

Catamarán Guazú: Embarcación Autónoma para Monitoreo de Espejos de Agua y Aplicaciones de Robótica Acuática

Santiago Pierini¹, Claus Rosito¹, Gabriel Torre^{1,2}, Ivan Jourdan¹, Pedro Segura³, Ignacio Mas^{1,4}, Juan Giribet^{1,4}

¹Laboratorio de Inteligencia Artificial y Robótica - Universidad de San Andrés, Buenos Aires, Argentina.

²Instituto de Ingeniería Biomédica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

³Nordelta S.A., Buenos Aires, Argentina

⁴CONICET - Argentina

Resumen—En este trabajo se presenta el diseño y construcción de una embarcación con el objetivo de servir como plataforma para el desarrollo e implementación de algoritmos de navegación autónoma. Se realiza un diseño buscando obtener una autonomía extendida utilizando un sistema eléctrico con capacidad de carga solar. Finalmente se valida el diseño naval, mecánico y eléctrico realizando ensayos de flotación y de conducción comandando la embarcación por radio control.

I. INTRODUCCIÓN

Los vehículos de superficie no tripulados (USV) han ganado relevancia en el ámbito náutico debido a su eficiencia y capacidad para operar en condiciones desafiantes sin tripulación a bordo. Su importancia se ve impulsada por los avances en tecnologías de baterías y motores eléctricos de la última década y la creciente demanda en sectores como la defensa, investigación y conservación de flora y fauna. Estos vehículos ofrecen una alternativa segura y económica para misiones que podrían ser muy riesgosas o directamente no factibles para vehículos tripulados.

Gran parte de los desarrollos recientes en USVs se centran en misiones de corta duración y de autonomía limitada [1]. BlueRobotics [2] provee un USV para fines de investigación y desarrollo, pero de dimensión reducida y con poca área para paneles solares, limitando su autonomía. Liquid Robotics Wavewalker [3] provee un USV autopropulsado que utiliza energía de las olas para generar electricidad, ofreciendo una autonomía prácticamente ilimitada y la capacidad de operar en condiciones de alto oleaje, pero requiere una gran profundidad mínima para operar. Del mismo modo, el Saildrone Surveyor [4] es un USV propulsado por viento y energía solar, ideal para estudios a largo plazo en áreas remotas pero tampoco es apto para operar en áreas con aguas poco profundas y vientos moderados a altos.

En nuestro país, se han desarrollado este tipo de vehículos, con diseños que demuestran capacidades de navegación y evasión autónoma de obstáculos [5], [6] o coordinación multirobot [7], y sigue siendo un tema actual de investigación y desarrollo. El presente desarrollo se enmarca en las actividades del Laboratorio de Inteligencia Artificial y Robótica de la Universidad de San Andrés en conjunto con Nordelta S.A. En este

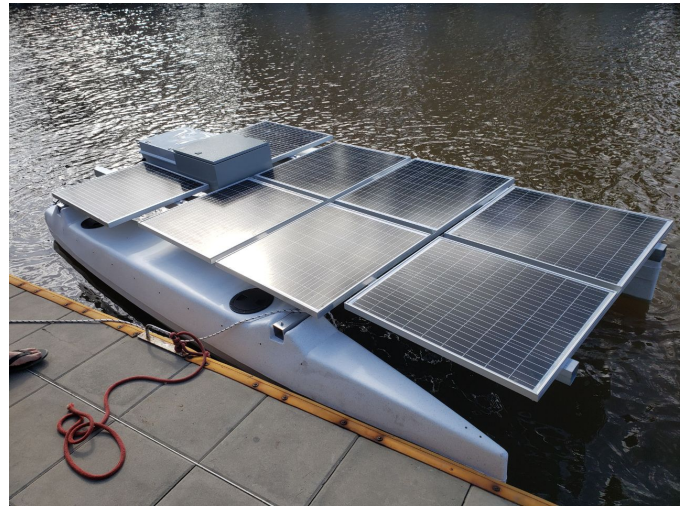


Figura 1. Vista panorámica de la embarcación

proyecto se puso especial énfasis en crear una plataforma que sirva como base para futuros ensayos de sensores, algoritmos y conceptos de misión como por ejemplo navegación autónoma, batimetría o control coordinado [8] y que a la vez posea una gran autonomía, posibilitando misiones de larga duración.

