

DISEÑO CONCEPTUAL DE EMBARCACIONES FLUVIALES DE CARGA Y PASAJEROS PARA EL RÍO MAGDALENA POR MEDIO DE UN MODELO DE SÍNTESIS

Paternina Castro L.¹, Alvarado Carvajal, D.¹, Paipa Sanabria, TN. E.G.¹

¹Cotecmar

¹e-mail: lpaternina@cotecmar.com,

RESUMEN

Hasta mediados del siglo XX, ríos como el Magdalena se constituían como la principal ruta para el transporte de cargas y pasajeros. No obstante, problemas asociados a la pérdida de navegabilidad por acumulación de sedimentos, la construcción de vías y ferrocarriles y el posterior afianzamiento de las aerovías, relegaron el transporte de carga a trayectos cortos en embarcaciones pequeñas. Como parte de un estudio que busca revitalizar las actividades económicas con base en el río Magdalena, el presente trabajo detalla el desarrollo del diseño conceptual de embarcaciones fluviales de carga y pasajeros cuyas características y dimensiones posibiliten el mejor desempeño manteniendo una navegación segura. Para tal fin, se desarrolló un modelo de síntesis que permita definir las dimensiones y características para el diseño de embarcaciones efectivas.

Palabras claves: Embarcaciones fluviales, modelo de síntesis, transporte de carga

1- INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, ríos y canales han sido usados como una ruta segura para el transporte de cargas y pasajeros. En Colombia, durante el siglo XIX y hasta mediados del XX, el desarrollo del país, el transporte de mercancías y pasajeros hacia y desde el interior del país dependía casi exclusivamente del río Magdalena. A finales de la primera mitad del siglo XX, con embarcaciones a vapor se transportaba por el río cerca del 60% del comercio de importación y



exportación; para la década de 1970 esta cifra era cercana al 6%. Esto como consecuencia de la acumulación de sedimentos, avances en construcción de vías, líneas de ferrocarril y posteriormente la instauración de aerovías[1]. Lo anterior conllevó al abandono estatal de esta ruta y su limitación al transporte de carga en trayectos cortos y en su mayoría en embarcaciones livianas de limitadas dimensiones[2]. En la actualidad, se adelantan estudios para incluir la navegación por el río Magdalena como pilar fundamental en la estrategia nacional para un sistema de transporte multimodal que permita una mejor conectividad entre regiones.

Para tal fin, se requeriría en primer lugar, la selección de embarcaciones de carga fluviales para el transporte efectivo de carga y pasajeros manteniendo dimensiones y calados que permitan una segura navegación por el río. Por lo tanto, surge la necesidad de definir las características de una embarcación que cumpla, con el mejor desempeño, los requisitos y requerimientos del proyecto.

Para justificar que el resultado del proceso de diseño de como resultado la embarcación más efectiva, se realizó un modelo de síntesis, que, mediante algoritmos, permite la aplicación de diversos modelos para la selección de un conjunto de embarcaciones de diferentes dimensiones que pueden llegar a cumplir los requerimientos propuestos. Las interdependencias de los parámetros de diseño hacen que el proceso sea altamente iterativo [3], por lo que este método de diseño automático permitiría generar un espacio de diseño con un gran número de posibles resultados[4][5].

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es, mediante el uso de un modelo de síntesis, definir el diseño a nivel conceptual de las alternativas que permitan el mejor desempeño para el transporte de cargas y pasajeros por el río Magdalena. A futuro, los diseños obtenidos al final del proceso pueden ser extendidos a diseños funcionales en la ejecución de proyectos futuros.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

En primer lugar, se definen como entrada los límites de las dimensiones que puede llegar a tener la embarcación de acuerdo a las características del río Magdalena. A partir de regresiones realizadas en embarcaciones fluviales de condiciones de navegación similares, se obtienen las relaciones de Eslora/Manga (L/B), Eslora/ Puntal (L/D) y Manga/ Calado (B/T) propias para embarcaciones fluviales[6][7] [ver tabla 1].

Junto a las relaciones anteriores, se tiene en cuenta las dimensiones, restricciones y características del canal en temporadas secas y dentro de los límites de intermodalidad propuestos [8]. Estos límites se restringen principalmente por la profundidad, ancho del canal y radio de curvatura en los meandros. De esta manera, se obtienen los límites superiores e inferiores para desarrollar las iteraciones [ver tabla 2].

