OPTIMIZACION DE EMBARCACIONES PLANEADORAS FLUVIALES PARA TRANSPORTE DE CARGA Y PASAJEROS

José R. Marín López,
Facultad de Ingeniería Marítima y CC. del Mar, Escuela Superior Politécnica del Litoral,
Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador, jrmarin@espol.edu.ec

RESUMEN

Se implementó un proceso de Optimización para minimizar la Resistencia al Avance de embarcaciones planeadoras diseñadas para transportar carga y pasajeros en acero. Para la estimación de la Resistencia se empleó el método de Savitsky, (1964), y Blount y Fox, (1976). Las variables de decisión fueron la Eslora, el coeficiente Bloque, Calado, LCG, el ángulo de astilla muerta, y, el espesor del casco. Las restricciones fueron GM_T, el área para carga/pasajeros, el esfuerzo en cubierta, la deformación del casco, y, la razón L/B. El esquema de Optimización fue desarrollado con la subrutina CONMIN, Vanderplaats, (1972). Se consideró transportar 1.84 toneladas de carga entre 12 y 15 nudos, y, para el de pasajeros, 20 personas que pesan 1.5 toneladas, entre 15 y 20 nudos. En el caso del transporte de carga la razón L/B, y, en el pasajeros, el Area de carga, fueron restricciones activas. Finalmente se generaron las formas de dos cascos de acero, uno para cada servicio, para comprobar la factibilidad de su construcción y los resultados lucen aceptables.

1. INTRODUCCION

En nuestro país se tienen zonas a las que por la ausencia de vías es muy difícil acceder, y en cuyos casos, se puede aprovechar los ríos disponibles para mejorar con poca inversión la comunicación. Localmente se han desarrollado algunos diseños de embarcaciones para prestar servicio de transportación de carga y pasajeros, Marín (2007), tanto en madera como en acero, como se muestra en las fotos de la figura 1. Sin embargo, se ha notado bastante diferencia entre los diseños de las embarcaciones construidas, y no hay evidencia de uso de tecnología para su cálculo y desarrollo. Por ello se considera necesario establecer un esquema de Optimización que determine las relaciones básicas del casco de embarcaciones que presten servicio, para transportar carga y pasajeros, y dado el rango de velocidades en las que deben operar, son de tipo planeador.

Figura 1.- Embarcaciones para transporte de carga y pasajeros de uso nacional: (a) Río Napo, (b) San Lorenzo, y, (c) Río Morona

En el departamento de Arquitectura Naval de la Universidad de Michigan, como parte del programa de diseño SPIRAL, se implementó un módulo para optimizar embarcaciones de tipo planeador, Aferiat (1977). En el presente estudio se incluyó también la formulación de Blount para mejorar los resultados de Savitsky, y además se implementó una estimación para el peso de la embarcación, según particularidades nacionales. En una publicación previa, Marín (2006), se presentaron los resultados de la optimización de una embarcación para proveer servicio hospitalario. Se trataba de minimizar en forma combinada la Resistencia al Avance y el Peso de la Estructura de una embarcación con un área de atención hospitalaria dada. El rango de velocidades de dicho trabajo hizo que dicha embarcación sea considerada como de tipo Desplazamiento, esto es, los efectos hidrodinámicos no causan cambios considerables en el calado medio ó asiento. En este trabajo se presentan los resultados de implementar un proceso de optimización, similar al de Marín (2006), pero considerando que las embarcaciones son de tipo planeador.

2. ESQUEMA DE OPTIMIZACION

La aplicación de un esquema de Optimización de una embarcación tiene tres componentes: el algoritmo de Optimización propiamente dicho, el algoritmo que define las características y coeficientes principales de la embarcación, y, el algoritmo para evaluar la función objetivo, que en este caso fue la Resistencia al Avance. En el presente trabajo se utilizó el esquema de Optimización con Restricciones, Vanderplaats (1973), que utiliza el método de las Direcciones Factibles ("Feasible directions"). Algunas relaciones para definir características hidrostáticas producían valores muy diferentes de los observados en las embarcaciones del medio, de manera que fue necesario alterarlas.

Siguiendo a Parsons (2004) se combinó originalmente la Resistencia al Avance y el Peso del Casco, como función objetivo, en una Optimización con múltiples criterios ("Multicriterion optimization problems"):

$$P[f_k(\vec{x})] = \sum_{k=1}^{K} \left[w_k f_k(\vec{x}) / f_k^0 \right] = \sum_{k=1}^{K} \left[w_k f_k'(\vec{x}) \right], \qquad (1)$$

en la que f_k son las funciones Objetivo, $\vec{x}$, es el vector de variables de decisión, y, se sugiere que la suma de los factores de Ponderación, w_k, sea 1.0. En la expresión anterior, las funciones Objetivo son normalizadas, $\left(f_k(\bar{x}) / f_k^0\right)$, y se sugiere emplear los resultados de una optimización en los que únicamente se ha tomado dicha función a minimizar, denotadas como f_k^0.

La Resistencia al Avance, se estimó empleando el método de Savitsky (1964) para embarcaciones planeadoras, y aplicando la corrección de Blount y Fox, (1976). Las formulaciones mencionadas presentan ecuaciones semiempíricas, y en el área de botes planeadores son consideradas de confiable aplicación a nivel Preliminar.

El peso del casco será estimado como el producto:

$$W_{Casco} = p\, A_{Casco}\, t_{Casco}\, \gamma_{Casco} \qquad (2)$$

Se incluye el factor p para considerar los refuerzos transversales y en el borde superior del costado, y su valor dependerá de la embarcación, como se mostrará posteriormente. Se tomó 7.8 ton/m^3 para el peso específico del acero.

Se escogieron como **Variables de Decisión:**
i) la Eslora en flotación, L, dimensión básica en todo esquema de diseño de buques,
ii) el Coeficiente bloque, C_B,
iii) el Calado, T,
iv) la Posición Longitudinal del Centro de Gravedad, LCG, medida desde el espejo,
v) el ángulo de astilla muerta, β, y,
vi) el espesor del casco.

