

## **Análisis de Resultados Propulsivos en una Lancha Planeadora de 11 m.**

Por: José R. Marín<sup>1</sup>, Livinstong Miranda<sup>2</sup> y Francisco Macas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Marítima, ESPOL, Km 30.5 Vía Perimetral,

<sup>2</sup>Departamento de Diseño, Astilleros Navales Ecuatorianos, Cañar y Vivero

<sup>3</sup>Departamento de Nuevas Construcciones, Astilleros Navales Ecuatorianos, Cañar y Vivero

### **RESUMEN**

Se describen las características principales y las pruebas de mar de lanchas de diseño nacional de 11 metros, con dos propulsores con chorro de agua, impulsados por motores diesel de 500 hp cada uno. El casco tiene formas prismáticas desde Sección media, con un ángulo de astilla muerta de 12°. El material de construcción es aleación de Aluminio 5086. En las pruebas, inicialmente se alcanzaron velocidades de alrededor de 20 nudos, y luego de eliminar algunos pesos, se llegó a velocidades del orden de los 36 nudos. Se aplicó luego la formulación clásica de Savitsky, [6], para estimar la Resistencia al avance de la embarcación para velocidades en el régimen de planeo. Estimando la velocidad del chorro, se determinó su eficiencia, aplicando la formulación de Kim, [4]; las restantes componentes de la eficiencia propulsiva fueron: la de la bomba asumida como 0.80, la de pérdidas mecánicas asumida como 0.95, la Relativa Rotativa asumida como 0.99, y a través del factor de estela y del de Deducción de Empuje, la eficiencia del casco resultó 1.05. A partir de la eficiencia propulsiva se calculó la potencia al eje requerida, pudiéndose razonablemente corroborar los registros durante las pruebas. Se comprobó también la influencia sobre la Resistencia que tiene la posición longitudinal del centro de gravedad, al encontrarse que moviendo 6 personas hacia Popa, significa un incremento en Resistencia del 8%. También se estimó la posibilidad de entrar en zona de inestabilidad en el plano vertical ("*Porpoising*"), [6], y se determinó que en el rango 34-37 nudos, se produciría este fenómeno.

### **1. Introducción**

El problema de estimación propulsiva de un buque es bastante complejo, por la cantidad de variables y por el hecho de manejar un fluido viscoso. En el caso de embarcaciones de alta velocidad, los efectos hidrodinámicos complican aún más el problema, debido a que se producen cambios en Calado medio y asiento de la nave, [8]. Típicamente para la estimación preliminar de la Resistencia al avance se aplica el conocido método empírico de Savitsky, [6], que se ha encontrado muy útil para embarcaciones planeadoras de formas prismáticas y altas velocidades. Sin embargo, es siempre útil comparar los resultados de estimaciones con los que se obtienen en pruebas con la nave real.

### **2. Descripción de la Embarcación**

La embarcación analizada sirve para el transporte de pasajeros, y fue construida por Astilleros Navales Ecuatorianos. Fue diseñada con resistencia estructural para soportar los esfuerzos originados por el servicio que prestará, de conformidad a los criterios de diseños del Servicio de Guardacostas de los Estados Unidos.

El tipo de construcción es mixta, asociada con cuadernas reforzadas en el fondo, costado y cubierta. Lo cual garantiza la resistencia transversal, puesto que las cuadernas reforzadas forman anillo con los baos.

La lancha está equipada con una planta propulsora formada por dos motores estacionarios a diesel que impulsan sendos equipos de propulsión con chorro de agua

(“waterjet”), para alcanzar una velocidad máxima de 32 nudos.

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| Eslora máxima        | 11.00 m   |
| Manga máxima         | 3.80 m    |
| Puntal moldeado      | 1.70 m    |
| Calado total         | 0.68 m    |
| Desplazamiento total | 14.39 ton |

Tabla 2.1.- Dimensiones principales

El sistema propulsor de la lancha está formado propulsada por dos motores Cummins, Modelo QSC 8.3 de 490 HP, 2600 RPM con propulsión waterjet Hamilton Jet, modelo HJ292, capaces de operar en forma segura y confiable en áreas tropicales.

A continuación se presenta el cuadro de estaciones, que incluye una china, y cuerpo prismático desde sección Media. En el apéndice se presenta el plano de Líneas de Formas.

