

Modelo de cálculos estructurales para un
modelo de síntesis para optimización de
diseños conceptuales de embarcaciones de alta
velocidad en materiales compuestos

José Felipe Morales Arciniegas

21 de abril de 2008

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Justificación	9
1.2. Objetivos	10
1.2.1. Objetivo General	10
1.2.2. Objetivos Específicos	10
1.3. Estado del arte	11
1.3.1. Sociedades de clasificación	11
1.3.2. Cálculos estructurales	13
1.3.3. Materiales de fabricación	16
1.4. Situación bajo estudio	18
2. El modelo de Hubble	20
3. Componentes estructurales	27
3.1. Casco	27
3.2. Mamparos	28
3.3. Cubiertas	29
3.4. Refuerzos	30

4. Parametrización y Dimensionamiento del bote objetivo	31
5. Cálculo de Peso y Centro de Gravedad de los Componentes	
Estructurales	35
5.1. Mamparos	36
5.2. Casco (Fondo)	40
5.3. Casco (Costados)	43
5.4. Cubiertas	45
5.5. Refuerzos	47
6. Implementación del Modelo	50
6.1. Modelo de Optimización	50
6.2. Modelo de Síntesis	53
6.3. Modelo de cálculos estructurales	54
6.3.1. Estructura del código	55
6.3.2. Funciones de los componentes	61
6.3.3. Funciones auxiliares	65
7. Metodología de Ajuste y Validación del Modelo	69
7.1. Metodología de ajuste	70
7.2. Ajuste del modelo	72
7.2.1. Aplicabilidad de la norma	72
7.2.2. Cálculo de la presión de diseño	74
8. Conclusiones y Recomendaciones	79
A. Glosario	83

B. Manual de Usuario	86
B.1. Archivos del modelo	86
B.2. Configuración del modelo	86
B.3. Operación del modelo	89
C. Notación	91

Índice de figuras

2.1. Casco típico en el modelo de Hubble	21
2.2. Sección típica en el modelo de Hubble	22
2.3. Compartimentación típica en el modelo de Hubble	23
3.1. Esquema del bote.	30
4.1. Parametrización del bote.	34
5.1. Mamparo Transversal.	38
5.2. Mamparo Longitudinal.	38
5.3. Casco en el fondo del bote.	40
5.4. Area de la cubierta.	46
6.1. Modelo de Optimización	51
6.2. Modelo de síntesis.	53
6.3. Diagrama de actividad del modelo.	67
6.4. Variables de forma	68
7.1. Unidades de Peso	71
7.2. Botes de alta velocidad	73
7.3. Proporción de Pesos	76

Índice de cuadros

6.1. Matriz de componentes estructurales.	61
6.2. Funciones de cálculo de componentes	62
7.1. Valores Iniciales del Modelo	77
7.2. Rangos de las variables de entrada del modelo.	78
7.3. Individuos de validación.	78
B.1. Archivos del modelo de cálculos estructurales	88

Capítulo 1

Introducción

De la misma manera en la que en el desarrollo de un proyecto de software la ingeniería de requerimientos cumple un papel esencial para la correcta ejecución y la posterior satisfacción del cliente, en los proyectos de diseño es indispensable analizar las necesidades actuales del cliente para poder llegar a un producto que sea de su entera satisfacción, superando incluso aquellas situaciones en las que el mismo cliente o el grupo de usuarios objetivo de dicho diseño no tienen una idea clara de lo que desean, o tienen necesidades, restricciones u objetivos en conflicto.

En este tipo de situaciones, entran a jugar vital importancia metodologías como el *QFD–Quality Factor Deployment* y el *AHP–Analytical Hierarchical Process*[2].

Cuando a estos procedimientos se suma la optimización de las opciones factibles de diseño, de manera que no se busque simplemente una opción que satisfaga al cliente, sino además la que mejor lo haga y con el menor costo posible, se requiere de la creación de un modelo de análisis mas robusto que

incluya:

- La validación de la factibilidad de las variables de diseño, mediante el uso de un modelo de síntesis.
- La evaluación de aquellos diseños factibles contra las necesidades del cliente, mediante un modelo de efectividad.
- La evaluación de los costos de cada diseño, por un modelo de costeo.
- El enfrentamiento de la efectividad contra los costos de diseño y el riesgo resultante de las decisiones de diseño, formando una frontera de Pareto, la cual sirva a su vez para la ejecución cíclica del modelo durante la etapa de optimización.

Eso genera un grupo definido de diseños que constituyen los óptimos tanto en costos como en la satisfacción del cliente.

Dentro de este gran modelo, es indispensable que las opciones generadas para diseño, cumplan con las restricciones impuestas tanto por los fenómenos físicos de la operación del producto, como con las restricciones de factibilidad en la producción e inclusive las restricciones impuestas por la interface hombre máquina, es decir aquellas en las que incurre el producto por ser operado por personas.

Para el caso particular de una embarcación rápida, el diseño de la estructura juega un papel muy importante en el desempeño final del vehículo, y por ende una buena aproximación y un dimensionamiento inicial adecuado son indispensables para la estimación de la idoneidad operativa de un diseño[8].

En este sentido, el modelo o conjunto de modelos que conformen el modelo de síntesis que va a validar la factibilidad deben incluir un modelo de cálculos

estructurales que permita, aún con pocas variables de entrada, estimar el centro de gravedad y el peso de la estructura principal del bote, siendo estas dos variables indispensables para el cálculo de las condiciones de estabilidad estática y dinámica de la embarcación.

1.1. Justificación

Los cálculos estructurales son indispensables para que un ingeniero naval pueda asegurar que un bote diseñado cumple con condiciones específicas de seguridad y estabilidad. Estas condiciones llegan hasta el punto de ser reglamentadas y exigidas por las casas clasificadoras de buques, y su cumplimiento es un requisito imprescindible para la clasificación o aprobación del diseño por parte de dichos entes regulatorios. La clasificación de un buque no es imprescindible, sin embargo es común que forme parte o sea un requerimiento contractual tanto para la construcción como para la contratación de servicios que involucren buques o estructuras flotantes.

Dada la necesidad de una optimización de las variables de diseño de un buque durante la fase conceptual, se requiere de una herramienta capaz de realizar cálculos de peso y de centro de gravedad sin poseer información detallada sobre la estructura en cuestión. Para esto es necesario desarrollar un modelo simple y general que realice los cálculos anteriormente mencionados.

El modelo a desarrollar, formará parte del modelo de síntesis desarrollado para el proyecto “*Exploración de conceptos y optimización para un bote de alta velocidad*”, desarrollado entre la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de La Industria Naval, Marítima y Fluvial, COTECMAR

y la Universidad Nacional de Colombia.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Crear un modelo de cálculos estructurales para un modelo de síntesis de embarcaciones de alta velocidad en materiales compuestos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir los componentes principales que conforman la estructura de un bote rápido en materiales compuestos.
- Definir, formular y parametrizar las dimensiones de la estructura de un bote de alta velocidad en materiales compuestos.
- Formular la estimación de peso de los componentes estructurales del bote, a partir de los parámetros de diseño.
- Parametrizar y ubicar los componentes estructurales del bote dentro de la embarcación y formular el cálculo del centro de gravedad de la estructura resultante.
- Definir parámetros dentro de la formulación e implementar herramientas para su modificación, para permitir el ajuste del modelo a el contexto de diseño encontrado.

- Implementar el modelo desarrollado de manera que pueda ser integrado dentro de un modelo de síntesis para la totalidad de variables que intervienen en el diseño conceptual de una embarcación de alta velocidad en materiales compuestos.
- Definir el dominio de operación del modelo, dentro del cual se cuenta con la confiabilidad de los resultados.
- Validar los resultados arrojados por el modelo frente a embarcaciones existentes para comprobar su precisión dentro del margen de error especificado para la fase de diseño conceptual.
- Documentar el funcionamiento del modelo de cálculos estructurales en el proceso de optimización llevado a cabo dentro del proyecto de *“Exploración de conceptos y optimización para un bote de alta velocidad”*
- Crear los documentos de soporte para la correcta operación del modelo por parte de los funcionarios de la Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación de Cotecmar, para la evaluación del diseño conceptual, en la parte estructural, de embarcaciones de alta velocidad en materiales compuestos.

1.3. Estado del arte

1.3.1. Sociedades de clasificación

Para la comercialización de una embarcación o estructura flotante, es requisito importante contar con la aprobación del diseño y de la construcción

por parte de una sociedad de clasificación, debido a que muchas veces este tipo de certificación constituye un requisito indispensable para la prestación de servicios comerciales con la embarcación en cuestión[13].

Existe un gran número de sociedades de clasificación, donde cada una ha desarrollado sus propias metodologías de evaluación. Sin embargo todas son reguladas por la *Asociación Internacional de Sociedades Clasificadoras-IACS*. Los requerimientos mínimos para estructuras flotantes y embarcaciones son dictados por la *Organización Internacional Marítima-IMO*¹, siendo este el punto de partida para las sociedades de clasificación, dado que cada sociedad aplica sus propios márgenes de seguridad.

Diferentes normas de clasificación reglamentan las características de un buque de acuerdo a diferentes áreas. Existen normas para estabilidad de la embarcación, para la resistencia de la estructura, para los equipos instalados, para las convenciones de iluminación que este debe poseer, y así sucesivamente. Debido a su influencia y robustez, se convierten en una buena herramienta para evaluar un diseño y para la clasificación del buque dentro de un tipo determinado. Por ejemplo, existen normas que de acuerdo a la funcionalidad del buque reglamentan ciertos requisitos que este debe cumplir para el transporte de pasajeros, carga estibada, hidrocarburos, vehículos, etc; dado que el comportamiento de estos componentes puede tener una gran influencia sobre el estado del buque en un momento particular en cuestiones de peso y centro de gravedad[8].

¹<http://www.imo.org/>

1.3.2. Cálculos estructurales

La importancia de los cálculos estructurales de una embarcación, radica básicamente en dos factores.

El primero es la resistencia de la estructura construida, teniendo en cuenta tanto la influencia causada por el medio, es decir el agua, que debido a su movimiento natural puede inducir cargas de compresión y de tracción sobre la estructura²; a la condición de carga de la embarcación y a la formación de olas, tanto para el buque en movimiento como para el buque en una posición estática.

El segundo factor importante a tener en cuenta en los cálculos estructurales, es la posición del centro de gravedad de la estructura construida y su peso, ya que siendo la estructura el peso mayor de toda la embarcación, tiene una gran influencia sobre la condición de estabilidad del buque, tanto estática como dinámicamente, por lo que se hace necesario determinarla con antelación a la colocación de los demás pesos dentro del buque, ya sean equipos, carga, fluidos o personal.

También influye sobre los cálculos de resistencia estructural el uso que se le va dar a un componente estructural determinado, ya sea un area de carga, un area de contención de fluidos, un area habitable, etc[8].

Existen varias aproximaciones hacia los cálculos estructurales de una embarcación, entre las que se encuentran las indicaciones y procedimientos de las sociedades de clasificación, los cuales pueden variar de acuerdo a la sociedad escogida, los calculos mediante elementos finitos y las aproximaciones por modelos de regresión.

²Tegeador [12]

Cálculos por sociedades de clasificación

Cuando se calcula de acuerdo a una sociedad de clasificación en particular, se deben realizar todo tipo de ensayos sobre los materiales de fabricación, para determinar las propiedades específicas del material de acuerdo a la metodología de fabricación, ya que estas propiedades pueden cambiar entre fabricantes y entre astilleros.

Una vez determinadas las propiedades del material, se procede a determinar el escantillonado del buque, es decir el tipo y la distribución de los refuerzos y componentes mayores colocados al interior de la estructura y sus espesores.

Es necesario resaltar que este tipo de cálculos provee un conjunto de proporciones entre los factores involucrados, por lo que permite un rango de decisión por parte del diseñador, por ejemplo, colocar menos refuerzos requiere de un espesor de casco mayor o un mayor tamaño en los reuerzos colocados.

Modelos estructurales de regresión

Cuando un taller, astillero u oficina de diseño acumula experiencia tanto en diseño como fabricación, le es posible mediante el análisis estadístico de datos, desarrollar modelos de regresión que le permitan estimar las propiedades de los buques diseñados o producidos.

Estos modelos generalmente relacionan las propiedades principales del buque, como son la eslora, la manga y el puntal, con la cantidad de materiales necesarios para fabricarlos, el peso de la estructura resultante, los costos, las horas hombre necesarias para su fabricación, e inclusive teniendo datos de la

proporción de costos de cada grupo constructivo³, los costos de equipamiento, propulsión, habilitación, generación, estructuras, etc, por separado.

Sin embargo, para el desarrollo de un modelo de regresión se requiere de una muestra de información adecuada. El astillero debe dar importancia y establecer los procedimientos de recolección y tabulación de información necesarios para asegurar que se cuenta con una base de datos suficiente en un futuro. Se deben hacer análisis de sensibilidad de cada parámetro a utilizar para determinar las variables o parámetros que realmente son relevantes en los resultados finales, teniendo en cuenta también la experticia de los análisis.

En el caso de que no se disponga de información histórica para un parámetro en particular, este deberá ser estimado analíticamente, posiblemente aumentando el error del modelo. Las asunciones o supuestos, las constantes de ajuste y los datos utilizados para el desarrollo del modelo, deben ser debidamente documentados, para que a medida que la información disponible aumente, se pueda ajustar el modelo adecuadamente, restando factores del error y evitando que este se confunda entre las variables analizadas.

Metodología de elementos finitos –*FEM*

Existen ocasiones en las que por las restricciones de peso de una embarcación, un requerimiento de desempeño elevado o simplemente por un proceso de optimización estructural, se hace necesario determinar más en detalle los esfuerzos a los que estará sometida la estructura de una embarcación. En estos casos se recurre a la simulación estructural mediante elementos finitos.

³Segmento funcional de una embarcación[10].

Para realizar este tipo de análisis se requiere del conocimiento en detalle de la estructura del buque en cuestión, pues cada componente debe ser modelado previamente a la simulación.

Iterativamente se calcula la distribución de las cargas y se hacen los ajustes necesarios a la estructura hasta obtener el nivel de optimización deseado.

Para el cálculo estructural mediante elementos finitos, se requiere en primera instancia de un *modelo de discretización* para la estructura, generalmente realizado por software de modelado en 2D o 3D. Una vez generada la malla, los nodos que la conforman se relacionan con un conjunto de variables incógnitas denominadas grados de libertad, y se conforma un sistema de ecuaciones que se conoce como *matriz de rigidez*. Este sistema es resuelto computacionalmente para hallar los valores de las variables relacionadas.

1.3.3. Materiales de fabricación

La selección del material de fabricación de la estructura tiene una gran influencia sobre las propiedades de la estructura resultante. Las opciones mas comunes son el acero, el aluminio y los materiales compuestos.

