

Algoritmo Numérico Alternativo para el cálculo de Esloras Inundables de un artefacto Naval utilizando el método Shirokahuer

José Carlos Villagómez Rosales
Asociación Peruana de Estudiantes de Ingeniería Naval
Escuela Profesional de Ingeniería Naval
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Nacional de Ingeniería
Lima-Perú

Email: pepevillagomez@yahoo.es
Telf: 364-8257 / Celular: 98922484

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el diseño y la implementación de un algoritmo numérico para calcular las esloras inundables de un artefacto naval empleando el Método Shirokahuer. Se presenta una variación del método de iteraciones sucesivas tradicional que permite controlar con mayor eficiencia las variables y condiciones del método encontrando una solución más exacta del valor de la eslora inundable buscada. Se presentan también los resultados numéricos de la implementación del algoritmo a un buque tipo mercante de 134m de eslora. El punto de partida es la geometría del artefacto naval sobre el cual se realizan todos los cálculos numéricos y la incógnita buscada es la magnitud de la eslora inundada en una flotación crítica del artefacto naval.

Algoritmo Numérico Alternativo para el cálculo de Esloras Inundables de un artefacto Naval utilizando el método Shirokahuer

INTRODUCCIÓN

En Ingeniería Naval es de suma importancia el estudio y análisis del compartimentaje de un artefacto naval cuneado éste ha sufrido una avería que involucre pérdida de flotabilidad y riesgo de hundimiento, con el objetivo de salvaguardar la carga embarcada, aún más si se trata de vidas humanas.

Los principales peligros para los barcos durante la navegación consisten en la colisión con otro barco o las varadas. La importancia de la subdivisión del casco es notoria, puesto que evita, o trata de evitar, la pérdida del barco por cualquiera de los accidentes antes dichos.

Es evidente que si, los mamparos transversales son suficientemente resistentes para poder estar sometidos a la presión del agua que pueda actuar sobre ellos, cuando uno de los compartimentos adyacentes está en comunicación con el mar, la cantidad de agua que puede entrar en el barco estará limitada por el tamaño del compartimiento inundado.

Sin embargo, si la avería da lugar a que uno de dichos mamparos quede inutilizado, la cantidad de agua que podrá penetrar se extenderá a dos compartimentos adyacentes, pero limitada a la capacidad de ambos. Por lo tanto, la seguridad de un barco ante la posibilidad de una avería de la importancia de la clase citada depende de que esté proyectado para que pueda permanecer a flote con uno o dos compartimentos adyacentes cualesquiera inundados, o con un mayor número de compartimentos, si resultan afectados por la avería más de un mamparo estanco.

Los primeros pasos en la evolución en el estudio sistemático de esta importante área de la Ingeniería Naval se remontan a Inglaterra a mediados del siglo XIX. Con el fin de las guerras napoleónicas se produce un aumento de tráfico marítimo, lo que intensificó la pérdida de buques y vidas humanas provocando preocupación por las consecuencias morales y económicas que esto podría producir.

En 1836, se reúne un comité parlamentario británico para analizar las causas de las mismas criticando severamente las condiciones de construcción y navegación de ese entonces. El comité propuso la creación del departamento de Marina (Marine Board) siendo gran parte de sus disposiciones y reglamentaciones recogidas en la ley de marina mercante de la legislación británica en 1854. Ya en esta ley, se obliga a los buques de más de 100 toneladas de arqueo a que estuviesen divididos en mamparos, de los que debía haber uno en cada extremo de las cámaras de máquinas, independientemente de otro en la parte de popa y el de colisión.

Otro importante aporte del “Board of Trade” a través del “Comité de 1890” fueron las recomendaciones sobre la forma en que los buques debían ser subdivididos para que pudiesen flotar en caso de avería en tiempos relativamente buenos, con dos compartimentos con comunicación al mar. Éste comité recomendaba que las esloras inundables en cualquier punto debían dar la longitud máxima de dos compartimentos adyacentes, teniendo su sección transversal media en el punto considerado, obteniéndose – en este comité – la curva de esloras inundables, no por cálculo sino mediante un modelo a escala.

En la Conferencia internacional de 1914, se aprueba el método empírico para el cálculo de esloras inundables propuesto por el profesor WELCH, presidente del comité británico desde 1912 a 1915.

