# OPTIMIZACION DE UNA EMBARCACION PARA PRESTAR SERVICIO HOSPITALARIO FLUVIAL

Por: José R. Marín López, Ph.D. Ing. Naval, Profesor FIMCM, ESPOL

## RESUMEN

Se ha implementado un proceso de Optimización para minimizar en forma de criterios múltiples una combinación de la Resistencia al Avance y Peso del casco de una embarcación diseñada preliminarmente para prestar Servicio Hospitalario Fluvial. Se adaptaron algunas relaciones para poder implementar un algoritmo para generar los coeficientes que definen las formas de una embarcación para este servicio. La estimación de la Resistencia se la desarrolló empleando el método de Holtrop, [3] y [4]; el peso del casco fue estimado empleando una relación adaptada de la literatura disponible. El esquema de Optimización propiamente dicho fue desarrollado con el programa CONMIN, [12], considerando la Eslora y el Calado como variables de decisión. Las restricciones fueron el área de la Cubierta, dado que este parámetro permitiría cumplir con el cometido de la embarcación, y, la altura metacéntrica transversal como parámetro que resume la estabilidad del buque. Originalmente se pensó en considerar como restricción el nivel de esfuerzo desarrollado en la estructura, dado lo reducido del puntal; pero estimaciones desarrolladas a partir de las características de una embarcación actualmente en operación, indicaron que los niveles de esfuerzos primarios eran bajos. A partir de los resultados del proceso de optimización se generaron las formas de un casco, para comprobar la factibilidad de su construcción, [7], y los resultados lucen aceptables. De manera que con el nuevo diseño preliminar, ponderando la Resistencia al Avance con 75% y el Peso del Casco con el 25%, se reduce la Resistencia al Avance al 68%, mientras que el peso estructural del casco en cambio se incrementa en 5%, respecto de un diseño actualmente en operación.

Palabras Clave: Minimización, Resistencia, Fluvial

## ABSTRACT

It has been implemented an Optimization process to minimize as a multiple criterion process a combination of the Ship Resistance and Hull Weight of a vessel preliminarly designed to provide a hospital river service. Some relations were adapted in order to implement an algorithm to estimate the coefficients that define the shape of a vessel for this service. The Ship Resistance was estimated using Holtrop's method, [3] and [4]; the weight of the hull was estimated using an adapted relation from the available literature. The Optimization scheme was developed using the CONMIN program, [12], considering the Length and the Draft as decision variables. The restrictions were the Deck area, since this parameter would allow to fulfill the ship's duty, and, the transveral metacentric height as a parameter that summarizes the ship stability. Originally it was thought to include the stress level developed in the structure as a restriction, considering the low depth of this type of vessels; but estimations developed from the analysis of a ship in service indicated that primary stress levels were low. From the results of the Optimization process there were generated ship lines of a hull, to check the feasibility of its construction, and the results look acceptable. So that with the new preliminary design, weighting the ship resistance with 75% and hull weight with 25%, the ship resistance is reduced at 68%, while the hull structural weight increases in 5%, with respect to a design in operation.

Keywords: Minimization, Resistance, River

## 1. INTRODUCCION

Existen zonas de nuestro país que por la ausencia de vías de acceso reciben escasos servicios de salud, habiéndose emprendido por parte del gobierno nacional la provisión de embarcaciones que presten un Servicio Hospitalario Ambulante aprovechando los ríos disponibles. Localmente se han desarrollado algunos diseños, LOGSESA, [5] produjo el aquí denominado LHosp. 1, y, SETINAVSA, [11], los llamados LHosp. 2 y 3, cuyas características principales se presentan en el Apéndice. Sin embargo, se ha notado bastante diferencia entre los diseños de las embarcaciones construidas; por ejemplo, de la tabla 4, en el apéndice, se notan valores del Coeficiente Bloque de 0.57, 0.83 y 0.88, del Coeficiente del Plano de Flotación, $C_{WP}$, de 0.89, 0.96 y 0.99, y, del Semiángulo de entrada del Plano de Flotación, $i_E$, de 37, 68, y, 89°. Por ello se considera necesario desarrollar un esquema de Optimización que determine las relaciones básicas del casco de una embarcación que preste este servicio.

Las embarcaciones que prestan servicio fluvial hospitalario deben enfrentar un calado restringido debido a la limitada profundidad de los ríos, lo cual lleva al diseñador a incrementar la Manga para poder soportar el peso del buque. De manera que las embarcaciones típicamente resultan con relaciones L/B y B/T del orden de 4.0 y 10.0, respectivamente. Es decir, lucen como barcazas pequeñas, con eslora en el orden de los 20 metros, pero con propulsión propia. Los parámetros de los diseños disponibles servirán para adaptar y seleccionar las relaciones adecuadas para el servicio que se pretende servir.

## 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 originalmente fue la Resistencia al Avance.

En el presente trabajo se utilizó el esquema de Optimización con Restricciones, [12], que utiliza el mètodo de las Direcciones Factibles ("Feasible directions"). En el medio se tiene cierta experiencia con este algoritmo, [1], cuando se lo empleó para realizar la Selección Optima de dimensiones y características principales de la estructura principal de una embarcación menor oceánica.

Para la definición del casco, a pesar de disponerse de algunos esquemas, fue necesario desarrollar una adaptación particular porque el tipo de embarcación en análisis difiere notoriamente de los disponibles. Así mismo, algunas relaciones para definir ciertas características hidrostáticas producían valores muy diferentes de los observados en las embarcaciones del medio. Por ejemplo la razón B/T para estimar la superficie mojada debe ser menor de 6.0, [8], mientras que en las embarcaciones construidas, dicho parámetro es de alrededor de 10.0.