La posición longitudinal del Centro de Gravedad, y el ángulo de astilla muerta, se incluyeron porque en el método de Savitsky son consideradas variables principales para la estimación de la Resistencia.

Se incluyeron cinco **Restricciones:**
i) la altura Metacéntrica, GM_T, para resumir el problema de seguridad,
ii) el Area de la Carga, que cubre el requerimiento de área para el caso de pasajeros, A_{carga},
iii) el esfuerzo primario del casco, σ_{cbta}, y
iv) la deformación del casco, en forma relativa, $\delta(L/2)/L$; estos parámetros se evaluaron considerando que la embarcación se encalla en los extremos, condición si bien es cierto extrema, resume el aspecto de Resistencia Estructural.

Finalmente, se tomó también como v) restricción la relación Eslora/Manga, L/B, debido a las distorsiones que se estaban obteniendo en las primeras etapas del trabajo.

Siguiendo la recomendación de Vanderplaats (1973), las restricciones se normalizaron, de tal manera que los valores límites sean en valor absoluto menores que 1.0:

i) El valor de la altura metacéntrica GM_T, debe ser mayor que 0.25 m[1], de manera que la restricción en forma normalizada tiene el siguiente valor:

$$-1.0 < GM_T' = \frac{GM_T}{0.25} - 2.0 < \infty \ . \quad (3)$$

ii) El área destinada a pasajeros se estimó como de 0.80x0.70 m^2 por cada pasajero, y se incrementó en un 30% para pasillos, lo que resulta en 14.6 m^2, de manera que:

$$-1.0 < A_{Carga}' = \frac{A_{Carga}}{14.6} - 2.0 < \infty \ . \quad (4)$$

En el caso del transporte de carga se tomó un área menor, porque se consideraba que esta restricción no era adecuada para ese caso.

iii) El esfuerzo flexural en cubierta será menor que 600 kg/cm^2, es decir, menor que ¼ del de fluencia para el acero:

$$-\infty < \sigma_{Cbta}' = \frac{\sigma_{Cbta}}{600} < 1.0 \ . \quad (5)$$

iv) La deformación relativa de Sección Media, respecto de la eslora, cm/m, será menor que 0.1, tomando como referencia algunos valores encontrados en Otsu et al (1960):

$$-\infty < \delta_{Casco}' = \frac{\delta_{Casco}}{0.1} < 1.0 \ . \quad (6)$$

[1] Dado que únicamente se toma este parámetro como referencia para la Estabilidad, se juzgó conveniente tomar un valor límite un poco mayor que los 15 cm exigidos por la OMI.

v) La razón L/B debe estar entre 5 y 12, en el caso del transporte de pasajeros:

$$-1 < (L/B)' = \frac{2(L/B)}{7} + \left(1 - \frac{24}{7}\right) < 1.0, \qquad (7)$$

y, entre 4.5 y 12 para transporte de carga:

$$-1 < (L/B)' = \frac{2(L/B)}{7.5} + \left(1 - \frac{24}{7.5}\right) < 1.0. \qquad (8)$$

3. GENERACION DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CASCO

3.1 Parámetros para Calcular la Resistencia al Avance

Dado que se trata de una embarcación planeadora, se requieren los siguientes parámetros para aplicar el método de Savitsky para determinar la Resistencia al Avance, a una velocidad dada: volumen desplazado del Casco, Manga de la China, B_m, Posición Longitudinal y Vertical del C. de Gravedad, y, Angulo de Astilla Muerta. Además, para desarrollar el equilibrio de fuerzas, se requiere definir la línea de acción del empuje, a través del ángulo del eje, ε, y la distancia f entre la línea de acción del empuje y el CG:

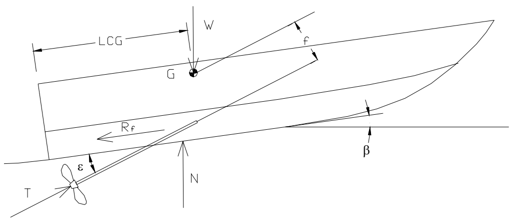

Figura 2.- Equilibrio de Fuerzas en el método de Savitsky.

La inclinación del costado, respecto de la vertical, se la tomó como fija, con un valor de 5º para ambos tipos de transporte, carga y de pasajeros. De esta forma se incrementa el área disponible para los pasajeros.

Entonces, a partir de la eslora, el coeficiente Bloque y el Calado, variables de decisión, en forma iterativa se encuentra la Manga de tal manera que el peso total, satisfaga la relación:

$$B_{WL} = \frac{W_{total}/\gamma}{C_B LT}, \quad \text{donde}: \text{Wtotal} = \text{Wcasco} + \text{Wcarga} + \text{Wmaq}. \qquad (9)$$

Excepto el peso del casco, los restantes se tomaron como fijos, dados que el servicio los impone; véase los valores utilizados en la tabla 3 del Apéndice. El peso del casco se lo estimó como el producto del área del casco por el espesor, variable de decisión, multiplicado por el peso específico del material y por una constante para incluir los refuerzos estructurales. En el caso de transporte de carga, esta constante fue del 1.3, mientras que en el caso de pasajeros, fue de 1.5, para considerar también los asientos y la tolda. A su vez, el Area del casco se la estimó de la siguiente forma:

$$A_{Casco} = L_T(0.74 * l_{fondo} + 2 * 0.90 * l_{costado}) \qquad (10)$$

en donde L_T es la eslora total (=1.05L), y, se tomó el puntal como el calado más 35 cm. Los coeficientes de esta ecuación fueron determinados a partir de las formas de embarcaciones planeadoras disponibles en la literatura.

