

CONSIDERACIONES DE “SEAKEEPING”

Para los futuros buques de la Marina de Chile.

Nicolás Gaya Lazo *

Resumen.

En términos simples, “seakeeping” puede definirse como el comportamiento dinámico de un buque en el mar. Este comportamiento depende de muchos parámetros relacionados con el diseño del buque y las características del mar en las zonas de operación de éste.

Por mucho tiempo, las características de “seakeeping” de un buque fueron consideradas como un “arte” durante el proceso de diseño. Los diferentes planos eran optimizados a partir de pruebas empíricas por diseñadores de vasta experiencia.

Durante los años 80, la aplicación de métodos numéricos en el diseño de buques fue posible gracias al desarrollo de las tecnologías computacionales y del mejoramiento de las aplicaciones de “software”. Con estas nuevas herramientas, el análisis del “seakeeping” se transformó en uno de los aspectos fundamentales considerados durante todo el proceso de diseño.

Las áreas marítimas de responsabilidad de la Marina de Chile incluyen: aguas interiores, el mar territorial, la Zona Económica Exclusiva (ZEE) y el área marítima internacional de búsqueda y rescate comprendida entre la ZEE y el meridiano 131° W.

Considerando las condiciones de mar en la extensa zona de responsabilidad de la Marina de Chile y usando un modelo para la evaluación preliminar de “seakeeping”, desarrollado en la Dirección de Programas, Investigación y Desarrollo de la Armada, se sintetizaron algunas consideraciones convenientes de tener en cuenta para el diseño de los futuros buques de la Marina de Chile.

Este trabajo muestra cómo el “seakeeping” puede influenciar los requerimientos de un buque y es una herramienta fundamental para los diseñadores, ya que entrega un resumen de las principales consideraciones que han sido empleadas durante años por grupos internacionales de vanguardia en el diseño de buques, y en el diseño de los sistemas de armas y sus plataformas [8].

Parámetros y métricas para el “seakeeping”.

El comportamiento de un buque en el mar es analizado normalmente en un espacio tridimensional de ejes perpendiculares. Los diferentes movimientos del buque pueden representarse por seis grados de libertad conocidos como: largada, arribada, subida, rolo, cabeceo y guiñada. Esto hace que los modelos numéricos sean particularmente complejos.

Figura 1: Movimientos del buque.

Afortunadamente, los principales efectos sobre los sistemas de un buque son causados normalmente por tres de estos grados de libertad: rolo (“roll”), cabeceo (“pitch”) y subida (“heave”), lo que permite una simplificación del problema.

Tabla 1: Criterios de misión, RMS [12].

	Roll	Pitch	Nº	Vacc (g)	Lacc (g)	Vvel (m/s)
Tránsito cbta. mojada/ hr.	-	-	30	-	-	-
Tránsito slamming/ hr.	-	-	20	-	-	-
Tránsito personal en el puente	4°	1.5°	-	0.2	0.1	-
Tránsito MSI, ¹ Puente (%)	-	-	20	-	-	-
Emergida hélice/ hr.	-	-	90	-	-	-
Emergida sonar/ hr.	-	-	24	-	-	-
Sonar activo	7.5°	2.5°	-	-	-	-
Lanzamiento torpedo	3.8°	3.8°	-	-	-	-
Tiro con cañón de proa	3.8°	3.8°	-	-	-	0.5
Lanzamiento desde VLS	8.8°	1.5°	-	0.3	0.35	-
Tiro con CIWS	3.8°	3.8°	-	-	-	0.5
Aterrizaje ² de helicóptero [1]	3.0°	1.0°	-	0.15	0.25	2.0
Transporte de helicóptero	5.0°	1.0°	-	-	-	-
Recarga de VLS (3/hr)	3.8°	1.0°	-	0.15	0.15	-
Recarga manual de torpedo	1.5°	1.5°	-	-	-	-
Recarga de equipamiento de soporte	1.8°	1.8°	-	-	-	-
RAS cbta. mojada/ hr	-	-	0. 5	-	-	-
RAS de equipos en “pallets”	2.2°	2.2°	-	-	-	-
RAS de misiles	1.6°	1.6°	-	-	-	-
VERTREP	-	-	-	-	-	1.05

La Tabla 1 demuestra que muchas de las actividades operacionales tienen limitaciones relacionadas con el “seakeeping” para asegurar el rendimiento de los sistemas de armas.