Para la estimación de la función Objetivo, originalmente se pensó en tomar a la Resistencia al Avance, estimada empleando la formulación de regresión de Holtrop. Sin embargo, Day et al, [2], comenta que los procesos de optimización en los que la resistencia se estima empleando formulaciones de regresión, son a menudo no confiables, porque pueden producirse cascos con proporciones muy diferentes de las disponibles en el grupo de datos a partir de los cuales se produjo dichas fórmulas. Se pensó entonces, que combinando este parámetro con algún otro para formar una nueva función objetivo, se conseguiría estabilidad en el proceso de convergencia.

Entonces se eligió como función objetivo no solamente la Resistencia al Avance sino también el Peso del Casco, considerando que influye directamente en el costo de la embarcación. Luego se realizó la siguiente combinación de funciones, descrita por [9], para el caso de problemas de optimización con múltiples criterios ("Multicriterion optimization problems"), esto es, búsqueda del óptimo con suma ponderada:

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

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, $\left(f_k(\vec{x}) / f_k^0\right)$, y se sugiere emplear los resultados de una optimización en los que únicamente se ha tomado dicha función a minimizar, denotadas como $f_k^0$. En el presente caso, simplemente se tomaron los valores originales de Resistencia al avance y Peso del casco de la LHosp. 1. Los factores de ponderación, $w_k$, fueron variados desde un extremo al otro.

La Resistencia al Avance, se estimó empleando el método de Holtrop, [3] y [4]. Esta fuerza, con que el agua se opone al avance de una embarcación, es un parámetro muy complicado de calcular, y de hecho, hasta el presente día, a pesar de los esfuerzos en el área de Dinámica de Fluidos Computacional, se debe confiar en resultados de pruebas de modelos en tanques de prueba. Las formulaciones mencionadas presentan ecuaciones de regresión a partir de los resultados de un buen número de pruebas de modelos. Y a pesar de la recomendación de [2] sobre el potencial peligro de emplear estos métodos para incluirlos en los esquemas de optimización, en el presente trabajo fue necesario hacerlo debido al limitado conocimiento disponible en el medio sobre la estimación de la Resistencia en forma numérico-analítica.

El peso del casco será estimado según una formulación disponible en la literatura y adaptado de acuerdo a los valores calculados para la LHosp. 1.

**Variables de Diseño:** se escogieron 1) la Eslora en flotación, dimensión básica en todo esquema de diseño de buques, y, 2) el Calado, dada la influencia que tiene la profundidad de navegación en el servicio fluvial. Se estableció como parámetro de diseño, la velocidad, de 9.5 nudos.

**Restricciones:** se consideró primero el Area de la Cubierta por ser este parámetro el requerimiento para la instalación de las facilidades hospitalarias. En este caso se tomó un rango alrededor del valor disponible en la LHosp. 1 (82 $m^2$), [5]: 81-83 $m^2$. Además siempre el problema de estabilidad es necesario incluirlo como restricción, por sus implicaciones en la seguridad del buque, en este caso a través de la Altura Metacéntrica, $GM_T$; sin embargo en todas las estimaciones realizadas, esta restricción nunca se activó. Esto se debe a que el bajo Calado obliga a incrementar la Manga, lo que lleva a un elevado Radio Metacéntrico, $BM_T$, lo que a su vez lleva a satisfacer los requerimientos en este respecto. Otro parámetro relacionado con la estabilidad es el francobordo, sin embargo, dado que en este tipo de medio no hay presencia significativa de olas, y, dadas las velocidades relativamente bajas para este tipo de embarcaciones, simplemente el puntal se lo tomó como el calado multiplicado por 1.6 (= T/0.625), lo que se piensa provee suficiente altura de borda libre a la embarcación.

## 3. GENERACION DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CASCO

Existen muchos esquemas para generar las relaciones básicas que definen el casco de un buque, sin embargo son típicamente usados para diseñar embarcaciones de tipo comercial, por ejemplo tanqueros, portacontenedores, pesqueros, u otros similares. En este caso, fue necesario realizar la adaptación de algunas relaciones disponibles, y adaptar otras, dado que su aplicabilidad original no se justificaba para el tipo de embarcación que se deseaba diseñar.

**Parámetros para Calcular la Resistencia al Avance:** A partir de la eslora (variable decisión) y de la velocidad se estimó el número de Froude, $Fn = v/\sqrt{gL}$ , y con este, se estimó el Coeficiente Bloque, siguiendo la curva media de Watson y Gilfillan, [8]:

$$C_B = 0.70 + 0.125\tan^{-1}\left[(23 - 100Fn)/4\right]. \quad (2)$$

El Peso del casco se lo estimó con la siguiente relación, tomada de [8],

$$W_{Casco} = KE^{1.36}\left[1 + 0.5(C_B{}' - 0.70)\right], \quad (3)$$

en la que:

$$E = L(B + T) + 0.85L(D - T), \quad (4)$$

y, a su vez, L, B, D y T, representan respectivamente la Eslora, Manga, Puntal y Calado. El puntal, D, se lo estimó como T/0.625, siguiendo el valor de la LHosp.1, y el parámetro:

$$C_B{}' = C_B + (1 - C_B)\left[0.8F - T/(3T)\right] \quad (5)$$

Dado que la manga, B, no había sido determinada, se iteró con la siguiente relación, a partir de la definición del Coeficiente Bloque:

$$B = \frac{W_{total}/\gamma}{C_B LT} \quad (6)$$

El coeficiente K de la fórmula para estimar el peso del casco, 0.119, fue determinado a partir de los datos del diseño LHosp1. No se consideraron los otros buques porque en esos casos, la habitabilidad empieza en el fondo de la embarcación, y no sobre la cubierta principal.

