

Universidad de La Laguna
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Sección Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

**Trabajo de
Fin de Grado**

**Maniobrabilidad en buques equipados con paso
fijo y paso variable**

Presentado por

Enzo Giménez Queren

Tutores

Juan Antonio Rojas Manrique

David Brito Hernandez

Presentado en Septiembre 2019



Resumen

El principal objetivo es comprobar si existen diferencias en la capacidad de maniobra de los buques según el tipo de propulsor que tienen equipado. Para cumplir con este objetivo, se deben esclarecer previamente determinados conceptos e ideas. El primero de estos conceptos es el de “maniobrabilidad”, definido como la capacidad de un buque para posicionarse respecto a su entorno y siempre a voluntad del maniobrista.

Otros conceptos e ideas de relevante importancia en este trabajo son los efectos que producen las hélices como elementos propulsores de un buque y la reacción que cabe esperar de cualquier buque ante ellos; para así poder aprovechar algunos de esos efectos para maniobrar con mayor eficacia y sin sobresaltos.

Para este trabajo, se han escogido a dos buques para ser comparados, intentando que tengan cierta similitud. Los buques son diferentes en cuanto a funcionalidad, no obstante, sus dimensiones estructurales son muy similares.

Para comparar la capacidad de maniobra de ambos buques, se han consultado las curvas de evolución de cada uno de ellos. Estas curvas aportan datos acerca de la capacidad de maniobra de cada buque en particular, normalmente cuando el buque se halla en condición de lastre. Los datos que se ofrecen en estos gráficos son obtenidos en las pruebas de mar con diferentes maniobras, las cuales se explican en este trabajo (al igual que el significado de los datos que se obtienen de dichas maniobras).

Finalmente, se han alcanzado unas conclusiones acerca de cuál es el mejor tipo de propulsor para un buque.

Abstract

The main objective is to test if there's any difference in the maneuveral capacity of a vessel according to the type of propeller which they have equipped. To accomplish with this objective, it must be clarified previously dterminated concepts and ideas. The first one is "maneuverability", defined as the capacity of a vessel for position itself respect to their environment and alwaysat the helmsman will.

Other concepts and ideas of relevant value in this redacction are the effects produced by the propellers as propellant elements of a vessel and the reaction that is expected in any vessel. The veseel can take advantage of this effects for maneuver with effectiveness and with no frights.

For this redacction, it has been choosen tow vessels for to be compared, trying that they are some similar. The vessels are different in their work, but their structure is so similar.

In order to compare the maneuveral capacity of both vessels, it have been consulted the Evolution Curves of each one vessel. This graphics provides data about the maneuveral capacity of each vessel, normally when the vessel is in ballast condition. The data showed on this graphics are obtained in the sea testing proves with differents movemments and maneouverings, which are explained in this redaction (including the meaning of the data obtained in those maneouverings).

Finally, some conclusions have been reached about which type of propeller is better for a vessel.

Índice general

Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XV
Acrónimos	XVII
Simbología	XIX
1. Introducción	1
2. Maniobrabilidad	3
2.1. Factores/Cualidades de la maniobrabilidad de un buque:	3
2.2. Maniobras que definen/demuestran la maniobrabilidad de un buque	4
2.3. Criterios OMI de Maniobrabilidad	9
2.4. Curvas de Evolución	10
3. Buques con Hélice de Paso Fijo	11
3.1. La Hélice	11
3.2. Tipos de Hélices	12
3.3. Hélices de Paso Fijo	12
3.4. Efectos Producidos por la Hélice	13
3.5. Fuerzas y Corrientes creadas por la Hélice y la Marcha del Buque	14
4. Buques Equipados con Hélices de Paso Variable	17
4.1. ¿Qué es el Paso Variable?	17
4.2. Sistema Kamewa	17
4.3. Principio de Funcionamiento del Sistema Kamewa	18
4.3.1. Paso Atrás	18
4.3.2. Paso Avante	19
4.3.3. Paso Cero	20
4.4. La Caja Distribuidora de Aceite (Sist. Kamewa)	20

5. Efectos Combinados de la Hélice y el Timón	23
5.1. Tratamiento de Variables	23
5.2. Buque partiendo del Reposo	23
5.2.1. Buque partiendo del Reposo para ir Avante	24
5.2.2. Buque partiendo del Reposo para ir Atrás	24
5.3. Buque con Arrancada Avante	25
5.3.1. Buque con Arrancada Avante y Máquina Avante	25
5.3.2. Buque con Arrancada y Máquina Atrás	25
5.4. Buque con Arrancada Atrás y Máquina Avante	27
5.5. Efectos Combinados en buques de 2 Hélices	28
5.5.1. Ciaboga partiendo del Reposo	28
5.5.2. Maniobra de Ciaboga con Hélices de giro hacia dentro	29
6. Comparación entre Paso Fijo y Paso Variable	31
7. Caso práctico I: B/T Tinerfe (Paso Fijo)	33
7.1. Ship's Particulars Tinerfe	33
7.2. Curvas de Evolución del B/T Tinerfe	34
7.2.1. Maniobras de Giro	35
7.2.2. Maniobra de Emergencia	38
7.3. Maniobra de atraque del B/T Tinerfe en Ibiza	39
8. Caso práctico II: S/F Bahama Mama (Paso Variable)	43
8.1. Ship's Particular S/F Bahama Mama	43
8.2. Curvas de Evolución del S/F Bahama Mama	44
8.2.1. Maniobras de Giro	44
8.2.2. Maniobra Crash Stop	46
8.2.3. Maniobra de Zig-Zag	46
8.3. Maniobra de atraque del S/F Bahama Mama en Barcelona	47
9. Conclusiones	53
10. Conclusions	55
Anexos	59
A. Imágenes de CPP	59
Bibliografía	59

