





Artículo

# Diseño del cuarto de máquinas y cálculo de la necesidad propulsiva de un buque de cabotaje para la flota fluvial colombiana, fundamentado en las necesidades de electromovilidad del proyecto I+D ferrofluvial 4.0

## Design of the machine room and calculation of the propulsion need for a cabotage ship for the colombian river fleet, based on the electromobility needs of the railway 4.0 R&D project

Alexander Raigoza Villada<sup>1\*</sup>, José María Riola<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, 130001, Colombia; alexander.raigoza@armada.mil.co

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 28040, España; chema.riola@rga-psi.es

\* Correspondencia: alexander.raigoza@armada.mil.co

**Resumen:** Como parte del proyecto I+D "Ferrofluvial 4.0 – Plan de investigación para la evaluación y priorización de tecnologías orientadas a la electromovilidad y su penetración e impactos en el fortalecimiento de encadenamientos productivos de Colombia en sus modos férreo y fluvial", se ha desarrollado este trabajo en el cual busca mostrar las características básicas de un buque de cabotaje para la flota fluvial colombiana, y así mismo realizar los respectivos cálculos de potencia para el sistema de propulsión y equipos auxiliares con los métodos matemáticas más utilizados en la construcciones de buques actualmente; para dejar planteado un diseño conceptual del cuarto de máquinas el buque de cabotaje que se pueda desempeñar apropiadamente en las cuencas fluviales de nuestro territorio considerando también los cuatro pilares del Modelo Energético Nacional con el fin de lograr la migración energética: seguridad y confiabilidad en el abastecimiento, mitigación y adaptación al cambio climático, competitividad y desarrollo económico, y conocimiento e innovación. Se presentarán resultados de los diseños del sistema de propulsión, generación eléctrica, contraincendios, almacenamiento de combustible, sistema de ventilación y arreglo general del cuarto de máquinas.

**Palabras clave:** Cabotaje; Diseño; Electromovilidad; Ferrofluvial 4.0; Potencia; Propulsión

**Abstract:** As part of the R+D project "Ferrofluvial 4.0 – Research focus for the evaluation and prioritization of technologies aimed at electromobility and their penetration and impacts on the strengthening of productive chains in Colombia in its railway and river modes" it has developed this work in which it seeks to show the basic characteristics of a cabotage vessel for the Colombian fleet fluvial, and likewise perform the respective power calculations for the propulsion system and auxiliary equipment with the mathematical methods most used in the construction of ships today; to leave a conceptual design of the engine room the cabotage vessel that can be properly performed for these river basins of our territory also considering the four pillars of the National Energy Model in order to achieve energy migration: security and reliability in supply, mitigation and adaptation to climate change, competitiveness and economic development, and knowledge and innovation. Results of the designs of the propulsion system, power generation, firefighting, fuel storage, ventilation system and general arrangement of the engine room will be presented in this work.



**Citación:** Raigoza, A.; Riola, J. Diseño del cuarto de máquinas y cálculo de la necesidad propulsiva de un buque de cabotaje para la flota fluvial colombiana, fundamentado en las necesidades de electromovilidad del proyecto I+D ferrofluvial 4.0 .

DERROTERO 2023, 17, 1–10.  
10.70554/Derrotero2023.v17n01.04

Recibido: 8/06/2022

Aceptado: 22/11/2022

Publicado: 12/06/2023



**Derechos de autor:** © 2023 por autores. Licenciado por Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", COL. Este artículo es de libre acceso distribuido en las términos y condiciones de *Creative Commons Attribution* (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Keywords:** Cabotage, Electromobility, Design, Ferrofluvial 4.0, Power, Propulsion

## 1. Introducción

Teniendo en cuenta lo estipulado en el Decreto 457 del 22 de marzo de 2020 "... Por el cual se imparten instrucciones en virtud de la emergencia sanitaria generada por la pandemia del Coronavirus Covid-19 y el mantenimiento del orden público...", es necesaria la creación de nuevos escenarios y estrategias que permitan la obtención de bienes y servicios sin tener que desplazarnos a centros de mercado que estimulan el acercamiento social y que por ello el incremento de la posibilidad de contagio de Covid-19.

La industria de transporte fluvial colombiana se ha consolidado y posicionado en el mercado, principalmente sobre las cuencas más importantes donde la industria cuenta con barcos empujadores y barcazas, pero ninguna de estas embarcaciones atiende con lo requerido por las nuevas políticas de conservación del medio ambiente que Colombia desea adoptar a través de la transición de energética, por lo cual es fundamental implementar proyectos de diseños para embarcaciones acordes con este cambio (Arcadis Nederland, B. V. and Jesyca 2015; Unidad de Planeación Minero Energética 2020). Por esta razón se busca presentar los caminos que se podrían emprender para alcanzar la transformación energética que habilite el desarrollo sostenible de Colombia.

