

# Diseño y construcción de un sistema de propulsión para una embarcación experimental

## Design and construction of a propulsion system for an experimental boat

*Javier Martin Slawiski<sup>(1)</sup>, Ignacio Zaradnik<sup>(2)</sup>, Diego Turconi<sup>(3)</sup>, Mabel Agüero<sup>(4)</sup>*

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza  
jslawiski@unlam.edu.ar

<sup>(2)</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza  
izaradnik@unlam.edu.ar

<sup>(3)</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza  
dturconi@unlam.edu.ar

<sup>(4)</sup> Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional de La Matanza  
maguero@unlam.edu.ar

### **Resumen:**

El agua es un recurso natural limitado y un bien público fundamental para la vida y la salud, por lo tanto, existe la necesidad de realizar estudios periódicos con la finalidad de monitorear su calidad, y de esta forma asegurar una provisión de agua potable que garantice el desarrollo sostenible de la población. Para realizar dicha tarea, los vehículos no tripulados de superficie constituyen una herramienta de gran utilidad para recolectar muestras de agua de ecosistemas acuáticos de difícil acceso. A continuación, se presenta el desarrollo de un sistema motriz

destinado a brindar propulsión a una pequeña embarcación de carácter experimental con la capacidad de recolectar muestras. Por haberse seleccionado una estructura del tipo catamarán para la embarcación, se planteó un sistema basado en dos motores fuera de borda, los cuales fueron desarrollados sobre la base de motores de corriente continua. El sistema de reducción de velocidad, de transferencia y la hélice fueron realizados por medio de impresión 3D. Realizados los ensayos, se logró verificar la correcta elección de la línea de diseño del sistema de propulsión.

**Abstract:**

Water is a limited natural resource and a fundamental public good for life and health. Therefore, there is a need to do periodic studies to monitor its quality, with the aim of ensuring a supply of drinking water that guarantees the sustainable development of the population. To carry out this task, unmanned surface vehicles are a very useful tool for collecting water samples from hard-to-reach aquatic ecosystems. The development of a propulsion system intended to provide propulsion to a small experimental boat with the capacity to collect samples is presented below. Since a catamaran-type structure was selected for the boat, a system based on two outboard motors was proposed, which were developed on the basis of direct current motors. The speed reduction system, transfer system and propeller were made by means of 3D printing. After the tests were carried out, it was possible to verify the correct choice of the propulsion system design line.

**Palabras Clave:** *Ecosistemas acuáticos, motor fuera de borda, impresión 3D*

**Key Words:** *Aquatic ecosystems, outboard motor, 3D printing*

**Colaboradores:** *Oreste Daniel Lupi, Diego Caccavielo, Luciano Salvatore. Fernando Grau, Juan Calabro, Nicolas Rimoldi, Matias Vazquez*

## **I. CONTEXTO**

En el marco del proyecto “Utilización de inteligencia artificial en vehículos no tripulados de superficie para aplicaciones medioambientales”, PROINCE C257, se planteó el diseño de una pequeña embarcación de carácter experimental con la capacidad de recolectar muestras de agua a ser extraídas de un medio acuífero para su posterior análisis. El siguiente trabajo se enfoca en los aspectos de diseño, métodos constructivos y resultados obtenidos del desarrollo del sistema de propulsión desarrollado para la embarcación en cuestión.

## **II. INTRODUCCIÓN**

El agua afecta todos los aspectos del desarrollo y se relaciona con la mayoría de los objetivos de desarrollo sostenible. Además, impulsa el desarrollo económico, apoya los ecosistemas saludables y es fundamental para la vida. Alrededor de 2000 millones de personas en todo el mundo no tienen acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura y 3600 millones no cuentan con servicios de saneamiento seguros [1].

El crecimiento demográfico, el uso intensivo de agua, la mayor variabilidad de las

precipitaciones y la contaminación son factores que se conjugan haciendo peligrar el abastecimiento constante de agua potable. Las situaciones planteadas anteriormente imponen la necesidad de recurrir a sistemas de vigilancia, control y alerta temprana de contaminación permitiendo identificar rápidamente los procesos de deterioro de la calidad del agua. Un ejemplo de este tipo de controles lo encontramos en la cuenca de los ríos y en los lagos del territorio nacional, tal es el caso de la provincia de Córdoba, más precisamente en los lagos San Roque y Los Molinos, responsables de abastecer de agua potable a múltiples localidades de la provincia de Córdoba. Allí, se realizan periódicamente controles con el fin de evaluar la calidad del agua, detectar el origen y las causas de su deterioro [2] [3] [4].