Índice de figuras

2.1.	Diagrama de la maniobra de Giro y los parámetros que se miden en ella(Fuente: <i>Maniobrabilidad de los Buques</i> [11]).	5
2.2.	Diagrama de maniobra de Zig-Zag (Fuente: <i>Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad</i> [3]).	6
2.3.	Diagrama de maniobra de Kempf (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i> [10]). . .	6
2.4.	Gráfica de un buque estable (Fuente: <i>Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad</i> [3]).	7
2.5.	Gráfica de un buque inestable (Fuente: <i>Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad</i> [3]).	7
2.6.	Trayectoria descrita por un buque estable (Fuente: <i>Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad</i> [3]). . .	8
2.7.	Trayectoria descrita por un buque inestable (Fuente: <i>Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad</i> [3]). . .	8
2.8.	Diagrama de la curva de Pull Out (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i> [10]). . .	9
3.1.	Diagrama del giro de hélices gemelas de paso fijo aplicadas a un buque tipo (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	13
3.2.	Diagrama de las fuerzas resultantes que se dan en la pala de una hélice y sus componentes desde una perspectiva vertical (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	14
3.3.	Diagrama de las fuerzas resultantes que se dan en cada pala de una hélice y sus componentes (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	15
4.1.	Dibujo del Pistón que hace posible variar el paso de la hélice (Fuente: <i>Hélice de paso Variable</i>).[8]	18
4.2.	Hélice de Paso Variable dispuesta para ir marcha atrás (Fuente: <i>Hélice de Paso Variable</i>).[8]	19
4.3.	Hélice de Paso Variable dispuesta para ir marcha adelante (Fuente: <i>Hélice de Paso Variable</i>).[8]	19
4.4.	Hélice de Paso Variable dispuesta en paso cero, el buque no avanza aunque la hélice gire (Fuente: <i>Hélice de Paso Variable</i>).[8]	20
5.1.	Diagrama de los efectos producidos en el buque al partir del reposo para ir adelante(Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	24

5.2.	Diagrama de los efectos producidos en el buque al partir del reposo para ir hacia atrás(Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	25
5.3.	Diagrama de los efectos producidos en el buque cuando tiene arrancada adelante y se le ordena más máquina adelante (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	26
5.4.	Diagrama de los efectos producidos en el buque cuando tiene arrancada adelante y se le ordena máquina atrás (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10] . . .	26
5.5.	Diagrama de los efectos producidos en el buque cuando tiene arrancada atrás y se le ordena máquina adelante (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	27
5.6.	Diagrama de la maniobra de Ciaboga de un buque con dos hélices, partiendo del Reposo(Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	29
5.7.	Diagrama de la maniobra de Ciaboga de un buque con dos hélices, partiendo del Reposo y haciendo uso del timón (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	30
5.8.	Diagrama de la maniobra de Ciaboga de un buque con dos hélices de giro hacia dentro (Fuente: <i>Maniobra de los Buques</i>).[10]	30
7.1.	El B/T Tinerfe atracado en la terminal de Mahon, Menorca (Fotografía realizada por el alumno durante su periodo de prácticas a bordo).	34
7.2.	Señalado en la imagen, el muelle de Botafoch, donde atraca el B/T Tinerfe cuando recalca en Ibiza (Fuente: <i>Google Earth</i>).[4]	39
7.3.	B/T Tinerfe atracado y descargando en el muelle de Botafoch, Ibiza(Fotografía realizada por el alumno durante su período de prácticas a bordo).	41
8.1.	El S/F Bahama Mama entrando al Puerto de Denia, Alicante (Fotografía realizada por el alumno).	44
8.2.	Diagrama de la Maniobra de Zig-Zag 10/10 del Super Ferry (S/F) Bahama Mama (Fuente: Curvas de Evolución del S/F Bahama Mama).	48
8.3.	Zona norte del puerto de Barcelona (Fuente: <i>Google Earth</i>).[4]	50
8.4.	Lugar donde atraca el S/F Bahama Mama en Barcelona (Fuente: <i>Google Earth</i>).[4]	51
8.5.	S/F Bahama Mama atracado en Barcelona (Fotografía realizada por el alumno durante su período de prácticas a bordo).	51
A.1.	Vista general de las Controlable Pitch Propeller (Hélice de Paso Variable) (CPP) del buque <i>Passió Per Formentera</i> (Fotografía tomada por el alumno durante su período de prácticas a bordo).	59
A.2.	Vista en detalle de una de las CPP del buque <i>Passió Per Formentera</i> (Fotografía tomada por el alumno durante su período de prácticas a bordo). . .	60
A.3.	Vista en detalle de una de las CPP del buque <i>Passió Per Formentera</i> (Fotografía tomada por el alumno durante su período de prácticas a bordo). . .	61

