

PRUEBAS A ESCALA REAL DE CARACTERÍSTICAS DE MANIOBRABILIDAD DE BUQUES CON SISTEMAS DE PROPULSION TIPO “PUMP – JET”

Carreño Moreno, Jorge Enrique^{1(*)}; Jiménez, Víctor Hugo¹; Sierra Vanegas, Eddy Yenesty¹
1 - COTECMAR | (*) Colombia

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es presentar la metodología desarrollada para identificar las características de maniobrabilidad de buques de desplazamiento con sistemas de propulsión no convencionales, tomando como caso de estudio los Buques Patrulleros de Apoyo Fluvial Pesados “PAF-P” de tercera generación de la Armada Colombiana, construidas por COTECMAR. Lo anterior por medio de pruebas de mar a escala real, cuya finalidad es verificar el cumplimiento de los criterios de maniobrabilidad, de acuerdo a las formas de casco, sistemas de propulsión, misión y gobierno de las embarcaciones. El conjunto de maniobras que permiten el estudio experimental, más eficiente, fue seleccionado a partir de un diseño de experimentos con datos simulados en el software de diseño naval TRIBON M3, que incluyen círculo evolutivo a diferentes velocidades de aproximación y ángulos de timón, espiral, zig-zag. La experimentación debe considerar la instrumentación y metodologías necesarias para conducción de pruebas, para lo cual se diseñó un sistema de adquisición de datos portátil basado en PC, que permite realizar las conexiones adecuadas de los sensores y equipos requeridos para cada prueba, además del desarrollo de instrumentos virtuales en LabVIEW para adquisición de datos.

Introducción

La Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial, COTECMAR, en Colombia, diseñó y construyó una serie de buques “PAF-P” con el fin de incrementar la presencia de la Armada Nacional y su Infantería de Marina en los más de 13.000 Km. de ríos navegables del país, la misión principal de estos buques, es la de prolongar la duración y el espacio de cubrimiento de los ECF (Elemento de Combate Fluvial) conduciendo operaciones de asalto, vigilancia, control, interdicción, seguridad y operaciones de apoyo en el área de interés. La primera y segunda generación de estos buques, está conformada por cuatro unidades, equipadas con sistemas de propulsión consistentes en dos hélices accionadas por motores diesel y un sistema de gobierno compuesto por dos timones compensados. El primer Buque de la serie “ARC GUILLERMO LONDOÑO” fue

comisionado en el mes de Enero de 2.000 en tanto que el cuarto entró en operación en el año 2004. Estos buques cumplen misiones en ríos tropicales, caracterizados por un ancho curso, no canalizados ni señalizados, con aguas de muy poca profundidad, especialmente en los meses de temporada seca, al punto que la relación profundidad - calado (H/T) puede reducirse hasta 1,5.

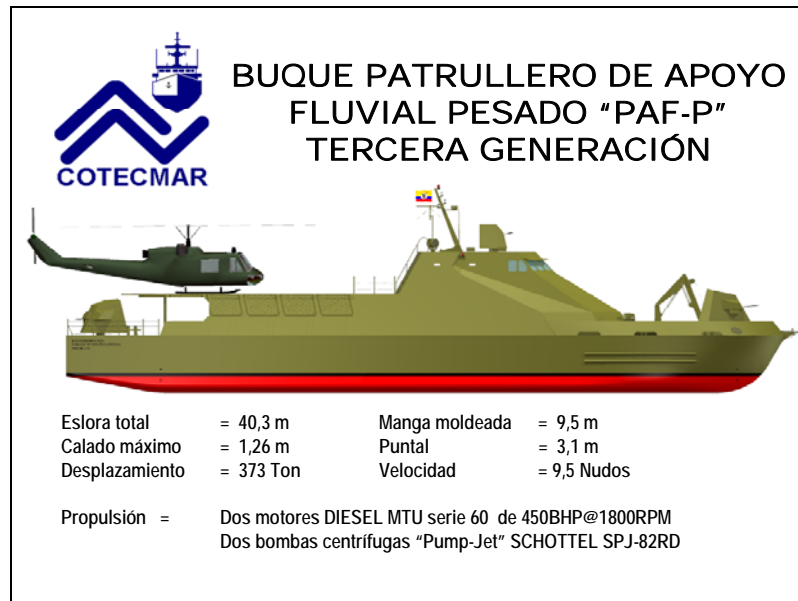


Ilustración 1 Características generales buque PAF-P tercera generación

La retroalimentación del desempeño operacional de los buques en sus primeros años de operación evidenció la necesidad de introducir diferentes tecnologías para la propulsión y gobierno de estos buques. En primer lugar, las hélices con una mínima inmersión, generan impulsos de presión que son transmitidos a través del codaste a la estructura del buque, generando efectos nocivos no solo en los equipos y estructuras menos rígidas sino desmejorando las condiciones de confort de la tripulación; igualmente los objetos que flotan en las aguas de los ríos tales como troncos se convierten frecuentemente en fuentes generadoras de averías, al deformar las aspas de las hélices y los timones. Por otra parte, las condiciones de maniobrabilidad de buques con relaciones manga – calado (B/T) muy altas (para el caso de los PAF-P la relación B/T = 7,5) son críticas debido a que aparece una inestabilidad de ruta, situación que se agudiza por la navegación en aguas muy poco profundas con presencia de corrientes.

