

# **Importancia de la implementación del control de pesos en la producción de embarcaciones rápidas en materiales compuestos. Caso de estudio: LPR**

**Roberto Omar Morante Villareal**

Jefe Departamento de Estructuras y Materiales, COTECMAR

[rmorante@cotecmar.com](mailto:rmorante@cotecmar.com)

Km. 9 Zona Industrial Mamonal, Cartagena – Colombia

Telefono: (57) (5) 6685033 ext. 272

Telefax: (57) (5) 6685377

## **RESUMEN**

La estimación de pesos durante el diseño de embarcaciones tiene una extrema relación con la producción de las mismas debido a que su desempeño depende mayormente del desplazamiento final y de la posición de su centro de gravedad. En embarcaciones construidas en materiales compuestos, en donde las especificaciones finales de fabricación están íntimamente ligadas a la pericia del operario, es vital establecer e implementar un proceso de control de pesos que nazca desde la concepción del diseño básico, que prevalezca a través del diseño contractual y de detalle, y de la producción, y que finalice en las pruebas de puerto previas a la entrega de las embarcaciones, lo cual consiste en establecer inicialmente un peso objetivo basado en capacidades de producción o requerimientos de diseño, luego generar estrategias de control de pesos basadas en índices de producción como porcentajes de peso de resina y fibra, métodos de laminación, permutación y combinación piezas, etc. y ejecutar estrategias de corrección de pesos basadas en funciones de desempeño de la embarcación como su velocidad, estabilidad, comportamiento dinámico etc. La construcción de tres lanchas rápidas de patrullaje en ríos (LPR 40`) es el caso de estudio presentado en este trabajo, aquí se detallan las diversas opciones evaluadas para la implementación del control de pesos y la implementación misma durante la producción. Además, se presentan simulaciones del comportamiento de la embarcación por etapas de avance de la producción cada vez más confiable hasta llegar a la entrega del producto durante las pruebas. Finalmente se detalla un modelo de control que garantizó una entrega del producto acorde a las necesidades de su cliente desde el punto de vista operacional.

## **ABSTRACT**

*The weight estimation in small boat design and construction has strong relationship with the boat displacement and the final position of its centre of gravity. In composite materials boats where the final manufacturing specification are closely linked to the worker`s skill and expertise, there must exist a weight control process in all design stages, during construction*

*and until the sea trial test. The implementation of this process imply to all shipyard departments involved in the boat production once there are contractual agreements, and when initially it is established a goal weight based on production capacity and design requirements, later on generate weight control strategies based on production metrics as percentages by weight of resin and fiber, laminating methods and piece permutation, and finally carry out strategies for weight correction based on boat performance as speed, stability, dynamic behavior, etc. Additionally, there are uncertainties attributed to other materials and equipment specifications where the weight control needs to be managed as limited design space with a rational acquisition process targeting to the best boat performance. The construction of three fast riverine patrol boats (LPR) is the case study presented here and this work describe the different activities which can be carry out for the weight control implementation.*

***Palabras claves:*** Lancha patrullera de río (LPR), Diseño de Experimentos (DOE) pesos, monitoreo, incertidumbres, velocidad, desempeño, pruebas de mar

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

Una variedad de términos como ingeniería del control de pesos o estimación de propiedades de masa se usan a menudo cuando se trata de pesos para diseño y construcción de embarcaciones. Generalmente los procesos implícitos en esta disciplina no siempre son atendidos en igual medida cuando los requerimientos varían de uno a otro diseño o del tipo de embarcación y del material de construcción, pero más allá de esa clasificación, el control de pesos comprende no solo el cálculo de los mismos y sus centros de gravedad aplicado a los componentes a bordo sino también su relación con aspectos técnicos y de desempeño, económicos y de riesgo.

Tanto es así, que la sola desatención de efectos acumulativos de errores relativamente pequeños en la ingeniería de pesos puede conducir a desempeños insatisfactorios que a su vez pueden amenazar el al entrega final de una embarcación.

Diversas consideraciones pueden ser aplicables a un proyecto de construcción cuando se trata de cumplir los requerimientos iniciales a través de la estricta administración de pesos, mas aun cuando los parámetros a controlar tienen variabilidad y muchas veces dependen de factores estocásticos como la pericia de operarios, su experticia y hasta el ánimo mismo en las condiciones de trabajo. Esto no siempre ocurre en embarcaciones de

acero o de aluminio, pero sí y muy a menudo cuando se fabrican embarcaciones en materiales compuestos y con una infraestructura no automatizada, en donde la variabilidad de las condiciones finales de la estructura y componentes fabricados por las personas es muy alta, lo que hace necesaria la implementación de modelos de control que contemplen lo siguiente:

- Análisis profundo de los requerimientos
- Definición de las variables críticas, sus límites y restricciones,
- Monitoreo continuo y registro de trazabilidad de pesos y centros, y su relación con los acuerdos contractuales,
- Análisis estadístico de datos de pruebas preliminares y proyecciones futuras de pesos,
- Implementación de metodologías de evaluación y selección de materiales basados en desempeño, costo y riesgo,
- Validación de las estimaciones mediante muestreo simple; y,
- Pruebas finales y validación del diseño