Una de las alternativas planteadas puede ser el paso a la electrificación de la flota fluvial adoptando sistemas híbridos como primera medida y después alcanzar diseños totalmente eléctricos, lo cual puede tener desafíos propios que impiden la implementación exitosa de esta tecnología. Estas barreras incluyen cuestiones técnicas y operativas. Los problemas técnicos están relacionados con la distancia en los trayectos entre municipios para embarcaciones totalmente eléctricas (Infineon 2021; Papadopoulou 2018). Además, la carga de la batería durante las cortas estancias en muelle para este tipo de embarcaciones es también un desafío crítico que requiere una infraestructura eléctrica adecuada (Craig 2020; Kim et al. 2021). Igualmente es importante considerar la reducción de peso de los buques y capacitación a todas las tripulaciones para que se familiaricen con lo técnico, operativo, y en aspectos de seguridad del nuevo sistema (Rapid Transition Alliance 2022).

## 2. Formas y características principales

La primera fase es la recolección y elaboración de una base de datos de buques con unas dimensiones y características cercanas a las requeridas por el buque objeto del proyecto y de demostrada eficiencia y comportamiento (Tabla 1).

**Tabla 1.** Base de datos

Name	DWT	L (m)	Lpp (m)	B (m)	T (m)	P (kW)	Speed (Kn)
Supercrew	220	32.5	35	7.5	2.5	600	16
AvTrFlu Pirain	91.5	23	25	8	1.2	420	13
BAL-C	313	40.18	40.58	8	1.2	412	9
Ferry Del-Chaco	140	33.2	35.9	8.5	2	450	14
NASH Oswaldo Cruz	360	42.5	47	8.5	1.8	533	7
Nodriza V	275	37.75	39.3	9.5	1	580	9
Papa Francisco	155	30	32	6	2	300	15.5
Primrose XXVI	170	37	40	12.8	1.7	640	10
Voea Late	96	22.3	30	8	1.3	600	9

Las correlaciones que se realizan en esta fase del proyecto son fundamentales para el logro de este. Se debe decidir en función de las características principales la realización de estas. Dicho esto, una de las características principales en el diseño de un buque, es el desplazamiento en toneladas y para el análisis de potencia también será fundamental la velocidad (Figura 1, 2, 3).

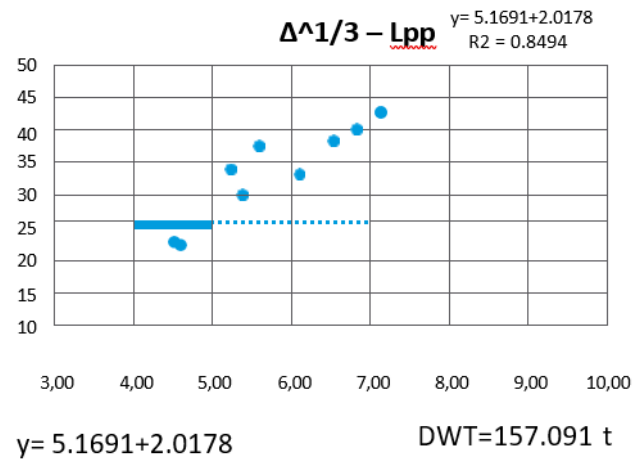


Figura 1. Relación  $\delta^{1/3} \cdot L_{pp}$ .

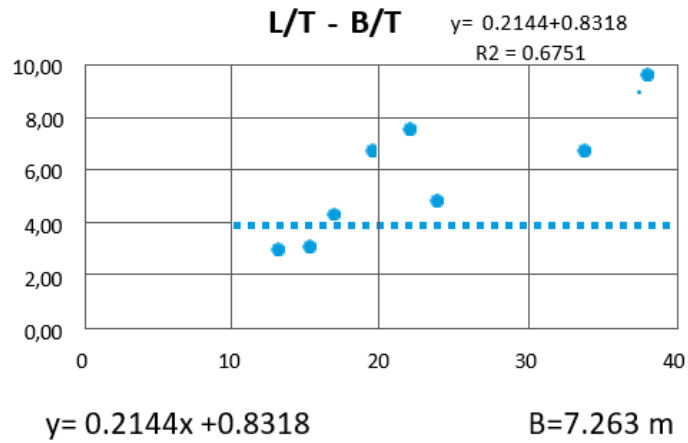


Figura 2. Relación  $L/T - B/T$ .