La problemática anterior así como la revisión de los roles y capacidades operacionales de los buques PAF-P hizo necesaria una reingeniería, que inició en el mes de septiembre del 2003 con las pruebas en el canal de experiencias hidrodinámicas de Gdansk Polonia CTO: “Centrum Techniki Okretowej” donde se desarrollaron ensayos de resistencia al avance del buque en diferentes condiciones de profundidad, así como ensayos de autopropulsión con una nueva configuración, es decir con dos propulsores tipo “Pump Jet” modelo SPJ 82RD, fabricados por Schottel, accionados por motores diesel MTU Serie 60 450BHP@1800RPM con una conexión compuesta por engranaje reductor e inversor de marcha y un eje cardánico, tal como se muestra en la ilustración 2.

La tercera generación de PAF-P, ver ilustración 1, está compuesta por cuatro buques, el primero de los cuales fue comisionado en el año 2005 y los dos últimos en el mes de marzo de 2009. Las mejoras en términos de maniobrabilidad y confiabilidad del sistema de propulsión y gobierno han sido evidentes, dada las características propias del mismo, por una parte se eliminan totalmente los apéndices tales como arbotantes, hélices, ejes y timones, lo cual implica que no hay posibilidades de averías por impactos con objetos flotantes; en tanto que la posibilidad de controlar los chorros de agua de cada bomba de manera independiente en cualquier dirección, le imprime unas condiciones de maniobrabilidad excepcionales al buque en términos de facilidad de evolución y de cambio de rumbo, capacidad táctica importante en un combate para orientar sus armas por el costado apropiado, no obstante lo anterior persiste la inestabilidad de ruta, es decir la capacidad de mantener un rumbo por la baja área de deriva (L x T) y la carencia de superficies de control.

Teniendo en cuenta la problemática existente, se desarrolló el proyecto “Pruebas de Mar”, en el que uno de sus objetivos, fue el de efectuar las pruebas a escala real de las PAF-P para identificar sus características de maniobrabilidad, siguiendo los estándares para maniobrabilidad de buques, adoptados por la OMI (Organización Marítima Internacional) y promulgados en la resolución A. 751 (18) en el año 1993 además de la circular MSC/Circ.644 publicada en junio de 1994; las características de maniobrabilidad, promulgadas por la OMI, son medidas típicas que tienen un interés náutico en el desempeño de los buques.

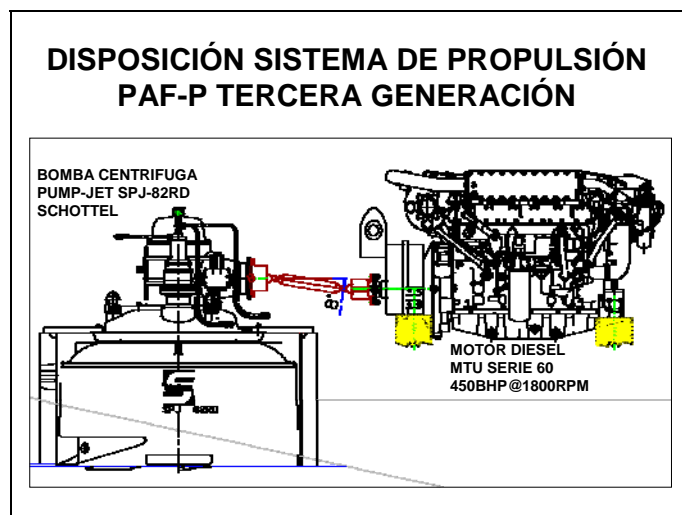


Ilustración 2 Disposición sistema de propulsión PAF-P tercera generación

Para valorar estas cualidades la OMI recomienda la realización de pruebas de círculo evolutivo, pruebas de zig-zag y pruebas de parada de colisión, sin embargo los estándares referidos no cubren todos los tipos de buques ni las circunstancias operacionales en que navegan algunos de ellos. Particularmente la Unión Europea en el año 2006 adoptó la directiva N° 2006 C/166-E/01 en la cual se establecen los requerimientos de maniobrabilidad a ser cumplidos por los buques que navegan en la red fluvial europea y se resumen en la capacidad de parar, capacidad de marcha atrás, capacidad de ejecutar maniobras evasivas y capacidad de virar contra la corriente.