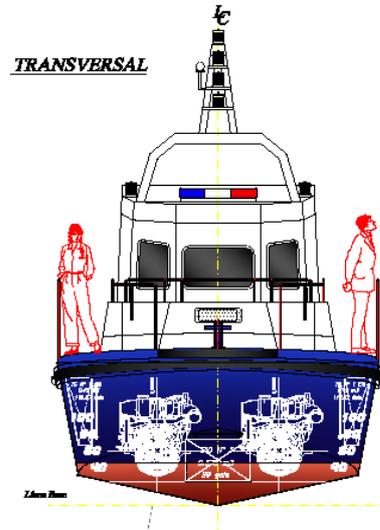


Figura 2.2.- Vista Transversal de la embarcación

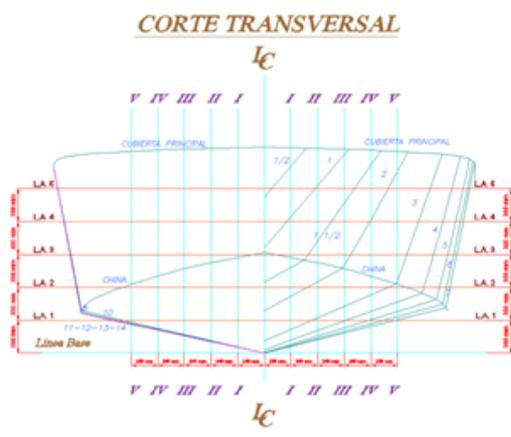


Figura 2.1.- Cuadro de estaciones

En la siguiente figura se muestra una vista transversal de la embarcación, y en el apéndice se presenta el plano de Distribución General.

A continuación en la figura 2.3, se presentan una cuaderna y un mamparo típicos de la estructura, construida con Aluminio 8086.

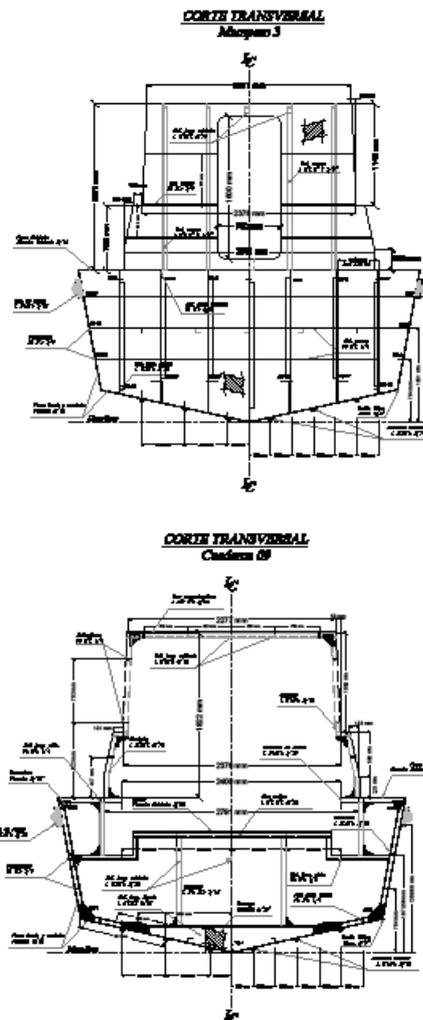


Figura 2.3.- Cuaderna y mamparo típicos

### 3. Resultados de las Pruebas

En septiembre del 2010 se inician las pruebas de mar con las lanchas Guayas y Manabí, junto con el fiscalizador, registrándose que la embarcación no alcanzaba la velocidad contractual de 32 nudos. Una de las soluciones, que se propuso fue colocar flaps en la popa de la embarcación, (esto es, una extensión del casco, instalado en el espejo), siguiendo la recomendación del fabricante de los propulsores con chorro de agua. En el presente caso, los flaps fueron instalados en dirección del fondo, es decir, sin ángulo relativo.

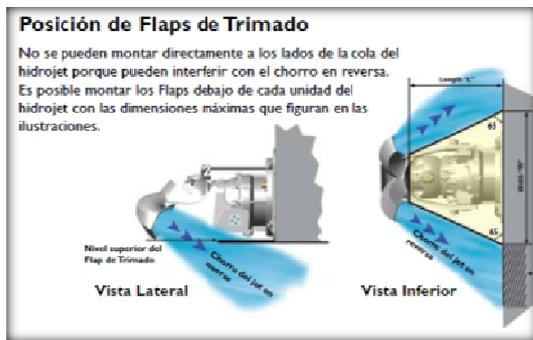


Figura 3.1.- Recomendaciones sobre flaps, [3]

Con dicha implementación, las embarcaciones tuvieron una ligera mejoría en la velocidad de navegación, pero sin poder alcanzar la velocidad requerida. Por ello se procedió a remover pesos de la embarcación, ya que hubo un incremento en el desplazamiento de un 56% aproximadamente, respecto del proyectado; inicialmente la embarcación iba a desplazar 9.52 y por cuestiones ajenas al astillero, finalmente desplazó 14.9 toneladas.