Índice de tablas

7.1. Relación entre regímenes de máquina y sus respectivas velocidades.	34
7.2. Calados del B/T Tinerfe según condición de carga (m).	35
7.3. Datos obtenidos de la primera Maniobra de Giro.	36
7.4. Datos obtenidos de la segunda Maniobra de Giro.	36
7.5. Datos obtenidos de la tercera Maniobra de Giro.	37
8.1. Datos obtenidos de las primeras Maniobras de Giro.	45
8.2. Datos obtenidos de las primeras Maniobras de Giro.	45
8.3. Ángulos de Rebasamiento en la Maniobra de Zig- Zag).	47
9.1. Datos obtenidos de las maniobras de giro (en esloras).	53
9.2. Datos obtenidos de las maniobras de parada de emergencia.	54
10.1. Data obtained from the turning maneuvers (in lengths).	55
10.2. Data obtained from the emergency stop maneuvers.	55

Acrónimos

OMI	Organización Marítima Internacional
rpm	Revoluciones Por Minuto
FP	Fixed Pitch (Hélice de Paso Fijo)
CPP	Controlable Pitch Propeller (Hélice de Paso Variable)
Pn	Presión Normal
Pl	Presión Lateral
E	Empuje efectivo
Ca	Corriente de Aspiración
Ce	Corriente de Expulsión
B/T	Buque Tanque
S/F	Super Ferry
CLH	Compañía Logística de Hidrocarburos
F.O.	Fuel Oil
M.D.O.	Motor Diesel Oil
Br	Babor
Er	Etribor
Pr	Proa
Pp	Popa
M/T	Motor Tanker

Simbología

Símbolo	Descripción
<i>L</i>	Eslora del buque en metros.
<i>V</i>	Velocidad del buque en <i>m/s</i> .
<i>m</i>	Metros.
<i>seg</i>	Segundos.
<i>mn/h</i>	Millas náuticas por hora.
<i>h</i>	Horas.
<i>e</i>	Fuerza Longitudinal de empuje.
<i>E</i>	Fuerza Total de empuje de la hélice (Empuje Efectivo).
<i>r</i> o	Presión Normal.
<i>R</i>	Fuerza Total resultante.
<i>l</i>	Presión Lateral en sección 3.5
<i>Lr</i>	Fuerza Lateral Total de la hélice.
<i>GT</i>	Gross Tons//Toneladas de Registro Bruto (TRB).
<i>TN</i>	Toneladas Netas.
<i>m³</i>	Metros cúbicos.
<i>KW</i>	Kilovatios de potencia.

1 Introducción

Actualmente se presupone que todo buque que entra en un puerto cumple con unos mínimos en cuanto a maniobrabilidad se refiere. Sin embargo, conocer al detalle la capacidad de maniobra de un buque es muy útil a la hora de establecer un plan de atraque o de salida de puerto. No es muy descabellado afirmar que, el tipo de propulsor (y número) con el que está equipado un buque determina en gran medida la maniobrabilidad de éste. Por ejemplo, el simple hecho de que el propulsor sea de paso variable o fijo influye de forma considerable en la toma de decisiones para elegir una de entre las diversas formas de proceder a un mismo punto. Cabe tener en cuenta, que en estos días, el factor económico es una de las claves para que un armador se decante por un tipo de propulsor u otro en sus buques.

Para intentar determinar si un tipo de propulsor es mejor o más adecuado que otro, se comparan dos buques que tienen cierta similitud. Son diferentes en cuanto a tipo y número de propulsores se refiere, no obstante, sus dimensiones estructurales son muy similares.

Para obtener una conclusión formal, es necesario conocer a fondo los dos tipos de propulsores así como los efectos que producen en los buques, las diferencias entre ellos, las ventajas e inconvenientes de cada tipo de propulsor y, por supuesto, los buques comparados.

2 Maniobrabilidad

La Maniobrabilidad puede definirse como *la eficacia con la que un buque puede maniobrar y mantener o variar su proa a voluntad del timonel, con el propósito de lograr una determinada posición respecto a su entorno*[5]. Este porcentaje de eficacia depende de dos capacidades[5]:

- La Capacidad de Gobierno: que es la capacidad para mantener la proa del buque apuntando a un determinado rumbo.
- La Capacidad de Evolución: que es la respuesta del buque a la acción conjunta de la máquina y el timón para realizar un cambio de rumbo y llevar a cabo un fin previsto (alcance, un alejamiento de otro buque, etc.).

2.1 Factores/Cualidades de la maniobrabilidad de un buque:

La maniobrabilidad de un buque depende de ciertos factores. Cabe destacar que estos condicionantes quedan reflejados en las curvas experimentales de cada buque (que son fruto de las pruebas de mar y de las maniobras que se hacen en ellas). Por tanto, las cualidades que mejor definen la maniobrabilidad de un buque son[3]:

- *La Estabilidad del Rumbo o de Ruta*: que es la capacidad para mantener un rumbo determinado haciendo el menor uso del timón. Cuanto más tenga que utilizarse el timón para mantener un determinado rumbo, menor será su estabilidad de rumbo. Al mismo tiempo, con esta cualidad se puede conocer también la velocidad de guiñada del buque, que variará en función del ángulo de metida del timón.
- *La Facilidad de Evolución*: que es la capacidad de realizar una maniobra con un fuerte ángulo de cambio de rumbo en un espacio reducido. El cambio debe ser de al menos 180 grados, para lo que se requieren grandes ángulos de metida del timón.
- *La Facilidad del Cambio de Rumbo*: que es la capacidad para cambiar de ruta o trayectoria en el menor espacio y con la mayor rapidez posibles. Esta capacidad está relacionada con las dos anteriores (respuesta rápida del timón y maniobrar en espacios reducidos), debido a que se tiene muy en cuenta a la hora ejecutar maniobras anticolidión; por lo tanto, es una cualidad del buque muy importante de conocer para preservar su seguridad durante la navegación.