En todos los casos, los controles inician con la recolección de las muestras de agua de forma manual, debiendo desplazarse el investigador hacia cada uno de los puntos para realizar la extracción, finalizando el proceso con el análisis en laboratorio de las muestras extraídas.

Con la finalidad de agilizar el proceso de muestreo se plantea el desarrollo de una embarcación con capacidad de desplazarse de forma autónoma o mediante el uso de un

control remoto pudiendo adentrarse en superficies de agua de donde extraer las muestras a analizar. Para ello, la embarcación debía contar con un sistema de propulsión que le permitiese desplazarse de forma confiable durante el tiempo que durase la travesía de recolección de las muestras previamente planificada.

A continuación, se abordan los aspectos de diseño, desarrollo y los resultados obtenidos del sistema motriz de la embarcación propuesta.

### III. DESARROLLO

El desarrollo de un sistema motriz se encuentra sujeto a las características y especificaciones de la embarcación a propulsar. En función de lo anterior, se planteó el desarrollo de una embarcación tipo catamarán, capaz de alojar en su parte central un sistema de toma de muestras. La figura N°1 muestra la embarcación propuesta. Las partes que componen a la embarcación se encuentran montadas sobre una estructura construida íntegramente por perfiles de aluminio, empleándose tornillería en pulgadas o milímetros, según la disponibilidad, para las uniones. El uso de aluminio permitió la construcción de una

estructura de bajo peso, adecuada para la aplicación planteada.

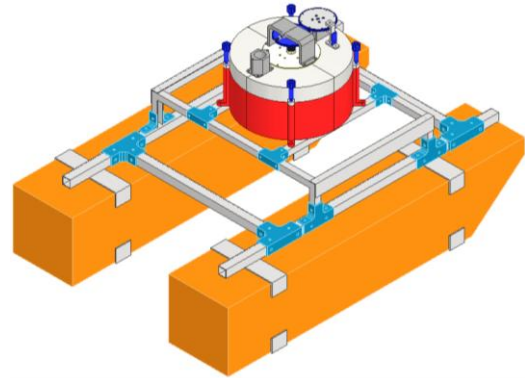


Fig. 1. Embarcación propuesta sin los motores

Para la flotación se utilizaron dos piezas de telgopor de 200 mm (ancho) x 200 mm (alto) x 1000 mm (largo). En función de las dimensiones anteriores, el conjunto de ambas permite desplazar un volumen de agua de 80 litros, esto garantiza una flotabilidad óptima considerando una embarcación cuyo peso se estimó en no más 30 kg. Para la construcción de los flotadores se emplearon dos piezas de ladrillo bloque para techo de losa de 120 mm x 420 mm x 1000 mm. Cada pieza se dividió en dos partes iguales, que posteriormente se unificaron mediante el uso de adhesivo de contacto para obtener la forma deseada.

Para garantizar el correcto desplazamiento y maniobrabilidad se planificó el diseño de un sistema compuesto por dos sistemas motores fuera de borda de idénticas características, ubicados en la popa y a ambos laterales. El

encendido en simultáneo de ambos motores permitiría avanzar y retroceder. Adicionalmente, accionando sólo un motor se podría virar a babor (izquierda) o estribor (derecha) según el sistema motriz accionado. El proceso de desarrollo del sistema de propulsión se compuso por múltiples tareas: consideraciones para la elección de los elementos del sistema propulsión, selección de los motores eléctricos, diseño de la caja de engranajes reductora y la pata motor, diseño de la hélice y la construcción del sistema motriz.

Durante el diseño mecánico se utilizó el software “Autodesk Inventor 2024” versión “Professional” del cual disponemos gratuitamente por formar parte del plantel de investigadores de la UNLaM.

#### *A. Consideraciones*

Para la definición de los parámetros asociados a la hélice, el motor y la caja reductora, se consideró un peso estimado de 30 kg para la embarcación y una velocidad de desplazamiento deseada en el orden de 0,25 a 0,50 m/s. En función de esto se planteó obtener el empuje necesario para lograr dicha velocidad.