El coeficiente de Sección Media se calculó, una vez que se conocía el calado, ángulo de astilla muerta, Manga, y, el puntal. Conociéndose además el Coeficiente Bloque, se puede estimar el Coeficiente Prismático Longitudinal, $C_P=C_B/C_M$.

El coeficiente del Plano de Flotación se estimó aplicando la relación:

$$C_{WP} = 0.69 + 0.28 * C_P, \quad (11)$$

tomada de Schneekluth et al (1998), adecuada para embarcaciones bihélices y con forma de Popa con espejo ("transom stern"), pero con los coeficientes ligeramente alterados.

Dado que las lanchas se están diseñando para ser propulsadas con motores fueraborda, la inclinación ε es 0^o, y, la distancia f es, véase la Figura 2:

$$f = \lfloor KG + 0.66 D_{prop} - LCG \tan\varepsilon \rfloor \cos\varepsilon, \quad (12)$$

donde el diámetro de los propulsores, D_{prop}, se asumió como 30 cm.

3.2 Parámetros para aproximar la Altura Metacéntrica Transversal

Para aproximar la Inercia Transversal se utilizó la fórmula de McCloghrie:

$$C_I = 1.04 C_{WP}{}^2 / 12, \quad y, \quad I_T = C_I L B^3. \quad (13)$$

Luego la posición Vertical del Centro de Boyantez se aproximó con la fórmula de Schneekluth (1998): $KB = T[0.90 - 0.30 * C_M - 0.10 * C_B]$. (14)

Para estimar el VCG del casco, se usó la fórmula de Kupras, ver Schneekluth et al (1998):

$$z_{Casco} = 0.01 D \left\lfloor 46.6 + 0.135 (0.81 - C_B)(L/D)^2 \right\rfloor \quad (15)$$

adecuada para L<120 metros, y alterada para no incluir la influencia de la cubierta.

El KG de la embarcación se estimó asumiendo que el centroide de los motores fueraborda se encontraba a la altura del puntal, mientras que el de la carga, se tomó como referencia un número de filas de tablones a transportar y en el de pasajeros, se asume que el centroide de cada pasajero se encuentra a 65 cm encima del piso, ubicado a la altura de la china.

$$KG = \frac{W_{Casco} z_{Casco} + W_{Maq} D + W_{Carga} * z_{Carga}}{W_{Casco} + W_{Maq} + W_{carga}}. \quad (16)$$

De esta forma, la altura metacéntrica transversal, considerada en forma preliminar como el parámetro que resume la buena estabilidad de la embarcación es:

$$GM_T = \left[KB + \frac{I_T}{\nabla} \right] - KG. \quad (17)$$

Para el Area de carga, se usó la siguiente ecuación: $A_{Carga} = 0.7 (L_T B_m)$, (18)

donde B_m es la Manga a la altura de la china.

3.3 Resistencia Estructural Primaria

En la tesis de Ingeniería Naval, Macas (2006), se encontró que para una embarcación fluvial que presta servicio hospitalario, la situación de encallamiento localmente exige más a la estructura que durante una navegación; aún cuando las proporciones de la embarcación analizada son diferentes de las del presente análisis, se va a considerar que la embarcación estaría encallada en los extremos, y con una distribución uniforme de su peso estructural y el de la Carga. En este caso, el Momento Flector Máximo se presenta en Sección Media:

$$M(L/2) = \left(W_{casco} + W_{c\arg a}\right) l/8, \qquad (19)$$

y la deformación máxima se presenta en el mismo punto, con un valor de:

$$w(L/2) = 5\,W\,l^3/(384\,E\,I). \qquad (20)$$

En estas ecuaciones W es la suma del peso del casco más la carga ó pasajeros; la longitud, l, se tomó como el 90% de la eslora en flotación, E es el módulo de Young del material del casco (acero), e, I es la Inercia Seccional, asumida como constante. La Inercia y el Módulo Seccional se los calculó asumiendo que el espesor es uniforme, e incluyendo al fondo y costado, considerados como rectángulos inclinados.

4. RESULTADOS de la OPTIMIZACIÓN

Se inició el proceso de optimización, probando con diferentes iniciales para las variables de decisión. A diferencia del proceso establecido en Marín (2006), en este caso se minimizó únicamente la Resistencia al Avance, pudiendo en el futuro ejecutarse el proceso con alguna Ponderación del Peso del Casco. Los rangos de las variables de decisión fueron:

$$9.0 < L < 16.0 \text{ m}, \quad 0.50 < C_B < 0.65, \quad 0.10 < T < 0.25 \text{ m},$$
$$3.0 < LCG < 4.5 \text{ m}, \quad 0 < \beta < 5.5^o, \quad y, \quad 0.318 < t_{casco} < 0.635 \text{ cm}.$$

Para confirmar la convergencia de los resultados, se probaron diferentes valores iniciales para las variables de decisión. En general no se obtuvo un máximo absoluto, sino varios locales, en algunos casos con poca diferencia entre ellos como se discutirá a continuación.

4.1 Transporte de Carga

El peso de la carga se asumió como 1.84 ton (30 tablones de madera de 6.00x0.20x0.06 m, x 0.85 t/m^3). En este caso, el Area requerida de carga se tomó en 10.0 m^2, valor que se esperaba que no se desarrollara como restricción activa. La velocidad se tomó en el rango 12.0-15.0 nudos con incrementos de 1.5. A continuación se muestra la convergencia de la Resistencia al avance para las tres velocidades analizadas, Figura 3, con una combinación de valores iniciales para las variables de decisión. En la Figura 4 se presentan los valores finales de la eslora, el calado, y el Peso del Casco, para diferentes valores iniciales. En el Apéndice se presentan los resultados completos, en las que las restricciones activas y las laterales activas (“side active constraints”) se muestran con el fondo sombreado.