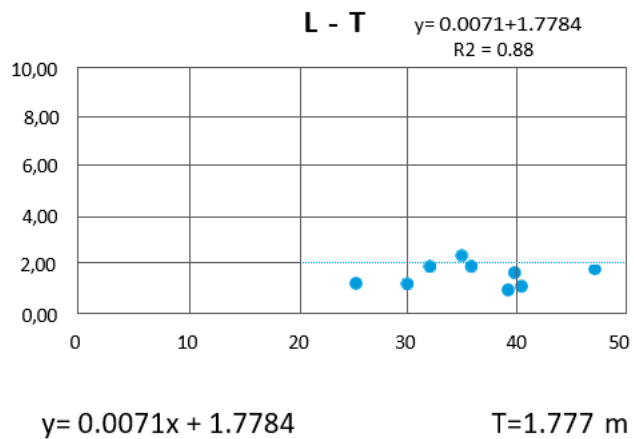


Figura 3. Relación  $L - T$ .

Los datos iniciales obtenidos anteriormente serán los necesarios para dar paso al uso de programas de computación para el diseño y la modelación. Además de las dimensiones principales en la base de datos aparecen otra serie de detalles de los buques que se pueden obtener mediante regresiones. Ya que las velocidades de los buques referenciados en

la Tabla 1 difieren levemente de los 12 nudos que se quieren para el buque proyecto si será conveniente realizar regresiones para calcular la potencia estimada. Para hacer la estimación de la potencia del Buque Proyecto se calculará la media de las potencias de los buques. Sabiendo que la potencia es función directa del cubo de la velocidad, se puede obtener la constante de proporcionalidad.

$$\text{Pot}_{\text{media}} = \frac{\text{Suma de potencias}}{n \text{ de potencias}}$$

$$f = \frac{\text{Pot}_{\text{media}}}{V^3}$$

$$f = 0.3411$$

$$\text{POTENCIA a Velocidad deseada (12 Knts)} \rightarrow \text{Pot}_m = f \cdot V^3$$

### 3. Modelación del buque

Usando los valores iniciales del buque obtenidos se procede a obtener unas formas aproximadas del mismo, utilizando el programa de modelación Maxsurf Modeler en el cual, a partir de las formas estándar de un buque, se irá modificando el diseño para obtener una forma de casco teniendo en cuenta la eslora, manga, calado y desplazamiento semejantes a los obtenidos en los cálculos anteriores (Resistance 2022) (Figura 4).

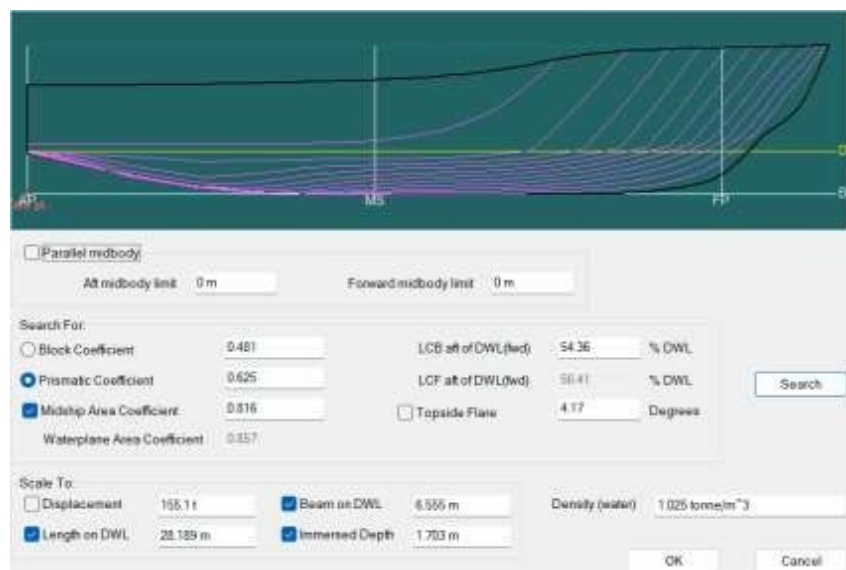


Figura 4. Transformación Paramétrica Maxsurf Modeler.

A continuación, se pretende resumir los aspectos más importantes en lo que se refiere a la disposición general del buque. Para tener una idea base de cómo será la distribución de algunos espacios que se consideran necesarios para este proyecto: espacios de carga, cuarto de máquinas, cuarto de baterías y tanques de combustible y consumos (Figura 5).