Tabla 1. Límites de las relaciones geométricas para embarcaciones de carga y de pasajeros

Relación geométrica	Embarcación de carga	Embarcación de pasajeros
LOA/D	22,20 – 17,04	17,60 – 10,11
LOA/B	5,85 – 4,40	6,80 – 3,53
B/T	10,38 – 7,54	8,89 – 4,42
Cb	0,8 – 0,9	0,8 – 0,9

Tabla 2. Límites de las dimensiones para embarcaciones de carga y de pasajeros

Dimensiones/Características	Embarcación de carga	Embarcación de pasajeros
Manga [m]	12,4 – 7,4	12,4 – 6,0
Eslora [m]	78,1 – 41,5	77,6 – 20,0
Puntal [m]	3,5 – 2,5	3,5 – 0,7
Calado [m]	1,6 – 1,2	1,6 – 0,45
Velocidad [kn]	9,0 – 4,2	9,0 – 4,2

Para el desarrollo del modelo de síntesis se elaboró un código de Matlab que implementa el algoritmo mostrado en la Figura 1.





Figura 1. Modelo de síntesis propuesto

Dentro del rango de dimensiones y dependiendo del paso definido en la iteración, se generó un arreglo multidimensional que contiene todas las posibles combinaciones de cada uno de los valores para cada parámetro de diseño. Posteriormente se recorre el espacio de diseño y se evalúa cada alternativa con los módulos de arquitectura naval que contienen los modelos analíticos y semi-empíricos para la estimación de los pesos, la potencia requerida, la autonomía, y los chequeos de estabilidad. Las alternativas que no superaron con los chequeos fueron descartadas

2.1 Condición de equilibrio de pesos

Una restricción básica dentro del modelo de síntesis corresponde al balance entre el peso ligero (LWT), peso muerto (DWT) y el desplazamiento. Las alternativas cuya suma del peso ligero y peso muerto no son iguales al desplazamiento son descartadas como soluciones.

$$L*B*T*C_b - LWT - DWT = 0 \quad (1)$$

2.2 Módulo de estimación de potencia

Las estimaciones de la potencia al freno en etapas iniciales del diseño pueden ser inexactas dada que las formas del casco y su relación con el sistema de propulsión están apenas definidas. Schneekluth & Bertram [9] proponen una relación semi-empírica para embarcaciones fluviales en función de la velocidad, desplazamiento y resistencia del casco en régimen de aguas profundas (2).

$$\frac{RT}{\Delta} = 73,73(\gamma)^4 - 144,9\left(\frac{V}{\sqrt{L}}\right)^3 + 115,9\left(\frac{V}{\sqrt{L}}\right)^2 - 28,87\left(\frac{V}{\sqrt{L}}\right) + 2,99 \frac{lb_f}{t} \quad (2)$$

A partir de la ecuación anterior, Lackenby [10] presentó una relación aplicable para aguas someras en función de la profundidad respecto a la quilla (CWD), profundidad del río (h), calado (T) y velocidad (V). A pesar que esta relación no tiene en cuenta el trimado, es usualmente usada para corregir la resistencia del casco en aguas de poca profundidad [11].

$$\frac{RT(h)}{RT(\infty)} = -0,125 + 0,875 \left(K_{wD0} + 0,4 \frac{B}{T} K_{wD1} \right) (3)$$

$$K_{wD0} = 1 + 0,97 e^{-2,74 \left(\frac{h-T}{T} \right)}$$

$$K_{wD1} = 0,75 e^{-4,87 \left(\frac{h-T}{T} \right)}$$

La resistencia total del buque (RT) necesaria para estimar la potencia requerida se calcula como la suma de la resistencia del casco desnudo en aguas profundas, la resistencia adicional por efecto de aguas poco profundas, la resistencia por apéndices; estimada en 15% de la resistencia del casco, y un margen de diseño del 15%. La potencia requerida (PE) es estimada a partir del producto de la resistencia total (RT) y la velocidad del buque (V) (4). La eficiencia del sistema (n_{prop}), mostrada en (5), es el cociente de la potencia efectiva (PE) y la potencia al freno (PB).