Finalmente, se alcanzaron las siguientes características:

| CONDICIÓN DE CARGA |     |          |
|--------------------|-----|----------|
| Calado Proa        | 0.6 | m        |
| Calado Popa        | 0.8 | m        |
| Combustible        | 280 | Galones  |
| Agua dulce         | 60  | Galones  |
| Tripulación        | 13  | personas |

Tabla 3.1.- Características de las lanchas para las pruebas

Luego de los cambios mencionados, durante las pruebas de la Lancha Manabí se obtuvieron los siguientes resultados:

| RPM  | A favor, nudos |      | En contra, nudos |      | Promedio |       |
|------|----------------|------|------------------|------|----------|-------|
|      | Vel            | GPH  | Vel              | GPH  | Vel      | GPH   |
| 2000 | 12.8           | 23.2 | 8.9              | 23.2 | 10.85    | 23.16 |
| 2200 | 17.4           | 32.2 | 10.8             | 31.6 | 14.1     | 31.86 |
| 2400 | 31.4           | 40.8 | 15.2             | 40.6 | 23.3     | 40.66 |
| 2500 | 36             | 45.6 | 27.2             | 44.2 | 31.6     | 44.86 |
| 2600 | 37.3           | 52   | 32.2             | 52   | 34.75    | 51.96 |
| 2500 | 34             | 44   | 28.8             | 45.6 | 31.4     | 44.76 |
| 2400 | 26.4           | 38.6 | 24               | 40.6 | 25.2     | 39.56 |
| 2300 | 18.7           | 35.8 | 14.5             | 36.6 | 16.6     | 36.16 |

Tabla 3.2.- Velocidades alcanzadas durante las pruebas de la lancha Manabí

Durante las pruebas de la Lancha Guayas se obtuvieron los siguientes resultados:

| RPM  | A favor, nudos |      | En contra, nudos |      | Promedio |       |
|------|----------------|------|------------------|------|----------|-------|
|      | Vel            | GPH  | Vel              | GPH  | Vel      | GPH   |
| 2000 | 13             | 23.2 | 8.7              | 23.2 | 10.85    | 23.16 |
| 2200 | 15.2           | 32.2 | 12.8             | 31.6 | 14       | 31.86 |
| 2400 | 21.3           | 40.8 | 24.7             | 40.6 | 23       | 40.66 |
| 2500 | 33.8           | 45.6 | 30               | 44.2 | 31.9     | 44.86 |
| 2600 | 36.6           | 52   | 32.1             | 52   | 34.35    | 51.96 |
| 2500 | 33.8           | 44   | 28.5             | 45.6 | 31.15    | 44.76 |
| 2400 | 27.5           | 38.6 | 24.4             | 40.6 | 25.95    | 39.56 |
| 2300 | 19.7           | 35.8 | 13               | 36.6 | 16.35    | 36.16 |

Tabla 3.3.- Velocidades alcanzadas durante las pruebas de la lancha Guayas

Es decir, pudo alcanzarse la velocidad requerida por el armador.



Figura 3.2.- Lancha planeando durante prueba

Como anécdota, debido a problemas de contaminación del combustible, las embarcaciones permanecieron dos meses atracadas en muelle, y al momento de probarlas nuevamente, alcanzaron velocidades de 18 nudos a 2600 rpm.

La razón fundamental para este fenómeno fue el efecto de la conchilla que se adhirió cuando la embarcación deja de operar por periodos largos. Las rejillas y toberas de los ductos del sistema con chorro de agua presentaban mucha suciedad, como se ilustra en las siguientes figuras, incrementando la Resistencia y dificultando el flujo por el equipo de bombeo.



Figura 3.3.- Conchilla adherida al casco y al sistema de propulsión

En la actualidad, luego de la limpieza respectiva, en la última navegación, luego de la ceremonia de entrega, las embarcaciones alcanzaron velocidades de hasta 37 nudos.

#### 4. Análisis Propulsivo

**Estimación de Resistencia.-** Se aplicó el método de Savitsky, para estimar la Resistencia al avance en aguas tranquilas, [7], y sin incluir influencia de apéndices. Se consideraron dos desplazamientos, de acuerdo a los cambios en peso que se implementaron, que corresponden a volúmenes de 14 y 14.9 m<sup>3</sup>, respectivamente. Las características en dichas condiciones son:

|                                 | Cond. 1 | Cond. 2 |
|---------------------------------|---------|---------|
| Volum. Desplaz., m <sup>3</sup> | 14.0    | 14.9    |
| Calado Medio, m                 | 0.65    | 0.68    |
| Asiento, m (+Pp)                | 0.20    | 0.20    |
| LCG, m (/ Espejo)               | 4.01    | 4.04    |

Tabla 4.1.- Características hidrostáticas en las Condiciones de prueba

Se asumió en ambas condiciones un KG de 1.14 m, y que el Empuje actúa paralelo a la quilla. El centro del chorro está a 0.29 m por encima del fondo, lo que significa que actúa a 0.69 m por debajo del CG.

La componente friccional de la Resistencia se estimó empleando la formulación ATTC, [8], para el coeficiente adimensional.