Posteriormente, en el Convenio internacional para la seguridad en la vida humana en el mar de 1929 se considera para el cálculo de esloras inundables seguir un método directo o bien emplear un método aproximado aceptado internacionalmente.

Entre los métodos directos para el cálculo de esloras inundables se hace una distinción entre los métodos gráficos, como el de Shirokahuer, y métodos matemáticos como los de ABBEL e IKUSHIMA.

En la actualidad para este análisis se ha generalizado y ha sido ampliamente difundido el empleo del Método Shirokahuer. En este trabajo se presenta un algoritmo alternativo para el cálculo de esloras inundables utilizando el método Shirokahuer, describiéndose detalladamente las bases teórico matemáticas para su implementación y aplicación. En segundo lugar, se muestran resultados numéricos obtenidos de la implementación del modelo numérico de esloras inundables para una embarcación tipo buque mercante de 150m de eslora y 22m de manga.

ALGORITMO NUMERICO PROPUESTO

El modelo de solución numérica parte de las condiciones iniciales del problema planteado: encontrar la eslora inundable, es decir, la ubicación de los límites longitudinales del compartimiento inundado de volumen conocido 'v' y centro de gravedad conocido 'X_w' que produce una determinada flotación crítica.

Por lo tanto, los datos iniciales para la solución están dados por:

1. La forma de la embarcación. Este dato se obtiene básicamente de la Tabla de Puntos de la embarcación que permite determinar – a manera de coordenadas – la superficie del casco que queremos analizar.
2. El volumen del compartimiento inundado 'v'. Este volumen es hallado por diferencia de desplazamientos entre el artefacto naval luego de la inundación, es decir, en la flotación crítica y su desplazamiento inicial.

$$\Delta_{compartimiento} = \Delta_{inund} - \Delta_{inicial}$$

3. La posición del centro de gravedad G del compartimiento inundado definida por la distancia X_w a la sección media del artefacto naval que es obtenida despejando ésta de la ecuación de equilibrio de momentos estáticos.

$$X_w = \frac{X_{inund} \cdot \Delta_{inund} - X_{inicial} \cdot \Delta_{inicial}}{\Delta_{compartimiento}}$$

Donde:

- X_{inund} y Δ_{inund}: Centro de gravedad con respecto a la sección media y desplazamiento en condición de inundación.
X_{inicial}. Δ_{inicial}: Centro de gravedad con respecto a la sección media y desplazamiento en condición inicial.
X_w : Posición del centro de gravedad del compartimiento inundado con respecto a la sección media
Δ_{compartimiento} : Desplazamiento del compartimiento inundado.

4. La flotación crítica de inundación a la que haremos el análisis: Se determina en base al puntal, la línea de subdivisión y la línea margen de la embarcación de acuerdo al procedimiento de *Shirokahuer*.

$$H = 1.6D - 1.5T$$

Donde:

- H:** Parámetro del método Shirokahuer necesario para definir la geometría de la inundación.
D: Definida por la distancia de la línea base a la línea margen.
T: Línea de subdivisión.

La flotación de inundación define la curva de áreas respectiva. Ésta muestra en el eje de ordenadas el valor numérico del área de la sección transversal de la embarcación por debajo de la flotación analizada y en el eje de las abscisas se representa la eslora del buque.

De este modo, la integral de la función de áreas, o equivalentemente el área bajo la curva de áreas desde un límite inferior 'a' situado hacia popa del artefacto naval hasta un límite superior 'b' situado a proa representará el valor numérico del volumen moldeado de un compartimiento de banda a banda limitado físicamente por dos mamparos estancos teóricos colocados en 'a' y 'b' respectivamente. Luego, conocida la posición del centro de gravedad G del compartimiento inundado con respecto a la sección media (X_w) es posible ubicarla longitudinalmente en la gráfica de curva de áreas.

Para encontrar el valor numérico de la eslora inundable es preciso encontrar justamente los límites 'a' y 'b' que cumplan las siguientes condiciones:

- *Condición de volumen fijo:* El volumen, o lo que es equivalente, el área bajo la curva debe ser igual numéricamente al valor del volumen del compartimiento inundado 'v' que es un dato inicial.
- *Condición de centro de gravedad fijo:* La abscisa del centro de gravedad G del compartimiento inundado debe coincidir con la abscisa del centro geométrico del área bajo la curva.