Por ello, es vital establecer e implementar un proceso de control de pesos que nazca desde la concepción del diseño básico, que prevalezca a través del diseño contractual y de detalle, y de la producción, y que finalice en las pruebas de puerto y de mar previas a la entrega de las embarcaciones. Esto consiste en establecer inicialmente un peso objetivo basado en capacidades de

producción o requerimientos de diseño, luego generar estrategias de control de pesos basadas en índices de producción como porcentajes de peso de resina y fibra, métodos de laminación idóneos a ser usados, permutación y combinación piezas, etc. y a la vez ejecutar estrategias de corrección de pesos basadas en funciones de desempeño de la embarcación como su velocidad, estabilidad, comportamiento dinámico etc. Esto implica que no solo esté involucrado el personal de ingeniería alrededor del proyecto, sino también el cliente, los proveedores de equipos, proveedores de material de alta rotación y las entidades de planeación y construcción del astillero, los cuales deben conocer la estrategia de control de pesos que se está llevando para establecer márgenes de diseño, de incertidumbre e incluso cláusulas de penalidades por incumplimiento de pesos a proveedores de equipos que indican pesos mediante catálogos que no son cumplidos al momento de su entrega, o como compromisos previos de personal de producción con objetivos de densidades de laminados por el uso del proceso de fabricación.

A continuación y basado en las consideraciones anteriores se detalla un modelo de control de pesos aplicable a la construcción de embarcaciones en

materiales compuestos que garantiza una entrega del producto acorde a las necesidades del cliente desde el punto de vista operacional. Luego se detallan las diversas actividades evaluadas para la implementación del control de pesos durante la producción de tres embarcaciones de alta velocidad (LPR 40`), además se presentan simulaciones del comportamiento de la misma por etapas de avance de la producción hasta llegar a la entrega del producto durante las pruebas.

## **2. MODELO DE CONTROL DE PESOS**

Este modelo propuesto de control de pesos en embarcaciones fabricadas en materiales compuestos persigue establecer un desplazamiento objetivo y una posición del centro de gravedad basado en los requerimientos contractuales de diseño, en establecer qué pesos son predominantes e influyentes en mayor medida en el diseño y cuáles no, y en definir márgenes, límites y restricciones a las variables afectadas por esos pesos para luego adoptar estrategias de corrección con el fin de mantener el objetivo inicial. En seguida vendría un registro y monitoreo de esos pesos que generen tendencias y alertas basadas en variaciones a través de la construcción de la embarcación. Esto puede considerarse aplicable a todos los proyectos de

construcciones de embarcaciones como objetivos generales e independientes, los cuales a su vez derivarán en tareas específicas relacionadas al tipo de embarcación, acuerdos contractuales y sus requerimientos propios de desempeño.

### ***Requerimientos de diseño***

Siendo así, las características principales de la lancha patrullera de río de alta velocidad con capacidades combativas para la ARC se describen en la figura 1 y tabla 1.

### ***Márgenes y Límites***

La LPR 40` fue inicialmente concebida para construirse en aluminio naval por lo que aquellas características iniciales sirvieron como partida para mejorar sus condiciones de velocidad al rediseñarse en materiales compuestos. Este rediseño en materiales compuestos fue realizado mediante la determinación de los índices de producción del astillero constructor en cuanto a materiales compuestos, y que a la vez servirían para establecer márgenes de diseño y crecimiento de pesos por grupos constructivos. Para esto, se llevaron a cabo pruebas de laminados por procesos y por operarios a diferentes porcentajes de peso de resina y fibra, y midiendo la variación existente para alcanzar las características mínimas requeridas según la tabla 2 y 3.

