los agujeros de anclaje del motor, con un avellanado en la placa para la cabeza del perno que corresponda al motor. Las escuadras deben ir unidas adhesivamente con el soporte de placa, la placa se sostendrá al soporte con cuatro pernos y tuercas M3. Y todo esto irá unido a la base portamotor. Las escuadras deben ir unidas adhesivamente con el soporte de placa, la placa se sostendrá al soporte con cuatro pernos y tuercas M3. Y todo esto irá unido a la base portamotor.

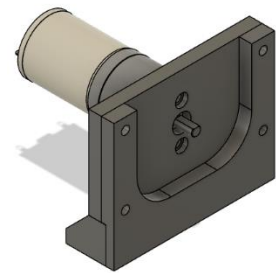


Figura 3.35: Isométrico soporte motor escuadras y placa motor ensamblados

3.5.10 Soporte de sensor de RPM

El sensor de RPM debe ubicarse cerca de la zona del eje contraria a la hélice, puesto que en ese lugar se instalará la rueda que permite su funcionamiento. Así, se diseña la pieza de la Figura 3.36 y se añade a la base portamotor a diseñar.

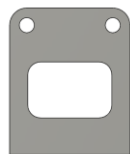


Figura 3.36: Elevación de soporte de sensor de RPM

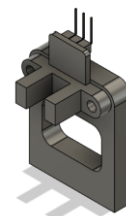


Figura 3.37: Soporte ensamblado con sensor de rpm

3.5.11 Repisa para electrónica del sistema de medición y propulsión

Para poder organizar y tener mejor acceso a componentes como el microcontrolador, se diseña una repisa ensamblable para la base portamotor, con un barandal para confinar los componentes.



Figura 3.38: Vista inferior de repisa

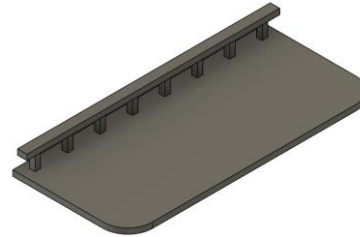


Figura 3.39: Isométrico de repisa y baranda

La repisa va unida a la base portamotor por medio de dos patas laterales (Figura 3.40) y una central (Figura 3.42). Las patas van unidas a presión al igual, que la baranda. Se define que todas las placas electrónicas, como Arduino y módulos, van en la repisa, y el sensor de corriente y ESC, en la sobrebase C. Las baterías igual se ubican abajo, entre los esquineros.

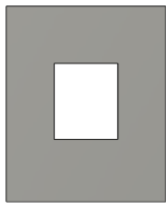


Figura 3.40: Elevación de pata lateral repisa

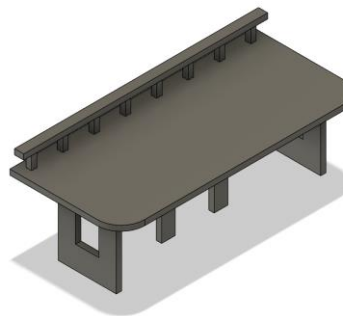


Figura 3.41: Isométrico de repisa y patas ensamblados

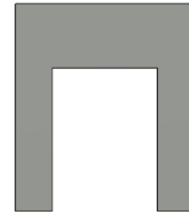


Figura 3.42: Elevación de pata central repisa

3.5.12 Esquineros para baterías

Se idean esquineros con dos triángulos ensamblables para confinar las baterías en el lugar que se le designe. Se ubicarán en ranuras en la base portamotor e irán unidas adhesivamente.



Figura 3.43: Elevación de esquinero A y B

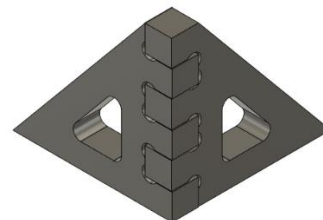


Figura 3.44: Isométrico de esquinero batería ensamblado

3.5.13 Base C portamotor y sobrebase C

Para contener los elementos desde la subsección 3.5.9 a la 3.5.12 se diseñan dos superficies.

La base C portamotor (Figura 3.45) tiene como propósito albergar el soporte de placa de motor en su centro. Su propósito es encajar con la base soporte de propulsión. Tiene, además, dos ranuras para la repisa, y cuatro agujeros con ranura para tuerca araña y perno con ojo M6. Esto corresponde a un modo de alzar esta base para retirarla de su posición de encaje. Sobre esta base va unida adhesivamente la sobrebase C (Figura 3.46) que se trata de una extensión de la base C, para aumentar su altura y su superficie cubierta. De esta manera, en caso de tener filtraciones, el nivel de agua debe aumentar más de 15 mm para que llegue agua a los componentes electrónicos.

En la sobrebase C se ubicarán los sistemas de medición, ESC, los esquineros y las baterías, la repisa y el soporte del sensor de RPM. A través de los cuatro agujeros concéntricos los cuatro de la base C, pasa un perno con ojo para engancharlo y retirar el conjunto. En la Figura 3.47 se puede observar las dos superficies adheridas y sobre las cuales se encontrarán las superficies presentadas anteriormente.

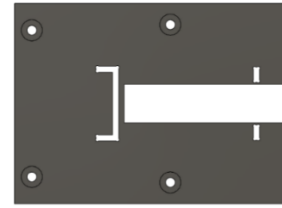


Figura 3.45: Vista inferior de base C portamotor

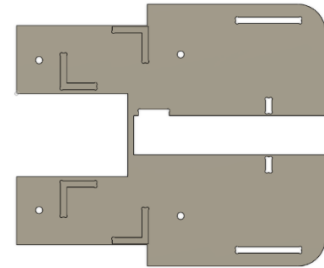


Figura 3.46: Planta de sobrebase C

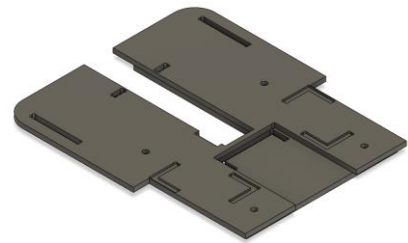


Figura 3.47: Isométrico de base C portamotor pegado a sobrebase C

3.5.14 Ensamble base portamotor y sistema de medición y propulsión

Las superficies presentadas entre las subsecciones 3.5.9 y 3.5.13, se encuentran ensambladas en la Figura 3.48. Este conjunto se ensambla sobre la base soporte de propulsión

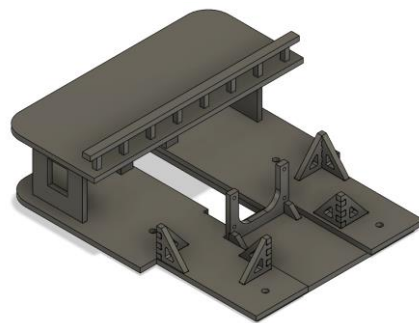


Figura 3.48: Isométrico de base portamotor y sistema de medición y propulsión ensamblado

3.5.15 Ensamble base soporte propulsión – celda de carga y base portamotor – sistema de medición y propulsión.

La Figura 3.49 expone un ensamble de las dos partes que componen la definida BSCP, incluyendo sus sensores.

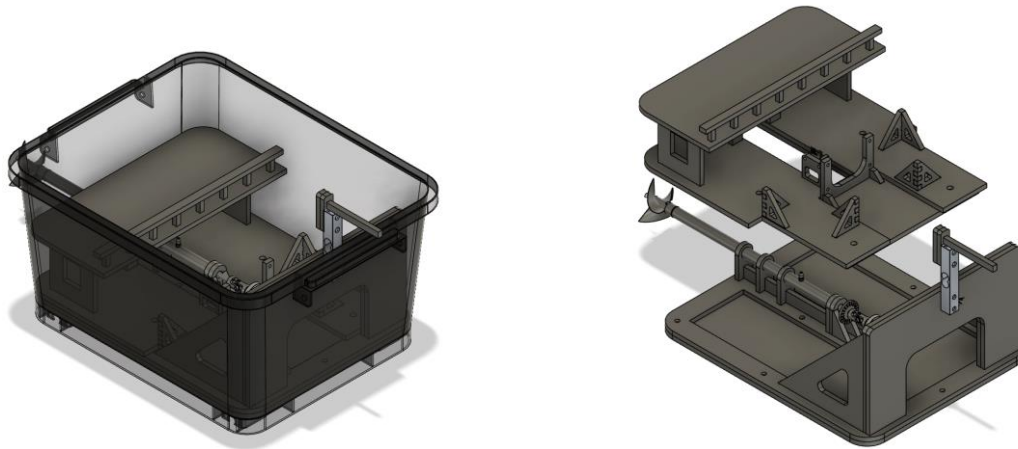


Figura 3.49: Isométrico de base soporte propulsión – celda de carga y base portamotor – sistema de medición y propulsión ensamblados con y sin caja

3.6 Diseño estructural marco de soporte con rieles (MSR)

Con la BSCP diseñada, se debe disponer de una estructura capaz de sostenerla sobre el agua mientras flota, pero con la hélice bajo el agua a la profundidad adecuada. Se deben ubicar los rieles, a través de los que deslizarán rodamientos lineales unidos a la caja con la BSCP. A continuación, se presentan las piezas que permiten esta acción.

3.6.1 Soportes laterales

Son dos estructuras idénticas que encajan en ambos extremos de la caja. Su función es levantar la caja firmemente de las extensiones laterales que esta posee.

Los soportes laterales permiten la instalación de dos rodamientos, que se fijan con pernos y tuercas como se observa en el zoom de la Figura 3.50. Se añaden dos ranuras cuadradas para los espaciadores de aluminio de la subsección siguiente. Existe un agujero con ranura para tuerca araña y perno M8.



Figura 3.50: Elevación de soporte lateral y zoom de fijación de rodamiento

3.6.2 Espaciadores de soporte

Los soportes laterales se unen por medio de estos espaciadores. Son perfiles de aluminio que para poder cumplir su función deben ser rellenos para ser atornillados y fijados al soporte.

Son dos espaciadores, uno por lado de la caja, soportando los bordes en contacto con su superficie, que está alineada a la superficie de contacto de los bordes en los soportes laterales.

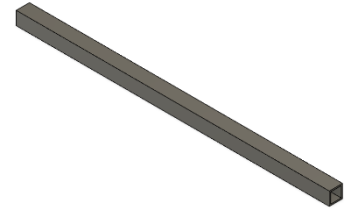


Figura 3.51: Isométrico de espaciadores de soportes laterales

3.6.3 Ensamble soporte de caja

En la Figura 3.52 se observa el ensamble del soporte de la caja.

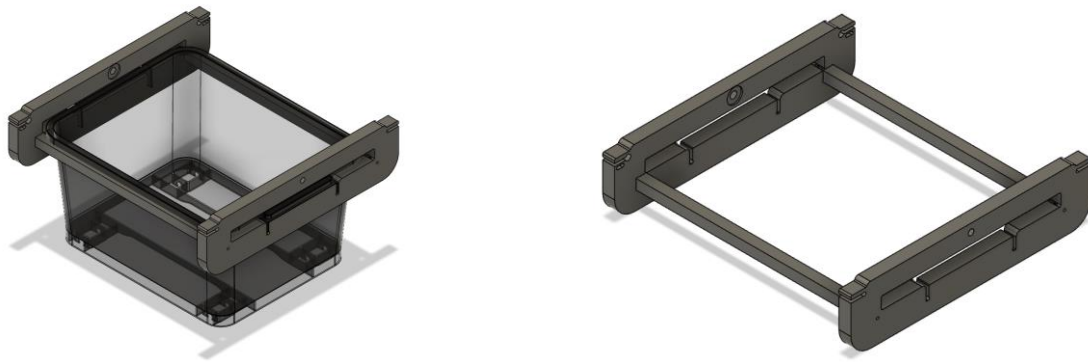


Figura 3.52: Isométrico de soporte de caja con y sin caja

3.6.4 Marco inferior

Esta pieza es la estructura fija respecto a la cual el banco de ensayo tendrá movimiento relativo. Sobre ella, en ranuras, se ubican los rieles que guían al banco. Los rieles disponibles se utilizarán en su longitud completa.

Es por eso que, como se puede ver en la Figura 3.53, se han añadido en la zona media extensiones para proporcionar un punto de apoyo adicional para los rieles.

Tiene una ranura por la que atravesará el perno para fijar el soporte al marco, situación que se explicará en la sección 3.7.

Tiene catorce agujeros pasantes para perno M3 para los puentes y cuatro para M6 para anclar el marco a las paredes del canal de agua.

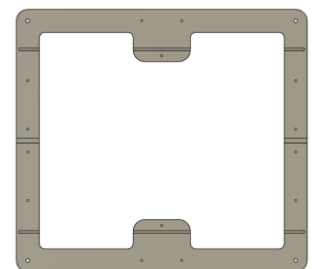


Figura 3.53: Planta de marco inferior

3.6.5 Puentes

Los puentes son proyecciones del marco inferior que conservan los agujeros y ranuras para rieles y perno de fijación. Los puentes son fijados al marco inferior con catorce pernos y tuercas en los agujeros concéntricos, confinando los rieles entre ambos.



Figura 3.54: Planta de puente lateral



Figura 3.55: Planta de puente central

3.6.6 Rieles

Los rieles permitirán el deslizamiento de cuatro rodamientos. Los rieles disponibles se utilizan en su longitud total, instalándose entre el marco y los puentes.

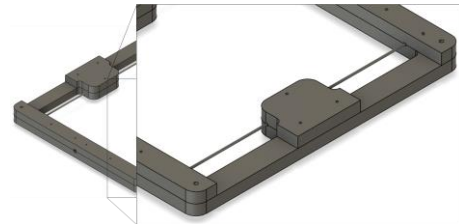


Figura 3.56: Isométrico zoom de rieles instalados en el marco de soporte

3.6.7 Anclaje

El marco debe ser anclado a la pared del canal, por lo que se designa una pieza con dos agujeros en direcciones perpendiculares. Uno se fija a la pared con un perno y un taco de anclaje de $\frac{3}{4}$ " inserto en ella. En el otro se fija un perno M6 en el soporte de anclaje. Esta pieza estará posicionada de manera que sus cuatro pernos M6 se puede encajar en las cuatro esquinas del marco, como se ve en la imagen



Figura 3.57: Isométrico de soporte de anclaje

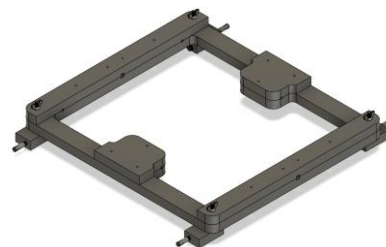


Figura 3.58: Isométrico de marco montado en las cuatro piezas de anclaje

3.7 Ensamble caja contenedora y MSR

Para ensamblar se deben instalar los rodamientos en los soportes laterales, luego juntarlos por medio de los espaciadores de aluminio. Los rodamientos deben ubicarse en los rieles, deslizándolos. Luego se enroscan los pernos con las tuercas M3 para asegurar los rieles.

Se añaden fijaciones en el soporte lateral para unir con el marco con un perno y tuerca araña M8. Su función es levantar el banco con el marco sin que los rieles reciban todo el peso. Se debe añadir un espaciador entre el soporte y el marco, con un agujero para M8 para que se presione al roscar el perno.

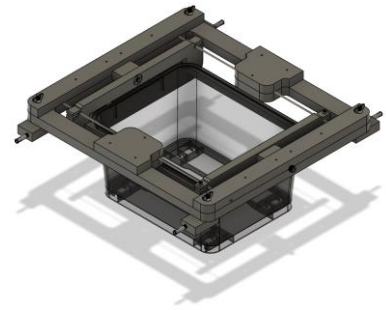


Figura 3.59: Isométrico ensamble de caja contenedora con MSR

3.8 Diseño sello estanco

El sello estanco corresponde a una pieza fundamental para el funcionamiento del banco, ya que debe ser capaz de separar el entorno acuático del interior de la caja contenedora.

Al analizar los materiales disponibles en el mercado, se llegó al fitting de PVC. Es un material relativamente fácil de modificar y hay piezas con rosca interna y externa.

La idea propuesta de sello requiere de ajustes y modificaciones personalizadas de estas piezas, y tienen que ver con el apriete adecuado que permita que los O-rings, internos y externos, sellen eficazmente entre la caja y el sello, y entre el sello y el eje. El diseño se basa en la Figura 2.15. Será descrito el proceso de fabricación del sello y la idea general.



Figura 3.60: Ajuste neolite



Figura 3.61: O-ring



Figura 3.62: Niple PVC



Figura 3.63: Terminal PVC

La ubicación de los sellos permite hermetizar la caja. El O-ring de 22 [mm], va alrededor del niple de $\frac{3}{4}$ " y es presionado por el terminal cuando se enroscan. Al terminal se le realizará una ranura en la cara de ingreso a la rosca para que confine el sello. Los O-ring de 12 [mm] y el ajuste de neolite, encajan ajustados en el eje. Se monta en el eje primero un O-ring, luego un ajuste de neolite y un O-ring al final. Se necesita de un espacio que los confine para que, con presión, los sellos puedan expandirse. Se creará un buje para presionarlos a partir del niple de $\frac{1}{2}$ ", borrando la rosca con torno y

cortando por la mitad como muestra la Figura 3.64. Cabe señalar que el niple de $\frac{1}{2}$ " , en su diámetro máximo, coincide con el diámetro interior del niple de $\frac{3}{4}$ " , y este último es roscable en el terminal. El niple de $\frac{3}{4}$ " se cortará, igualmente, por la mitad, pero conservará su rosca. En el extremo cortado, se deberá reducir el diámetro interno de la pieza, como en la Figura 3.66, para que limite axialmente los sellos instalados en el eje al ser presionados por el buje. El terminal se utilizará sin modificar.

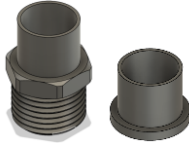


Figura 3.64: Mecanizado de niple de $\frac{1}{2}$ "



Figura 3.65: Despiece de sello estanco para la salida del eje a través de la caja

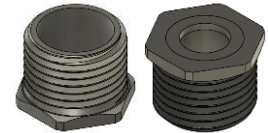


Figura 3.66: Corte y aumento de diámetro interno de niple de $\frac{3}{4}$ "

3.9 Canal del modelo hidráulico de Ingeniería Civil

Como se definió anteriormente, la profundidad de operación es alrededor de 200 [mm] y el canal puede cubrir esta demanda. Por conveniencia del diseño, se establece que la profundidad máxima a la que se puede sumergir el banco, desde su base, sin sumergir el soporte lateral de la caja, es 120 [mm]. Con esto, la hélice queda alrededor de 60 [mm] de la superficie. El banco se debe instalar entre los dos agujeros que están más cercanos al desagüe por medio de anclajes (subsección 3.6.7) a 185 [mm] del fondo del canal. El nivel del agua debe ser cercano a 170 [mm].

De esta manera, existen 40 [mm] entre el fondo y la base de la caja.

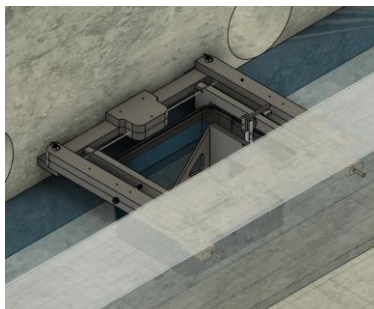


Figura 3.67: Isométrico de banco de ensayo instalado en canal de agua

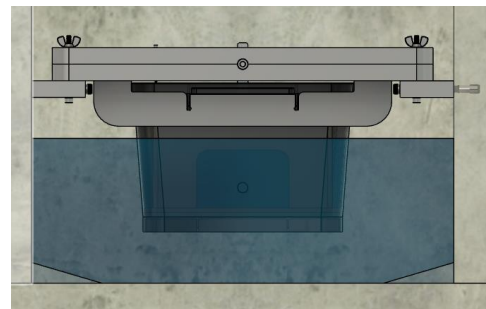


Figura 3.68: Elevación de banco de ensayo instalado en canal de agua

3.10 Consideraciones de uso

El banco de ensayo, al momento de operar, debe tener todo instalado y ajustado en su sitio. El programa cargado en el microcontrolador. Todo energizado por las baterías.

La fuerza de flotación debe actuar uniformemente sobre el banco, que además debe estar al nivel de los rieles del anclaje para evitar que la fricción en los rodamientos perturbe las mediciones. Se propone añadir lastre para hundir la caja al nivel requerido.

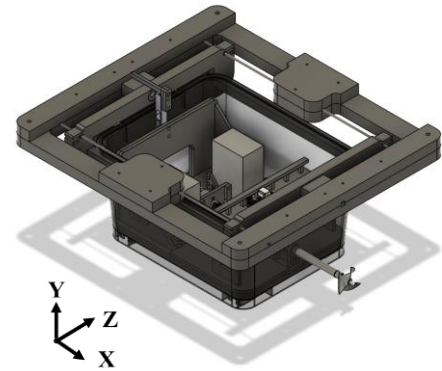


Figura 3.69: Isométrico del banco de ensayo

3.11 Diseño del proceso de fabricación del banco de ensayo

El banco de ensayo tiene una importante cantidad de piezas que han de ser mecanizadas en MDF y terciado estructural. Se desarrollan códigos .g en el módulo de Manufactura de Fusion 360, configurando los modelos y el material disponible, y diseñando el orden de operación de cada modelo de fabricación. Las operaciones de mecanizado de las piezas diseñadas fueron procesadas y guardadas en un dispositivo de almacenamiento para luego ejecutarlas en la máquina CNC.

Los planos de fabricación se encuentran en el anexo F.