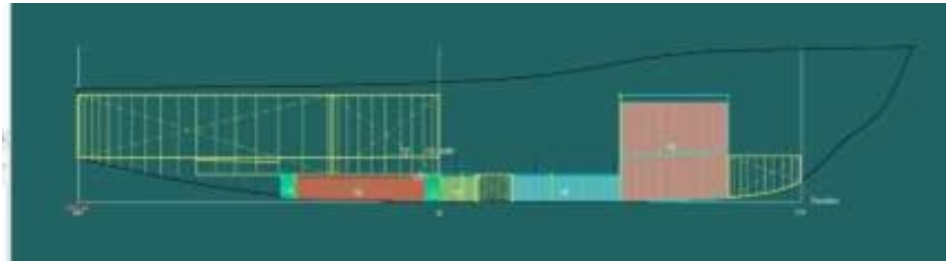


Figura 5. Maxsurf Stability: disposición de espacios.

**4. Cálculo de la potencia**

Del cálculo de esta resistencia al avance, deducimos el valor de la fuerza que se necesita aplicar al buque, para conseguir una velocidad determinada, y como consecuencia, la potencia de su máquina. El cálculo de la resistencia al avance de un buque se realiza por medio de experimentación con modelos a escala en los canales de Experiencias Hidrodinámicas, modificando las características para asemejarlas a las del buque. En nuestro caso, para realizar el cálculo de potencia se usará el método de Wyman (Zulqernine et al. 2020). En este caso, el modelo que se utilizará será el modelo final. Usando el módulo Hullspeed del software Maxsurf Resistance se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 2 para distintas velocidades entre 12 y 13 nudos (Figura 6):

Tabla 2. Resultados de potencia para velocidad de 12 a 13 nudos.

	Speed (Kn)	Froude No. LWL	Froude No. VOL	Wyman Resist. (Kn)	Wyman Power (KW)
28	12.025	0.372	0.856	84.9	525.219
29	12.100	0.374	0.861	86.0	535.107
30	12.175	0.377	0.866	87.0	545.120
31	12.250	0.379	0.872	88.1	555.256
32	12.325	0.381	0.877	89.2	565.517
33	12.400	0.384	0.882	90.3	575.904
34	12.475	0.386	0.888	91.4	586.417
35	12.550	0.388	0.893	92.5	597.057
36	12.625	0.391	0.898	93.6	607.826
37	12.700	0.393	0.904	94.7	618.723
38	12.775	0.395	0.909	95.8	629.749
39	12.850	0.398	0.914	97.0	640.906
40	12.925	0.400	0.920	98.1	652.194

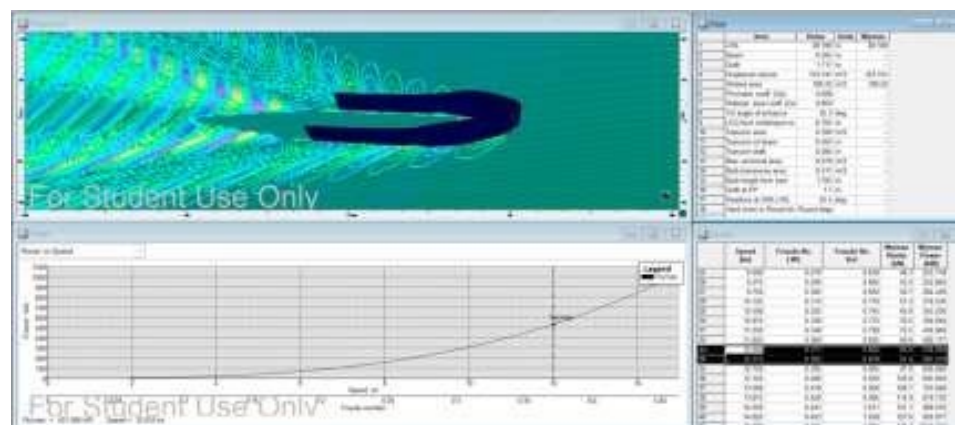


Figura 6. Simulación Maxsurf Resistance.

Nota. Vista general de simulación – datos – gráficos en el software Maxsurf Resistance.

