



REVISTA DERROTERO

Ingeniería Naval

Propulsión Diésel-Eléctrica para un Remolcador de 15.000 Toneladas y 33 Metros de Eslora para El Río Magdalena

Diesel-Electric Propulsion for a 15,000-ton Tugage and 33 Meters in Length for the Magdalena River

Ovalle Sperber Juan Guillermo¹
Caceres Rodriguez Sonia Fernanda²
José María Riola Rodríguez³

Recibido: 07/03/2022
Aprobado: 27/05/2022

Correspondencia: juanovallesp@gmail.com
caceresf27.fc@gmail.com
chema.riola@rga-psi.es

Resumen

En este proyecto se realizó una serie de cálculos de las características de remolque y dimensiones de un buque remolcador, de las máquinas principales y auxiliares de la propulsión y se dibujaron planos del interior del cuarto de máquinas, en base a sus características estructurales. Por medio de regresiones se dedujeron los valores de los elementos de maquinaria y las características principales. El sistema de propulsión en embarcaciones similares a las que se proponen en este trabajo de investigación son de diésel marino, el cual tiene un alto impacto en los gases de efecto invernadero liberados. En el siglo XXI se tiene la oportunidad de realizar un cambio en los sistemas de propulsión de cara a la necesaria descarbonización global, por lo que después del estudio de, formas y capacidades de las embarcaciones similares, se concluyen que una propulsión diésel-eléctrica es una opción mucho más amigable con el medio ambiente. Esta opción no elimina del todo el impacto que la navegación tiene en el medio ambiente, pero si limita la cantidad de daño que esta puede hacer, hasta que la logística de los futuros e-combustibles o con base de hidrógeno esté disponible en el mercado.

Palabras Clave: Propulsión, diésel-eléctrica, remolcador, descarbonización

1 Profesional en ciencias navales

2 Profesional en ciencias navales, especialista en logística

3 Doctor en Ingeniería Naval



Abstract

For this project, a series of calculations were made of the towing characteristics and dimensions of the tugboat, of the main and auxiliary propulsion machines, and plans of the interior of the engine room were drawn based on the structural characteristics of the tugboat. By means of regressions, the values of the machinery elements and the main ship characteristics. The propulsion system in boats similar to those proposed in this research work is marine diesel, which has a high impact on the greenhouse gases released. In the 21st century there is the opportunity to make a change in the propulsion systems in the face of the necessary global decarbonization, so after studying the hull and capacities of similar vessels, it is concluded that a diesel-electric propulsion It is a much more environmentally friendly option. This option does not completely eliminate the impact that shipping has on the environment, but it does limit the amount of damage it can do until future hydrogen-based or e-fuel logistics are available on the market.

Keywords: Propulsion, diesel-electric, tugboat, decarbonization

Introducción

Cuando se piensa en los avances y desafíos en el mundo actual, se puede observar la urgencia del cuidado del medio ambiente (Andrés, 2015). Teniendo en cuenta esta idea, en este trabajo de investigación propone una visión de los sistemas de propulsión de un tipo de embarcación con un trabajo crítico en nuestro país, como lo es el empujador fluvial, (figura 1) siendo importante por el transporte de mercancía en los ríos y más exactamente en el río Magdalena (Cormagdalena, 2022). En este trabajo se ha diseñado una embarcación con la configuración del sistema de propulsión diésel-eléctrica para un remolcador tipo pusher o empujador.

Figura 1.
Empujador. (Fuente: Cotecmar).