Se mostrará el procedimiento para el análisis de cada una de éstas restricciones por separado, relacionándolas posteriormente para encontrar la solución final.

CONDICION DE VOLUMEN FIJO

Como ya se ha mencionado, el volumen es equivalente al área bajo la curva. Esta relación nos permite manipular las áreas para controlar el volumen del compartimiento.

Sea un compartimiento hipotético limitado longitudinalmente por 'a' y 'b' distanciados dV_x y dV_y a la abscisa X_w respectivamente.

Deberá cumplirse la siguiente relación:

$$A_1 + A_2 = v$$

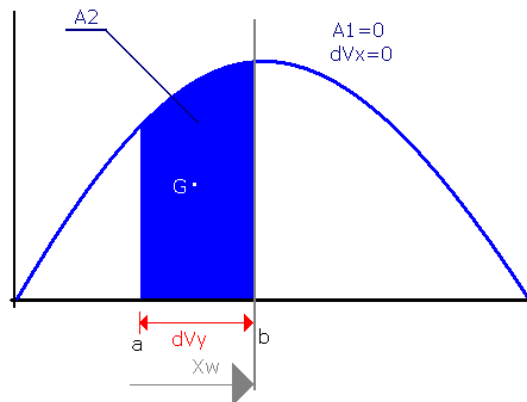
En donde:

A_1 : Valor numérico del área bajo la curva de áreas para una flotación crítica desde la abscisa X_w hasta 'a'.

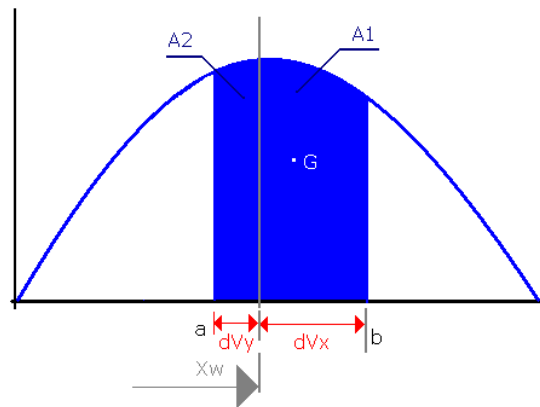
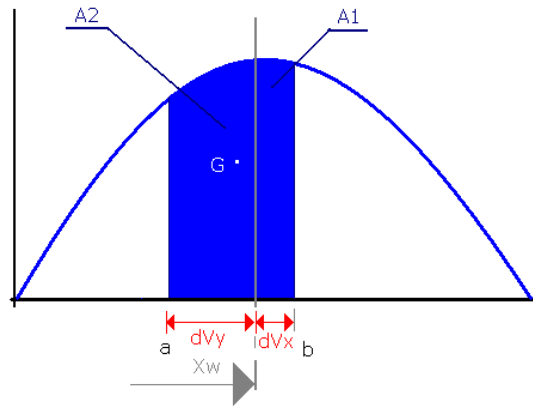
A_2 : Valor numérico del área bajo la curva de áreas para una flotación crítica desde la abscisa X_w hasta 'b'.

v : Valor numérico del volumen del compartimiento inundado.

El algoritmo genera un compartimiento inicial de volumen 'v' cuyo limite delantero situado en 'a' coincide con la posición del centro de gravedad G del compartimiento buscado (ver figura). Para este caso particular se debe verificar que $A_1=0$ y $A_2=v$. Obviamente, el centro de gravedad 'G' de este compartimiento inicial de prueba no coincidirá con G . Se registran las magnitudes de las distancias dV_{x1} (en este caso es cero) y dV_{y1} .



El paso siguiente es desplazar la pared delantera una distancia dVx_2 a partir de la abscisa X_w . (Fig 1b). Con dVx_2 definido, el algoritmo calcula el área A_1 . Así, es posible hallar el valor de A_2 . Conocido A_2 el modelo calcula por integraciones sucesivas el valor de dVy_2 . Luego, se incrementa a un valor dVx_3 y repitiendo el procedimiento se consigue el valor de dVy_3 .