2.2 Maniobras que definen/demuestran la maniobrabilidad de un buque

Durante las pruebas de mar que realizan los buques al salir de los astilleros, se realizan una serie de maniobras mediante la cuales se pueden conocer, de forma objetiva, las cualidades y capacidades anteriormente citadas. Algunas de estas maniobras definitorias son:

- **Maniobra de Giro (figura 2.1):** con el buque a una velocidad y rumbo constantes en marcha avante, se mete un determinado ángulo de timón y se deja que el buque realice un círculo hasta que el rumbo cambie 540 grados respecto al rumbo inicial[3]. Esto es, dejar que el buque realice por lo menos una vuelta y media. Realizada la maniobra, se recopila trayectoria del buque y sobre ésta se miden[11]:
 - El Diámetro de Giro: es la distancia máxima entre dos puntos opuestos del giro en el período uniforme. Aunque es el parámetro más conocido de esta maniobra, no es cierto que marque el espacio mínimo para maniobrar con un buque. Lo más común es que esta distancia sea de entre 2 y 4 esloras.
 - El Diámetro Táctico: es la separación entre la posición inicial del buque y cuando éste se encuentra en un rumbo opuesto, es decir, cuando su rumbo ha variado en 180 grados.
 - El Avance: la distancia recorrida hasta que el buque cambia su rumbo 90 grados respecto al rumbo inicial. Son aceptables valores de entre 2 y 3 esloras de distancia recorrida.
 - El Traslado Lateral: es la distancia lateral alcanzada por el buque cuando su proa ha caído en 90 grados respecto a su proa inicial. El corte entre el final del Avance y el final de esta medida marca el punto inicial de la Curva de Giro. Son normales valores de entre 1.5 y 2.5 esloras de distancia.

Esta maniobra ofrece otro parámetro importante para la maniobra del buque. Este parámetro es el tiempo, es necesario medir el tiempo que emplea el buque en hacer cambios de rumbo de 90, 180 y 360 grados[11].

- **La Maniobra de Zigzag (figura 2.2):** se realiza metiendo el timón a un determinado ángulo (normalmente unos 20 grados a una banda) y se espera a que el rumbo cambie en la misma medida que el ángulo de metida del timón. Es decir, si se meten 20 grados a estribor y se espera a que el rumbo varíe en 20 grados desde que se modificó el timón. Cuando el buque alcanza el rumbo deseado, se lleva el timón a la banda contraria y en igual medida. Continuando con el ejemplo anterior, cuando el buque alcanzase el rumbo deseado, se pasarían de 20 grados a estribor, a 20 grados a babor (lo que supondría en el timón un cambio de 40 grados) hasta que el buque alcance nuevamente el rumbo deseado. Esta operativa se repite unas tres o cuatro veces. Al igual que en la maniobra anterior, se recopila la trayectoria del buque (además de los cambios en el timón) y sobre ésta se miden[3]:
 - El Número P de Norrbín: que es el ángulo de rumbo girado por unidad de ángulo de timón empleado, cuando el buque ha recorrido una distancia de una eslora desde la metida de timón.
 - El Ángulo de Rebasamiento (Overshoot): que es el ángulo que dibuja la trayectoria del buque al cambiar el timón de una banda a otra. Gracias a este ángulo se puede saber la distancia de riesgo de un buque, que es la distancia que avanzaría el buque en caso de un cambio brusco del rumbo.