CAPÍTULO 4: Implementación del banco de ensayo

En este capítulo se aborda el proceso de fabricación y calibración del banco de ensayo. Se presentan las dificultades acontecidas durante el curso de la manufactura, instalación y testeo, y sus respectivas resoluciones.

4.1 Fresado CNC

La mayoría de las piezas diseñadas para el proyecto requieren de un mecanizado CNC, según fueron diseñadas. Se utilizan los diseño CAD de las piezas del Capítulo 3 para producir códigos .g para maquinas CNC. Los códigos contemplan una sucesión de operaciones de mecanizado, como taladrado y fresado, para dar forma a cada pieza.

Los códigos .g se abren en el programa maestro de la maquina CNC. Se instalan las herramientas y el material en la zona de trabajo y se ejecutan los códigos.



Figura 4.1: Mecanizado de piezas del BSPC



Figura 4.2: Mecanizado de piezas del MSR

4.2 Imprimación de MDF con sellante

Se realiza una imprimación de cada una de las piezas con un sellante de nombre comercial “Cerestain” para proteger los materiales, MDF y terciado estructural, de la humedad.

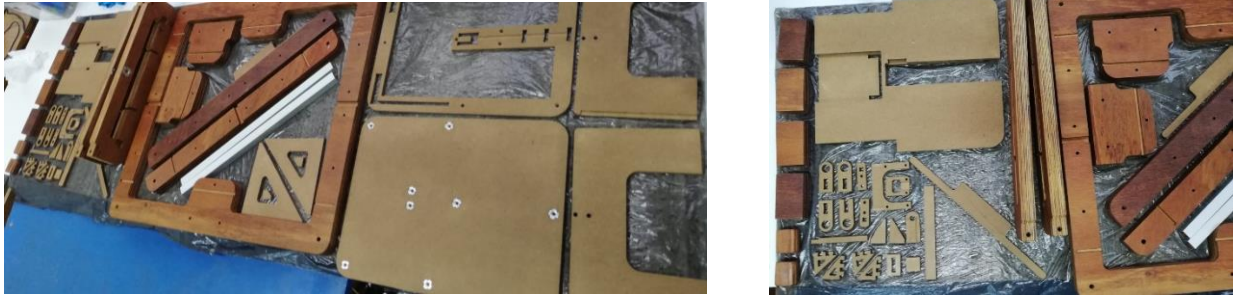


Figura 4.3: Piezas imprimadas con sellante

4.3 Ensamblaje del banco de ensayo

4.3.1 Ensamblaje estructural

El montaje estructural consiste en ensamblar las piezas a presión, y unir, mecánica y adhesivamente, las que lo requieran, de la manera en que se presenta en el Capítulo 3.

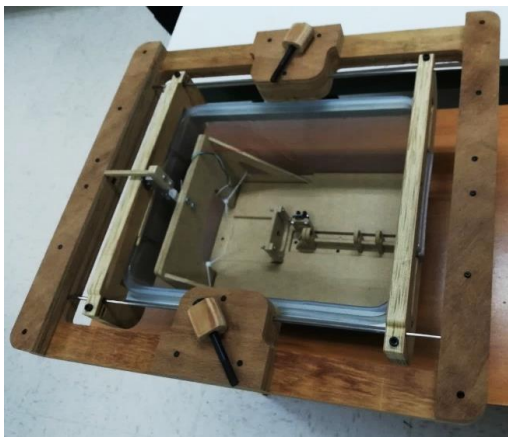


Figura 4.4: Banco de ensayo montado

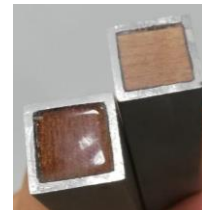


Figura 4.5: Espaciadores rellenos con terciado

Los espaciadores de aluminio son rellenos con un trozo de terciado estructural y adheridos con resina epóxica. Además, se añaden las tuercas araña en sus sitios correspondientes.

4.3.2 Instalación de componentes electrónicos

Durante la implementación electrónica y la creación del código .ino para el microcontrolador se realizaron pruebas de todos sus componentes individualmente, pero se identificó que al integrarlos todos se provocaba interferencia entre el módulo bluetooth y el ESC, por lo que se incorpora un módulo PCA 9685 conectado a esta última, cuya función es generar pulsos de forma independiente a Arduino y permitir que todo funcione en conjunto. Se implementa un shield (Figura 4.6) para conectar el sistema al microcontrolador sin modificarlo, y posee los colores que representan a cada subsistema.

Se perforó la repisa para ubicar los componentes en sus sitios y se incorporaron conectores polarizados, para asegurar su correcta conexión (Figura 4.7). Con ellos es posible remover el shield en caso de modificar las conexiones. Además, se puede extraer completamente la repisa de la sobrebase C. La ESC y el sensor de corriente están fijados a la sobrebase C por unión adhesiva y apornada, respectivamente, como se observa en la Figura 4.8. El motor a utilizar es el RS-550.

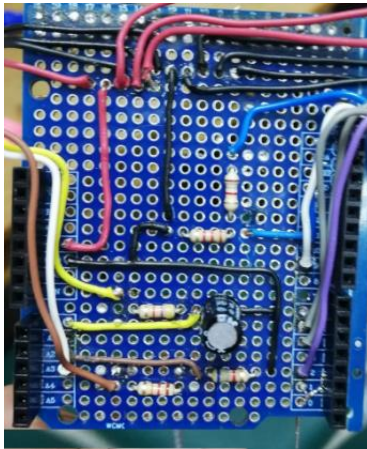


Figura 4.6: Shield de conexiones para Arduino

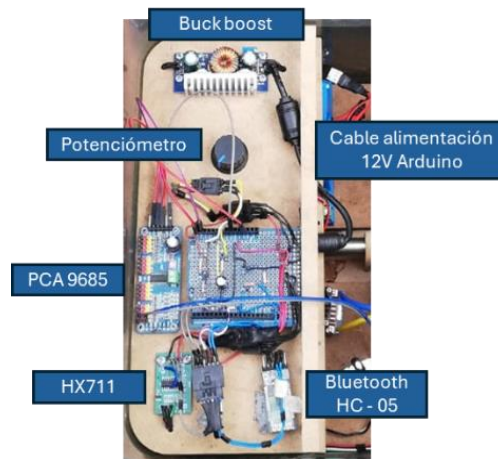


Figura 4.7: Distribución de componentes electrónicos en repisa



Figura 4.8: Bases ensambladas y componentes electrónicos

Las entradas del divisor de voltaje, del buck boost y del cable de alimentación de Arduino de 12 [V] se conectan directamente de las baterías en paralelo, las cuales a su vez están conectadas a través del sensor de corriente, en dirección a la ESC, y esta última se encuentra conectada al motor.

En las siguientes pruebas de funcionamiento, se identificó que la celda de carga instalada en el soporte de celda no entregaba mediciones estables, debido a que tanto la extensión de la celda y el soporte, como la celda de carga, actuaban como resortes en serie y producían fluctuaciones importantes en la medición. Como solución, se eliminó este soporte y la extensión de celda y se instaló la celda directamente en el soporte lateral de la caja a través de pernos, y se incorporó un perno modificado, adelgazado en la punta, que pasa a través del soporte lateral para cargar la celda entre los agujeros superiores de esta. Al tratarse de una estructura más rígida que la anterior, se estabilizaron las mediciones.



Figura 4.9: Celda en soporte lateral y perno de carga

4.4 Montaje en el canal de pruebas

El montaje en el canal de pruebas consiste en perforar las paredes e instalar los tacos de anclaje, en los que irán apernados los soportes del MSR. Esta instalación es desmontable.



Figura 4.10: Soportes de anclaje instalados en la pared del canal

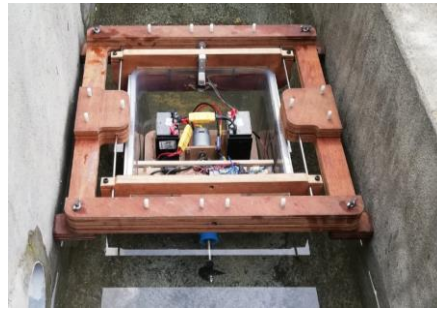
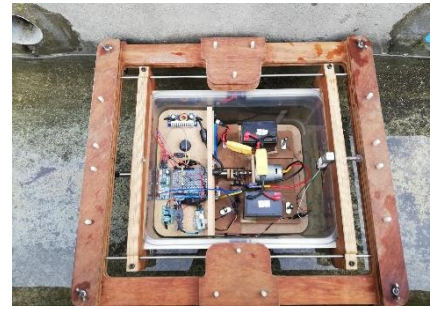


Figura 4.11: Banco de ensayo instalado en el canal



Se define que el banco de ensayo estará sumergido 120 [mm] considerando una distancia de 40 [mm] desde el fondo hasta la base de la caja. En consecuencia, los tacos de anclaje se instalan a 225 [mm] del fondo del canal y la profundidad del agua en el canal debe estar alrededor de los 165 [mm].

4.5 Flotación, nivelación y estabilidad del banco de ensayo

El banco debe flotar horizontalmente, estable y nivelado, para que los rodamientos de los soportes reciban la menor cantidad de roce. Se realiza un análisis de flotación y estabilidad, incluyendo la determinación del peso y ubicación de lastre para ajustar la inmersión en el agua, la altura del centro de gravedad del banco experimentalmente y los puntos que condicionan la estabilidad.

4.5.1 Flotación del banco de ensayo

El principio de Arquímedes establece que un cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza de flotación igual al peso del fluido desplazado [7]. Cuando el peso del objeto es igual a la fuerza de flotación, el cuerpo está en equilibrio de flotación. El banco de ensayo sin el marco tiene una masa de 5.1 [kg], y la caja contenedora tiene un volumen interior total de 13 [L]. Por medio del modelo CAD se determina que el volumen sumergido del banco a la profundidad establecida es de aproximadamente 8.2 [L]. Considerando una densidad del agua de 1 [kg/L], el banco debe tener una masa total de 8,2 [kg]. De este modo, se necesitarían aproximadamente 3 [kg] de lastre para llegar al nivel de profundidad.

4.5.2 Estabilidad de un cuerpo flotante

La estabilidad de un cuerpo flotante corresponde a la capacidad para volver a su posición original luego de ser perturbado en un eje horizontal. Existen tres puntos clave para comprobar la estabilidad; el centro de gravedad (G), donde se concentra la masa del cuerpo, el centro de flotación (B), donde se aplica la fuerza de flotación, y el metacentro (M), que es el punto de intersección entre la línea de acción de la fuerza de flotación y el eje central del cuerpo al inclinarse. Si el metacentro se encuentra sobre el centro de gravedad, entonces el cuerpo será estable [8]. A continuación, se identifica G , B y M y sus distancias relativas para el banco de ensayo.

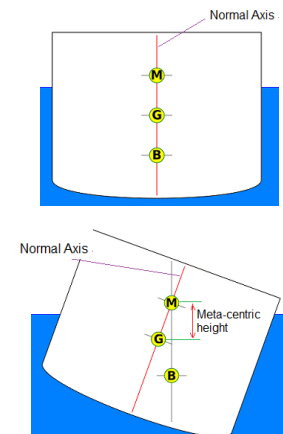


Figura 4.12: Centros relacionados a la estabilidad [9]

4.5.3 Centro de gravedad en el plano y nivelación

En primera instancia, se instalan dos instrumentos de nivel perpendicularmente en el banco, para así considerar in situ su inclinación con respecto al plano horizontal. Además, se indica en su interior una marca de hundimiento.

La nivelación consiste en alinear el centro de gravedad con el geométrico. de modo que el banco se encuentre flotando paralelo a la superficie del agua. Para ello, y se distribuyen los 3 [kg] de lastre, de manera que los instrumentos de nivel comprueben su horizontalidad mientras el banco de ensayo se encuentra colgado de los puntos medios de sus lados como se observa en la Figura 4.13 y Figura 4.14.



Figura 4.13: Banco de ensayo colgando de su centro de gravedad en el eje X

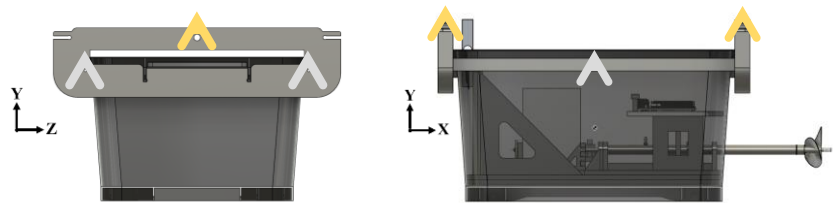


Figura 4.14: Nivelación del banco de ensayo con cuerdas en el eje X (gris), y en el eje Z (naranja) del centro de gravedad

La distribución de lastre que nivela el banco se realiza ubicando un plomo rectangular de 0.78 [kg] centrada en la zona libre bajo la caja, cuatro bolsas de 0.25 [kg] y 2 plomos de 0.17 [kg] bajo la repisa de electrónica y una pesa de 1 [kg] tras el motor.

4.5.4 Altura del centro de gravedad

Para conocer la ubicación del centro de gravedad en el eje Y se realiza una inclinación controlada de 20° del banco con lastre incluido, elevándolo verticalmente de un extremo, a través de un dinamómetro digital. Se realiza un diagrama de cuerpo libre (Figura 4.16) representando la inclinación para hacer un equilibrio momentos y encontrar la altura del centro de gravedad (KG) desde la base de la caja.

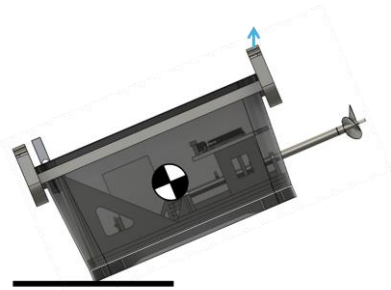


Figura 4.15: Ilustración de la inclinación controlada

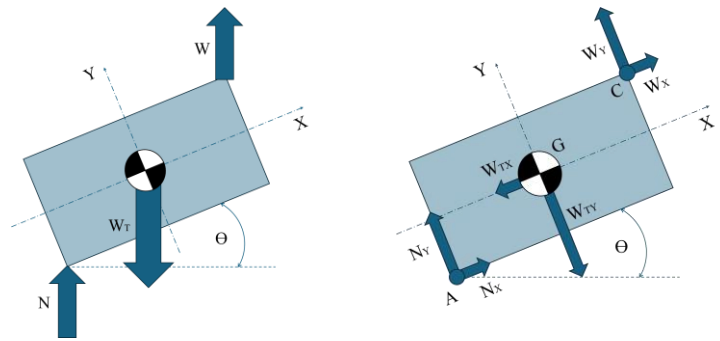


Figura 4.16: Diagrama de cuerpo libre del banco inclinado

Se tiene un ángulo de inclinación $\Theta = 20$ [°], una masa total $W_T = 8.2$ [kg], una masa medida en la inclinación con el dinamómetro $W = 4.1$ [kg], y las distancias horizontales (x) y verticales (y) entre los puntos indicados, $AC_y = 202$ [mm], $AC_x = 330$ [mm], $AG_x = 153$ [mm].

De la Figura 4.16 se tiene que:

$$Wtx = Wt \sin\theta \quad Wty = Wt \cos\theta \quad Wx = W \sin\theta \quad Wy = W \cos\theta$$

Como se trata de un equilibrio estático, la sumatoria de fuerzas y momentos debe ser igual a cero.

$$\sum M_A = 0 \quad (2)$$

$$W_{TX} \cdot AG_Y + W_Y \cdot AC_X - W_X \cdot AC_Y - W_{TY} \cdot AG_X = 0$$

Resolviendo el equilibrio de momentos de la ecuación 2, del equilibrio de momentos con respecto al punto A, se puede despejar la incógnita AG_y , que tiene un valor de 75 [mm].

4.5.5 Centro de flotación y metacentro

La altura del centro de flotación (KB) es la altura del centroide del volumen sumergido del cuerpo, que en el banco de ensayo está constituido por la caja. A través del modelo CAD se conoce el volumen sumergido, $V = 8187000 \text{ [mm}^3\text{]}$ y $KB = 68 \text{ [mm]}$.

La distancia entre el centro de flotación y el metacentro (BM) se obtiene del cociente entre el momento de inercia de la sección transversal del cuerpo en el plano del agua respecto a su línea central (I), y el volumen de agua desplazado por el cuerpo (V).

$$BM = \frac{I}{V} \quad (3)$$

Como este volumen no depende del interior, la caja se considera como un sólido. Así se obtiene la sección transversal ubicada a 120 [mm] de la base de caja (Figura 4.17). Su forma rectangular con radios permite dividir la sección como se observa en la Figura 4.18. Se calculan los momentos de inercia en X de cada forma, y por teorema de los ejes paralelos se calcula el momento total de la superficie con respecto al centro de gravedad del banco de ensayo en el plano, $I = 420452552 \text{ [mm}^2\text{]}$.



Figura 4.17: Sección transversal de la caja a 120 [mm] de su base

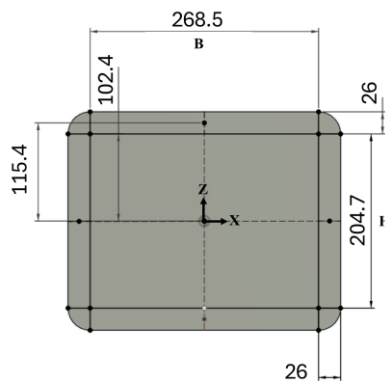


Figura 4.18: División de la sección transversal en formas conocidas

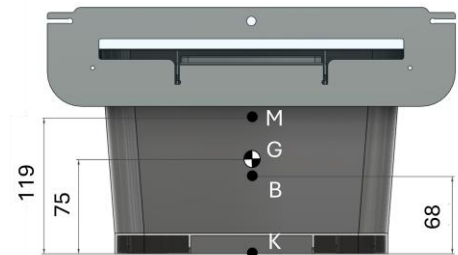


Figura 4.19: Puntos del análisis de estabilidad en el banco de ensayo

De esta manera, la distancia entre el centro de flotación y el metacentro es $BM = 51.4 \text{ [mm]}$

Para relacionar estos puntos y encontrar la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro (GM) se utiliza la ecuación 3, donde BG corresponde a la distancia entre el centro de flotación y el centro de gravedad.

$$GM = BM - BG \quad (4)$$

Finalmente, se determina la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro, $GM = 44.5$ [mm]. Su signo positivo indica que el metacentro está sobre el centro de gravedad del banco de ensayo, y, por consiguiente, es estable al estar sumergido 120 [mm] en el agua.

4.6 Calibración de sensores

Para que los sensores entreguen valores confiables, es necesario calibrarlos, utilizando como referencia instrumentos que ya lo estén. Para esto, se busca una escala de calibración. El cociente entre el valor en bruto y la escala de calibración, dará por resultado el valor calibrado.

La realización correcta de este procedimiento garantiza la exactitud de la magnitud física que se mide según el error que se considere.

4.6.1 Calibración de celda de carga

La celda de carga se calibra a partir de las señales del módulo HX711, según las variaciones de voltaje causadas por la deflexión de la celda. La celda utilizada es de máximo 3 [kg], el cual será el límite de para cargar la celda.

Para realizar este procedimiento, se miden las señales recibidas, luego de aplicar cargas con cuerpos de masa conocida, y considerando un tiempo de estabilización de 15 segundos previo a cada medición.

Se utilizan 20 datos para cada masa, y se ajusta una curva a ellos, como se observa en la Figura 4.20.

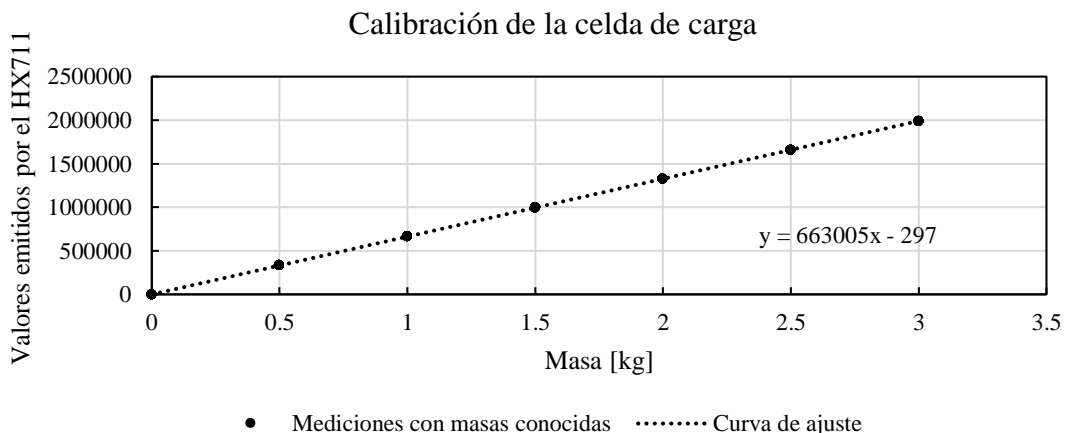


Figura 4.20: Calibración de la celda de carga

La pendiente de la curva de ajuste para estas mediciones proporciona una escala. Para que el resultado sea en gramos la escala es 663 [1/g], con una resolución de ± 1 [g]. El valor de tara (offset) se obtiene en cada uso.

4.6.2 Calibración de sensor de corriente

La calibración de este sensor consiste en la conexión en serie de una fuente de poder regulable, un multímetro, y el cable que pasa a través de la bobina de efecto hall del sensor. Además, se mide la señal emitida por el sensor en el puerto analógico A1 para establecer la escala de calibración. Se utilizan 18 mediciones.