La selección del material depende de los costos de fabricación, del nivel de resistencia necesario, el mantenimiento y la aplicación particular de la estructura en cuestión. Para embarcaciones pequeñas son comúnmente utilizados los materiales compuestos.

Los materiales compuestos, como su nombre lo indica, son conformados básicamente por dos materiales, una fibra y una resina. Durante la fabricación de una estructura, se colocan capas de la fibra en cuestión sobre un molde

de madera, unidas a su vez por capas de la resina seleccionada.

Entre las fibras comunes a utilizar estan: la fibra de vidrio, conformada principalmente por sílice y combinada con óxidos alcalinos y alcalinotérreos, la fibra de carbono, fabricadas mediante la pirólisis del poliacrilonitrilo, y las fibras de kevlar, obtenidas mediante el hilado de poliamidas aromáticas. Las propiedades y costo de cada fibra determinan su uso para una aplicación determinada.

Las resinas mas comúnmente utilizadas son las resinas de poliéster, las resinas epoxy y las resinas vinil ester.

Un factor determinante en las propiedades del conjunto resultante del laminado, es la presentación de las fibras. Estas se pueden encontrar en forma de un Mat de hilos cortados o CSM, en el que pequeñas hebras de alrededor de $25mm$ son unidas mediante un ligante, que comúnmente puede ser una resina de poliéster. Tambien se encuentran en forma de un Roving, que es básicamente un embobinado de fibras que conforman un hilo mas grueso. Finalmente es comun encontrar las fibras en forma de tejidos, donde el entrelazado de los filamentos determina algunas propiedades adicionales de cada capa, como el espesor, la resistencia longitudinal y la resistencia transversal.

El conjunto de resina y fibra conforma lo que se denomina como páneles de laminado simple. Sin embargo es común encontrarlas en forma de lo que se denomina laminado sándwich. Este ultimo consta de dos laminados simples, entre los que se coloca otro componente denominado núcleo. Esta configuración tiene la ventaja de proveer una mayor resistencia, debido a que las cargas de flexión sobre el panel, se convierten en cargas de tracción y de

compresión, debido a la distancia existente entre los laminados simples⁴. El núcleo deberá mantener la distancia entre las caras y estar lo suficientemente bien adherido a los laminados como para evitar el movimiento longitudinal de los laminados. Los materiales mas comunmente utilizados como núcleos son la madera de balsa y las espumas sintéticas.

1.4. Situación bajo estudio

La metodología de calculo estructural se basa en un modelo de regresión planteado por Nadine Hubble, para el Centro de Desarrollo e Investigación de Embarcaciones Navales David W. Taylor[7].

El cálculo estructural mediante las normas de clasificación fue descartado, debido a que requiere de la toma de decisiones por parte del diseñador, pues para los mismos valores iniciales, muchos diseños diferentes pueden cumplir la norma, por lo que para decidir cual de todos es el adecuado, se haría necesario realizar una optimización adicional, aumentando considerablemente la complejidad del modelo.

Debido a que la optimización a realizar esta conformada por diseños en la etapa conceptual, no se posee el nivel de detalle necesario para realizar un análisis mediante elementos finitos. Este requeriría generar automáticamente las mallas para cada diseño y resolver cada grado de libertad, aumentando considerablemente el numero de cálculos a realizar.

Las embarcaciones a ser analizadas, son botes pequeños de alto desempeño, y se fabricarán en materiales compuestos por cuestiones de peso de la estruc-

⁴Tegedor[12]

tura y facilidad de mantenimiento⁵.

Los componentes estructurales a ser calculados, serán estandarizados y parametrizados para todos los botes. No poseerán superestructura ni mamparos estancos⁶ y los refuerzos serán transversales y se ubicarán uniformemente a lo largo de toda la eslora.

Para cada componente estructural mayor se puede variar entre laminado simple y laminado sándwich.

⁵Aún cuando los procesos de mantenimiento para materiales compuestos son más complejos que aquellos del acero o el aluminio, el usuario final en particular de la embarcación solicitada posee más experiencia e infraestructura en el mantenimiento de materiales compuestos.

⁶Por definición, un mamparo estanco es aquel que es sellado y no permite el paso de fluidos en sus uniones, sin embargo para este caso en particular, nos referimos a que no se tendrá en cuenta la presión ejercida por los fluidos, pues los mamparos no determinarán espacios de contención

Capítulo 2

El modelo de Hubble

A continuación se describe el modelo desarrollado por Hubble para el centro David W. Taylor. Su aproximación a los cálculos estructurales de una embarcación de planeo, fue la utilizada para desarrollar este trabajo, así como los coeficientes iniciales del modelo.

El modelo desarrollado por Nadine Hubble, *PHOMPT*, ha sido utilizado para el estudio de factibilidad de embarcaciones de planeo. Es un modelo enfocado a embarcaciones navales, aunque también puede aplicarse para otros tipos de embarcaciones que posean un desplazamiento inferior a 1500ton y un coeficiente de velocidad sobre desplazamiento $F_{n\Delta}$ menor de cuatro.

Las embarcaciones analizadas pueden estar fabricadas en aluminio, acero o materiales compuestos, con sistema de propulsión diesel o de turbina de gas mediante propelas de paso fijo o variable; o waterjets.

Realiza estimaciones de peso y centro de gravedad vertical de los componentes estructurales mayores y las cargas principales.

Una vez realizadas dichas estimaciones, el programa puede calcular el

peso, volumen y centro de gravedad para un casco determinado o puede optimizar el puntal, la manga a la altura de los codillos y el desplazamiento para una eslora determinada. Realizando el este último cálculo para esloras diferentes se puede determinar la longitud óptima de la embarcación.

La base de datos de embarcaciones utilizada para la realización y ajuste del modelo, incluyó patrulleras pequeñas, embarcaciones tipo *hydrofoil*¹, destructores y destructores escolta.

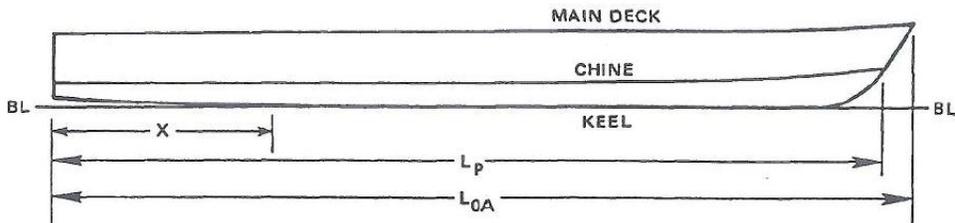


Figura 2.1: Casco típico en el modelo de Hubble

El casco de planeo bajo estudio en el modelo de Hubble posee una forma en V con codillos marcados, como se observa en las figuras 2.2 y 2.1. A partir de un casco base, se aplican deformaciones para ajustarse a cada concepto en particular. Para cada nuevo casco generado se hace un nuevo cálculo de las propiedades hidrostáticas.

De acuerdo al tamaño de la embarcación evaluada, la compartimentación del casco puede variar de acuerdo a la figura 2.3. Las compartimentaciones planteadas provienen de embarcaciones existentes.

¹Tipo de embarcación que posee apéndices de sustentación que levantan la embarcación al alcanzar determinada velocidad, causando una reducción en la resistencia al avance y por ende un aumento en la eficiencia o en la velocidad de la embarcación.

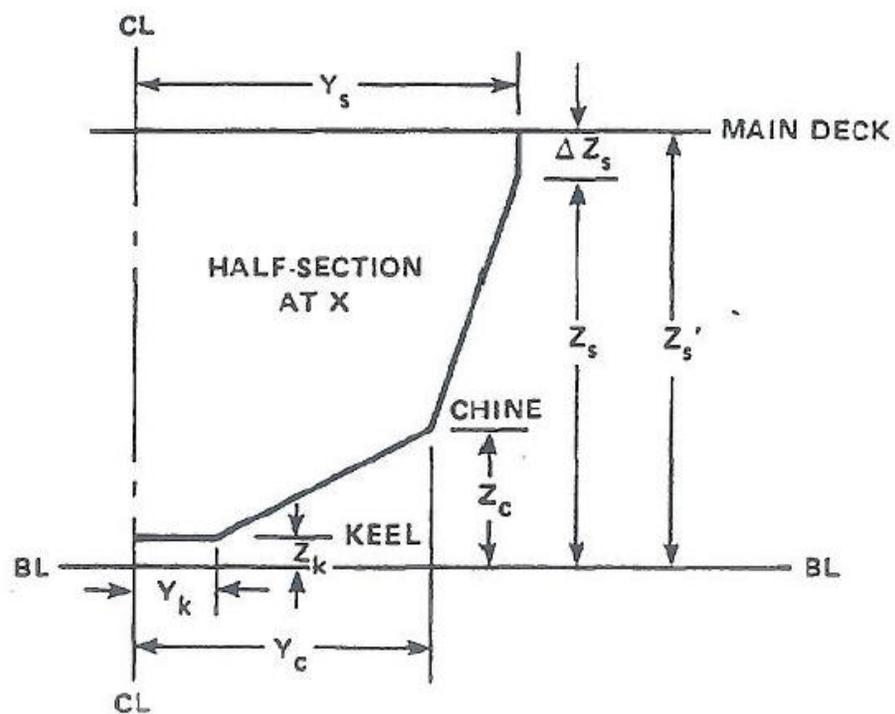


Figura 2.2: Sección típica en el modelo de Hubble

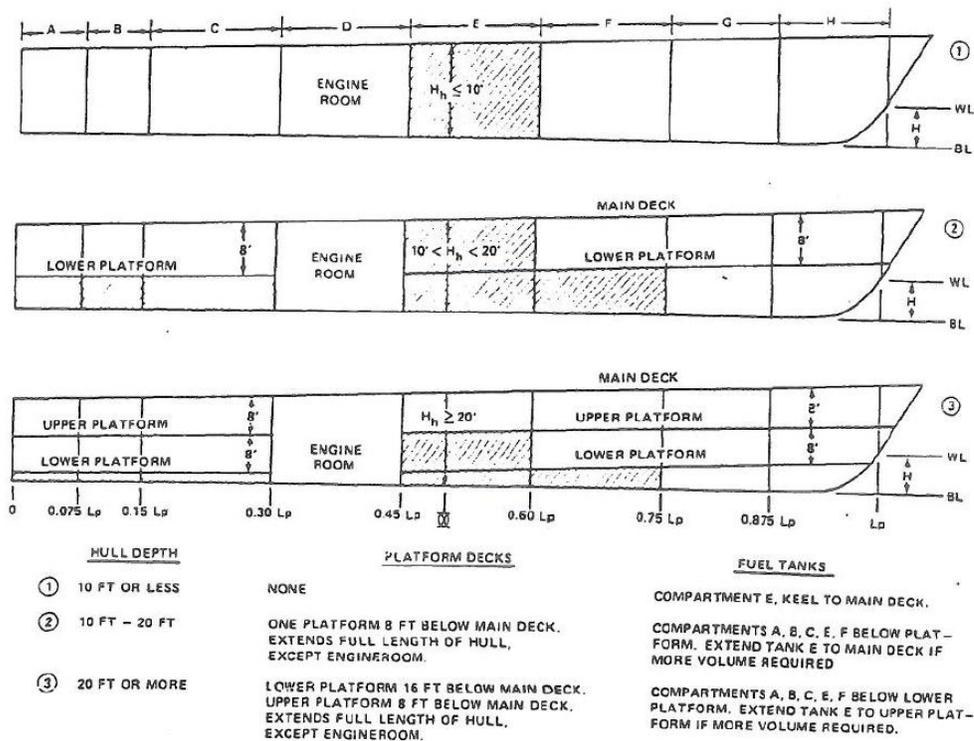


Figura 2.3: Compartimentación típica en el modelo de Hubble

Los cálculos estructurales realizados por el modelo de Hubble tienen en cuenta las cargas a las que están sometidos los componentes y el efecto de los cambios en la eslora, manga y puntal de la embarcación. Incluye rutinas separadas para embarcaciones en acero, aluminio y materiales compuestos², estos últimos presentando arquitectura de laminado simple o sándwich. Incluye también una rutina especial para el cálculo de embarcaciones tipo LCU³

Para cada embarcación se estima la resistencia al avance de acuerdo a datos calculados para la serie 62 y 65 de cascos de planeo del *DTNSRDC*⁴, publicados previamente por dicho centro de investigación⁵.

El cálculo del empuje permite el uso de propelas o bombas tipo *waterjet*. Calcula la potencia necesaria para mantener la embarcación a una velocidad de diseño y de crucero especificada. El usuario puede ingresar la planta propulsora a utilizar o permitir que el sistema haga los cálculos utilizando aquella que posea la mayor potencia disponible. Para los casos que utilicen propelas, el programa busca el menor tamaño de la misma que pueda producir el empuje necesario para las velocidades de diseño y de crucero, teniendo en cuenta criterios para cavitación⁶.

Teniendo en cuenta la planta propulsora seleccionada, se hacen los cálculos del volumen requerido, tamaño de las tomas de aire y de combustible,

²Resina de poliéster reforzado en fibra de vidrio

³*LCU - Landing Craft Unit* Embarcaciones diseñadas para el desembarco de vehículos y personal, que poseen por lo general una rampa de acceso en proa y refuerzos adicionales en dicha zona del casco para permitir el emplayaje.

⁴David Taylor Naval Ship Research and Development Center

⁵DTNSRDC Report 4307, Abril de 1974

⁶Fenómeno causado por las bajas presiones generadas por el desplazamiento de fluido, que pueden causar daños en las propelas.

son calculados de acuerdo a ecuaciones desarrolladas que incluyen el peso específico, velocidad rotacional y consumo específico para motores diesel y turbinas de gas. También calcula el peso de las transmisiones y de las bombas propulsoras.

La necesidad de generación eléctrica en kilovatios puede ser ingresada por el usuario o calculada a partir del desplazamiento de la embarcación. A partir de regresiones y proporciones, se calculan los pesos de sistemas auxiliares y el equipamiento.

De acuerdo al consumo de combustible previamente calculado y al rango especificado para la embarcación, se calcula el requerimiento de volumen de tanques de combustible.

De acuerdo a datos previos y a estándares de la Armada de los Estados Unidos, se calcula el personal a bordo y el volumen requerido para el almacenamiento de agua y para habitación y acomodación.

Finalmente, si el tamaño de la embarcación es fijo, el modelo realiza iteraciones hasta que se cumpla con los requerimientos de diseño o hasta que ocurra una excepción particular. El modelo varía el desplazamiento hasta encontrar el *payload*⁷ de diseño, la manga de la embarcación varía hasta que se obtiene un centro de gravedad vertical del *payload* adecuado; y el puntal se aumenta y se reduce para obtener el volumen del *payload*.