Usando la información entregada en la Tabla 1 y teniendo en cuenta la relación directa que existe entre velocidades y aceleraciones (vertical y lateral) con la ubicación de los sistemas a bordo, se puede obtener un criterio general para rolido, cabeceo, aceleración vertical (Vacc), aceleración lateral (Lacc) y velocidad vertical (Vvel), considerando los criterios de misión para el aterrizaje de helicópteros, que es uno de los más exigentes a bordo de los buques de guerra [1].

El comportamiento del buque es estudiado mostrando los parámetros antes mencionados en diagramas polares. Cada diagrama indica la magnitud del parámetro evaluado en diferentes Estados de Mar, a una velocidad dada del buque y considerando las olas desde diferentes direcciones (relativas a la proa de éste)

Figura 2: Diagramas polares para rolido (“roll”) y cabeceo (“pitch”) a 15 nudos en Estado de Mar 5.³

La figura 2 muestra un ejemplo de estos diagramas para una fragata de 3800 tons.

Para un determinado buque, se puede obtener un conjunto de diagramas polares de rolido, cabeceo, aceleración vertical, aceleración lateral y velocidad vertical. Cada diagrama polar representando el comportamiento a una determinada velocidad. Traslapando estos diagramas y aplicando los criterios de misión, mencionados anteriormente, se puede obtener un diagrama polar simplificado que representa las áreas donde el buque satisface los requerimientos de “seakeeping”. Estas áreas son denominadas como “Operating Envelopes”. La figura 3 muestra un ejemplo del proceso de traslape aplicado a la obtención del “Operating Envelope” de rolido de una Fragata de 3800 toneladas.

Figura 3: “Operating Envelope” para rolido obtenido usando procedimiento de traslape (azul).

Finalmente, traslapando todos los “Operating Envelopes” individuales (para rolido, cabeceo, aceleraciones verticales y laterales y velocidad vertical), es posible obtener un diagrama polar combinado que representa las áreas en las que el buque satisface todos los criterios de misión planteados. La figura 4 muestra un ejemplo de este proceso de traslape considerando rolido y cabeceo y para velocidades del buque entre 0 y 25 nudos.

Figura 4: “Combined Operating Envelope” para rolido y cabeceo (sombreado).

El área sombreada de la figura 4 representa aproximadamente el 51.5% del área circular total entre 0 y 25 nudos. El área en la que el buque cumple con los requerimientos de “seakeeping” es llamada normalmente “Operation Index” [9] o “Combined Operating Envelope” [12].

Modelo para la evaluación preliminar de “seakeeping”.

Normalmente es muy difícil simular el “seakeeping” debido a que el comportamiento del buque en el mar depende de muchos factores relacionados con la forma del casco y sus dimensiones, todos aspectos que requieren de un avanzado nivel de desarrollo de la fase de ingeniería básica del buque. Esto implica que se requieren planos y cálculos más refinados.

Lamentablemente en la práctica, el cliente normalmente desea tener una idea preliminar de las “características generales del buque” en etapas tempranas del proceso de ingeniería, al menos sus dimensiones. Para hacer frente a esta comprensible curiosidad y entregar respuestas con un mayor nivel de precisión, se desarrolló un modelo de evaluación preliminar de “seakeeping” [4] usando las principales características de un buque: eslora entre perpendiculares (L_{pp}), manga en la línea de agua (B_{wl}), calado hidrostático (T) y coeficiente de bloque (C_B).

En el caso de buques de guerra como Corbetas, Fragatas y Destruyores, se asumió un coeficiente de bloque similar para todos los casos (≈ 0.52). Con este parámetro estático, se obtuvieron las funciones de transferencia que permiten simular el comportamiento dinámico del buque en función de las demás características dimensionales (L_{pp} , B_{wl} y T). Aplicando conceptos de análisis de sistemas lineales para una de las tres dimensiones involucradas, se puede comprobar que el modelo del buque se comporta de la misma forma que un filtro electrónico.