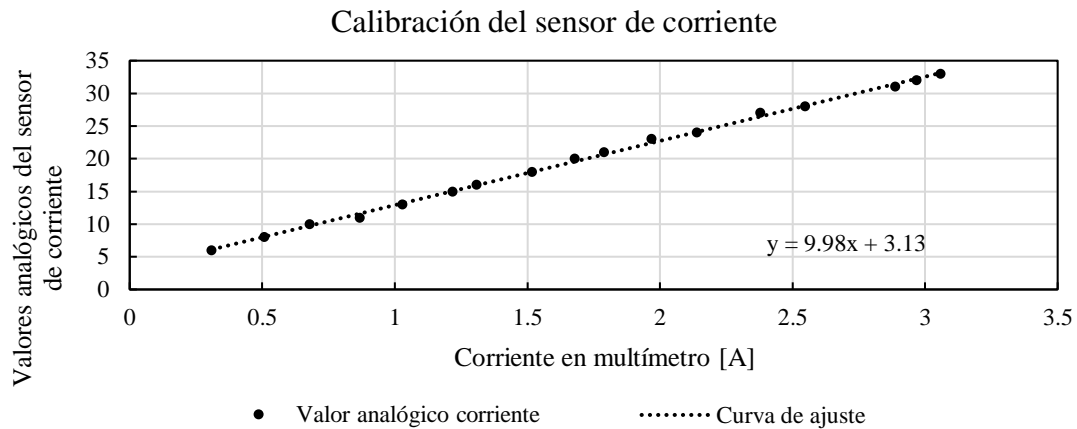


Figura 4.21: Calibración del sensor de corriente

Con la pendiente de la curva de ajuste de estas mediciones, se establece una escala de 10 [1/A] y un offset de 3, con una resolución de ± 0.1 [A].

Durante la calibración, se notó que los valores analógicos del sensor eran muy bajos, llegando hasta 35 de 1023, cuando la corriente estaba alrededor de 3 [A] de funcionamiento. Esto se debe a que el sensor está diseñado para medir 100 [A] como máximo, y, por ende, está sobredimensionado para el sistema de medición. Es posible mejorar la resolución de medición, cambiando el sensor por uno que se ajuste a los valores de funcionamiento, que se espera que no superen los 20 [A].

4.6.3 Calibración de divisor de voltaje

La calibración del divisor de voltaje se lleva a cabo conectando una fuente de poder regulable, a través del divisor de voltaje, al puerto analógico A3. A su vez, se conecta un multímetro para comprobar que el voltaje que se emite de la fuente. Se utilizan 15 mediciones.

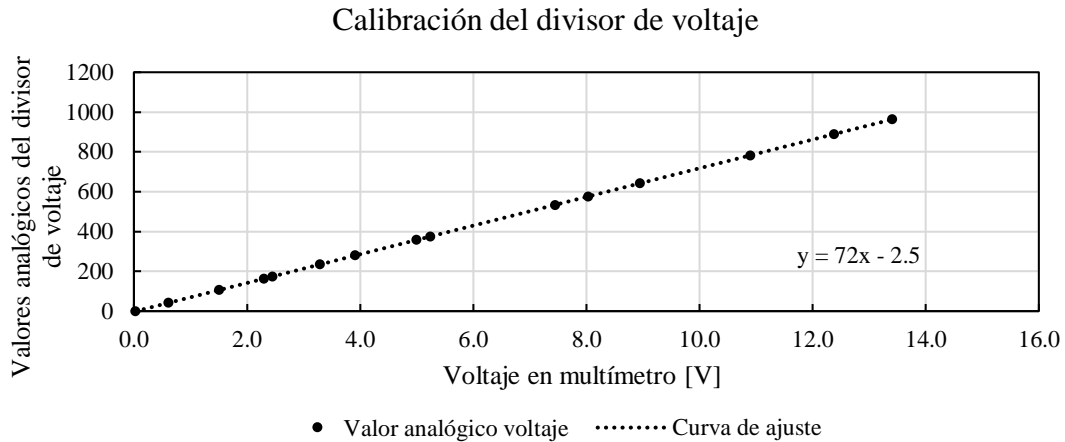


Figura 4.22: Calibración del divisor de voltaje

La pendiente de la curva de ajuste a las mediciones otorga una escala de calibración de 72 [1/V], con una resolución de ± 0.1 [V]. Al realizar una medición de comprobación, se nota que el offset no se utiliza, quedando la lectura dividida solo por la escala.

4.6.4 Calibración de sensor de RPM

El sensor de RPM corresponde a un encoder óptico, cuyo disco tiene diez orificios, que representan un décimo de revolución. Las mediciones de RPM están determinadas por el número fijo de ranuras y su directa relación con las revoluciones, y no requiere de calibración adicional.

En el código, se realiza un conteo de cambios de estado del sensor. Cuando el primer cambio es detectado, se cuentan los microsegundos hasta que ocurren 10 cambios, obteniendo el periodo, y con él, las RPM.

4.7 Uso del banco de ensayo

Es posible utilizar el banco de ensayo de manera manual y automática mediante un código .ino que se encuentra en el anexo C, Entrega las mediciones de empuje, RPM, voltaje y corriente en el terminal serial USB o Bluetooth cada 500 [ms]. La guía de uso se encuentra en el anexo C.

El banco de ensayo posee comunicación con terminal serial, vía USB, y comunicación por terminal serial bluetooth, por medio de un dispositivo móvil. Se pueden utilizar de forma independiente o mixta, pudiendo enviar instrucciones de control desde el terminal bluetooth y recibir los datos en el puerto serial, y viceversa. Esto debe ser modificado en el código.

El modo de comunicación dependerá del usuario y de como se quiera realizar las mediciones.

4.7.1 Control manual del banco de ensayo

Hay dos opciones de control manual; a través del potenciómetro, y a través de un comando ingresado en el terminal serial. Ambas opciones tienen la función de variar los anchos de pulso recibidos por el motor. El rango de anchos de pulso está entre 1600 y 1800 [μ s]

4.7.2 Control automático del banco de ensayo

Para controlar el banco de ensayo automáticamente, se dispone de un sistema de control proporcional de RPM que es habilitado cuando el potenciómetro se encuentra en la posición 0. Para controlar las RPM se debe ingresar el valor deseado en el terminal serial.

4.8 Sistema de control

El sistema de control propuesto para el banco de ensayo consiste en un control proporcional de lazo cerrado (Figura 4.23) con una sola variable de control, que por medio de retroalimentación del sensor encoder, permite modificar el valor de salida, para alcanzar el valor deseado de RPM.

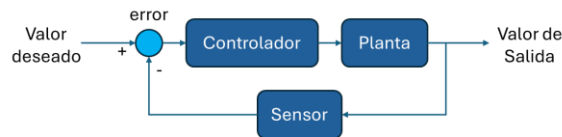


Figura 4.23: Esquema de sistema de control de lazo cerrado

La retroalimentación se realiza por medio de la ecuación 5 para obtener un error entre lo medido y lo deseado y realizar una acción de control en la planta.

$$e(t) = RPM \text{ deseado} - RPM \text{ medido } (t) \quad (5)$$

Con este error se busca modificar la variable de salida con una ganancia proporcional K_p que multiplica el error en el tiempo presente, obteniendo la señal de control como se muestra en la ecuación 6.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (6)$$

La señal de control corresponde a un ancho de pulso, que en respuesta a los resultados de las ecuaciones 5 y 6, actuará como acción de control. Luego de aplicarla se repite el proceso retroalimentación hasta obtener un error menor a determinado valor.

En la comprobación del sistema de control se utiliza la hélice de $\varnothing 52$ [mm] y se determina experimentalmente un K_p probando valores hasta que la respuesta de la señal de acción sea eficaz visualmente.

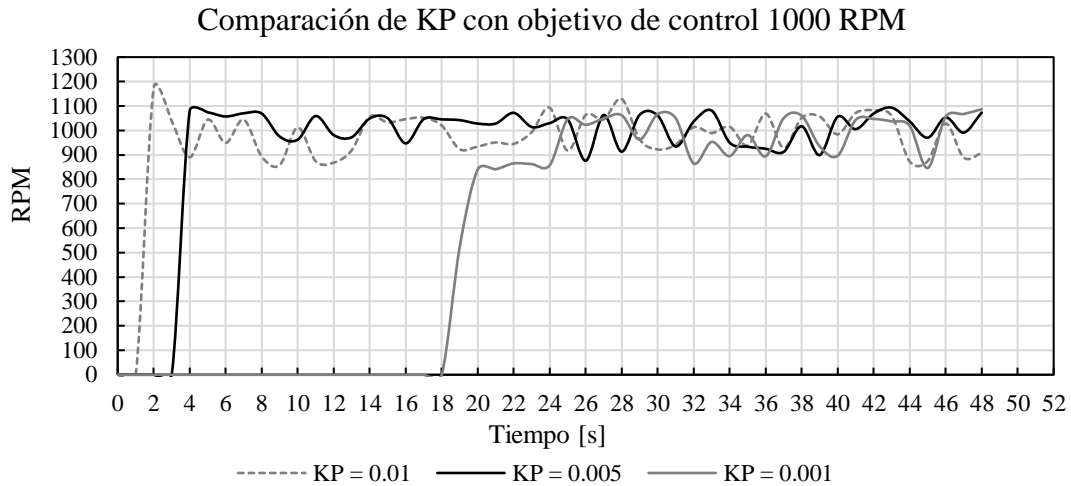


Figura 4.24: Comparación de K_p con objetivo de control 1000 RPM

En la Figura 4.24, se observa que para el K_p de 0.001 el sistema responde en 18 [s] y en la primera aproximación no alcanza los 1000 RPM. En cambio, el K_p de 0.01 tiene una reacción muy rápida y con un sobreimpulso de casi 200 RPM sobre el objetivo. Al probar con un valor intermedio, 0.005, existe una reacción un poco más lenta que la anterior y un sobre impulso de unos 100 RPM. Todos los K_p producen fluctuaciones en la velocidad de rotación de aproximadamente ± 100 RPM, pero el $K_p = 0.005$ tiene una respuesta que se considera adecuada para el sistema de control.

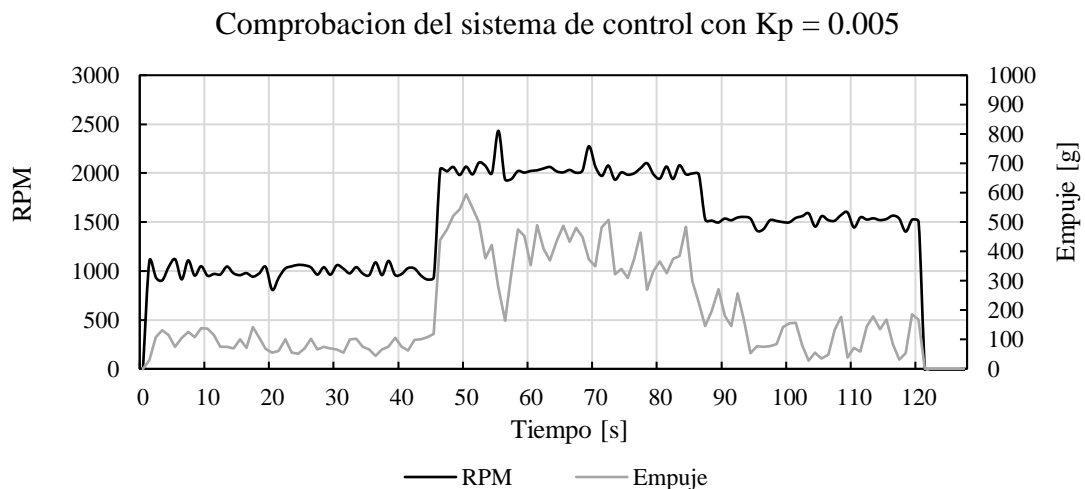


Figura 4.25: Comprobación sistema de control con $K_p = 0.005$

En la Figura 4.25, los valores obtenidos a distintos objetivos de control de RPM cumplen con él, estabilizándose rápidamente al cambiarlo. Estos datos tienen una fluctuación de aproximadamente ± 100 RPM.

El sistema de control de RPM permite tener un contraste visual de cómo se comporta el sistema al producir empuje a distintas velocidades de rotación, el cual tiene una clara tendencia a aumentar o disminuir con los RPM. Al ingresar el objetivo de 2000 RPM se puede observar que el empuje aumenta, pero luego disminuye pronunciadamente. Esto puede deberse a los vórtices y reflexiones del agua al aumentar bruscamente las RPM, ya que desplazan el banco y no se transmite el empuje a la celda de carga. En el siguiente objetivo, se pueden ver los efectos de las perturbaciones en el agua en el empuje, debido a que la disminución del empuje es evidente, pero tiene más ruido que a los 1000 RPM, donde el agua se encontraba en reposo.

El sistema de control de empuje se encuentra en el código y funciona, pero debido a fluctuaciones en la medición de esta variable no se considera relevante de analizar.

CAPÍTULO 5: Mediciones, análisis y resultados

Con el banco de ensayo implementado y calibrado, se espera validar su funcionamiento. Para ello se ensayan dos hélices, de Ø55 y Ø52 [mm] y paso de 80 [mm], y un motor RS-550 de 100 [W], obteniendo sus variables de medición respectivas. Se realizan comparaciones entre las hélices ensayadas, evidenciando su comportamiento bajo diferentes condiciones de funcionamiento, y evaluar su desempeño mediante parámetros como coeficientes y relaciones.

5.1 Condiciones del ensayo

El ensayo es llevado a cabo con el banco de ensayo nivelado y con lastre. El agua tiene una altura de aproximadamente 170 [mm] desde el fondo del canal.

Con el banco de ensayo montado y operativo, se realizarán pruebas que permitan afirmar la confiabilidad de las mediciones del banco, que consisten en acelerar el motor a % de ancho de pulso

Los datos que entrega el banco de ensayo son RPM, empuje, voltaje y corriente. Estos datos son almacenados y deben ser procesados para el análisis. Se utilizarán 80 datos para cada aceleración.

Los porcentajes corresponden al rango de anchos de pulso para la activación del motor determinados en pruebas preliminares y va de 1600 a 1800 [μ s]. Sin embargo, al probar en agua anchos de pulso sobre 1650 [μ s] se observan perturbaciones provocadas por la misma hélice en el agua, donde se reconoce cavitación y vórtices en la superficie que generan la entrada del aire al flujo de agua. Estas perturbaciones existen en el rango de prueba, pero son de menor magnitud. Se espera que se reflejen en las mediciones.

5.2 Mediciones

Las mediciones de las variables obtenidas en los ensayos se presentan contrastando ambas hélices en un gráfico para conocer sus diferencias inmediatas, luego se procede a analizar su desempeño por medio de criterios de comparación.

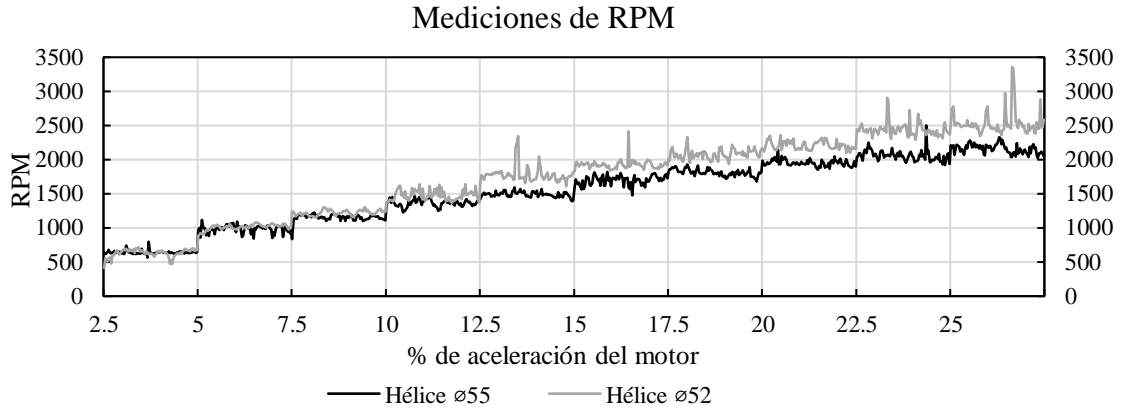


Figura 5.1: Mediciones de RPM de ambas hélices

El diámetro de la hélice condiciona la resistencia hidrodinámica al funcionar, por lo que la hélice con menor diámetro tiene la posibilidad de girar a mayor RPM como se ve en la Figura 5.1. Se puede notar ruido y una tendencia ascendente al aumentar la aceleración del motor.

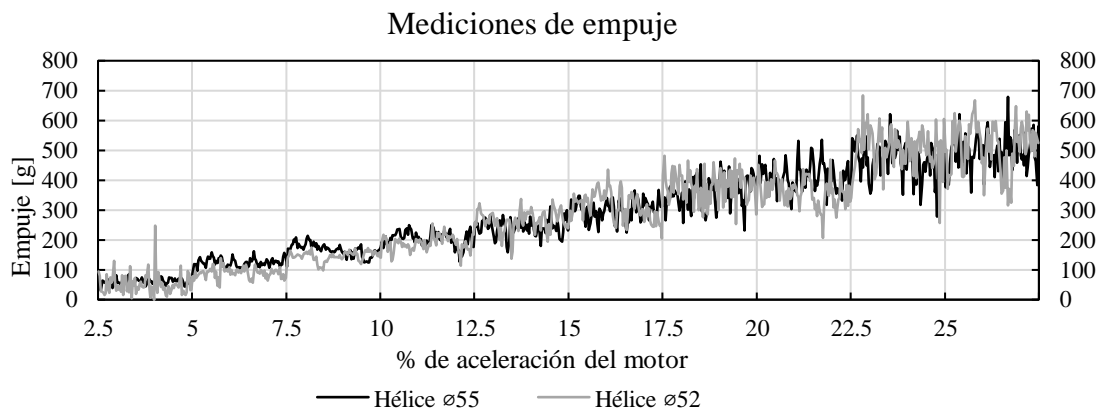


Figura 5.2: Mediciones de empuje de ambas hélices

El empuje producido por ambas hélices tiene valores similares entre sí y presentan ruido durante toda la medición. En la Figura 5.2 se evidencia un empuje creciente con respecto a la aceleración del motor. En cuanto a la corriente consumida, presentada en la Figura 5.3, se nota una clara diferencia entre cada aceleración a la que se expone el motor y los valores son similares en ambas hélices. El aumento en el consumo de corriente a medida que se incrementa la carga en el motor se refleja en estas mediciones. La hélice de Ø52 [mm] presenta valores en general más altos que los de la otra hélice.

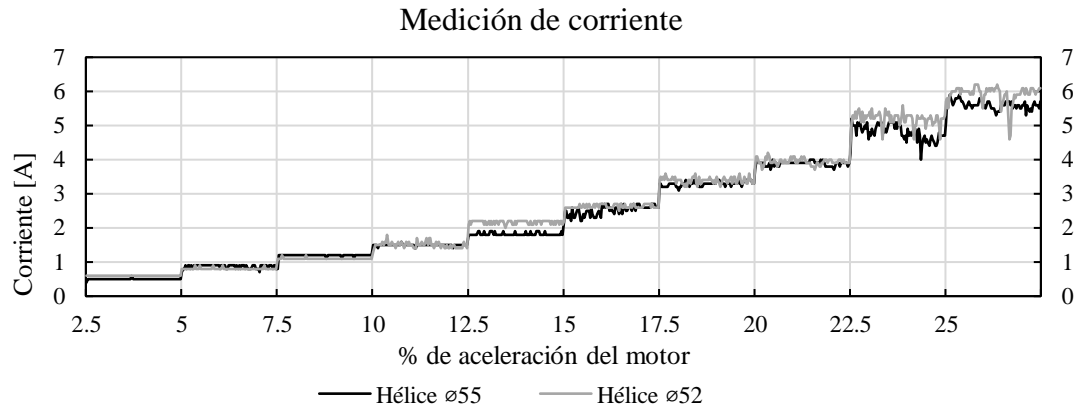


Figura 5.3: Mediciones de corriente de ambas hélices

El voltaje medido durante los ensayos tiene una diferencia en sus valores iniciales y finales de tensión, pero la tendencia decreciente es muy similar, como se ve en la Figura 5.4. La causa de esta diferencia radica en el menor estado de carga de las baterías al momento del ensayo de la hélice de Ø55 [mm]. Esto se comprueba en los valores iniciales de voltaje. Además, se puede notar que las caídas de voltaje sobre el 17.5% de aceleración son mayores que las de la hélice de Ø52 [mm], por esta misma razón.

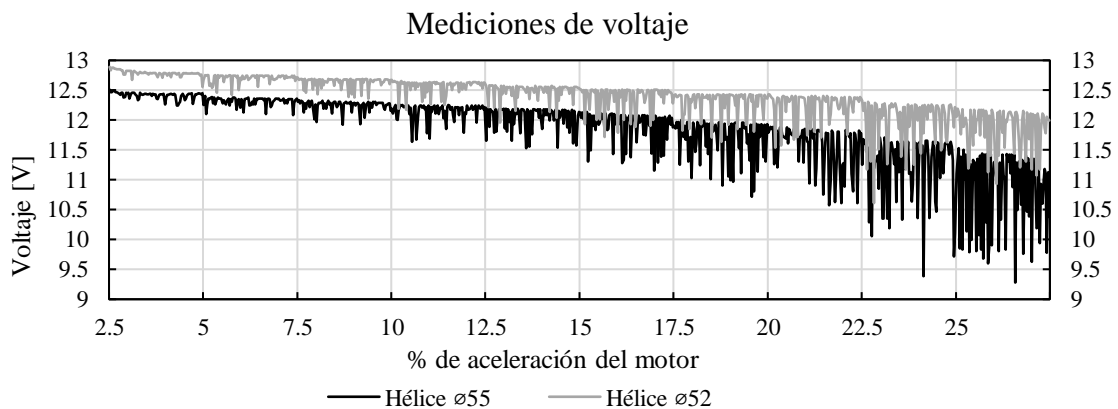


Figura 5.4: Mediciones de voltaje de ambas hélices

Para ver cómo influye el estado de carga de las baterías en los ensayos, se presenta la Figura 5.5, donde se realiza un ajuste del voltaje de la hélice de Ø55 [mm] e igualar con el voltaje inicial de la otra hélice. Con este nuevo valor se obtiene la potencia ajustada que presenta una variación alrededor de un 3% con respecto a la original.