Respecto de las restricciones, todas se satisfacen, sin embargo, la razón L/B se presentó frecuentemente como activa, en 4.5 valor impuesto como límite. El GM_T, en cambio, por el rango de la Manga con que se trabaja, está por encima de 1.0 m. Así mismo, dado que los diseños tienden a resultar como elevadas mangas, se reduce la eslora, y tanto el esfuerzo como la deformación del casco no alcanzan los límites impuestos.

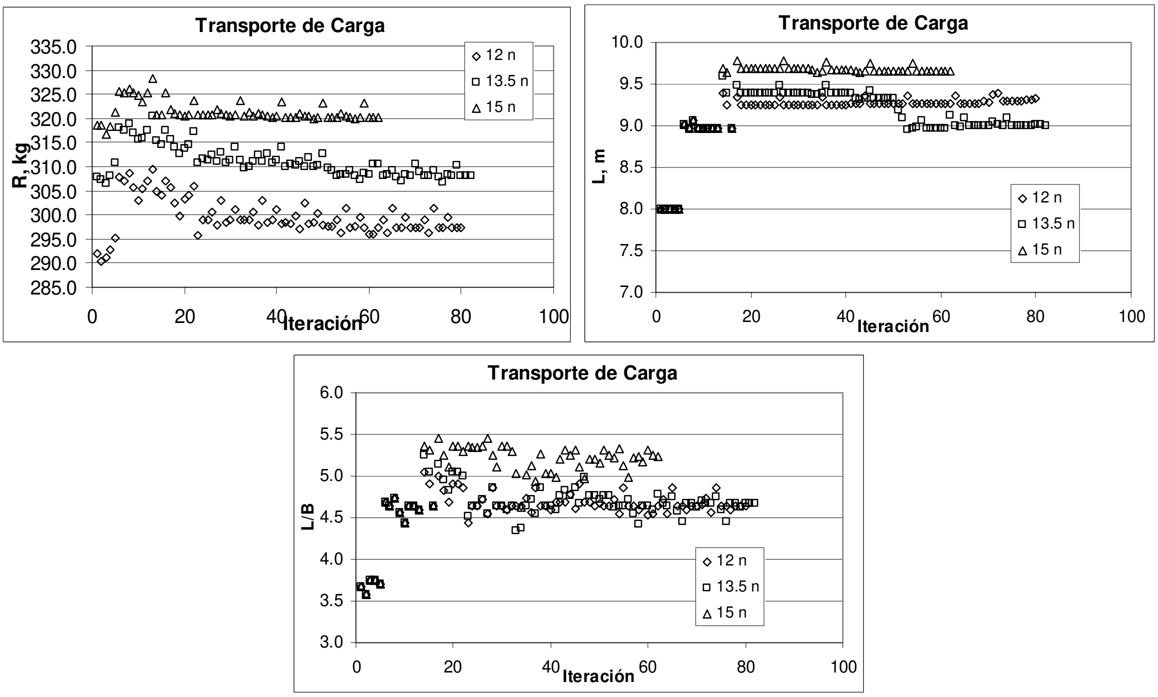

Figura 3.- Convergencia de la Función Objetivo, de la L, y, de la L/B, con L_i=8 m, C_{Bi}= 0.65, T_i=0.25 m, lcg_i=3.5 m, β_i=2.5º y t_{casco}=0.318 cm, para el transporte de carga.

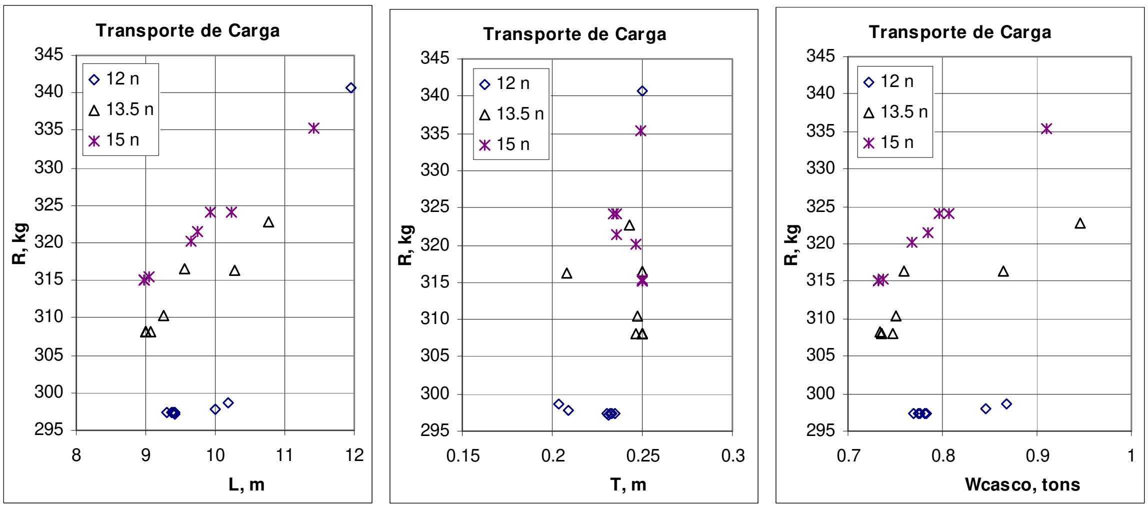

Figura 4.- Valores resultantes para las variables de decisión, Transporte de Carga, véase las Tablas 4-6 en el apéndice

4.2 Transporte de Pasajeros

En este caso, se consideró el transporte de 20 pasajeros, con un peso de 75 kg, asignando un espacio de 0.80x0.70 m^2/pasajero y espacio extra del 30% para transitar, se tiene un requerimiento de 14.6 m^2 de área de carga. Para la velocidad, se consideraron mayores valores que en el caso del transporte de carga, desde 15-20 nudos, con incrementos de 2.5.