Las pruebas de mar a escala real fueron conducidas por COTECMAR, en el “ARC STCIM EDIC CRISTIAN REYES HOLGUÍN”, último buque de la tercera generación de PAF-P, en la Bahía de Cartagena en la Costa Caribe Colombiana, durante los meses de marzo y abril de 2009 en aguas someras ($H/T = 2,4$) y aguas profundas ($H/T > 10$). El buque fue sometido a pruebas de círculo evolutivo a diferentes velocidades de aproximación y ángulos de timón, zig-zag y parada emergencia; la instrumentación usada durante las pruebas incluía un DGPS (Differential Global Positioning System), un giroscopio inercial, sensores transmisores de dirección de empuje de los propulsores, veleta y anemómetro, un par de sensores ópticos y un sistema de medición de torque. Los datos sensados fueron adquiridos por medio de instrumentos virtuales desarrollados en LabVIEW para este propósito, centralizando la información en un ordenador localizado en el puente de mando de la embarcación.

Características de maniobrabilidad

Para evaluar las características de maniobrabilidad promulgadas por la OMI, estabilidad dinámica inherente, capacidad para mantener un rumbo, capacidad de giro, capacidad de parada y aptitud para corregir la guiñada, esta ha establecido parámetros valorados a través de pruebas de maniobrabilidad como círculos evolutivos, zig-zag y parada de colisión; COTECMAR selecciono dichas maniobras para llevar a cabo pruebas de mar en las PAF-P que se consideran en este estudio. Los parámetros que permiten evaluar las características de maniobrabilidad, durante la ejecución de estas maniobras, se muestran en la tabla 1.

Según OMI, SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers) e ITTC (Internacional Towing Tank Conference) las condiciones en las que se debe desarrollar las pruebas de mar son plena carga, no asiento, aguas profundas y no restringidas, ambiente en calma, sostenimiento de velocidad constante, estado de mar menor a 4 y velocidad de viento verdadero menor a Beaufort 5.

Tabla 1. Parámetro de evaluación característica de maniobrabilidad

Circulo evolutivo (Habilidad de giro del buque)	Zig-zag (Capacidad de caída y mantenimiento de rumbo)	Parada de emergencia
Avance	Tiempo de giro inicial	Tiempo de parada
Transferencia	Tiempo para la segunda ejecución	Distancia
Diámetro táctico	Tiempo para comprobar la guiñada	Desviación lateral
Tiempo en que el rumbo cambia 90°	Ángulo de sobrepaso (overshoot)	
Tiempo en que el rumbo cambia 180°		

Pruebas de mar a escala real

Este proyecto de investigación¹ ha sido desarrollado desde el año 2006 por la Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación de COTECMAR, por medio de un proyecto de tesis doctoral² y tres proyectos de tesis de pregrado³. El proyecto se ha estructurado en tres partes:

1. Desarrollo del diseño de experimento.
2. Desarrollo de una metodología para conducción de pruebas de mar.

¹ Proyecto de investigación de Pruebas de mar

² Proyecto de de tesis Doctoral, CN Jorge Enrique Carreño Moreno, Universidad Politécnica de Madrid.

³ TN Carlos Augusto Estévez Duran, TN Carlos Enrique Hernández Cruz, Escuela Naval Almirante Padilla. Cesar Mauricio Quimbaya Sarmiento, Universidad Central. Ety Yenesty Sierra Vanegas, Universidad Tecnológica de Bolívar.

3. Sistema de adquisición de datos.

1. Diseño de experimento

El número de corridas y el costo que representa el hecho de hacer experimentación con un buque a escala real sobrepasa los recursos disponibles y lo hacen inviable. Haciendo uso de la metodología de diseño de experimentos y del diseño factorial fraccionado de dos niveles, Montgomery [8], el experimentador puede suponer razonablemente que ciertas interacciones de orden superior son insignificantes, permitiéndolo obtener información de los efectos principales y de las interacciones de orden inferior corriendo únicamente una fracción del experimento factorial completo.

Siguiendo la misma metodología presentada por Islam et al. [9], se presenta a continuación el diseño del experimento de exploración (screening) para conducir las pruebas de mar para la maniobra de círculo evolutivo. En primer lugar se ha hecho un análisis dimensional de los principales factores que intervienen en la maniobra en mención, teniendo en cuenta el interés de estudiar la influencia de la navegación en aguas poco profundas, el objetivo es identificar los factores más significativos, de tal forma que se puedan eliminar para en una etapa posterior diseñar el experimento de manera racional con los factores restantes. En la tabla 2 se muestran las características del diseño de exploración llevado a cabo mediante el software STATGRAPHICS Centurión XV © Versión 15.2.14.