El pensamiento de crear una embarcación con propulsión alternativa a la convencional es de gran importancia, ya que esta promueve un desarrollo nacional fluvial y da importancia a las energías no renovables, siendo además de gran importancia la reducción de costos que conlleva tener una embarcación híbrida y lo que puede afectar al coste de la carga que lleve (Wilson, 2006). El Plan Maestro Fluvial (PMF) promovido en Colombia (Mintransporte, 2015) es la base estructural de este trabajo de grado, debido a que motiva a la expansión de los elementos de desarrollo basados sistemas de propulsión que serán una mejora en los procedimientos energéticos del transporte fluvial, ya que la energía eléctrica tiende a ser más amigable con el medio ambiente. La visión y el objetivo principal del PMF está basado en desarrollos tecnológicos, infraestructuras y la visión del Gobierno de Colombia, cuyo objetivo principal es obtener un sistema de transporte fluvial más competitivo, limpio, seguro y beneficioso para el desarrollo social, tal como contempla el Plan de Desarrollo Naval (ARC, 2020).

Resultados Y Cálculos

Los requisitos preliminares del trabajo han sido el conseguir una embarcación que cumpla con la eslora máxima de 33 metros, por lo que se ha escogido como buque base a una embarcación similar que ya fue previamente construida por el astillero colombiano Cotecmar (2022). Dicha embarcación tiene el nombre de remolcador fluvial Providencia, y dicho remolcador tiene una capacidad de remolque de 15.000 toneladas, y con el diseño ahora propuesto, la embarcación tendrá una capacidad de empujar hasta 8 barcasas de aproximadamente 1.875 toneladas cada una.

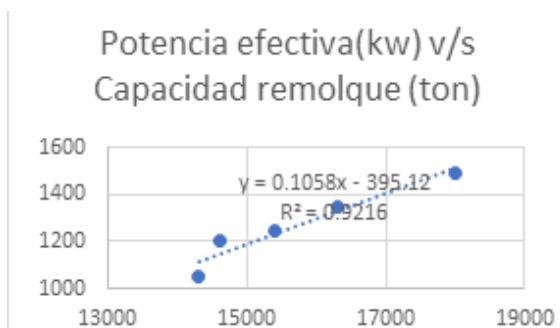
Para el cálculo de las dimensiones del buque, trabajamos con una base de datos de los remolcadores empujadores “pusher” de todo el mundo, pero que tuviesen unas características principales suficientemente parecidas con los requerimientos exigidos a nuestro prototipo de embarcación, como lo es la función de empujar un valor en torno a las 15.000 toneladas y además de poder navegar sobre ríos. Es importante resaltar que estas embarcaciones no son tan comunes fuera de Estados Unidos, Europa, y algunos países de Hispanoamérica como Paraguay, ya que es poco aprovechado el transporte fluvial. Así, tras el filtrado de las características buscadas, se ha conseguido la información de 5 buques (tabla 1) cuya capacidad de remolque está en un rango de 14.300 a 18.000 toneladas.

Tabla 1.
Base de datos de remolcadores.

Nombre buque	Bandera	Lpp (m)	L (m)	B (m)	D (m)	T (m)	Capacidad remolque (ton)	Pot. (kw)	V (n)
4 de Mayo	Paraguay	29,8	30,5	9,8	4,2	1,5	14300	1050	13,4
Alfonso	Paraguay	31,5	32,5	12	2,5	1,2	14600	1204	13,4
Ara Sunu	Japón	29,2	30,2	9	3,8	1,2	15400	1245	13
Amancay	Brasil	31,5	32	12	2,2	1,7	16300	1350	13
Ava Guarani	Paraguay	20	25	9,2	3,5	1,1	18000	1490	13

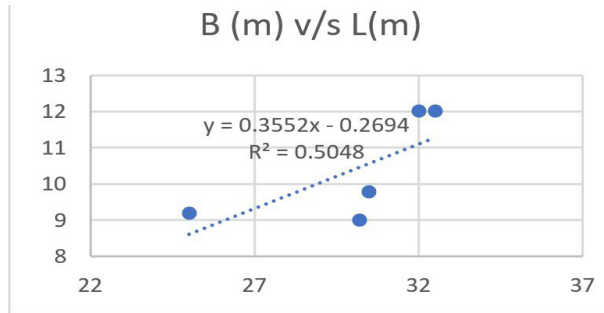
Para determinar el valor de la potencia de la embarcación y contando con que se tienen los datos fijos de eslora (33 metros) y del necesario tiro de la embarcación (15.000 toneladas), se realizó una regresión con los valores de la base de datos para obtener la potencia efectiva, la manga, la eslora entre perpendiculares, el puntal, el calado y la velocidad máxima, y cuyas gráficas se presentan a continuación en las figuras 2 hasta la 7:

Figura 2.
Regresión potencia efectiva vs remolque



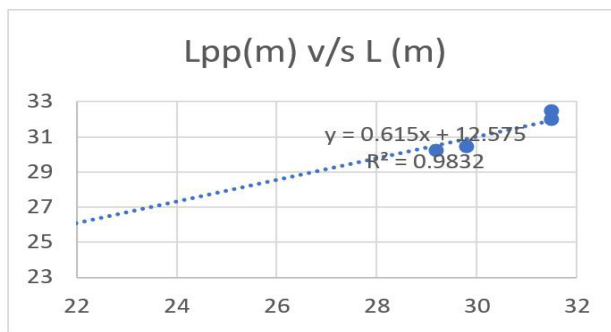
$$y = 0,1056(x) - 391,29 \quad y = 1192,71 \cong 1200kW$$

Figura 3.
Regresión manga vs eslora



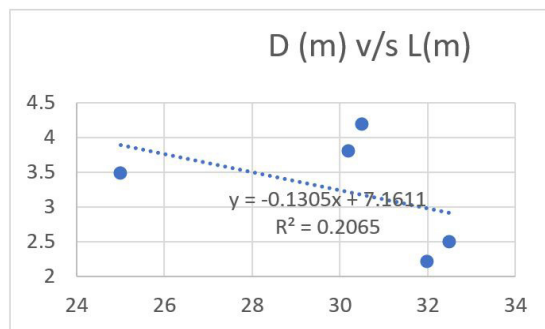
$$y=0,3552(x)-0,2694 \quad y=11,4522 \cong 11,5m$$

Figura 4.
Regresión eslora entre perpendiculares vs eslora.



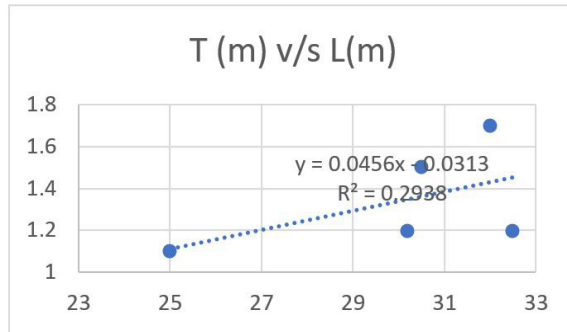
$$y=0,615(x)+12,575 \quad y=31,41 \cong 31,5m$$

Figura 5.
Regresión del puntal vs eslora.



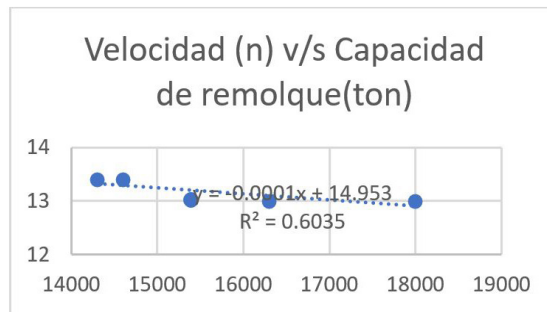
$$y=-0,1305(x)+7,1611 \quad y=2,8546 \cong 2,9m$$

Figura 6.
Regresión de calado vs eslora.



$$y = -0,0456(x) - 0,0313 \quad y = 1,4735 \cong 1,5m$$

Figura 7.
Regresión velocidad vs remolque.



$$y = -0,0001(x) + 14,953 \quad y = 13,453 \cong 13,5n$$

Los coeficientes de la carena (Olivella, 1995) que se obtuvieron son los que intervienen en los distintos aspectos hidrodinámicos del buque, como la resistencia al avance y propulsión de la embarcación, la estabilidad y maniobrabilidad, el trimado y comportamiento del buque en aguas tranquilas, la capacidad de los espacios de carga y su estiba más conveniente, además de ser muy importante para los procesos de fabricación:

- Coeficiente de bloque: $C_B = 1,2 - \frac{0,5+V}{L_{pp}^{0,5}} = 0,581$
- Coeficiente de sección media: $= 0,88$ $C_M = 0,526 + \frac{0,49}{C_B} - \frac{0,165}{C_B} = 0,88$
- Coeficiente prismático longitudinal: $C_P = \frac{C_B}{C_M} = 0,66$
- Coeficiente de flotación en carga: $= 0,821$ $C_{wp} = 0,45 C_B + 0,56 = 0,821$

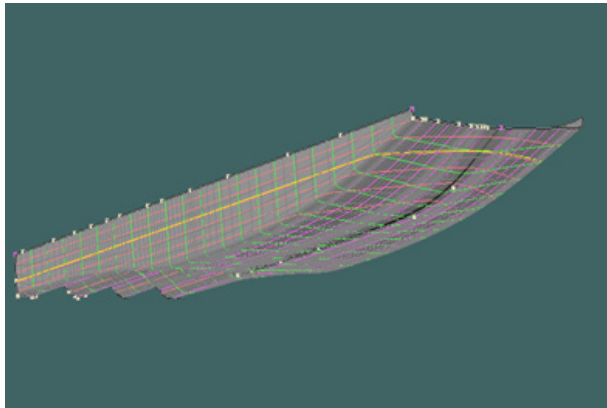
Y en base a ellos, se consiguen las siguientes relaciones adimensionales:

$$\frac{B}{D} = 3,96 \qquad \frac{L}{D} = 11,38 \qquad \frac{L}{B} = 2,87$$

Con los datos anteriores obtenidos se realizó la modelación de la embarcación (figura 8) con el programa de arquitectura naval Maxsurf (Bentley, 2022).

Figura 8.

Dibujo de formas del empujador. (Fuente: propia).



De la salida del módulo del buque en Maxsurf se obtiene la curva de la resistencia al avance con respecto a la velocidad, en donde podemos apreciar una menor resistencia al avance, debido a que solo se calcula el casco, sin apéndices, siendo la resistencia al avance del casco a 13,5 nudos de unos 75kN aproximadamente. Al no ser una necesidad habitual en este tipo de buques que se les requiera navegar tan rápido, el valor de su resistencia al avance habitual será menor. En las figuras 9 y 10 se puede observar la curva de resistencia vs velocidad y la de potencia efectiva vs la capacidad de remolque.

Figura 9.

Curva resistencia vs velocidad.

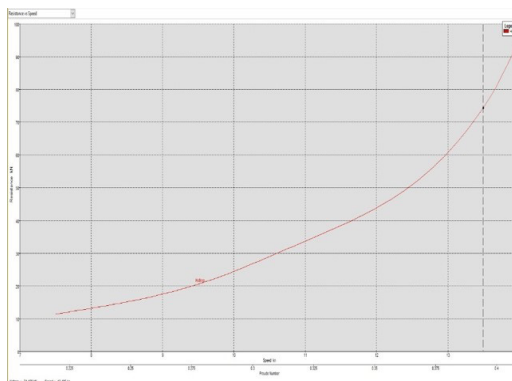
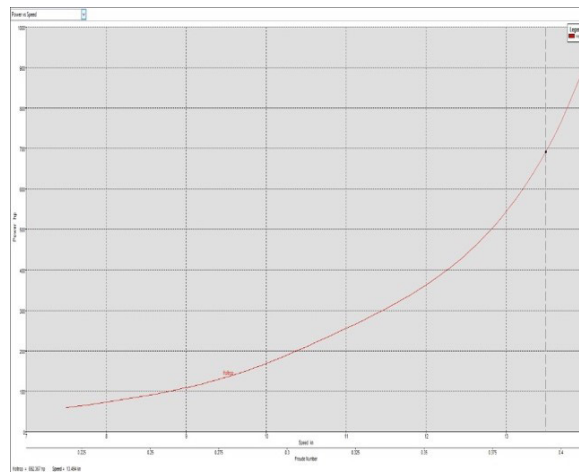


Figura 10.
Potencia efectiva vs velocidad.



