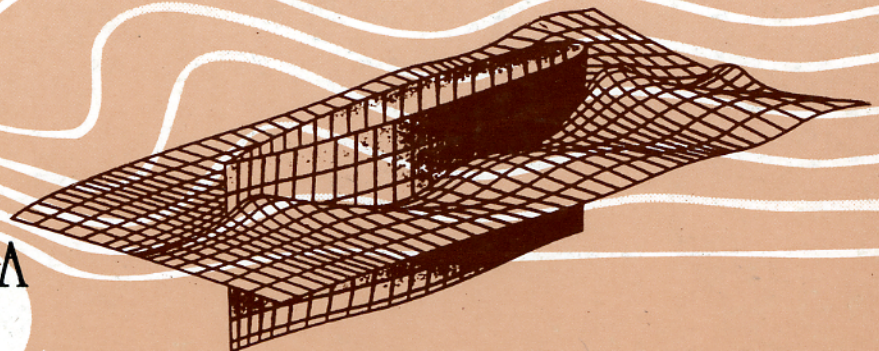
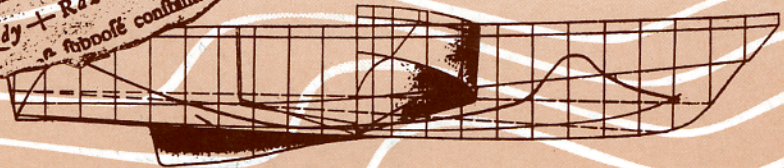
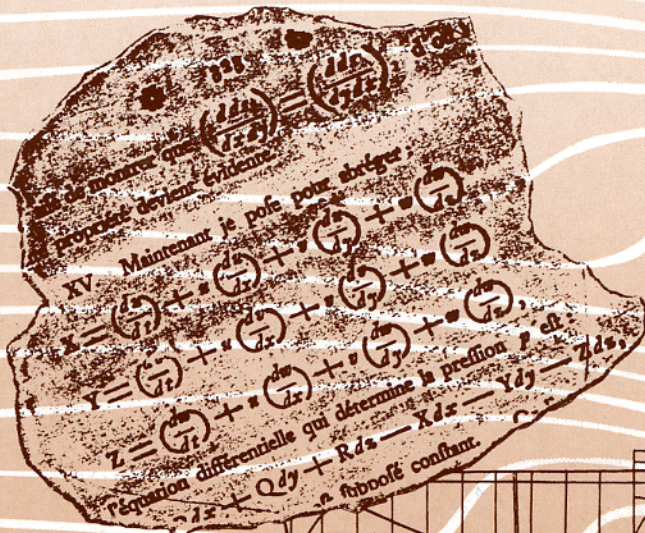


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 1993 VOLUMEN 3 No. 2



INGENIERIA
1993

NAVEGABILIDAD Y CAPACIDAD DE CARGA DE UN NAVIO PESQUERO: CALCULOS POR MEDIO DE COMPUTADORAS PERSONALES

Luis M. Murillo B., Ing, Ph.D.

Resumen

Se introducen procedimientos numéricos para el cálculo de algunas de las curvas hidrostáticas del diseño naval. Los procedimientos usan dibujo ayudado por computadora (CAD) y hojas de cálculo modernas. El uso de las computadoras agiliza grandemente los procedimientos tradicionales y permite al diseñador concentrarse en los principios del diseño más que en los detalles del cálculo tedioso. Los procedimientos son aplicables a pequeños barcos de pesca comúnmente observados en las costas centroamericanas.

Summary

Modern computer based procedures of naval design for small fishing boats are introduced for use toward better construction practices in the central american fishing fleet. PC's (IBM PS/2) and CAD packages (Design CAD) are used together with Spreadsheets (Excel) to speed up the basic computations for the displacement and other curves applicable for small vessels.

1. INTRODUCCION

El diseño de un navío común se realiza tradicionalmente en una mesa de dibujo y en un taller de trazado y afinamiento de las curvas del barco. Recientemente, sin embargo, han aparecido instrumentos de gran utilidad para la ingeniería naval, como las computadoras personales y las hojas de cálculo con procedimientos y rutinas automatizables. Esto facilita y acelera el proceso de diseño y trazado de las características de los cascos en la ingeniería oceánica o naval. En este artículo se revisan los fundamentos de navegabilidad y propulsión e introducen nuevas rutinas de integración y trazado de las curvas clásicas del diseño naval, usando computadores personales y mesas digitadoras para los tradicionales cálculos de áreas de las secciones transversales. Los valores de las áreas, semimangas y alturas se introducen en hojas de cálculo en donde se realizan los cómputos de volumen, la posición de centro de boyancia y la capacidad de carga por centímetro

de inmersión. El procedimiento parte de un diagrama de formas hecho a escala fiel del prototipo que se procesa en una tableta de dibujo digital. Se usan integradores y procedimientos de trazado digital de paquetes de dibujo por computadora para el diseño y evaluaciones iniciales. Los valores se transfieren luego manualmente a una hoja de cálculo en donde se realizan los cálculos pertinentes de forma automática y muy rápida, reduciendo el tiempo que se requiere para un diseño al tiempo que tarda el ingeniero naval en dibujarlo. La computadora realiza luego los cálculos tediosos e incómodos rápidamente.