Para cada valor de dVx se encuentra un único valor de dVy . Progresivamente se incrementa el valor de dVx y mediante la rutina explicada se van consiguiendo los valores de dVy respectivos, ordenándolos en la tabla siguiente.

| | |
|---------|---------|
| dVx_1 | dVy_1 |
| dVx_2 | dVy_2 |
| ... | ... |
| dVx_n | dVy_n |

Puede apreciarse en la figura que ha medida que el valor de dV_x aumenta dV_y disminuye. Esto puede entenderse gráficamente como que si el volumen “flotara” de izquierda a derecha. Este volumen constante se desplaza por la curva de áreas variando su forma pero no su magnitud, definiendo además sus límites longitudinales. De aquí se desprende que la longitud de este compartimiento flotante para esta condición estará dada por:

$$L = dV_x + dV_y$$

En el análisis de esta condición no nos ocupamos del centro de gravedad del compartimiento generado que obviamente cambiará de posición a medida que el volumen se desplaza hacia la derecha del gráfico.

La restricción de volumen fijo nos deja únicamente como objetivo verificar la segunda condición del problema, es decir, que el punto G sea efectivamente el centro de gravedad del compartimiento inundado.

CONDICION DE CENTRO DE GRAVEDAD FIJO

Por definición matemática el centro de gravedad de cualquier cuerpo es el punto en el cual los momentos estáticos de primer orden en todo el cuerpo se anulan. Es decir:

$$\Sigma M_G = 0$$

En nuestro caso, esta restricción matemática nos lleva a pensar que si tenemos un compartimiento hipotético como el mostrado en la figura limitado longitudinalmente por ‘a’ y ‘b’ a una distancia dM_x y dM_y de la abscisa X_w respectivamente, para que el punto G sea efectivamente la abscisa del centro de gravedad del volumen entre ‘a’ y ‘b’ deberá cumplirse la siguiente relación.

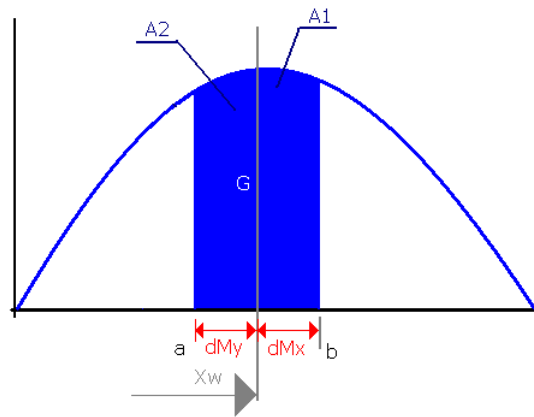
$$M_{A1} = M_{A2}$$

En donde:

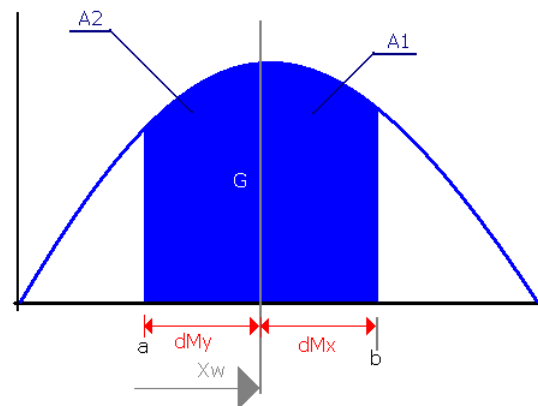
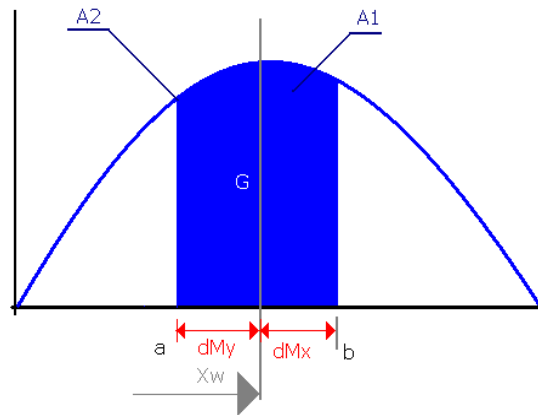
M_{A1} : Valor numérico del momento estático de primer orden del área A1 con respecto a G.