Con el fin de evaluar la linealidad del efecto de los factores se han agregado cuatro puntos centrales por bloque, de tal forma que se obtiene un diseño 2^{k-1} es decir 2^{4-1} , 8 corridas más cuatro puntos centrales para un total de 12 corridas aleatorizadas. Se ha omitido intencionalmente el factor costado de ejecución de la maniobra, el cual será introducido en la fase final de diseño del experimento. La razón es que no es posible obtener una variación en la respuesta a partir de simulación con el software TRIBON-M3©, el cual ha sido usado para obtener los valores de Diámetro Táctico, como se observa en la tabla 3.

Tabla 2 Diseño de experimento de exploración

Clase de diseño: De Exploración (Screening)				
Nombre del Diseño: Media fracción 2^{4-1}				
Comentario: Circulo evolutivo				
Diseño Base				
Número de factores experimentales: 4				
Número de bloques: 1				
Número de respuestas: 1				
Número de corridas: 12, incluyendo 4 puntos centrales por bloque				
Grados de libertad para el error: 4				
Aleatorizar: Sí				
<i>Factores</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Unidades</i>	<i>Continuo</i>
Velocidad	3,0	9,0	Nudos	Sí
Carga	LIGHT	FULL		No
Profundidad	1,5	10,0	metros	Sí
Timón	5,0	15,0	grados	Sí
<i>Respuestas</i>	<i>Unidades</i>			
Diámetro Táctico	m/L			

Las simulaciones mostradas en la tabla 3 fueron desarrolladas en el software de diseño TRIBON-M3©, usando los modelos matemáticos de buques de formas llenas y equipados con timones convencionales y hélices, dado que no se dispone de una herramienta de cálculo para la predicción de características de maniobrabilidad de buques con sistemas de propulsión y gobierno no convencional tipo Pump-Jet.

Tabla 3 Resultados de simulación con SOFTWARE TRIBON M3 ©

Corrida	Velocidad [Nudos]	Condición de Carga	Profundidad [m]	Timón [°]	Diámetro Táctico/Eslora
1	9	FULL	1,5	5	5,07
2	6	FULL	5,75	10	5,33
3	3	LIGHT	1,5	5	10,96
4	3	FULL	10	5	12,19
5	9	LIGHT	1,5	15	3,47
6	6	LIGHT	5,75	10	6,14
7	3	LIGHT	10	15	4,58
8	6	LIGHT	5,75	10	6,14
9	6	FULL	5,75	10	5,33
10	9	LIGHT	10	5	11,68
11	3	FULL	1,5	15	2,57
12	9	FULL	10	15	3,29

El análisis estadístico del modelo fraccionado de dos niveles con cuatro puntos centrales se centra en la obtención de los factores más significativos en la respuesta, de acuerdo a lo presentado en la tabla 2. En la ilustración 3, se observa el diagrama de Pareto, el cual puede usarse para identificar los factores más significativos. En el caso de estudio, se eliminan las interacciones de segundo, tercero y cuarto nivel, así como el factor Carga. El factor velocidad aunque no es muy significativo, se mantiene para darle una mayor robustez al experimento.

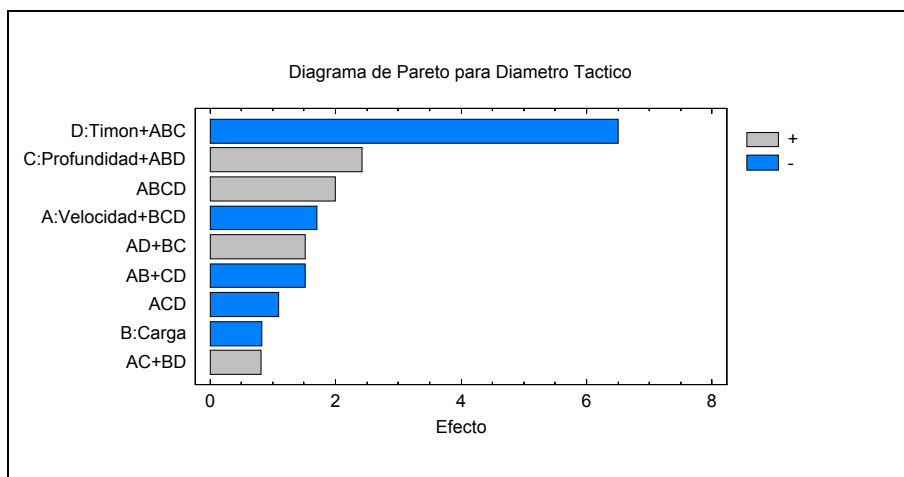


Ilustración 3 Diagrama de Pareto para Diámetro Táctico

Finalmente, se puede obtener una superficie estimada de respuesta a partir de los factores significativos y un modelo de regresión, tal como se observa en la ilustración 4.