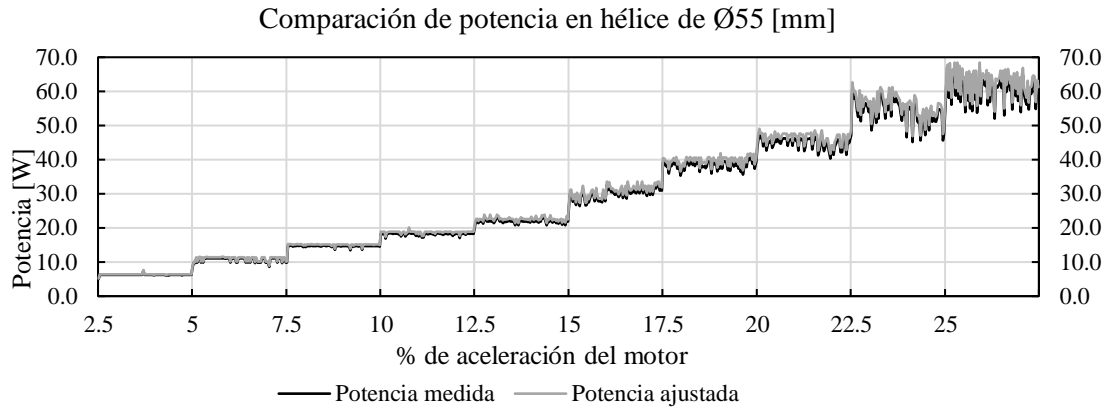


Figura 5.5: Comparación de potencia en hélice de Ø55 [mm]

Bajo la hipótesis que el estado de carga puede afectar las mediciones, la diferencia entre las mediciones de corriente, puede ser causada por esto.

La potencia consumida en ambos ensayos por las hélices, que se presenta en la Figura 5.6, tiene una tendencia similar a la corriente medida y es acorde con el aumento de aceleración.

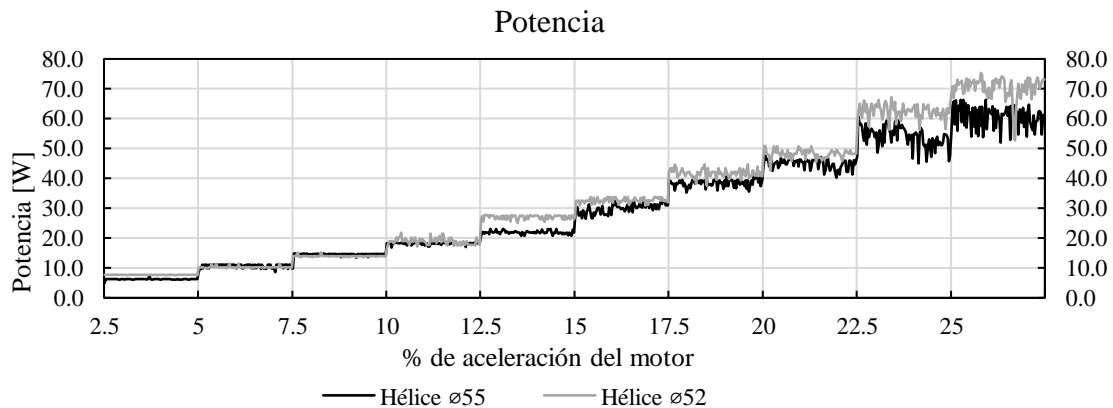


Figura 5.6: Potencia de ambas hélices

Es muy probable las fluctuaciones de empuje se deban a las perturbaciones generadas por la hélice en el agua del entorno de prueba, que tiende a reflejarse en las paredes y el fondo, y retornar al banco de ensayo.

No obstante, como es de esperar, las variables responden a la aceleración del motor con un aumento de RPM, empuje y consumo de corriente, y una disminución del voltaje disponible, lo que permite tener una idea de cómo se comporta el sistema en las condiciones ensayadas.

En el anexo E se encuentran las mediciones individuales de cada hélice.

5.3 Criterios de comparación

A partir de las mediciones de los ensayos hace un contraste de las hélices en base a criterios de comparación. Debido al ruido registrado, las comparaciones se realizan, para el primer criterio, con promedios de 80 datos para cada % aceleración, y para el segundo, con promedios de los valores presentes en intervalos de 200 RPM.

5.3.1 Empuje específico por unidad de potencia

En el área náutica es común utilizar la eficiencia propulsiva para comparar sistemas de propulsión que relaciona el producto del empuje producido y la velocidad de avance de la embarcación, con la potencia consumida. Por otra parte, el banco de ensayo se asume estático, es decir, no posee velocidad de avance, pues el empuje generado se transmite a la celda de carga para ser medido. Esta condición hace que la eficiencia propulsiva no sea un criterio de comparación adecuado para este ensayo.

Un parámetro que se ajusta mejor a esta condición es el empuje específico por unidad de potencia:

$$T_e = \frac{T}{P} \quad (7)$$

Donde T es empuje en [g], y P, potencia en [W].

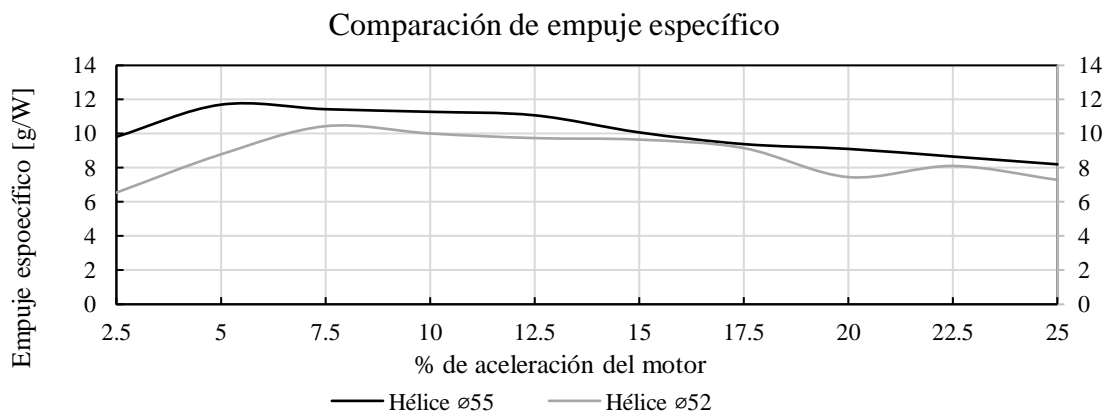


Figura 5.7: Comparación de empuje específico por unidad de potencia

La Figura 5.7 sugiere que la hélice de Ø55 [mm] tiene un desempeño superior que la de Ø52 [mm] en el ensayo, bajo este criterio.

5.3.2 Coeficientes de empuje y de potencia

Se trata de coeficientes adimensionales que expresan empuje y potencia por unidad de diámetro, RPS y densidad del fluido. Con ellos se puede comparar el desempeño de hélices bajo condiciones similares [8].

El coeficiente de empuje corresponde a C_T :

$$C_T = \frac{T}{\rho \cdot D^4 \cdot n^2} \quad (8)$$

El coeficiente de potencia corresponde a C_P :

$$C_P = \frac{P}{\rho \cdot D^5 \cdot n^3} \quad (9)$$

Donde T es el empuje producido en [N], P es potencia consumida en [W], n son las RPS, ρ es la densidad del agua en [kg/m³], y D , el diámetro de la hélice en [m]. Se asume una densidad constante del agua de 1000 [kg/m³]. El coeficiente de empuje refleja la capacidad de producir empuje bajo las condiciones establecidas. Por otro lado, el coeficiente de potencia relaciona la potencia requerida en dichas condiciones. Se espera que un sistema propulsor tenga un C_T alto y un C_P bajo.

En la Figura 5.8 se evidencia que la hélice de Ø55 [mm] tiene un mayor C_T que la hélice de Ø52 [mm], sugiriendo que su capacidad de producir empuje también es mayor.

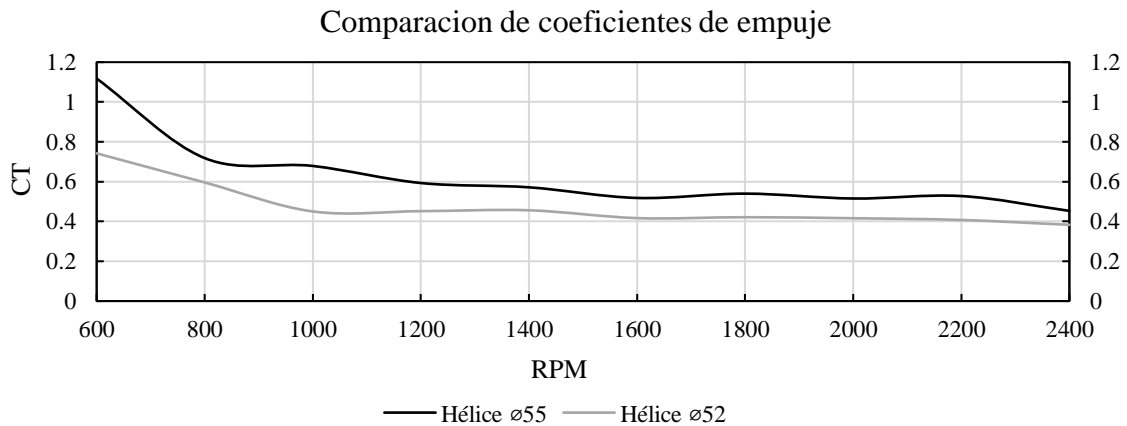


Figura 5.8: Comparación de coeficientes de empuje

La Figura 5.9 ilustra una similitud entre ambas hélices en cuanto a su consumo en operación. Bajo las 1000 RPM se puede observar que la hélice de Ø55 [mm] tiene un menor coeficiente de potencia que la otra hélice, sugiriendo un mejor desempeño. Sin embargo, a estas velocidades de operación, el consumo de potencia medido es similar en ambas hélices, aun cuando su diámetro es distinto. Se

comprueba que a bajas velocidades el diámetro tiene un impacto significativo. A velocidades superiores, los coeficientes de ambas hélices se aproximan entre sí, sugiriendo un desempeño similar en estas condiciones, pues las cargas hidrodinámicas aumentan.

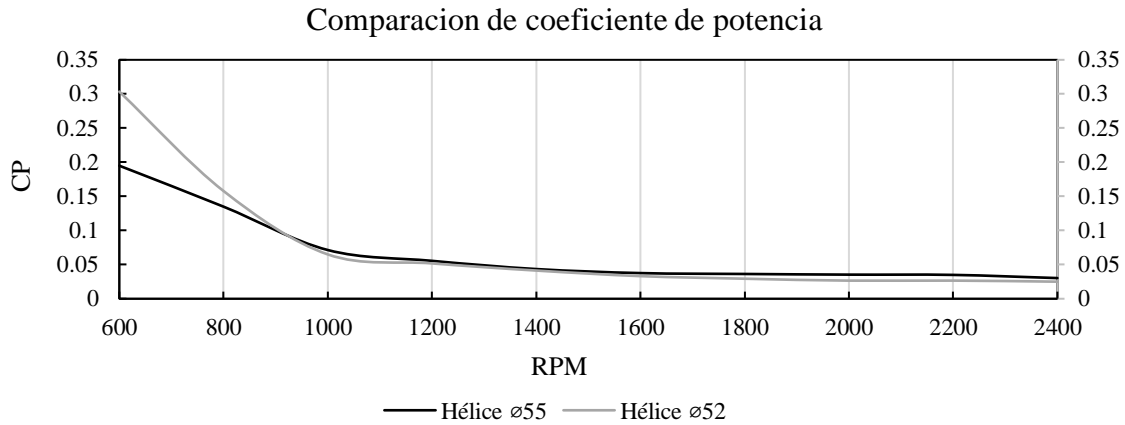


Figura 5.9: Comparación de coeficientes de potencia

Finalmente, en la Figura 5.10, se relacionan ambos coeficientes para obtener un rendimiento adimensional del sistema, por unidad de diámetro, RPS y densidad del fluido. De esta manera se puede analizar el desempeño del sistema de propulsión considerando la influencia de ambos coeficientes. Hasta alrededor de los 1800 RPM, el desempeño de la hélice de Ø55 [mm] es mayor que el de la hélice de Ø52 [mm], sugiriendo que la primera puede aprovechar mejor la energía para generar empuje a determinadas velocidades. Luego, el desempeño de la hélice pequeña es superior, y puede deberse a que recibe una menor resistencia hidrodinámica con respecto a la otra hélice. Sobre los 2200 RPM, se infiere que la resistencia tiene un impacto similar en ambas hélices.

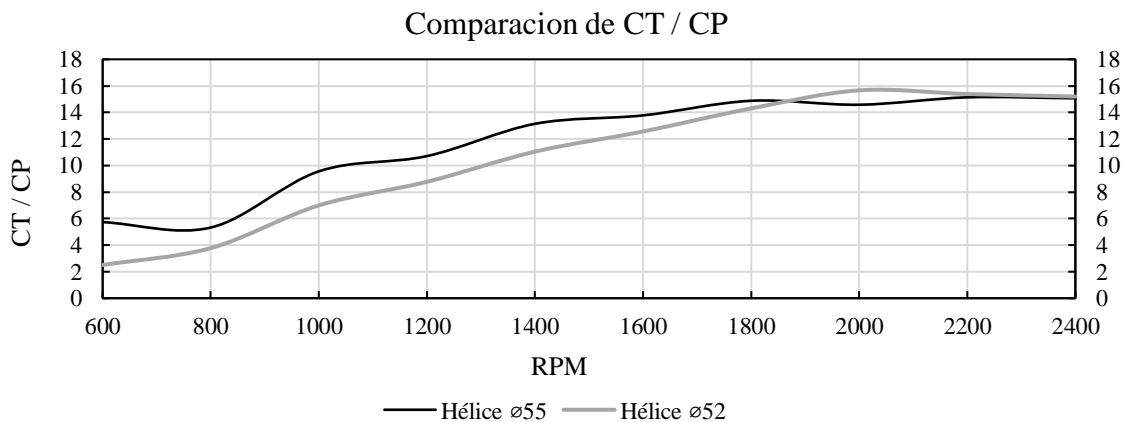


Figura 5.10: Comparación de CT/CP

5.4 Resultados

Las mediciones obtenidas en las pruebas presentan fluctuaciones que se atribuyen a la reflexión de las perturbaciones generadas por la hélice en el agua y por el estado de carga de la batería. Este último se considera un factor con un impacto menor en los resultados, pero se recomienda que sea similar entre ensayos para que los resultados sean representativos. Se concluye que los datos medidos representan el comportamiento real de los sistemas de propulsión, debido a que los sensores se encuentran calibrados, y existe una tendencia en los datos acorde a la potencia entregada al motor.

En base a los criterios de comparación utilizados, es posible determinar que la hélice de Ø55 [mm] posee un mejor desempeño que la de Ø52 [mm] en condiciones similares de operación, donde la capacidad de producir empuje de la primera es mayor que la segunda. Pese a ello, el consumo energético de ambas hélices es similar a lo largo del ensayo.

CAPÍTULO 6: Evaluación económica

6.1 Evaluación económica

El proyecto presente fue llevado a cabo con un presupuesto cercano a los \$ 240.000 pesos. El costo estimado por las horas de ingeniería invertidas en el proyecto aumenta el costo total, llevándolo a un valor alrededor de los tres millones de pesos.

Tabla 3: Costos totales del proyecto

| Concepto | Cantidad | Costo | Total |
|--------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| Terciado estructural - 20 [mm] | 610*500 [mm] | \$ 9000 /m ² | \$ 2 745 |
| MDF - 5.5 [mm] | 1520 x 2440 [mm] (1 plancha) | \$ 14 710 /plancha | \$ 14 710 |
| Componentes comerciales | - | \$ 220 470 | \$ 220 470 |
| Costo de horas de ingeniería | 32 horas / Fresado e imprimado | \$ 35 000 /hora | \$ 2 800 000 (80 horas) |
| | 24 horas / Montaje estructural y sello eje | | |
| | 8 horas / Montaje electrónico | | |
| | 16 horas /Calibración y detalles | | |
| Costos adicionales | - | \$ 7 000 | \$ 7 000 |
| TOTAL | | | \$ 3 044 925 |

CAPÍTULO 7: Conclusiones

El banco de ensayo para motores eléctricos y hélices, capaz de medir RPM, empuje producido y potencia consumida por distintas configuraciones de propulsión, fue construido y validado. Los objetivos de trabajo asociados fueron cumplidos.

La necesidad que motiva el desarrollo del banco de ensayo es conocer el desempeño de motores eléctricos y hélices para los proyectos de la asignatura “Integración a través de CDIO”, con el fin de utilizar una configuración de propulsión adecuada para cumplir el desafío que se les propone a los estudiantes. La operación del banco de ensayo satisface esta necesidad, pues permitirá tener un contraste entre sistemas de propulsión y seleccionar el que más se adecúe a su misión.

El proceso de concepción y diseño da como resultado la estructura, sistema de propulsión y sistema de medición del banco de ensayo. Se diseña un marco de soporte con rieles en la dirección de aplicación del empuje, cuya función es que el banco no cambie su dirección con el empuje y la celda de carga lo reciba directamente. La estructura, casi en su totalidad es desmontable y permite el cambio de componentes o la modificación de algunos.

En la etapa de implementación, el banco de ensayo se construye mecanizando sus partes. Se realizan las conexiones soldadas del sistema de medición. Se realiza una nivelación horizontal y un estudio de estabilidad dando como resultado que el banco es estable en flotación, debido a que su metacentro se encuentra sobre el centro de gravedad. Los sensores utilizados son calibrados para poder garantizar la confiabilidad de las mediciones. Y se instalan los soportes del marco en el canal de pruebas.

Se realiza un ensayo para comparar dos hélices de $\text{Ø}55$ [mm] y $\text{Ø}52$ [mm] con un paso de 80 [mm] caracterizar su comportamiento en condiciones de operación similares. El ensayo consiste en realizar mediciones con ambas hélices, entre 600 y 2400 RPM, y entre 2.5 y 25 % de aceleración del motor.

Mediante el análisis de los datos con criterios como el coeficiente de empuje, el coeficiente de potencia y el empuje específico por unidad de potencia, fue posible concluir que el desempeño de la hélice de $\text{Ø}55$ [mm] es mejor que la de $\text{Ø}52$ [mm] en el rango de pruebas y en condiciones similares. La capacidad de producir empuje de la hélice $\text{Ø}55$ [mm] es mayor debido a su diámetro, pero el consumo energético de ambas hélices es similar a lo largo del ensayo.

Aun cuando las mediciones tienen cierta inexactitud, ruido y fluctuaciones, son suficientes para evaluar el rendimiento de los sistemas de propulsión, ya que es posible conocer la tendencia de los datos en los ensayos según la potencia que se le entrega al motor.

Es importante destacar que para que los resultados sean más representativos que los obtenidos en el experimento, podrían tomarse una mayor cantidad de mediciones por variable y considerar más rangos de aceleración del motor que los utilizados. Asimismo, la precisión de los datos depende de la calidad de la nivelación del banco en el agua, tanto en profundidad como en equilibrio de flotación, ya que con ello se permite disminuir la fricción en los rodamientos.

7.1 Oportunidades y trabajos futuros

Como oportunidades para mejorar las condiciones de funcionamiento y medición, se consideran las siguientes:

- Analizar detalladamente las perturbaciones que afectan al banco, para conocer su causa y resolver el ruido en las mediciones.
- Experimentar con los K_p del sistema de control para mejorar su estabilización y acción de control con respecto a la condición actual.
- Se sugiere cambiar los cables unifilares a multifilares, por posible fatiga y ruptura de los primeros al usar los conectores y reemplazar los conectores del sistema electrónico de medición para facilitar su uso.

Referencias

- [1] G. Restrepo y M. Lopera, «CDIO: Una gran estrategia de formación en ingeniería,» 2015.
- [2] UNCTAD, «La UNCTAD pide que se invierta en las cadenas de suministro marítimas para impulsar la sostenibilidad y la resistencia a futuras crisis,» 2022. [En línea]. Available: <https://unctad.org/es/press-material/la-unctad-pide-que-se-invierta-en-las-cadenas-de-suministro-maritimas-para-impulsar>.
- [3] J. Guevara, «Diseño y construcción de banco de pruebas para la caracterización de hélices mediante torque y empuje,» Universidad de Chile, 2019.
- [4] F. Ortiz, «Diseño y construcción de Banco de pruebas para hélices,» Universidad de los Andes, 2018.
- [5] H. Salcedo, «Sistemas de propulsión náutica,» Universidad de los Andes, 2012.
- [6] M. Meza, «Diseño, construcción y automatización de un banco de ensayo para hélices de paso variable,» Universidad de Concepción, 2023.
- [7] R. L. Mott, «Mecánica de Fluidos,» Pearson Educación, México , 2006.
- [8] A. F. Molland, The Maritime Engineering Reference Book, Oxford: Elsevier, 2008.
- [9] Mecholic, «Differentiate center of gravity, center of buoyancy and metacentre,» [En línea]. Available: <https://www.mecholic.com/2018/06/differentiate-centre-of-gravity-metacentre.html>.