M_{A2} : Valor numérico del momento estático de primer orden del área A2 con respecto a G.

El modelo genera inicialmente con una distancia de dMx_1 un área $A1$ cuyo momento estático de primer orden respecto a G es $MA1$. Conocido este valor, el algoritmo calcula la distancia dMy_1 que produzca un área $A2$ cuyo momento de inercia $MA2$ sea igual – según la expresión $x - a$ – a $MA1$. Se registran los valores numéricos de éstas variables.



Luego, se hace un incremento del límite a a una distancia dMx_2 , obteniéndose los respectivos nuevos valores de $MA2$ y dMy_2 . Se repite el procedimiento incrementando progresivamente la variable dMx y obteniendo los valores respectivos de dMy .



Los resultados de dMx y dMy son ordenados de la siguiente forma:

| | |
|---------|---------|
| dMx_1 | dMy_1 |
| dMx_2 | dMy_2 |
| ... | ... |
| dMx_n | dMy_n |

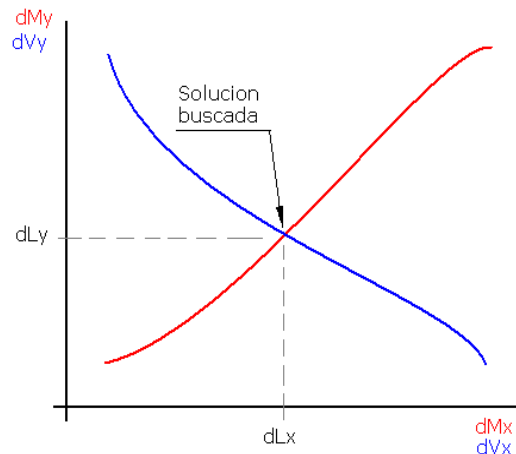
A diferencia del casco anterior, es lógico pensar que los valores de dMy van incrementándose a medida que se incrementan los valores de dMx también. Esto se debe a que los valores de momentos estáticos de primer orden $MA1$ van aumentando y el área reflejada $A2$ deberá ser mayor también para compensar el aumento del momento estático. Esto puede observarse gráficamente como si el compartimento hipotético fuera “expandiéndose” longitudinalmente conservando invariable la posición de su centro de gravedad. De aquí se desprende que la longitud de este compartimento ‘expandido’ para esta condición será dada por:

$$L = dMx + dMy$$

En el análisis de esta condición no se toma en cuenta el volumen que toma el compartimento – que obviamente va aumentando – sino que conserve su centro de gravedad estático.

En el estudio realizado hasta ahora se ha analizado cada una de las condiciones por separado. Ahora se mostrará cómo relacionarlas para llegar a la solución final. Las tablas que resultaron de analizar cada condición deben considerarse respuestas parciales del problema. Sin embargo, la eslora inundable buscada es aquella que cumple las dos condiciones mencionadas.

Es posible graficar, tomando como datos iniciales los datos obtenidos en las tablas en el eje de abscisas los valores de dVx y dMx y en el eje de las ordenadas los valores correspondientes de dVy y dMy cada uno de estos.



Es decir, obtendremos dos curvas en una misma gráfica. La primera curva es dVy en función de dVx y representa la relación que deben tener estas dos variables – que son las distancias a los extremos del compartimento inundado a proa y popa respectivamente- para cumplir la condición de volumen fijo constante. La segunda curva es dMy en función de dMx y muestra la relación que deben tener estas dos variables para que su centro de gravedad se ubique precisamente en G.