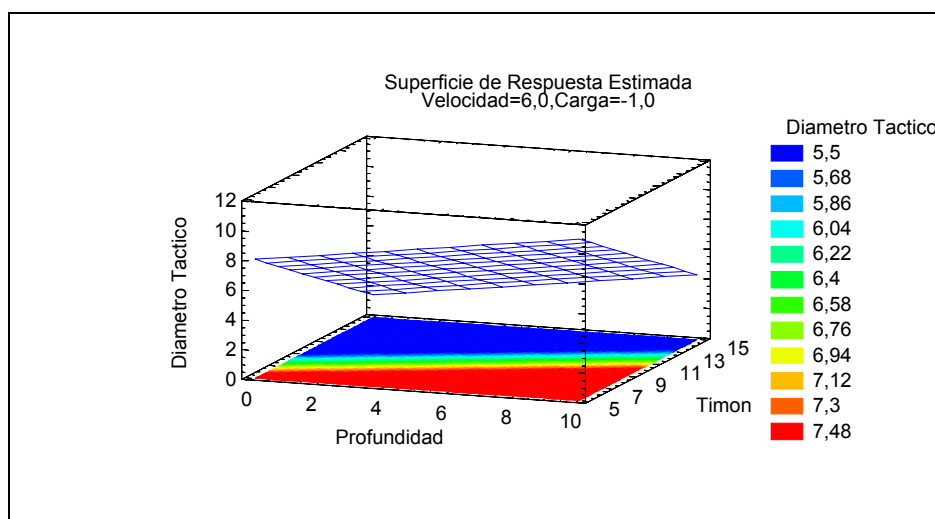


Ilustración 4 Superficie de respuesta estimada

Los tres factores significativos a estudiar son: Ángulo de timón, velocidad del buque y profundidad. Igualmente y por requerimiento de la normatividad OMI, será incluido para el diseño de experimento final un factor generador de errores aleatorios el cual es el costado al cual se ejecuta la maniobra, es decir Estribor o Babor.

En la ilustración 4, se muestra el diseño de experimento factorial 2^k con dos puntos centrales y cuatro factores, es decir 18 corridas en total. El hecho de haber desarrollado este proceso ha permitido no solo eliminar un factor e interacciones no significativas sino haber optimizado el número de corridas frente al que se pretendía inicialmente mediante un diseño con tres

factores de tres niveles cada uno (Velocidad, profundidad y timón), así como dos factores discretos con dos niveles cada uno, es decir Condición de carga y costado de la maniobra. En total se ha reducido el número de corridas de un valor de 108 ($3^3 \times 2 \times 2$) a tan solo 18, tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 4 Diseño de experimento factorial

Design name: Factorial 2⁴				
Comment: Círculo evolutivo				
Base Design				
Number of experimental factors: 4				
Number of blocks: 1				
Number of responses: 1				
Number of runs: 18, including 2 centerpoints per block				
Error degrees of freedom: 7				
Randomized: Yes				
<i>Factors</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Units</i>	<i>Continuous</i>
Costado	EBR	BBR		No
Profundidad	3	12	metros	Yes
Velocidad	3	9	Nudos	Yes
Timón	10	20	Grados	Yes
<i>Responses</i>		<i>Units</i>		
Diámetro Táctico		m/L		

Tabla 5 Diseño de experimento final para Diámetro Táctico

CORRIDA [#]	COSTADO	PROFUNDIDAD [m]	VELOCIDAD [nudos]	TIMON [°]
1	BBR	3	3	10
2	BBR	12	3	10
3	BBR	12	3	20
4	EBR	12	9	10
5	BBR	12	9	10
6	EBR	12	9	20
7	EBR	3	9	20
8	BBR	3	9	10
9	BBR	12	9	20
10	EBR	3	3	20
11	BBR	3	3	20
12	EBR	7.5	6	15
13	EBR	12	3	10
14	EBR	3	3	10
15	EBR	12	3	20
16	BBR	3	9	20
17	BBR	7.5	6	15
18	EBR	3	9	10

El número de corridas listado en la tabla 5 se justifica desde el punto de vista de interés científico de los autores para la validación de modelos matemáticos de maniobrabilidad de buques con sistemas de propulsión no convencional que navegan en aguas poco profundas. Los valores bajos y altos de los factores descritos en la tabla 4 difieren de la tabla 2 por razones prácticas. En el caso de la profundidad, está condicionado por el área en la que se conducen las maniobras dentro de la Bahía de Cartagena, encontrándose solo profundidades constantes de 3 metros, para relaciones $H/T = 2,4$ y profundidades mayores de 13 metros para el caso de relaciones $H/T > 10$ en las cuales se considera que no existe el efecto de canal. Igualmente previo al inicio formal de pruebas se ha decidido aumentar el ángulo incidencia del chorro de agua de las bombas, aumentándolo de 10 a 20 grados dado que no hay un efecto de respuesta significativo sobre el buque con ángulos menores.