Considerando la modelación en Maxsurf Resistance y la potencia media hallada por regresión se considerará una aproximación a 550 kW para la selección del conjunto propulsivo.

$$\text{Regresión: Pot}_m = 589.433 \text{ kW} \quad \text{Potencia Wyman} = 525,216 \text{ kW}$$

## 5. Propulsores

Conocidas todas las características del sistema, se está en disposición de determinar el modelo de los motores para la propulsión principal, los cuales serán eléctricos con el fin de acercar el proyecto cada vez más a la electromovilidad (Infineon 2021). Para mantener y asegurar mayor maniobrabilidad, es necesario disponer de dos propulsores en popa que, combinados, permitan mover al buque a la velocidad esperada (Kim et al. 2021).

Se determinó a través de regresión y la modelación que la potencia propulsora necesaria debería estar entre 525/589 kW, que se aproximarán en este caso a los 550 kW. Por lo tanto, es necesario disponer en popa de dos propulsores de 275/300 kW cada uno (Craig 2020). El motor asíncrono, es cada vez más utilizado ya que son más baratos, más robustos y fáciles de mantener. Al ser sus componentes algo más pequeños nos dará un tamaño menor total del motor. Su potencia se podrá variar fácilmente con un convertidor de frecuencia y mejor que en el caso de los motores síncronos. Considerando la disponibilidad de motores eléctricos marinos con esta una potencia similar se seleccionó el siguiente equipo de la empresa ABB, cuyas características están contempladas en el Tabla 3.

**Tabla 3.** Características equipo ABB

Marca	Motor	Voltaje	Frecuencia	Torque	Peso	Potencia 0/3600 RPM
ABB	M3BP	440 V	60 Hz	840 Nm	1680 kg	315 kW

Para determinar las características físicas y las dimensiones principales, se debe utilizar el modelo real de un fabricante en particular. En este caso, se recurre a dos de las principales firmas del sector, como son Wärtsilä y Schottel. Los criterios de búsqueda son sencillos, pues se deberá buscar y seleccionar modelos acordes y cercanos a la potencia requerida de un sistema azimutal para propulsión. En la Tabla 4 se muestran los modelos más acordes a las necesidades planteadas de las dos empresas mencionadas y sus principales características:

**Tabla 4.** Sistemas hélice-timón

Firma	Modelo	Potencia (kW)	RPM máx.	Peso
Schottel	SPR 150	330	1800	1200 kg
Schottel	<b>SPR 130</b>	<b>280</b>	<b>1800</b>	<b>1200 kg</b>
Wärtsilä	WST-11	450	1800	5000 kg

Lo mejor para este tipo de propulsores es una instalación sin engranaje reductor entre el motor eléctrico y el propio propulsor, realizándose la reducción necesaria en el interior del propulsor. La potencia máxima que admite el sistema de propulsión es 280 kw para un funcionamiento continuo para cada costado; lo que representa un empuje total de 560 kw que se ajustan bastante a lo requerido acuerdo los cálculos realizados. La maniobrabilidad de este tipo de buque puede ser excelente, puesto que por la disposición y tipo de propulsores el buque es capaz de girar sobre sí mismo. En cuanto a la velocidad de maniobra, el factor determinante es la velocidad de giro de los propulsores que pueden girar 360° en un tiempo que oscila entre 10 y 12 segundos, lo cual hace pasar al buque de todo avante a todo atrás en muy breve espacio de tiempo.

## 6. Generación eléctrica

Considerando la necesidad propulsiva del buque que será limitada hasta los 550 kW acuerdo la máxima entrada de potencia que recibe el conjunto hélice timón. Se busca contar con un conjunto de generación eléctrica formado por un motor de combustión interna eficiente y un alternador que pueda mantener la velocidad máxima del buque y a su vez mantener cubiertas los demás consumidores. Por lo cual se considera dejar disponibles más 100 kWe disponibles para cubrir los demás consumidores que puedan ser instalados y que no estén considerados dentro de este proyecto. Teniendo como referencia a una de las compañías líderes en arreglos de generación eléctrica, se determina el siguiente conjunto como el más indicado (Tabla 5).

**Tabla 5.** Características equipo ABB

Marca	Modelo	Potencia (kWe)	Frecuencia (Hz)	Motor	Peso
MTU	DS750	680	60	12V2000	7883

Teniendo en cuenta el peso y eficiencia de los dos sistemas de baterías, se consideran una mejor elección para el proyecto el módulo de baterías Akasystem de la marca Akasol. Para el diseño se deben agrupar 6 módulos de 9 baterías que puedan sumar un total 5292 kW – 30240.