En la intersección de ambas curvas se encuentra el valor de dLx que cumple con ambas condiciones. El paso siguiente es hallar el valor de dLy que corresponde a la intersección. Como se había mencionado antes, el valor de la eslora inundable buscada será:

$$L = dLx + dLy$$

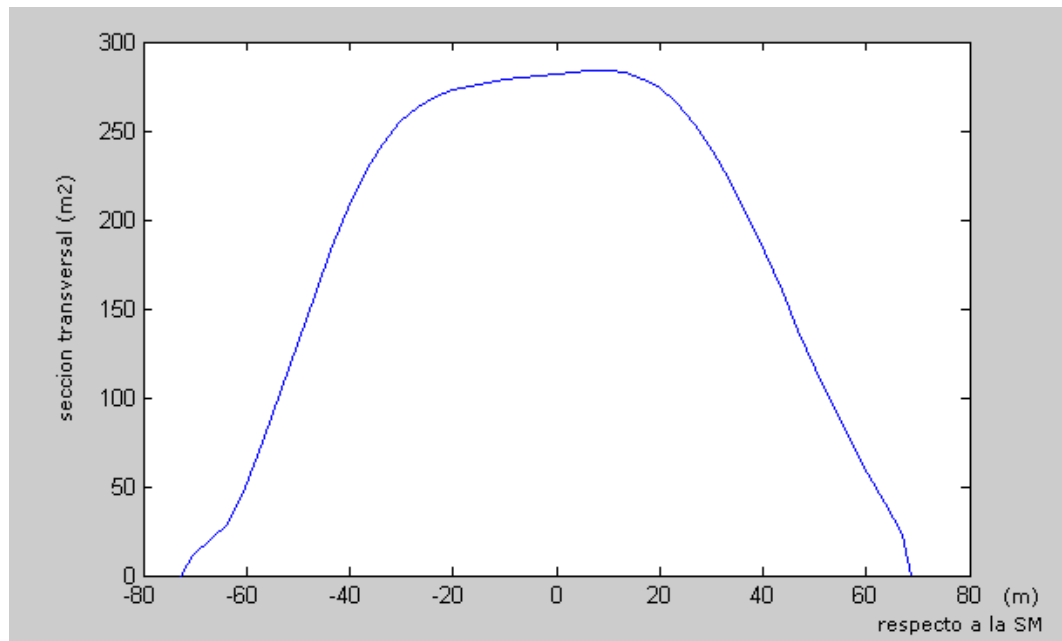
Donde dLx y dLy son las longitudes hasta los extremos del compartimento inundado a proa y popa del artefacto naval respectivamente relativos al centro de gravedad del mismo; y L es la magnitud de la eslora inundable buscada.

RESULTADOS

El algoritmo se implementó y aplicó a un buque mercante de las siguientes características.

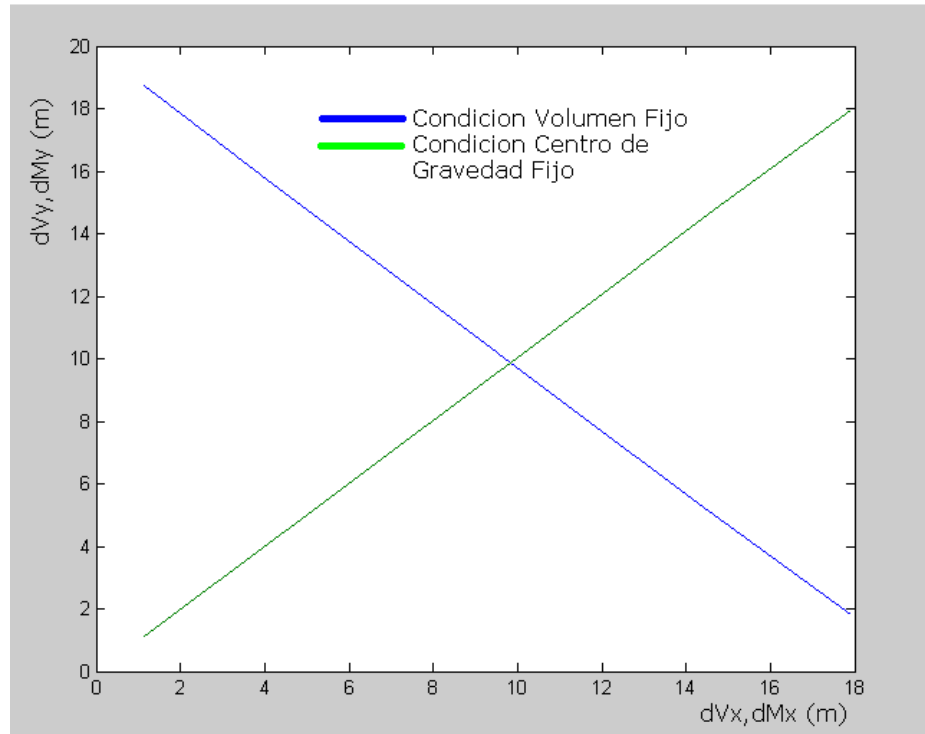
| | |
|---|----------------|
| <i>Eslora</i> | 126m |
| <i>Manga</i> | 22,8m |
| <i>Puntal</i> | 17m |
| <i>Línea de subdivisión</i> | 10.1m |
| <i>Calado de inundación a proa</i> | 11.342m |
| <i>Calado de inundación a popa</i> | 13.492m |