Figura 5: Función de transferencia para la dinámica de un buque (una dimensión solamente).

En la figura 5, $W(s)$ representa la transformada de Laplace de la señal de entrada (olas) y $\theta(s)$, la transformada de Laplace de la señal de salida (en este caso el ángulo de rolo).

Con este modelo y el proceso de traslape de diagramas polares descrito anteriormente, es posible obtener el comportamiento preliminar de “seakeeping” de buques de guerra y con esto, una mejor aproximación de las características dimensionales requeridas por los clientes en etapas tempranas del proceso de ingeniería.

En la figura 6 se entrega un esquema con los pasos de operación de este modelo.

- a) Primer paso: cálculo de la dinámica del buque y condiciones de mar.
- b) Segundo paso: simulaciones dinámicas a diferentes velocidades y direcciones del oleaje.
- c) Tercer paso: cálculo del “Combined Operating Envelope” (sombreado).

Figura 6: Pasos de operación del modelo de evaluación preliminar de “seakeeping”.

Condiciones de mar en las aguas de responsabilidad chilena.

Se mencionó anteriormente que las aguas de responsabilidad Chilena comprenden desde aguas interiores hasta un área marítima internacional de búsqueda y rescate limitada por el meridiano 131° W (ver figura 7). En esta extensa área la dirección predominante del mar es sur weste, con condiciones de mar que normalmente alcanzan el Estado de Mar 5 o superior.

Figura 7: Área marítima Chilena de búsqueda y rescate.

Los Estados de Mar pueden ser transformados en datos más precisos utilizando la Tabla 2 y las referencias [10] y [12], por lo que se puede deducir que las alturas y períodos típicos del oleaje en la zona de responsabilidad son los siguientes:

Altura típica de la ola: 2.5 – 6.0 [m]

Período típico de la ola: 7.8 – 9.7 [seg]

Tabla 2: Estados de Mar.

Estado de Mar Nº	Altura significativa de la ola [m]		Período modal de la ola [seg]	
	Rango	Mediana	Rango	Probable
0 - 1	0-0.1	0.05	-	-
2	0.1-0.5	0.3	3.3-12.8	7.0
3	0.5-1.25	0.88	5.0-14.8	7.5
4	1.25-2.5	1.88	6.1-15.2	8.8
5	2.5-4.0	3.25	8.3-15.5	9.7
6	4.0-6.0	5.0	9.8-16.2	12.4
7	6.0-9.0	7.5	11.8-18.5	15.0
8	9.0-14.0	11.5	14.2-18.6	16.4
>8	>14.0	>14.0	18.0-23.7	20.0

Estas condiciones de mar entregan las primeras consideraciones a ser tenidas en cuenta durante el complejo proceso de diseño de los nuevos buques de la Marina de Chile.

Efectos de las condiciones de mar sobre los buques de guerra.

Usando el modelo de evaluación preliminar de “seakeeping” se obtuvieron las características dinámicas generales de un conjunto de buques de guerra monocasco de diferentes desplazamientos (fragatas y destructores) en Estados de Mar 5 y 6 (límites medios).⁴

Para el criterio de misión establecido en la Tabla 1, se obtuvieron los “Combined Operating Envelopes” generales indicados en la Tabla 3.

Ahora utilizando el porcentaje de “Combined Operating Envelope” establecido en el “Principles of Naval Architecture” [9] (ver Tabla 4), se obtuvo una tabla general de cumplimiento del criterio de misión considerado (Tabla 5) para buques tipo destructores y fragatas con desplazamientos entre 2000 y 8000 toneladas para Estados de Mar 5 y 6 (SS 5 y SS 6). (Fig. 8).

Tabla 3: “Combined Operating Envelopes”.