$$PE = RT * V \quad (4)$$

$$n_{prop} = PE / PB \quad (5)$$

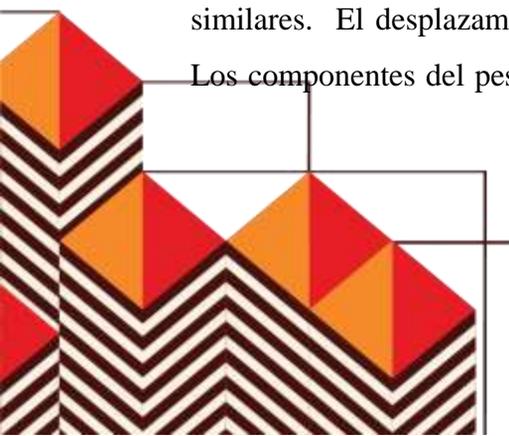
2.3 Módulo de autonomía

La autonomía de las alternativas es calculada en función de la capacidad de carga, consumo de provisiones por tamaño de la tripulación y duración del trayecto y por la tasa de consumo de combustible. Para el consumo de agua potable se recomienda utilizar 30 galones por persona por cada día y el almacenamiento debe ser suficiente, como mínimo, para 2 días al contarse con una planta para tratamiento de agua potable.

2.4 Módulo de pesos

Los pesos son estimados a partir de regresiones desarrolladas para buques de prestaciones similares. El desplazamiento viene expresado como la suma del peso ligero y el peso muerto.

Los componentes del peso ligero para una embarcación consisten en el peso estructural, el peso



del equipo, el peso de maquinaria y un margen del 5%. Todos los anteriores son calculados a partir de relaciones semi-empíricas[6]. El peso muerto está conformado principalmente por el peso de los contenedores en embarcaciones de carga, y para las embarcaciones de pasajeros por el peso de los mismos y su respectivo equipaje[7].

2.5 Módulo de estabilidad

En etapas tempranas del diseño la altura metacéntrica transversal (GM_T) indica el nivel de estabilidad del buque en función del centro vertical de flotación (KB), el radio transversal metacéntrico (BM_T) y el centro vertical de gravedad (KG) [ver ecuación 4]. Al igual que para embarcaciones marítimas, el GM_T debe estar por encima de 1 metro [6].

$$GM_T = KB + BM_T - KG \quad (6)$$

2.6 Módulo de costos

El modelo incluye un módulo para el cálculo de los costos de construcción. Estos costos están clasificados en costos laborales, costos de materiales, y costos generales. A su vez, los costos de construcción están conformados por los costos de acero de casco, costo de equipamiento e ingeniería de casco, y el costo de la maquinaria.

3- RESULTADOS

3.2 Modelo de síntesis para embarcaciones de carga

De la ejecución del modelo para embarcaciones de carga, se obtuvo 181440 alternativas de las cuales 15048 son convergentes. Los resultados obtenidos del modelo de síntesis permiten revisar el efecto de las características de la embarcación en el desempeño de los parámetros. Entre estas, el efecto del calado y coeficiente de bloque en la potencia al freno requerida y desplazamiento, peso ligero y peso muerto.



La Figura 3 muestra la relación de la potencia de frenado respecto al desplazamiento del barco a la eslora (L) y manga (B). Con la finalidad de caracterizar el espacio de diseño, en la Figura 4 se analizó el efecto del calado, coeficiente de bloque sobre la relación de potencia – desplazamiento.

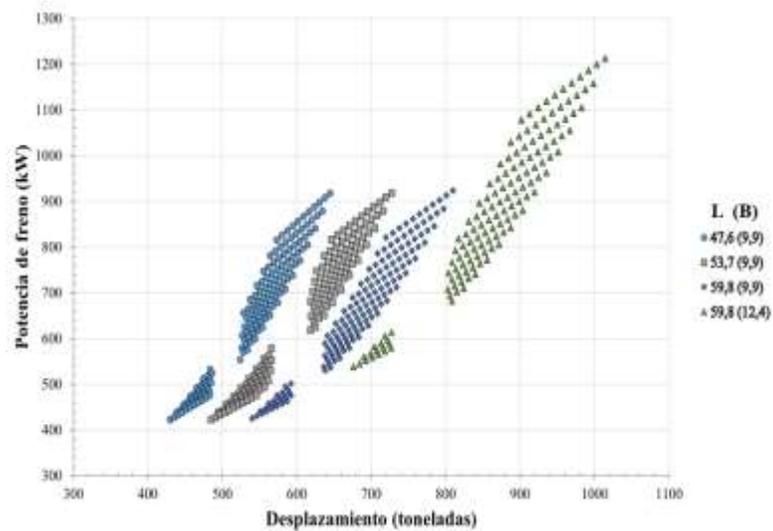


Figura 3. Relación de potencia –desplazamiento en función de la eslora y manga para de 9 nudos.