Una vez determinado un diseño óptimo, el programa entrega los pesos, centros de gravedad y volúmenes de componentes de acuerdo su grupo dentro del *BSCI*⁸. También entrega una tabla de secciones, propiedades

⁷Carga útil de una embarcación, es decir aquella que se refiere a los equipos, insumos o personal requeridos para el cumplimiento de la misión especificada.

⁸*Basic Ship Construction Index*. Sistema de codificación de los componentes de una

hidrostáticas, una curva de velocidad contra potencia para y algunas estimaciones para las aceleraciones verticales contra estados de mar.

embarcación, reemplazado en los sesenta por el actual *SWBS - Ship Work Breakdown Structure*[10]

Capítulo 3

Componentes estructurales

Antes de realizar los cálculos, se hace necesario definir los componentes que van a conformar el bote. Estos serán concurrentes en todos los diseños que se evalúen en el modelo de estructura.

3.1. Casco

El casco es lo que soporta toda la estructura del buque. Es un componente importante ya que determina tanto el volumen disponible al interior, como la forma del volumen sumergido y por ende incide en la resistencia al avance en la estabilidad del bote. A su vez, siendo la frontera de los demás componentes, también determina su forma.

Las embarcaciones de planeo se caracterizan por poseer un ángulo de astilla muerta¹ que tiende a incrementarse hacia el sector de proa. Dicho ángulo

¹Ángulo que se forma entre una línea horizontal en la base de la quilla y el corte transversal del casco en un punto determinado

tiene una fuerte influencia sobre la estabilidad direccional de la embarcación y sobre las aceleraciones causadas por la interacción con la superficie, sin embargo su aumento genera también un aumento en el calado².

Los costados del casco para este modelo se asuman perpendiculares a la línea de agua y se asume un cuerpo paralelo³ desde la cuaderna maestra⁴ hasta el espejo de la embarcación.

Para su análisis, el casco se separa en sector de fondo, el cual va desde la quilla hasta los codillos, y sector de costados, desde los codillos hasta la altura de la cubierta principal.

3.2. Mamparos

Los mamparos son paneles verticales que se utilizan con fines estructurales y de compartimentación. Estos están fabricados en materiales compuestos y pueden ser transversales, es decir que atraviesan el casco de babor a estribor, o longitudinales, cuando lo hacen de popa a proa.

Los mamparos transversales mantienen la forma del casco y proveen la resistencia de la estructura a las cargas laterales y torsionales. Derminan la subdivisión en áreas funcionales del bote y contribuyen al soporte de cargas específicas a su función, como equipos y maquinaria. Constituyen un elemento fundamental para evitar la propagación de daños a lo largo de la estructura, ya sea por fuego, por inundación o por relevo de cargas estructurales. En

²Altura sumergida del bote

³Zona del casco de una embarcación a lo largo de la cual cualquier corte transversal tiene el mismo aspecto

⁴Corte transversal que define la disposición general del casco

caso de delimitar espacios de contención de líquidos, deben soportar permanentemente la carga hidrostática causada por los fluidos contenidos[4].

El bote en cuestión tiene tres mamparos transversales: un mamparo espejo, que es el que se localiza en la popa de la embarcación, cerrando el casco, un mamparo de máquinas, que se localiza en frente de los motores, separando el cuarto de máquinas del resto de la embarcación y un mamparo de colisión, el cual da inicio al pique de proa y da rigidez estructural a la misma para las operaciones en cubierta.

En cuanto a mamparos longitudinales, solo se poseen dos, desde el mamparo de máquinas hasta el mamparo de colisión, cerca de los costados, definiendo el area habitable.

3.3. Cubiertas

Las cubiertas son los paneles ubicados horizontalmente en el buque. Son fabricados tambien en materiales compuestos.

Se definen básicamente tres cubiertas en una embarcación de planeo a saber: una cubierta principal, desde el mamparo de máquinas hasta el mamparo de colisión, siendo el area por donde se desplaza la tripulación, una cubierta de máquinas, que cubre los motores y va desde el espejo hasta el mamparo de máquinas, en la parte superior del casco, y una cubierta de proa, la cual cubre el pique de proa, desde el mamparo de colisión.

3.4. Refuerzos

Los refuerzos son perfiles moldeados transversalmente sobre el casco, para darle a este una mayor rigidez estructural. Son un componente importante para la resistencia de la embarcación y, para este análisis particular, estarán ubicados uniformemente, de la popa a la proa de la embarcación. Es común que los mamparos transversales se ubiquen sobre estos refuerzos, para reducir los esfuerzos cortantes generados por dichos paneles.

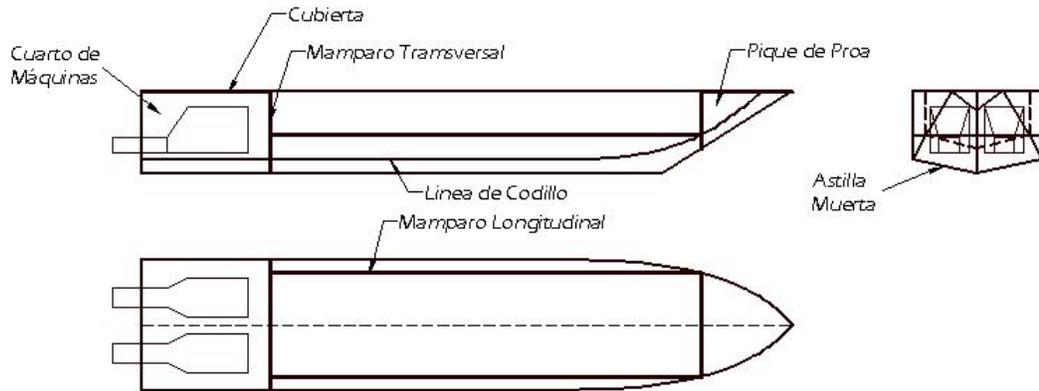


Figura 3.1: Esquema del bote.

Capítulo 4

Parametrización y

Dimensionamiento del bote

objetivo

Debido a la cantidad de modelos a evaluar, se debe definir con antelación la posición de cada uno de los componentes estructurales anteriormente definidos, dando su posición de acuerdo a algún parámetro de las dimensiones generales del bote. Teniendo esto en cuenta, el posicionamiento escogido para los componentes es:

- El origen de las coordenadas se colocará en el espejo del bote, en la parte inferior, punto desde donde parte la quilla del mismo. Como es convención en los sistemas de diseño de embarcaciones, el eje x ira desde la popa hasta la proa de la embarcación, el eje y hacia los costados, siendo babor el lado positivo y estribor el negativo, y el eje z positivo hacia hacia arriba.

- Se asume que el bote tiene un cuerpo medio paralelo que se extiende desde el mamparo espejo hasta un 60% de la eslora. A partir de este punto, el ángulo de astilla muerta empezará a subir linealmente desde el ángulo mínimo hasta el ángulo máximo en el 40% restante. La manga de la embarcación empezara a reducirse formando una parábola hasta cerrarse en la eslora. La quilla de la embarcación ira en $z = 0$ hasta el 80% de la eslora. A partir de ese porcentaje esta empieza a subir linealmente hasta encontrarse con la cubierta cuando x es igual a la eslora. Los costados del casco se asumen verticales, desde los codillos hasta la cubierta. El fondo será en forma de ‘v’ e ira cambiando con el ángulo de astilla muerta y la altura de la quilla.
- El mamparo espejo se colocará verticalmente en $x = 0$, yendo desde la quilla hasta la cubierta.
- La posición del mamparo de máquinas depende de las dimensiones en x del motor a colocar en el bote, por lo que esta posicionado a un 120% de este valor, desde el espejo, teniendo en cuenta los espacios necesarios disponibles para la acometida de los sistemas asociados a la propulsión y el espacio necesario para el acceso a los motores para labores de mantenimiento.
- De acuerdo a la norma del *American Bureau of Shipping-ABS*, el mamparo de colision se coloca a un 5 por ciento de la eslora por detrás de la perpendicular de proa[12]. Debido a que no se posee un dato inicial del calado de la embarcación, este se colocara a un 86% de la eslora¹.

¹La perpendicular de proa, se ubica verticalmente en el punto donde la quilla corta la

- Los mamparos longitudinales se encuentran entre el mamparo de máquinas y el mamparo de colisión, a un 48,75 % de la manga máxima hacia babor y estribor respectivamente.
- La cubierta de máquinas irá desde el mamparo espejo hasta el mamparo de maquinas, a la altura del puntal.
- La cubierta principal se extenderá desde el mamparo de máquinas hasta el mamparo de colisión, y su altura es considerada una variable de entrada al modelo, ya que esta influye en el espacio disponible para combustibles y tiene una influencia en la seguridad de la tripulación y en la posición del centro de gravedad debido a que los pesos de tripulación y equipos asociados irán colocados sobre este componente.
- La cubierta de proa inicia en el mamparo de colisión y llega hasta la eslora de la embarcación, a la altura del puntal.
- Los refuerzos son de tipo transversal y están distribuidos uniformemente a lo largo de la eslora del bote.

línea de agua, por eso para su estimación se requiere conocer el calado de la embarcación

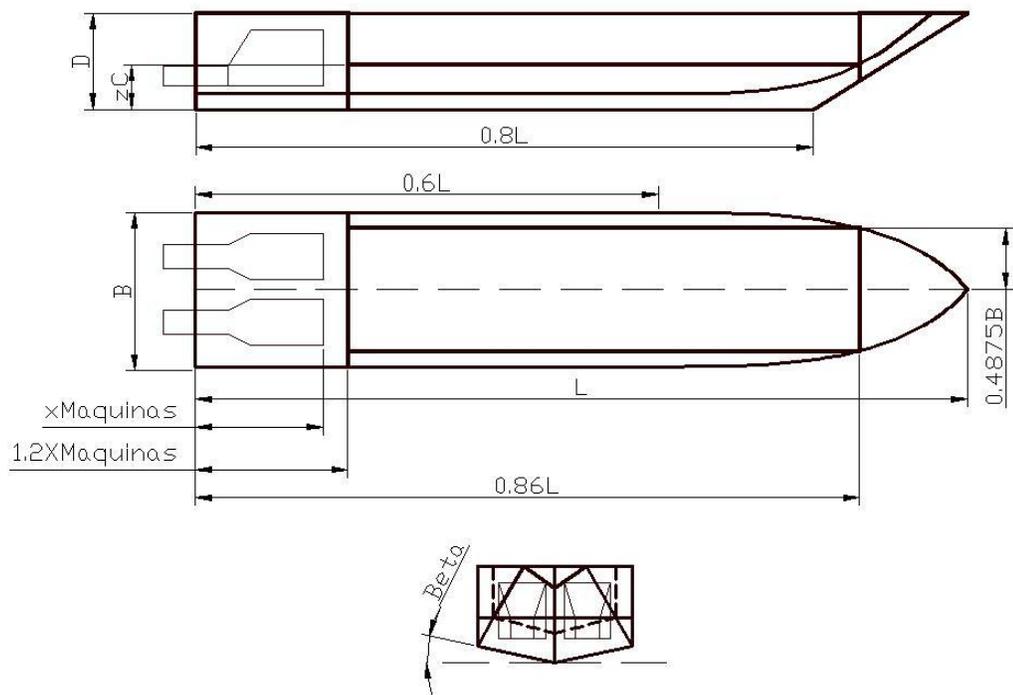


Figura 4.1: Parametrización del bote.

Capítulo 5

Cálculo de Peso y Centro de Gravedad de los Componentes Estructurales

Para el cálculo de pesos se sigue la formulación de Nadine Hubble[7] para hayar cada componente, y el peso de la estructura corresponde a:

$$W_t = \sum_{i=1}^n W_i(\text{ton}) \quad (5.1)$$

La posición del centro de gravedad de la estructura, corresponde a:

$$X_t = \sum_{i=1}^n \frac{(W_i X_i)}{W_t} (\text{ft}) \quad (5.2)$$

$$Y_t = \sum_{i=1}^n \frac{(W_i Y_i)}{W_t} (\text{ft}) \quad (5.3)$$

$$Z_t = \sum_{i=1}^n \frac{(W_i Z_i)}{W_t} (\text{ft}) \quad (5.4)$$

Donde i corresponde a cada uno de los componentes estructurales anteriormente calculados. El cálculo del centro de gravedad de cada componente estructural depende tanto de su forma como de su posición en el bote. Se han hecho algunas asunciones en la geometría para simplificar los cálculos y se asume que la distribución del peso de laminado es uniforme. Para laminado en sándwich se asume que los los laminados a ambos lados del núcleo poseen igual espesor.

5.1. Mamparos

El primer paso en el cálculo del peso de los mamparos, es hallar la presión a la que estos están sometidos, siendo este un factor determinante en su espesor y por ende en su peso. La presión de diseño sobre un mamparo transversal P_{tb} , está definida de acuerdo a:

$$P_{tb} = \frac{64(H_{tb} + 4)}{144} (lb/in^2) \quad (5.5)$$

Donde H_{tb} es la altura del mamparo en cuestión. Esta fórmula es tomada del modelo inicial de Hubble, sin embargo se puede observar que se asume la presión sobre el mamparo como la presión hidrostática sobre el mamparo en cuestión de acuerdo a:

$$P_{tb} = C\rho_e(H_{tb} + M) \quad (5.6)$$

Donde $C = 1/12^2$ es un factor de corrección de unidades de pies a pulgadas cuadradas, $\rho_e = 64lb/ft$ es el peso específico del agua de mar y M es un margen de seguridad.

Una vez hallada la presión sobre el mamparo, se procede a hallar la unidad de peso del mismo S_{tb} dado en (lb/ft^2) , siendo este el peso por unidad de

área del mamparo en cuestión, de acuerdo a:

$$S_{tb} = 2,5 + 0,221P_{tb} \text{ para tipo sándwich} \quad (5.7)$$

$$S_{tb} = 3,25 + 0,280P_{tb} \text{ para tipo simple} \quad (5.8)$$

Una vez hallada la unidad de peso del mamparo en cuestión, esta se multiplica por el área del mismo. Para el caso particular de un bote pequeño, se asume que los mamparos transversales cortan la totalidad del casco. Teniendo en cuenta las formas mas comunes de este tipo de botes, se constituye un mamparo transversal a partir de un área rectangular por encima de los codillos y hasta la cubierta, area *superior*, y un area triangular desde la quilla hasta los codillos, area *inferior* (*figura 5.1*), es decir:

$$A_{tb} = B(x)(T(x) - C(x)) \quad (5.9)$$

para el sector superior y

$$A_{tb} = 0,5B(x)C(x) \quad (5.10)$$

para el sector inferior.

De donde el peso del mamparo transversal corresponde a:

$$W_{tb} = S_{tb}(A_{tb,superior} + A_{tb,inferior}) \quad (5.11)$$

El peso de cada mamparo longitudinal W_{lb} , obedece a la misma formulación, con la diferencia de que su área esta dada por:

$$A_{lb} = (0,86L - 1,2x_{maquinas})(T - z_c) \quad (5.12)$$

debido a que se extiende desde el mamparo de máquinas hasta el mamparo de colisión y desde la la cubierta habitable hasta el puntal (*figura 5.1*).