2000-3000 tons
3000-4000 tons
4000-5000 tons
5000-6000 tons
6000-7000 tons
7000-8000 tons

Tabla 4: Criterio de porcentaje para “Combined Operating Envelopes”.

SS 5	SS 6
≥ 40%	≥ 27%

Tabla 5: Cumplimiento criterio de misión (aterrizaje de helicóptero).

Desplazamiento	Capacidad aterrizaje helicóptero	
	SS 5	SS 6
2000-3000 tons	✗ ⁵	✗
3000-4000 tons	✓	✗
4000-5000 tons	✓	✗ ⁵
5000-6000 tons	✓	✓
6000-7000 tons	✓	✓
7000-8000 tons	✓	✓

Figura 8: Fragata Clase “Leander” (≈3200 tons.) preparándose para reaprovisionamiento en el mar.

De la Tabla 5 y las condiciones de mar descritas para las aguas de responsabilidad Chilena, se puede deducir que los futuros buques de guerra de la Marina de Chile deben desplazar más de 4000 toneladas, idealmente sobre 5000 toneladas, para garantizar operaciones sin restricciones al menos en las aguas de responsabilidad, dados los criterios establecidos en la Tabla 1.

Condiciones de mar alrededor del mundo.

La Tabla 1 muestra que los sistemas del buque son afectados por los parámetros de “seakeeping” y con ello, las capacidades de interoperación del buque.

Con la intención de obtener las consideraciones relacionadas con capacidades de interoperación en aguas internacionales para los futuros buques de guerra de la Marina de Chile, a continuación se utilizarán los resultados entregados en la Tabla 5 y se analizarán las condiciones de mar en dichas aguas.

Las condiciones de mar alrededor del mundo han sido estudiadas por muchos años por razones de seguridad y para el diseño de buques. Estas bases de datos se han obtenido de estimaciones, mediciones en largos periodos de tiempo y estudios teóricos, complementados con experiencias del servicio a bordo.

Esta información permite elaborar mapas de las condiciones de mar alrededor del mundo para mostrar aquellas áreas oceánicas donde, por ejemplo, su comportamiento supere cierto valor de Estado de Mar.

Figura 9: Áreas oceánicas donde Estados de Mar 6 o superiores son normalmente alcanzados (achuradas).

Los mapas de la figura 9 muestran aquellas áreas donde las condiciones de mar son iguales o superiores al Estado de Mar 6^o [10]. Se puede apreciar que estas áreas representan una extensa zona en los océanos del mundo.

A partir de las condiciones de mar mostradas en la figura 9 y el resumen de antecedentes entregado en la Tabla 5, es posible deducir que para tener capacidades de operación mundial sin restricciones se requieren buques de guerra con desplazamientos superiores a las 5000 toneladas.

Tendencia de los buques de guerra.

A partir de información de libre acceso (Jane’s Fighting Ships [7] y otras publicaciones), es posible verificar la tendencia de los buques de guerra de las diferentes Marinas alrededor del mundo. Los resultados de este análisis se indican en el siguiente resumen:

América: Sólo las marinas de EE.UU. y Canadá tienen capacidades de operación mundial sin restricciones. Es importante mencionar aquí que si bien países como Chile y Perú tienen plataformas con desplazamientos suficientes para proveer buenas características de “seakeeping”, éstas son muy antiguas y están prontas a ser decomisionadas.

África: No se encontraron plataformas con capacidades de operación mundial sin restricciones.

Asia: Se estima que casi todas las Marinas de primer nivel de este continente tienen capacidades de operación mundial sin restricciones.

Europa: Prácticamente todas las Marinas de primer nivel de este continente se encuentran construyendo buques de guerra con desplazamientos sobre las 5000 toneladas, incluso

buques sobre 6000 y cerca de 8000 toneladas. Esto confirma que estas Marinas están haciendo importantes esfuerzos para lograr capacidades de operación mundial sin restricciones.

Oceanía: No se encontraron plataformas con capacidades de operación mundial sin restricciones.

Conclusiones.

Las capacidades de operación mundial sin restricciones de los buques de combate dependen, entre otros factores, de las características dinámicas de la plataforma en la que serán instalados los sistemas de armas.