Anexos

Anexo A: Carta Gantt

CARTA GANTT - DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYO PARA HÉLICE DE BARCO

Franco Caraboni

Semana 1: 11-03-24



Anexo B: Componentes disponibles para el proyecto

| Cant. | Nombre | Función | Imagen |
|-------|---|-----------------------------|---|
| 1 | Motor RS-550VC 7525 100 [W] | Fuente motriz |  |
| 1 | Eje sellado $\phi 12 \times 300\text{mm}$ | Transmisión de torque |  |
| 3 | Uniones cardánicas | Acoplamiento eje – motor |  |
| 2 | Helices de paso 80 [mm] y $\phi 55 \text{ mm}$ y $\phi 52 \text{ mm}$ | Producir empuje |  |
| 1 | ESC New rain 480A | Controlar las RPM del motor |  |
| 1 | Potenciómetro | Controlar la ESC |  |
| 1 | Celda de carga 5 kg | Medir empuje producido |  |
| 1 | Sensor de corriente de efecto Hall JXK 14-8 | Medir corriente de consumo |  |
| 1 | Módulo bluetooth HC-05 | Comunicación remota |  |

| | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------|---|
| 1 | Bateria de 12V y 2.6 Ah | Alimentación |  |
| 1 | Arduino UNO R3 | Microcontrolador |  |
| 1 | Modulo Amplificador HX711 | Lectura de señal |  |
| 1 | Sensor de RPM óptico infrarrojo | Medir RPM del motor |  |
| 2 | Riel | Direccionar movimiento |  |
| 4 | Rodamientos lineales | Reducir roce al desplazar |  |

Anexo C: Código .ino para controlar el banco de ensayo conectado vía bluetooth.

```

// PINES
#define PIN_POTENCIOMETRO A3
#define PIN_BT_TX 10
#define PIN_BT_RX 11
#define PIN_ENCODER 2
#define PIN_VOLTAJE A2
#define PIN_CORRIENTE A0
#define PIN_CELDA_DT 6
#define PIN_CELDA_SCK 3

// LIBRERIAS
#include "HX711.h"
#include <LibPrintf.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>
#include "tinyCommand.hpp"

Adafruit_PWMServoDriver pwm =
Adafruit_PWMServoDriver();

// ENCODER
volatile long encConteo = 0;
int revolucion = 10;
unsigned long tiempo = 0;
float tiempo2 = 0;
int rpm = 0;

// CELDA
HX711 celda;
float gramos = 0;

// VOLTAJE CORRIENTE
float voltEscala = 72;
float corrOffset = 3;
float corrEscala = 10;

// BLUETOOTH
SoftwareSerial BTSerial(PIN_BT_TX, PIN_BT_RX);
static tinyCommand tC(BTSerial);
int rpm_objetivo = 0;
int gramos_objetivo = 0;
int ap = 0;
unsigned long last_print = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  BTSerial.begin(9600);
  printf_init(BTSerial);

  // motor
  pwm.begin();
  pwm.setOscillatorFrequency(26000000);
  pwm.setPWMFreq(500);

  // pwm
  pinMode(PIN_ENCODER, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(
    digitalPinToInterrupt(PIN_ENCODER), []() -> void {
      volatile int encoderState =
digitalRead(PIN_ENCODER);
      if (encoderState == HIGH) {
        encConteo++;
        if (encConteo == 1){
          tiempo = micros();
        }
        if (encConteo == revolucion){
          tiempo2 = micros() - tiempo;
          encConteo = 0;
        }
      }
    },
    RISING);

  // celda
  celda.begin(PIN_CELDA_DT, PIN_CELDA_SCK);
  celda.tare(30);
  celda.set_scale(663); // lectura con 1 kg

  // comandos bluetooth
  tC.begin();
  tC.setCmd("rpm", [](int argc, char **argv) ->
int16_t {
    if (argc == 2) {
      rpm_objetivo = atoi(argv[1]);
      gramos_objetivo = 0;
      ap = 0;
      BTSerial.print("Objetivo RPM: ");
      BTSerial.println(rpm_objetivo);
    }
  });
  tC.setCmd("gramos", [](int argc, char **argv) ->
int16_t {
    if (argc == 2) {
      gramos_objetivo = atoi(argv[1]);
      rpm_objetivo = 0;
      ap = 0;
      BTSerial.print("Objetivo gramos:");
      BTSerial.println(gramos_objetivo);
    }
  });
  tC.setCmd("ap", [](int argc, char **argv) -> int16_t
{
  if (argc == 2) {
    ap = atoi(argv[1]);
    rpm_objetivo = 0;
    gramos_objetivo = 0;
    BTSerial.print("Ancho de pulso: ");
    BTSerial.println(ap);
  }
});
  tC.setCmd("tar", [](int argc, char **argv) ->
int16_t {
    if (argc == 1) {
      BTSerial.println("Tarando");
      celda.tare(30);
    }
  });
}

```

```

        BTSerial.println("Listo");
    }
    });

    BTSerial.print("listo");
}

void loop() {
    // encoder
    rpm = 1.0 / (tiempo2 / 1000000) * 60;

    // voltaje corriente
    float voltaje = analogRead(PIN_VOLTAJE) /
voltEscala;
    int corrValor = analogRead(PIN_CORRIENTE);
    float corriente = (corrValor - corrOffset) /
corrEscala;
    // celda
    if (celda.is_ready()) {
        gramos = (celda.get_value(1) / celda.get_scale());
    }

    // motor
    int pot = analogRead(PIN_POTENCIOMETRO); // lectura
del valor del potenciómetro (0 y 1023)
    if (pot > 50) { // control
manual
        ap = 0;
        int motor_anchopulso = map(pot, 0, 1023, 1550,
1700);
        pwm.writeMicroseconds(15, motor_anchopulso);
    } else { // control automatico
        if (rpm_objetivo) {
            int ancho_pulso = loop_rpm(rpm_objetivo, rpm);
            pwm.writeMicroseconds(15, ancho_pulso);
        } else if (gramos_objetivo) {
            int ancho_pulso = loop_gramos(gramos_objetivo,
gramos);
            pwm.writeMicroseconds(15, ancho_pulso);
        } else {
            pwm.writeMicroseconds(15, ap);
        }
    }
    // procesar mensajes bt
    tC.scan();

    unsigned long dt = 500;
    if (millis() - last_print > dt) {
        printf("%d RPM, %.1f G, %.2f V, %.2f A \n", rpm,
gramos, voltaje, corriente);
        BTSerial.print("rpm: ");
        BTSerial.print(rpm);
        BTSerial.print(", gramos:");
        BTSerial.print(gramos);
        BTSerial.print(", voltaje: ");
        BTSerial.print(voltaje);
        BTSerial.print(", corriente: ");
        BTSerial.println(corriente);

        last_print = millis();
    }
}

```

```

    }

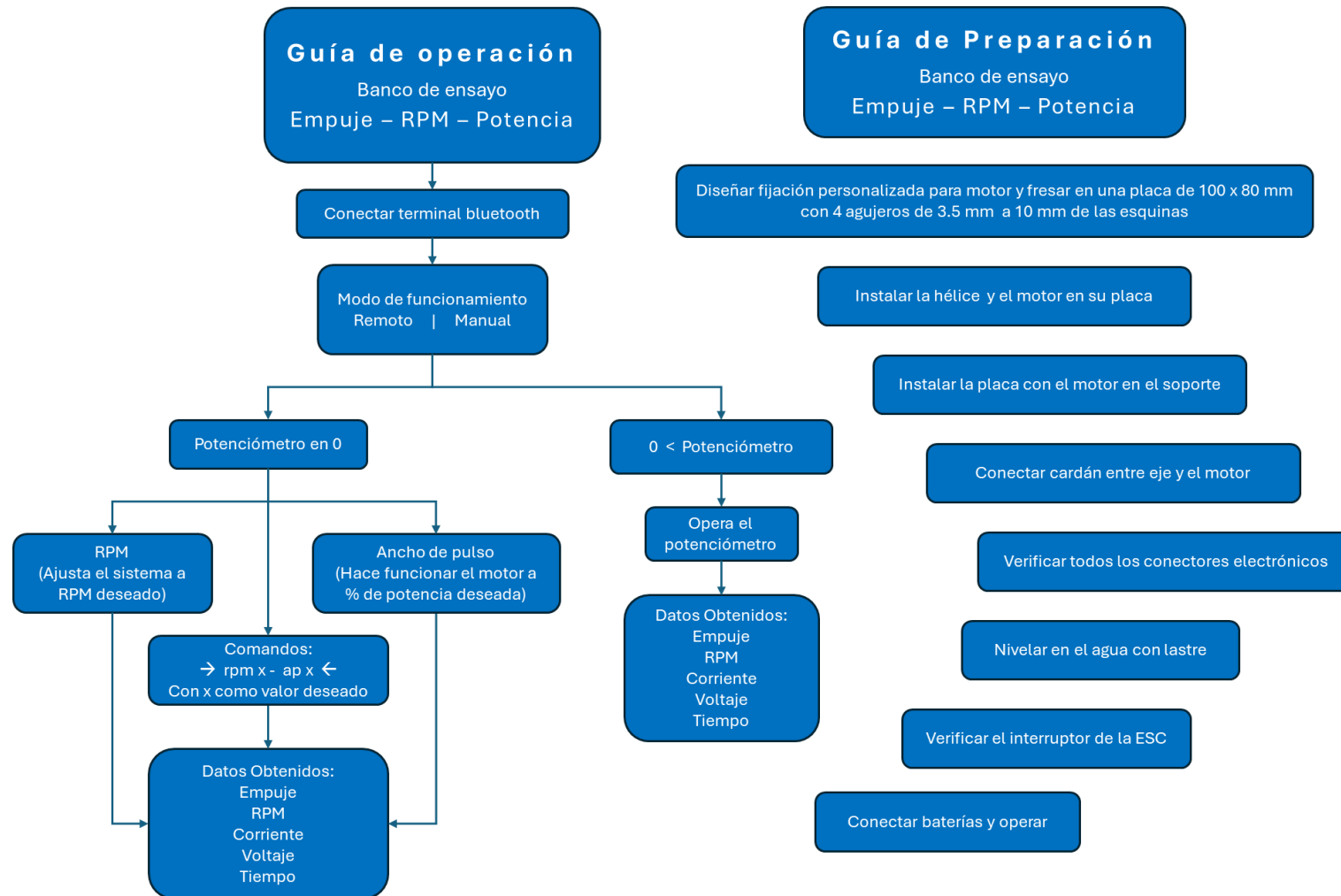
    unsigned long tiempo_anterior = 0;
    float ancho_entregadof = 1500;

    int loop_rpm(int rpm_objetivo, int rpm) {
        unsigned long tiempo_actual = millis();
        unsigned long tiempo_prueba = 100;
        unsigned long tiempo_accion = tiempo_actual -
tiempo_anterior;
        if (tiempo_accion >= tiempo_prueba) {
            int error = rpm_objetivo - rpm;
            float kp = 0.005;
            float delta_ancho = 0;
            if (abs(error) > 5) {
                delta_ancho = kp * error;
            }
            ancho_entregadof = ancho_entregadof + delta_ancho;
            tiempo_anterior = tiempo_actual;
            int ancho_entregadoi =
constrain(round(ancho_entregadof), 1500, 1700);
            return ancho_entregadoi;
        }
    }

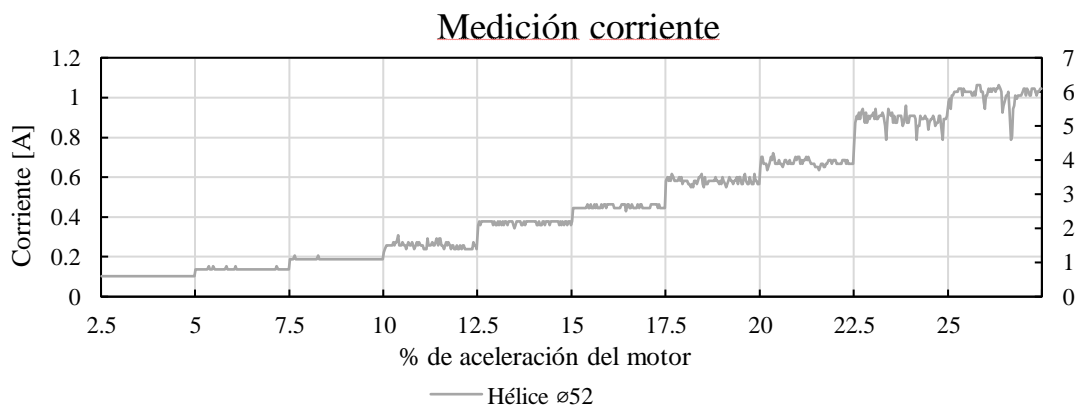
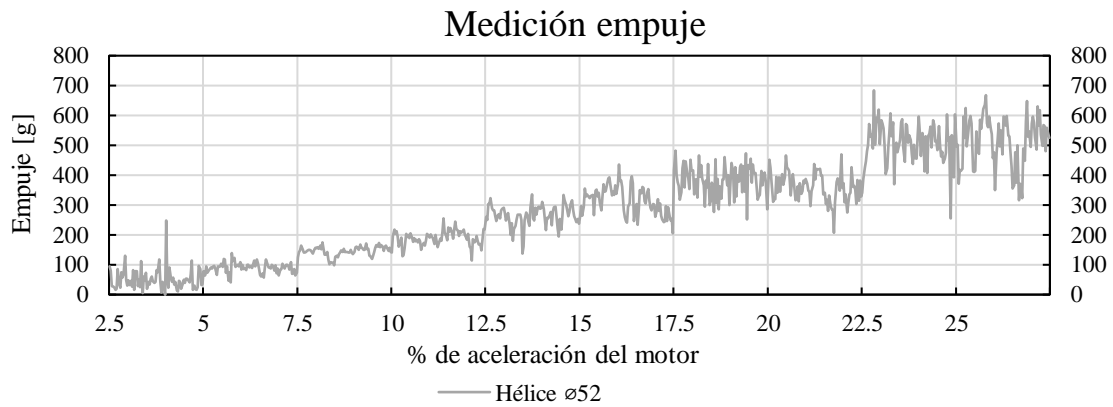
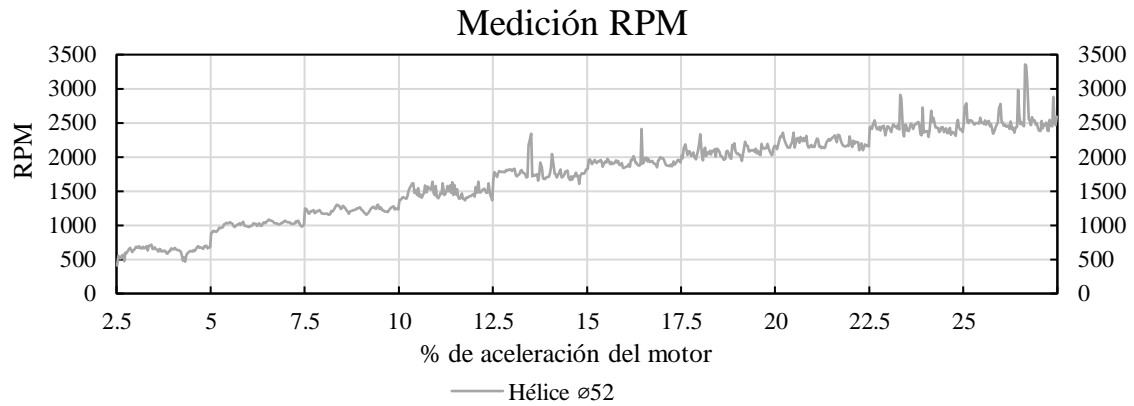
    int loop_gramos(int gramos_objetivo, int gramos) {
        unsigned long tiempo_actual = millis();
        unsigned long tiempo_prueba = 100;
        unsigned long tiempo_accion = tiempo_actual -
tiempo_anterior;
        if (tiempo_accion >= tiempo_prueba) {
            int error = gramos_objetivo - gramos;
            float kp = 0.007;
            float delta_ancho = 0;
            if (abs(error) > 5) {
                delta_ancho = kp * error;
            }
            ancho_entregadof = ancho_entregadof + delta_ancho;
            tiempo_anterior = tiempo_actual;
            int ancho_entregadoi =
constrain(round(ancho_entregadof), 1500, 1700);
            // printf("%d, %d, %d, %d\n", error,
ancho_entregadoi, newton_objetivo, newton);
            return ancho_entregadoi;
        }
    }
}