Los remolcadores empujadores son un tipo de embarcación auxiliar que se utilizan para la navegación y maniobra de los buques y otros elementos flotantes y que se suelen utilizar para asistir a otro buque en sus maniobras de atraque y desatraque, empujar a otro buque que se ha quedado sin propulsión propia o para transportar barcasas de un sitio a otro. Las principales características que deben cumplir son el tener una potencia adecuada, una excelente maniobrabilidad y una estabilidad a prueba de cualquier operación. Esta estabilidad debe basarse en la resolución A.749 (18) Código Internacional de Estabilidad sin Avería (OMI, 2003) y se particulariza en que debe de tenerse en cuenta que las puertas de los alojamientos y cámara de máquinas deben ser estancas, dado que el buque puede alcanzar una gran escora en su operación.

La capacidad y facilidad de maniobra (Sagarra, 1997) es fundamental para que pueda realizar adecuadamente su trabajo, ya que será necesario que pueda moverse en espacios reducidos y en todas las direcciones (Reid, 1986). Para ello se han diseñado unas formas del casco casi planas con el fin de que las corrientes de aspiración puedan llegar a las hélices o a los sistemas Voith-Schneider con las menores turbulencias posibles. En nuestro caso, un empujador para llevar barcasas en el río Magdalena, la potencia requerida debe ser como mínimo la necesaria para empujar las barcasas de un determinado desplazamiento a una velocidad mínima, teniendo en cuenta que deberá gobernar el convoy en unas posibles condiciones meteorológicas adversas, entre las que se encuentra una posible alta corriente del río en épocas de lluvia.

Al tratarse de una embarcación de dimensiones reducidas y teniendo en cuenta las funciones principales del empujador que operara de manera exclusiva en el río Magdalena, y siendo esta una zona de navegación poco profunda, se considera de suma importancia el diseño de las formas de la embarcación y las dimensiones de su sala de máquinas, teniendo así que presentar un diseño compacto, para lo que se necesita reducir las medidas de los sistemas principales y auxiliares lo más posible. Para validar y aprobar el diseño de estos sistemas, se siguieron las reglas de buques mercantes de acero de la sociedad de clasificación Bureau Veritas (BV, 2022), en su normativa NR 467.

Resistencia al Avance y Potencia al Freno

La potencia necesaria para instalar en el remolcador será la que obtenga la velocidad máxima requerida, y que estará en función de los rendimientos del motor propulsor, de la línea de ejes, de las hélices y de los cascos de las barcasas y del propio buque (Hensen, 2003).

De la gráfica de la regresión de la capacidad de remolque vs potencia efectiva, se obtienen unos valores de 1.200 kW a una velocidad de 13,5 nudos.

$$EHP = \frac{R_t V}{550 \frac{ft lb}{s Hp}} \quad R_t = 39.392 lb \approx 175.223 kN \quad (1)$$

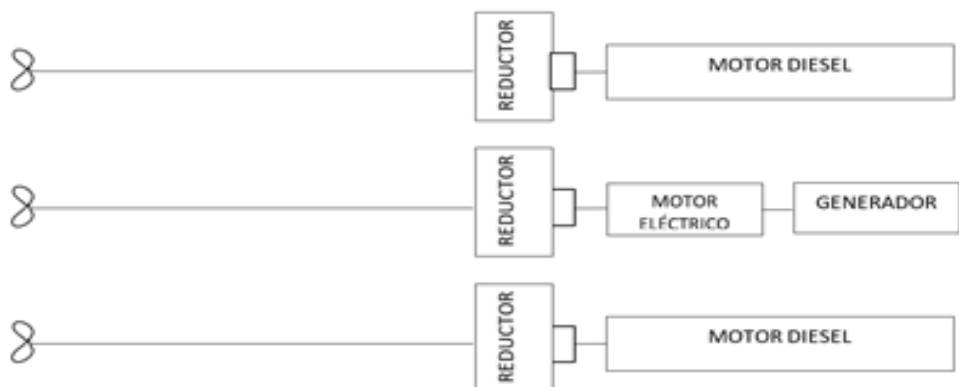
Para el cálculo de la potencia al freno (BHP) se establece la siguiente relación de ecuaciones, basándose en el concepto de rendimiento establecido por la Universidad Naval de Estados Unidos (USNA, 2021), en el capítulo 7.