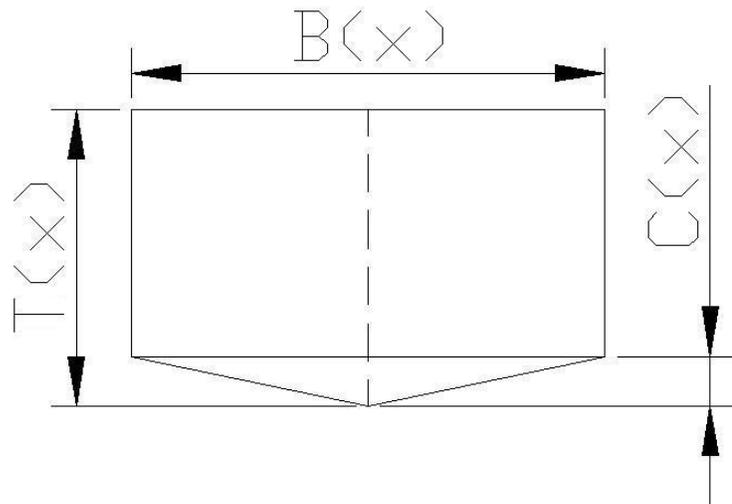


Figura 5.1: Mamparo Transversal.

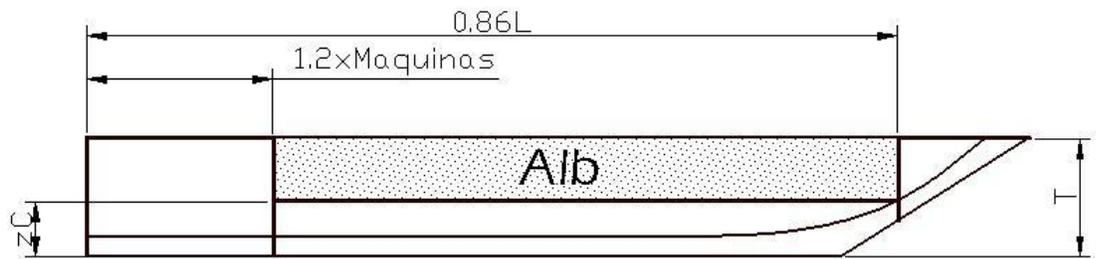


Figura 5.2: Mamparo Longitudinal.

Debido a que los mamparos transversales se extienden de babor a estribor, con una distribución de pesos uniforme, se asume que el centro transversal de gravedad $Y_{tb} = 0$. La coordenada longitudinal del centro de gravedad X_{tb} , se ubicará en la coordenada en x donde se ubique el mamparo de acuerdo a la parametrización de la posición de los componentes estructurales. De acuerdo a estas asunciones geométricas, el centro de gravedad de un mamparo transversal se encontrará en:

$$X_{tb} = x \quad (5.13)$$

$$Y_{tb} = 0 \quad (5.14)$$

$$Z_{tb} = \frac{Z_{tb,superior}A_{tb,superior} + Z_{tb,inferior}A_{tb,inferior}}{A_{tb}} \quad (5.15)$$

Siendo $Z_{tb,i}$ la coordenada en z de el centro de gravedad del sector correspondiente y $A_{tb,i}$ su area de acuerdo a (5.9) y (5.10). Las coordenadas provienen de:

$$Z_{tb} = \frac{T(x) + C(x)}{2} \quad (5.16)$$

para el sector superior,

$$Z_{tb} = \frac{2}{3}C(x) \quad (5.17)$$

para el sector inferior. $T(x)$ y $C(x)$ corresponden al puntal y la altura del codillo respectivamente, en el punto en el que se encuentre localizado el mamparo.

Los mamparos longitudinales que se encuentran en el bote tienen una extensión fija desde el mamparo de maquinas hasta el mamparo de colisión, de popa a proa y desde la altura de cubierta z_c definida por el usuario hasta el puntal total de la embarcación. De acuerdo a esto y teniendo en cuenta

las asunciones mencionadas al inicio del capítulo, la posición del centro de gravedad de un mamparo longitudinal se localiza en:

$$X_{lb} = \frac{1,2x_{maquinas} + 0,86L}{2} \quad (5.18)$$

$$Y_{lb} = y \quad (5.19)$$

$$Z_{lb} = \frac{z_c + D}{2} \quad (5.20)$$

5.2. Casco (Fondo)

El fondo del casco se divide en dos sectores, uno de popa y uno de proa (*figura 5.2*). Esto se debe a que la unidad de peso del fondo depende de la presión a la que este sea sometido, y esta es diferente para cada sector, pues debido a la naturaleza operativa del bote los mayores impactos y aceleraciones se dan hacia la proa del mismo [5].

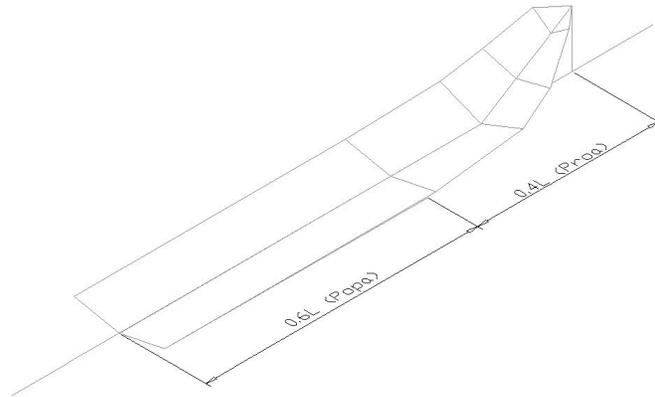


Figura 5.3: Casco en el fondo del bote.

El primer paso en el cálculo es hallar la presión hidrostática, de acuerdo a:

$$P_{hh} = 1,777 + 0,444Z_{sm} \quad (5.21)$$

Donde Z_{sm} es la altura media del puntal de la embarcación. Posteriormente se calcula la presión de diseño en el sector de proa de acuerdo a:

$$P_{bf} = (753,4883\nabla)/(G_bL) \quad (5.22)$$

Siendo G_b la mitad del perímetro del casco a el 60% de la eslora, ∇ el desplazamiento de la embarcación y L la eslora.

Una vez se tienen las dos presiones ejercidas sobre el casco, se escoge la mayor de las 2 para continuar los cálculos, pues esta será la que determinará la unidad de peso del fondo de la embarcación.

Para la presión en el sector de popa, P_{ba} , el cual corresponde al 60% posterior, se calcula este como la mitad de la presión en el sector de proa.

Con los valores de las presiones para ambos sectores, de acuerdo a la arquitectura del laminado, se calculan las unidades de peso para proa y popa:

$$S_{bf} = 3,25 + 0,192P_{bf} \quad (5.23)$$

$$S_{ba} = 3,25 + 0,192P_{ba} \quad (5.24)$$

En laminado simple y:

$$S_{bf} = 2,5 + 0,14P_{bf} \quad (5.25)$$

$$S_{ba} = 2,5 + 0,14P_{ba} \quad (5.26)$$

Para laminados en sándwich.

El peso total de cada sector del fondo del casco se calcula entonces multiplicando la unidad de peso correspondiente al sector por el área del mismo.

El área del sector de popa, corresponde a:

$$A_{ba} = \frac{0,6BL}{\cos \beta} \quad (5.27)$$

El área del sector de proa, corresponde a:

$$A_{bf} = \sum_{i=1}^{n-1} A(x_i) \quad (5.28)$$

donde $A(x_i)$ es el área de una franja del casco en el sector de proa, en una coordenada $x_i = L(0,6 + (0,4i)/n)$:

$$A(x_i) = \frac{0,4L \cos(\beta(x_i))}{nB(x_i)} \quad (5.29)$$

Para la estimación de su centro de gravedad, el fondo del casco se divide en un sector de popa y un sector de proa. Debido a que en el sector de popa la forma no varía, el centro de gravedad se calcula como:

$$X_{ba} = 0,3L \quad (5.30)$$

$$Y_{ba} = 0 \quad (5.31)$$

$$Z_{ba} = 0,5C(0) \quad (5.32)$$

Para el sector de proa:

$$X_{bf} = \frac{\sum_{n=0}^{n-1} ((x_i - \frac{0,2L}{n})A(x_i))}{A_{bf}} \quad (5.33)$$

donde $x_i = L(0,6 + (0,4i)/n)$, $A(x_i)$ proviene de (5.29) y A_{bf} proviene de (5.28)

$$Y_{bf} = 0 \quad (5.34)$$

y

$$Z_{bf} = \frac{\sum_{n=0}^{n-1} (A(x_i)(0,5C(x_i) + (T - T(x_i))))}{A_{bf}} \quad (5.35)$$

Finalmente, las coordenadas del centro de gravedad del casco en el sector de fondo se definen como:

$$X_b = \frac{X_{ba}A_{ba} + X_{bf}A_{bf}}{A_b} \quad (5.36)$$

$$Y_b = \frac{Y_{ba}A_{ba} + Y_{bf}A_{bf}}{A_b} \quad (5.37)$$

$$Z_b = \frac{Z_{ba}A_{ba} + Z_{bf}A_{bf}}{A_b} \quad (5.38)$$

donde $A_b = A_{bf} + A_{ba}$.

5.3. Casco (Costados)

Los costados del casco se extienden desde el espejo de la embarcación hasta la proa, desde las líneas de codillo hasta la cubierta. Para el bote en cuestión se ha asumido que estos son verticales. La unidad de peso¹ de los costados del casco S_s , dada en libras sobre pies cuadrados, corresponde a:

$$S_s = 1,4 + 0,035L_p \text{ para laminado en sándwich} \quad (5.39)$$

$$S_s = 2,3 + 0,0395L_p \text{ para laminado simple} \quad (5.40)$$

Donde L_p es la longitud del codillo. Una vez calculada la unidad de peso para los costados, esta se multiplica por el área de los mismos para hallar el peso resultante:

$$A_{sa} = 0,6L(T - C(0,6L)) \quad (5.41)$$

$$A_{sf} = 0,2L(T - C(0,6L)) \quad (5.42)$$

¹De la traducción directa del modelo de Hubble, *Weight Unit*, se refiere a el peso por unidad de área.

$$A_s = 2(A_{sa} + A_{sf}) \quad (5.43)$$

$$W_s = S_s A_s \quad (5.44)$$

El centro de gravedad de los costados del casco, se calcula teniendo en cuenta que se asume una posición vertical de los mismos. Para su cálculo se divide en sector de popa y de proa, ya que el aspecto de los costados se mantiene constante hasta el 60% de la eslora. Debido a esto, y a que la simetría del mismo nos permite asumir que el centro de gravedad se encuentra sobre la línea de centro del bote, para el sector de popa el cálculo corresponde al centro de gravedad de un rectángulo que se extiende desde los codillos hasta el puntal y desde el espejo hasta que finaliza el sector de proa, es decir que:

$$X_{sa} = 0,3L \quad (5.45)$$

$$Y_{sa} = 0 \quad (5.46)$$

$$Z_{sa} = \frac{T + C(0)}{2} \quad (5.47)$$

para el sector de proa, y haciendo una proyección del costado en el sector de proa como un triángulo, tenemos que:

$$X_{sf} = \frac{1}{3}(0,4L) + 0,6L \quad (5.48)$$

$$Y_{sf} = 0 \quad (5.49)$$

$$Z_{sf} = C(0,6L) + \frac{2}{3}(T - C(0,6L)) \quad (5.50)$$

y finalmente:

$$X_s = \frac{X_{sa}A_{sa} + X_{sf}A_{sf}}{A_{sa} + A_{sf}} \quad (5.51)$$

$$Y_s = 0 \quad (5.52)$$

$$Z_s = \frac{Z_{sa}A_{sa} + Z_{sf}A_{sf}}{A_{sa} + A_{sf}} \quad (5.53)$$

donde A_{sa} proviene de (5.41) y A_{sf} proviene de (5.42).

5.4. Cubiertas

La posición de las cubiertas esta parametrizada de manera que estas se encuentren a una altura h entre zero y el puntal del bote, extendiéndose desde un x_1 hasta un x_2 , siendo $L > x_2 > x_1$. La presión de diseño para una cubierta esta definida por:

$$P_p = \frac{64(H_p + 4)}{144} \quad (5.54)$$

Siendo H_{pl} la distancia entre la cubierta en cuestión y la cubierta principal. La unidad de peso correspondiente es:

$$S_p = 2,50 + 0,140P_p \text{ para laminado en sándwich} \quad (5.55)$$

$$S_p = 3,25 + 0,192P_p \text{ para laminado simple} \quad (5.56)$$

Esta se multiplica entonces por el área de la cubierta para hallar el peso total del componente.

$$W_p = A_p S_p \quad (5.57)$$

Donde el área se calcula teniendo en cuenta tres escenarios diferentes (*figura 5.4*):

$$A_p = \begin{cases} (x_2 - x_1)B & \text{Si } x_1 \leq x_2 \leq 0,6L \\ (0,6L - x_1)B + \sum_{i=1}^{n-1} A(x_i) & \text{Si } x_1 \leq 0,6L \leq x_2 \\ \sum_{i=1}^{n-1} A(x_i) & \text{Si } 0,6L \leq x_1 \leq x_2 \end{cases} \quad (5.58)$$

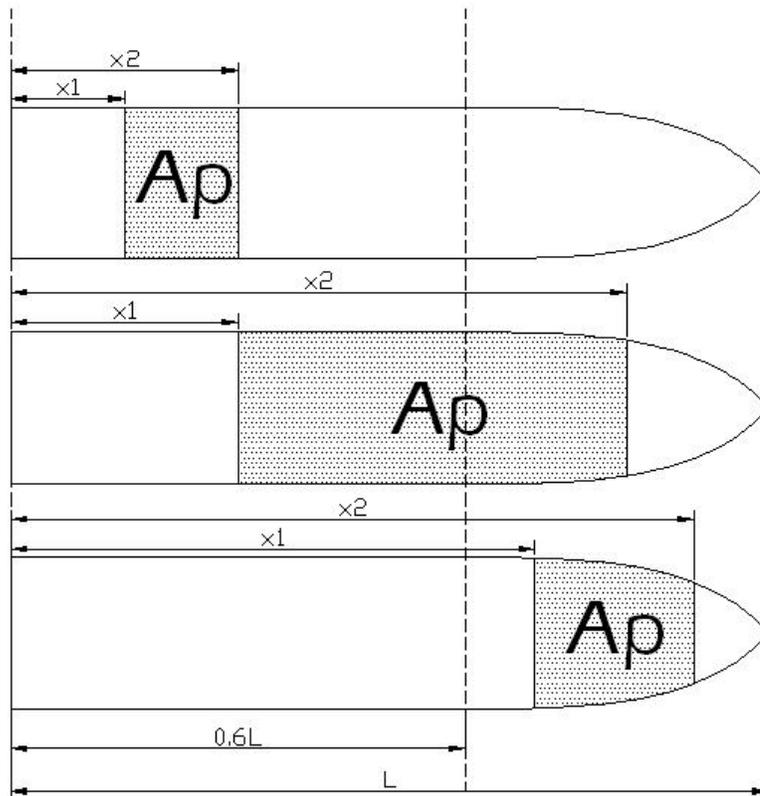


Figura 5.4: Area de la cubierta.