```

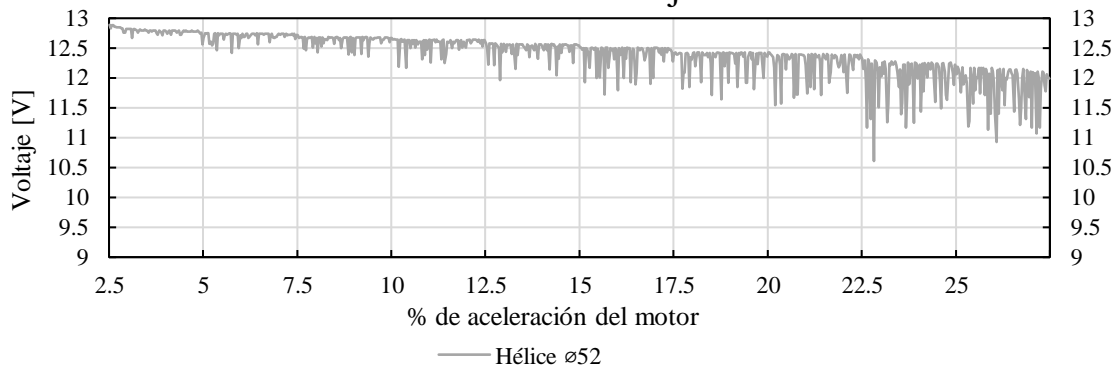
Anexo D: Guía de uso



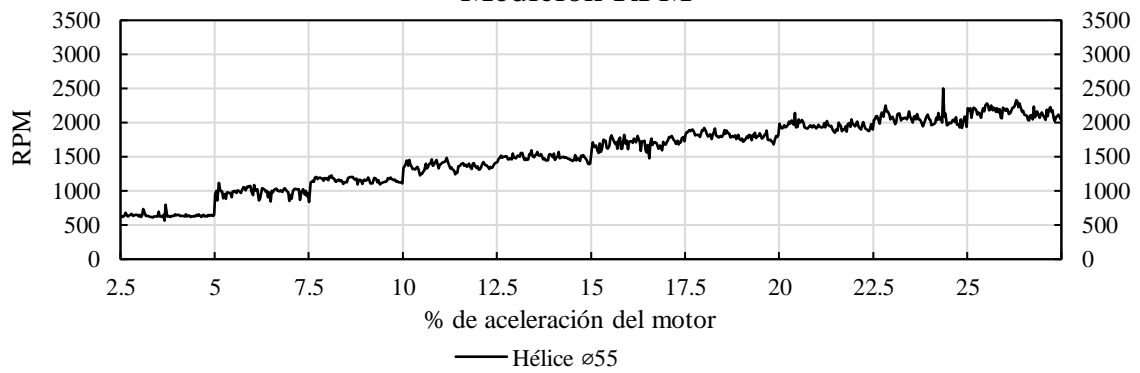
Anexo E: Mediciones con cada hélice



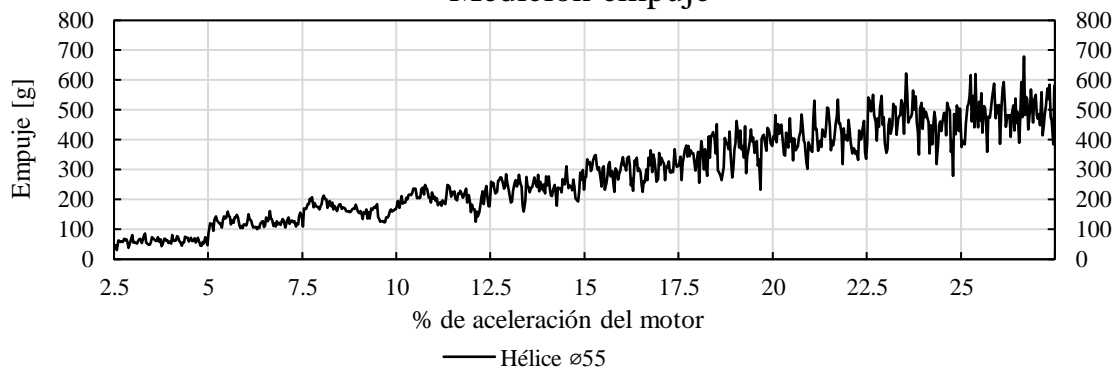
Medición voltaje



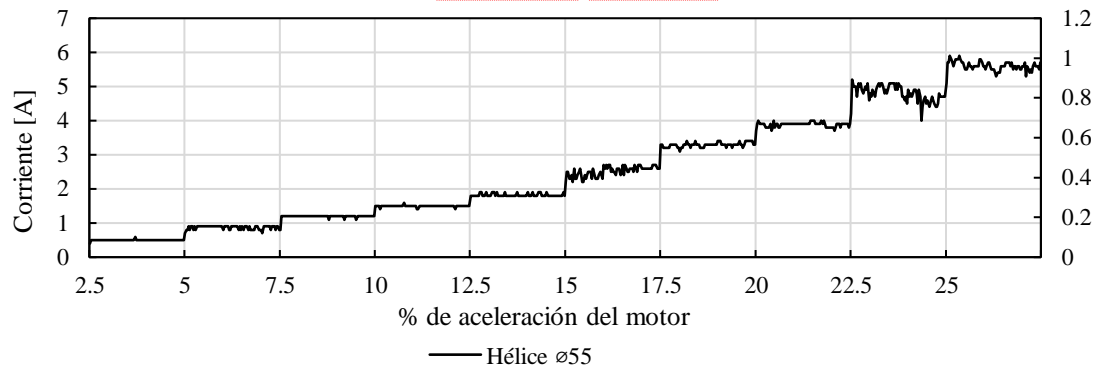
Medición RPM



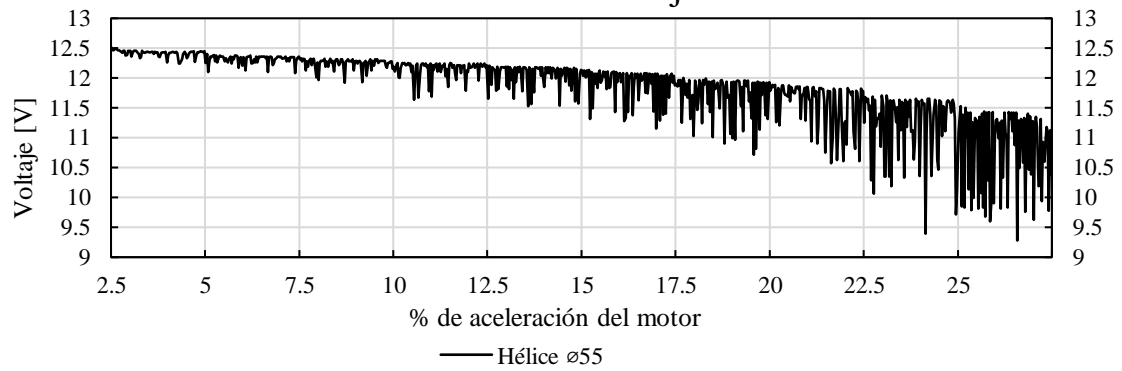
Medición empuje



Medición corriente

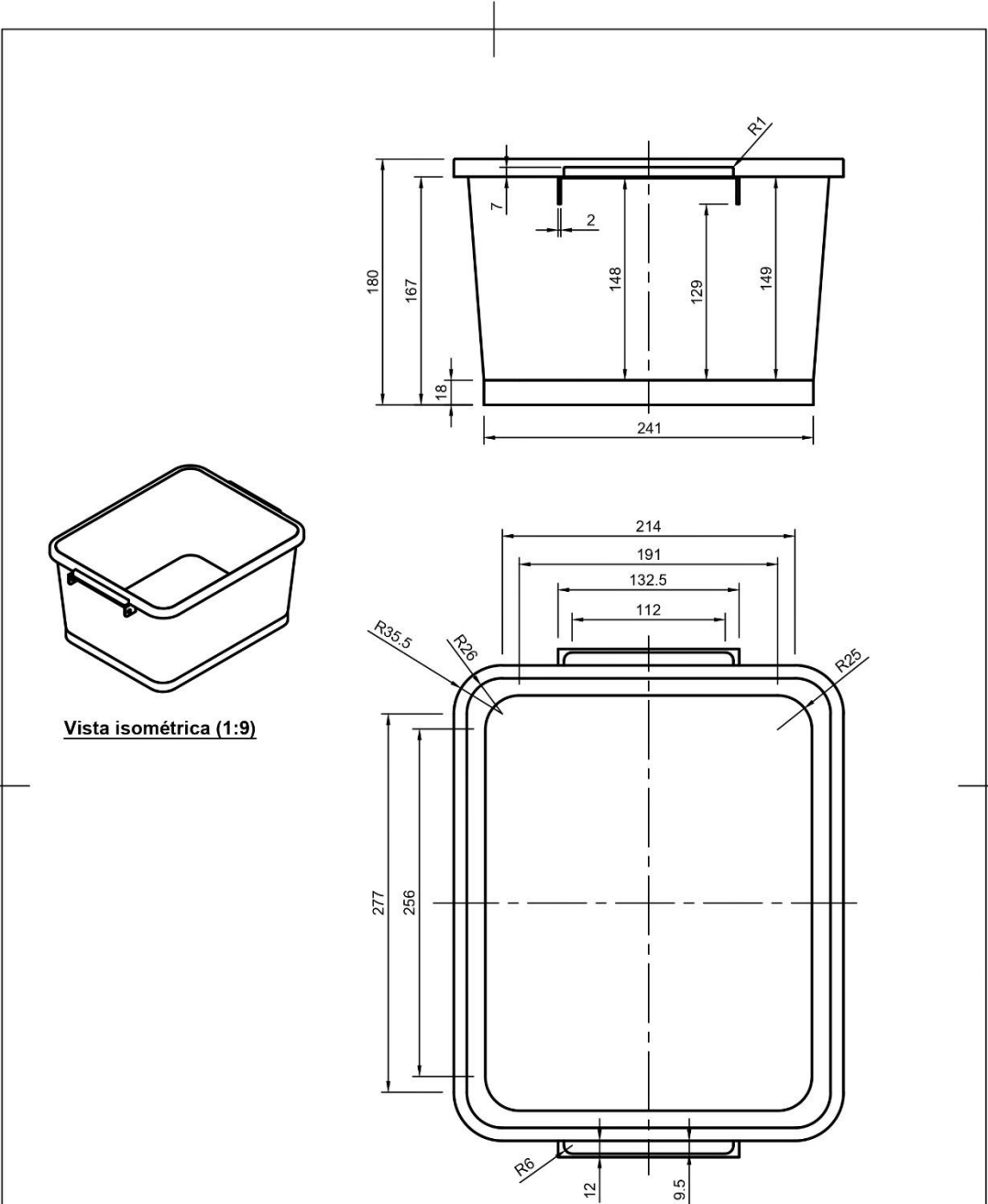


Medición voltaje



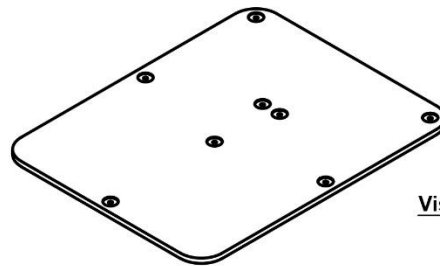
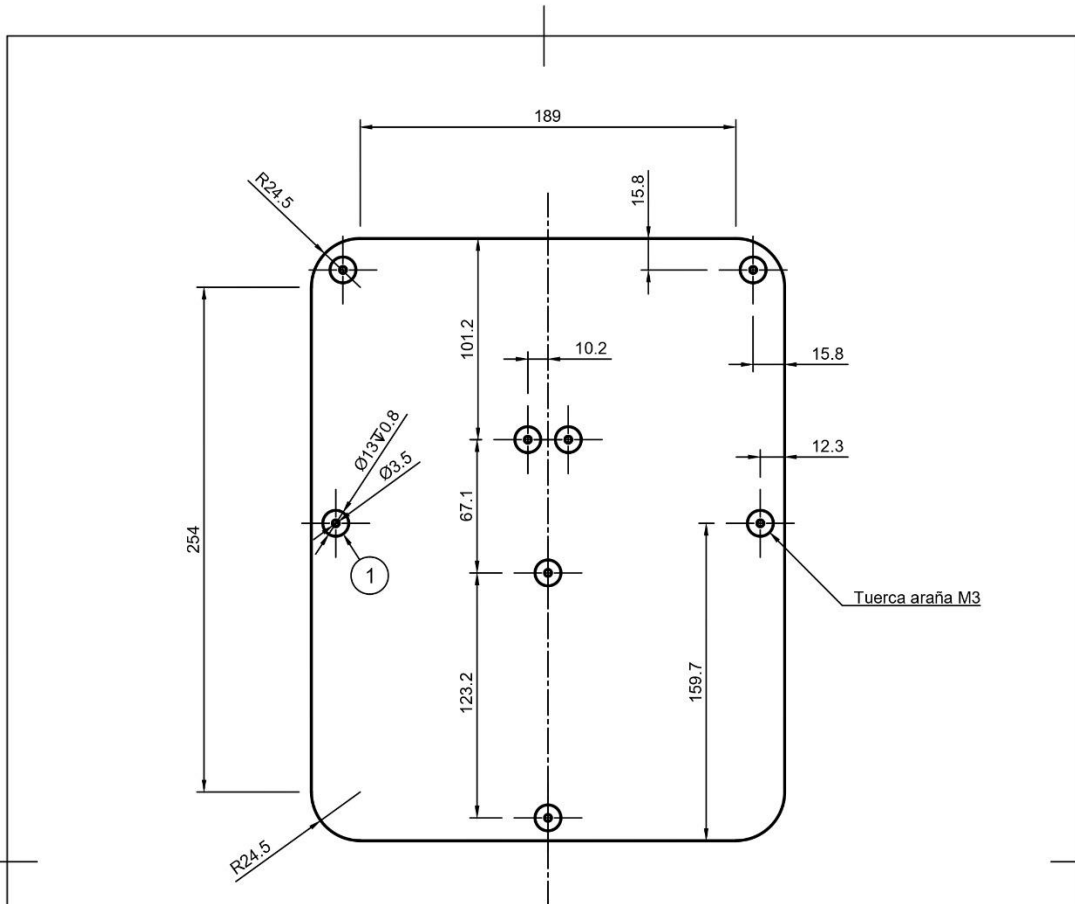
Anexo F: Planos de fabricación

(A partir de la página siguiente)



Vista isométrica (1:9)

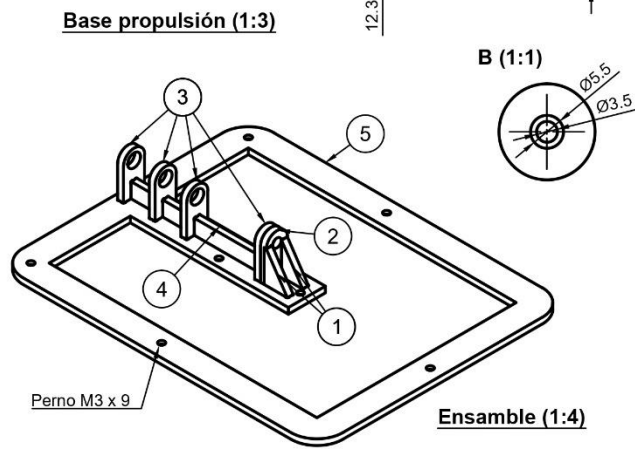
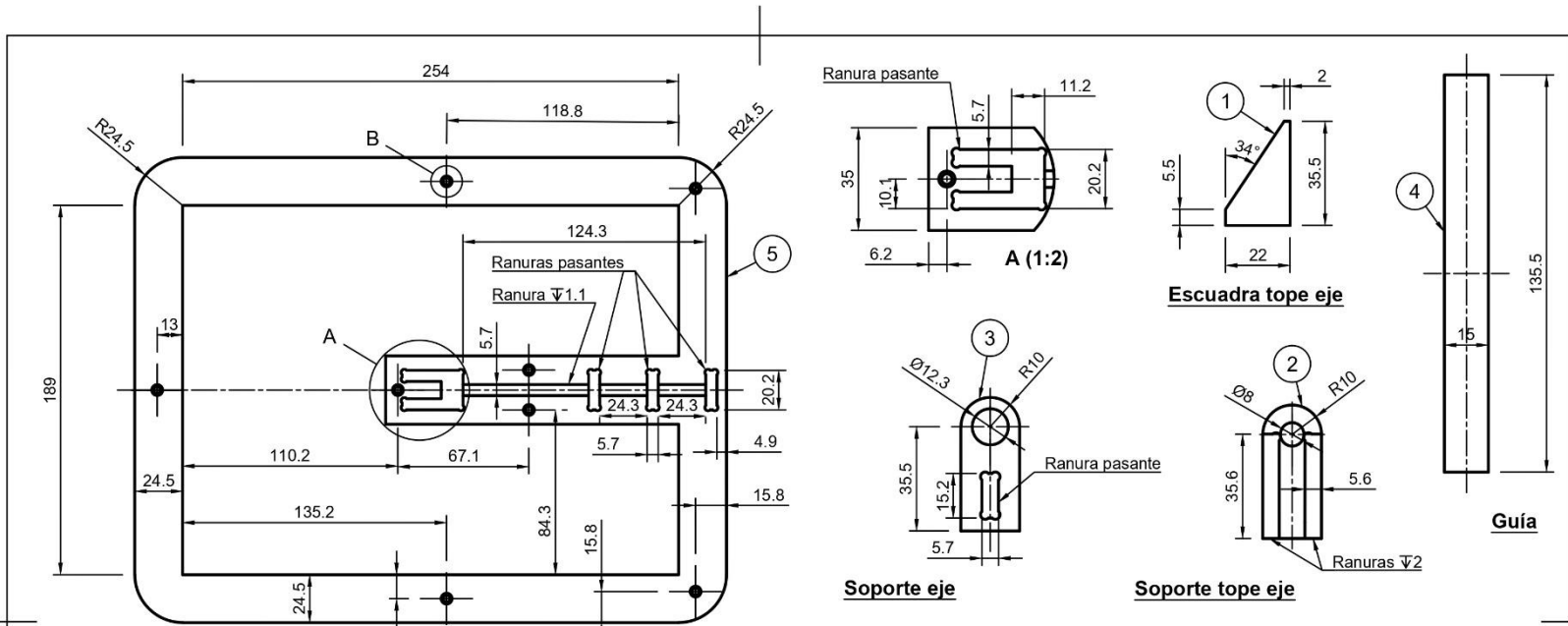
| | | | |
|---|---|------------|---|
| FECHA 06-09-2024 |  UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica  | | |
| CONTENIDO Caja contenedora | DIBUJADO POR | | |
| MATERIAL Polipropileno | FRANCO CARABONI BURGOS | | |
| PROYECTO Banco de ensayo de hélices de barco | N° PLANO 1/16 | ESC 1:4 |  |



Vista isométrica (1:5)

Nota: Los agujeros de la pieza tienen las dimensiones de los indicados en 1

| | | | |
|-------------------------------------|---|-----------------|---|
| 1 | 8 | Tuerca araña M3 | |
| N°PIEZA | CANT. | DESCRIPCIÓN | |
| FECHA |  UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica | | |
| 06-09-2024 |  | | |
| CONTENIDO | Base Principal | | DIBUJADO POR |
| MATERIAL | MDF 5.5 [mm] | | FRANCO CARABONI BURGOS |
| PROYECTO | N° PLANO | ESC |  |
| Banco de ensayo de hélices de barco | 2/16 | 1:3 | |



Nota 1: Los arcos en las esquinas de las ranuras tienen radio R1.59
 Nota 2: Los agujeros de la pieza 5 tienen las dimensiones de la vista detalle B

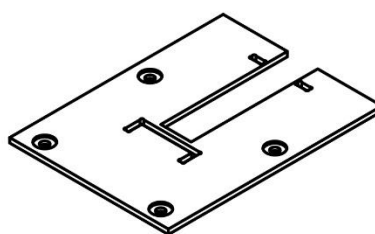
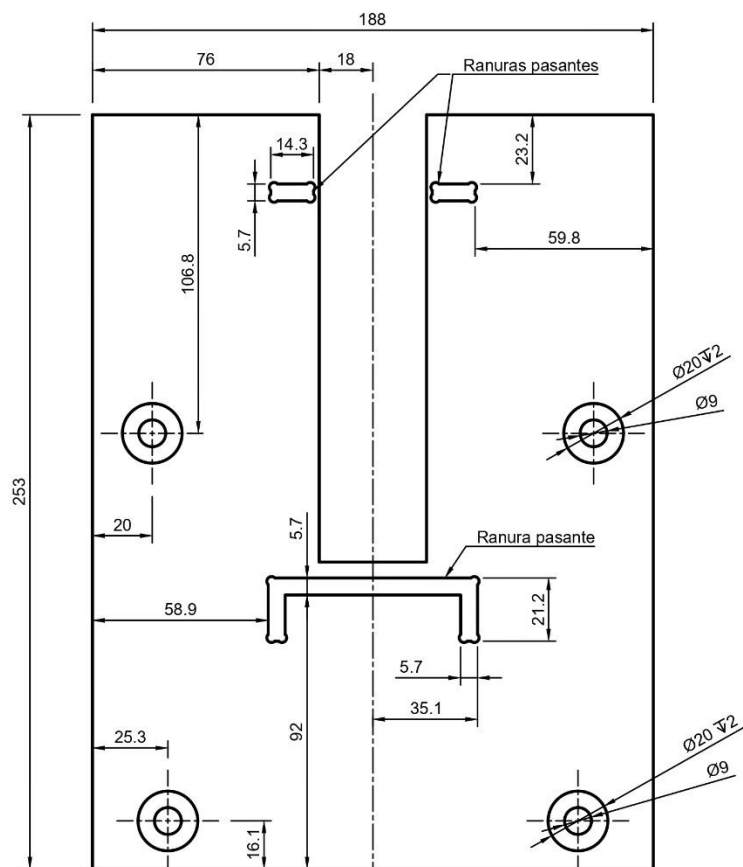
| N° PIEZA | CANT. | DESCRIPCIÓN |
|----------|-------|-------------------|
| 6 | 8 | Perno M3 x 10 |
| 5 | 1 | Base propulsion |
| 4 | 1 | Guía |
| 3 | 4 | Soporte eje |
| 2 | 1 | Soporte tope eje |
| 1 | 2 | Escuadra tope eje |

FECHA: 06-09-2024

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Departamento de Ingeniería Mecánica



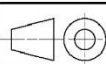
| | | | |
|-----------|-----------------|--------------|------------------------|
| CONTENIDO | Base propulsión | DIBUJADO POR | FRANCO CARABONI BURGOS |
| MATERIAL | MDF 5.5 [mm] | | |

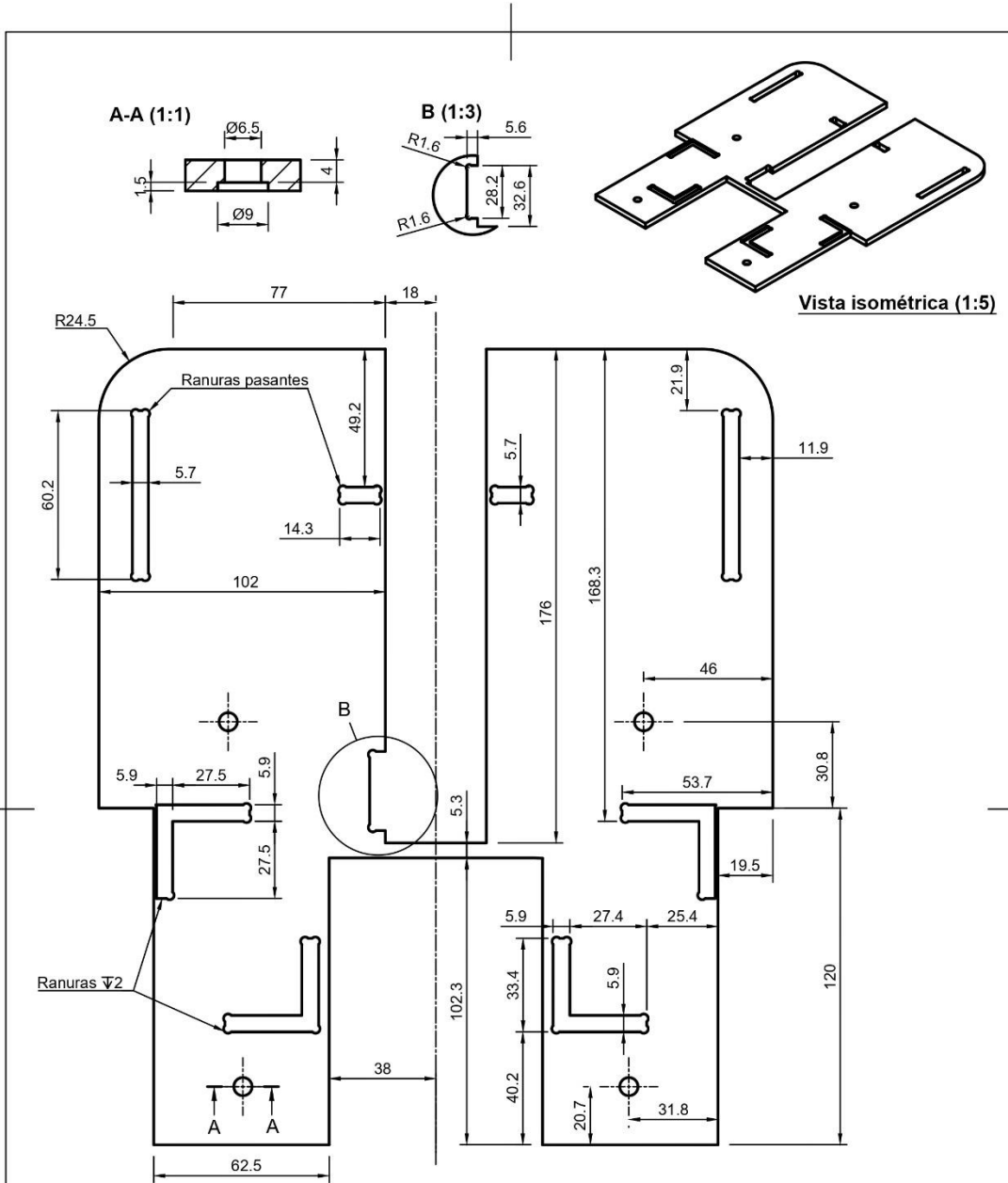
| | | | | | | |
|----------|-------------------------------------|----------|------|-----|-----|--|
| PROYECTO | Banco de ensayo de hélices de barco | N° PLANO | 3/16 | ESC | 1:2 | |
|----------|-------------------------------------|----------|------|-----|-----|--|



Vista isométrica (1:5)