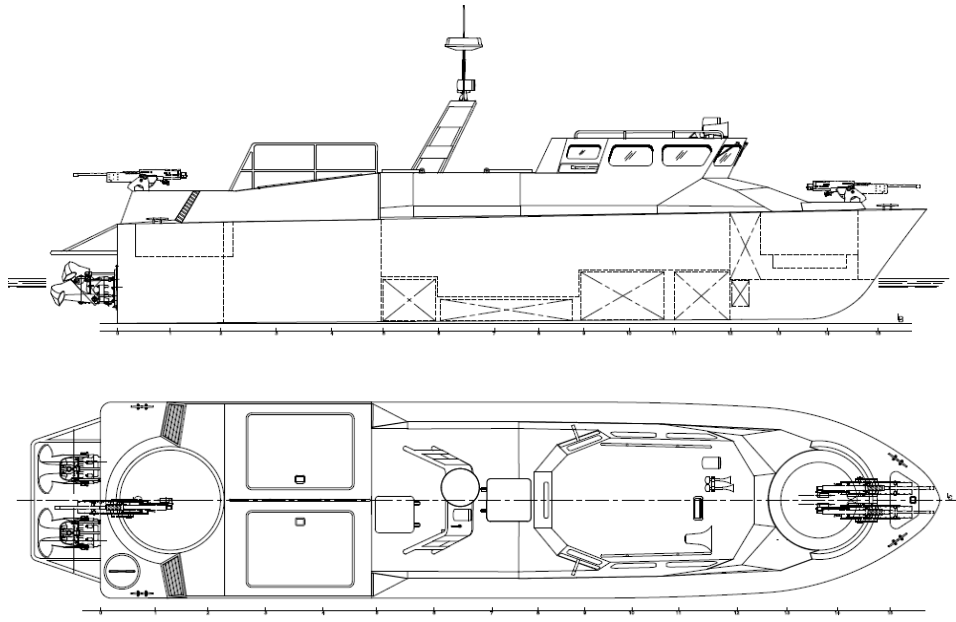


Figure 1.- Lancha patrullera de rio, 40 pies<sup>1</sup>

| PERFORMANCE            |  | PROPULSION                 |  |
|------------------------|--|----------------------------|--|
| Max Speed:             | 29 Knots (53.7 Km/hr)                        | Main Engines:              | 2X 503 BHP@2500 RPM  |
| Endurance:             | 5 Days                                       | Propulsion:                | 2X Water Jet   |
| Range:                 | 500 Kms                                      | AUXILIARY SYSTEMS          |  |
| DIMENSIONS             |  | Electric Power Generators: | 1X 4.6kVA @ 60 Hz  |
| Length:                | 12,70 m                                      | Air Conditioning System:   | 2X 5000 BTU/h  |
| Breadth:               | 2,80 m                                       | Steering Systems:          | 2X Hydraulic Nozzle  |
| Depth:                 | 1,53 m                                       | Fire Extinguishing:        | CO2 Fixed for engine room,<br>4X ABC Portable extinguisher |
| Draft:                 | 0,65 m                                       | Anchor:                    | Danforth Type  |
| Displacement:          | 12 Ton                                       | Bilge Pumps:               | 4X 2000 GPH<br>1X Engine Driven                            |
| CAPACITIES             |  | NAVIGATION                 |  |
| Diesel Oil:            | 625 Gal                                      | Radar:                     | 24 MN  |
| ACCOMMODATIONS         |  | Spotlight:                 | Search   |
| Crew:                  | 06 Crew                                      | COMMUNICATIONS             |  |
| GUNS (mounts for guns) |  | VHF, UHF, HF               |  |
| HMG's:                 | 1X MH2B Double<br>1X MH2B or MK 19<br>2X M60 |                            |  |
| ARMOR                  |  |                            |  |
| Balistic Protection:   | NIJ Level III<br>(NATO 7.62X51 Cal)          |                            |  |

Tabla 1.- Características de LPR basadas en requerimientos de diseño<sup>1</sup>

|                            | Carbon/<br>Vynilester | Glass/<br>Epoxy | Glass/<br>Vynilester |
|----------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
| Modulo de Young (GPa)      | 181                   | 38,6            | 38,6                 |
| Relacion de Poisson        | 0,28                  | 0,26            | 0,26                 |
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 1225                  | 610             | 496                  |

Tabla 2.- Propiedades mínimas para reforzos, vagras y cuadernas<sup>2</sup>

|                            | Carbon/<br>Vynilester | Glass/<br>Epoxy | Glass/<br>Vynilester |
|----------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
| Modulo de Young (GPa)      | 70,27                 | 18,97           | 22,36                |
| Relacion de Poisson        | 0,29                  | 0,27            | 0,138                |
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 405,4                 | 254             | 218,6                |

Tabla 3.- Propiedades mínimas para paneles

Las conclusiones fueron que el valor esperado de la relación resina/fibra estaría entre 47/53 y 57/43 con un nivel de confianza del 5%. En base a estos resultados, se predijo que el peso de la estructura estaría alrededor de 2150kg

manteniendo una incertidumbre del 16% por efectos de producción (traslapes, perdidas, condiciones ambientales, etc.) y en base a ello se difundió una primera etapa del estado de pesos (tabla 4). Los márgenes para maquinarias y equipos

fueron establecidos dentro de un margen 25% aproximadamente.  
 global de diseño, que al final contabilizo

|                                 | PESO               | VCG           | TCG           | LCG           |
|---------------------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| GRUPO 100 (Estructura)          | 2184,81 kg         | 0,94 m        | 0,00 m        | 6,33 m        |
| GRUPO 200 (Propulsión)          | 2996,60 kg         | 0,72 m        | 0,02 m        | 9,18 m        |
| GRUPO 300 (Electricidad)        | 537,75 kg          | 1,18 m        | -0,02 m       | 7,20 m        |
| GRUPO 400 (Electrónica)         | 53,75 kg           | 2,13 m        | -0,05 m       | 3,63 m        |
| GRUPO 500 (Sistemas Auxiliares) | 252,61 kg          | 0,87 m        | 0,18 m        | 4,32 m        |
| GRUPO 600 (Acomodaciones)       | 969,10 kg          | 0,22 m        | 0,01 m        | 0,53 m        |
| GRUPO 700 (Armamento)           | 1451,00 kg         | 0,99 m        | 0,02 m        | 4,86 m        |
| GRUPO F (Consumibles)           | 2845,00 kg         | 0,61 m        | 0,00 m        | 5,45 m        |
| <b>TOTAL</b>                    | <b>11290,62 kg</b> | <b>0,76 m</b> | <b>0,01 m</b> | <b>6,16 m</b> |