Una última consideración inicial respecto de las unidades. Tradicionalmente la ingeniería naval norteamericana se ha usado el sistema inglés de unidades con fuerza en libras y longitud en pies. Sin embargo, modernamente se han debido cambiar todas las unidades de cálculo al Sistema Internacional con kilogramos y metros. En este trabajo usaremos un sistema tradicional al enunciar las leyes de la hidrodinámica naval por su mayor

simplicidad; sin embargo, todos los cálculos numéricos se harán en el Sistema Internacional.

2. NAVIGABILIDAD Y PROPULSION DE UN BARCO PESQUERO

Los cascos de uso común y económico en la construcción de barcos de pesca son generalmente del tipo de "pleno desplazamiento". En estas condiciones generalmente se usan sistemas propulsivos tradicionales de baja velocidad y máximo rendimiento, como las hélices de paso fijo. Esto por cuanto se sabe que los pequeños barcos de pesca (generalmente de menos de 20 metros de largo) deberán llevar cargas máximas a un bajo costo. A desplazamiento pleno, no se ha brincado la barrera de Froude y el barco genera inevitablemente un sistema de olas de acompañamiento que, a velocidades cercanas a la velocidad correspondiente unitaria, comienza a demandar gran capacidad de potencia.

A velocidades muy bajas de pocos nudos domina la fricción del casco y el diseñador hábil sabe escoger la forma del barco que minimice la fracción de área expuesta al agua con el volumen del navío. Esto generalmente produce formas redondeadas (vistas en el plano de formas) con coeficientes de finura intermedios y números densimétricos altos. Estos diseños dan mínima resistencia a bajas velocidades, pero máxima resistencia a altas velocidades i.e a velocidades cercanas a la velocidad correspondiente del casco, o sea cuando

$$V[n] \approx \sqrt{(L[ft])} \quad (1)$$

En esta ecuación, como es tradicional en la ingeniería naval, V representa la velocidad en nudos (n) y L la longitud de la línea de flotación del navío escrita en pies (ft). Así por ejemplo, un barquito de pesca de 45 pies de largo y 12 toneladas de desplazamiento, requiere menos de cinco libras de empuje por tonelada de carga a una velocidad de un tercio de la velocidad correspondiente, que en este caso es de unos siete nudos. De esta fuerza aproximadamente la mitad se usa para vencer la fuerza de fricción y la otra mitad se usa para vencer el efecto de las olas de acompañamiento. Ya a una velocidad correspondiente, dada por la ecuación No. 1, la resistencia friccional es

de unas siete libras y la resistencia de las olas es de unas 18 libras por tonelada de desplazamiento. Esta desproporción de fuerzas se aumenta aún más para otras velocidades mayores. Ya a una velocidad de 10 nudos la fuerza de las olas es más de 100 veces mayor que la fuerza de fricción.

No conviene entonces diseñar un barco de desplazamiento pleno para altas velocidades si se quiere operar económicamente. Tampoco conviene hacer el casco muy delgado porque esto maximiza la fuerza de fricción por unidad de volumen del barco y reduce la capacidad de carga del mismo. Se puede ganar una mayor velocidad a un costo de potencia razonable haciendo el barco más grande. Así por ejemplo, un barco el doble de largo (94 pies) puede navegar económicamente a 10 nudos sin sobrepasar su velocidad correspondiente unitaria ni pagar ningún tipo de pena energética.

Es importante tener un buen diseño que acomode un buen volumen pero que, sin embargo, no sea redondeado desde todo punto de vista. Es decir, si el barco aparece redondeado en vista lateral, podrá minimizar los requerimientos de potencia propulsiva, pero puede afectarse seriamente su navegabilidad por inestabilidad y cabeceo. Dicho con otras palabras, un barco con forma de semiesfera minimiza la resistencia friccional y de Froude a bajas velocidades, pero maximiza el efecto del oleaje incidente sobre la estabilidad el casco. El barco se agita demasiado en el mar y mucha de su fuerza propulsiva se gasta nada mas en girar y dar vueltas. Para este tipo de casco un mar relativamente tranquilo se vuelve un mar agitado rápidamente cuando hay olas. Técnicamente, esto se puede explicar en términos del momento de inercia del área de flotación y la altura metacéntrica, junto con poco momento de resistencia estático al vuelco en ángulos pequeños. Estos y otros muchos temas de interés para un buen diseño naval se podrán discutir en próximos artículos técnicos como este.

En Centroamérica realmente se ha procedido por muchos años a seguir unos cuantos cascos mas o menos conocidos, a la hora de construir barcos de pesca y muchas veces se desconoce su comportamiento hidrodinámico y propulsivo en términos precisos de la ingeniería naval. Sin embargo, esto no es grave si se considera que los cascos son de bajas velocidades, en donde la forma importa poco y, siempre que el casco sea un poco redondeado (visto en plano de formas transversales) y tenga buen volumen neto, no se pagará pena

alguna por poca capacidad de carga. La pena, además, de un mal diseño, la más grave de todas, es la ruina financiera...