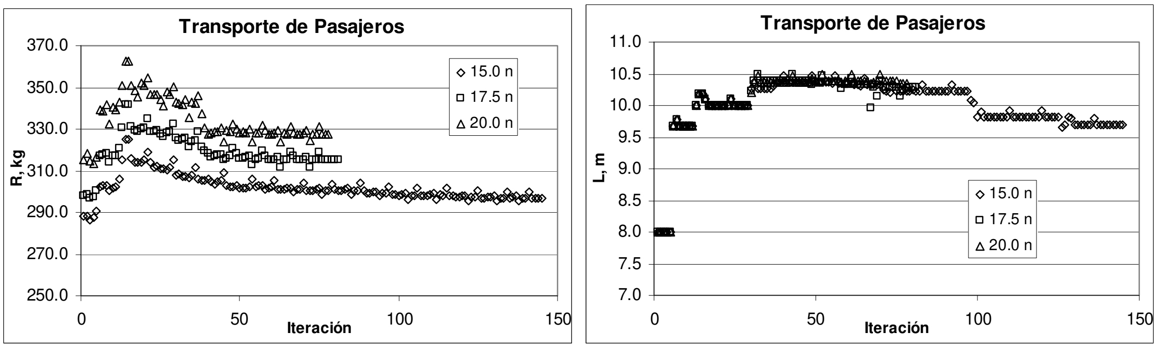

Figura 5.- Convergencia de la Función Objetivo y de la Variable L, con L_i=8 m, C_{Bi}= 0.65, T_i=0.25 m, LCG_i=3.5 m, β_i=2.5º y t_{casco}=0.318 cm, para el Transporte de pasajeros.

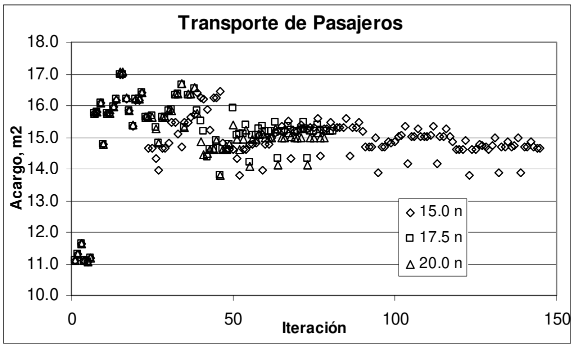

Figura 6.- Convergencia de la Restricción Area de Carga, con L_i=8 m, C_{Bi}= 0.65, T_i=0.25 m, LCG_i=3.5 m, β_i=2.5º y t_{casco}=0.318 cm, para el Transporte de pasajeros.

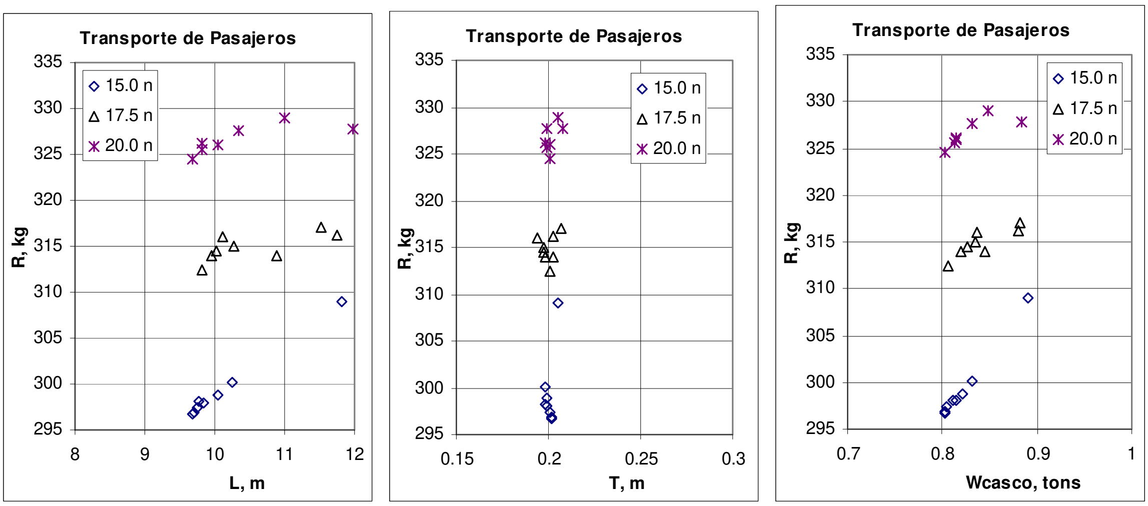

Figura 7.- Valores resultantes para las variables de decisión, Transporte de Pasajeros

4.3. Resumen de resultados

En la siguiente tabla se resumen los valores de las variables para los servicios analizados. De la figura 4, para el transporte de carga, se puede establecer que una eslora de 9.2 metros significa una Resistencia muy cercana a la mínima obtenida, pero con un mínimo peso del casco, para las tres velocidades consideradas. En cambio en el caso del transporte de pasajeros, Figura 7, una eslora de 9.8 m representa un mínimo local en resistencia.

	Carga	Pasajer.
Vel., nudos	12-15	15-20
L, m(en flotación)	9.264	9.821
B, m	1.972	2.13
D, m	0.597	0.55
T, m	0.247	0.201
C_B	0.65	0.65
LCG, m(desde espejo)	3.991	3.78
β, grados	2.458	2.43
A_{carga}, m^2	12.746	14.697
Vol.Desplazamiento, m^3	2.836	2.657
A_{casco}, m^2	23.29	25.032
W_{casco}	0.75	0.807
L/B	4.699	4.612

Tabla 1.- Resumen de Características Principales de los óptimos seleccionados

A continuación se graficaron simultáneamente la Resistencia para las dos embarcaciones, Figura 8, observándose que la de pasajeros tiene menor resistencia en todo el rango analizado. Para efectos de comparación se incrementó el desplazamiento para representar un transporte de carga, hasta un valor total de 2.90 ton, y se calculó para dicha embarcación la resistencia, denotándose dicha curva como Pasajeros/Carga en la figura mencionada, notándose que la embarcación de carga tiene resistencia ligeramente menor.