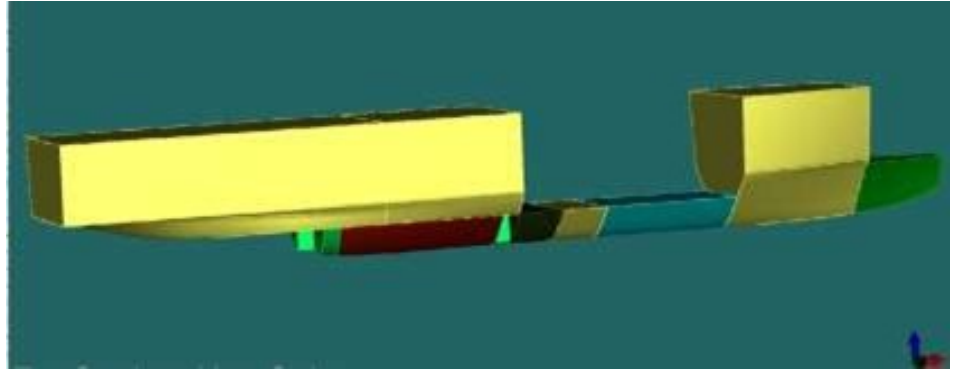
En la Tabla 6 se relacionan las capacidades de las baterías para determinar la autonomía de la embarcación en modo solo eléctrico teniendo en cuenta la potencia requerida por los motores de propulsión a 12 y 9 nudos, la descarga será regulada acuerdo la exigencia por velocidad de los motores; considerando la descarga máxima de las baterías como 10% del total de su capacidad.

**Tabla 6.** Relación de potencia con capacidad de las baterías

DATOS	AKASYS-TEM 9 AKM 150 CYC	AKASYS-TEM 9 AKM 150 CYC (54 baterías)	POTENCIA RE-QUERIDA (12 Knots)	AUTONOMÍA (90% carga)	POTENCIA RE-QUERIDA (9 Knots)
<b>AUTONOMÍA (90% carga)</b>					
Capacidad	140 Ah	7560 Ah	827 Amp	–	413 Amp
–					
Energía	98 kWh	5292 kWh	550 kW	8,2 a 8,6 horas	275 kW
16,5 a 17,3 horas					
Potencia descarga	98 kW	5292 kW	550 kW	–	275 kW
–					

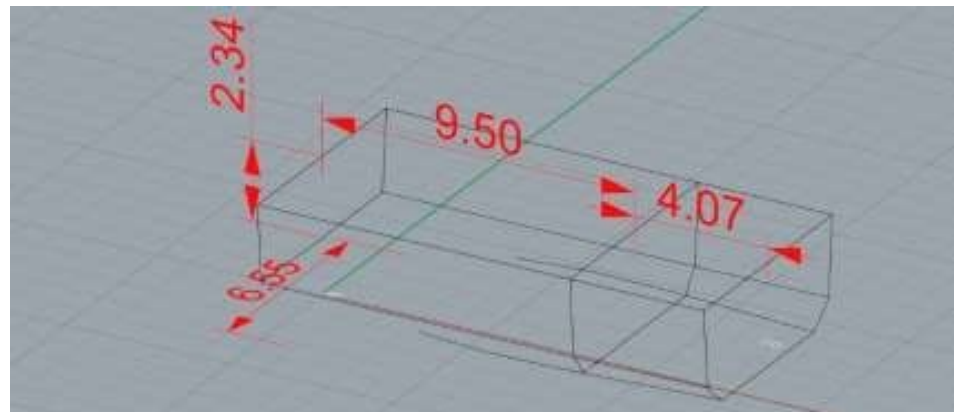
## 7. Diseño del cuarto de máquinas

En esta sección se diseña a partir de los equipos y sistemas estimados anteriormente. En primer lugar, se introducirán los modelos tridimensionales. Luego se mostrará la organización general para ver la interacción entre los componentes. Se requiere realizar un modelo 3D que facilite la visualización y distribución de los componentes del buque. A continuación, se mostrarán las fases que fueron necesarias para lograr el diseño del cuarto de máquinas para el buque de cabotaje objeto de este proyecto haciendo uso del programa de diseño Rhino 7 (Figura 7).