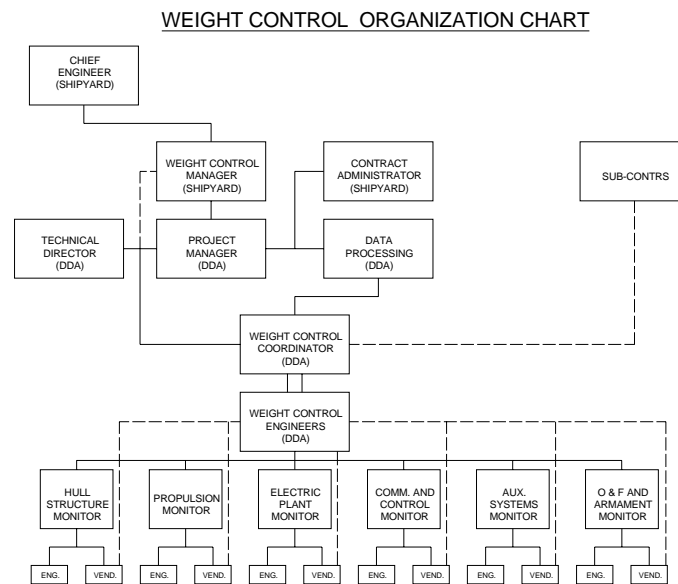
**Tabla 4.- Estimación inicial de pesos y centros LPR.**

***Variables a Monitorear (Desplazamiento y KG Limite)***

Esta embarcación posee un casco de planeo por las exigencias de velocidad para cumplir sus misiones, además de poder acceder a lugares de bajo calado. Lo anterior condujo a decidir lo determinante que debe ser la atención en la posición longitudinal del centro de gravedad para alcanzar la velocidad contractual y en el desplazamiento final para lograr el acceso a dichos lugares poco navegables por el bajo calado.

Una vez conocidos los requerimientos contractuales del proyecto y haber establecido los márgenes y variables críticas para el tipo de embarcación se procedió a desarrollar estudios del KG<sup>3</sup> y

LCG<sup>4</sup> límites para determinar cuantitativamente la influencia de los pesos, límites y restricciones de las variables relacionadas y poder luego establecer las acciones de corrección a desviaciones que se presentaron. Para ello, los diferentes grupos constructivos a través de la lista preliminar de materiales a utilizar y sus ubicaciones a bordo, estimaron la posición del centro de gravedad (C.G.) y el peso de la embarcación para la condición ligera, adoptando una organización interina para este proyecto que se muestra en la figura 2.



**Figure 2.- Organización de control de pesos adoptada<sup>5</sup>.**

La determinación del KG límite consistió en encontrar la posición más alta y permisible del centro de gravedad para un rango de desplazamientos de la embarcación en donde se evaluaron los siguientes criterios:

- Coding IMO (IMO code on intact stability A.749(18) amended to MSC.75(69))
  - Máximo ángulo de escora debido al giro de la embarcación
  - Vientos severos y criterios de balance
- Código IMO para embarcaciones rápidas (IMO HSC Code MSC.36(63))
  - Áreas bajos las curvas GZ vs. ángulo de escora
  - Angulo de máximo GZ
  - GM inicial

El KG límite se escogió basados en los valores de KG que condujeran a que los criterios anteriores fallen; las conclusiones obtenidas se muestran en la figura 3 y fueron las siguientes:

- Cuando la embarcación estaba en reposo, el KG estaba limitado por el criterio de áreas bajo la curva GZ y GM inicial.
- El KG estimado preliminarmente (VCG=0.76, ver tabla 4) era menor que el máximo KG permitido calculado anteriormente para las condiciones de reposo de la embarcación, siendo este ultimo 1.06m para 11.29ton con criterios de GZ y GM.
- Para las condiciones de velocidad de menores a 15 nudos, el máximo KG permitido era de 0.92m>0.76m.

- Cuando la velocidad de la embarcación era mayor o igual a 15 nudos, el KG se verá limitado por el criterio de ángulo de escora debido al giro de la embarcación. Sin embargo, para velocidades mayores a 19.6 nudos el máximo KG permitido era de 0.76m

o cualquier valor menor. Es decir, para maniobras de giro realizadas a una velocidad mayor a 19.6 nudos, este criterio de estabilidad no se cumplía.