Para cumplir con este objetivo se seleccionó la configuración catamarán, ya que para naves de eslora y manga similares es la configuración que minimiza la masa mientras maximiza la eficiencia hidrodinámica y la estabilidad, permitiendo optimizar la autonomía y proveer una plataforma estable frente al oleaje [9]. Adicionalmente, la configuración catamarán permite minimizar el perfil, reduciendo la resistencia al viento en comparación con configuraciones monocasco, ayudando a optimizar la estabilidad y la autonomía. Bajo estas consideraciones se avanzó en un diseño que cuenta con dos pontones en paralelo unidos por una estructura central. Se tienen dos pares de motores, cada uno en la parte posterior de cada pontón, permitiendo realizar un control diferencial de la embarcación. La superficie superior del vehículo está cubierta por paneles solares, que en conjunto con la batería

y su sistema de regulación y carga asociados con el fin de proveer una elevada capacidad de autonomía para la nave.

II. DISEÑO

El sistema eléctrico presenta decisiones de compromiso al momento de realizar un diseño de un vehículo autónomo con paneles solares [10]. En primer lugar, cuanto mayor sea el área disponible de celdas solares, mayor será la potencia disponible de estos pero también mayor será el tamaño y el peso del vehículo. En segundo lugar, cuanto mayor sea la capacidad de la batería, mayor será la autonomía pero también será mayor el peso. Teniendo en cuenta estos compromisos se inicia la etapa de diseño con dos componentes fijados, los pontones y los motores eléctricos por cuestiones de disponibilidad en el mercado y de presupuesto.

Se utiliza el pontón Fun Cats de SIT ON TOP [11] de fabricación local.

Datos por cada pontón:

- Fabricante: SIT ON TOP
- Modelo: Fun Cats
- Eslora (largo): 3,4 M
- Manga (ancho): 0,35 M
- Alto: 0,50 m
- Peso: 25 kg
- Capacidad de carga máxima: 100 kg

Los motores eléctricos corresponden al modelo T500 de Blue Robotics [2]. Estos motores se adquieren con su controlador electrónico de velocidad (ESC) propietario. Se colocan dos motores por pontón, obteniendo un total de cuatro motores.

Datos de cada motor:

- Fabricante: Blue Robotics
- Modelo: T500
- Potencia máxima: 1044 W
- Empuje máximo: 16,1 kgf
- Corriente máxima: 43,5 A
- Tensión de alimentación (ESC): 7-26 V

Se estima el consumo de los motores ya que estos representan la parte mas significativa de la carga sobre el sistema eléctrico. Se considera que el funcionamiento promedio de los motores va a ser cuando estos generen la mitad del empuje máximo posible. Según los datos provistos por el fabricante [2], el valor de corriente para este valor de empuje es de 13,88 A por motor, por lo que el consumo promedio sera de 55,52 A para cuatro motores. Además se tiene en consideración que el valor máximo de corriente que puede solicitar cada motor es de 43,5 A a máxima potencia por hasta un minuto, por lo que la corriente pico podrá ser de 174 A. La tensión de alimentación del ESC (controlador del motor) debe estar en el rango de 7 V a 26 V [2]. Cuanto mayor sea esta tensión, mayor potencia podrá transmitirse a los motores. Por estas condiciones, se decide utilizar una batería con una tensión nominal de 24 V.

Debido a la dificultad de acceso rápido al vehículo durante el uso, ya que este estará navegando, se opta por una batería con celdas LiFePO4 debido su perfil de mayor seguridad

comparado con otras baterías basadas en Litio [12]. De esta manera se busca reducir el riesgo de incendio por problemas con la batería. Se encarga la construcción de una batería con celdas LiFePO4 de 24V y 200Ah a un fabricante local [13], esta estará compuesta principalmente por 16 celdas que se conectaran como dos paralelos de 8 celdas en serie cada uno.

Datos de la batería:

- Tecnología: LiFePO4
- Fabricante: Electroconversiones
- Capacidad nominal: 200 Ah
- Corriente de descarga nominal: 1 C
- Corriente de carga: 0,5 C
- Tensión nominal por celda: 3.2 V
- Peso por celda: 1,8 kg

Teniendo en consideración que la descarga máxima recomendada (DOD por sus siglas en inglés) de la batería es del 80 % de su capacidad y dejando 5 % de margen por una posible pérdida de capacidad por degradación [12], se tienen disponibles para consumo 150 Ah, con un consumo constante al valor estimado se obtiene una duración de 2 horas y 42 minutos de uso si solo se tiene en cuenta la capacidad de la batería como fuente de energía.