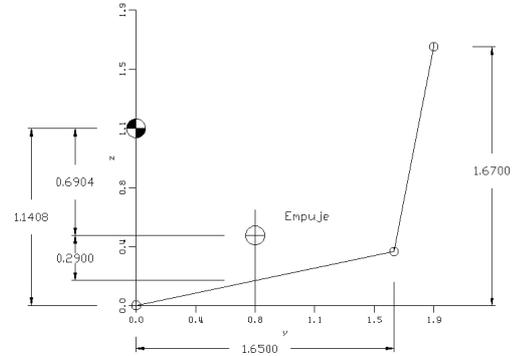


Figura 4.1.- Ubicación del CG y relación con el Empuje

Luego de aplicar el método mencionado, a continuación se grafica la variación de la Resistencia total al avance, en las dos condiciones de carga. Se empieza en una velocidad de 15 nudos, que corresponde a un coeficiente de velocidad,  $C_V = v/\sqrt{gB_T}$  de 1.36, es decir un poco antes de empezar el régimen de planeo:

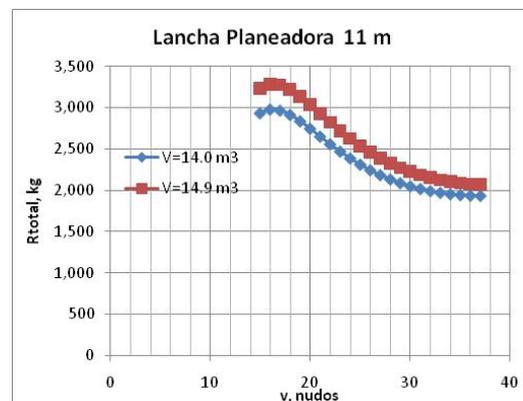


Figura 4.2.- Resistencia al avance en las dos condiciones de carga

En ambas condiciones de carga, se alcanza un valor máximo alrededor de los 17 nudos, y luego la Resistencia se reduce.

A continuación se grafica el cambio en trimado, notándose en forma consistente con el gráfico anterior, que una vez que se sobrepasan los 17 nudos, aproximadamente, se observa una reducción en ángulo de asiento.

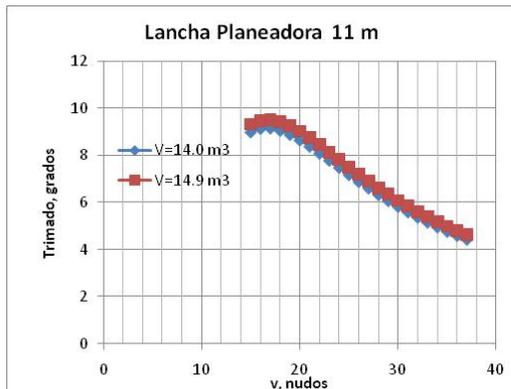


Figura 4.3.- Variación del asiento

### Estimación de Potencia al Eje

Para estimar la Eficiencia Propulsiva, OPC, se ha seguido el proceso resumido por Sarzosa, [5], que aplica el proceso descrito en [4] y emplea algunas ecuaciones de [1]. Hubo necesidad de hacer algunas adaptaciones dado que la referencia primero mencionada fue desarrollado para diseño preliminar.

La eficiencia Propulsiva se calcula como el producto:

$$OPC = \eta_M \eta_P \eta_J \eta_{RR} \eta_h$$

donde:

$\eta_M$ : Eficiencia por pérdidas mecánicas en el eje propulsor,

$\eta_P$ : Eficiencia de la bomba,

$\eta_J$ : Eficiencia del chorro,

$\eta_{RR}$ : Eficiencia Relativa-Rotativa, y,

$\eta_h$ : Eficiencia del casco.

En este trabajo, las eficiencias por Pérdidas Mecánicas, de la Bomba, Relativa-Rotativa, y, del Casco serán asumidas; esta última a través de la asunción de valores para el

coeficiente de estela y de Deducción de Empuje. La eficiencia del chorro se estima según la fórmula siguiente dada por [4]:

$$\eta_J = \frac{2 \left( \frac{v_J}{v_s} - 1 \right)}{\left( \left( \frac{v_J}{v_s} \right)^2 - 1 \right) + \frac{2gh_L}{v_s^2}}$$

donde  $v_J$  y  $v_s$  son las velocidades del chorro y del buque,  $g$  es la aceleración de la gravedad, y,  $h_L$  son las pérdidas en el sistema.

La velocidad del chorro se estima considerando la Conservación del Momentum en el sistema de bombeo. Esto es, el Empuje desarrollado en el sistema se debe al incremento en velocidad del agua:

$$T = \frac{R}{(1-t)} = \rho Q (v_J - v_s)$$

A su vez, el flujo a través del sistema,  $Q$ , corresponde al producto del área de la tobera de descarga por la velocidad del chorro. El diámetro de la tobera se ha asumido como el 70% del diámetro del impulsor de la bomba, de manera que conociendo el Empuje y la velocidad del bote, se puede estimar la velocidad del chorro.

Para los cálculos desarrollados se tomaron los siguientes valores de los parámetros propulsivos, según lo sugiere [2]:

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| Coef. de estela              | 0.03  |
| Coef. de Deducción de Empuje | -0.02 |
| Eficiencia Relativa-Rotativa | 0.99  |

Tabla 4.2.- Parámetros de propulsión sugeridos por [2]

Además, la Eficiencia Mecánica fue asumida en 0.95 y la de la bomba en 0.80, dentro del rango mencionado por [4].