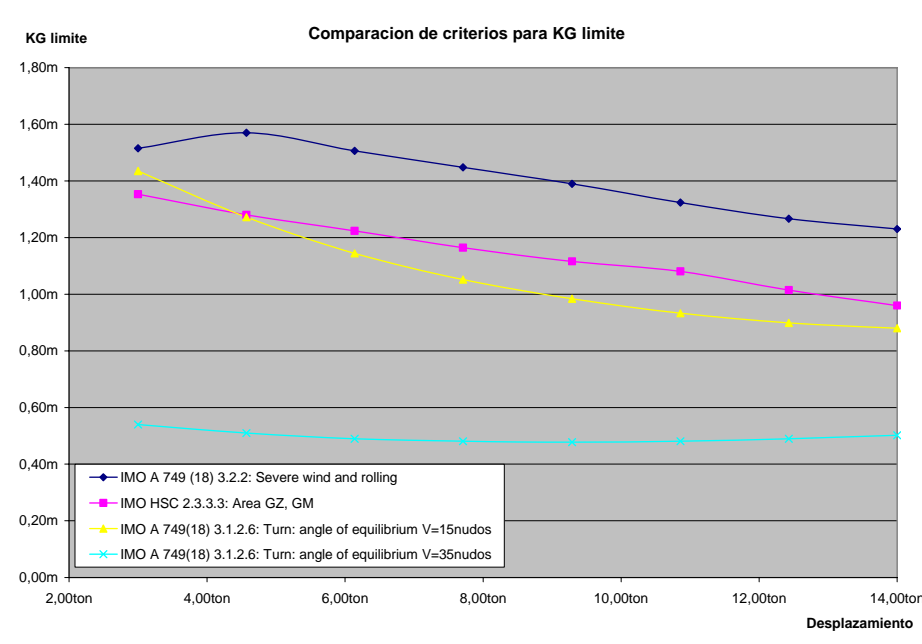


Figure 3.- Comparación de criterios para KG limites

Este análisis del KG permitió revelar únicamente que en reposo la posición vertical del centro de gravedad se encontraba dentro de los valores permisibles para este estudio (considerando criterios de estabilidad intacta). Las maniobras de giro de la embarcación a velocidades mayores a 19.6 nudos no garantizaban el cumplimiento de la norma citada, es decir, el ángulo de inclinación sobre pasaba los 15°. Sin embargo, estas maniobras eran necesarias

y el diseño de la LPR debía contemplar reducir la altura del KG estimado hasta un valor que permitiera realizar dichas maniobras cumpliendo dicho criterio.

### ***Influencia predominante de pesos (LCG limite)***

Para determinar esta influencia se consideraron los efectos de los lcg's de los grupos constructivos dentro de la estimación final de pesos y centros:

1. Factor A: LCG Grupo 100

2. Factor B: LCG Grupo 200
3. Factor C: LCG Grupo 300
4. Factor D: LCG Grupo 400
5. Factor E: LCG Grupo 500
6. Factor F: LCG Grupo 600
7. Factor G: LCG Grupo 700
8. Factor H: LCG Grupo 800

Y se llevo a cabo un diseño factorial completo no replicado por tratarse de un modelo determinístico<sup>6</sup>. Mediante un tamizado se asumieron valores altos y bajos de lcg's de los grupos constructivos correspondientes a +5% y -5% del LCG original de cada grupo lo cual resulto en 28 combinaciones o 256 corridas del modelo determinístico de potencia para la variación del LCG, dejando establecido que los lcg's significativos para este proyecto fueron los correspondientes a los grupos 100, 200 700 y 800 como se muestra en la tabla 5

| TERMINO DEL MODELO       | CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL |
|--------------------------|-------------------------|
| <b>A (LCG GRUPO 100)</b> | <b>26,712%</b>          |
| <b>B (LCG GRUPO 200)</b> | <b>47,293%</b>          |
| <b>C (LCG GRUPO 300)</b> | 0,938%                  |
| <b>D (LCG GRUPO 400)</b> | 0,002%                  |
| <b>E (LCG GRUPO 500)</b> | 0,075%                  |
| <b>F (LCG GRUPO 600)</b> | 0,016%                  |
| <b>G (LCG GRUPO 700)</b> | <b>6,140%</b>           |
| <b>H (LCG GRUPO 800)</b> | <b>18,824%</b>          |

Tabla 5.- Estimación de los efectos de los factores y sumas de cuadrados del diseño factorial 2<sup>8</sup>

Una vez determinados los lcg's significativos en este proyecto se procedió a estimar la influencia de cada uno de ellos en la velocidad de la embarcación mediante otro modelo determinístico de predicción de velocidad. En este caso se tuvieron las siguientes consideraciones:

1. Se considerarán los efectos de 4 factores
  - Factor A: LCG Grupo 200
  - Factor B: LCG Grupo 700
  - Factor C: LCG Grupo 800
  - Factor D: Desplazamiento LPR
2. Se llevo a cabo un diseño factorial completo y no replicado usando el modelo de predicción de velocidad de Savitsky<sup>7</sup>

Al igual que el experimento anterior se desarrolló un tamizado y se asumieron los mismos valores altos y bajos de lcg's para los grupos constructivos correspondientes a +5% y -5% del LCG original de cada grupo, y se varió el desplazamiento de la LPR en +5% y -5% del estimado inicialmente conduciendo a los resultados presentados en la tabla 6, los cuales indicaron que los factores significativos en el modelo fueron los correspondientes a los factores A (LCG GRUPO 200), C (LCG GRUPO 800) y D (DESPLAZAMIENTO LPR), y a las interacciones AD y CD.