Para el diseño del sistema de paneles solares, se utiliza un regulador de carga del tipo seguidor de punto de máxima potencia (MMPT por sus siglas en inglés). Esta tecnología de reguladores adaptan su impedancia de carga para que el conjunto de paneles trabaje en el punto de máxima transferencia de potencia. Este componente regula la tensión que recibe del conjunto de paneles solares al valor necesario para la carga de la batería. Es importante destacar que el voltaje de carga solo puede ser un valor menor que la tensión que generan los paneles solares.

En la figura 2 se muestra de manera ilustrativa una curva de tensión contra corriente de una celda solar, aquí se puede observar el punto de máxima transferencia de potencia.

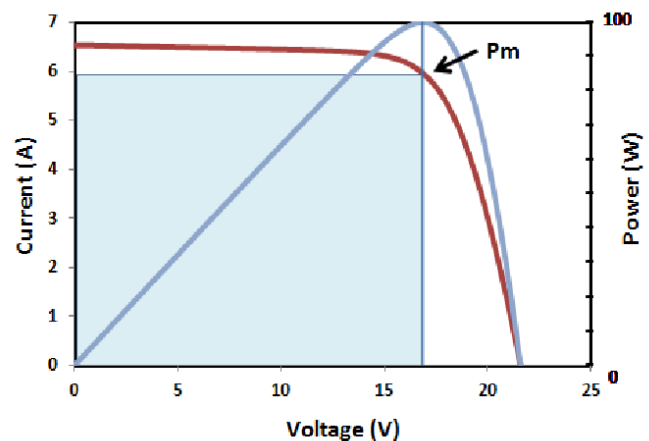


Figura 2. En esta figura se muestra en rojo la curva de corriente contra tensión y en celeste la curva de potencia contra tensión de una celda solar, donde PM es el punto de máxima potencia [14].

Esta curva se modifica según las condiciones de trabajo en las que se encuentre la celda solar. Las variables que alteran significativamente el funcionamiento de estas celdas son la temperatura de trabajo y el valor de irradiancia solar (potencia incidente por unidad de superficie). Las figuras 3 y 4 muestran los efectos de la temperatura y la irradiancia sobre la curva de la figura 2.

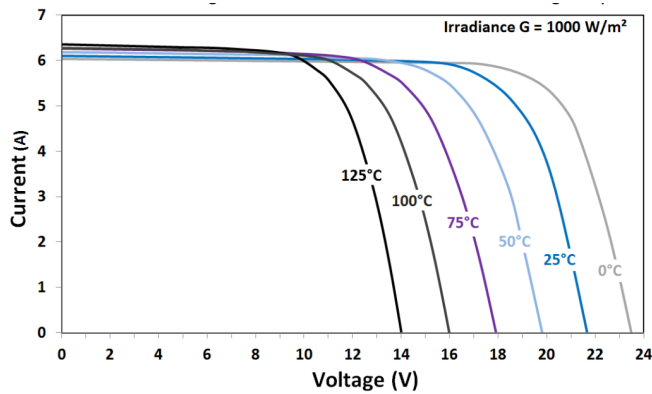


Figura 3. Efecto del cambio de temperatura en las condiciones de trabajo de una celda solar [14].

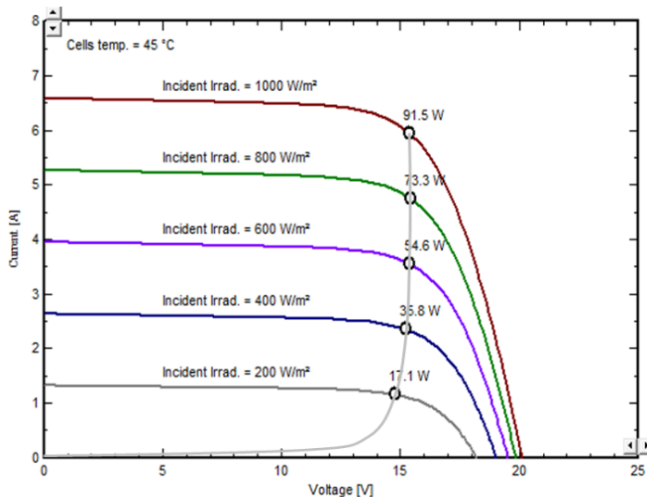


Figura 4. Efecto del cambio de irradiancia en las condiciones de trabajo de una celda solar [14].