Para estas dimensiones y características de la embarcación podemos calcular los desplazamientos antes y después de la inundación. El desplazamiento inicial se obtiene a partir de las curvas hidrostáticas de la embarcación para el calado de subdivisión obteniendo el valor de 21 000 Ton, mientras que el desplazamiento después de la inundación se puede calcular a partir de las curvas de Bon Jean con los calados de inundación a proa y popa de la embarcación obteniéndose de este modo la curva de áreas para esta flotación crítica (figura) cuya integración total es equivalente al valor del desplazamiento después de la inundación 26 560 Ton.



Así, el valor numérico del compartimento inundado 'v' se obtiene reemplazando la expresión (1) los valores numéricos de los desplazamientos resultando $v=5556,8 \text{ m}^3$. A su vez empleando la expresión (2) obtenemos la distancia de la sección media al centro de gravedad del compartimento inundado X_w igual a 2,20m.

La figura siguiente muestra la gráfica que relaciona los espaciamientos longitudinales (dx en el eje de abscisas y dy en el eje de las ordenadas) que cumplen por separado la condición de volumen fijo y la condición de centro de gravedad fijo.



Cada punto de las curvas representadas cumple una condición. Es lógico entonces inferir que la solución buscada será su intersección. Para el buque y la inundación analizada encontramos los valores correspondientes a la intersección de $dLx = 9,8m$ y $dLy = 9,88m$. Por lo que, utilizando la expresión (x) la eslora inundable buscada será:

$$L = 9,8 + 9,88 = 19,68 m$$

CONCLUSIONES

Se ha logrado implementar un algoritmo alternativo utilizando el método Shirokahuer para el cálculo de esloras inundables de una embarcación. A diferencia del procedimiento usual de iteraciones sucesivas, este algoritmo utiliza un ‘barrido’ de todas las posibles soluciones analizando cada una de las dos restricciones desarrolladas, para finalmente encontrar la solución general interceptando gráficamente las dos curvas de soluciones parciales, hallando así la eslora inundable buscada.

La principal diferencia con el método de iteraciones sucesivas, es el control de cada una de las dos condiciones planteadas independientemente una de la otra. En la medida que se asegure la exactitud de cada uno de estos análisis independientes, se garantizará la exactitud del resultado final.

Del algoritmo descrito pueden desprenderse a su vez otros procedimientos para obtener las esloras inundables, sin embargo, se requerirá hacer análisis similares al desarrollado en el presente trabajo. Es posible realizar un ‘barrido parcial’ modificando las variables para cumplir una condición y consecutivamente evaluarlas hasta cumplir la otra y viceversa.

A nivel local, los estudios en compartimentación de naves y esloras inundables no son difundidos, perdiendo de esta manera una herramienta importante de diseño y arquitectura naval para optimizar, en futuros proyectos, las condiciones de seguridad de la embarcación y sus espacios útiles de acuerdo al tipo de servicio para el cual son fabricadas. Este trabajo intenta contribuir en la línea de la implementación tecnológica gradual y el desarrollo de tecnología propia en el ámbito naval, en miras a aportar con el avance científico y el desarrollo del Perú.

REFERENCIAS

- [1] Edward Lewis, “Architecture and Naval Design”, 1996 SNAME Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [2] Javier Gonzalez, “Teoría del buque”, 1980 Universidad Politécnica de Madrid. Tomo I.
- [3] Godino Gil, Teoría del buque y sus aplicaciones.