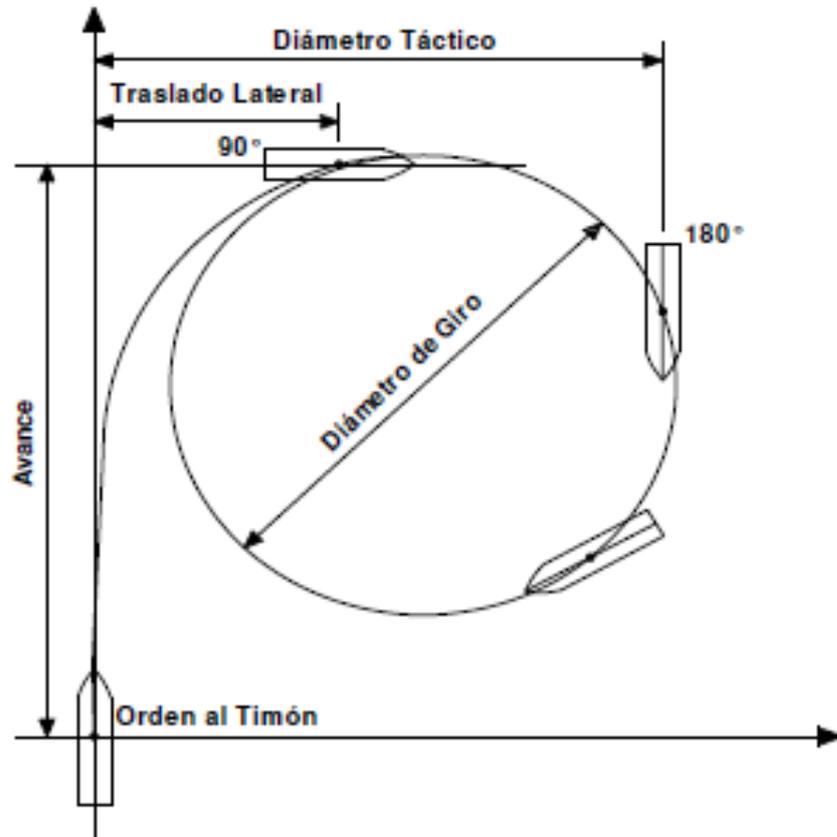


Figura 2.1: Diagrama de la maniobra de Giro y los parámetros que se miden en ella (Fuente: *Maniobrabilidad de los Buques*[11]).

En algunas publicaciones y estudios, esta misma maniobra de zigzag se la denomina como “Maniobra de Kempf” (figura 2.3). Esto es debido a que de esta maniobra también se puede obtener el Periodo de Kempf. Este periodo es el tiempo transcurrido entre dos cambios de rumbo iguales[10]. Es decir, el tiempo que se tarda, por ejemplo, desde que se hace el primer cambio de 20 estribor a 20 babor hasta que se tiene que repetir esta acción (tiempo en el cual hay un cambio de rumbo intermedio: de 20 babor a 20 estribor). Añadir, por último, que esta misma maniobra se repite, pero con una caída inicial de 10 grados.

- Maniobra de Espiral (o de Dieudonné)[3](figuras 2.4 a 2.7): con el buque a una velocidad y un rumbo constantes, se mete el timón a un determinado ángulo, normalmente 15 grados y se mantiene dicho ángulo de timón hasta que se alcanza una velocidad de giro uniforme durante al menos un minuto. Con el buque ya girando uniformemente, se reduce el ángulo de timón en 5 grados, es decir, si estaba en 15 grados estribor, se levanta hasta 10 grados estribor. Se espera hasta que la velocidad de giro vuelva a ser constante y una vez alcanzado ese estado de giro constante, se vuelve a modificar el ángulo del timón de igual forma. Para los últimos 5 grados (entre 5 y 0 grados de timón), es mejor repetir la acción de grado en grado; esto es, pasar de 5 estribor a 4 estribor, mantener hasta que el giro sea constante y proceder de igual forma hasta que el timón quede a la vía (0 grados). Cuando el timón vuelve a estar a la vía, se repite la secuencia de cambios; pero en este caso partiendo de cero grados y llevando el timón hacia la banda contraria y en igual medida que al inicio de la maniobra, esto es, hasta tener el timón en 15 grados a babor. De esta maniobra se recogen los datos

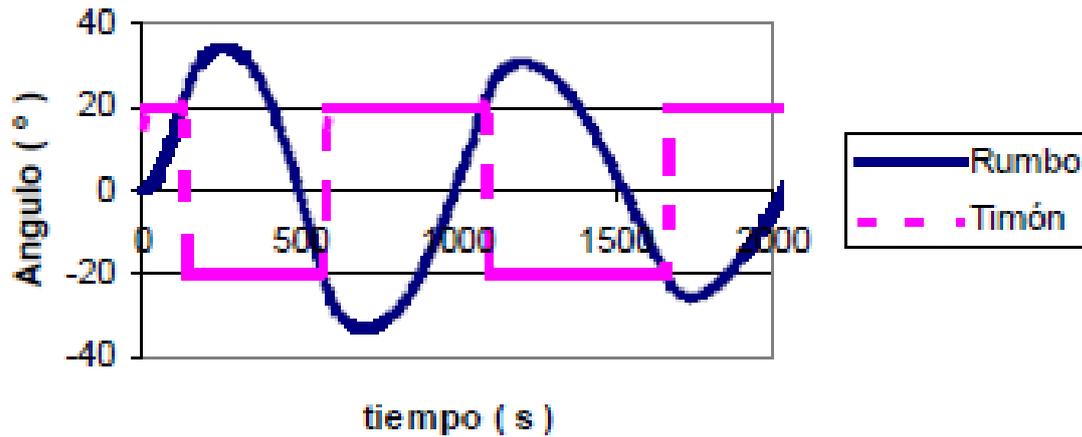


Figura 2.2: Diagrama de maniobra de Zig-Zag (Fuente: *Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad*[3]).