Ya con estos detalles fundamentales en mente, podemos proceder a cuantificar un poco los requerimientos propulsivos probables de un barco pesquero pequeño tal y como los encontramos en la costa pacífica de Costa Rica. Si se conoce un barco similar al que se estudia, que navegue en las mismas aguas y que posea un sistema propulsivo con una potencia dada que le funcione bien, entonces es posible estimar, de forma aproximada, los requerimientos propulsivos de otros barcos similares.

El procedimiento se basa en las leyes de similitud de Froude y Reynolds. Sus fundamentos se exponen a continuación y deberán realizarse en unidades consistentes preferentemente por un ingeniero con alguna experiencia en mecánica de fluidos. Sin embargo, muchas veces en Centroamérica no se encuentra tal especialista y se requiere de urgencia un estimado rápido aproximado. (Como se dice popularmente para no meter mucho la pata...). Para suplir estas necesidades evidentes del desarrollo naval nacional, es que la Universidad de Costa Rica inició este programa de extensión naval, bajo el cual se escribe el presente artículo.

Como se vio anteriormente los requerimientos de potencia están mayormente determinados por la ola de acompañamiento del navío y menormente determinados por la fricción del casco a velocidades intermedias (i.e de 3 a 7 nudos aproximadamente). La fricción del casco crece con el área mojada del mismo y esto crece según

$$F_r \approx W^{(2/3)} \quad (2)$$

en donde W representa el desplazamiento (peso) del navío y F_f es la fuerza de fricción. La fuerza de presión de la ola de acompañamiento, se escala según el número de Froude. Esta fuerza es comparable para barcos similares moviéndose a velocidades correspondientes dadas por

$$V_1 / \sqrt{L_1} = V_2 / \sqrt{L_2} \quad (3)$$

en donde V es la velocidad del barco (tradicionalmente dada en nudos) y L es su longitud en pies

(LPP o sea longitud entre perpendiculares o la longitud de la línea de flotación). El índice 1 se refiere al primer barco, el 2 al segundo barco.

La Potencia requerida entonces para vencer el empuje de la ola de acompañamiento en mar tranquilo, está dada por la fuerza de la pared de agua desplazada. Esta fuerza es proporcional al área transversal y dicha área transversal es proporcional al peso del barco para navíos parecidos. En consecuencia, la resistencia del agua es groseramente proporcional al peso W del barco o sea a su desplazamiento. Entonces

$$F_o \approx W \quad (4)$$

en donde F_o es la magnitud de la fuerza de empuje requerida. La velocidad se escala con la ecuación 3. En consecuencia la potencia necesaria (P) para mover el barco, que es el producto de la fuerza por la velocidad, esta dada aproximadamente por

$$P \approx (W^{(2/3)} + W) * \sqrt{L} \approx W * \sqrt{W^{(1/3)}} \quad (5)$$

en la segunda igualdad hemos usado el hecho de que para valores grandes $W \gg W^{2/3}$.

Conocida, entonces, una referencia determinada confiable para la comunidad pesquera del país, que llamamos P_1 (i.e la potencia, en caballos de fuerza, de un motor de un muy buen barco de pesca de la persona X) se pueden, entonces, calcular los requerimientos propulsivos del barco en estudio o en construcción, mediante una regla de tres como sigue

$$P_2 = P_1 * (W_2/W_1)^{7/6} \quad (6)$$

En donde P_2 es la potencia requerida para el barco, W_2 es su desplazamiento, P_1 y W_1 son los valores conocidos del barco de referencia. A esta regla para el cálculo del caballaje o potencia requerida la llamaremos la "Regla de los Siete Sextos".

Estos cálculos asumen similitud en las pérdidas por piñones, engranajes, chumaceras etc. La eficiencia propulsiva neta ha de ser la misma para ambos barcos. De no ser así las anteriores reglas han de modificarse.

Ahora para un barco, al que se le quiere colocar un motor, se deberá conocer su volumen sumergido y con este volumen, por multiplicación con el peso específico de agua marina, podremos calcular su peso o desplazamiento W . Finalmente se usa la Regla de los Siete Sextos para estimar la potencia del motor requerido. Para realizar estos cálculos de desplazamiento es que se introducen los métodos computarizados de este artículo y que trataremos más adelante.

Los anteriores procedimientos son aproximados y el cálculo de ingeniería más preciso se realiza con pruebas de estanque. En estas pruebas de estanque, se estiman las fuerzas de fricción y de oleaje de acompañamiento del prototipo, mediante medición de estas mismas fuerzas en un modelo que se corre arrastrado a la velocidad correspondiente de Froude, en una piscina larga o estanque de pruebas. Se usan luego los procedimientos de ingeniería (reglas de similitud de Reynolds y Froude, el Teorema de la Separabilidad y la experiencia) para determinar la fuerza propulsiva requerida por el navío real o prototipo. Para esto cabe mencionar que se usan los procedimientos clásicos del análisis dimensional de la mecánica de fluidos acoplados al buen juicio y experiencia del ingeniero, como en todos los casos prácticos.