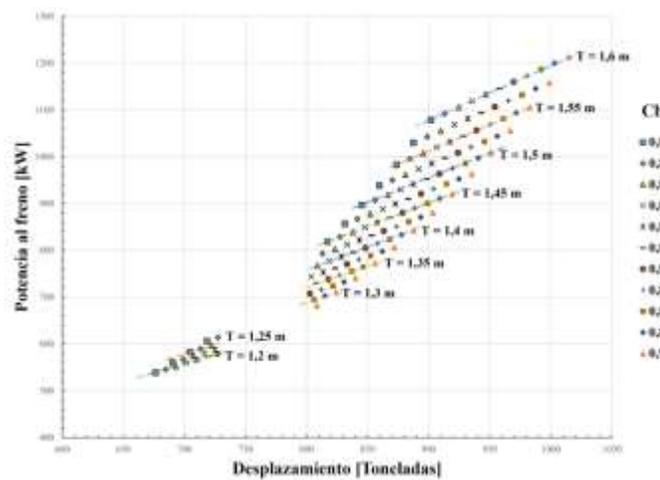
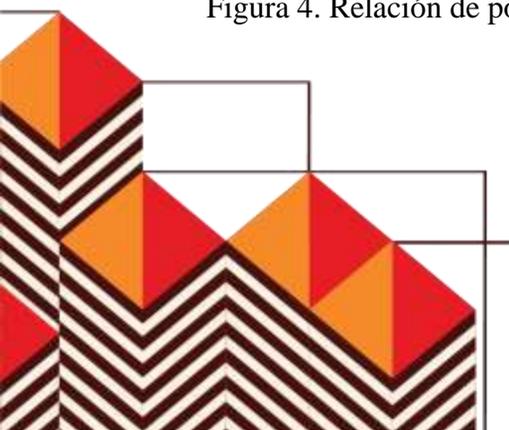


Figura 4. Relación de potencia – desplazamiento resaltando el calado y el coeficiente de bloque



3.3 Modelo de síntesis para embarcación de pasajeros

Para el modelo de embarcación de pasajeros, se generaron 176000 alternativas, de las cuales convergieron 2418. Se llevó a cabo un proceso de evaluación y descarte de alternativas similar al llevado a cabo para las embarcaciones de carga. Así mismo La Figura 5 muestra la relación de la potencia de frenado respecto al desplazamiento del barco a la eslora (L) y manga (B) a 9 nudos.

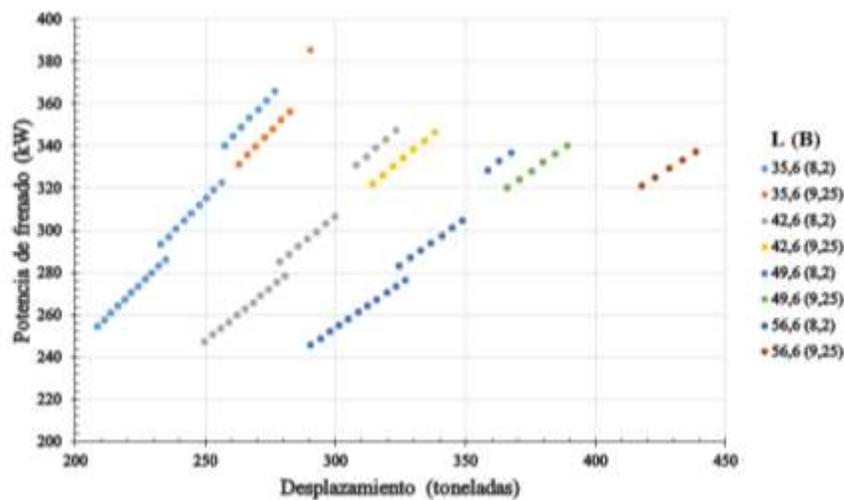


Figura 5. Relación de desplazamiento – potencia en función de eslora y manga.