La eslora total se la aproximó como 1.025*L, y, el peso total se lo tomó como la suma del peso del Casco, Superestructura, Equipo Hospitalario, Líquidos y Consumibles, y, Maquinaria. Excepto el peso del casco, los restantes se tomaron como fijos, dados que el servicio los impone; véase los valores utilizados en la tabla 5 del Apéndice de este trabajo, [5].

El coeficiente de Sección Media se estimó aplicando la ecuación de Jensen, [8]:

$$C_M = \left[1 + (1 - C_B)^{3.5}\right]^{-1}, \quad (7)$$

y conociéndose 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:

$$C_{WP} = 0.69 + 0.28 * C_P, \quad (8)$$

tomada de [8], adecuada para embarcaciones bihélices y con forma de Popa con espejo ("transom stern"), pero con los coeficientes alterados para adaptarse a los valores de la LHosp1.

La mejor posición Longitudinal del Centro de Boyantez se determinó con la ecuación de Harvald, tomada de [8]:

$$lcb = 9.70 - 45.0Fn. \quad (9)$$

Este parámetro está medido desde la Sección Media, positivo hacia Proa, expresado como un porcentaje de la Eslora del buque.

Para aproximar la Superficie Mojada, se disponen de algunas formulaciones, véase [10]; sin embargo al aplicarlas para las embarcaciones tipo fluvial disponibles, producían resultados bastante diferentes que los obtenidos al integrar numéricamente las líneas de formas. Por ello, se alteraron las relaciones de Lap, Danckwarth 1 y 2, y, Schneekluth, buscando valores para las constantes que aparecían en dichas formulaciones, hasta que las evaluaciones que producían se acercaban a los valores de Superficie Mojada calculados. Luego se calculó la suma de las diferencias cuadradas y la que menor residuo produjo fue la de Danckwarth 1:

$$S_{Moj} = \frac{\nabla}{B}\left[\frac{3.0}{C_B + 1.2(C_B - 0.65)} + \frac{B}{T}\right] \quad (10)$$

Los valores originales de las constantes que aparecen en esta formulación eran:

1.7, −0.2 y 0.65 (no hubo necesidad de cambiarlo).

Finalmente para estimar el semiángulo de entrada del Plano de Flotación de diseño se empleó la formulación desarrollada por [4]:

$$i_E = 1 + 89\exp[-(L/B)^{0.80856}(1 - C_{WP})^{0.30484}$$
$$(1 - C_P - 0.0225lcb)^{0.6367}(L_R/B)^{0.34574}$$
$$(100\nabla/L^3)^{0.16302}] \tag{11}$$

donde el parámetro $L_R$ se estima de la siguiente forma:

$$L_R/L = 1 - C_P + 0.06C_P lcb/(4C_P - 1). \tag{12}$$

**Parámetros para aproximar la Altura Metacéntrica Transversal:** Para aproximar la Inercia Transversal se utilizó la fórmula de McCloghrie, [8]:

$$C_I = 1.04C_{WP}^2/12, \quad y, \quad I_T = C_I LB^3. \tag{13}$$

Luego la posición Vertical del Centro de Boyantez se aproximó con la fórmula de Schneekluth:

$$KB = T[0.90 - 0.30 * C_M - 0.10 * C_B]. \tag{14}$$

Para estimar el KG del buque, se requiere primero estimar el VCG del casco, parámetro que se estimó usando la fórmula de Kupras, [8]:

$$z_C = 0.01D\left[46.6 + 0.135(0.81 - C_B)(L/D)^2\right] + 0.08D(L/B - 6.5) \tag{15}$$

adecuada para esloras inferiores a 120 metros.

El KG de la embarcación se estimó asumiendo que el centroide de la Superestructura y del Equipo Hospitalario estaba 1.5 metros encima de la Cubierta, y, los Líquidos y Maquinaria se concentraban a mitad del puntal:

$$KG = \frac{W_C z_C + (W_S + W_E)(D + 1.5) + (W_L + W_M)\frac{D}{2}}{W_{Casco} + W_{SE} + W_{Eq} + W_{Líq} + W_{Maq}} \tag{16}$$

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

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

**Parámetros para estimar la Superficie de la Cubierta:** A partir de las características de la embarcación LHosp.1 se conoce que la Cubierta tiene un área de $1.05*A_{WP}$, y a través del coeficiente del Plano de Flotación:

$$A_{Cbta} = 1.05(C_{WP}LB). \tag{18}$$

**Resistencia Estructural Primaria:** En los esquemas de optimización estándares se incluye la resistencia estructural como una restricción del diseño. Sin embargo, en este caso, tratándose de una embarcación menor, aún considerando el bajo Puntal, no fue necesario incluir este aspecto entre las restricciones, como se muestra con los siguientes resultados. A continuación se incluye la curva de pesos de la LHosp.1 en condición Cargada:

| xm | Casco | Superes. | Equipos | Agua | Comb. | Gasol. | AANN | Maquin. | Suma |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m | ton/m | ton/m | ton/m | ton/m | ton/m | ton/m | ton/m | ton/m | ton/m |
| 0.85 | 0.19 | | | | | | | | 0.19 |
| 2.55 | 0.36 | 0.34 | 0.21 | 0.78 | | | | | 1.69 |
| 4.25 | 0.53 | 0.34 | 0.21 | 0.78 | | | | | 1.86 |
| 5.95 | 0.53 | 0.34 | 0.21 | | | | | | 1.08 |
| 7.65 | 0.53 | 0.34 | 0.21 | | | | | | 1.08 |
| 9.35 | 0.53 | 0.34 | 0.21 | | | | 1.19 | | 2.27 |
| 11.05 | 0.53 | 0.34 | 0.21 | | | | | | 1.08 |
| 12.75 | 0.53 | 0.34 | 0.21 | | | | | | 1.08 |
| 14.45 | 0.53 | 0.34 | 0.21 | | 0.29 | | | | 1.36 |
| 16.15 | 0.43 | 0.34 | 0.21 | | 0.29 | | | | 1.27 |
| 17.85 | 0.33 | 0.34 | 0.21 | | | 0.37 | | 0.29 | 1.55 |