Un detalle final antes de pasar a los cálculos de volumen. Un buen diseño naval es bueno para un mar determinado con oleaje y características generales determinadas. *Un diseño no es bueno para todas las condiciones posibles; sino solo para las que se diseñó.* Es por esto que es importante conocer cuales son las condiciones físicas del diseño. Es decir, es recomendable conocer, por ejemplo, la longitud del oleaje medio común del lugar en donde el barco va a operar, los vientos, las corrientes etc. Esto permite, entre otras cosas, calcular una longitud apropiada para el barco que no "resuene" o baile demasiado con las olas. Estos y otros temas que determinan la navegabilidad de un barco los expondremos en artículos posteriores.

3. EL CALCULO DE LAS CURVAS HIDROSTATICAS DE UN NAVIO

Son varias las curvas que se pueden calcular haciendo uso de los conocimientos de la estática de fluidos de la ingeniería oceánica. En este artículo introduciremos procedimientos para calcular algunas de importancia en el diseño de los barcos.

Existen muchos procedimientos alternativos de cálculo. Los aquí expuestos son los tradicionales de la ingeniería naval en los Estados Unidos (Comstock, 1967) modificados un poco para adaptarlos a las necesidades de las hojas de cálculo modernas y para barcos pequeños. Para procedimientos alternativos un poco más exactos, para barcos de pesca pequeños, se puede consultar a Murillo (1991).

Un diagrama de uso común en el diseño naval es el de toneladas desplazadas por unidad de calado. Otro es el de la posición del centro de boyancia longitudinal contra tonelaje o calado medio. La curva de toneladas por centímetro de inmersión o curva TPC es otro diagrama que tiene muchos usos en la ingeniería naval. Uno de los principales usos de la curva TPC es el cálculo de las variaciones de desplazamiento W mediante lectura directa o sea, la localización de la línea de flotación con respecto de la quilla del barco; es decir, mediante lectura directa de la distancia vertical desde el fondo del navío hasta la línea de flotación vigente en condiciones de carga dadas.

Como su nombre lo indica la curva TPC es un gráfico de las toneladas de desplazamiento del barco por cada centímetro de inmersión del casco. Como las formas de los navíos no son formas geométricas sencillas, las integraciones que se indican en las formulas matemáticas se realizan siempre de forma numérica y, en nuestro caso, usando siempre la computadora para todos los cálculos tediosos.

El procedimiento para calcular los diagramas mencionados en los párrafos anteriores comienza con pasar un plano de formas transversales a escala, mediante una tableta de dibujo, a un programa de dibujo por computadora o CAD. La figura No. 1 muestra el plano de formas transversales de la nave Chacarita I de la Cooperativa de Pescadores COOPECHAPU de Puntarenas, que usaremos de ejemplo en este artículo y que fue transferido mediante una tableta digital.

Las líneas curvas corresponden a las diferentes cuadernas o mejor dicho a sus límites moldeados o externos. Estas líneas están numeradas de -1 a 11. Aparece solo la mitad de cada cuaderna, puesto que los barcos son generalmente simétricos de babor a estribor. Los números negativos indican cuadernas que se encuentran por detrás del codaste, siempre sobre el agua. Las líneas horizontales equidistantes se dibujan con el CAD y representan líneas de flotación tentativas que se usarán en los

cálculos. En este caso se escogieron 6 líneas de flotación y estas están espaciadas verticalmente 40 cm la una de la otra. De estas seis se escogieron las primeras cuatro para realizar los cálculos. Se considera que estas cuatro líneas de flotación cubren el rango de operación común del barco.

Para cada una de las líneas de flotación que se escojan, se miden luego las áreas de las secciones transversales desde la quilla o fondo del navío, con un integrador digital propio del CAD. Esto requiere de una tableta de dibujo y un "pato" de dibujo. Desde luego que un primer paso en todo esto es fijar la escala exacta del dibujo en el CAD. La medición de áreas generalmente requiere su delineamiento en la tableta con el pato y el CAD realiza luego la evaluación cuantitativa del área de forma automática. Las computadoras modernas son tan rápidas en esto, que hoy día se dura mucho más (200 o más veces...) en delinear el área transversal de la línea de flotación dada, que en calcular el área.

El cuadro No.1 muestra los resultados de la evaluación realizada a Chacarita I. Este cuadro indica el ángulo en el que se dibujaron las líneas de flotación escogidas. Para la curva TPC este ángulo es cero, pero para otros cálculos importantes como el cálculo de las Curvas de Estabilidad a ángulos mayores se trazan varios grupos de líneas de flotación con inclinaciones que varían cada 5 grados de 0 a 90. Estos y otros cálculos se podrán discutir más adelante en otros artículos técnicos.