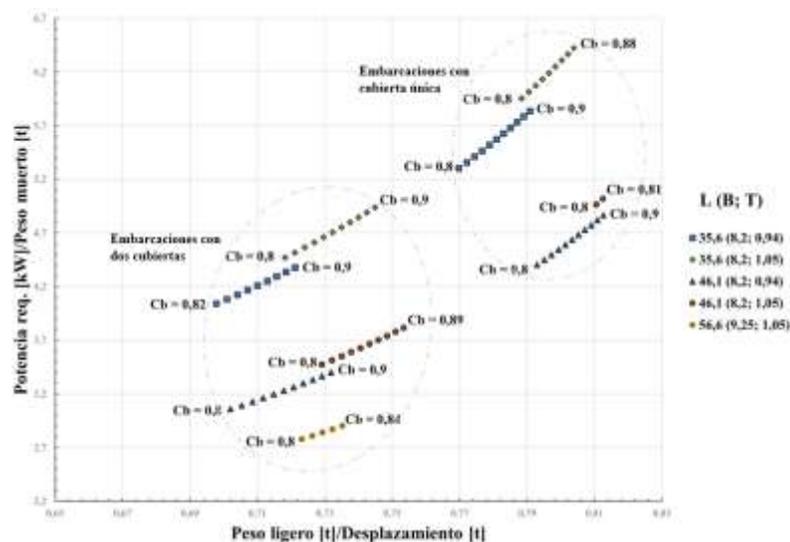


Figura 6. Relación de desplazamiento – potencia en función de eslora y manga

Una vez descrito la relación entre los datos obtenidos, se determinan las embarcaciones más efectivas. Para el tránsito rentable por el río Magdalena se requiere una embarcación cuyo calado no supere 1,6 m, con una relación adecuada de capacidad de carga y potencia requerida al tiempo en que su peso ligero es reducido. El alcance debe ser suficiente para alcanzar embarcaderos y puertos lejanos río arriba con la menor cantidad de paradas para repostaje.

Para escoger la embarcación con el mejor desempeño, es necesario generar una figura de mérito para jerarquizar la prioridad de los diversos parámetros. La jerarquía de las diferentes variables relacionadas con el diseño de la embarcación y su calificación ponderada fue definida mediante el software de decisiones multi-variable 'Expert Choice' [ver Tabla 4].

Tabla 4. Jerarquía de parámetros para figura de mérito para cascos de carga

Parámetros	Figura de mérito	
	Carga	Pasajeros
Peso muerto	38.8%	41.4%
Potencia al freno	31.1%	30.5%
Calado	14.3%	14.0%
Peso ligero	10.4%	9.1%
Alcance	5.4%	5.0%

Después del estudio de jerarquía de las variables, se seleccionaron embarcaciones de carga con esloras comprendidas entre 47,6 y 59,8 metros, y mangas entre 9,9 y 12,4 metros. Las alternativas propuestas para la embarcación de pasajeros se encuentran en un rango de una o dos cubiertas, esloras entre 35,6 y 56,6 m y manga entre 8,2 y 9,5 m.

De las alternativas convergentes se escogen las dos mejores calificadas en dos rangos distintos conforme a las necesidades económicas de la región cuyas implicaciones se discutirán en la siguiente sección [ver tabla 5].



Tabla 5. Características de las alternativas seleccionadas para embarcación de pasajeros y carga

Características	Embarcaciones			
	Pasajeros		Carga	
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 1	Alternativa 2
Eslora total (LOA)	56,6 ± 3,5 m	35,6 ± 3,5 m	47,60 ± 3 m	59,80 ± 3 m
Eslora línea de agua (LWL)	53,77 ± 3,5 m	33,82 ± 3,5 m	45,22 ± 3 m	56,81 ± 3 m
Pasajeros	360 personas	72 pasajeros	N/A	N/A
Manga (B)	9,25 ± 0,5 m	8,2 ± 0,5 m	9,90 ± 1,25 m	12,4 ± 1,25 m
Puntal (D)	3,5 m	2,3 m	2,30 m	2,30 m
Calado (T)	1,05 m	0,94 m	1,20 m	1,20 m
Potencia al freno (9 nudos)	321,252 kW	254,53 kW	423,135 kW	538,73 kW
Peso muerto	115,66 t	48,016 t	181,68 t	281,80 t
Peso ligero	302,13 t	193,732 t	248,09 t	394,47 t
Desplazamiento	417,79 t	208,548 t	429,77 t	676,266 t
KG [m]	3,10 m	1,96 m	2,33 m	2,37 m
Coficiente Bloque (Cb)	0,8	0,8	0,8	0,8
Cubiertas de pasajeros	2	1	N/A	N/A

De las embarcaciones obtenidas se analizala relación de potencia requerida por pasajero transportado [ver figura 7] y de potencia requerida por tonelada de peso muerto para embarcaciones de carga [ver Figura 8].