*Tabla 1.- Distribución de Pesos*

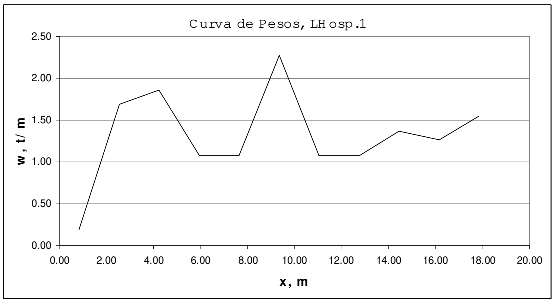



*Figura 1.- Curva de Pesos, condición Cargado*

Luego se calculó la distribución de Momento Flector, con los siguientes resultados, siendo el valor máximo 8.6 ton-m:

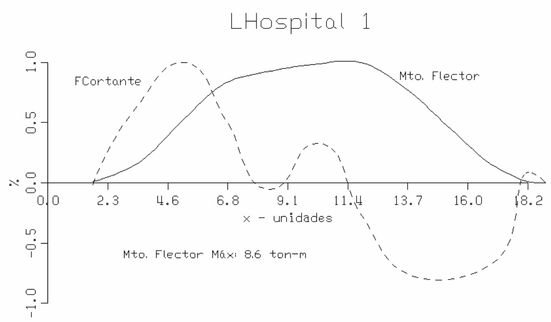



*Figura 2.- Distribución de Momento Flector y Fuerza Cortante, LHosp.1*

La Inercia y el Módulo Seccional se los calculó conociendo los elementos estructurales de la sección transversal, obteniéndose: 43.92 $m^2$-$cm^2$, y, 108.0 m-$cm^2$, respectivamente. Unicamente se consideraron los elementos del casco, es decir, por debajo de la Cubierta Principal. Véase los escantillones de la Sección Media en el apéndice. Como referencia se aplicó la siguiente relación tomada de las reglas de ABS del 2001, para embarcaciones con esloras inferiores a 90 metros:

$$SM = C_1 C_2 L^2 B (C_B + 0.7), [m - cm^2], \quad (19)$$

donde $C_1 = 22.40 - 0.52L$, $18 < L < 24$, y, $C_2 = 0.01$, obteniéndose un valor requerido de 268.0 m-$cm^2$. Es decir, los requerimientos de Resistencia primarios en realidad son bastante menores a los de una embarcación oceánica, quedando por determinar los niveles de esfuerzo en condiciones típicas del servicio fluvial, como encallamientos ú otras.

Finalmente se estimó el esfuerzo primario obteniéndose un valor de 80 kg/$cm^2$, muy por debajo del esfuerzo de fluencia del acero estándar (2450 kg/$cm^2$). Por lo expresado, se consideró que en lo referente a la resistencia estructural, el diseñador debe proveer suficiente material para soportar principalmente los esfuerzos secundarios y terciarios, pudiendo en general despreocuparse de los primarios.

## 4. RESULTADOS de la OPTIMIZACIÓN

Una vez implementado el proceso descrito, se ejecutó el programa, con diferentes valores de Ponderación para el Peso del Casco y la Resistencia al avance. Para efectos de Normalización, se emplearon los valores originales del peso estructural de la LHosp.1, 8.51 toneladas, y, la Resistencia al avance a 9.5 nudos, 759.20 kg. Los resultados se muestran a continuación, para tres combinaciones de factores de Ponderación. Se nota que conforme se da más importancia al peso del casco, la Eslora disminuye, y la Manga se incrementa, lo cual logra una reducción del peso, pero incrementando la Resistencia total al Avance.

| | 25% Wcasco | 50% Wcasco | 75% Wcasco | |
|---|---|---|---|---|
| | 75% Resist. | 50% Resist. | 25% Resist. | |
| Parámetro | FINAL | FINAL | FINAL | Unid. |
| Eslora Flot. | 22 | 20.444 | 20 | m |
| Manga | 4.1564 | 4.5013 | 4.5456 | m |
| Puntal | 0.79834 | 0.79718 | 0.80207 | m |
| Calado | 0.49896 | 0.49824 | 0.50129 | m |
| CB | 0.5501 | 0.54547 | 0.54422 | |
| CP | 0.5837 | 0.58 | 0.57901 | |
| CM | 0.94244 | 0.94046 | 0.93992 | |
| CPF | 0.85344 | 0.8524 | 0.85212 | |
| Volumen | 25.099 | 25.01 | 24.802 | $m^3$ |
| Sup. Mojada | 92.41 | 89.88 | 88.704 | $m^2$ |
| lcb | -5.2689 | -5.8282 | -5.9995 | %L, +Pr |
| iE | 25.28 | 29.609 | 30.454 | grad |
| KB | 0.28055 | 0.28067 | 0.28253 | m |
| BMT | 3.9731 | 4.6947 | 4.7662 | m |
| VCGCasco | 0.57703 | 0.54623 | 0.53923 | m |
| GMT | 3.074 | 3.8051 | 3.8731 | m |
| Area Cbta | 81.941 | 82.364 | 81.342 | $m^2$ |
| Peso Casco | 8.9438 | 8.8548 | 8.6473 | ton |
| Fn Objetivo | 0.77341 | 0.87916 | 0.94308 | m/m |
| Rtotal | 516.9 | 545 | 549.6 | kg |

*Tabla 2.- Resultados de la Optimización con diferentes valores de ponderación*

A continuación se muestran algunas figuras que muestran la convergencia de la Función Objetivo, las restricciones y las variables de diseño. Se establecieron diferentes valores iniciales para Eslora y Calado, para corroborar el proceso de convergencia.