Con todos estos valores, los resultados para la Potencia requerida son:

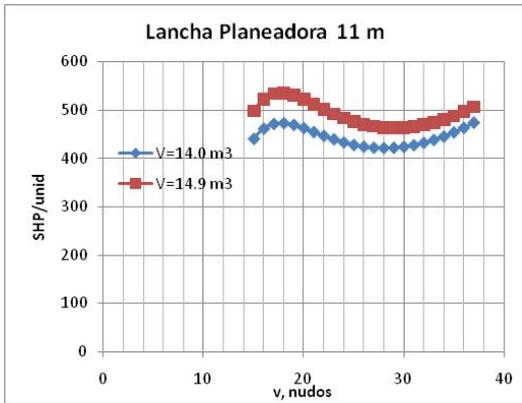


Figura 4.4.- Potencia al eje requerida

Considerando que la potencia al eje disponible es 500 hp, se puede establecer que con la condición de menor desplazamiento se puede alcanzar los 37 nudos, mientras que en la condición de mayor desplazamiento únicamente se llegaría a 15 nudos, aproximadamente. Estas observaciones coinciden, en general, con lo reportado previamente durante las etapas de prueba de la embarcación.

A continuación se graficó el flujo requerido para cada condición, en función de la velocidad a alcanzar.

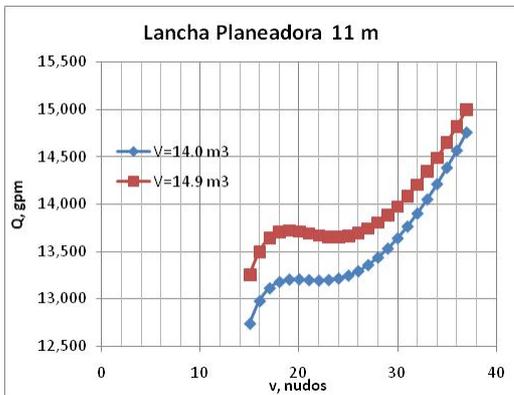


Figura 4.5.- Flujo de agua requerido

Eventualmente se podría relacionar este parámetro con la velocidad de rotación del eje.

Finalmente a continuación se grafica la eficiencia propulsiva total del sistema:

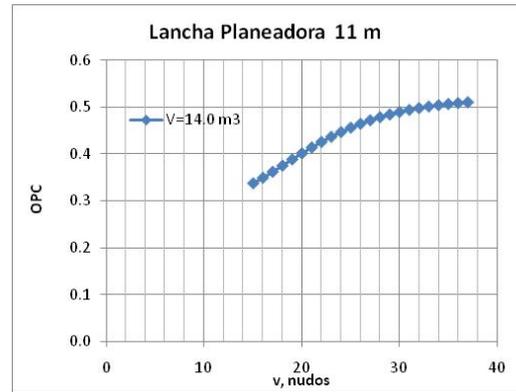


Figura 4.6.- Variación de la eficiencia propulsiva

### Influencia de la posición longitudinal del Centro de Gravedad

Se reportó también durante las pruebas que si todos los tripulantes se quedaban en su posición habitual, no se alcanzaba la velocidad máxima; algunos de ellos debían moverse hacia Proa para incrementar la velocidad. Por ello se consideró el desplazar hacia Popa a 6 tripulantes, a partir de la condición inicialmente considerada; esto representa aproximadamente un desplazamiento del LCG de 16 cm. Se compararon los resultados con el trimado original, con los siguientes resultados:

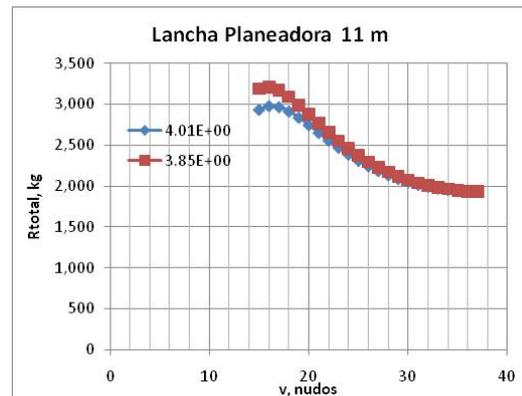


Figura 4.7.- Influencia del LCG sobre la Resistencia al avance

Se nota un incremento notable (254 kg que corresponden al 8%) en la Resistencia en la zona del máximo, previo al inicio del planeo, que corrobora la observación hecha durante las pruebas.