Las aguas de responsabilidad Chilena demandan altas exigencias respecto de “seakeeping”, debiendo considerarse buques con desplazamientos sobre las 4000 toneladas (idealmente sobre 5000 toneladas para interoperar a nivel mundial), de tal manera de maximizar las capacidades operacionales al menos en esta zona de responsabilidad.

Se mencionó que las Marinas Europeas de primer nivel se encuentran construyendo nuevos buques de guerra con desplazamientos sobre 5000 toneladas, incluso buques sobre 6000 y hasta cerca de las 8000 toneladas. Este esfuerzo demuestra que para lograr capacidades operacionales a nivel mundial sin restricciones se requieren buques con desplazamientos mayores.

El fenómeno de la globalización y las obligaciones internacionales asumidas por el Gobierno de Chile han generado tareas bastante demandantes para la Marina. Los intereses internacionales y nacionales se pueden encontrar lejos de nuestras costas. Las rutas marítimas pueden cruzar a través de áreas que requieran capacidades operacionales sin restricciones para poder ser protegidas. A la fecha, la protección de estas áreas se encuentra restringida sólo a un grupo de Marinas en el mundo. En caso de un conflicto a gran escala o bien de una amenaza terrorista, las rutas marítimas regulares podrían ser cerradas y el tráfico marítimo desviado a zonas donde se requieran altas exigencias de “seakeeping” donde, por el momento, sólo es posible brindar una limitada protección.

El resumido análisis continental muestra qué Marinas tienen capacidades de operación mundial sin restricciones y cuáles aún no pueden satisfacer las actuales demandas provenientes del fenómeno de la globalización. En este escenario globalizado es posible hablar de “fronteras para la interoperación” [6]. Estas fronteras constituyen un gran desafío para la Marina de Chile y para todas aquellas Marinas cuyas misiones requieran de capacidades de operación mundial sin restricciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Brown, D.K. “The future British Surface Fleet, Options for Medium-Sized Navies”, Conway Maritime Press, 1991.
2. Couser, P. “Seakeeping Analysis for Preliminary Design”.
(www.formsys.com/Maxsurf/MSPProductRange/SKPaper-Jul00.pdf)
3. Daring Class-Type 45 (www.type45.com)
4. Gaya, N. “Diseño de Modelo para Evaluación de Seakeeping”, Documento interno de la Dirección de Programas Investigación y Desarrollo de la Armada en el que se describe el diseño del modelo para evaluación preliminar de “seakeeping”, 2002.

5. Gaya, N. "Evaluación de Seakeeping", Documento interno de la Dirección de Programas Investigación y Desarrollo de la Armada en el que se describe la evaluación de diferentes buques de guerra bajo el punto de vista del "seakeeping", 2002.
 6. Gaya, N. "Fronteras para Interoperación en el Mar", exposición efectuada durante EXPONAVAL 2002 (www.exponaval.cl).
 7. Jane's Fighting Ships 2002-2003 (<http://online.janes.com>)
 8. Jeffery, R. Entrevista personal, 10/24/02
 9. Lewis, E. "Principles of Naval Architecture", Volume 3, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989.
 10. Lloyd's Register of Shipping, "Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships", Jan 2002.
 11. "Principles of Naval Architecture", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1968.
 12. STANAG 4154 Edition 3, "Common Procedures for Seakeeping in the Ship Design Process", NATO Standardization Agreement, unclassified, 1998
-

NOTAS

* Tte. 1º Ingeniero Naval Electricista.

1. MSI: "Motion Sickness Incidence". Este parámetro evalúa el porcentaje de dotación mareada.
2. Sin sistema de recuperación.
3. El Estado de Mar 5 fue considerado con altura media significativa de la ola (3.25 m) y el período de modal de ola más probable (9.7 seg).
4. Límites medios significa altura media de la ola y período de ola más probable de la Tabla 2.
5. Los desplazamientos de los límites superiores cumplirían, pero utilizando estabilizadores.
6. Para más información respecto del Estado de Mar 6, ver Tabla 2.