de donde:

$$A(x_i) = \begin{cases} B(x_i)\left(\frac{x_2-0,6L}{n}\right) & \text{Si } x_1 \leq 0,6L \leq x_2 \\ B(x_i)\left(\frac{x_2-x_1}{n}\right) & \text{Si } 0,6L \leq x_1 \leq x_2 \end{cases}$$

$$x_i = \begin{cases} \frac{i(x_2-0,6L)}{n} + 0,6L & \text{Si } x_1 \leq 0,6L \leq x_2 \\ \frac{i(x_2-x_1)}{n} + 0,6L & \text{Si } 0,6L \leq x_1 \leq x_2 \end{cases}$$

Teniendo en cuenta que para el bote en cuestion se asumen todas las cubiertas como planas y horizontales, es decir que en todo punto de las mismas $z = k$, que se extienden desde un punto x_1 hasta un punto x_2 donde se cumple que $0 < x_1 < x_2 < L$ y que cubren la totalidad de la manga del bote, la posición del centro de gravedad de una cubierta esta determinada por:

$$X_p = \frac{\sum_{n=0}^{n-1} X_i A_i}{A_p} \quad (5.59)$$

$$Y_p = 0 \quad (5.60)$$

$$Z_p = z_c \quad (5.61)$$

donde

$$X_i = \frac{i(x_2 - x_1)}{n} + x_1,$$

A_i y A_p provienen de (5.58)

5.5. Refuerzos

Para el cálculo los refuerzos se asume un escantillonado transversal, en el que los refuerzos estan distribuidos uniformemente a lo largo de la eslora del bote. El peso total de los refuerzos W_{fr} obedece a:

$$W_{fr} = 0,75(\nabla_h) \quad (5.62)$$

Donde ∇_h es el volumen del casco. Para el cálculo de este volumen, se hace necesario separar el casco en cuatro sectores, un sector superior en popa, que puede ser considerado como un cilindro cuadrado, un sector inferior en popa, que se considera un cilindro triangular o prisma, y un par de sectores, superior e inferior, para proa, los cuales deben ser calculados mediante integración numérica. De acuerdo a:

$$\nabla_h = \nabla_{superior,popa} + \nabla_{inferior,popa} + \nabla_{superior,proa} + \nabla_{inferior,proa} \quad (5.63)$$

$$\nabla_{superior,popa} = 0,6LB(T - C(0)) \quad (5.64)$$

$$\nabla_{inferior,popa} = \frac{0,6LB(C(0))}{2} \quad (5.65)$$

$$\nabla_{superior,proa} = \sum_{i=1}^{n-1} B(x_i)(T(x_i) - C(x_i)) \frac{0,4L}{n} \quad (5.66)$$

$$\nabla_{inferior,proa} = \sum_{i=1}^{n-1} B(x_i)C(x_i) \frac{0,2L}{n} \quad (5.67)$$

$$x_i = 0,6L + \frac{i(0,4L)}{n} \quad (5.68)$$

De acuerdo al modelo de Hubble, el centro de gravedad de los refuerzos se encuentra ubicado en el mismo punto que el centro de gravedad del volumen del casco. De la misma manera que se hizo para el cálculo de volumen, se hace necesario dividir el casco en 4 sectores, superior, inferior y popa y proa. De acuerdo a esto, las coordenadas del centro de gravedad de cada sector son:

$$X_{popa,inferior} = X_{popa,superior} = 0,3L \quad (5.69)$$

$$Z_{popa,inferior} = \frac{2}{3}C(0) \quad (5.70)$$

$$Z_{popa,superior} = \frac{1}{2}(T + C(0)) \quad (5.71)$$

$$X_{proa,inferior} = \sum_{n=0}^{n-1} X_i A_{i,inferior} \quad (5.72)$$

$$X_{proa,superior} = \sum_{n=0}^{n-1} X_i A_{i,superior} \quad (5.73)$$

$$Z_{proa,inferior} = \sum_{n=0}^{n-1} Z_{i,inferior} A_{i,inferior} \quad (5.74)$$

$$Z_{proa,superior} = \sum_{n=0}^{n-1} Z_{i,superior} A_{i,superior} \quad (5.75)$$

donde

$$X_i = 0,6L + \frac{i(0,4L) - (0,2L)}{n} \quad (5.76)$$

$$Z_{i,inferior} = T - T(x_i) + \frac{2}{3}C(x_i) \quad (5.77)$$

$$Z_{i,superior} = T - T(x_i) + \frac{1}{2}(C(x_i) + P(x_i)) \quad (5.78)$$

$$A_{i,inferior} = \frac{B(x_i)C(x_i)}{2} \quad (5.79)$$

$$A_{i,superior} = B(x_i)(T(x_i) - C(x_i)) \quad (5.80)$$

siendo $x_i = 0,6L + i(0,4L)/n$. De acuerdo a esto, las coordenadas del centro de gravedad de la totalidad del volumen del casco y por ende del centro de los refuerzos serían:

$$X_{fr} = \frac{X_{popa} \nabla_{popa} + X_{proa,superior} \nabla_{proa,superior} + X_{proa,inferior} \nabla_{proa,inferior}}{\nabla_h} \quad (5.81)$$

$$Y_{fr} = 0 \quad (5.82)$$

$$Z_{fr} = \frac{Z_{popa,inferior} \nabla_{popa,inferior} + Z_{popa,superior} \nabla_{popa,superior}}{\nabla_h} + \frac{Z_{proa,superior} \nabla_{proa,superior} + Z_{proa,inferior} \nabla_{proa,inferior}}{\nabla_h} \quad (5.83)$$

siendo $\nabla_{popa} = \nabla_{popa,superior} + \nabla_{popa,inferior}$.

Capítulo 6

Implementación del Modelo

Como requisito del proyecto de “*Exploración de conceptos y optimización para un bote de alta velocidad*” del cual forma parte este modelo, la implementación del mismo se debe hacer sobre matlab, siendo esta la herramienta seleccionada para realizar el proceso de optimización de los botes objetivo. Esto hace que el modelo se organice en subrutinas almacenadas en archivos de extensión “m”, con archivos de texto para los datos concurrentes.

6.1. Modelo de Optimización

El modelo planteado (*figura 6.1*) permite optimizar diseños conceptuales de botes al minimizar los costos y maximizar la efectividad. La medida de efectividad proviene de una matriz de ponderaciones de curvas de utilidad, lo cual nos permite evaluar cada posible concepto para hallar su “*Medida Global de Efectividad-OMOE*”. Los costos provienen del modelo ajustado de Carreyette [3], al cual se le ha añadido el cálculo del ciclo de vida (LCC)

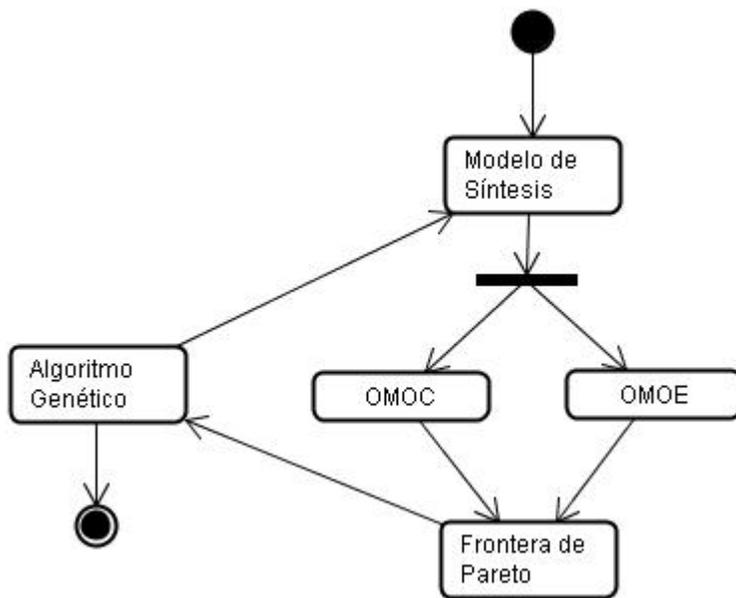


Figura 6.1: Modelo de optimización multiobjetivo mediante algoritmos genéticos.

para el bote, constituyendo su “*Medida Global de Costo-OMOC*”.

Para el proceso de optimización se utiliza un algoritmo genético multiobjetivo desarrollado por Kumara Sastry, en el laboratorio de algoritmos genéticos de la Universidad de Illinois [11].

El procedimiento de optimización inicia por la generación aleatoria de una población de conceptos de acuerdo a los intervalos definidos para cada variable de entrada. Todos ellos son evaluados por el modelo de síntesis para determinar su factibilidad, efectividad y costos.

Con estos datos de cada población, el algoritmo muta cada una de los conceptos evaluados dando una mayor probabilidad de “supervivencia” a aquellos conceptos que resultaron como factibles¹. También da un mayor chance de reproducirse a aquellos conceptos que hayan representado un aumento en la efectividad o una reducción en el costo respecto a sus antecesores. De esta manera, tras la ejecución cíclica del procedimiento, finalmente se llega a una población de conceptos óptimos.

Con la población óptima se construye una “Frontera de Pareto”, la cual permite identificar aquellos conceptos que son dominantes, es decir aquellos para los cuales se cumple que no existe ningún otro miembro de la población que tenga mayor costo y menor efectividad. Este conjunto de botes constituyen una herramienta de toma de decisiones, pues a medida que se añada mayor importancia al costo o a la efectividad, mediante la ponderación excluyente de dichos factores, se puede finalmente llegar a la selección de un bote en particular.

¹Esta aproximación al tratamiento de los no factibles, permite salir y entrar a la zona factible, ayudando a combatir los máximos y mínimos locales.

6.2. Modelo de Síntesis

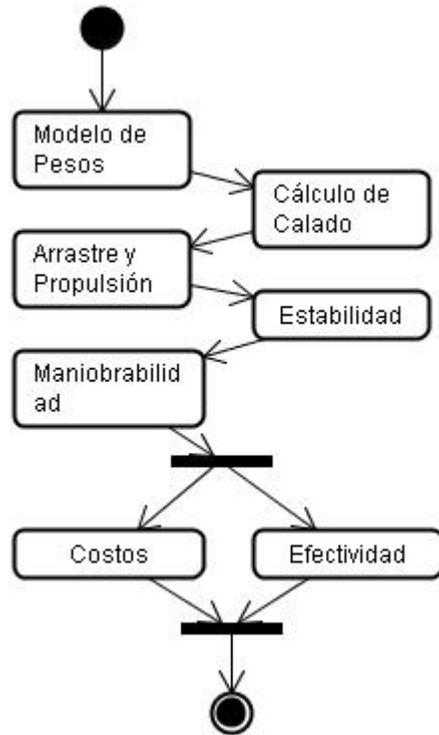


Figura 6.2: Modelo de síntesis.

El modelo de síntesis tiene básicamente dos funciones principales, por un lado se valida la factibilidad de la combinación de variables de diseño generadas y por otro lado se evalúan las variables necesarias para haber la efectividad y el costo de cada concepto.

La secuencia de ejecución inicia por el modelo de pesos, el cual incluye dentro de sí al modelo de cálculos estructurales. Al peso de la estructura se le añaden los pesos por la tripulación, por los equipos, combustible y víveres,

calculando finalmente el desplazamiento, calado y centro de gravedad de la totalidad de la embarcación.

El siguiente paso es el cálculo de la curva de resistencia al avance y potencia, mediante la cual se interpola la velocidad de operación de la embarcación de acuerdo a la combinación propulsiva seleccionada.

Conociendo las condiciones de forma, desplazamiento y centro de gravedad de la embarcación, se realizan los cálculos de estabilidad de la misma, para asegurar que cumpla con las condiciones de seguridad necesarias para su correcta operación.

Por último se calcula la maniobrabilidad de la embarcación.

Los cálculos anteriormente mencionados permiten la evaluación de la efectividad de la embarcación y su costo. En el caso de que una embarcación no cumpla con las restricciones de factibilidad, su costo será asignado como máximo y su efectividad como mínima, dejando que la dinámica del algoritmo genético la elimine de la población resultante.

6.3. Modelo de cálculos estructurales

El modelo de cálculos estructurales tiene la secuencia presentada a continuación:

1. Cálculo del $wcog^2$ de los mamparos transversales:
 - Mamparo de máquinas.
 - Mamparo de colisión.

²Peso y centro de gravedad.

- Mamparo de espejo de popa.
2. Cálculo del *wcog* de los mamparos longitudinales:
 - Mamparo de babor.
 - Mamparo de estribor.
 3. Cálculo del *wcog* del casco:
 - Fondo de casco.
 - Costados.
 4. Cálculo del *wcog* de las cubiertas:
 - Cubierta de máquinas.
 - Cubierta de la zona habitable.
 - Cubierta del pique de proa.
 5. Cálculo del *wcog* de los refuerzos.
 6. Cálculo del *wcog* resultante de la totalidad de los componentes.

A medida que se calculan los componentes, la subrutina principal los almacena en una matriz con la estructura dada en el cuadro 6.3.1. En la figura 6.3.1 se describe la secuencia de cálculos del modelo.

6.3.1. Estructura del código

A continuación se ilustra la estructura de la rutina principal detrás del modelo de cálculos estructurales.

Creación de constantes y estructuras de datos

Para el almacenamiento de los componentes estructurales se crea una matriz de datos de 15 filas por 8 columnas. Se crean constantes para facilitar el uso de cada columna en particular en la tabla. El uso de esta tabla permite la generalización del cálculo del centro de gravedad y peso total y facilita la depuración del modelo.

```
%Matriz de componentes  
componentes = zeros(15,8);
```

```
%Tabla de Componentes
```

```
Tipo = 1;  
Material = 2;  
UnidadPeso = 3;  
Area = 4;  
Peso = 5;  
X = 6;  
Y = 7;  
Z = 8;
```

Se definen también constantes para identificar los tipos de componentes dentro de la tabla, la arquitectura de fabricación y las ecuaciones del modelo.

```
%Constantes  
%Tipo  
CascoFondo = 11;  
CascoCostados = 12;
```

```
MamparoTransversal = 21;
MamparoLongitunal = 22;
Cubierta = 31;
Refuerzo = 41;

%Material
Simple = 10;
Sandwich = 20;

%Ecuaciones
StbSimple = 1;
StbSandwich = 2;
Ptb1 = 3;
Atb = 4;
Wtb = 5;
```

Llamado a componentes estructurales

Para añadir o remover componentes de acuerdo a la arquitectura de la embarcación, basta con agregar o remover llamados a las funciones implementadas, de acuerdo a la parametrización realizada sobre los mismos. Si se desea añadir componentes diferentes a los ya programados se debe tener en cuenta cumplir con la estructura de la tabla de componentes para el correcto funcionamiento de los cálculos de peso y centro de gravedad.