### Límite de Inestabilidad (“Porpoising”)

En el trabajo de Savitsky, [6], también se incluye un gráfico para en forma simplificada estimar la posibilidad de que se alcance una Inestabilidad en el plano vertical, que en Inglés se denomina “Porpoising”. Dicho fenómeno se define como “las oscilaciones combinadas de un bote en Cabeceo y Levantamiento, de amplitud sostenida ó creciente, que se producen cuando la embarcación planea en aguas tranquilas”. Savitsky resume la información disponible en un gráfico en el que en función del Coeficiente de sustentación,  $C_{L\beta}$ , y el ángulo de planeo, se establecen rangos en los que se espera este fenómeno. El coeficiente mencionado se define como:

$$C_{L\beta} = \frac{\Delta}{1 / 2\rho v^2 b^2}$$

En la siguiente figura reproducida del trabajo de Savitsky, se incluye la variación de los parámetros de la lancha. Conforme se incrementa la velocidad el Coeficiente de Sustentación se reduce de manera que la variación de la curva morada va de la derecha hacia la izquierda para las velocidades más altas (37 nudos):

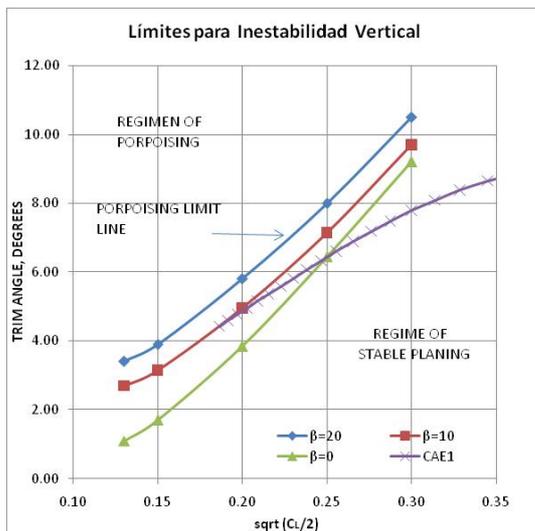


Figura 4.8.- Zonas de Inestabilidad en el plano vertical

Se nota que para los valores más altos de velocidad, esto es los que están hacia el límite izquierdo de la curva de respuesta de la lancha, se sobrepasa el límite de Inestabilidad; esto tomando como límite la

curva para astilla muerta de  $10^\circ$ . Se puede establecer también que si dicho ángulo se incrementara, no habría problemas de inestabilidad.

Se estableció que durante las pruebas, ante la presencia de “olas pequeñas” el movimiento de la embarcación se tornaba muy irregular, y como medida de seguridad se reducía la velocidad. Esta observación es consistente con los resultados al usar la estimación de Savitsky sobre inestabilidad en el plano vertical.

No fue posible aplicar la formulación de [7], para estimar la aceleración vertical del bote, dado que el parámetro del peso ( $\Delta/(0.01L)^3$ ) excede al rango de su uso.

### 5. Comentarios Finales

Se analizó la propulsión de una clase de lanchas planeadoras de 11 metros, propulsadas cada una por dos sistemas con chorro de agua, diseñadas y construidas por Astinave. Se aplicó el método de Savitsky para determinar la Resistencia al avance, y en forma simplificada se determinó la eficiencia propulsiva total, siguiendo la aplicación de Sarzosa que utiliza como base los trabajos de Allison y Kim.

Se comprobó que con el peso con que fueron originalmente completadas, la potencia instalada únicamente les permite alcanzar 15 nudos. Sin embargo, una reducción en peso de alrededor de 1 tonelada, permite que las embarcaciones alcancen los 37 nudos de velocidad, al sobrepasar el máximo ángulo de planeo.

También pudo comprobarse que si el centro de gravedad se moviera hacia Popa, como por ejemplo al desplazarse 6 personas, el incremento en Resistencia sería del 8% para una velocidad de 15 nudos. Esto explica la observación durante las pruebas de que debían tener algunos tripulantes “hacia Proa” para alcanzar la velocidad de contrato.

También se analizó la posibilidad de alcanzar una situación de Inestabilidad en el plano vertical (“Porpoising”). Se determinó que para las velocidades más altas del rango analizado (34-37 nudos), según los resultados de Savitsky, se sobrepasa el límite de inestabilidad. Esto

concuera con la observación de que unas pocas olas eran suficientes para hacer reducir la velocidad por el peligro de zozobra de la embarcación. Posiblemente este problema podría reducirse si se incrementara el ángulo de astilla muerta de la embarcación.

### **Recomendaciones**

En el caso de embarcaciones planeadoras, además de la velocidad de rotación a cada velocidad del buque, deberíamos reportar el ángulo de asiento, dado que su cambio es elevado en este régimen. En este sentido sería recomendable que si se desarrollan pruebas de velocidad se reporten también las condiciones de velocidad del viento durante las pruebas, y si fuera el caso, profundidad del sitio.

Sería conveniente desarrollar también un Análisis de Cavitación, aunque durante las pruebas no se reportó problema alguno en este respecto.

### **Agradecimiento**

En nuestro medio, pocas oportunidades se tienen en que las universidades trabajan en conjunto con la industria. Afortunadamente este trabajo rompe esa proposición. La actitud del Gerente General de Astinave, y de los Jefes de Diseño y de Nuevas Construcciones son admirables, y deben recibir reconocimiento.