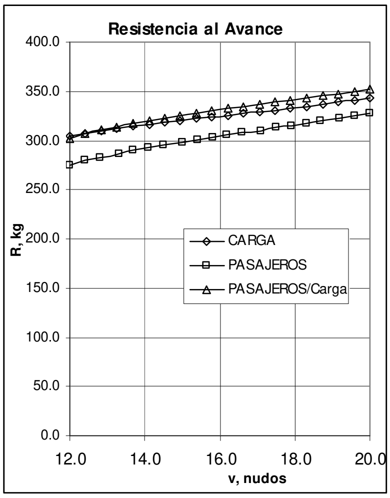

Figura 8.- Comparación de la Resistencia para los diferentes servicios y velocidades

Debe enfatizarse que los cálculos de Resistencia al Avance no recibieron corrección por efectos de la profundidad limitada.

5. APLICABILIDAD DE LOS DISEÑOS GENERADOS

A partir de los resultados obtenidos, se generaron las formas de las embarcaciones obtenidas, usando el programa de Marín (2005), para comprobar la aplicabilidad de los diseños, utilizando una china. Las formas obtenidas se las presenta a continuación. La tabla 2 presenta algunas características hidrostáticas de las embarcaciones generadas.

	Carga	Pasaj.
T, m	0.247	0.20
Vol.Desplazamiento, m^3	2.87	2.67
A_{casco}, m^2	24.12	26.83
B_{esp}/B_{SM}	0.93	1.00
A_{esp}/A_{SM}	0.89	1.00
LCG, m (desde espejo)	3.55	3.64

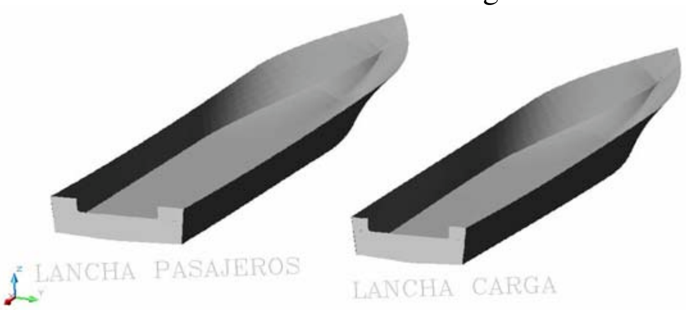

Tabla 2.- Características Hidrostáticas de las formas óptimas generadas

Se pensaba originalmente que el valor máximo permitido para el C_B era alto, dado que se trata de embarcaciones relativamente rápidas. Sin embargo, con las formas obtenidas se nota que aún pudo elevarse dicho parámetro un poco más. En el presente caso, el perfil de las embarcaciones se las levantó ligeramente hacia el espejo, para tratar de que se alcanzara el calado requerido. En la tabla anterior, la manga en el espejo, B_{esp}, es medida en cubierta, mientras que el área Seccional en el espejo, A_{esp}, fue medida al calado.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha implementado un proceso de Optimización tratando de reducir la Resistencia al Avance, para embarcaciones que proveen Servicio de Tranporte de Carga y Pasajeros. La estimación de la Resistencia al Avance se desarrolló aplicando las ecuaciones desarrolladas por Savitsky, (1964), y, Blount y Fox, (1976), consideradas como adecuadas para estimar en forma preliminar la resistencia de botes planeadores. El material del casco considerado es acero, aún cuando en las zonas visitadas, Marín (2007), el principal material de construcción es la madera, por su facilísima obtención. Las variables de decisión finales fueron la Eslora en flotación, el Coeficiente Bloque, el Calado, la posición longitudinal del CG, el ángulo de astilla muerta, y, el espesor del casco; las restricciones fueron la altura metacéntrica transversal, el Area de Carga, el esfuerzo primario en el casco, la deformación del casco, y, la razón L/B. Se separó el trabajo en transporte de carga con un rango de velocidad entre 12 y 15 nudos, y, transporte de pasajeros con velocidades entre 15 y 20 nudos.

Como resultado de las optimizaciones, no se obtuvieron máximos globales, sino locales, pero la variación de la Resistencia entre ellos es pequeña, véase las tablas 4-9. Se encontró que un óptimo local para transportar carga en las condiciones descritas previamente tiene una eslora de 9.26 metros en flotación, para el rango de velocidades dado. En cambio, para el caso del transporte de pasajeros, por su mayor velocidad, es preferible una eslora de 9.82 metros. Se encontró que la de pasajeros es más eficiente que la de carga, por su mayor eslora. Los calados para los diseños óptimos están en el rango de 0.20-0.25 m.

En los cálculos desarrollados, no se incluyó la influencia de la profundidad limitada. Queda entonces por determinar si dicha influencia cambia mucho en los rangos de velocidad analizados. Además, si es necesario se podría en el futuro desarrollar estos cálculos considerando el peso del casco en forma de optimización con múltiples objetivos.

7. RECONOCIMIENTO

El presente trabajo es un resultado del proyecto “Optimización de Embarcaciones para Uso Fluvial Ecuatoriano”, auspiciado por CONESUP. El autor deja constancia de su agradecimiento hacia esa institución.

8. REFERENCIAS

Aferiat, S., (1977) **Planeopt: A Planing Boat Optimization Program**. The Department of Naval Architecture and Marine Engineering, U. de Michigan, Reporte No 190.

Blount, D. y Fox, D., (1976) Small-Craft Power Prediction. **Marine Technology**, SNAME.

Macas, F. J., (2006) **Análisis de la Estructura de la Embarcación Samarina empleando el Método de Elementos Finitos**. Tesis de Ing. Naval, FIMCM-ESPOL, 2006.

Marín, J.R., (2005) **GFormas-GNurbs: Programas para la Generación de Formas de un Buqu**e. jrmarin@espol.edu.ec.