Se calculan los mamparos transversales de acuerdo a:

- Mamparo de máquinas ($x = 1,2xMaquinas$):

```

actual = indActual(componentes);
componentes(actual, 1:8) = mamparoTransversal(L, B, T,
    Beta, BetaP, componentes(actual), xMaquinas*1.2,
    arq(3));

```

- Mamparo de colisión ($x = 0,86L$):

```

actual = indActual(componentes);
componentes(actual, 1:8) = mamparoTransversal(L, B, T,
    Beta, BetaP, componentes(actual), L*0.86, arq(3));

```

- Mamparo espejo ($x = 0,0$):

```

actual = indActual(componentes);
componentes(actual, 1:8) = mamparoTransversal(L, B, T,
    Beta, BetaP, componentes(actual), 0, arq(3));

```

Los mamparos longitudinales:

- Mamparo longitudinal de babor ($y = 0,4875B$):

```

actual = indActual(componentes);
componentes(actual, 1:8) = mamparoLongitudinal(L, B, T,
    Beta, BetaP, 0.4875*B, arq(3), componentes(actual),
    xMaquinas);

```

- Mamparo longitudinal de estribor ($y = -0,4875B$):

```

actual = indActual(componentes);
componentes(actual, 1:8) = mamparoLongitudinal(L, B, T,
Beta, BetaP, -0.4875*B, arq(3), componentes(actual),
xMaquinas);

```

Casco:

- Fondo:

```

actual = indActual(componentes);
componentes(actual, 1:8) = cascoFondo(L, B, T, desp,
Beta,BetaP, componentes(actual), arq(1));

```

- Costados:

```

actual = indActual(componentes);
componentes(actual, 1:8) = costados(L, B, T, desp, Beta, BetaP,
componentes(actual), arq(2));

```

Cubiertas:

- Cubierta principal ($z = zCubierta, x1 = 1,2xMaquinas, x2 = 0,86L$):

```

actual = indActual(componentes);
componentes(actual, 1:8) = cubiertas(L,B,T,Beta, BetaP,
componentes(actual), arq(5), zCubierta, 1.2*xMaquinas,

```

0.86*L);

- Cubierta de motores ($z = T, x1 = 0, x2 = 1, 2xMaquinas$):

```
actual = indActual(componentes);  
componentes(actual, 1:8) = cubiertas(L,B,T,Beta, BetaP,  
componentes(actual), arq(5), T,0, 1.2*xMaquinas);
```

- Cubierta frontal ($z = T, x1 = 0,86L, x2 = L$):

```
actual = indActual(componentes);  
componentes(actual, 1:8) = cubiertas(L,B,T,Beta, BetaP,  
componentes(actual), arq(5), T,0.86*L,L);
```

Y finalmente los refuerzos, equitativamente espaciados en el casco.

```
actual = indActual(componentes);  
componentes(actual, 1:8) = refuerzos(L, B, T, Beta, BetaP,  
componentes(actual));
```

Cálculo del peso y centro de gravedad final

Al final de la ejecución, se hace el llamado a la función *Wcog*, que entrega un vector de 4 datos, peso, centro de gravedad longitudinal, centro de gravedad transversal y centro de gravedad vertical respectivamente, a partir de una matriz de componentes de acuerdo al formato especificado, permitiendo la adición de nuevos componentes.

```
%% 1.3 Calculo de Centro WCOG total
```

```
Wcog = wcog(componentes);
```

i	Propiedad
1	Tipo de componente
2	Tipo de laminado
3	Unidad de Peso (S)
4	Area
5	Peso
6	x
7	y
8	z

Cuadro 6.1: Matriz de componentes estructurales.

6.3.2. Funciones de los componentes

El cálculo de cada componente se realiza mediante a una función implementada para cada tipo, cuyos resultados se almacenan en la matriz de componentes como un registro más. Esto hace que sea particularmente sencillo incluir o remover componentes a la estructura, añadiendo o removiendo llamados a las funciones de componentes con los parámetros necesarios para identificar su posición dentro del bote. En la tabla 6.2 se describen las funciones de componentes, sus entradas y sus salidas.

Cuadro 6.2: Funciones de cálculo de componentes

Función	Variables	
	Nombre	Descripción
mamparoTransversal	Entradas	
	L	Eslora
	B	Manga
	T	Puntal
	β	Astilla Muerta
	β'	Astilla Máxima
	$componente$	Vector del componente
	x	Coordenada del mamparo
Mat	Tipo de laminado	
	Salidas	
	$componente$	Componente evaluado
mamparoLongitudinal	Entradas	
	L	Eslora
	B	Manga
	T	Puntal
	β	Astilla Muerta
	β'	Astilla Máxima
	y	Coordenada del mamparo
	Mat	Tipo de laminado
	$componente$	Vector del componente
	$xMaquinas$	Longitud de máquinas

Función	Variables	
	Nombre	Descripción
	Salidas	
	<i>componente</i>	Componente evaluado
cascoFondo	Entradas	
	L	Eslora
	B	Manga
	T	Puntal
	∇	Desplazamiento
	β	Astilla Muerta
	β'	Astilla Máxima
	<i>componente</i>	Vector del componente
Mat	Tipo de laminado	
	Salidas	
	<i>componente</i>	Componente evaluado
	Entradas	
costados	L	Eslora
	B	Manga
	T	Puntal
	∇	Desplazamiento
	β	Astilla Muerta
	β'	Astilla Máxima
	<i>componente</i>	Vector del componente
	Mat	Tipo de laminado
Salidas		

Función	Variables		
	Nombre	Descripción	
	<i>componente</i>	Componente evaluado	
cubiertas	Entradas		
	L	Eslora	
	B	Manga	
	T	Puntal	
	β	Astilla Muerta	
	β'	Astilla Máxima	
	<i>componente</i>	Vector del componente	
	Mat	Tipo de laminado	
	h	Altura de la cubierta	
	x_1	Coordenada de inicio de la cubierta.	
	x_2	Coordenada final de la cubierta.	
	Salidas		
	<i>componente</i>	Componente evaluado	
refuerzos	Entradas		
	L	Eslora	
	B	Manga	
	T	Puntal	
	β	Astilla Muerta	
	β'	Astilla Máxima	
	<i>componente</i>	Vector del componente	
		Salidas	
		<i>componente</i>	Componente evaluado

6.3.3. Funciones auxiliares

De acuerdo a la parametrización de la geometría del bote, se hace necesario disponer de ciertas propiedades particulares del bote a diferentes extensiones del mismo. Debido a esto se hizo necesario implementar las siguientes subrutinas:

astilla esta función calcula el ángulo de astilla muerta de la embarcación a una distancia x del espejo de la misma. De acuerdo a la parametrización dada en capítulos anteriores, el ángulo de astilla muerta es constante hasta un 60% de la eslora y posteriormente tiene una variación lineal entre β y β' .

C esta función calcula la altura desde la línea base hasta el codillo de la embarcación a una distancia x del espejo.

evaluate debido a la necesidad de permitir la variación en los coeficientes del modelo, se implementó esta rutina para evaluar las funciones del modelo a partir de un archivo de texto que describe cada una de ellas.

indActual calcula el índice de la primera fila vacía en la matriz de componentes y se utiliza para determinar el sitio en donde agregar nuevos componentes.

manga calcula la manga de la embarcación a cualquier distancia x del espejo. Esta tiene una variación parabólica a partir del 60% de la eslora de la embarcación.

puntal calcula el puntal de la embarcación a cualquier distancia x del espejo. De acuerdo a la parametrización inicial, el puntal es igual al puntal

máximo hasta el 80 % de la eslora. A partir de este punto la quilla del bote empieza a subir y por ende el puntal se reduce linealmente hasta ser cero en la eslora de la embarcación.

rad conversión de grados a radianes.

El comportamiento de estas variables a lo largo de la eslora del bote se describe en la figura 6.3.3.

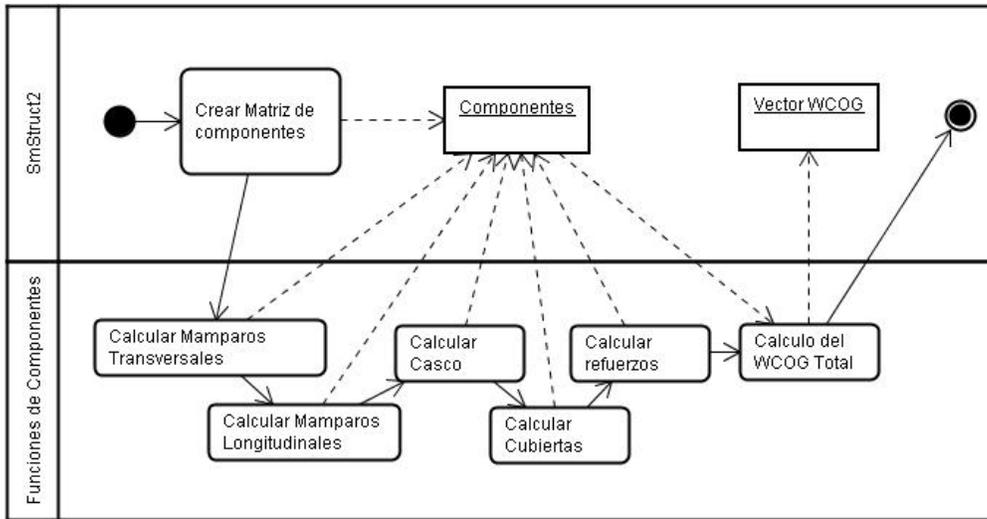


Figura 6.3: Diagrama de actividad del modelo.

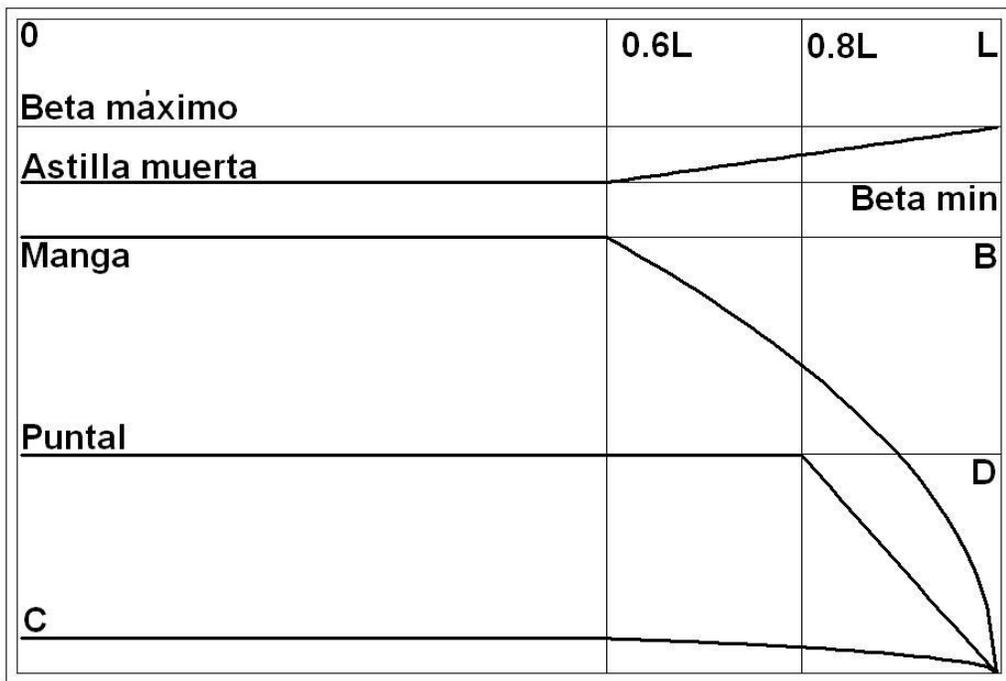


Figura 6.4: Comportamiento de las variables de forma contra la eslora.

Capítulo 7

Metodología de Ajuste y Validación del Modelo

Debido a que el modelo planteado por Hubble aplica para embarcaciones entre 50 y 1500 toneladas, se hace necesario implementar el modelo de manera que pueda ser ajustado para el entorno de operación particular, el cual es entre 3 y 8 toneladas aproximadamente.

Para lograr esta capacidad de ajuste, todos los coeficientes del modelo que conforman los modelos de regresión utilizados son de carácter variable, de manera que la experiencia del operador le permita modificarlos para producir mejores resultados, cuando exista información disponible para su validación.

Debido al carácter lineal del modelo, la parametrización de las funciones se limita solo a los interceptos y las pendientes de las rectas que describen cada variable involucrada. Los datos originales del modelo de Hubble, correspondientes a la formulación presentada en capítulos anteriores, se presentan en la tabla 7.

Debido a que la información utilizada para la validación del modelo, constituye un secreto tanto militar como comercial, no se incluye en este documento. Sin embargo, el error arrojado respecto al peso de las embarcaciones reales con las que fue comparado es alrededor del 7%, superando la expectativa para diseño conceptual, donde el error máximo permitido es del 20%.

Para futuros ajustes, se presenta el procedimiento de ajuste de una variable, para que pueda ser seguido por el usuario interesado cuando este disponga de la información necesaria.

7.1. Metodología de ajuste

De acuerdo a la generalización realizada, el valor resultante de evaluar la ecuación i del modelo, en el punto a corresponde a:

$$Var_i = Evaluar(i, a) = x_i^0 + ax_i^1 \quad (7.1)$$

Por ende las ecuaciones presentadas en capítulos anteriores deben entenderse como los estados actuales del modelo, y pueden variar de acuerdo a los ajustes realizados por el usuario. La figura 7.1 muestra el cambio de las unidades de peso de diferentes componentes estructurales para los coeficientes inicialmente planteados por Hubble.

Al realizar el ajuste del modelo, se debe definir con claridad los intervalos específicos entre los cuáles se han validado los resultados, para evitar realizar extrapolaciones en zonas de evaluación donde los valores resultantes puedan no tener el mismo nivel de precisión. Los intervalos de operación considerados para cada variable de entrada dentro del modelo se presentan en la tabla 7.1.