Lamentablemente se observó que el cálculo preciso del empuje está asociado a la hélice,

por lo que resultó imposible determinar los parámetros de la misma por medio del cálculo previsto. Por otro lado, los distintos parámetros asociados a la navegación, entre ellos el empuje, son un proceso complejo que involucra múltiples variables, cuyos valores, en muchos casos, se determinan en forma experimental. Así mismo, en la mayoría de los casos, se requiere de software especializado y datos detallados de la hélice y del barco. En función de esto, se decidió definir una hélice y por medio de ecuaciones aproximadas determinar los otros elementos.

#### *B. Hélice*

La hélice es la pieza fundamental que permitirá el correcto desplazamiento de la embarcación. El primer paso consistió en conocer los tipos de hélices y determinar el modelo más adecuado para nuestro caso de aplicación.

Toda hélice se encuentra formada por un conjunto de aspas que giran en torno a un eje y trazan un movimiento rotativo responsable de la propulsión. Las aspas que la forman, generalmente entre 2 y 5, están torcidas de manera idéntica y colocadas alrededor de un núcleo que se sitúa sobre el eje de empuje. Para conseguir el movimiento, se combina la rotación y la traslación a lo largo de su eje

sumergido en el agua. Esto genera una fuerza que permite el impulso de la hélice hacia delante y, por lo tanto, de la embarcación [5]. La aplicación planteada corresponde a una embarcación que debe desplazarse de forma estable a baja velocidad y con el mínimo de vibraciones posible tendiendo a conservar la calidad y la integridad de las muestras de agua extraídas. Para ello, se decidió avanzar con el desarrollo de una hélice de cuatro aspas, con un diámetro total de 170mm, considerándose la más adecuada para una embarcación que necesita mayor fuerza de arrastre a baja velocidad. La figura N°5 presenta el diseño implementado.

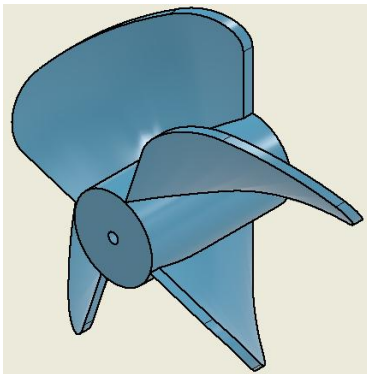


Fig. 5. Hélice de cuatro aspas.

### C. Selección de los motores

Sobre la base de la velocidad deseada, se tomaron las ecuaciones planteadas por la ITTC (International Towing Tank Conference) en el documento “Procedimientos y pautas recomendados –

Test de Resistencia” [6] y se planteó la ecuación N°1.

$$R_T = R_F + R_S \quad (1)$$

Donde:

- $R_T$ : Resistencia Total de la embarcación [N]
- $R_F$ : Resistencia de fricción [N]
- $R_S$ : Resistencia residual [N]

Siendo la resistencia residual la que incluye la resistencia de ola (generada por el movimiento del barco) y otras resistencias menores, se despreció ya que las pruebas se realizarían en un ambiente controlado y siendo la velocidad definida baja. Por lo tanto, la resistencia total de la embarcación se calculó como se detalla en la ecuación N°2, es decir igualando la resistencia total a la de fricción.

$$R_T = C_F * 0,5 * \rho * S * V^2 \quad (2)$$

Donde:

- $C_F$ : Coeficiente de resistencia de fricción
- $\rho$ : Densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]
- $S$ : Área de superficie sumergida [m<sup>2</sup>]
- $V$ : Velocidad [m/s]

Se tomó la densidad del agua como 1000 kg/m<sup>3</sup>, el área de la superficie sumergida

como 0,52 m<sup>2</sup>, la velocidad como 0,5 m/s y el coeficiente de resistencia de fricción como 0,04, lo que dio como resultado una resistencia de 2,6 kg\*m/s [N].

El área sumergida se calculó sobre la base de que la embarcación se sumergió 5 cm con un peso total de aproximadamente 20 kg. El coeficiente de resistencia de fricción es un valor estimado como promedio del coeficiente de fricción del poliestireno expandido en agua, brindados por las inteligencias artificiales (Chatgpt, Gemini y Copilot).