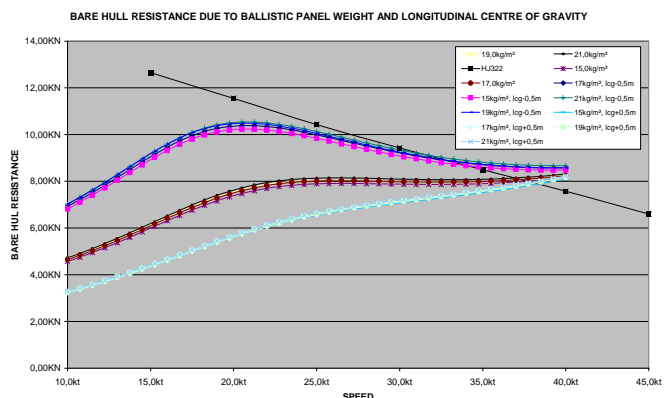
| CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL  |                |
|--------------------------|----------------|
| <b>A (LCG GRUPO 200)</b> | <b>0,532%</b>  |
| B (LCG GRUPO 700)        | 0,079%         |
| AB                       | 0,001%         |
| <b>C (LCG GRUPO 800)</b> | <b>0,623%</b>  |
| AC                       | 0,022%         |
| BC                       | 0,002%         |
| ABC                      | 0,002%         |
| <b>D</b>                 | <b>94,585%</b> |
| (DESPLAZAMIENTO)         |                |
| <b>AD</b>                | <b>0,748%</b>  |
| BD                       | 0,140%         |
| ABD                      | 0,019%         |
| <b>CD</b>                | <b>3,187%</b>  |
| ACD                      | 0,041%         |
| BCD                      | 0,020%         |
| ABCD                     | 0,000%         |

**Tabla 6.- Estimación de los efectos de los factores y sumas de cuadrados del diseño factorial 2<sup>4</sup>**

**Selección racional de materiales críticos (Paneles Balísticos)**

A seguir y mientras se desarrollaba la ingeniería de detalle de las lanchas patrulleras de río tuvieron que generarse términos de referencia para la adquisición de paneles balísticos que poseían las características de peso y niveles de protección requeridos por el proyecto y ofertados por diversos proveedores, por lo que la selección de este material influía en

el centro de gravedad y el peso de la embarcación para el desempeño final en condición de planeo. Se llevaron a cabo simulaciones y predicciones de potencia para embarcaciones de planeo a diversas condiciones de carga, determinadas en este caso por el peso total de los paneles balísticos a bordo, y se determinó la influencia resultante en el desempeño de la LPR para valores entre 15 y 21kg/m<sup>2</sup> de los paneles balísticos. Se graficó predicción de potencia y la curva de empuje del propulsor a instalar (HAMILTON H322) a una potencia de entrada del 80% del MCR (80% de 375kw) y se obtuvieron los resultados de la figura 4.



**Figure 4.- Predicción de potencia para determinar influencia de paneles balísticos**

De estos resultados se concluyó con un alfa de 5% que no hubo diferencia significativa en el peso de los paneles balísticos para el rango considerado en el mercado mientras que sí existió diferencia significativa en las posiciones

longitudinales de gravedad (LCG's). Sin embargo, se pudo determinar la curva de evaluación de desempeño de los proveedores de material balístico para la selección racional de los mismos, la cual se presenta en la figura 5.

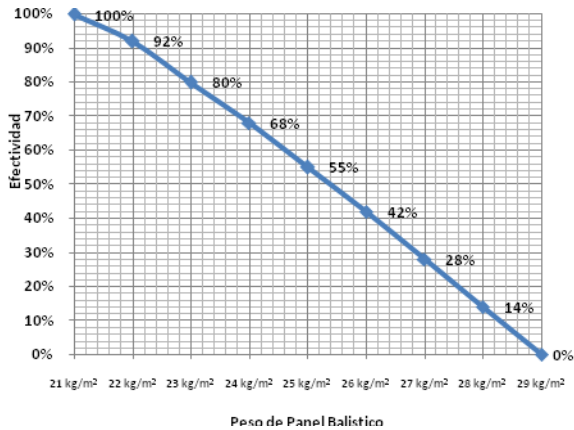


Figure 5.- Curva de selección de proveedores de paneles balísticos

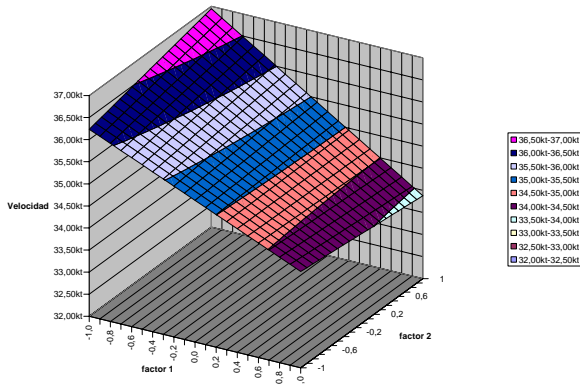
### *Estrategia de corrección de pesos*

La estrategia de corrección en este proyecto se basó en realizar cambios racionales en la posición longitudinal de equipos y materiales a bordo correspondientes a los grupos constructivos que presentaron mayor sensibilidad al cambio del LCG global de la embarcación, aunque cabe destacar que los análisis realizados en este proyecto condujeron a estrategias de corrección de pesos a través de la construcción y antes de la entrega de la embarcación, y que ciertamente no son aplicables a otras embarcaciones ya que las combinaciones de requerimientos, restricciones, variables