Cuadro No. 1

D-CAD Tabla de Hidrostática del Diagrama de Formas

Angulo = 0°		metros						
Barco: Chacarita								
Ing. L. M. Murillo B.								
Sta.	W.L #1	W.2	#2	W.L #3	W.L #4			
	0.5	Area	0.5	Area	0.5	Area	0.5	Area
S0	0	0	0.12	0.24	0.78	1.47	1.87	2.74
S1	0.09	0.19	0.61	1.22	1.8	2.6	1.96	3.92
S2	0.29	0.58	0.93	1.86	1.7	3.4	2.4	4.8
S3	0.48	0.86	1.11	2.228	1.9	3.8	2.63	5.26
S4	0.5	1	1.21	2.42	2	4	2.7	5.4
S5	0.5	1	1.22	2.44	2.1	4.2	2.9	5.8
S6	0.5	1	1.24	2.48	2.1	4.2	2.9	5.8
S7	0.39	0.78	1.07	2.14	1.85	3.7	2.6	5.2
S8	0.31	0.62	0.88	1.76	1.6	3.2	2.3	4.6
S9	0.2	0.39	0.62	1.232	1.21	2.48	1.8	3.6
S10	0.12	0.23	0.3	0.6	0.62	1.24	0.95	1.9
WA/2	m^2	2.0		11.0		19.0		23.6
W.A.	m^2	4.0		22.1		38.0		47.2

Con el cuadro No.1 terminado podemos proceder a su análisis. El cuadro No. 1 indica el espaciamiento "s" entre las cuadernas que es generalmente una constante (1 metro = 3,28 pies en este caso). También se indica el ingeniero a cargo o responsable y la fecha. Las áreas se calculan para cada línea de flotación (WL#1 a WL#4). Desde luego que dichas líneas de flotación deberán cubrir el rango estimado de operación del navío, es decir desde la quilla hasta la borda libre o cerca de ella. Un detalle importante es que en realidad se calculan solo las medias áreas puesto que el barco es simétrico con respecto a su eje longitudinal. Las áreas simplemente se calculan multiplicando luego por 2.

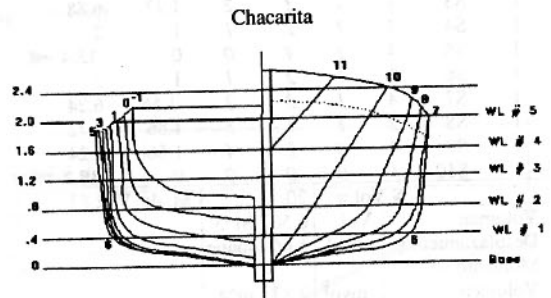


Figura 1. Diagrama de formas del barco pesquero Chacarita I. Las líneas horizontales son las líneas de flotación del diseño.

Del cuadro No. 1 se pasa luego a los cálculos de los volúmenes de desplazamiento, desplazamientos, momentos de volumen y posiciones longitudinales del centro de boyancia. Todos los cálculos se realizan automáticamente usando una hoja de cálculo (Excel 2.1 en este caso). Esto se hace para cada línea de flotación de forma similar. Aquí se discutirá solamente el cálculo para la línea de flotación No. 1 (cuadro No. 2). Los cuadros 3-5 se calculan de forma idéntica para cada línea de flotación.

El cuadro No. 2 muestra los cálculos para la línea de flotación # 1 (WL#1). Este cuadro tiene ocho columnas. La primera indica la línea de flotación, la segunda la estación (10 en total). La tercera columna indica el multiplicador de Simpson para integraciones numéricas, la cuarta indica el área. Este valor está ligado al valor correspondiente del cuadro No.1. Mediante "liga virtual" o "linking" que es una facilidad ofrecida por hojas de

Cuadro No. 2

Tabla de Cálculos Base para Curva de Toneladas y Calado contra la Posición del Centro de Boyancia Longitudinal

Barco: Chacarita		LPP = 10.00m		10/30/93			
Ing. L. M. Murillo B.							
Este método usa el integrador digital de D-CAD y transferencia manual para área Angulo = 0°							
Calado = 0.40m							
Espaciamientos 1.0m		Densidad					
1/3*s = 0.33m		1.0t/m ³					
De: DCAD				de DCAD			
W.L.#	ST#	SM	Area	f(A)	Brazo	Mo- mento	f(M)
1	S0	1	0	0	0	0	0
1	S1	4	0	1	4	0.752	3.008
1	S2	2	1	1	3	1.74	3.48
1	S3	4	1	3	2	1.72	6.88
1	S4	2	1	2	1	1	2
1	S5	4	1	4	0	0	15.4 ←
1	S6	2	1	2	1	1	2
1	S7	4	1	3	2	1.56	6.24
1	S8	2	1	1	3	1.86	3.72
1	S9	4	0	2	4	1.56	6.24
1	S10	1	0	0	0	0	18.2 ←
S.Vol =			20	M. de V 2.83			
Volumen	Vol	6.50	M ³				
Desplazamiento	displ	6.66	tonne				
Momento de Volumen	mvol	2.83	m ⁴				
C de B. ref. C.B.	CB-L	0.15	m				

en donde ds representa una distancia infinitesimal a lo largo de la línea de centros del barco. El desplazamiento se obtiene luego multiplicando por el peso específico del agua. El primer momento de áreas se calcula mediante la expresión

$$\mu = \int s * dt = \sum (sm_i * s_i * A_i) \tag{8}$$

El momento de las áreas es el producto del área por el brazo de palanca en múltiplos de s. La función de momentos para cada estación es el producto del momento por el multiplicador de Simpson para cada estación. Luego la posición del centro de boyancia respecto de la estación central se calcula según la ecuación

$$CB (s) = \frac{(\mu_d - \mu_i)}{\tau} \tag{9}$$

en donde los subíndices "d" y "i" del momento indican derecha e izquierda de la estación central del navío.