Habiéndose considerado que para tener una velocidad constante el empuje debía ser igual a la resistencia de la embarcación, se empleó la ecuación N°3 para obtener una relación entre el torque del motor y la velocidad de giro del mismo (ecuación N°4), la cual fue extraída de [7].

$$\eta_0 = E * V / 2 * \pi * n * T \quad (3)$$

$$n * T = E * V / 2 * \pi * \eta_0 \quad (4)$$

Donde:

- $\eta_0$ : Eficiencia de la propulsión en aguas abiertas
- E: Empuje
- V: Velocidad de la embarcación
- n: Velocidad de rotación de la hélice
- T: Torque de la hélice

Para obtener la relación se tomó una eficiencia de la propulsión del orden del 75% (es decir 0,75), un empuje de 2,6 N y una velocidad de 0,5 m/s, dando como resultado una relación entre el torque y la velocidad de giro del orden de 0,3 N\*m/s.

Por lo tanto, la selección de los motores se centró en la búsqueda de un modelo de reducidas dimensiones y bajo consumo, capaz de entregar la relación torque-rpm calculada. A lo anterior, se le suma la necesidad de alimentar a los motores mediante el uso de baterías de 12/24 V de electrolito absorbido.

El resultado fue la adquisición de dos motores de corriente continua modelo RS-550PC-7527 [8], capaces de erogar un torque de 47,8 mN.m a 16130 rpm, lo que brindaba una relación de aproximadamente 13 N\*m/s, más que adecuada para la aplicación. La figura N°2 muestra el torque en función a la corriente, la eficiencia y la velocidad de giro del motor adoptado. La recta N, con pendiente negativa, representa la relación torque/velocidad de giro. En el gráfico se identifica el punto de trabajo en función de la velocidad mencionada. Sobre la base de estas características de los motores eléctricos, se continuó con el diseño de la caja de engranajes, pata motor y la hélice.



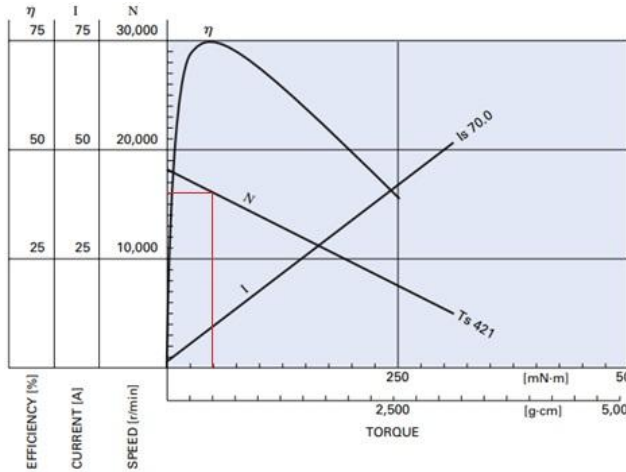


Fig. 2. Torque en función de la velocidad de giro rpm

#### D. Caja de Engranajes y Pata Motor

La caja de engranajes y la pata motor son los elementos que se encuentran entre el motor eléctrico y la hélice. La función de la caja de engranajes consiste en adaptar la velocidad de giro del motor a la velocidad de giro definida para la hélice. Por otro lado, la pata motor cumple la función de conectar la caja de engranajes con la hélice.

El diseño de la caja de engranajes se basó en un conjunto de cuatro engranajes con un coeficiente de reducción de giro de 132 veces permitiendo obtener una velocidad final de las hélices de 122,2 rpm y un torque de 6,3 N.m. En la figura N° 3 se observa la caja de engranajes y el motor eléctrico.

A continuación, se detallan las características de los engranajes que integran la caja reductora de velocidad de giro:

- Engranaje E1 (Simple). Motor.  $N_1=10$  dientes. Coeficiente de engrane  $CE_{1-2}$ : 11.
- Engranaje E2 (Doble).  $N_{2-1}$ : 110,  $N_{2-3}$ : 20. Coeficiente de engrane  $CE_{2-3}$ : 5.
- Engranaje E3 (Doble).  $N_{3-2}$ : 100,  $N_{3-4}$ : 30. Coeficiente de engrane  $CE_{3-4}$ : 2,4.
- Engranaje E4 (Salida) (Simple).  $N_4$ : 72.