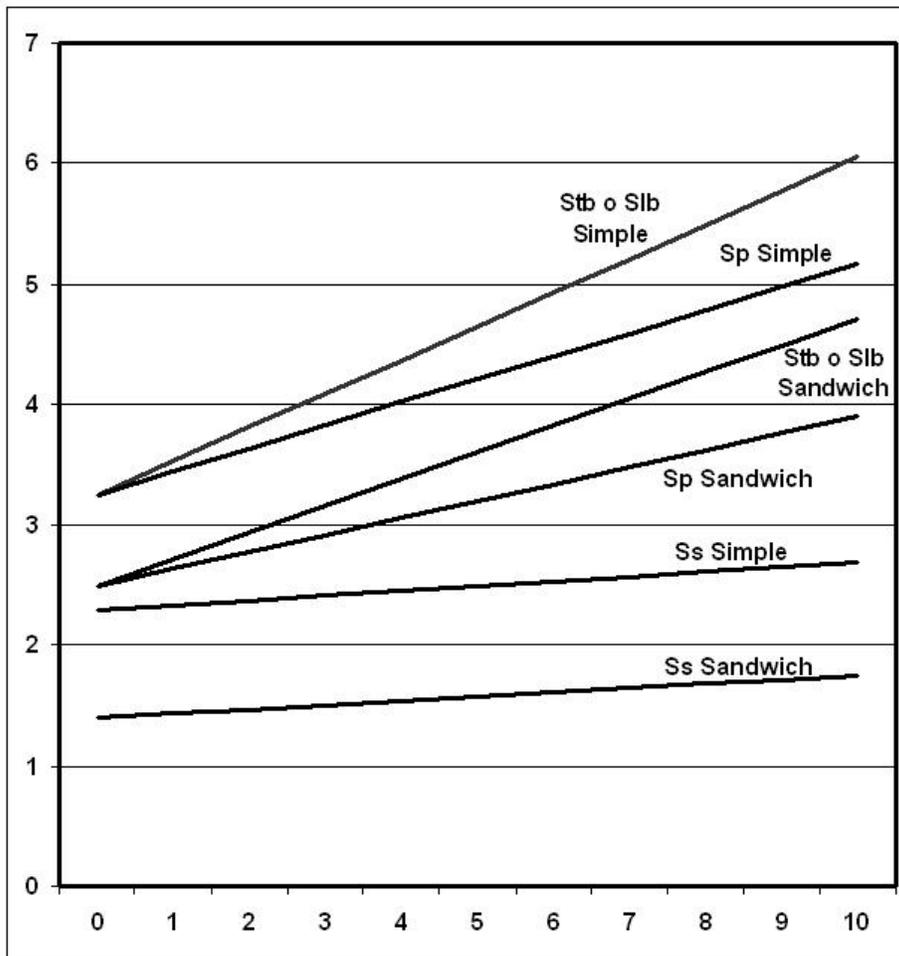


Figura 7.1: Comportamiento de las Unidades de peso (lb/ft^2) de diferentes componentes.

7.2. Ajuste del modelo

A continuación se realiza el ajuste de la ecuación de presión dinámica para la zona del casco de la embarcación. Debido a la poca disponibilidad de información sobre estructuras de este tipo, se realiza el cálculo estructural mediante norma de clasificación, utilizando las reglas del *American Bureau of Shipping*¹ para embarcaciones de alta velocidad.

El cálculo estructural de validación se realiza sobre los dos individuos presentados en la tabla 7.2.

7.2.1. Aplicabilidad de la norma

Primero que todo se determina si los botes a analizar pueden ser considerados como de “Alta Velocidad”. Para esto, según el inciso de *Límites de aplicación*² de la norma se debe cumplir que:

$$\frac{V}{\sqrt{L}} > 2,36 \quad (7.2)$$

En la figura 7.2.1 se puede observar que los botes analizados y sus posibles variantes se encuentran dentro de este rango³.

De acuerdo también al inciso de *Límites de aplicación*, para embarcaciones de casco sencillo debe cumplirse que la eslora sea menor de 130 metros, lo cual es válido para todos los botes analizados.

¹ABS - High Speed Craft [1]

²Parte 1, Sección 1.5.1[1]

³Se utiliza un rango de velocidad entre 28kn y 40kn de acuerdo a la evaluación de efectividad a la que serán sometidos los botes.

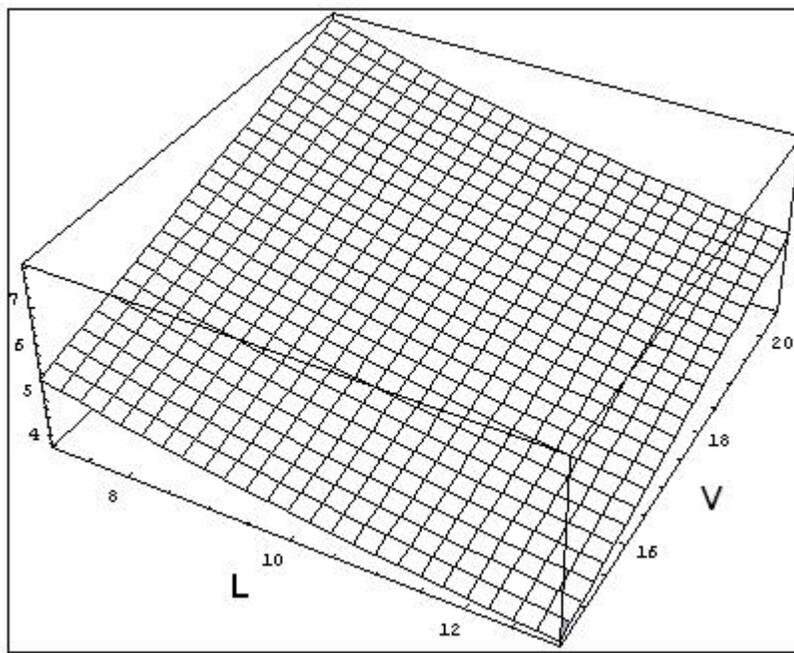


Figura 7.2: $\frac{V}{\sqrt{L}}$

Debido a la relación entre el puntal de la embarcación y su eslora, no se hará una análisis del buque como viga⁴.

$$B < 2D \quad (7.3)$$

7.2.2. Cálculo de la presión de diseño

De acuerdo a la norma, parte 3, sección 8.1.1, la presión de diseño sobre el fondo del casco de una embarcación de planeo debido al *slamming*⁵ esta dada por:

$$P_{bcg} = \frac{N_1 \Delta}{L_w B_w} [1 + n_{cg}] F_D \quad (7.4)$$

Donde N_1 es un factor de corrección de unidades igual a 0,1, $L_w = 90 \%L$, $B_w = B$ y n_{cg} es el máximo numero de gravedades a las que será acelerado el casco, considerandose este como $3g's$, al igual que en el modelo.

Para una estimación inicial del desplazamiento del bote Δ , en la figura 7.2.2 se parte de una población de conceptos de 415 individuos, siendo la serie “A” el peso total de la embarcación, “B” el peso de la estructura y “C” la proporción entre B y A, donde el peso de la estructura constituye alrededor del 45 % del peso total⁶, con una tendencia al aumento a medida que aumenta el tamaño de la embarcación. El eje horizontal de la gráfica esta dado por el producto de la eslora por la manga por el puntal de la embarcación, como

⁴Debe cumplirse que $L/T > 12$.

⁵Impacto del casco de la embarcación contra la superficie debido a la interacción de las las olas encontradas con la sustentación y la boyancia de la embarcación

⁶Todos los botes analizados tienen la misma funcionalidad y un perfil similar. Esta proporción puede cambiar para poblaciones de botes con funciones o aplicaciones diferentes.

una medida del tamaño total de la embarcación. Debido a esto se asume un peso de 4000kgs para el bote a y 6500kgs para el bote b .

La evaluación de P_{bcg} para el bote a es igual a $22,46\text{lb}/\text{m}^2$ y para el bote b es $9,2\text{lb}/\text{m}^2$. DE acuerdo a al coeficiente inicial de Hubble, se encontro un error del 22%. Debido a esto, el coeficiente x^1 para $i = 16$ (*ver cuadro 7*) cambia de 753.4883 a 924.0141, lo que arroja un error inferior al 1% para ambos botes.

El procedimiento anteriormente mencionado, se debe realizar para cada variable, de acuerdo al entorno de operación del modelo, asegurando así la precisión del modelo de acuerdo a la aplicación en la que se encuentre.

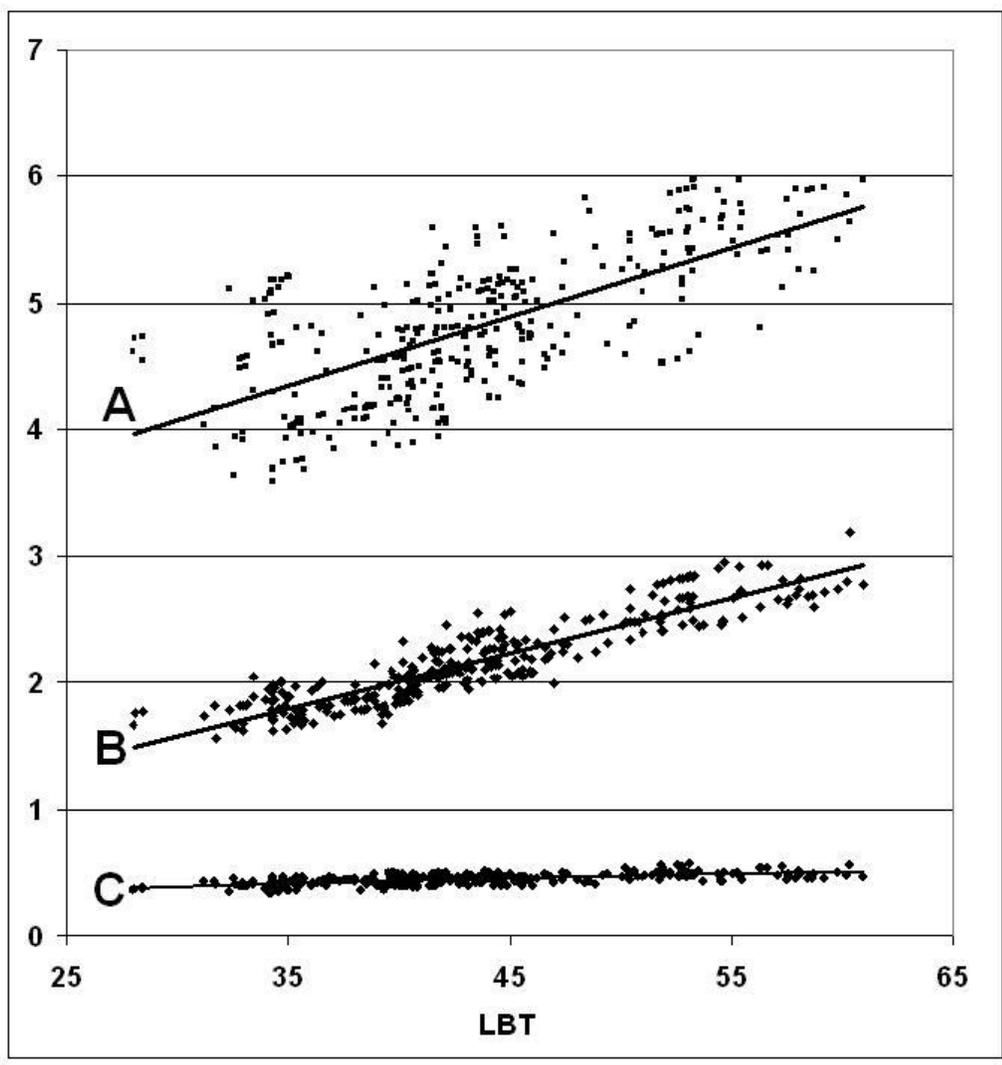


Figura 7.3: Proporción del peso estructural sobre el peso total.

i	Variable	x^0	x^1
1	S_{tb} (Simple)	3.25	0.28
2	S_{tb} (Sandwich)	2.50	0.22
3	P_{tb}	1.77	0.44
4	P_{tb}	1.77	0.44
5	P_{hh}	1.77	0.44
6	S_{bf} (Simple)	3.25	0.19
7	S_{bf} (Sandwich)	2.50	0.14
8	S_{ba} (Simple)	3.25	0.19
9	S_{ba} (Sandwich)	2.50	0.14
10	S_s (Simple)	2.3	0.03
11	S_s (Sandwich)	1.4	0.03
12	P_p	1.77	0.44
13	S_p (Simple)	3.25	0.19
14	S_p (Sandwich)	2.5	0.14
15	W_{fr}	0.0	0.75
16	P_{bf}	0.0	753.4883

Cuadro 7.1: Valores Iniciales del Modelo

$$\begin{aligned}
23 &\leq L \leq 43 && (ft) \\
5.4 &\leq B \leq 11.4 && (ft) \\
2.29 &\leq T \leq 4.9 && (ft) \\
8 &\leq \beta_{min} \leq 24 && (\text{deg}) \\
8 &\leq \beta_{max} \leq 24 && (\text{deg}) \\
\beta_{min} &\leq \beta_{max} && \\
0 &< z_c \leq T && (ft)
\end{aligned}$$

Cuadro 7.2: Rangos de las variables de entrada del modelo.

	<i>a</i>	<i>b</i>	
<i>L</i>	7	13	(<i>m</i>)
<i>B</i>	1,64	3,5	(<i>m</i>)
<i>T</i>	0,7	1,5	(<i>m</i>)

Cuadro 7.3: Individuos de validación.

Capítulo 8

Conclusiones y Recomendaciones

A partir del análisis presentado, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- El peso de la estructura de un bote, así como la posición de su centro de gravedad tienen una incidencia directa en el desempeño de este y en el cumplimiento de las normas que rigen la integridad estructural y la seguridad de operación de las estructuras flotantes.
- La estructura de una embarcación de alto desempeño en materiales compuestos se puede dividir en sus componentes principales, siendo estos el casco, a su vez conformado por el fondo y los costados, los mamparos, los cuales dependiendo de su posición son comúnmente longitudinales o transversales, y las cubiertas o plataformas, siendo estas últimas los paneles colocados horizontalmente en el bote. Para dar ma-

por rigidez a la estructura, se añaden refuerzos que se pueden distribuir tanto longitudinal como transversalmente a lo largo del casco, los cuales pueden ser pequeños y en gran número o grandes y con pocas ocurrencias dentro de la estructura. Esto último depende básicamente del criterio del diseñador, ya que las normas o reglas normalmente seguidas por los diseñadores pautan las proporciones entre el tamaño de los refuerzos y la densidad de su distribución.

- Es necesario establecer normas y parámetros para la ubicación de cada uno de los componentes estructurales mencionados para poder posteriormente generalizar el cálculo del peso y del centro de gravedad de la estructura de una embarcación.
- Al utilizar modelos de regresión para la estimación o simulación de fenómenos físicos, es importante documentar debidamente todas las asunciones realizadas, de manera que el error generado por las mismas esté plenamente identificado. Es también importante que se defina el rango de operación del modelo de regresión y los parámetros de ajuste que este incluya, permitiendo su aplicación posterior en entornos diferentes.