Nota 1: Los arcos en las esquinas de las ranuras tienen radio R1.59

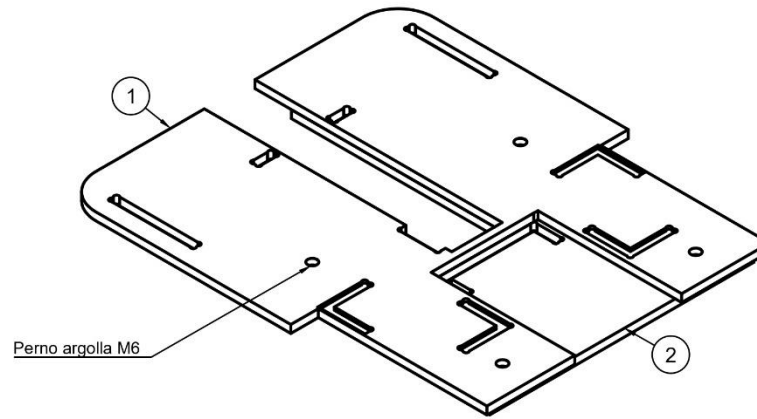
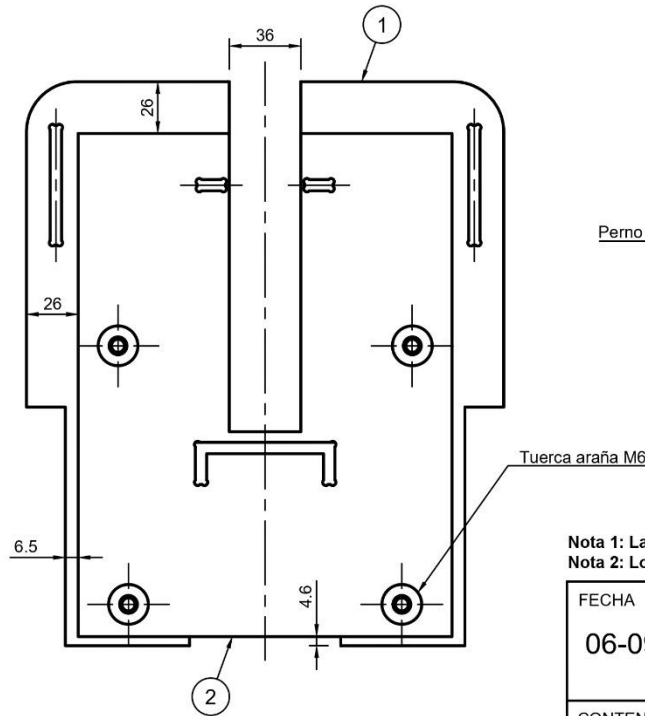
| | | | |
|---|---|---|---|
| FECHA 06-09-2024 |  UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica |  | |
| CONTENIDO Base C portamotor | DIBUJADO POR | | |
| MATERIAL MDF 5.5 [mm] | FRANCO CARABONI BURGOS | | |
| PROYECTO Banco de ensayo de hélices de barco | N° PLANO 4/16 | ESC 1:2 |  |



Nota 1: Los arcos en las esquinas de las ranuras tienen radio R1.59
 Nota 2: Los agujeros de la pieza tienen las dimensiones del corte A-A

| | | | | | |
|--|--|---|-------------------------|---|---|
| FECHA 06-09-2024 | |  UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica | |  | |
| CONTENIDO Sobrebase C | | | DIBUJADO POR | | |
| MATERIAL MDF 5.5 [mm] | | | FRANCO CARABONI BURGOS | | |
| PROYECTO Banco de ensayo de hélices de barco | | | N° PLANO 5/16 | ESC 1:2 |  |

Ensamble bases electronica

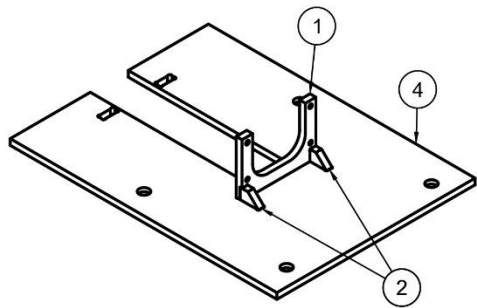


Vista isométrica ensamble

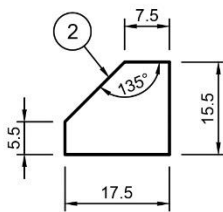
Nota 1: La pieza 1 se une adhesivamente a la 2 según las medidas en el ensamble
 Nota 2: Los pernos son puntos de agarre para retirar la base entera

| N° PIEZA | CANT. | DESCRIPCIÓN |
|----------|-------|-----------------------|
| 4 | 4 | Perno argolla M6 x 40 |
| 3 | 4 | Tuerca araña M6 |
| 2 | 1 | Sobrebase C |
| 1 | 1 | Base C portamotor |

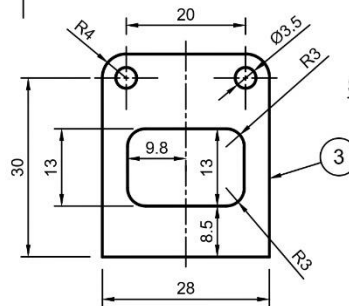
| | | |
|---|---|---|
| FECHA 06-09-2024 |  UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica |  |
| CONTENIDO Ensamble bases electrónica | DIBUJADO POR FRANCO CARABONI BURGOS | |
| MATERIAL - | PROYECTO Banco de ensayo de hélices de barco | N° PLANO 6/16 |
| | | ESC 1:3 |
| | |  |



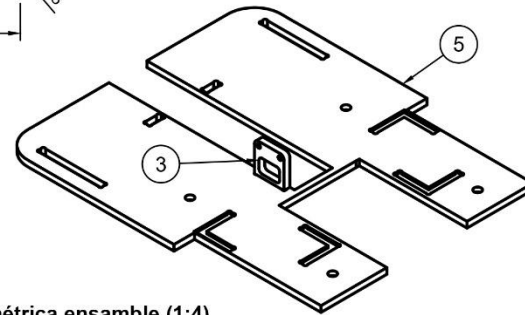
Vista isométrica ensamble (1:4)



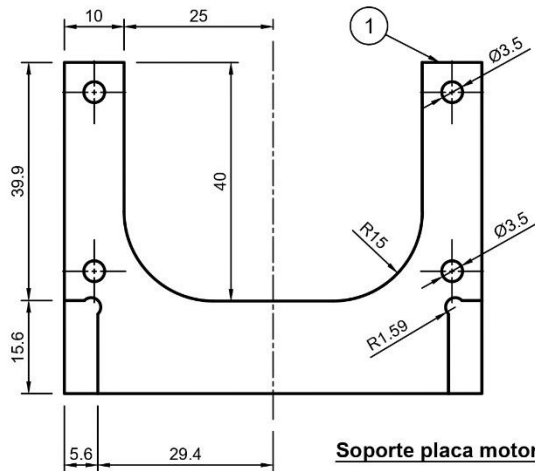
Escuadra soporte placa motor



Soporte encoder



Vista isométrica ensamble (1:4)



Soporte placa motor

| | | |
|----------|-------|------------------------------|
| 5 | 1 | Base C portamotor |
| 4 | 1 | Sobrebase C |
| 3 | 1 | Soporte encoder |
| 2 | 2 | Escuadra soporte placa motor |
| 1 | 1 | Soporte placa motor |
| N° PIEZA | CANT. | DESCRIPCIÓN |

FECHA
06-09-2024



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Mecánica



CONTENIDO
Soporte placa motor y
Soporte encoder

DIBUJADO POR

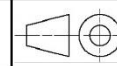
MATERIAL
MDF 5.5 [mm]

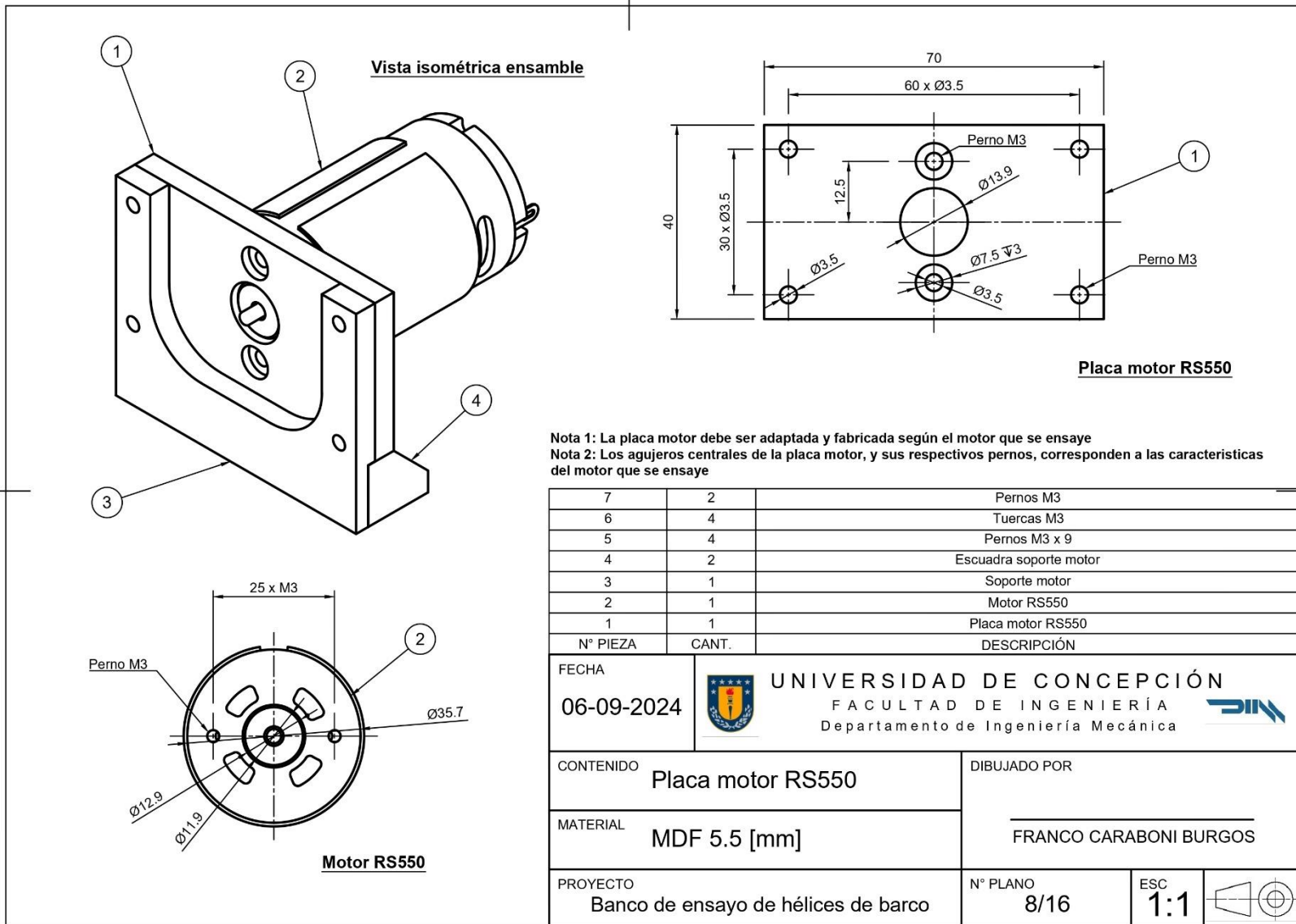
FRANCO CARABONI BURGOS

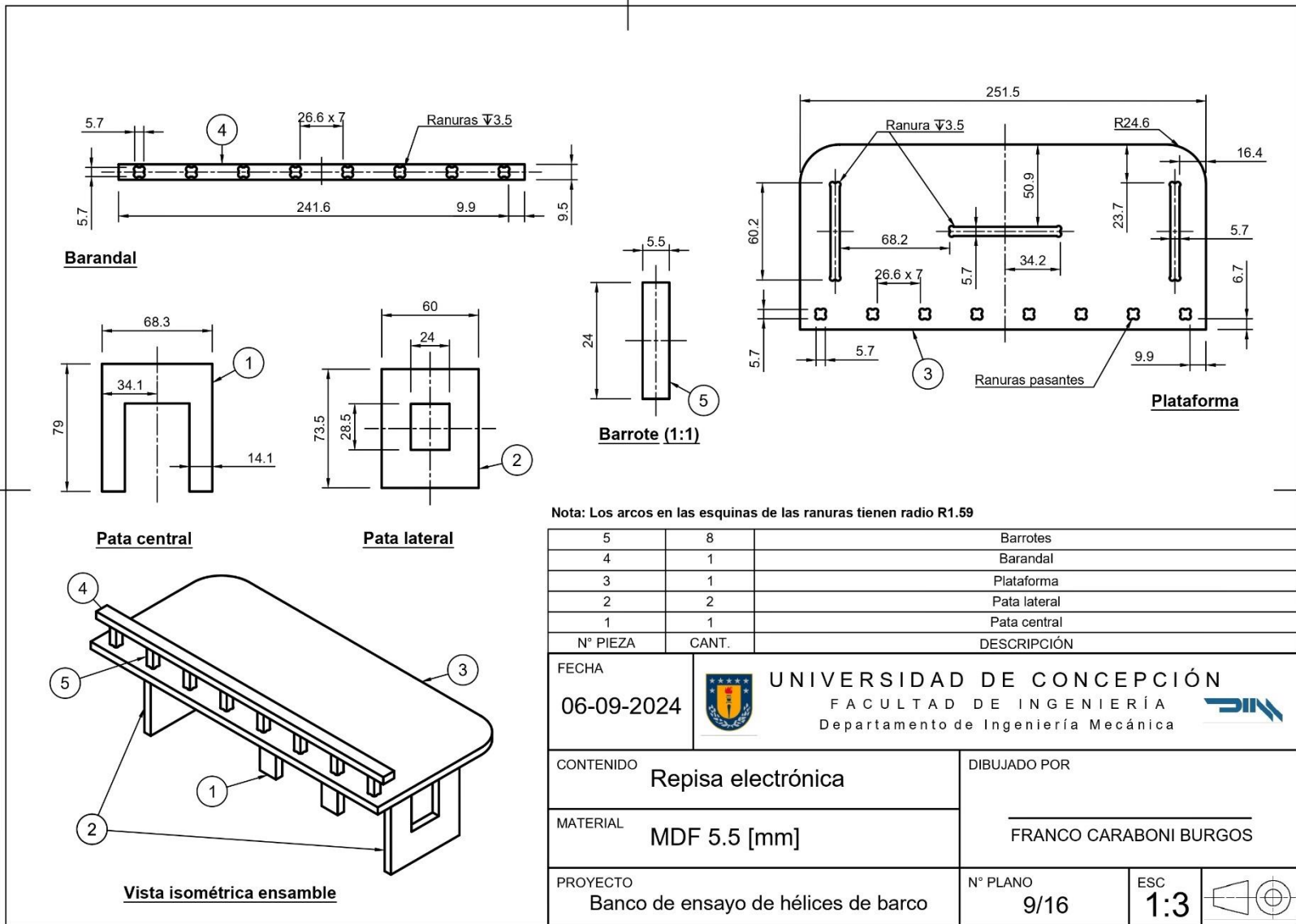
PROYECTO
Banco de ensayo de hélices de barco

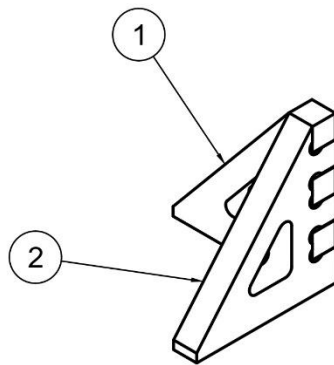
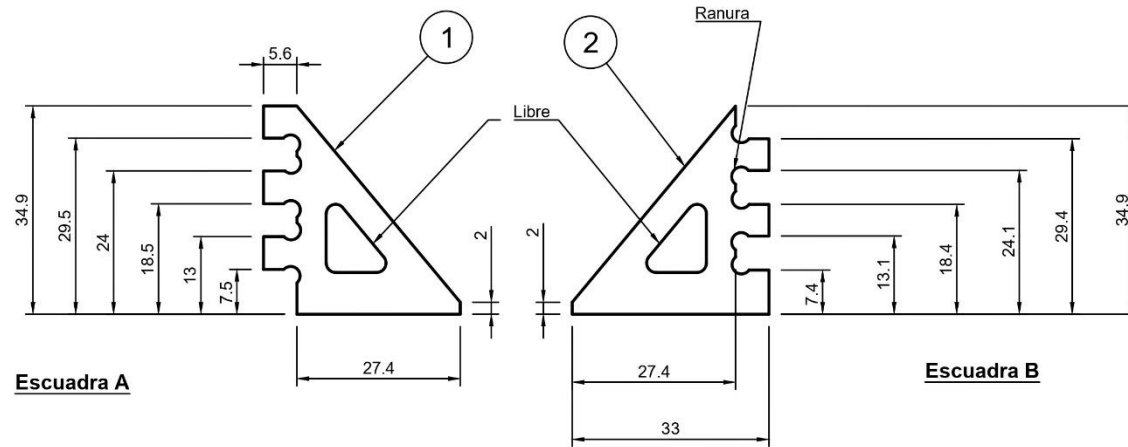
N° PLANO
7/16

ESC
1:1









Vista isométrica ensamble

Nota: Los arcos en las esquinas de las ranuras tienen radio R1.59

| | | |
|----------|-------|-------------|
| 2 | 4 | Escuadra B |
| 1 | 4 | Escuadra A |
| N° PIEZA | CANT. | DESCRIPCIÓN |

FECHA
06-09-2024



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Mecánica



CONTENIDO
Escuadra Baterías

DIBUJADO POR

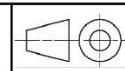
MATERIAL
MDF 5.5 [mm]

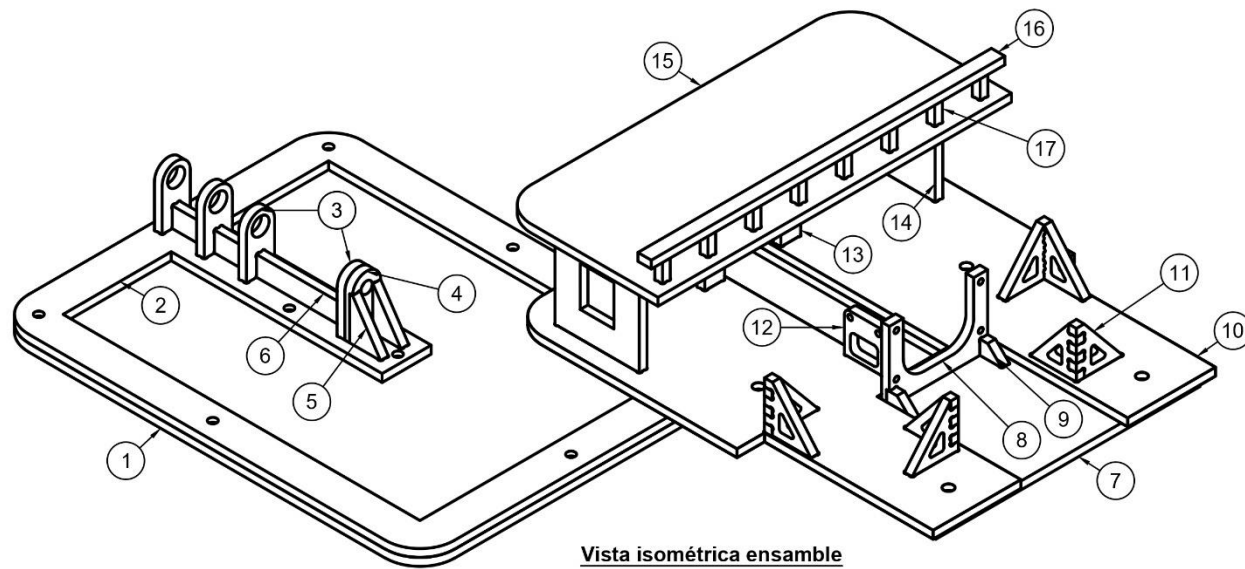
FRANCO CARABONI BURGOS

PROYECTO
Banco de ensayo de hélices de barco

N° PLANO
10/16

ESC
1:1





Vista isométrica ensamble

| | | |
|----------|-------|------------------------------|
| 17 | 8 | Barrote |
| 16 | 1 | Barandal |
| 15 | 1 | Plataforma |
| 14 | 2 | Pata lateral |
| 13 | 1 | Pata central |
| 12 | 1 | Soporte encoder |
| 11 | 4 | Escuadra batería |
| 10 | 1 | Sobrebase C |
| 9 | 2 | escuadra soporte placa motor |
| 8 | 1 | Soporte placa motor |
| 7 | 1 | Base C portamotor |
| 6 | 1 | Guía |
| 5 | 2 | Escuadra tope eje |
| 4 | 1 | Soporte tope eje |
| 3 | 4 | Soporte eje |
| 2 | 1 | Base propulsión |
| 1 | 1 | Base principal |
| N° PIEZA | CANT. | DESCRIPCIÓN |

Nota 1: La pieza 1 va unida adhesivamente al interior de la caja contenedora

Nota 2: Las piezas 3, 4, 5 y 6 se unen adhesivamente con 2 y luego se aperna a 1

Nota 3: Las piezas de la 7 a la 17 son extraíbles de la caja contenedora

FECHA

06-09-2024



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánica



CONTENIDO

Ensamble bases interiores

DIBUJADO POR

FRANCO CARABONI BURGOS

MATERIAL

MDF 5.5 [mm]