Para determinar la tensión máxima del conjunto de paneles se tiene en cuenta dos factores. En primer lugar los efectos del cambio de temperatura e irradiancia que generan una reducción en el valor de tensión del punto de óptima transferencia de potencia. En segundo lugar que el regulador de carga solo pueda reducir la tensión de entrada. Por estos motivos se decide fijar un valor de tensión máxima para todo el conjunto de paneles solares, que permita tener un amplio margen respecto del valor de carga de la batería y de esta forma garantizar carga aún en condiciones no ideales. Con estos lineamientos se buscan opciones de paneles solares en el mercado local, evaluando no solo la tensión máxima del conjunto sino que también su tamaño, su peso y la potencia generada.

Se utiliza el software de dibujo en 3D Onshape [15] para representar los componentes y realizar pruebas de ensamble dentro de este entorno. Para la construcción de la estructura principal, donde irán montados los componentes, se decide utilizar caños cuadrados de aluminio de 60 mm y 1,5 mm de espesor. Se elige aluminio debido a su menor densidad, comparado con otros materiales estándares como acero, por lo que agregará menor peso al vehículo. Las dimensiones de los caños son medidas estándares que pueden soportar el peso máximo especificado de los pontones. Estos perfiles se sujetan a los pontones y entre si utilizando tornillería de acero inoxidable. En la figura 5 se muestra una vista del diseño de la estructura con los pontones.

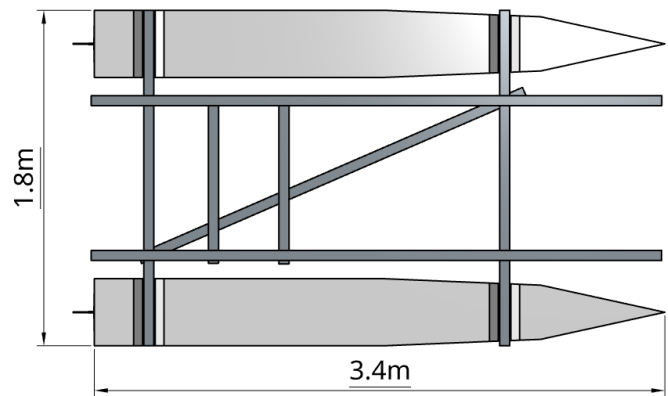


Figura 5. Vista superior del diseño 3D donde se puede observar la estructura mecánica.

Finalmente, teniendo en cuenta el área disponible del diseño, las dimensiones de la batería y las dimensiones estimadas de los gabinetes que alojan los componentes eléctricos, se colocan ocho unidades de los paneles SN-M-KIT200W de SolarLine [16], este modelo trae dos paneles de 100W por unidad.

Datos del panel solar:

- Fabricante: Solarline
- Modelo: SN-M-KIT200W
- Potencia máxima: 100 W
- corriente de cortocircuito: 6,12 A
- Tensión a circuito abierto: 21,6 V
- Peso: 7,5 kg
- Tamaño: 78x69x3 cm

Para poder definir las características del regulador de carga necesario se evalúan las condiciones de trabajo de este. Cada panel solar tiene una tensión de circuito abierto de 21,6 V y los ocho paneles se conectarán como dos conjuntos en paralelo de cuatro paneles en serie, con esta configuración se tiene una tensión máxima de circuito abierto de 86,4 V. De esta manera se obtiene una diferencia de tensión que es 3,6 veces mayor que la tensión nominal de la batería.

Por otro lado se evalúa la corriente máxima de carga teniendo en cuenta que la potencia máxima del conjunto de paneles es de 800 W. Con el fin de obtener la peor condición para la corriente de salida se considera que el regulador de

carga tiene una eficiencia del 100 % en la conversión y que la tensión de carga será 20 V (tensión aproximada del fin de descarga para 8 celdas de LiFePO4 en serie), de modo que el valor de corriente en su peor condición será de 40 A.

Por estas condiciones se necesita un regulador de carga que pueda tolerar al menos 86,4 V del conjunto de paneles solares y que pueda entregar más de 40 A de corriente de carga.

Se utiliza el regulador MPPT 100/50 de Victron Energy [17].