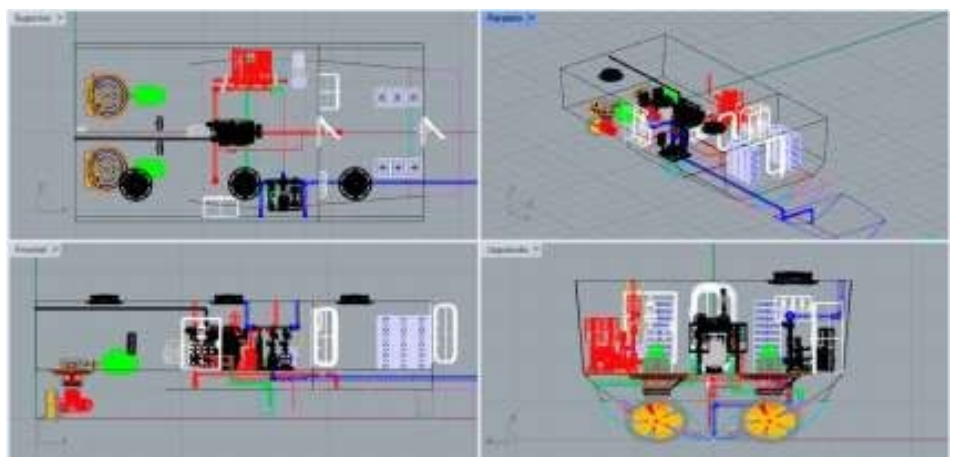
**Figura 7.** Disposición de tanques y cuarto de máquinas Maxsurf Stability.

El espacio del cuarto de máquinas fue extraído del software Maxsurf Stability y exportado al software de diseño Rhino 7, el cual es utilizado como herramienta y guía para agregar los equipos y sistemas al cuarto de máquinas y así darle forma al diseño final. En la Figura 8 se observan las líneas de forma y medidas del cuarto de máquinas dentro del cual serán ubicados todos los sistemas de ingeniería.



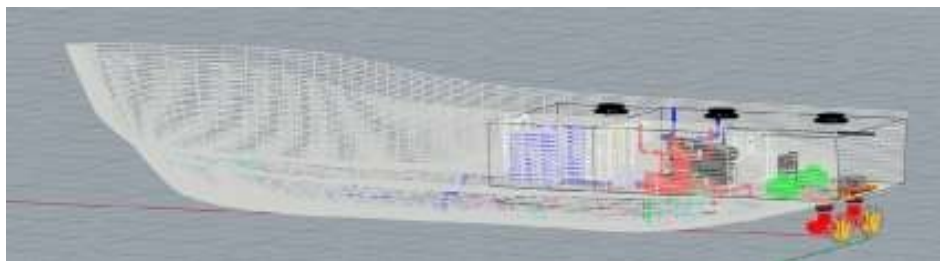
**Figura 8.** Cuarto de máquinas y cotas en metros.

Una vez se han dispuesto los sistemas y sus diferentes componentes como tableros de control, tuberías y válvulas; se procede a acoplar todo en un solo diseño como se muestra en la Figura 9 teniendo en cuenta que los sistemas deben estar espaciados para que su lugar en el compartimento no afecte el funcionamiento de otro sistema o equipo y tenga una como operación para el personal de la tripulación (Figura 10, 11).

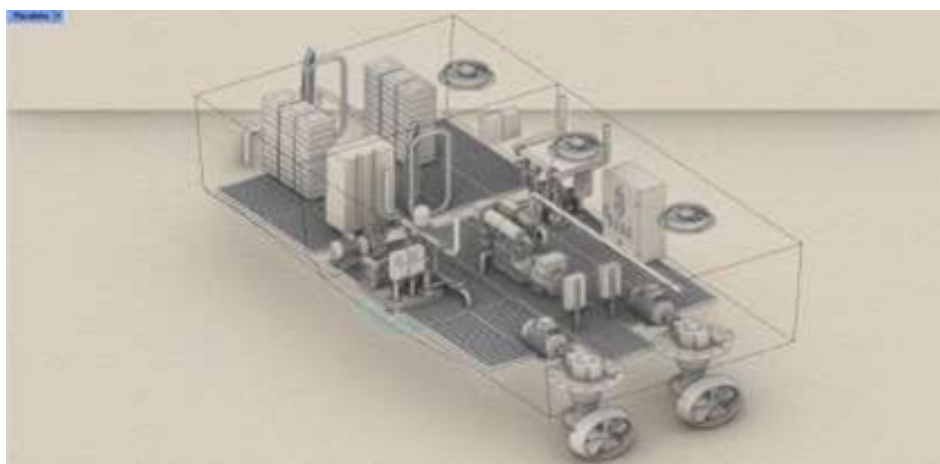


**Figura 9.** Arreglo general del cuarto de máquinas.





**Figura 10.** Vista general de las líneas del casco y sistemas del cuarto de máquinas.



**Figura 11.** Diseño del cuarto de máquinas.

## 8. Conclusiones

El proyecto responde a una necesidad de renovar los buques de la flota fluvial colombiana que realizan operaciones de cabotaje, desde el punto de vista de ingeniería, diseño, eficiencia y electromovilidad. Con el fin de ir construyendo el camino hacia la transición energética que se requiere, pues la construcción fluvial en el país, así como reglamentos y normas, son una limitante para el desarrollo de proyectos de construcción fluvial, lo cual dificulta la investigación para nuevos proyectos.