La figura No. 2 muestra el gráfico de desplazamiento contra el calado en centímetros que se construye con los cuadros correspondientes para cada línea de flotación (similares al cuadro No. 2, pero incluyendo las otras tres líneas de flotación). Los valores obtenidos del cálculo de volúmenes se interpolan y extrapolan usando polinomios de primero, segundo o tercer grado si es necesario, es decir, cuando hay mucha curvatura en el gráfico. Para hacer las regresiones necesarias y saber el grado de ajuste a la curva, se usan las funciones de la hoja de cálculo (En este caso Excel 2.1 y sus funciones SUM, PLOT y TREND por ejemplo).

Usando la figura No. 2 es posible medir directamente el desplazamiento del barco bajo condiciones de carga dadas. Solo se mide el calado, luego se lee de la figura No. 2 el tonelaje correspondiente. La posición vertical del centro de boyancia se puede calcular de forma aproximada usando la ecuación de Morrish

o sea

$$CB_v = \frac{1}{3} \left(\frac{C}{2} + \frac{\tau}{A_h} \right) \tag{8}$$

cálculo modernas como Excel o QPRO actualmente en el mercado internacional. Cualquier valor introducido en la hoja del cuadro No. 1 se transfiere a la hoja del cuadro No. 2 automáticamente.

La columna # 5 contiene la función de áreas f(A), que es el producto del multiplicador de Simpson para la estación i (sm_i) por el área de la estación i o sea A_i. La columna # 6 contiene el brazo de palanca o sea la distancia desde popa en múltiplos de s.

La columna # 7 contiene el primer momento del área respecto a popa y la columna # 8 contiene la función de los momentos para cada estación f(μ) es decir, el producto del multiplicador de Simpson por el momento del área.

El volumen sumergido (τ) bajo la primera línea de flotación del navío se calcula mediante la ecuación