### **Referencias Bibliográficas**

- [1] Allison, John, Marine Waterjet Propulsion. SNAME Transactions, vol. 101, 1993, pp. 275 – 335.
- [2] Blount, D., y Bartee, R., Design of Propulsion Systems for High-Speed Craft. SNAME, Local meeting, 1996.
- [3] Hamilton Waterjet, Manual de Diseño de la Serie HJ de Hidrojets. Nueva Zelanda, 2009
- [4] Kim, Hun Chol, Hydrodynamic Aspects of Internal Pump-Jet Propulsion. Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan.
- [5] Sarzosa, D., Diseño de un Sistema de Propulsión con Chorro de Agua y Construcción de un Prototipo para una Embarcación Fluvial. Tesis de Ingeniero Naval, ESPOL, Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, 2006.
- [6] Savitsky, D., Hydrodynamic Design of Planing Hulls. Marine Technology, Vol. 1, No. 1, 1964.
- [7] Savitsky, D., y Brown, P.W., Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water. Marine Technology, Vol. 13, No. 4, 1976
- [8] Van Manen, J.D., y Van Oossanen, P., Resistance, cap. 5 en PNA vol. II, editado por Lewis, E. SNAME, 1988.

Apéndices

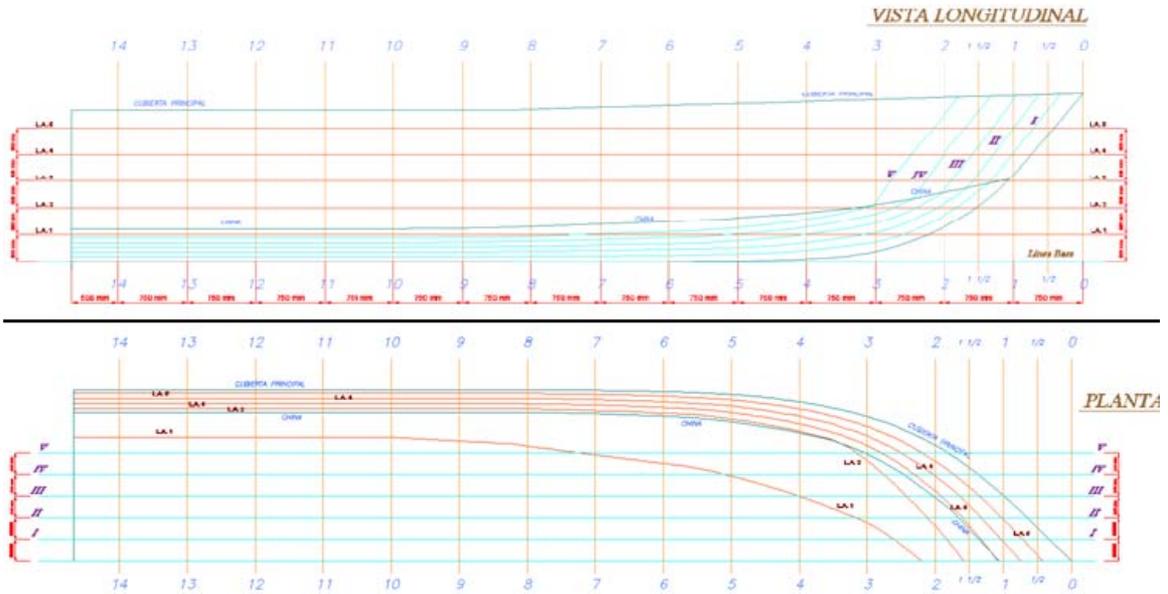


Figura A.1.- Líneas de Formas

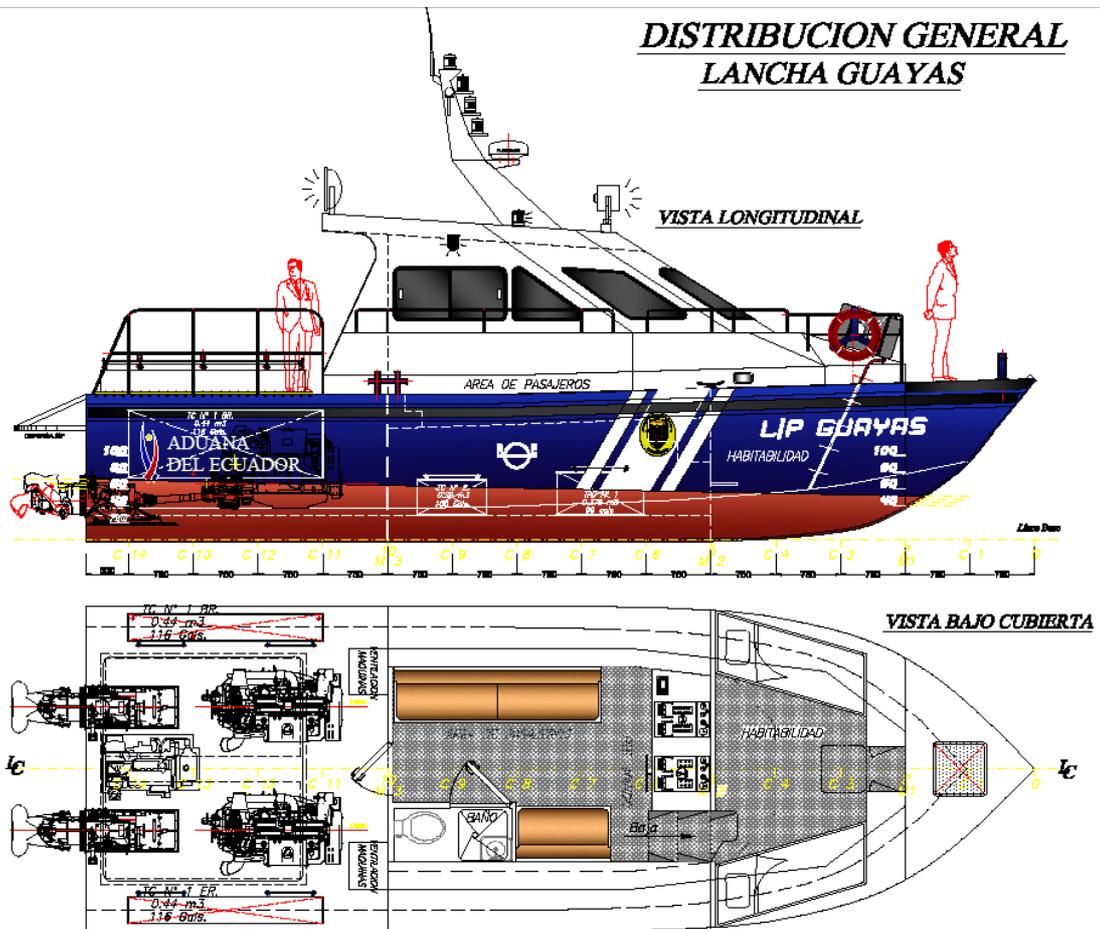


Figura A.2.- Distribución General

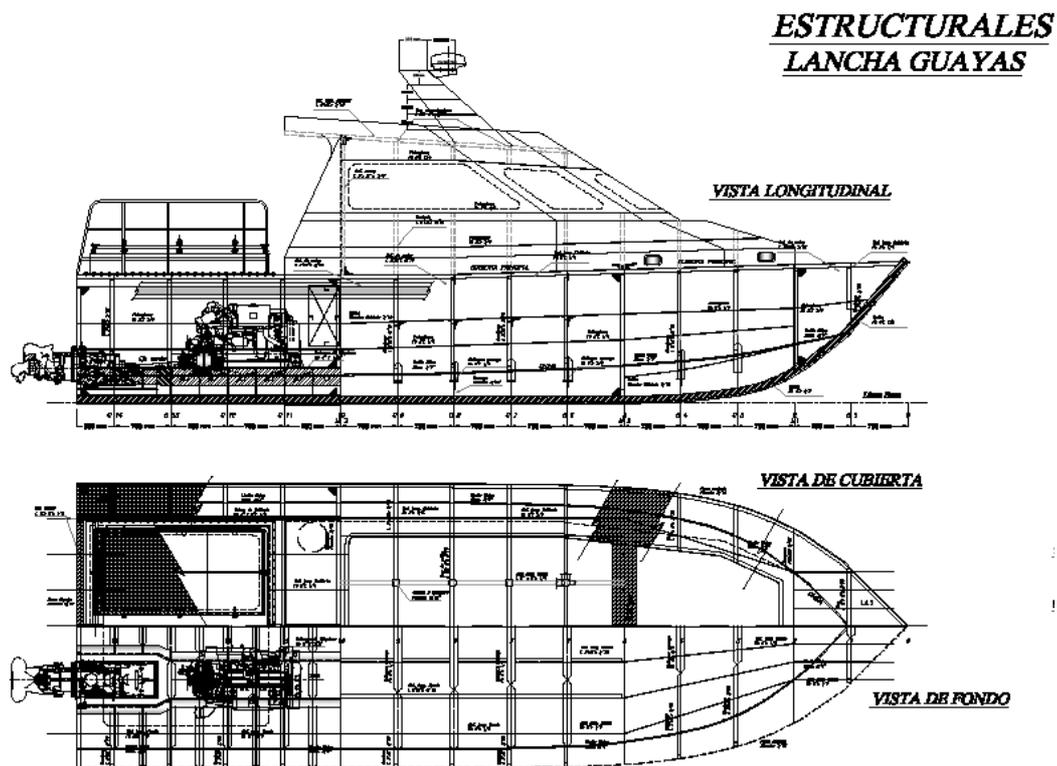


Figura A.3.- Estructurales Principales