Respecto de las restricciones, ambas se satisfacen sin problema. Especialmente el $GM_T$, con las elevadas Mangas con que se trabaja, este parámetro está siempre por encima de los 3.00 metros.

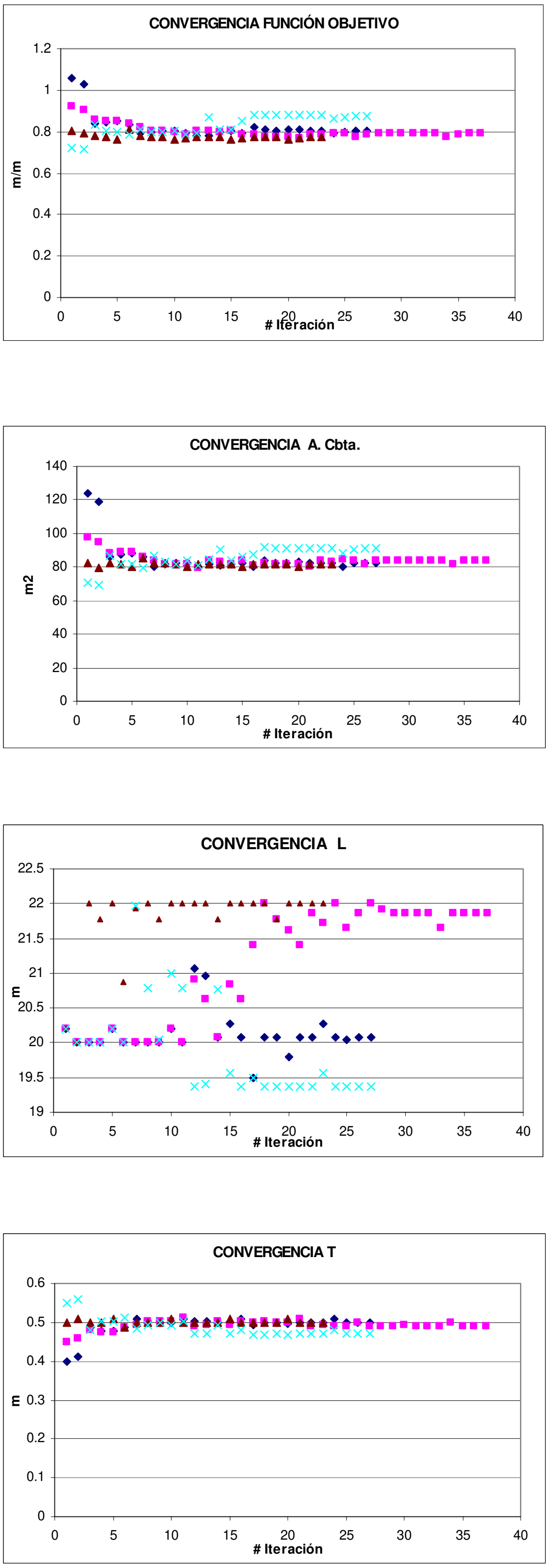



*Figura 3.- Convergencia de la Función Objetivo, Area de Cubierta, L y T, con $w_{Peso}$= 0.25, y $w_{Resist}$= 0.75*

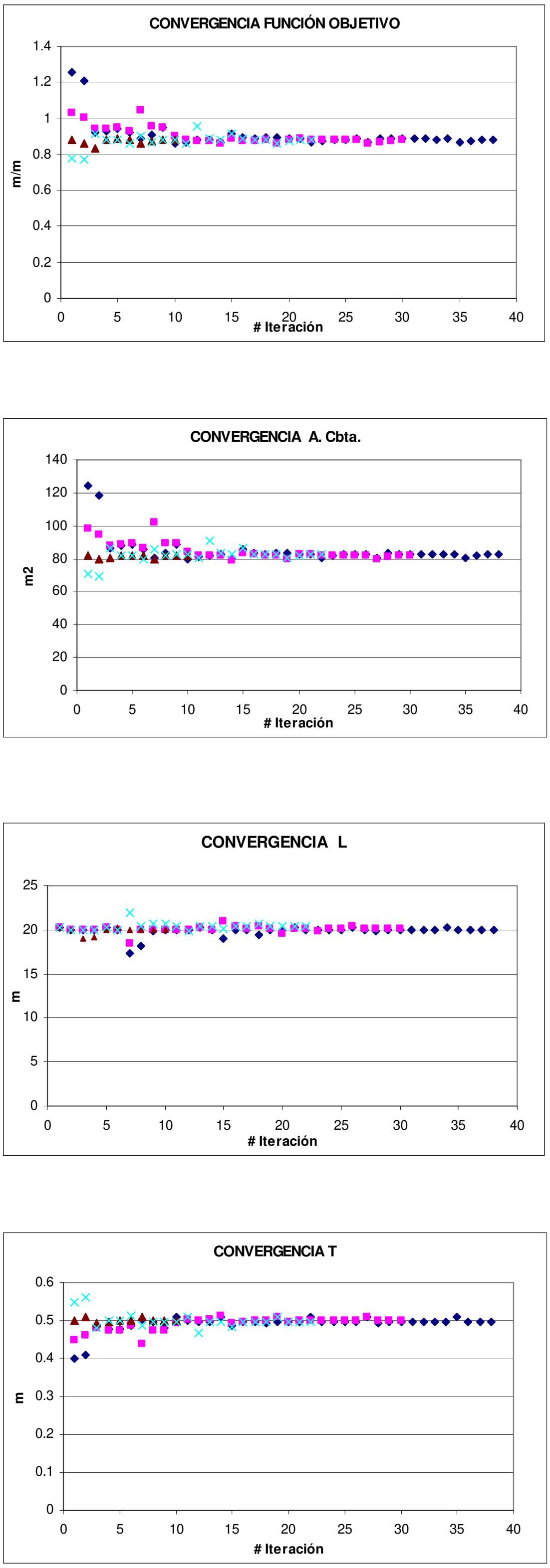



*Figura 4.- Convergencia de la Función Objetivo, Area de Cubierta, L y T, con $w_{Peso}$= 0.50, y $w_{Resist}$= 0.50*