Datos del regulador MPPT:

- Corriente de carga nominal: 50 A
- Tensión máxima del conjunto de paneles: 100 V
- Corriente máxima del conjunto de paneles: 60 A
- Eficiencia: 98 %

Por ultimo se colocan dos componentes más en el circuito eléctrico, en primer lugar se agregan diodos de bloqueo a cada conjunto serie de paneles solares, de esta manera se busca evitar que cuando alguno de los conjuntos en paralelo opere en condiciones desfavorables respecto del otro, este le genere una carga al otro conjunto. En segundo lugar se coloca un fusible de 250A a la salida de la batería a modo de protección en caso de un cortocircuito. En la figura 6 se puede ver el diseño del circuito eléctrico.

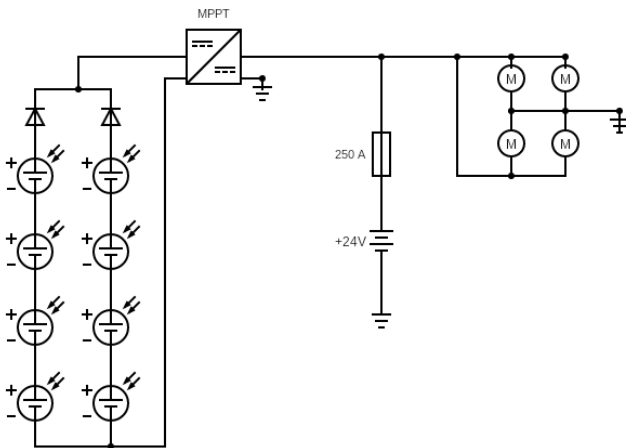


Figura 6. Esquemático de referencia del sistema eléctrico de la embarcación.

Se decide montar los motores sobre la superficie trasera de los pontones, el soporte de estos es construido a medida utilizando herramientas manuales. Los motores se montan a una placa de aluminio de 5 mm de espesor utilizando tornillos M4.

Con el sistema eléctrico y la posición de los motores definida, se puede realizar un ajuste fino del diseño mecánico, teniendo en cuenta los pesos de cada componente y evaluando la posición del centro de masa de diferentes configuraciones.

Cabe destacar que en el posicionamiento de los paneles se tiene en cuenta que en el caso de una colisión sean los pontones los que absorban el golpe. La construcción final del vehículo se puede ver en la figura 1.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se presentan dos pruebas de la embarcación que se detallan a continuación

III-1. Primera prueba de flotación: La primera prueba es la verificación de la flotación de la embarcación solo con la estructura principal y los motores, es decir sin el peso que agregan los paneles solares y la batería. En esta prueba también se coloca un lastre de 70 kg para evaluar el impacto que tiene el peso que agregan los componentes restantes. Para tener control sobre la embarcación durante la prueba se coloca un gabinete con dos baterías de LiPo de 22,8 V y 10 Ah, cuyo peso es de 1,2 kg, además dentro de este gabinete se colocan los controladores de los motores y un receptor de radio Spektrum AR6210 [18] para utilizar un radio control Spektrum Dx7s [18]. Se verifica que el dispositivo flota con y sin el lastre, que no ingresa agua dentro de los pontones y que el montaje de los motores es lo suficientemente robusto para soportar la fuerza que estos ejercen. En la parte superior de la figura 7 se puede observar una imagen de esta prueba.



Figura 7. Prueba de flotación de la embarcación, en la figura superior se muestra sin el sistema eléctrico montado y en la figura inferior con el sistema eléctrico montado.

III-2. Segunda prueba de flotación: La segunda prueba de flotación se realiza con el sistema eléctrico montado (paneles solares, batería y gabinetes). Estos elementos agregan un peso de 120 kg a la embarcación. Las baterías pequeñas ya no son necesarias ya que la batería especificada para la embarcación está montada. Se verifica que el dispositivo flota con un peso aproximado al total, que no ingresa agua dentro de los pontones y que los motores tienen la potencia suficiente para maniobrar la embarcación con el peso agregado. En la parte inferior de la figura 7 se puede observar una imagen de esta prueba.

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se presentaron el diseño, construcción y ensayos de una embarcación no tripulada con capacidad de carga solar, permitiendo su operación prolongada sin necesidad de carga manual de las baterías. Combinado con las características hidrodinámicas de la configuración catamarán, esto la convierte en una plataforma ideal para misiones autónomas de larga duración, como por ejemplo el monitoreo de espejos de agua, batimetría de alta revisita y otros estudios de flora, fauna y conservación medioambiental, a la vez que también se presenta como una base para investigación y desarrollo en robótica acuática, algoritmos de navegación y control, evasión autónoma de obstáculos y coordinación multirobot, solo por nombrar algunos.