PROYECTO

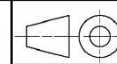
Banco de ensayo de hélices de barco

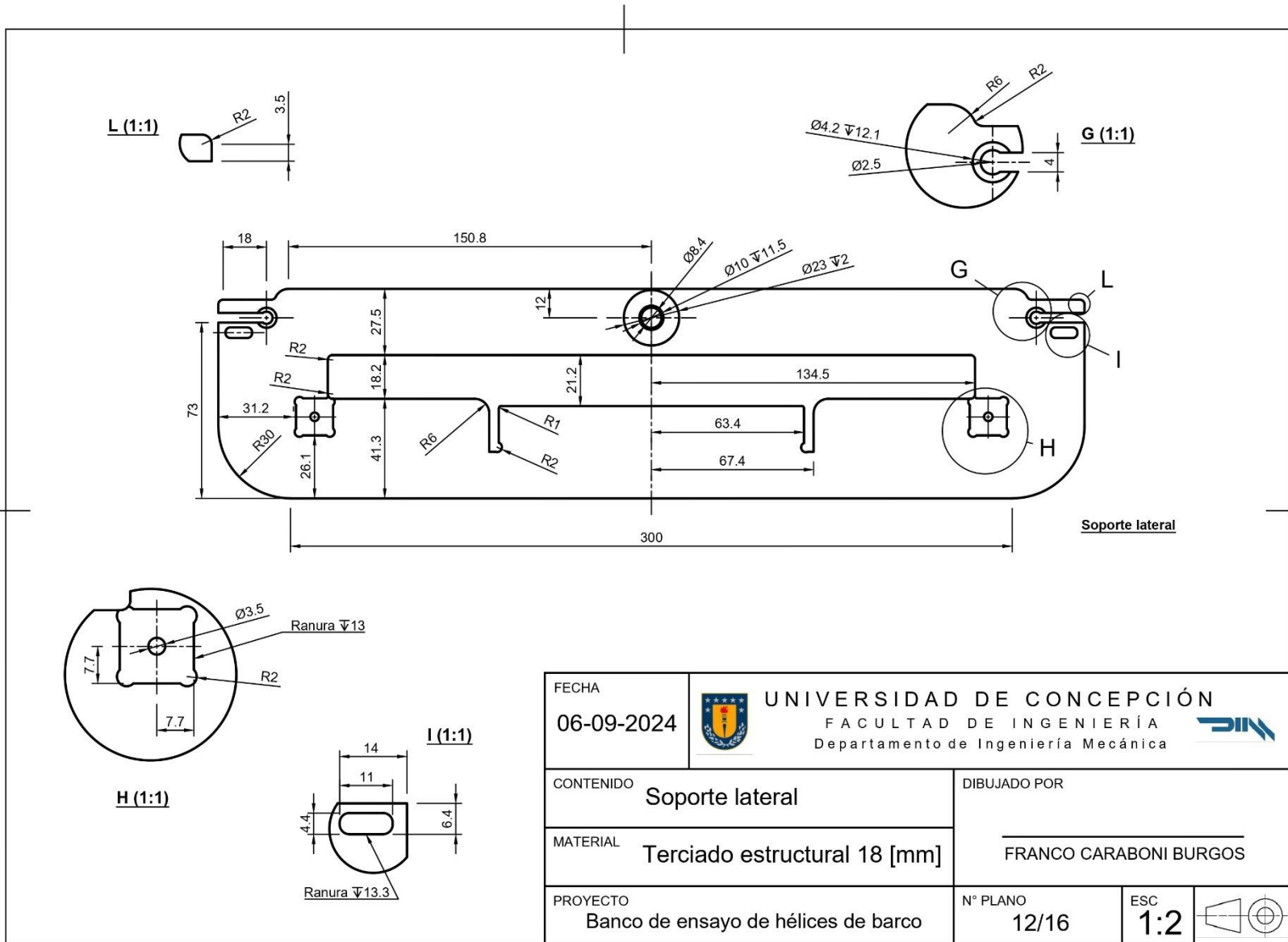
N° PLANO

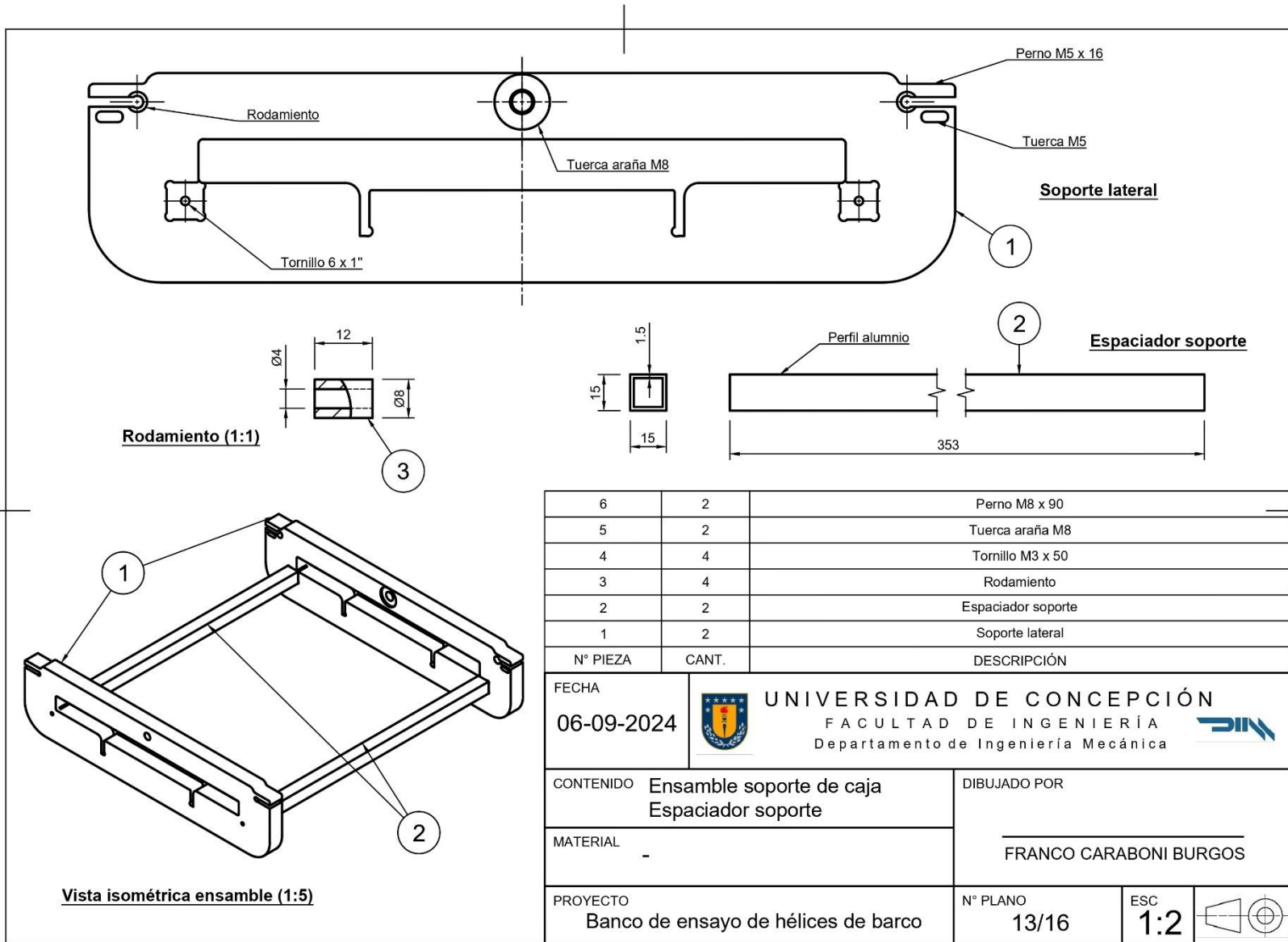
11/16

ESC

1:3







| | | |
|----------|-------|--------------------|
| 6 | 2 | Perno M8 x 90 |
| 5 | 2 | Tuerca araña M8 |
| 4 | 4 | Tornillo M3 x 50 |
| 3 | 4 | Rodamiento |
| 2 | 2 | Espaciador soporte |
| 1 | 2 | Soporte lateral |
| N° PIEZA | CANT. | DESCRIPCIÓN |

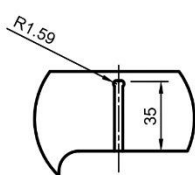
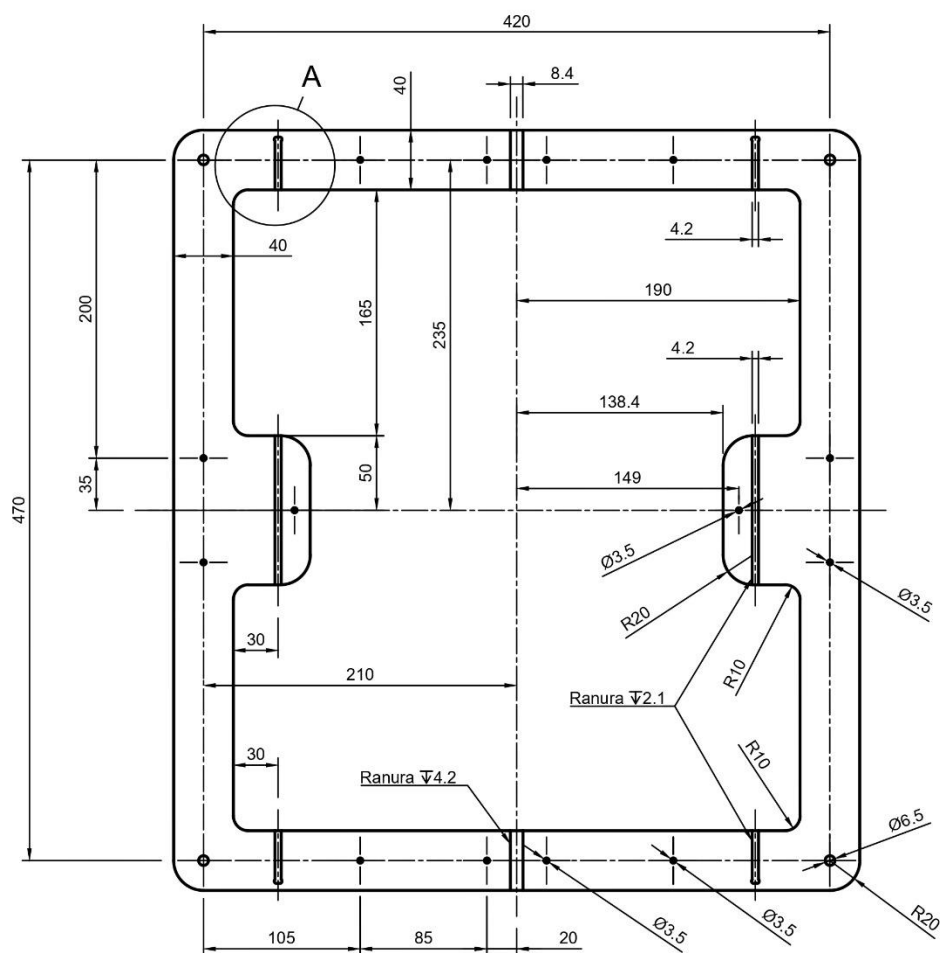
FECHA: 06-09-2024

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Departamento de Ingeniería Mecánica

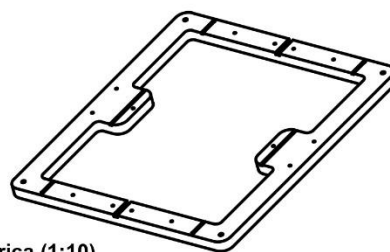



| | | | |
|-----------|--|--------------|------------------------|
| CONTENIDO | Ensamble soporte de caja Espaciador soporte | DIBUJADO POR | FRANCO CARABONI BURGOS |
| MATERIAL | - | | |

| | | | | | | |
|----------|-------------------------------------|----------|-------|-----|-----|---|
| PROYECTO | Banco de ensayo de hélices de barco | N° PLANO | 13/16 | ESC | 1:2 |  |
|----------|-------------------------------------|----------|-------|-----|-----|---|

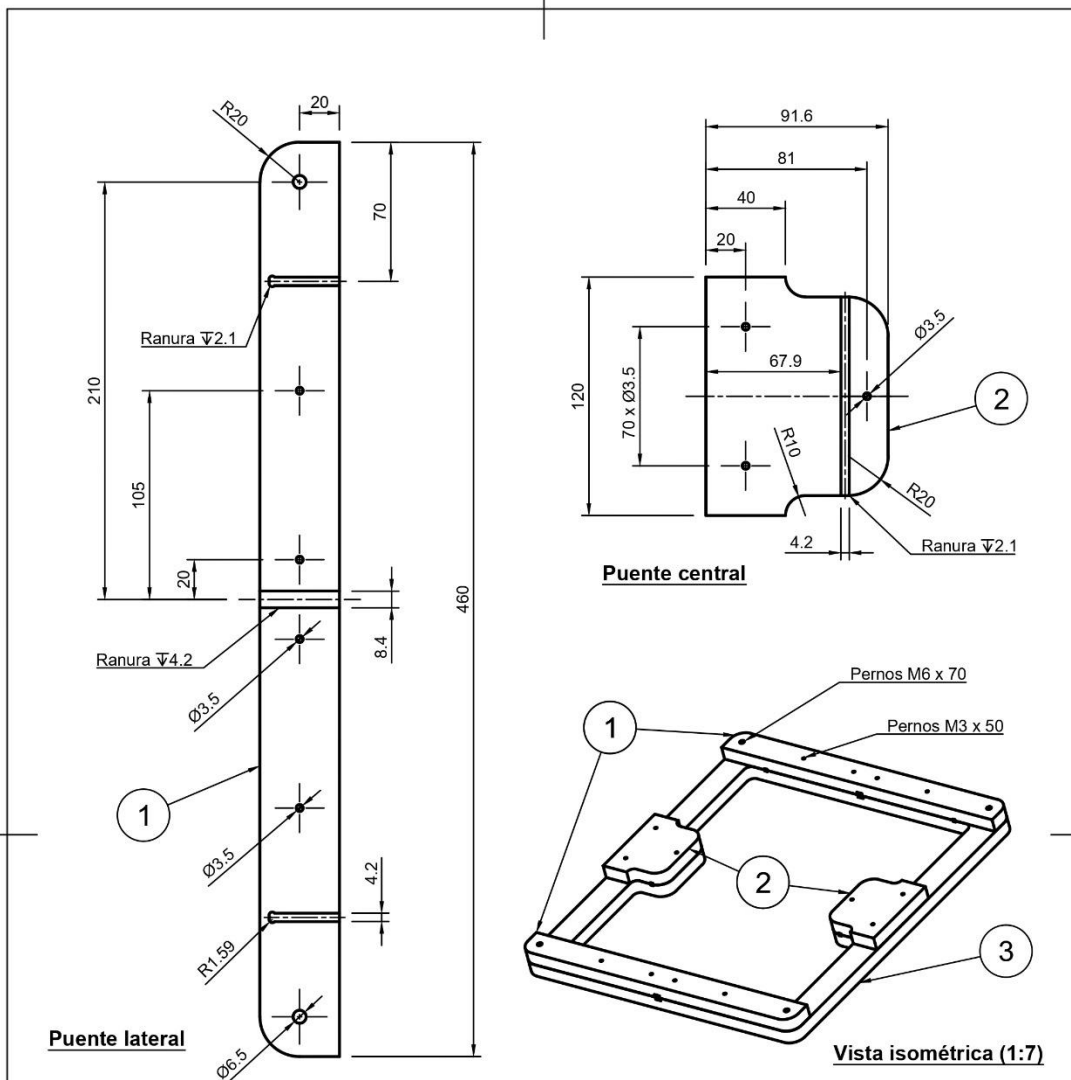


A (1:3)



Vista isométrica (1:10)

| | | | |
|---|--|---|---|
| FECHA 06-09-2024 |  UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Departamento de Ingeniería Mecánica |  | |
| CONTENIDO Marco soporte con rieles | DIBUJADO POR FRANCO CARABONI BURGOS | | |
| MATERIAL Terciado estructural 20 [mm] | | | |
| PROYECTO Banco de ensayo de hélices de barco | N° PLANO 14/16 | ESC 1:4 |  |



| | | |
|----------|-------|-----------------------------|
| 5 | 14 | Tuerca M3 |
| 4 | 14 | Perno M3 x 50 |
| 3 | 1 | Marco de soporte con rieles |
| 2 | 2 | Puente central |
| 1 | 2 | Puente lateral |
| N° PIEZA | CANT. | DESCRIPCIÓN |

FECHA

06-09-2024



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Mecánica



CONTENIDO

Puentes del marco

DIBUJADO POR

FRANCO CARABONI BURGOS

MATERIAL

Terciado estructural 20 [mm]

PROYECTO

Banco de ensayo de hélices de barco

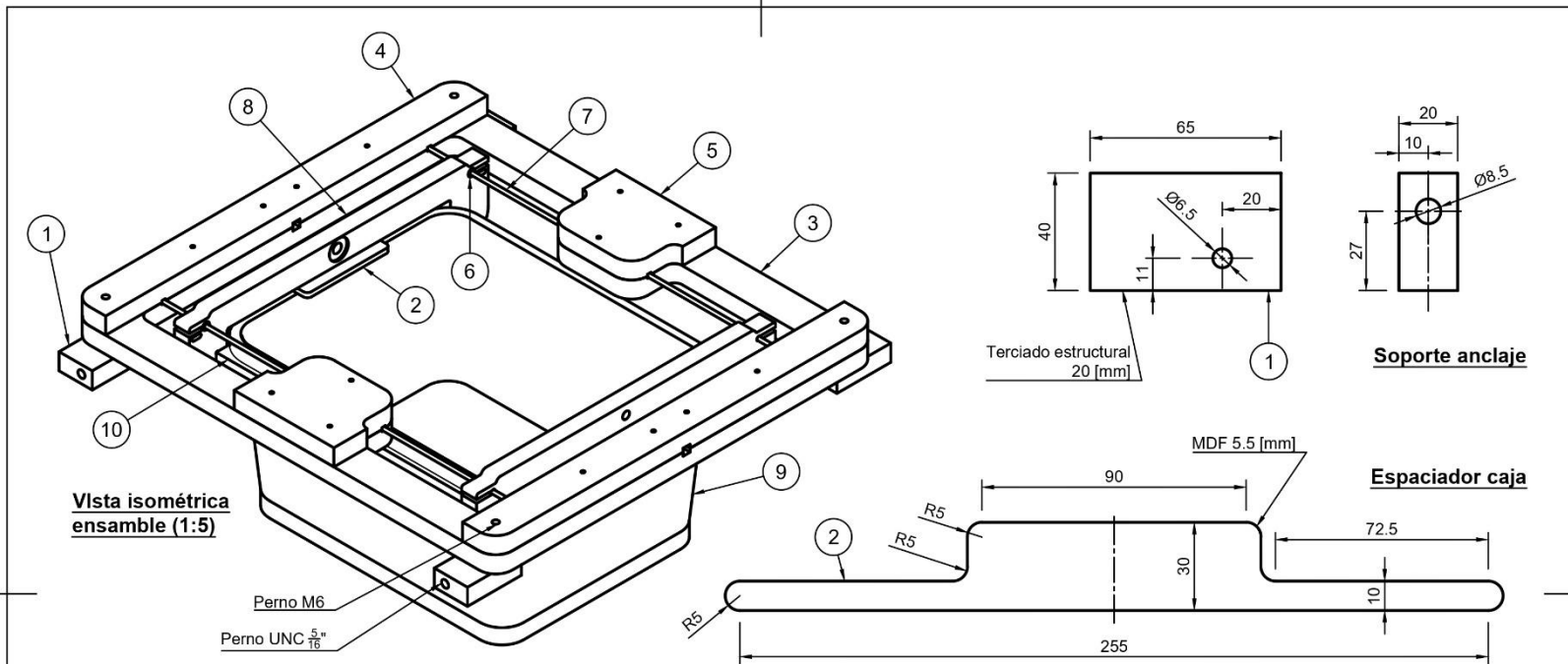
N° PLANO

15/16

ESC

1:3





Vista isométrica
ensamble (1:5)

Perno M6
Perno UNC $\frac{5}{16}$ "

- Nota 1: Los tacos de anclaje 12 van insertos en la superficie de instalación del marco
 Nota 2: Los pernos 11 atraviesan el soporte 1 y se enroscan en los tacos 12
 Nota 3: Los pernos 13 atraviesan 1, 3 y 4, y se enroscan con las tuercas 14
 Nota 4: El espaciador caja va entre la caja y el soporte lateral

| | | |
|----------|-------|--------------------------------------|
| 14 | 4 | Tuerca mariposa M6 |
| 13 | 4 | Perno M6 x 70 |
| 12 | 4 | Taco de anclaje UNC $\frac{5}{16}$ " |
| 11 | 4 | Perno UNC $\frac{5}{16}$ " x 80 |
| 10 | 2 | Espaciador soporte |
| 9 | 1 | Caja contenedora |
| 8 | 2 | Soporte lateral |
| 7 | 2 | Riel |
| 6 | 4 | Rodamiento |
| 5 | 2 | Puente central |
| 4 | 2 | Puente lateral |
| 3 | 1 | Marco soporte con rieles |
| 2 | 2 | Espaciador caja |
| 1 | 4 | Soporte anclaje |
| N° PIEZA | CANT. | DESCRIPCIÓN |

FECHA

06-09-2024



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Mecánica



CONTENIDO
Ensamble marco soporte con rieles
Soporte anclaje, espaciador caja

DIBUJADO POR

FRANCO CARABONI BURGOS

MATERIAL

-

PROYECTO

Banco de ensayo de hélices de barco

N° PLANO

16/16

ESC

1:2