Para el mejoramiento futuro del modelo presentado y el desarrollo de metodologías de estimación de pesos y centros de gravedad de estructuras de embarcaciones de alto desempeño se recomienda:

- Desarrollar las funciones de geometría de la embarcación, de manera que estas puedan describir formas de botes más generales e incluir componentes estructurales menores que puedan influir en los resultados

obtenidos. Añadir la posibilidad de calcular la superestructura de la embarcación cuando sea necesario.

- En el modelo se hace la asunción de que los mamparos transversales no son estancos, sin embargo el mamparo de colisión debe cumplir dicha condición. Se debe ajustar este componente en particular para dicho requerimiento.
- Las normas de clasificación rigen las proporciones entre el tamaño y la cantidad de refuerzos al interior del casco de una embarcación. En el modelo de Hubble estos se asumen uniformemente espaciados a lo largo del casco. Para reflejar de mejor manera la realidad detrás del proceso de diseño de botes, se debería permitir el ingreso de estas proporciones por parte del diseñador o realizar un proceso de optimización alternativo que permita determinar la mejor distribución de refuerzos, ya sea por cuestiones de peso, volumen disponible o resistencia de la estructura resultante.
- Dentro del modelo de Hubble se puede encontrar el cálculo de las propiedades estructurales de embarcaciones de alto desempeño en aluminio y en acero. La implementación de estas formulaciones aumentaría en gran cuantía la capacidad de análisis del modelo.
- El modelo estructural presentado se limita a embarcaciones elaboradas con poliéster reforzado con fibra de vidrio. Existen otro tipo de fibras como el kevlar que pueden soportar esfuerzos cortantes mucho mayores; o como la fibra de carbono, que pueden generar estructuras más livianas que las convencionales. Si bien el empleo comercial de estos materiales

no esta tan difundido, la inclusión de los mismos permitiría al modelo ir acorde a las tendencias de diseño de punta de embarcaciones de alta velocidad.

- Las presiones y aceleraciones a las que se encuentra sometida la embarcacion en el area del casco están simplificadas fuertemente debido a que la no linealidad de estas interacciones aumenta en gran cuantía la complejidad de su solución. Sin embargo la inclusión de estos fenomenos seria provechosa para la robustez y utilidad de la herramienta.
- El modelo esta estructurado de manera que cada componente se calcule por separado. Esta generalización permite remover o añadir componentes de acuerdo al entorno de operación, con ediciones del código fuente que son relativamente sencillas. Sin embargo, sería una gran herramienta para el cálculo de embarcaciones en materiales compuestos implementar herramientas de alto nivel para la adición o remoción de componentes estructurales, permitiéndole al usuario final realizar dichas tareas.

Apéndice A

Glosario

Arfada Traslación vertical de una embarcación.

Astilla Muerta, ángulo de Ángulo existente entre la superficie inferior del casco desde la quilla hasta los codillos respecto a una línea horizontal perpendicular a la quilla de la embarcación.

Babor Con el frente hacia la proa de la embarcación, se refiere al lado izquierdo de la misma.

Casco Estructura principal de la embarcación, localizada en la parte inferior y que define el volumen flotante de la misma.

Cubierta Cada uno de los "pisos" de una embarcación. Cuando no se especifica se refiere a la cubierta "principal", siendo esta la más grande de la embarcación, generalmente a la intemperie y a partir de la cual se mide el puntal.

Cabeceo Oscilación vertical de la proa de una embarcación.

Codillo Esquina inferior lateral del casco, que para las embarcaciones de planeo posee un ángulo definido para causar la separación del agua desplazada por el movimiento de la embarcación y evitar que esta suba hasta la cubierta.

Escora Inclinación de la embarcación respecto a su eje longitudinal.

Eslora Longitud de una embarcación, medida desde la popa hasta la proa de la misma.

Espejo Tipo de popa de embarcaciones, caracterizada por ser plana y por cortar la curvatura del casco.

Estribor Con el frente hacia la proa de la embarcación, se refiere al lado derecho de la misma.

Fuerza Boyante Fuerza ejercida sobre un objeto sumergido total o parcialmente debido a su flotabilidad.

Grados de libertad Notación de la movilidad de un objeto. Un objeto sin ninguna restricción de movimiento, posee seis grados de libertad, siendo tres de ellos relativos a la traslación en los ejes de coordenadas y los tres restantes relativos a la rotación respecto a los ejes de coordenadas.

Manga Distancia máxima medida transversalmente en una embarcación, perpendicular a la quilla de la misma.

Popa Parte posterior de una embarcación.

Porpoising Inestabilidad que presenta una embarcación cuando la frecuencia natural de cabeceo y arfada entra en resonancia con el movimiento

inducido por la interacción con la superficie del agua. Debido a esta resonancia la amplitud de dichos movimientos crece constantemente y puede terminar en la entrada de agua a la cubierta, generalmente en el sector de la proa.

Proa Parte frontal de una embarcación.

Propela Dispositivo de transmisión de potencia mediante la transformación de esta a empuje o propulsión a través de un fluido como el aire o el agua, mediante la rotación de sus aspas, siguiendo los principios de Bernoulli y la Tercera ley de Newton.

Puntal Medida de la altura del casco de una embarcación.

Quilla Esquina inferior del casco, localizada en la mitad de la manga y alrededor de la cual el casco es simétrico.

Trimado Inclinación del buque respecto a su eje transversal.

Apéndice B

Manual de Usuario

A continuación se describen algunos detalles a tener en cuenta para la correcta operación del modelo de cálculos estructurales para botes de alta velocidad en materiales computestos “SmStruct2”. Este modelo ha sido desarrollado y probado en Matlab R2007a.

B.1. Archivos del modelo

En la tabla B.1 se presenta una lista con los archivos necesarios para la operación del modelo.

B.2. Configuración del modelo

Para cambiar los coeficientes de las funciones del modelo, se deben modificar los valores encontrados en el archivo “*coeficientes.txt*”, cuyo estado inicial se presenta a continuación:

% X0	%X1	%Ecuaciones
1 3.2500	0.2800	%StbSimple o SlbSimple
2 2.5000	0.2210	%StbSandwich o SlbSandwich
3 1.7777	0.4444	%Ptb1
4 1.7777	0.4444	%Plb1
5 1.7777	0.4444	%Phh1
6 3.2500	0.1920	%SbfSimple
7 2.5000	0.1400	%SbfSandwich
8 3.2500	0.1920	%SbaSimple
9 2.5000	0.1400	%SbaSandwich
10 2.3000	0.0395	%SsSimple
11 1.4000	0.0350	%SsSandwich
12 1.7777	0.4444	%Pp1
13 3.2500	0.1920	%SpSimple
14 2.5000	0.1400	%SpSandwich
15 0.0000	0.7500	%Wfr
16 0.0000	753.4883	%Pbf

astilla.m
C.m
cascoFondo.m
coeficientes.txt
costados.m
cubiertas.m
evaluate.m
indActual.m
mamparoLongitudinal.m
mamparoTransversal.m
manga.m
puntal.m
rad.m
refuerzos.m
SmStruct2.m
wcog.m

Cuadro B.1: Archivos del modelo de cálculos estructurales

La primera columna corresponde al índice de cada función, la columna X0 es el intercepto y la columna X1 es la pendiente. A partir de cada signo %, MATLAB ignora el resto de la línea. Esto se utiliza para poder insertar comentarios en un archivo a ser leído. Debido a que los datos en el archivo se convertirán en una matriz, es indispensable que todas las filas del archivo tengan el mismo número de columnas.

B.3. Operación del modelo

Para la ejecución del modelo, el usuario debe ir a la línea de comandos de matlab, y hacer el llamado a la función principal “SmStruct2” con los parámetros correspondientes:

```
>>SmStruct2(L,B,T,Beta,BetaP,zC,xMaquinas,arq1,...  
           arq2,arq3,arq4,arq5,desp)
```

donde:

L es la eslora del bote.

B es la manga del bote.

T es el puntal del bote.

Beta es la astilla muerta mínima del bote.

BetaP es la astilla muerta máxima del bote.

zC es la altura de la cubierta principal del bote.

xMaquinas es la longitud del conjunto de propulsión del bote.

arq1 es el tipo de laminado¹ del casco bote.

arq2 es el tipo de laminado de los costados del bote.

arq3 es el tipo de laminado de los mamparos transversales del bote.

arq4 es el tipo de laminado de los mamparos longitudinales bote.

¹Valor “1” para laminado simple y “2” para laminado en sandwich.

arq5 es el tipo de laminado las cubiertas del bote.

desp es un estimado del desplazamiento del bote.

La ejecución posterior de la función entregará un vector de 4 datos, peso, posición longitudinal del centro de gravedad, posición transversal del centro de gravedad y posición vertical del centro de gravedad respectivamente. El peso entregado estará en toneladas y las coordenadas en metros.

Apéndice C

Notación

A_b	Área de fondo de casco.
A_{ba}	Área de la popa del fondo del casco.
A_{bf}	Área de la proa del fondo del casco.
A_{lb}	Área de un mamparo longitudinal.
A_{lb}	Área de un mamparo longitudinal.
A_p	Área de una cubierta.
A_s	Área de los costados del casco.
A_{sa}	Área de la popa de los costados del casco.
A_{sf}	Área de la proa de los costados del casco.
A_{tb}	Área de un mamparo transversal.
$A_{tb, inferior}$	Área inferior de un mamparo transversal.
$A_{tb, superior}$	Área superior de un mamparo transversal.
B	Manga.
G_b	Medio perímetro del casco
H_p	Distancia de una cubierta a la cubierta principal.

H_{tb}	Altura de un mamparo transversal.
L	Eslora.
L_p	def
P_{ba}	Presión sobre la popa del fondo del casco.
P_{bf}	Presión sobre la proa del fondo del casco.
P_{hh}	Presión hidrostática sobre el fondo.
P_{lb}	Presión sobre un mamparo longitudinal
P_p	Presión sobre una cubierta.
P_{tb}	Presión sobre un mamparo transversal.
S_{ba}	Unidad de peso de la popa del fondo.
S_{bf}	Unidad de peso de la proa del fondo.
S_p	Unidad de peso de una cubierta.
S_{tb}	Unidad de peso de un mamparo transversal.
S_s	Unidad de peso de los costados.
T	Puntal.
W_{fr}	Peso de los refuerzos.
W_i	Peso de un componente i .
W_{lb}	Peso de un mamparo longitudinal.
W_p	Peso de una cubierta.
W_s	Peso de los costados.
W_t	Peso total de la estructura.
W_{tb}	Peso de un mamparo transversal.
X_b	Centro de gravedad longitudinal del fondo.
X_{ba}	Centro de gravedad longitudinal de la popa del fondo.
X_{bf}	Centro de gravedad longitudinal de la proa del fondo.

X_{fr}	Centro de gravedad longitudinal de los refuerzos.
X_{lb}	Centro de gravedad longitudinal de un mamparo longitudinal.
$x_{maquinas}$	Longitud de máquinas.
X_p	Centro de gravedad longitudinal de una cubierta.
X_s	Centro de gravedad longitudinal de los costados.
X_{sa}	Centro de gravedad longitudinal de la popa de los costados.
X_{sf}	Centro de gravedad longitudinal de la proa de los costados.
X_t	Centro de gravedad longitudinal de la estructura.
X_{tb}	Centro de gravedad longitudinal de un mamparo transversal.
Y_b	Centro de gravedad longitudinal del fondo.
Y_{ba}	Centro de gravedad longitudinal de la popa del fondo.
Y_{bf}	Centro de gravedad longitudinal de la proa del fondo.
Y_{fr}	Centro de gravedad longitudinal de los refuerzos.
Y_i	Centro de gravedad longitudinal de un componente i .
Y_p	Centro de gravedad longitudinal de una cubierta.
Y_s	Centro de gravedad transversal de los costados.
Y_{sa}	Centro de gravedad transversal de la popa de los costados.
Y_{sf}	Centro de gravedad transversal de la proa de los costados.
Y_{lb}	Centro de gravedad transversal de un mamparo longitudinal.
Y_t	Centro de gravedad transversal de la estructura.
Y_{tb}	Centro de gravedad transversal de un mamparo transversal.
Z_b	Centro de gravedad vertical del fondo.
Z_{ba}	Centro de gravedad vertical de la popa del fondo.
Z_{bf}	Centro de gravedad vertical de la proa del fondo.
z_c	Áltura de la cubierta.

Z_{fr}	Centro de gravedad vertical de los refuerzos.
Z_i	Centro de gravedad vertical de un componente i .
Z_{lb}	Centro de gravedad vertical de un mamparo longitudinal.
Z_p	Centro de gravedad vertical de una cubierta.
Z_s	Centro de gravedad vertical de los costados.
Z_{sa}	Centro de gravedad vertical de la popa de los costados.
Z_{sf}	Centro de gravedad vertical de la proa de los costados.
Z_{sm}	Puntal medio de la embarcación.
Z_t	Centro de gravedad vertical de la estructura.
Z_{tb}	Centro de gravedad vertical de un mamparo transversal.
$Z_{tb,inferior}$	Centro de gravedad vertical del área inferior de un mamparo transversal.
$Z_{tb,superior}$	Centro de gravedad vertical del área superior de un mamparo transversal.
∇_h	Volumen del casco.

Bibliografía

- [1] AMERICAN BUREAU OF SHIPPING: *Guide for building and classing - High Speed Craft*, ABS(2001)
- [2] K. Al-Harby: *Application of the AHP in project management*, International Journal of Project Management 19 (2001)
- [3] J. Carreyette: *Preliminary ship cost estimation*, The Royal Institution of Naval Architects (1977)
- [4] D. Chalmers: *Design of Ship's Structures*, HMSO(1993)
- [5] O. Faltinsen: *Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles*, Cambridge University Press (2005)
- [6] E. Greene: *Marine Composites*, SNAME (2001)
- [7] E. Hubble: *PHMOPT planing hull feasibility model user's manual*, David W. Taylor Naval Ship Research and Technology Center (1982)
- [8] E. Lewis: *Principles of Naval Architecture*, The society of naval architects and marine engineers (1988)
- [9] B. Magrab: *An Engineer's Guide to MATLAB*, Prentice Hall (2000)

- [10] NAVSHIPS: *Ship Work Breakdown Structure*, Naval Ships Systems Command (1973)
- [11] K. Sastry: *Single and multiobjective genetic algorithm toolbox for matlab*, Illinois University (2007)
- [12] J. Tegedor: *Construcción de buques de pesca en poliéster reforzado con fibra de vidrio*, Colegio Oficial de Ingenieros Navales y Oceánicos de España (2001)
- [13] D. Watson: *Practical Ship Design*, ELSEVIER (1998)