$$\eta_{propulsión} = \frac{EHP}{BHP \eta_{eje}} \quad BHP = 3.026,97 Hp \quad (2)$$

Codelod

El sistema CODELOD, combinado eléctrico-diésel es el que emplea para la propulsión a motores diésel y a la generación de energía (figura 11), que al estar conectados con los motores eléctricos por una caja reductora, y que a su vez es la encargada de aumentar el par a velocidades más bajas para disminuir el giro del motor y aumentar la fuerza de empuje, se utilizan con el fin de reducir significativamente los costos de servicio, ya que se reduce la cantidad de motores diésel diferentes y además, el motor eléctrico requiere un mantenimiento menor. Y desde luego, el motor eléctrico funciona de manera más eficiente que el motor diésel cuya eficiencia es baja cuando trabaja lejos del 85% MCR.

Figura 11.
Configuración CODELOD. (Fuente: propia).



Maquinaria Auxiliar

Se ha procedido a calcular las siguientes características de los sistemas auxiliares:

- Sistema de combustible:

$$Capacidad_{total} = \frac{Capacidad_{nav}}{densidad\ combustible} \text{ margen del 110\%} \quad (3)$$

La capacidad de navegación en este caso y para esta embarcación es de 71m³ y la densidad media del combustible según las normas del Bureau Veritas, oscila en 0.85 y 0.89 según lo establecido en la normativa ISO 8217 del 2010:

$$Capacidad_{total} = \frac{71,5\ m^3}{0,85} \cdot 1,1 = 93\ m^3$$

- Sistema de aceite lubricante: $Volumen_{aceite} = 1,2\ m^3$

- Sistema de lastre: $Q = \frac{capacidad\ total\ lastre}{cantidad\ bombas \times horas\ lastrar/deslastrar}$ (4)

La capacidad total de lastre en este caso y para esta embarcación es de 94,3 y las horas capaces de lastrar y deslastrar es de 4,3 horas, según Bureau Veritas (2022):

$$Q = \frac{94,3\ m^3}{4\ bombas\ 4,3\ horas} = 5,5\ \frac{m^3}{h}$$

En base a estos datos se presenta la tabla 2 que muestra un análisis de mejoría en consumo de combustible:

Tabla 2.

Consumo de combustible basado misión de OPV. (Fuente: Matec)

Operation mission	Speed (knot)	Duration (hour/year)	DMP propulsion system		CODAE propulsion system	
			Main engine	Aux engine	Main engine	Aux engine
Harbouring	-	3500	-	998 ton	-	645 ton
Surveillance	JO	1550	288 ton	445 ton	-	571 ton
Patrolling	18	2100	1836 ton	593 ton	2040 ton	245 ton
Chasing	22	1550	2212 ton	445 ton	2204 ton	605 ton
Total of fuel consumption			6817 ton/year		6309 ton/year	

Es por esto que se justifica la información tomada de (Matec, 2010), en la tabla 2, en la que se realiza un estudio de iguales características sobre el cambio de método de propulsión de una propulsión puramente diésel a un sistema diésel-eléctrico. Del mismo modo, se justifica este argumento ya que se observa que las operaciones

a bajas velocidades de este tipo de configuración pueden conseguir alcanzar un menor consumo de combustible en toneladas consumidas por año.