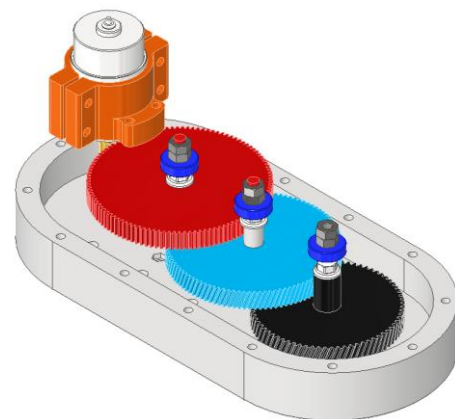


Fig. 3. Vista interna de la caja de engranajes

Las ecuaciones N°5 y N°6 corresponden al cálculo de torque y la velocidad de giro del engranaje de salida E4.

$$T_{Salida} = CE_{1-2} * CE_{2-3} * CE_{3-4} * T_{motor} \quad (5)$$

$$RPM_{Salida} = RPM_{Motor} / (CE_{1-2} * CE_{2-3} * CE_{3-4}) \quad (6)$$



En lo que respecta a la pata motor, como se muestra en la figura N°4, ésta consiste en una columna compuesta en su parte inferior por un conjunto de dos engranajes biselados, relación 1 a 1.

Su eje vertical se conecta con el engranaje de salida de la caja reductora, mientras que, su eje horizontal permite conectar con la hélice. En función de la relación de engrane mencionada anteriormente, la hélice dispondrá del torque y la velocidad de giro entregadas a la salida de la caja de engranajes.

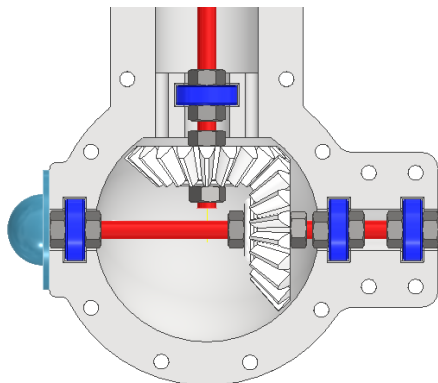


Fig. 4. Vista interna de la pata motor

En lo que respecta a la construcción de la caja de engranajes y la pata motor, los engranajes se encuentran montados sobre ejes contruidos mediante el uso de varilla roscada diámetro 6 mm. Así mismo, dichos ejes se apoyan sobre rodamientos tipo 626-Z

los cuales se adaptan a los requerimientos mecánicos del sistema.

Durante el diseño de ambas partes se hizo especial foco en conseguir el mayor grado de estanqueidad posible contra el ingreso de agua, teniendo en cuenta el ambiente de funcionamiento. Por ello, se generaron amplias superficies de contacto entre las piezas y múltiples puntos de ajuste.

#### *E. Construcción y ensamblado*

La construcción del sistema motriz compuesto por la caja de engranajes/pata motor y la hélice fue posible gracias al uso de la Impresión 3D. El término anterior engloba varios métodos de fabricación, en nuestro caso, por cuestiones de costos y accesibilidad se recurrió al “Modelado por Deposición Fundida (FDM)”.

Una impresora FDM funciona mediante la extrusión de un filamento plástico capa por capa. Las características mecánicas de la pieza fabricada dependerán de la elección del polímero y de la configuración de los parámetros de impresión tales como la altura entre capas, temperatura de impresión, grosor de pared entre otros.

En nuestro proyecto, se utilizaron dos tipos de materiales, ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) para la fabricación de

los engranajes y PETG (Polietileno Tereftalato de Glicol) para la impresión de las piezas estructurales de la caja de engranajes/pata motor y la hélice.

Ambos materiales resultan aptos para la producción de piezas sometidas a esfuerzos mecánicos, aunque, el ABS posee mejores prestaciones, ofreciendo mayor dureza, resistencia al impacto, resistencia a la flexión.

A pesar de las ventajas que ofrece el ABS, este resulta más difícil de trabajar que el PETG.