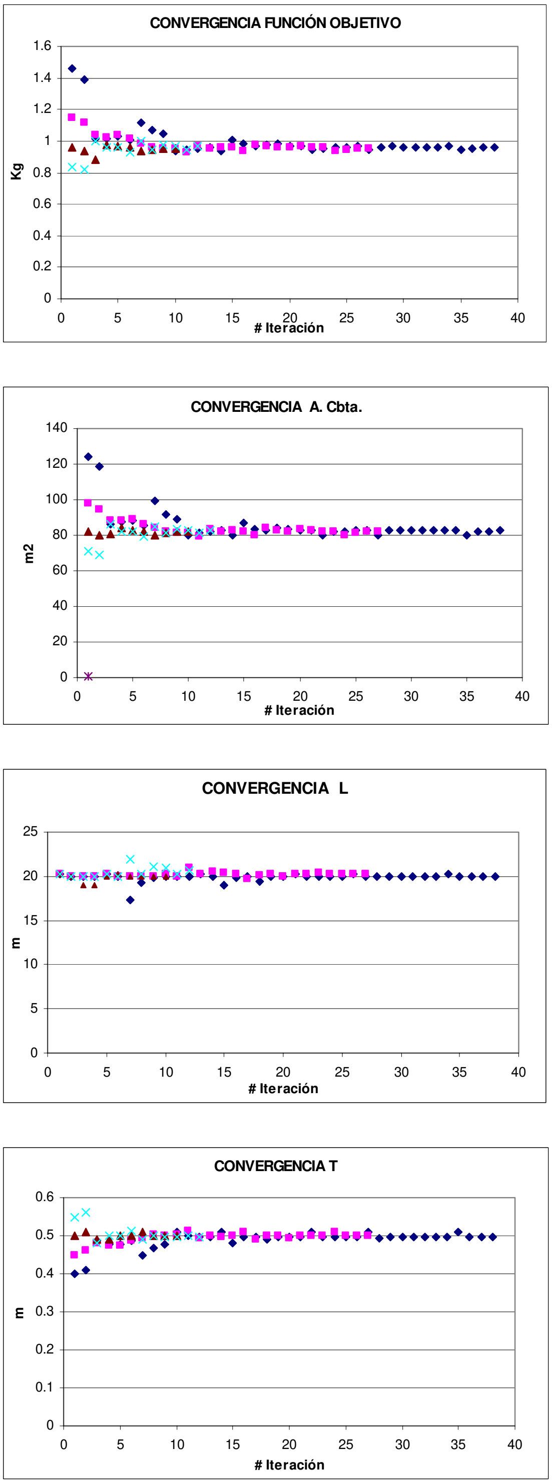



*Figura 5.- Convergencia de la Función Objetivo, Area de Cubierta, L y T, con $w_{Peso}$= 0.75, y $w_{Resist}$= 0.25*

El coeficiente Prismático Longitudinal, $C_P$, resultante es de aproximadamente 0.58, véase la tabla 2. Ahora de acuerdo con los comentarios de Parsons, [8], dicho paràmetro debe elegirse en función del número de Froude, que en los casos analizados vale alrededor de 0.33-0.34. Y usando la figura 6 tomada de [8], se comprueba que para un número de Froude de dicho rango, se recomienda un $C_P$ entre 0.55-0.60.

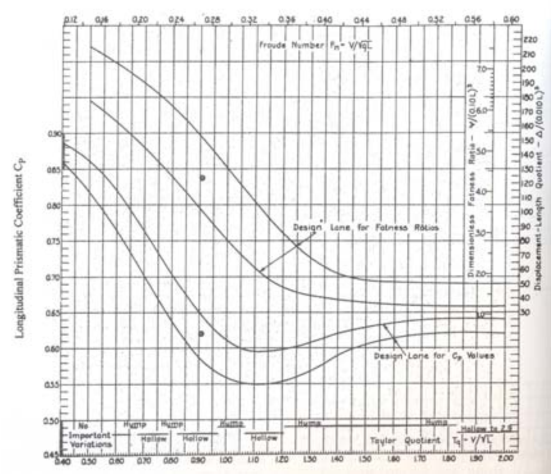



Figura 6.- $C_P$ para diferentes Fn, [8]

Debe enfatizarse que los cálculos de Resistencia al Avance no recibieron corrección por efectos de la profundidad limitada. Se espera que dado que los diseños se comparan para una misma velocidad, la influencia mencionada actúe en forma similar para todos ellos.

## 5. APLICABILIDAD DE LOS DISEÑOS GENERADOS

A partir de los resultados obtenidos, se empleó el programa Gformas-GNurbs, [7] para desarrollar las formas de una de las embarcaciones obtenidas, para comprobar la aplicabilidad de los diseños. Para facilitar el potencial trabajo de construcción, las formas generadas incluyeron dos chinas. Se consideró el diseño que pondera 75% la Resistencia al Avance, y, 25% el Peso del Casco; véase en el Apéndice el plano con las formas generadas.