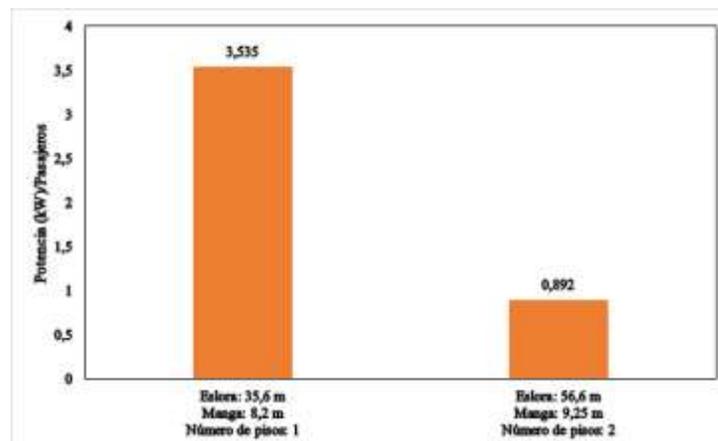


Figura 7. Relación Potencia/ Pasajeros

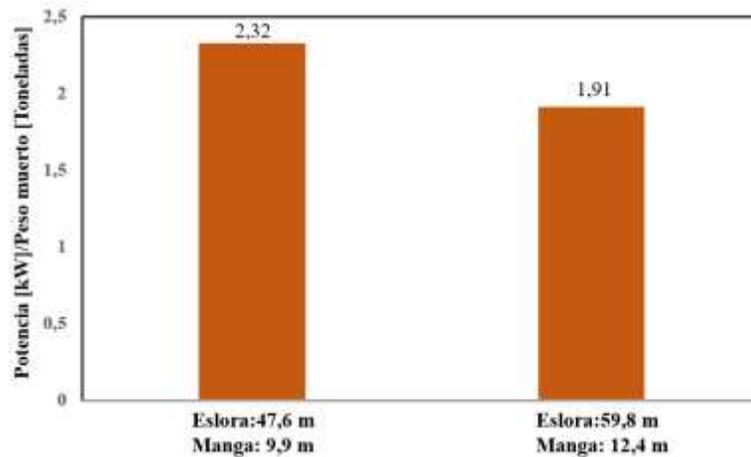


Figura 8. Relación Potencia/ Peso muerto para embarcaciones de carga

Finalmente, se grafican las curvas de potencia obtenidas en el rango de velocidades del proyecto para embarcaciones de carga [C] y pasajeros [P] [ver figura 9].