El ABS requiere mayor temperatura de fusión y es muy sensible a los cambios de temperatura del ambiente de impresión, pudiendo generarse fallas que lleven a la pérdida de la pieza fabricada. Por lo anterior, se recurrió al uso de una Impresora Creality modelo Ender-6 con cerramiento acrílico en sus laterales garantizando un ambiente óptimo para el trabajo con ABS.

En referencia a los parámetros de impresión, resulta necesario mencionar la altura entre capas y el diámetro de la boquilla. Los parámetros anteriores se ajustan conjuntamente, resultando el espesor entre capas una fracción del diámetro de la boquilla. Para conseguir piezas resistentes se suele adoptar un espesor entre capas menor al 50 % del diámetro de la boquilla permitiendo una correcta adherencia entre las capas de la pieza

fabricada. Por otro lado, la relación entre diámetro de boquilla y altura entre capas determina no sólo la resistencia mecánica de las piezas sino también el tiempo que demanda la fabricación de estas. Diámetros de boquilla mayores permiten reducir los tiempos de fabricación en perjuicio del grado de definición y la calidad de la pieza fabricada, por otro lado, menor diámetro permite resolver piezas con mayor nivel de detalle.

En lo que respecta a la fabricación de los engranajes, se utilizó una boquilla de 0,4 mm y un espesor entre capas de 0,1 mm, resultando piezas con una correcta adherencia entre capas y una adecuada resistencia mecánica.

Para la fabricación de las piezas de gran tamaño, tales como carcasas de la caja de engranajes y pata motor, se recurrió al uso de una boquilla de 0,6 mm diámetro y un espesor entre capas de 0,2 mm. Lo anterior permitió reducir notablemente los tiempos de producción sin resignar calidad, resistencia y adherencia entre capas de las piezas finales.

Durante el proceso de ensamble se prestó principal atención a la estanqueidad de la pata motor, para ello, previo al armado, en la superficie de contacto de ambas mitades se colocó “Sellador forma junta tipo Loctite” con el objetivo de formar una junta y evitar el ingreso de agua. Finalmente, se utilizó tornillería milimétrica para sujetar ambas mitades. La figura N°

6 muestra una unidad motriz completamente ensamblada.



Fig. 6. Sistema de Propulsión - Imagen del prototipo construido

#### **IV. PRUEBAS**

En las figuras N°7 y N°8 se presenta el diseño proyectado y el prototipo de embarcación finalmente construido. Con el objetivo de verificar el diseño del sistema de propulsión se realizaron pruebas de maniobrabilidad y velocidad de desplazamiento. Todas las pruebas se desarrollaron en las instalaciones del Natatorio de la Universidad Nacional de La Matanza tal como se muestra en la figura N° 8. Allí, se realizaron las pruebas bajo un ambiente controlado pudiendo verificar inicialmente la flotabilidad del sistema completo. A continuación, se realizó el encendido progresivo de ambos motores verificando el avance y retroceso de la embarcación. Finalmente, se realizaron pruebas de maniobrabilidad, observando el

correcto viraje de la embarcación, tanto a babor como a estribor.

A continuación, se midió la velocidad de desplazamiento, obteniéndose una velocidad máxima de 0,3 m/s lo cual se encuentra dentro del rango de velocidad planteada durante la fase de diseño.

Una vez finalizadas las pruebas anteriores procedimos con el desarme de ambas unidades motrices para evaluar el grado de estanqueidad obtenido. Allí, pudimos detectar el ingreso de una mínima cantidad de agua devenida del uso de la varilla roscada para la construcción del eje de las hélices.

#### **V. CONCLUSIONES**

Se logró el diseño de un sistema de propulsión para una embarcación experimental. Las pruebas realizadas permitieron verificar la correcta elección de la línea de diseño, encontrándose acorde a las dimensiones y características de la embarcación planteada. A pesar de esto, con el objetivo de aumentar la confiabilidad del sistema, evitando el ingreso de agua en las unidades motrices y reduciendo el desgaste de las partes mecánicas, planteamos a futuro la utilización de conjuntos motor/hélice específicamente diseñados para el uso en ambientes acuáticos sumergidos. Dichas

unidades se caracterizan por utilizar motores tipo brushless de imanes permanentes, en contrapartida de los motores a escobillas utilizados durante la presente aplicación. Lo anterior generará un aumento del período de la vida útil, menor desgaste, reducción de tamaño y peso traduciéndose en un aumento de autonomía del sistema en general.