Marín, J.R., (2006) Optimización de una Embarcación para prestar Servicio Hospitalario Fluvial. Guayaquil, **2do Congreso Nacional de Investigación, Tecnología e Innovación**.

Marín, J.R., (2007) Reporte Final del Proyecto "**Optimización de Embarcaciones para Uso Fluvial Ecuatoriano"**. CONUEP-ESPOL.

Nocedal, J., y, Wright, S., (1999) **Numerical Optimization**. Springer.

Otsu, Y., Yokohama, N., y Kobayashi, T., (1960) **Structural Testing of Small Craft, en Fishing Boats of the World: 2**, J.-O. Traung, ed. Fishing News (Books) Ltd.

Parsons, M., y, Scott, R., (2004) Formulation of Multicriterion Design Optimization Problems for Solution with Scalar Numerical Optimization Methods. **Journal of Ship Research**, SNAME, Vol. 48, No 1.

Savitsky, D., (1964) Hydrodynamic Design of Planing Hulls. **Marine Technology**, SNAME.

Schneekluth, H., y, Bertram, V., (1998) **Ship Design for Efficiency and Economy**. Butterworth-Heinemann, 2da ed.

Vanderplaats, G., (1973) **CONMIN, A Fortran Program for Constrained Function Minimization, User's Manual**. NASA Technical Memorandum, NASA TM X-62,282.

APENDICES

Cálculo de las características de la Sección Media

$$y_{china} = \frac{D - b\tan\alpha}{\tan\beta - \tan\alpha}, \quad z_{china} = y_{china}\tan\beta$$

$$l_{fondo} = \frac{D - b\tan\alpha}{\cos\beta(\tan\beta - \tan\alpha)},$$

$$l_{costado} = \frac{b - \dfrac{D - b\tan\alpha}{(\tan\beta - \tan\alpha)}}{\cos\alpha}$$

$$I_u = I_x\cos^2\theta + I_y \mathrm{sen}^2\theta \text{ (por la simetría)}$$

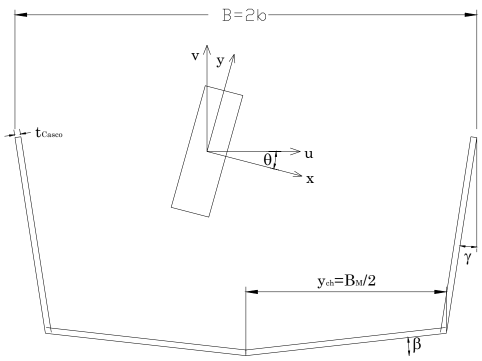

Figura 9

Tabla 3.- Pesos fijos, toneladas.

Tipo de Transporte:	Carga	Pasajeros
Peso Carga, ton	1.84	1.50
Peso Maquinaria, ton	0.25	0.35

	L	CB	T	LCG	Beta	thull	GMT	Acargo	σdeck	δhull	L/B	Rtotal	Whull
CARGA0101	9.31	0.65	0.235	3.964	2.442	0.318	1.877	13.468	452.299	0.037	4.506	297.44	0.769
CARGA0102	9.368	0.65	0.233	4.008	2.472	0.318	1.931	13.662	460.697	0.038	4.5	297.313	0.775
CARGA0103	9.993	0.65	0.209	4.003	2.473	0.318	2.487	15.599	545.816	0.049	4.505	297.892	0.846
CARGA0104	10.185	0.65	0.204	4.006	2.396	0.318	2.629	16.137	570.18	0.052	4.528	298.623	0.868
CARGA0105	11.961	0.5	0.25	3.568	2.494	0.333	2.308	18.253	590.427	0.06	5.492	340.642	1.078
CARGA0106	9.412	0.65	0.231	3.978	2.408	0.318	1.962	13.789	465.573	0.038	4.502	297.251	0.781
CARGA0107	9.43	0.65	0.23	3.961	2.404	0.318	1.978	13.849	467.941	0.039	4.501	297.309	0.783
CARGA0108	9.388	0.65	0.232	3.989	2.481	0.318	1.945	13.717	463.3	0.038	4.502	297.317	0.777

Tabla 4.- Resumen del Proceso de Optimización de la Lancha para Transporte de Carga v=12 nudos, con diferentes valores iniciales para las Variables de Decisión

	L	CB	T	LCG	Beta	thull	GMT	Acargo	σdeck	δhull	L/B	Rtotal	Whull
CARGA0201	9.006	0.65	0.25	4.034	2.306	0.318	1.625	12.504	410.916	0.032	4.527	308.077	0.736
CARGA0202	9.264	0.65	0.247	3.991	2.458	0.318	1.62	12.746	431.581	0.034	4.699	310.394	0.75
CARGA0203	9.075	0.65	0.246	3.986	2.057	0.318	1.686	12.748	418.057	0.032	4.51	308.093	0.747
CARGA0204	10.76	0.523	0.243	3.998	2.478	0.318	2.54	17.203	542.768	0.05	4.729	322.705	0.946
CARGA0205	10.29	0.65	0.208	3.911	2.189	0.318	2.399	15.773	563.786	0.052	4.72	316.34	0.864
CARGA0206	8.998	0.65	0.25	4.047	2.493	0.318	1.629	12.498	412.139	0.032	4.522	308.166	0.734
CARGA0207	9.549	0.65	0.25	3.819	2.309	0.318	1.464	12.592	440.747	0.036	5.04	316.458	0.759
CARGA0208	9.011	0.65	0.25	3.984	2.321	0.318	1.624	12.504	411.308	0.032	4.531	308.103	0.736

Tabla 5.- Resumen del Proceso de Optimización de la Lancha para Transporte de Carga v=13.5 nudos, con diferentes valores iniciales para las Variables de Decisión