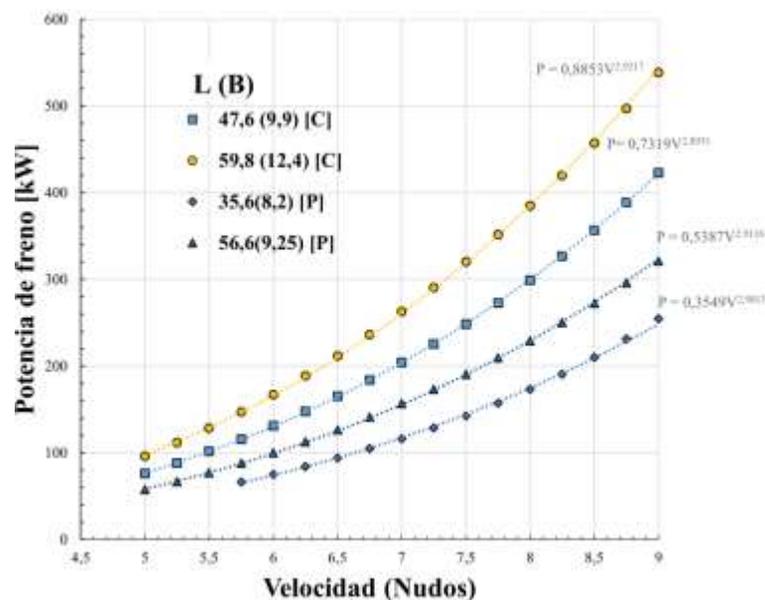


Figura 9. Curvas de potencia para las soluciones seleccionadas

4- DISCUSIÓN

4.1 Modelo de síntesis para embarcaciones de carga

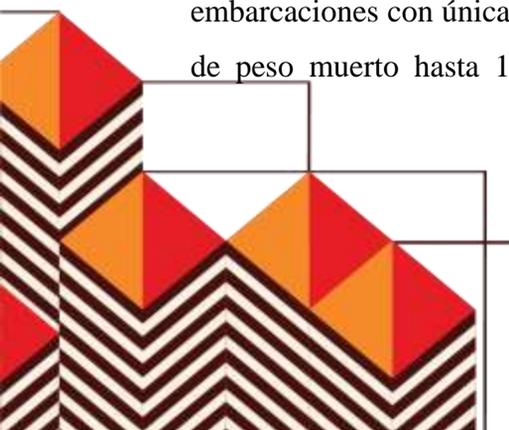


De la figura 3, en que se relacionan todas las alternativas convergentes cuya potencia al freno permitiría una potencia de 9 nudos, se puede observar que se obtienen 4 combinaciones de eslora y manga y que en cada una de estas hay dos conjuntos de embarcaciones que varían en su puntal, calado y coeficiente de bloque. Se muestra una fuerte dependencia de la potencia al freno respecto a la manga y una menor dependencia frente a la eslora. Tomando como referencia los resultados de la potencia al freno y desplazamiento para el conjunto de datos de 78,1 m de eslora y 12,4 m de manga, a continuación, se describirá la naturaleza de cada uno de los puntos en términos de coeficiente de bloque (C_b) y calado (T).

A su vez, En la figura 4, se puede analizar el efecto que tiene el calado y el coeficiente de bloque en la potencia requerida. Se encontró que el calado, dados los modelos analíticos usados, tiene una mayor influencia en el aumento de requerimientos de potencia al freno que el coeficiente de bloque. De esta manera, mientras que un incremento del 12,5% en el coeficiente de bloque implica un aumento cercano al 20% en la potencia al freno requerida, un incremento cercano a 8% en calado conlleva a un incremento de 21% en los requerimientos de potencia. Esta tendencia se mantiene para el análisis de embarcaciones de pasajeros.

4.2 Modelo de síntesis para embarcaciones de pasajeros

Al igual que el caso de embarcaciones de carga, en la figura 5 se gráfica las embarcaciones con capacidad de navegar a 9 nudos en relación con la potencia al freno y el desplazamiento, se obtiene un rango de diseño entre 240 y 380 kW de potencia al freno para embarcaciones entre 200 y 450 toneladas, siendo la manga el factor de mayor influencia en la potencia al freno, y la eslora en el desplazamiento. En la Figura 6, al relacionar la potencia al freno requerida por cada tonelada de peso muerto y la fracción del peso ligero en desplazamiento, se evidencian dos grupos: el de embarcaciones con una cubierta y las embarcaciones con cubierta doble. Las embarcaciones con única cubierta presentan requerimientos de potencia al freno por cada tonelada de peso muerto hasta 1,3 veces mayor. Adicionalmente, comparando ambas alternativas, un



incremento del puntal de 11 % representa un incremento en el requerimiento de potencia en 8% y un aumento de la fracción del peso ligero respecto al desplazamiento en 2,5%.

4.2 Selección de embarcaciones

Dadas las condiciones variables del río Magdalena, el tamaño de puertos y embarcaderos y la funcionalidad de las embarcaciones, la nave más efectiva encontrada puede no ser apropiada para las funciones de transporte más comunes. Por ende, se formaron dos conjuntos con los resultados en función de su manga y de cada conjunto se obtuvo una embarcación que cumpliría de formas más efectivas con los requisitos de diseño.

Para el caso de las embarcaciones de pasajeros [ver tabla 5] se seleccionaron dos embarcaciones. La primera embarcación tiene una eslora de 35 metros, una cubierta y 8,2 m de manga. La segunda, es una embarcación mayor, de 2 cubiertas, 56 metros de eslora y 9,25 m de manga. La primera estaría destinada a transporte de personas en cortos trayectos departamentales y la segunda; con mayor desplazamiento, a trayectos interdepartamentales superiores a 1500 millas náuticas. Al comparar ambas alternativas en términos de requerimientos de potencia por pasajeros transportados se tiene que la embarcación de 35 metros de eslora requiere una potencia al freno por pasajero transportado 4 veces mayor a la embarcación de 56 metros [ver figura 7]; esto está relacionado con la mayor fracción de peso ligero respecto a desplazamiento en las embarcaciones de menor eslora [ver figura 6].