críticas y metodológica racional para toma de decisiones puede variar de un proyecto a otro. De los experimentos factoriales anteriores, el primero mostró en orden de importancia que los grupos 200, 100, 800 y 700 eran determinantes para el LCG. Sin embargo, el LCG del grupo 100 no permitía tanta variación debido a que la configuración de la estructura obedece a posiciones fijas a bordo. Esto condujo a disponer únicamente de la libertad de movimiento de materiales y equipos en los grupos 200 y 700 en la etapa de diseño y al grupo F en la operación de la lancha. Por otra parte, habiendo considerado el nivel de complejidad que existía para cambiar posiciones longitudinales en los tres grupos filtrados, se planteó lo siguiente:

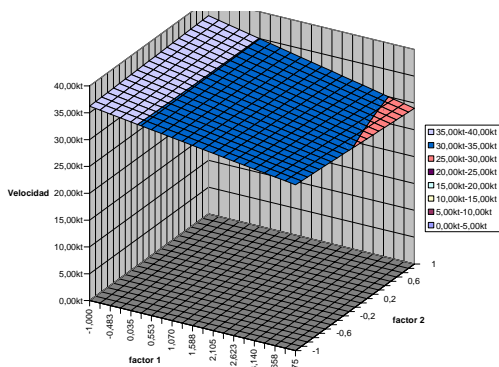
- De acuerdo al modelo de regresión del segundo experimento, cambiar racionalmente la posición longitudinal de materiales y equipos del grupo 200 lo más a proa posible (tentativamente a una posición del  $l_{cg200} = 8.719m$  desde el extremo más a proa de LPR, o 46.1cm a proa de la posición actual).
- A seguir, cambiar racionalmente la posición longitudinal de materiales y equipos del grupo 700 a fin de obtener un LCG que resulte en la mayor velocidad predicha posible después del cambio anterior en el grupo 200.

- Por último, simular las condiciones de carga y trasvase de líquidos (grupo F) longitudinalmente para lograr la mayor velocidad predicha posible después del cambio anterior en el grupo 700.



**Figure 6.- Superficie de respuesta para LCG grupo F y el desplazamiento**

Se pudo encontrar también el máximo desplazamiento permitido para que la velocidad de la LPR sea de al menos 29 nudos (velocidad ofertada en el contrato), el cual fue 13046kg con los márgenes establecidos (figura 7)



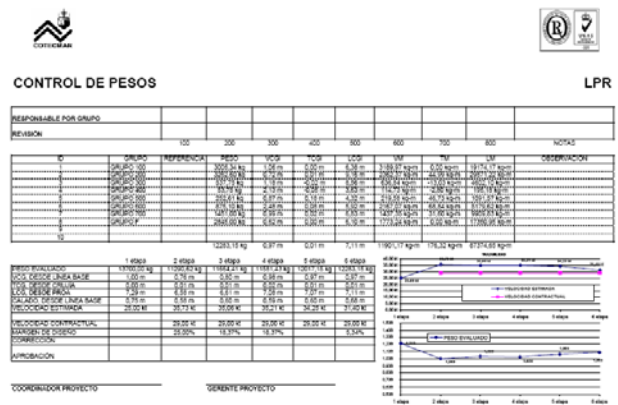
**Figure 7.- Superficie de respuesta para determinar el desplazamiento necesario a 29 nudos**

**Monitoreo y trazabilidad de pesos**

El control de pesos necesitó de una herramienta de análisis que procese el

estado de las variables críticas y a la vez una continua retroalimentación de dicha herramienta. Para lo cual, a lo largo de la construcción de LPR se establecieron etapas de monitoreo y análisis de acuerdo al porcentaje de avance<sup>8</sup>. Se consolido toda la información en formatos desarrollados para tal fin como hojas de control, mostrada en la figura 8 y en los siguientes hitos:

- 1era Etapa: Cierre Diseño preliminar
- 2da Etapa: Cierre Diseño Básico
- 3era Etapa: Compra de materiales
- 4ta Etapa: Protección Balística Casco
- 6ta Etapa: Compra Motores Caterpillar
- 7ma Etapa: Protección Balística Cabina



**Figure 8.- Formato de control de pesos implementado**

La trazabilidad de las características contractuales de la embarcación fue registrada en dichos formatos para monitorear el comportamiento del proyecto y el compromiso de los

objetivos inicialmente acordados con el cliente en reportes de variación como los mostrados en la figura 9:

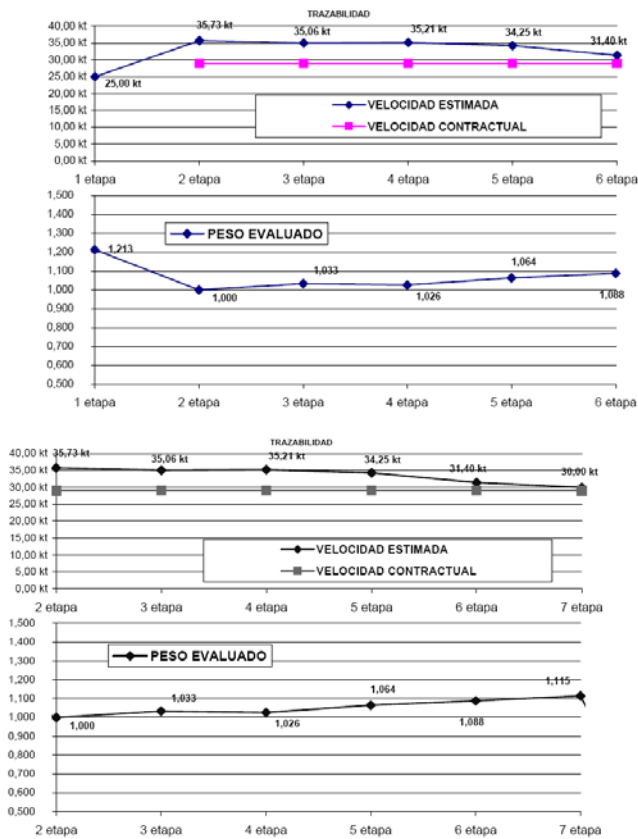


Figure 9.- Trazabilidad de control de pesos en el proyecto LPR

Al final del proyecto, el haber determinado los márgenes de diseño e incertidumbres y las variables críticas, haber seleccionado racionalmente los materiales y establecido cláusulas de cumplimiento de las restricciones de desempeño, y haber ejecutado las estrategias de corrección de pesos condujo a poder cumplir los acuerdos contractuales de velocidad y calado con las condiciones de habitabilidad, capacidad de carga y de combate de las lanchas patrulleras de río

de 40'. Esto pudo comprobarse cuando debido a los márgenes de crecimiento de pesos por la variabilidad estimada inicialmente y al margen de diseño establecido a la condición de operación de los motores, la LPR presentaba una velocidad controlada de 30 nudos en la 7ma etapa del control de pesos, lo que generaría confiabilidad en los resultados al momento de las pruebas de mar finales.

### 3. VALIDACIÓN DEL MODELO DE CONTROL DE PESOS Y DETERMINACIÓN DE MÁRGENES REALES DE DISEÑO

Habiendo realizado estimaciones iniciales y proyecciones futuras de pesos, incertidumbres y márgenes de diseño, y la selección racional de materiales junto con el continuo monitoreo de pesos por etapas, la LPR alcanzó una velocidad de 39.43 nudos en condición máxima y estado de mar 0 durante las pruebas de mar. Las pruebas de arranque y de mar de los motores CAT C9 revelaron que la carga de los mismos fue del 97% en la condición de diseño, de lo que se concluyó que del 25% del margen establecido (por la incertidumbre en el laminado final y en los pesos del equipamiento) solo se consumió un 4% debido a las estrategias de corrección

implementadas y a la toma de decisiones racional para la instalación de equipos a bordo basados en una medida de desempeño de mínimo peso y máxima velocidad.

#### **4. CONCLUSIONES**

Se implementó el modelo de control de pesos como una organización interna del astillero, en donde se realizaron diversas actividades relacionadas a mantener los acuerdos contractuales sin cambios. También, se demostró la importancia de aplicar metodologías racionales de diseño que garanticen la validación del mismo para tener altas posibilidades de cumplimiento con los acuerdos contractuales y que la estimación preliminar de pesos mediante pruebas preliminares en embarcaciones fabricadas en materiales compuestos es vital cuando existen altas variabilidades dependientes del factor humano. Finalmente se encontró que aunque las variabilidades de ciertos pesos de equipos a instalar a bordo de una embarcación no fueran tan altas, es indispensable adquirirlos mediante una metodología de selección racional ya que en embarcaciones menores de alta velocidad la influencia de los mismos es significativa.

#### **5. BIBLIOGRAFÍA**

---

<sup>1</sup> Dirección de investigación desarrollo e innovación, Anexo Técnico Contractual LPR 40`, COTECMAR 2007

<sup>2</sup> Galanis Konstatinos, Hull Construction with composites materials for Ships, Massachusetts Institute of Technology 2002

<sup>3</sup> Morante Villareal Roberto, Estudio del KG límite para el control de pesos LPR, COTECMAR 2008

<sup>4</sup> Morante Villareal Roberto, Estudio del LCG límite para el control de pesos LPR, COTECMAR 2008

<sup>5</sup> SNAME Panel SD-1 (Weight Engineering), Two model weight control plans for ships, SNAME 1986

<sup>6</sup> Montgomery Douglas, Design and Analysis of Experiments 5<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons 2001

<sup>7</sup> Savitsky Daniel, Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planning Hulls. DAVIDSON LABORATORY

<sup>8</sup> Thomas Lamb, Ship Design and Construction Volume 1, SNAME 2003