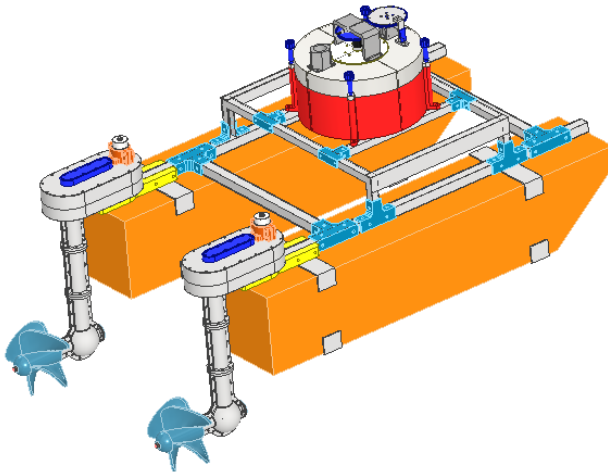


Fig. 7. Ensamble de la embarcación – Imagen del diseño proyectado

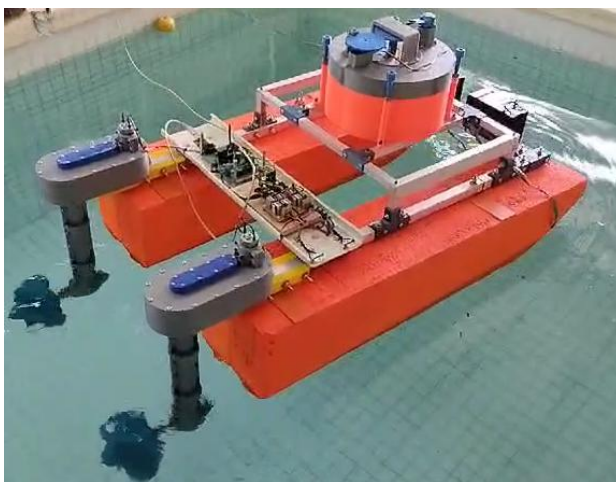


Fig. 8. Ensamble de la embarcación – Pruebas de funcionamiento

## V. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Bank Group, "Water - Overview," 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldbank.org/en/topic/water/overview>. Accedido el 3 de noviembre de 2024.
- [2] Acumar, "Realizamos un nuevo estudio de calidad de agua superficial de la Cuenca," oct. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.acumar.gob.ar/prensa/realizamos-nuevo-estudio-la-calidad-agua-superficial-la-cuenca/>. Accedido el 3 de noviembre de 2024.
- [3] Instituto Nacional del Agua (INA), "La calidad del agua del embalse San Roque capta todas las miradas," jun. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/la-calidad-del-agua-del-embalse-san-roque-capta-todas-las-miradas>. Accedido el 3 de noviembre de 2024.
- [4] *La Voz*, "Lago Los Molinos: el proceso de deterioro ambiental se sigue acentuando," jun. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/lago-los-molinos-el-proceso-de-deterioro-ambiental-se-sigue-acentuando/>. Accedido el 3 de noviembre de 2024.

[5] Centramar, "¿Qué tipos de hélices para barcos existen?," [En línea]. Disponible en: <https://www.centramar.es/tipos-de-helices-de-barcos/>. Accedido el 6 de octubre de 2024.

[6] ITTC, "Recommended Procedures and Guidelines – Test Resistance," 2011. [En línea]. Disponible en: <https://itc.info/media/1217/75-02-02-01.pdf>. Accedido el 15 de diciembre de 2024.

[7] J. S. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2nd ed. Elsevier, 2007, pp. 89–94.

[8] MABUCHI MOTOR CO. LTD, "RS-550PC/VC," [En línea]. Disponible en: [http://www.robotstorehk.com/rs\\_550pcvc.pdf](http://www.robotstorehk.com/rs_550pcvc.pdf). Accedido el 15 de diciembre de 2024.

**Recibido:** 2024-09-16

**Aprobado:** 2024-12-19

**Hipervínculo Permanente:** <https://doi.org/10.54789/reddi.9.2.4>

**Datos de edición:** Vol. 9 -Nro. 2 -Art. 4

**Fecha de edición:** 2024-12-30