	L	CB	T	LCG	Beta	thull	GMT	Acargo	σdeck	δhull	L/B	Rtotal	Whull
CARGA0301	9.654	0.65	0.246	3.958	2.513	0.318	1.515	12.838	454.687	0.038	5.058	320.188	0.767
CARGA0302	9.738	0.65	0.236	3.9	2.502	0.318	1.719	13.503	476.705	0.041	4.907	321.499	0.785
CARGA0303	9.927	0.65	0.234	3.832	2.491	0.318	1.707	13.664	491.107	0.043	5.039	324.162	0.796
CARGA0304	10.232	0.65	0.236	4.049	2.456	0.318	1.571	13.58	505.004	0.045	5.375	324.079	0.806
CARGA0305	11.412	0.57	0.249	4.121	2.424	0.318	1.61	15.184	560.305	0.055	5.974	335.301	0.91
CARGA0306	9.041	0.65	0.25	4.006	2.363	0.318	1.615	12.508	413.298	0.032	4.559	315.381	0.737
CARGA0307	8.986	0.65	0.25	4.016	2.531	0.318	1.634	12.496	411.804	0.032	4.511	315.108	0.733
CARGA0308	8.973	0.65	0.25	3.986	2.581	0.318	1.639	12.492	411.529	0.032	4.5	315.08	0.732

Tabla 6.- Resumen del Proceso de Optimización de la Lancha para Transporte de Carga v=15.0 nudos, con diferentes valores iniciales para las Variables de Decisión

	L	CB	T	LCG	Beta	thull	GMT	Acargo	σdeck	δhull	L/B	Rtotal	Whull
PASAJ0101	9.7	0.65	0.202	3.846	2.272	0.318	2.071	14.641	465.121	0.041	4.516	296.885	0.803
PASAJ0102	9.783	0.65	0.198	3.928	2.399	0.318	2.187	14.962	478.63	0.043	4.5	298.154	0.812
PASAJ0103	9.753	0.65	0.201	3.866	2.452	0.318	2.096	14.734	472.303	0.042	4.539	297.351	0.805
PASAJ0104	10.239	0.65	0.198	3.89	2.434	0.318	2.011	15.088	506.57	0.048	4.881	300.108	0.831
PASAJ0105	10.043	0.65	0.199	3.88	2.209	0.318	2.021	14.918	489.076	0.045	4.749	298.839	0.822
PASAJ0106	11.819	0.639	0.205	3.977	2.279	0.318	1.373	15.099	585.591	0.064	6.455	309.035	0.891
PASAJ0107	9.677	0.65	0.202	3.863	2.226	0.318	2.074	14.625	463.018	0.041	4.5	296.702	0.802
PASAJ0108	9.833	0.65	0.199	3.884	2.294	0.318	2.135	14.921	478.97	0.043	4.556	298.017	0.814

Tabla 7.- Resumen del Proceso de Optimización de la Lancha para Transporte de Pasajeros v=15.0 nudos, con diferentes valores iniciales para las Variables de Decisión

	L	CB	T	LCG	Beta	thull	GMT	Acargo	σdeck	δhull	L/B	Rtotal	Whull
PASAJ0201	10.28	0.65	0.197	3.817	2.508	0.318	2.031	15.169	511.793	0.049	4.896	315.05	0.834
PASAJ0202	10.121	0.65	0.194	3.772	2.469	0.318	2.243	15.449	509.408	0.048	4.666	316.027	0.836
PASAJ0203	9.821	0.65	0.201	3.783	2.431	0.318	2.042	14.697	474.768	0.043	4.612	312.442	0.807
PASAJ0204	10.883	0.65	0.203	3.907	2.482	0.318	1.591	14.742	533.448	0.053	5.622	313.975	0.845
PASAJ0205	11.751	0.65	0.203	3.967	2.425	0.318	1.351	14.912	585.202	0.064	6.461	316.129	0.88
PASAJ0206	11.515	0.632	0.207	4.005	2.379	0.318	1.473	15.127	566.047	0.06	6.124	317.005	0.882
PASAJ0207	10.012	0.65	0.197	3.745	2.229	0.318	2.138	15.132	492.726	0.045	4.657	314.448	0.827
PASAJ0208	9.945	0.65	0.198	3.794	2.417	0.318	2.128	15.019	488.869	0.045	4.631	313.936	0.819

Tabla 8.- Resumen del Proceso de Optimización de la Lancha para Transporte de Pasajeros v=17.5 nudos, con diferentes valores iniciales para las Variables de Decisión

	L	CB	T	LCG	Beta	thull	GMT	Acargo	σdeck	δhull	L/B	Rtotal	Whull
PASAJ0301	10.34	0.65	0.199	3.592	2.476	0.318	1.914	14.975	509.818	0.049	5.012	327.67	0.831
PASAJ0302	10.042	0.65	0.201	3.553	2.416	0.318	1.946	14.732	487.134	0.045	4.806	325.976	0.815
PASAJ0303	9.818	0.65	0.198	3.448	2.404	0.318	2.184	14.994	481.292	0.043	4.522	326.184	0.814
PASAJ0304	11.001	0.647	0.205	3.991	2.5	0.318	1.534	14.72	537.631	0.054	5.75	328.95	0.849
PASAJ0305	11.985	0.645	0.208	3.963	2.499	0.318	1.214	14.715	590.399	0.065	6.799	327.748	0.884
PASAJ0306	9.819	0.65	0.199	3.472	2.212	0.318	2.111	14.864	475.911	0.043	4.56	325.597	0.813
PASAJ0307	9.686	0.65	0.201	3.458	2.329	0.318	2.087	14.653	465.349	0.041	4.5	324.564	0.802
PASAJ0308	10.132	0.65	0.202	3.575	2.32	0.318	1.887	14.705	490.085	0.045	4.899	326.016	0.819

Tabla 9.- Resumen del Proceso de Optimización de la Lancha para Transporte de Pasajeros v=20.0 nudos, con diferentes valores iniciales para las Variables de Decisión