$$\tau = \int A * ds = \sum (sm_i * A_i) \tag{7}$$

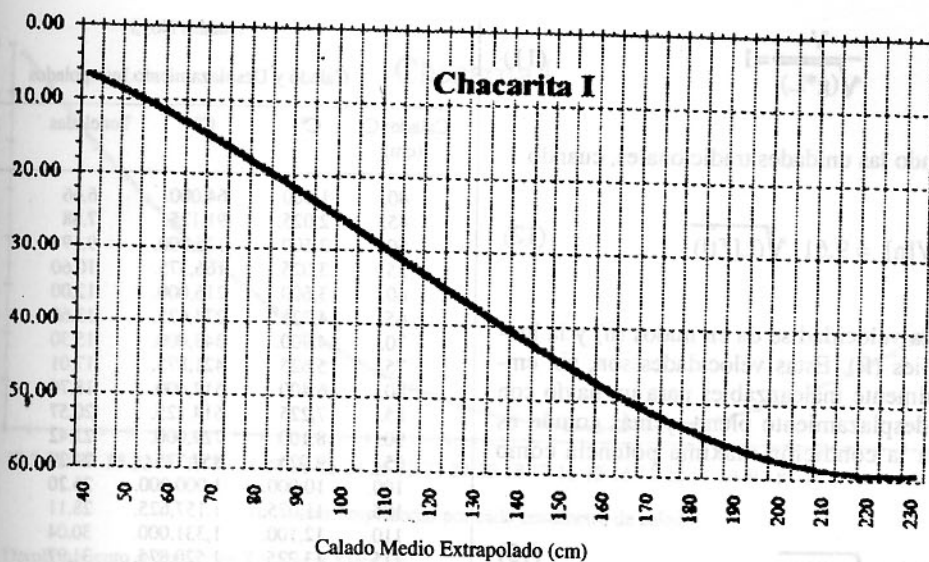


Figura 2. Desplazamiento vrs Calado

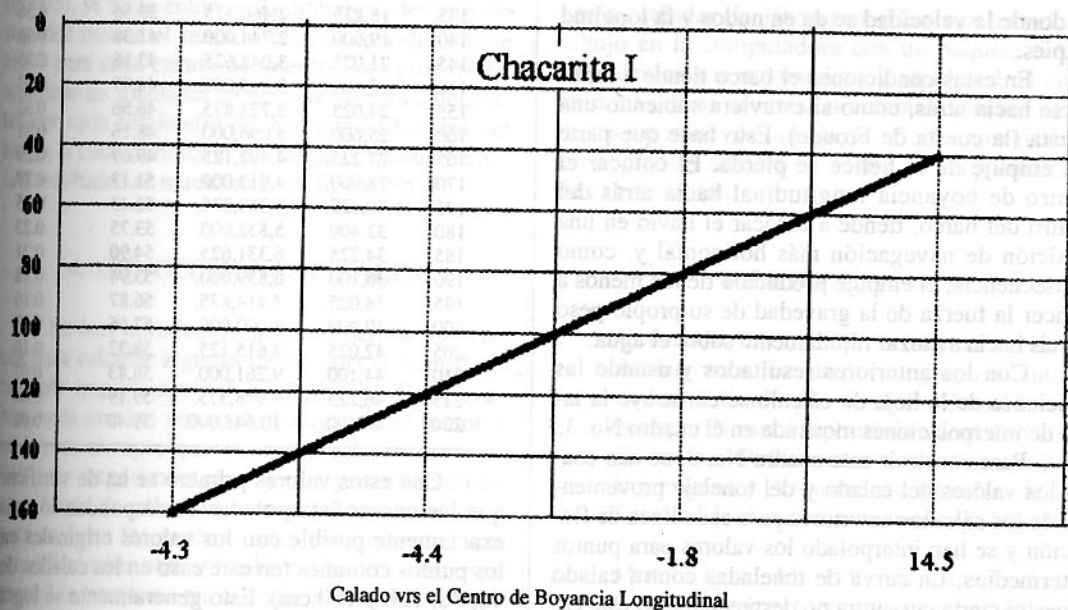


Figura 3. Posición del Centro de Boyancia Longitudinal desde el Centro del Navío

en donde C representa el calado, τ el volumen total sumergido y A_n el área del plano horizontal de flotación del barco. Estos cálculos se hacen rápidamente con las funciones de la hoja de cálculo.

La figura No. 3 muestra un gráfico del calado medio contra la posición del centro de boyancia

longitudinal. Esto permite estimar el comportamiento del casco en una determinada condición de carga y verificar su navegabilidad. Muchas veces se quiere inclinar el barco hacia adelante para mejorar su comportamiento hidrodinámico a altas velocidades, cercanas a la velocidad correspondiente unitaria, es decir cuando

$$\frac{V}{\sqrt{(g \cdot L)}} = 1 \quad (11)$$

o sea, usando las unidades tradicionales, cuando

$$V[n] = 9.61 \sqrt{(L[ft])} \quad (12)$$

en donde la velocidad se da en nudos (n) y la longitud en pies (ft). Estas velocidades son, sin embargo, realmente inalcanzables para un navío con casco de desplazamiento pleno, y más común es referirse a la condición máxima potencia como cuando

$$V[n] = 1.34 \sqrt{(L[ft])} \quad (13)$$

en donde la velocidad se da en nudos y la longitud en pies.

En estas condiciones el barco tiende a inclinarse hacia atrás, como si estuviera subiendo una cuesta (la cuesta de Froude). Esto hace que parte del empuje de la hélice se pierda. El colocar el centro de boyancia longitudinal hacia atrás del centro del barco, tiende a colocar el navío en una posición de navegación más horizontal y, como consecuencia, el empuje producido tiende menos a vencer la fuerza de la gravedad de su propio peso y más hacia avanzar rápidamente sobre el agua.

Con los anteriores resultados y usando las funciones de la hoja de cálculo se construye la tabla de interpolaciones mostrada en el cuadro No. 3.

Para construir este cuadro No. 3, se han usado los valores del calado y del tonelaje provenientes de los cálculos anteriores para cada línea de flotación y se han interpolado los valores para puntos intermedios. La curva de toneladas contra calado muestra cierta curvatura no despreciable en este caso y, en consecuencia, para calcular las diferencias de tonelaje para cada centímetro adicional de inmersión, que van en la curva de TPC, se requieren interpolaciones con polinomios de segundo o tercer grado. Esto se logra regresionando el calado, el calado cuadrado y el calado cubicado contra el desplazamiento. Todo se hace para los valores principales e intermedios, o sea, aquellos valores producto de la interpolación. Para lo anterior se usan las funciones intrínsecas de la hoja de cálculo.

Cuadro No. 3

Calado y Desplazamiento Interpolados

Calado: C (cm)	C°	C°	Toneladas	tp5c/5
40.	1,600.	64,000.	6.66	0.24
45.	2,025.	91,125.	7.88	0.26
50.	2,500.	125,000.	9.19	0.28
55.	3,025.	166,375.	10.60	0.30
60.	3,600.	216,000.	12.00	0.31
65.	4,225.	274,625.	13.66	0.33
70.	4,900.	343,000.	15.30	0.34
75.	5,625.	421,875.	17.01	0.35
80.	6,400.	512,000.	18.76	0.36
85.	7,225.	614,125.	20.57	0.37
90.	8,100.	729,000.	22.42	0.38
95.	9,025.	857,375.	24.29	0.38
100.	10,000.	1,000,000.	26.20	0.38
105.	11,025.	1,157,625.	28.11	0.39
110.	12,100.	1,331,000.	30.04	0.39
115.	13,225.	1,520,875.	31.97	0.38
120.	14,400.	1,728,000.	33.90	0.38
125.	15,625.	1,953,125.	35.81	0.38
130.	16,900.	2,197,000.	37.70	0.37.
135.	18,225.	2,460,375.	39.56	0.36
140.	19,600.	2,744,000.	41.38	0.36
145.	21,025.	3,048,625.	43.16	0.35
150.	22,500.	3,375,000.	44.89	0.33
155.	24,025.	3,723,875.	46.56	0.32
160.	25,600.	4,096,000.	48.16	0.31
165.	27,225.	4,492,125.	49.69	0.29
170.	28,900.	4,913,000.	51.13	0.27
175.	30,625.	5,359,375.	52.49	0.25
180.	32,400.	5,832,000.	53.75	0.23
185.	34,225.	6,331,625.	54.90	0.21
190.	36,100.	6,859,000.	55.94	0.18
195.	38,025.	7,414,875.	56.87	0.16
200.	40,000.	8,000,000.	57.66	0.13
205.	42,025.	8,615,125.	58.32	0.10
210.	44,100.	9,261,000.	58.83	0.07
215.	46,225.	9,938,375.	59.19	0.04
220.	48,400.	10,648,000.	59.40	0.01