2. Guía metodológica para conducción de pruebas de mar.

En el desarrollo de la guía metodológica se consideran fuentes de información que contemplan la normatividad para pruebas de mar en buques, obteniéndose esta información de publicaciones emitidas por la Organización Marítima Internacional, International Towing Tank Conference, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, British Maritime technology e International Organization for Standardization. Se realizó una revisión de los criterios de maniobrabilidad promulgados por la organización marítima internacional [1] y [2], así como aquellos recomendados por diferentes autoridades regionales orientados a buques que navegan en canales, aguas restringidas y ríos.

La guía metodológica consta de un flujograma del planteamiento de las pruebas de mar en buques así como de los siguientes documentos:

1. Solicitud de las características del buque al armador.
2. Inspección de obra viva por parte de buzos.
3. Cartilla Explicativa de la prueba de Mar.
4. Registro de información pruebas de Mar.
5. Procedimiento para el desarrollo de la maniobra de Círculo Evolutivo.
6. Procedimiento para el desarrollo de la maniobra de ZIG-ZAG.
7. Procedimiento para el desarrollo de la maniobra Parada de Emergencia.

8. Informe técnico para el astillero.
9. Informe de resultados para cliente.

La Guía Metodológica examina la planeación (preparación), ejecución (desarrollo) y evaluación (análisis y reporte) de las pruebas de mar; considera además la reunión pre pruebas armador-astillero que debe realizarse, las responsabilidades, la instrumentación y material necesarios, instalación de equipos a bordo, ejecución de maniobras incluidas en las pruebas de mar y finalmente generación de reportes y resultados.

La cartilla explicativa contiene una lista de comprobación y trata aspectos específicos del alistamiento en puerto, instalación de equipos de medición, criterios para selección del área de pruebas, procedimiento y criterio de evaluación para cada una de las pruebas a ejecutar.

3. Sistema de adquisición de datos

Las mediciones de las variables, durante las pruebas de mar, se realizan en forma distribuida empleando sensores de diferentes tipos, integrando de forma centralizada y sincronizada mediante un PC y tarjetas de adquisición y digitalización de datos (Fieldpoint). Los datos obtenidos a partir del sistema de adquisición, fueron muestreados de acuerdo a las recomendaciones de ITTC (0.5–2 muestras por segundo), estos son almacenados en el computador para realizar post procesamiento y obtener información acerca de las características de maniobrabilidad del buque a través de la cuantificación de los parámetros de evaluación, en la tabla 6 se especifican los parámetros que deben medirse en cada maniobra según OMI e ITTC, en la tabla 7 se especifica la instrumentación recomendada por ITTC [5] y SC [6].

Tabla 6 Parámetros medidos durante pruebas de mar

	TYPE OF TEST	Heading	Position	Speed	Rudder angle	RPM	Rate of turn
1	Turning test	√	√	√	√	√	√
2	Z-maneuver test	√	√	√	√	√	-
3	Stopping Test (Crash stop astern test)	√	√	√	-	√	-

Fuente: Final report and recommendations to the 22nd ITTC

La instrumentación usada para conducir pruebas de mar en COTECMAR (ver tabla 8), seleccionada según las recomendaciones de tales organizaciones, es capaz de proveer un historial de tiempo de las medidas durante la ejecución de las maniobras.

Tabla 7 Instrumentación recomendada por ITTC

Heading	Position	Speed	Rudder angle	RPM	Rate of turn	Torque
Girocompás	GPS	GPS	Potenciómetro angular	Sensor óptico	Cambio de rumbo por segundo	Galgas Extensiométricas

Tabla 8 Equipos utilizados en pruebas de mar

Parámetro	Unidad	Equipo de medida	Rango	Exactitud
Heading	grados	giróscopo 3d	0-360°,-180-+180°	<1,0°
Position	grados/min/s	GPS	-	<10m
Speed	knots	GPS	0-9kn	0,05m/s
Rudder angle	grados	potenciómetro lineal	0-360°	0,05Ω
Velocidad angular	RPM	sensor óptico	1-250000RPM	-
Rate of turn	grados/s	giróscopo 3d	±300°/s	-
Wind speed	knots	anemómetro	0-86,9kn	±0,87kn
Wind direction	grados	veleta	0-360°	-

Los datos correspondientes a tiempo, rumbo, posición, velocidad y rata del giro son recolectados en un PC generalmente instalado en el puente de gobierno; mientras RPM, torque, dirección y velocidad de viento se recolectan en el cuarto de máquinas usando una tarjeta de adquisición de datos (Field point de National Instruments) que se comunica con el PC inalámbrica o cableadamente utilizando un modulo de red Ethernet. Los sensores, interfaces y fuentes de alimentación que se instalan en el cuarto de máquinas se integran en un equipo portátil que permite realizar las conexiones de los equipos requeridos para cada prueba. Los datos adquiridos en el cuarto de máquinas y los proporcionados por el GPS son recolectados usando una aplicación desarrollada en LabVIEW.