En el caso de las embarcaciones de carga, se seleccionaron dos naves, la primera con una eslora de 47,6 m y una manga de 9,9 m y la segunda con una eslora de 59,8 m y 12,4 m de manga. La primera embarcación estaría destinada a transporte de carga en trayectos departamentales mientras que la segunda se diseñaría para el transporte de carga en rangos superiores a 1600 nm. En la figura 8 se evidencia que la embarcación de menor eslora presentaría un requerimiento de potencia 1,21 veces mayor por cada tonelada de peso muerto desplazado debiéndose, al igual que



en las embarcaciones de pasajeros, por la mayor fracción de peso ligero en el desplazamiento conforme disminuye la eslora.

Finalmente, en la figura 9 se resumen los requerimientos de potencia al freno de las 4 embarcaciones seleccionadas. En esta, se puede observar que debido principalmente a efectos de la manga y calado, se registra un 68% de incremento en potencia al freno en relación con las embarcaciones de carga y pasajeros con mayor eslora.

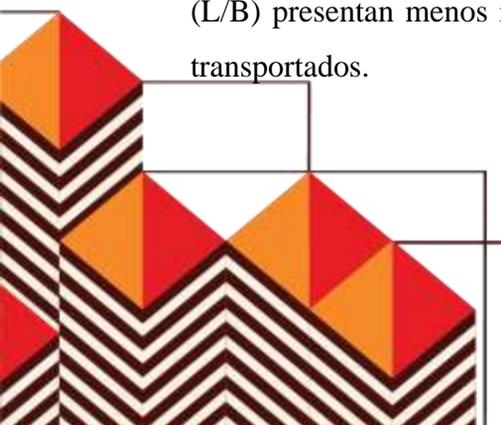
5- CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un modelo de síntesis orientado a seleccionar las embarcaciones fluviales más adecuadas para el transporte de carga y pasajeros por el río Magdalena. El modelo se desarrolló mediante el uso de expresiones analíticas y semi-empíricas para definir el espacio de diseño y se realizó una selección de las embarcaciones más efectivas por medio de una figura al mérito a partir de los requerimientos de diseño.

Se definió el diseño conceptual de dos embarcaciones de carga: la primera de 47,6 m de eslora y 9,9 m de manga y la segunda de eslora y manga 59,8 m y 12,4 m respectivamente y un calado de 1,2 m. Para embarcaciones de pasajeros se definieron dos embarcaciones con una y doble cubierta

con y 35,6 m de eslora y 8,2 m de manga en la primera y con 56,6 m de eslora y 9,25 m de manga en la segunda. Esto con la finalidad de poder cubrir el rango de requerimientos técnicos y económicos para el transporte por el río Magdalena.

Para ambos escenarios se encontró que un incremento en la eslora disminuye la fracción de peso ligero respecto al desplazamiento. A su vez, considerando que la potencia al freno requerida está fuertemente influenciada por la manga de la embarcación, las naves con mayor grado de esbeltez (L/B) presentan menos requerimientos de potencia por la carga muerta o cantidad de pasajeros transportados.



6- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Alvear Sanin, Manual del río Magdalena, Medellín: Cormagdalena, 2005.
- [2] J. Lancheros, Plataforma Logística y Puerto Multimodal para Consolidar Puerto Berrío como puerto Multimodal, Bogotá: Universidad Javeriana, 2017.
- [3] G. Vernengo y E. Rizzuto, «Ship synthesis model for the preliminary design of a fleet of compressed natural gas carriers,» *Ocean Engineering*, vol. 89, pp. 189-199, 2014.
- [4] V. Zanic, J. Andric y P. Prebeg, «Design synthesis of complex ship structures,» *Ships and Offshore Structures*, vol. 8, pp. 384-403, 2013.
- [5] V. Zanic, «Methods and concepts for the multi-criteria synthesis of ship structures,» *Ship and Offshore Structures*, vol. 8, pp. 225-244, 2013.
- [6] G. Younis, M. Gaafary, H. El-Kilani y M. Moustafa, «Techno-Economical Optimization for River Nile Container Ships,» *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, vol. 62, n° 4, pp. 383-395, 2011.
- [7] K. Rawson, Basic Ship Theory. Volume I. Ship Dynamics and Design, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [8] L. Polo, «Restricciones para el diseño de un sistema de transporte intermodal de contenedores a través del río Magdalena,» COTECMAR, Cartagena, 2015.
- [9] H. Schneekluth y V. Bertram, «Ship Design for Efficiency and Economy,» Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998.
- [10] H. Lackenby, «The effect of shallow water on ship speed,» *The ship builder and the marine engine builder*, 1963.
- [11] E. Rotteveel, Investigation of inland ship resistance, propulsion, and manoeuvring using literature study and potential flow calculations, TU DELF, 2013.