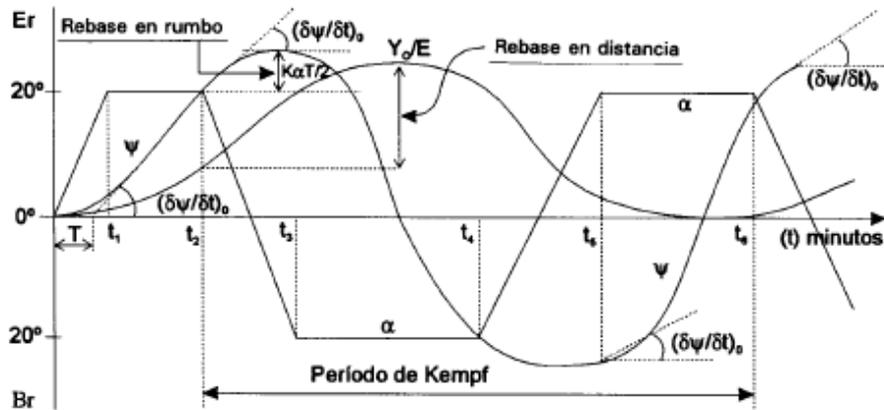


Figura 2.3: Diagrama de maniobra de Kempf (Fuente: *Maniobra de los Buques*[10]).

relativos a los ángulos de timón y la velocidad de giro que ha experimentado el buque con cada ángulo de timón. Ambas magnitudes pueden representarse gráficamente como una función, pudiéndose diferenciar dos tipos de buques según la representación obtenida[3]:

- Buques Estables: son aquellos en los que, para cada ángulo de timón, existe un único valor de la velocidad de giro en régimen permanente, por lo que la curva resultante es una curva simple. (Figuras 2.4 y 2.6)
- Buques Inestables: son aquellos en los que, para ángulos próximos a cero grados de timón, existen dos posibles valores de velocidad de giro, uno negativo y otro positivo; es decir, en estos buques se presenta un Ciclo de Histéresis. Además, dentro de este ciclo, existe una zona (una serie de valores) en la que el “equilibrio” es inestable, por tanto, no es posible mantener una velocidad de giro constante. La inestabilidad de un buque puede medirse por las dimensiones del Ciclo de Histéresis que éste presente. Cuanto más grande es el ciclo, mayor es la inestabilidad de un buque. La anchura (o tamaño) del ciclo lo determina el margen de variación del ángulo del timón (ángulo en el que el buque podría girar en contra

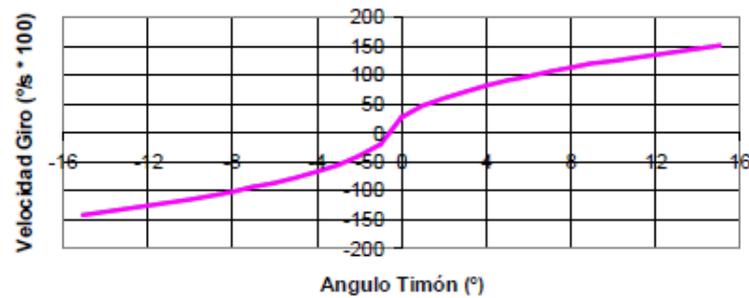


Figura 2.4: Gráfica de un buque estable (Fuente: *Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad*[3]).

de lo que cabría esperar del ángulo que se le ha dado a la caña del timón). Por otra parte, la anchura del ciclo también da el ángulo mínimo de timón que debe darse para que el buque obedezca correctamente. (Figuras 2.5 y 2.7)

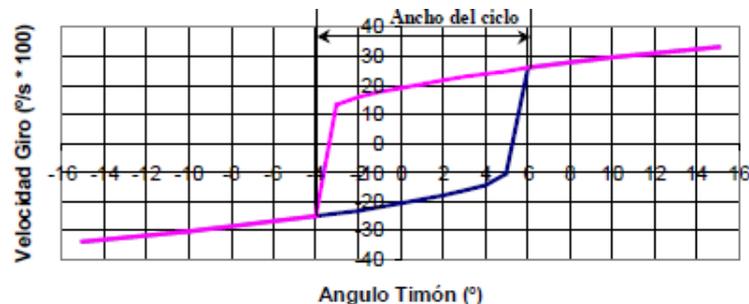


Figura 2.5: Gráfica de un buque inestable (Fuente: *Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad* [3]).

Del mismo modo, al igual que en las dos maniobras anteriores, si se recopila la trayectoria de un buque haciendo esta maniobra, también se puede saber si éste es estable o inestable. De esta forma, es mucho más gráfico, pero no se puede establecer de forma tan precisa la velocidad de giro correspondiente a cada ángulo de timón ni el ángulo mínimo para que el buque obedezca.

- Curva de Pull-Out[10] (figura 2.8): Es una de las más sencillas de realizar, requiere poco personal y se puede hacer en cualquier momento de la Navegación. Se requiere que haya un timonel, una persona anotando el tiempo y los grados de guiñada y un cronógrafo. Para realizar esta curva se procede de la siguiente forma:
 - Navegando con máquina en “Todo Avante”, se mete timón a una banda, hasta llegar a 20 grados de metida.
 - Cuando el buque alcanza un periodo uniforme de giro, es decir, una velocidad constante de guiñada (giro), se pone el timón a la vía.
 - Si el buque es estable, la guiñada del buque debe reducirse por completo hasta que el buque quede de nuevo adrizado. De lo contrario, si el buque es inestable, quedará con cierta guiñada o desvío hacia la banda en la que se haya metido el timón.
 - Esta secuencia se debe hacer para ambas bandas de caída, tanto a babor como a estribor.