La ilustración 5 muestra la disposición de la instrumentación utilizada en las pruebas de mar en la PAF-P.

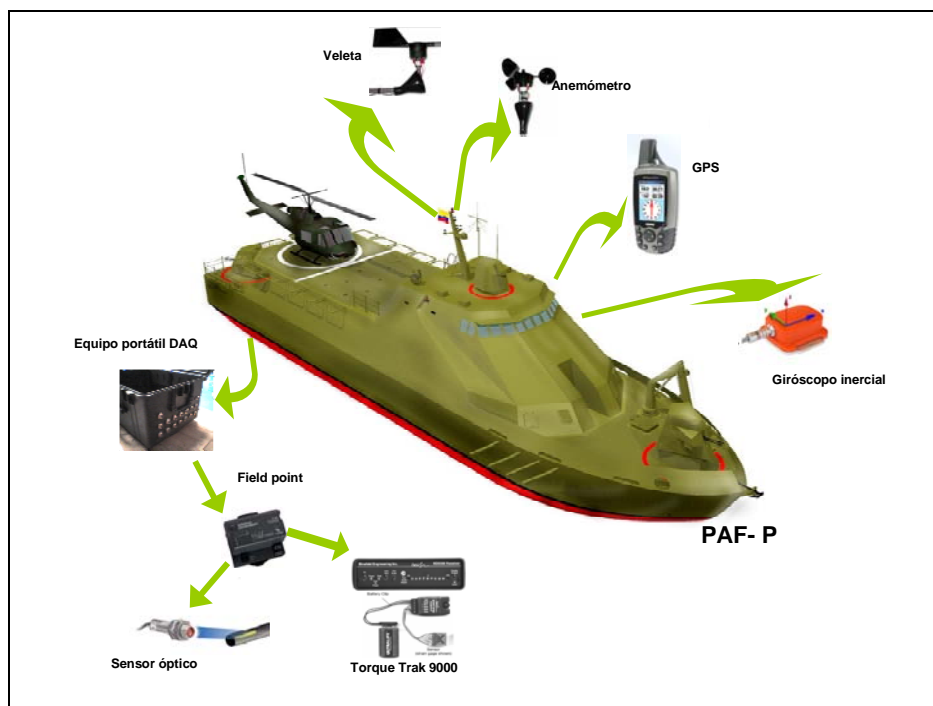


Ilustración 5 Disposición de la instrumentación en el buque PAF

4. Pruebas de mar a escala real conducías en la ARC STCIM Edic Cristian Reyes Holguin

Las ilustraciones de los resultados corresponden al traqueo de las maniobras durante pruebas y al post procesamiento realizado en los datos utilizando Excel y Matlab (MATrix LABoratory, Software matemático). Las gráficas tomadas durante pruebas fueron suministradas por el Área de Hidrografía del CIOH (Centro de Investigaciones Oceanográficas e hidrográficas) procesadas usando el software hidrográfico HYPACK⁴.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de círculo evolutivo, comparando las maniobras ejecutadas a 10° de timón y 9 nudos de velocidad en aguas relativamente profundas y someras; la ilustración 7 presenta una de las maniobras de círculo evolutivo ejecutadas en aguas someras a 9 nudos de velocidad y 10° de ángulo de timón.

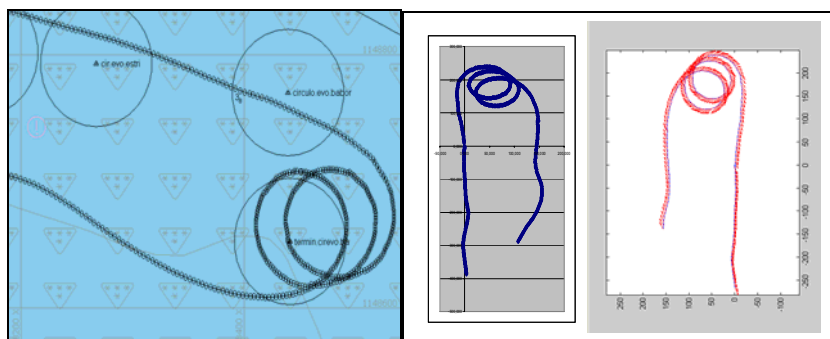


Ilustración 7 Círculo evolutivo en aguas someras, 10° de timón a 9 nudos de velocidad.