La tabla 3 presenta una comparación de algunas características hidrostáticas del buque generado con los resultados del proceso de optimización. Una de las más grandes diferencias está en el Coeficiente del Plano de Flotación, aunque el valor realmente obtenido está por encima del requerido. Posiblemente en un futuro, se pueda mejorar la ecuación (8), a partir de nueva información sobre embarcaciones de este tipo.

Para efectos de comparación, a partir de los datos hidrostáticos disponibles, se estimó la Resistencia al Avance de la embarcación LHosp. 1 a una velocidad de 9.5 nudos, resultando un valor de 759.20 kg. Es decir que con el nuevo diseño, se reduce al 68% la Resistencia al Avance (519.7 kg). El peso estructural del casco en cambio se incrementa de 8.51 a 8.94 toneladas, valor estimado para el diseño óptimo, es decir un incremento del 5% .

| | Optimo | Generado | |
|---|---|---|---|
| Eslora $_{Flot.}$ | 22 | 21.912 | m |
| Manga | 4.1564 | 4.16 | m |
| Puntal | 0.79834 | 0.8 | m |
| Calado | 0.49896 | 0.5 | m |
| $C_B$ | 0.5501 | 0.56 | |
| $C_P$ | 0.5837 | 0.61 | |
| $C_M$ | 0.94244 | 0.93 | |
| $C_{WP}$ | 0.85344 | 0.84 | |
| Volumen | 25.099 | 25.73 | $m^3$ |
| $S_{mojada}$ | 92.41 | 85.5 | $m^2$ |
| LCB | -5.2689 | -2.46 | %LPP |
| iE | 25.28 | 24 | grad |
| $A_{cbta}$ | 81.941 | 81 | $m^2$ |
| $R_{TOTAL}$ | 516.9 | 519.7 | kg |

*Tabla 3.- Comparación de características de las formas generadas con las del óptimo*

Finalmente, dado que las embarcaciones tratadas tienen proporciones similares a las de una barcaza, y conociendo que estas adolecen de problemas de inestabilidad direccional, [6], fue necesario desarrollar cálculos primarios sobre este asunto. Se comprobó que instalando un codaste con la altura igual al Calado, la embarcación alcanzaría la Estabilidad Direccional, según el criterio lineal.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha implementado un proceso de Optimización para reducir una combinación de Resistencia al Avance y Peso del casco, para una embarcación que provee Servicio Hospitalario Fluvial. La estimación de la Resistencia al Avance se desarrolló aplicando las ecuaciones de Regresión desarrolladas por Holtrop, [3] y [4]. Y aún cuando es posible obtener procesos no completamente confiables, como lo previene Day, [2], se piensa que se ha obtenido un diseño con proporciones que representa un ahorro satisfactorio en consumo de combustible. Para confirmar los resultados, sería conveniente comprobar el rango de parámetros de los modelos de buques, a partir de los que se establecieron las relaciones de regresión. Queda por determinar cuánto es la influencia de la profundidad limitada a los diseños aquí obtenidos.


## RECONOCIMIENTO

El presente trabajo es un resultado del proyecto "Optimización de Embarcaciones para Uso Fluvial Ecuatoriano", auspiciado por CONESUP-ESPOL. El autor deja constancia de su agradecimiento hacia esas instituciones.


## REFERENCIAS


1. Costaín, J. M., Optimización Estructural Preliminar usando el método COPES-CONMIN y las Reglas de Construcción de ABS. Tesis de Grado de Ingeniero Naval, Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, ESPOL, 1997.

2. Day, A.H., y, Doctors, L.J., Resistance Optimization of Displacement Vessels on the Basis of Principal Parameters. Journal of Ship Research, SNAME, Vol. 41, No 4, Diciembre 1997.

3. Holtrop, J., y Mennen, G.G.J., An Approximate Power Prediction Method. International Shipbuilding Progress, Vol. 29, Julio 1982.

4. Holtrop, J., A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data. International Shipbuilding Progress, Vol. 31, Noviembre 1984.

5. LOGSESA, Memoria Técnica para la Construcción de la L/H Samarina. Guayaquil, 1994

6. Marín, J.R., Cálculo de la Estabilidad Direccional de una Embarcación Fluvial. Memorias de ESPOL Ciencia, Guayaquil, Ecuador, Diciembre 2004.