Con estos valores primero se ha de verificar que las curvas interpoladas correspondan lo más exactamente posible con los valores originales en los puntos comunes (en este caso en los calados de 40, 80, 120 y 160 cm). Esto generalmente se logra con un polinomio de tercer grado, pero siempre se puede elevar o disminuir el grado del polinomio de regresión escogido, hasta que el ajuste sea óptimo. En el ejemplo Chacarita I se nota acuerdo en todos los puntos comunes a dos cifras significativas. Esto es suficientemente bueno como para proceder a sacar las diferencias.

Los valores interpolados se calculan cada 5 centímetros en este ejemplo. Para calcular la columna de las diferencias para cada centímetro

Chacarita I

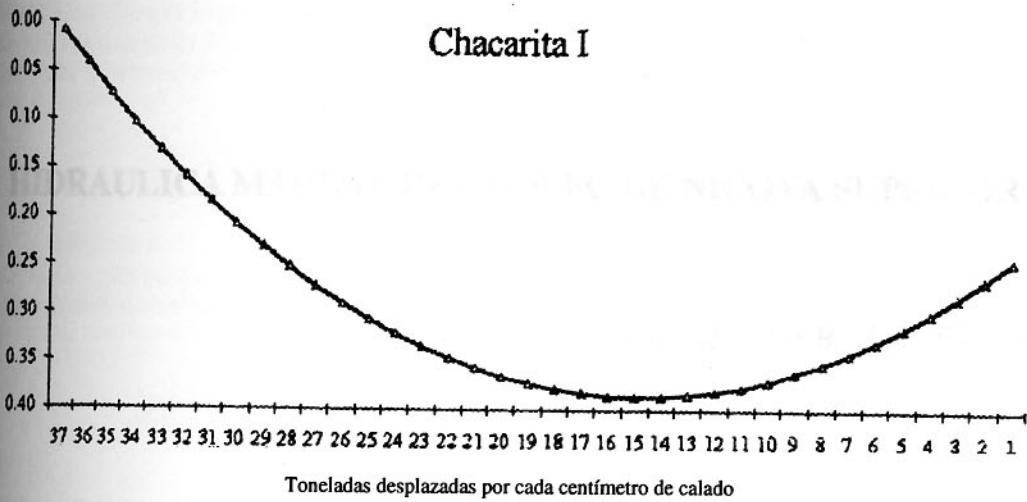


Figura 4. Desplazamiento del navío en Toneladas Métricas.

(tp5c/5), se toma entonces la diferencia del renglón superior menos el renglón inferior, dividido entre cinco para cada calado de interés. Esto produce finalmente las toneladas de desplazamiento adicionales por cada centímetro de inmersión adicional del navío, a cada condición de carga desplazamiento. Los resultados se muestran en la figura No. 4

4. CONCLUSIONES FINALES

Se han introducido procedimientos numéricos para calcular algunas de las curvas hidrostáticas más importantes del diseño naval. Estas evaluaciones pueden servir para asignarle el motor a un barco, siempre que se tengan referencias confiables y experimentadas. Estos procedimientos usan hojas de cálculo y computadores modernos para realizar las evaluaciones rápidamente. Los procedimientos son aplicables a barcos de pesca pequeños comunes en la costa pacífica de Costa Rica. Generalmente se requieren unas cuatro líneas de flotación, espaciadas unos 40 cm para un

barco estándar de 10 metros. Una vez trazado el dibujo en la computadora con un paquete CAD, los cálculos son automáticos y rápidos. Los ajustes a las curvas se realizan automáticamente usando las funciones de la hoja de cálculo para establecer el grado y número de puntos de los polinomios de extrapolación.

BIBLIOGRAFIA

1. Comstock, J. P., 1967. *Principles of Naval Architecture*. Escrito por un grupo de autoridades. Editado por John P. Comstock de Newport News Shipbuilding and Drydock Company. Publicación de la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Navales de los Estados Unidos de Norteamérica (SNAME).
2. Murillo B., L. M., 1991. *El Cálculo de las Curvas Hidrostáticas para los Navíos Nacionales*. Ingeniería 1 (2): 53-63, Universidad de Costa Rica.