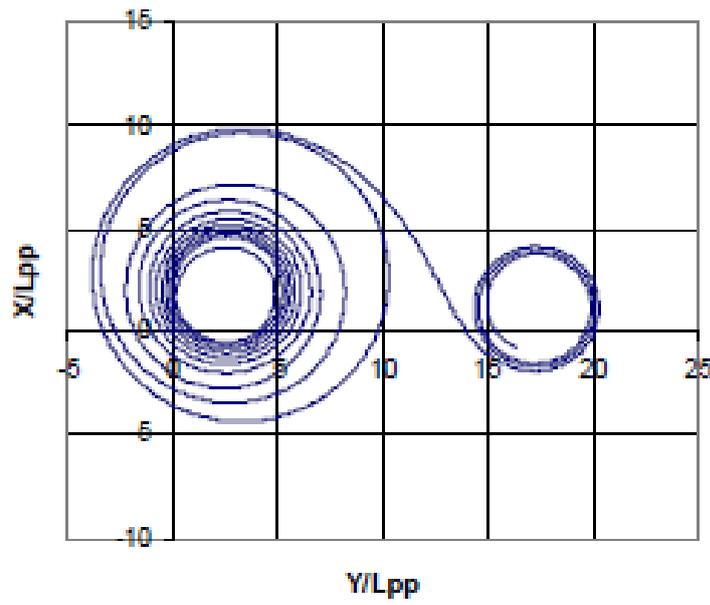


Figura 2.6: Trayectoria descrita por un buque estable (Fuente: *Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad*[3]).

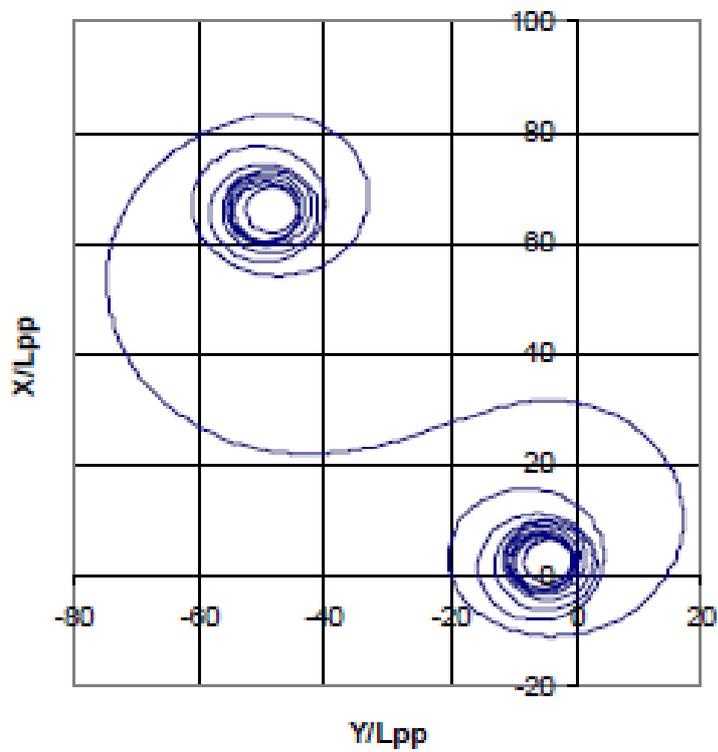


Figura 2.7: Trayectoria descrita por un buque inestable (Fuente: *Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad*[3]).

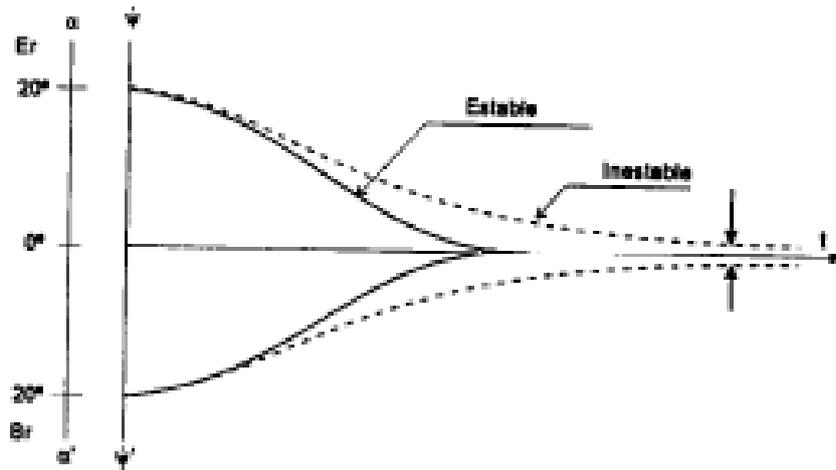


Figura 2.8: Diagrama de la curva de Pull Out (Fuente: *Maniobra de los Buques*[10]).

De las maniobras anteriormente descritas, se pueden extraer cualidades acerca de la maniobrabilidad de los buques. Estas cualidades son cuantificables, dado que están estrechamente relacionadas con algunas de las magnitudes que se obtienen de estas maniobras. Estas relaciones entre las cualidades y las magnitudes que mejor las representan son:

- La Facilidad de Evolución, relacionada estrechamente con el Diámetro de Giro. En la maniobra de la curva de evolución se mide el diámetro de giro y se comprueba la facilidad que tiene el buque para desarrollar su propia evolución.
- La Estabilidad de Ruta, relacionada con la anchura del Ciclo de Histéresis. En la maniobra de espiral se comprueba cómo de estable puede ser un buque en su rumbo establecido y la anchura del Ciclo de Histéresis (si se da) establece el ángulo mínimo para gobernar el buque.
- La Facilidad del Cambio de Rumbo, relacionada con el Avance y el Número P. En la maniobra de la curva de evolución se comprueba la facilidad que tiene el buque para cambiar el rumbo viendo lo que avanza hasta que cambia el rumbo del buque. Por su parte, el número P se obtiene de la maniobra de zigzag, cuando el buque ya ha recorrido una eslora desde que se mete el timón para cambiar el rumbo.