7. Marín, J.R., Programa Gformas-GNurbs: Programa para la Generación de Formas de un Buque. jmarin@espol.edu.ec, 2005.

8. Parsons, M.G., Capítulo 11, Parametric Design en Ship Design and Construction, vol. I, Lamb, T., ed. SNAME, NJ, 2003.

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

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

11. SETINAVSA, Memoria Técnica para la Construcción de las L/H Mincha Kole y Jami Purina. Guayaquil, 2002

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


## APENDICE

### Características de Embarcaciones de Diseño Local

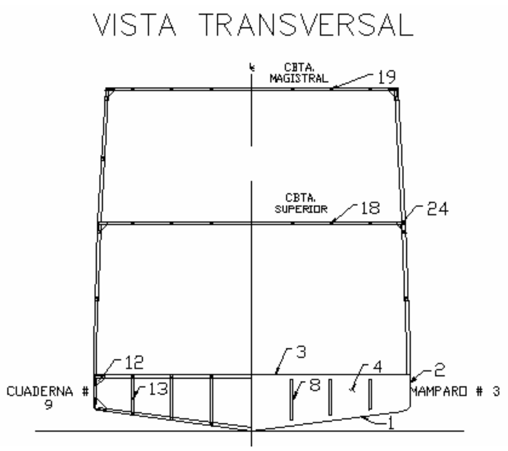
| | LHosp.1 | LHosp.2 | LHosp.3 | |
|---|---|---|---|---|
| $L_{OA}$ | 19.386 | 21.00 | 18.50 | m |
| $L_{WL}$ | 18.931 | 20.397 | 17.554 | m |
| $L_{PP}$ | 18.25 | 21 | 18 | m |
| B | 4.6 | 5.1 | 4 | |
| $B_{WL}$ | 4.596 | 4.386 | 3.743 | m |
| D | 0.8 | 1.2 | 1.2 | m |
| T | 0.496 | 0.341 | 0.39 | m |
| V | 24.67 | 25.44 | 22.60 | $m^3$ |
| $S_{moj}$ | 84.4 | 93.3 | 73.9 | $m^2$ |
| $S_{cbta}$ | 81.6 | 103 | 73.7 | $m^2$ |
| $A_{WP}$ | 77.7 | 86 | 65.2 | $m^2$ |
| $A_M$ | 1.79 | 1.421 | 1.411 | $m^2$ |
| $i_E$ | 36.79 | 68 | 89 | gr |
| $A_{espejo}$ | 0.26 | 0.269 | 0.259 | $m^2$ |
| lcb (S.M.) | -2.41 | -1.62 | -1.23 | % L |
| $C_B$ | 0.572 | 0.834 | 0.882 | |
| $C_M$ | 0.785 | 0.950 | 0.967 | |
| $C_P$ | 0.728 | 0.878 | 0.912 | |
| $C_{WP}$ | 0.893 | 0.961 | 0.992 | |

Tabla 4

### Pesos de las Embarcaciones de Diseño Local, toneladas.

| | LHospit.1 | LHospit.2 | LHospit.3 |
|---|---|---|---|
| $W_{Casco}$ | 8.510 | 13.926 | 11.088 |
| $W_{Superstr.}$ | 5.801 | 1.160 | 1.160 |
| $W_{Líquidos}$ | 6.284 | 6.284 | 6.284 |
| $W_{Equipam.}$ | 3.570 | 3.570 | 3.570 |
| $W_{Maquin.}$ | 0.500 | 0.500 | 0.500 |
| $W_{Total}$ | 24.666 | 25.440 | 22.601 |

Tabla 5




1 Planchaje de fondo 1/4"
2 Planchaje de costado 1/8"
3 Planchaje de cubierta principal 1/8"
4 Forro de mamparo 1/8"
8 Refuerzo verticales de mamparo 1.5" x 1/8"L
12 Escuadras del casco 1/8"
13 Puntales $1\frac{1}{2}$" SCH40
18 Refuerzo long. cub. superior 1.5" x 1/8"L
19 Refuerzo long. cub. magistral 1.5" x 1/8"L
24 Escudras de superestructura 1/8"

Figura 7.- Sección Transversal de la Cuaderna Maestra de la LHosp.1

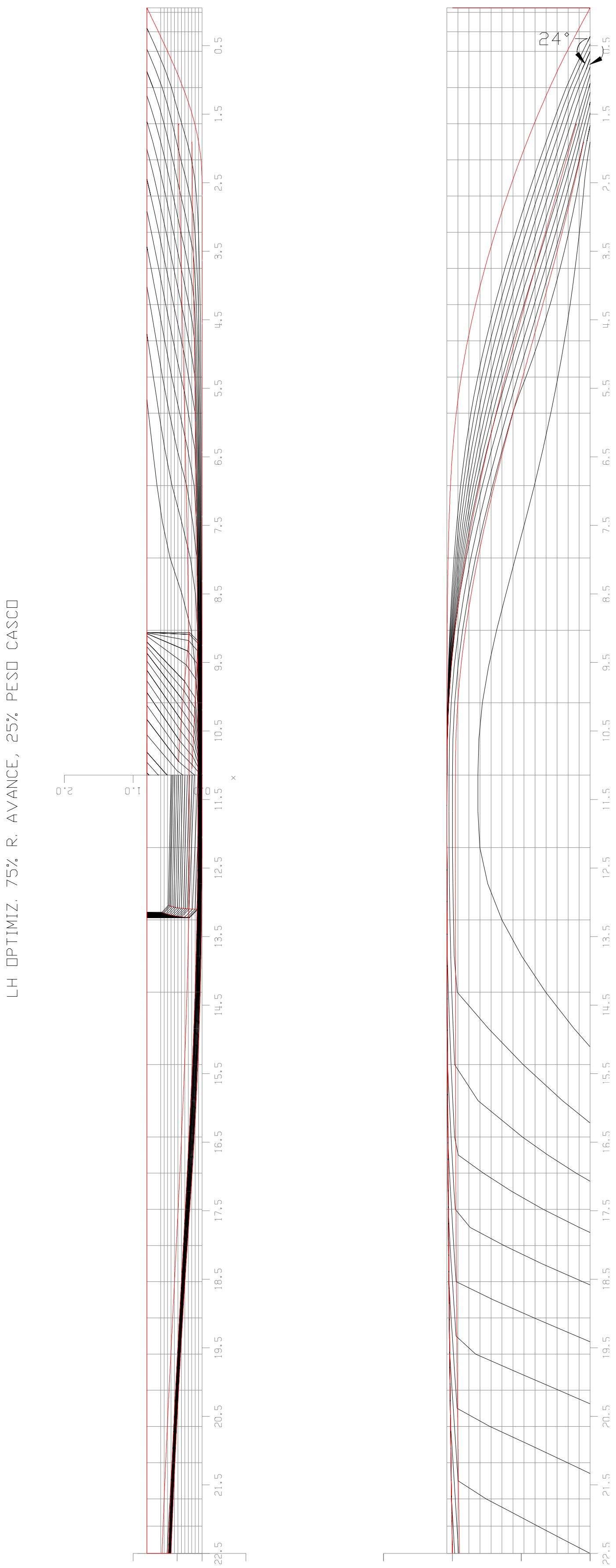



Figura 8.- Formas generadas para un diseño óptimo