Uno de los métodos para poder establecer las dimensiones básicas aproximadas de cualquier tipo de embarcación, es considerar y establecer una base de datos de buques que puedan ser similares para realizar regresiones directas e indirectas; por eso la importancia de este método en las primeras fases del diseño. Para determinar la necesidad propulsiva de una embarcación, se debe hallar la resistencia al avance fase fundamental en el desarrollo del proyecto, pero gracias al direccionamiento en la etapa de análisis se usó el método Wyman, el cual no es muy convencional para la obtención de este tipo de resultados.

El uso de las herramientas computacionales, como Maxsurf Stability- Modeler-Resistance y Rhino 7, fueron fundamentales para el desarrollo del proyecto, pues son muestra de cómo los softwares minimizan los tiempos de evaluación y estudio, y además facilitan las tareas de diseño. Un buque eléctrico, con una capacidad de batería lo suficientemente grande y un motor eléctrico, puede reducir significativamente las emisiones. Por otro lado, aunque la tecnología de baterías ha tenido crecimiento, su mayor problema es su duración. Aunque, parece que hay tres formas de evitar el problema.

La primera es tener buques alimentados por baterías para distancias más pequeñas, como el caso de los buques pequeños de cabotaje. La segunda forma es hacer paradas frecuentes de recarga en los puertos o instalar una gran capacidad de sistemas de baterías, y la última opción es tener buques híbridos que, cuando se excede la capacidad de su sistema de batería, funcionará con combustible (Unidad de Planeación Minero Energética 2018).

## Referencias

- Arcadis Nederland, B. V. and Jesyca, S. A. S. (2015). *Plan maestro fluvial de Colombia 2015*. Ministerio de Transporte de Colombia, Bogotá. Recuperado de: <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=13276>.
- Craig, B. (2020). The future of batteries in the marine. Recuperado de: <https://www.southampton.ac.uk/~assets/doc/The%20Future%20of%20Batteries%20in%20the%20Marine%20Sector.pdf>.
- Infineon (2021). Why ships of the future will run on electricity. Recuperado de: <https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/electrified-ships/>.
- Kim, Y. R., Kim, J. M., Jung, J. J., Kim, S. Y., Choi, J. H., and Lee, H. G. (2021). Comprehensive design of dc shipboard power systems for pure electric propulsion ship based on battery energy storage system. *Energies*. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/en14175264>.
- Papadopoulou, A. (2018). The future of fuel: The feasibility of electric power for container shipping. Recuperado de: <https://www.kestonelaw.com/keynotes/the-future-of-fuel-the-feasibility-of-electric-power-for-container-shipping>.
- Rapid Transition Alliance (2022). Making waves: Electric ships are sailing ahead. Recuperado de: <https://www.rapidtransition.org/stories/making-waves-electric-ships-are-sailing-ahead/>.
- Resistance, M. (2022). Resistance manual.
- Unidad de Planeación Minero Energética (2018). Plan indicativo de abastecimiento de combustible. Recuperado de: [https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Comentarios\\_Plan\\_Indicativo\\_Combustibles\\_Liquidos\\_VFinal.pdf](https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Comentarios_Plan_Indicativo_Combustibles_Liquidos_VFinal.pdf).
- Unidad de Planeación Minero Energética (2020). Plan energético nacional 2020-2050. Recuperado de: [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN\\_2020\\_2050/Plan\\_Energetico\\_Nacional\\_2020\\_2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf).
- Zulqernine, M., Mahdi, M., and Dutta, S. (2020). Resistance and power prediction of different ship hulls using numerical methods. *Dhaka, Bangladesh*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/364027428>.

## Biografía de los Autores



**Alexander Raigoza Villada** Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla"



**José María Riola** Ingeniero Naval; Universidad Politécnica de Madrid

**Descargo de responsabilidad/Nota del editor:** Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente responsabilidad de los autores y colaboradores individuales y no reflejan necesariamente las opiniones de DERROTERO y/o de los editores. DERROTERO y/o los editores se deslindan de cualquier responsabilidad por daños o perjuicios a personas o bienes que puedan surgir como resultado de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido. Se recomienda a los lectores verificar de manera independiente la información antes de basarse en ella.