A partir de aquí se abren varias líneas de trabajo, incluyendo:

- Medición del sistema de carga solar.
- Ensayo de la autonomía de la embarcación en condiciones controladas.
- Estimación de la autonomía considerando diferentes escenarios de misión y casos de uso.
- Integración de sensores que aumenten la capacidad de navegación autónoma, tales como GPS, Corredera (Velocidad relativa al agua) y Lidar, así como instrumentos que permitan realizar mediciones meteorológicas.
- Integración con Sistema de Control de Misión para Misiones Robóticas de Largo Plazo.

Finalmente, se pasará a la etapa de desarrollo de los algoritmos de navegación y control para dotar a este robot acuático de las funcionalidades específicas de un robot autónomo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de San Andrés por su apoyo y principalmente al Centro Educativo Área Beta de Nordelta. También se agradece al Dr. Hernán Socolovsky por su asesoramiento en lo referente a Energía Solar, y al personal de la carrera de Diseño de la Universidad de San Andrés.

REFERENCIAS

- [1] V. Bolbot, A. Sandru, T. Saarniniemi, O. Puolakka, P. Kujala, and O. A. Valdez Banda, "Small unmanned surface vessels—a review and critical analysis of relations to safety and safety assurance of larger autonomous ships," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/12/2387>
- [2] Blue Robotics, "Underwater rovs, usvs, thrusters, and sonars!" 2024, accessed: date-of-access. [Online]. Available: <https://bluerobotics.com/>
- [3] L. Robotics, "Liquid robotics." [Online]. Available: <https://www.liquid-robotics.com/wave-glider/customer-stories/>
- [4] Saildrone, "Saildrone." [Online]. Available: <https://www.saildrone.com/technology/vehicles>
- [5] R. C. Leegstra, M. De Paula, I. Carlucho, F. J. Solari, A. F. Rozenfeld, G. G. Acosta, B. V. Menna, R. J. de la Vega, L. M. Arrien, H. J. Curti, and S. A. Villar, "MACÁBOT: Prototipo de vehículo autónomo de superficie (asv)," *Revista Tecnología y Ciencia*, no. 36, p. 142–154, oct. 2019. [Online]. Available: <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/view/344>
- [6] J. L. Rosendo and F. Garelli, "Proyecto genesas: Integración y puesta en marcha de robot autónomo de superficie," in *28 Congreso Argentino de Control Automático. Asociación Argentina de Control Automático (AADECA)*, 2023.

- [7] L. Garberoglio, P. Moreno, I. Mas, and J. I. Giribet, "Autonomous vehicles for outdoor multidomain mapping," in *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, 2018, pp. 1–8.
- [8] L. Garberoglio, P. Moreno, I. Mas, and J. Giribet, "Control coordinado de vehículos aéreos y acuáticos para relevamiento batimétrico en aguas poco profundas," *Revista Electrón*, vol. 6, no. 2, pp. 86–95, 2022, accessed: 2024-03-26. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37537/rev.elektron.6.2.164.2022>
- [9] E. Tupper, *Introduction to Naval Architecture*, 3rd ed. Oxford, England: Butterworth-Heinemann, Jun. 1996.
- [10] B. Allotta, R. Costanzi, F. Fanelli, N. Monni, L. Paolucci, and A. Ridolfi, "Sea currents estimation during auv navigation using unscented kalman filter," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 13 668–13 673, 2017, 20th IFAC World Congress. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240589631733450X>
- [11] "Sitontop," 2024. [Online]. Available: <https://www.sitontop.com.ar/>
- [12] I. Buchmann, *Batteries in a portable world*. Cadex Electronics Inc, 2016.
- [13] Electroconversiones, 2024. [Online]. Available: <https://electroconversiones.com.ar/>
- [14] Victron Energy, "Which solar charge controller: Pwm or mppt?" 2020. [Online]. Available: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Technical-Information-Which-solar-charge-controller-PWM-or-MPPT.pdf>
- [15] "Onshape," 2024. [Online]. Available: <https://www.onshape.com/>
- [16] SolarLine, 2024. [Online]. Available: <https://www.solaryeolicasrl.com.ar/>
- [17] Victron Energy, 2024. [Online]. Available: <https://www.victronenergy.com/>
- [18] Spektrum, 2024. [Online]. Available: <https://www.spektrumrc.com/>