⁴ HYPACK Software hidrográfico, integra todas las herramientas necesarias para cada una de las etapas de trabajo: HYPACK MAX (ecosondas monofrecuencia). HYSWEEP (ecosondas multihaz). DREDGEPACK (dragado). Planificación y Diseño del Trabajo. Adquisición de datos (levantamiento). Edición de datos. Producto Final (volúmenes y ploteado).

Tabla 9. Comparación de resultados de círculos evolutivos

Círculo evolutivo	Círculo evolutivo en aguas someras	Círculo evolutivo en aguas profundas
Avance	1,59 esloras	1,38 esloras
Diámetro táctico	2,8 esloras	2,1 esloras
Tiempo en que el rumbo cambia 90°	34 segundos	30 segundos
Tiempo en que el rumbo cambia 180°	68 segundos	45 segundos
Velocidad	9 nudos	9 nudos
Ángulo de timón	10°	10°

Las maniobras de zig-zag se realizaron a 20°-20° entre 6 y 9 Nudos aproximadamente a estribor y babor.

La ilustración 8 muestra una de las maniobras de zig-zag 20°/20° a 6 nudos de velocidad mientras que la tabla 10 muestra los resultados para una maniobra de zig-zag 20°/20° a 7,9 nudos de velocidad en aguas profundas.

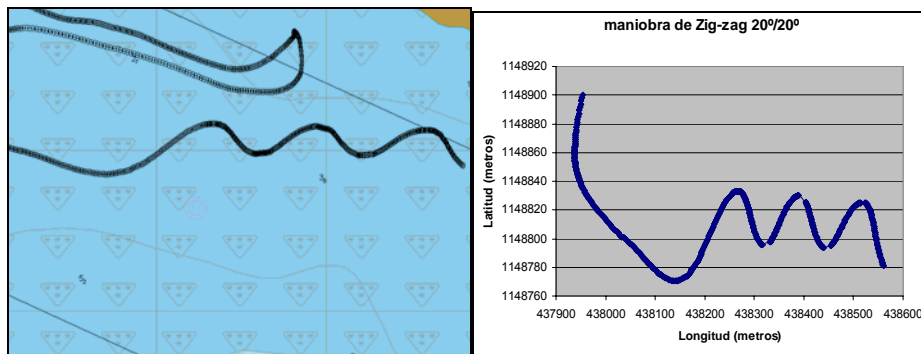


Ilustración 8 Zig-zag por el costado de babor a 6 nudos.

Tabla 80. Resultado de maniobra de zig-zag 20°/20° en aguas relativamente profundas

MANIOBRA		Primera maniobra de Zig-zag 20°/20°		
Top	Descripción	Tiempo (s)	Yaw rate (°/min)	Rumbo (grados)
1	Inicio de maniobra	0	23,7	150
2	sobrepaso	1,4	133	130
a	detenida	35,1	0	45
3	sobrepaso	75	249	170
b	detenida	97	0	185
4	sobrepaso	118	247	130
Velocidad de aproximación		7,9 nudos		
RPM		1447		
Rumbo inicial (grados)		150°		

Conclusiones

1. Se ha desarrollado una herramienta de pruebas de mar que incorpora los sensores necesarios para monitorear en buques a escala real los parámetros necesarios para evaluar las características de maniobrabilidad.

2. Se ha desarrollado, aplicado y apropiado una metodología para la conducción y análisis de pruebas de mar siguiendo estándares de OMI, ITTC y SNAME.
3. Se ha aplicado técnicas de diseño de experimentos para racionalizar los recursos para la validación de las características de maniobrabilidad de buques a escala real.
4. La herramienta tecnológica desarrollada permite optimizar la inversión de recursos frente a los resultados obtenidos tanto en horas hombre para la conducción y el acompañamiento durante pruebas de mar como en número y confiabilidad de los datos obtenidos.

Bibliografía

- [1].IMO Resolution A.751 (18), 1993 “Interim standards for ship maneuverability”
- [2].IMO MSC/Circ.1053, 1993 “Explanatory notes to the standards for ship maneuverability”
- [3].IMO MSC. 137(76), 2002 “Standard for Ship Maneuverability. Resolution”.
- [4].SNAME N° 3-47 “Guide for sea trials. Technical and research bulletin”.
- [5].ITTC. Recommended Procedures. Full Scale Measurements Maneuverability, Full scale Maneuvering Trials Procedure. 2002.
- [6].ITTC. The special committee on trials and monitoring. Final report and recommendations to the 22nd.2005.
- [7].CARREÑO, Jorge. Proyecto de Tesis Doctoral. 2006. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales.
- [8].MONTGOMERY, D. C. 2004. Diseño y análisis de experimentos, Segunda Edición, Limusa Wiley, México.
- [9].MOHAMEND F. Islam, L. M. Lye. Combined use of dimensional analysis and modern experimental design methodologies in hydrodynamics experiments. Ocean Engineering 36 (2009) 237 - 247