$$\text{Porcentaje mejora CODELOD} = \frac{100\% \Sigma \text{CODAE MAIN AUX}}{\Sigma \text{DMP MAIN AUX}} \approx 12\% \quad (5)$$

Conclusiones

- El modelo de la embarcación propuesta es el resultado de una regresión de estudios anteriores con las formas más usadas en este tipo de remolcadores pusher, en donde se obtiene un diseño de la embarcación con buenas características hidrodinámicas.
- En el presente estudio se logra el diseño de un sistema de propulsión para un remolcador empujador que, aunque tenía unos requerimientos iniciales, se observa que algunos datos según regresiones, no son tan certeros debido a las pocas embarcaciones construidas con funcionalidad de empujar que hay en el mundo y se han optimizado en el desarrollo del trabajo.
- Si se comparan el remolcador empujador fluvial de Cotecmar, con el prototipo de remolcador de este proyecto, se deduce como beneficio de este diseño el ahorro de combustible debido a la configuración, siendo importante esto en el ciclo de vida útil del remolcador.
- Tras las regresiones obtenidas con la base de datos de otros remolcadores empujadores, la potencia efectiva requerida para el movimiento del buque y 8 barcazas es de EHP= 1.200 kW, y para la operación de cada motor tanto eléctrico como diésel se requiere una potencia al freno de BHP= 2.257 kW. Para la resistencia al freno según cálculos arroja 175,2 kN a una velocidad máxima de 13,5 nudos sin barcazas y con barcazas a máxima carga se consigue una velocidad de 6 nudos.
- Se necesitan, para los sistemas auxiliares, una capacidad total de combustible de 93 m3, un sistema de aceite lubricante de 1,2 m3. El lastre contará con 4 bombas capaces de lastrear y deslastrear en 4,3 horas con un caudal par de 5,5 m3/h por cada bomba.

Figura 13.
Empujador sin carga.



Fuente: Cotecmar

Referencias

- Álvarez, C. (2020). *Remolcador de puerto, altura y transportes especiales*. Universidad de Oviedo.
- Andrés, H. (27 de 08 de 2015). *Catorce6*. Obtenido de catorce6.com: <https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/regionales/350-publicaciones/13314-r%C3%ADo-magdalena-200-a%C3%B1os-de-soledad>
- ARC. (01 de 06 de 2020). *armada.mil.co*. Obtenido de armada.mil.co: <https://www.armada.mil.co/es/content/b-plan-desarrollo-naval-2042-0>
- BV. (2022). *Clasificación de buques y unidades offshore*. Obtenido de Bureau Veritas en <https://www.bureauveritas.com>
- Cormagdalena. (2022). *El río Magdalena*. Obtenido de Cormagdalena en: <http://cormagdalena.gov.co>
- Cotecmar. (2022). *Empujador fluvial*. Obtenido en Cotecmar.com: <https://www.cotecmar.com>
- Bentley. (2022). *Maxsurf: software de arquitectura naval y diseño de buques*. Obtenido en Bentley.com: <https://www.bentley.com>
- Hensen, H. (2003). *Tug use in port. Puerto de Rotterdam*, Países Bajos.
- Mintransporte. (2015). *Plan maestro fluvial de colombia*. Bogota D.C: Mintransporte.
- Olivella, J. (1996). *Teoría del buque*. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- OMI. (2003). *Código internacional de estabilidad sin avería. Resolución A. 748 (18)*. Organización Marítima Internacional. Londres, Reino Unido.
- Reid, G.H. (1986). *Shiphandling*. Londres: Cornell Maritime Pr/Tidewater Pub.
- Sagarra, R.M. (1997). *Maniobra de buques*. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- U.S Navy. (2021). *usna.edu*. Obtenido de usna.edu: https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN400/02.07a%20Ch7%20HW%20Solutions.pdf
- Wilson, J. (2006). *Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación*. Obtenido de Medidas de ahorro de combustible y de costos para armadores de pequeñas embarcaciones pesqueras: <https://www.fao.org/3/x0487s/X0487S00.htm#TOC>