2.3 Criterios OMI de Maniobrabilidad

Desde hace unas décadas, la Organización Marítima Internacional (OMI) ha participado activamente para establecer unos criterios básicos sobre la buena maniobrabilidad de los buques. Los órganos de la OMI encargados de redactar y compilar estos criterios fueron el Sub-Comité de Proyectos Buques y Equipamientos y el Comité de Seguridad Marítima. Por tanto, se puede decir que estos criterios están enfocados a ser un aspecto más para garantizar la seguridad de los buques. Sin embargo, cabe recordar que la OMI sólo entrega reglas y recomendaciones, no puede emitir leyes internacionales. La decisión final sobre aplicar o no las directrices de la OMI recae en cada uno de los gobiernos miembros. Las normas y criterios de la OMI sobre maniobrabilidad fueron adoptadas en asamblea en 1993 bajo la Resolución A.751(18)[6]. En esta asamblea se invitó a los gobiernos a recolectar datos obtenidos a partir de los criterios y normas que establece esta resolución. Estas normas y criterios son[11]:

1. Las maniobras deben ser aplicadas sin el uso de cualquier ayuda, especialmente las maniobras en puerto.
2. Las condiciones en las que se apliquen estas normas, donde también se medirá el desempeño del buque, son las siguientes:
 - a) Ambiente tranquilo (mar y viento en calma o flojo).
 - b) Aguas profundas, en las que no se dé restricción alguna por calado
 - c) Condición de cargamento máximo.
 - d) Estabilizar el buque a una velocidad de prueba.
3. Se considerará que un buque tiene buena maniobrabilidad si cumple con los siguientes criterios:
 - a) Capacidad de Giro: el avance no debe ser superior a 4.5 esloras del buque y el diámetro táctico no debe exceder las 5 esloras del propio buque en la Maniobra de Giro.
 - b) Capacidad de Giro Inicial: aplicando un ángulo de 10 grados en el timón (da igual a qué banda), el buque no debería navegar más de 2.5 esloras en el momento en el que la proa cambie en 10 grados de su rumbo original.
 - c) Capacidad de la Detención de la Caída:
 - 1) El valor del primer ángulo de Overshoot en 10/10 en la maniobra de zigzag no debe exceder de:
 - 10 grados si L/V es menor de 10 segundos.
 - 20 grados si L/V es 30 segundos o más.
 - $[5 + (L/(V/2))]$ grados si L/V está entre 10 y 30 segundos.¹
 - 2) El valor del segundo ángulo de Overshoot en 10/10 en la prueba de zigzag no debe exceder los valores mencionados anteriormente para el primer Overshoot por más de 15 grados.
 - 3) Los valores del primer ángulo de Overshoot en la prueba de zigzag 20/20 no debe exceder los 25 grados.

2.4 Curvas de Evolución

Hoy en día, en todos los puentes de los buques existen a disposición de los tripulantes unas tablas que muestran todos los aspectos y datos de maniobra propios del buque. Estas tablas se las conoce coloquialmente como tablas de las curvas de evolución. Según la compañía y el tipo de buque, estas tablas pueden contener mayor o menor información, pero todas ellas tienen algunos puntos en común. En todos los tabloneros expuestos en los diferentes puentes de mando, se muestra como mínimo la Maniobra de Giro del buque, en algunos buques con diferentes situaciones de carga o régimen de máquinas. Esto es así debido a que esta maniobra es la más representativa y la que ofrece una mayor cantidad de datos respecto a las otras. Además, los datos que se muestran son los más útiles para el práctico en caso de tener que asesorar al capitán sobre la maniobra a realizar en un puerto o sus proximidades. Hay que destacar, por último, que en algunos de estos tabloneros también se muestran otras maniobras y sus correspondientes datos. Algunos ejemplos son: la maniobra de zigzag, la maniobra de frenado de emergencia, la potencia y velocidad correspondiente a cada régimen de máquinas, etc.

¹Los valores de L (eslora del buque) es en metros y V (velocidad de prueba) es en metros por segundo.

3 Buques con Hélice de Paso Fijo

3.1 La Hélice

Para efectuar cualquier movimiento o maniobra, cualquier buque precisa de un elemento propulsor. Dicho elemento es la hélice, el cual se define como: *Una pieza formada por unas palas de forma helicoidal que acoplada al eje, gira en el sentido de él y hace mover el buque.*[2] Una vez definida, cabe destacar algunas partes importantes de la propia hélice[2]:

- El Eje: es la barra o tubo (en caso de buques grandes) en la cual va acoplada la hélice y que la hace girar.
- Núcleo: es el cuerpo central de la hélice, donde se afirman el eje a las palas.
- Capacete: pieza en forma de capuchón que protege la parte final del eje y ejerce de cierre de éste.
- Pala: cada una de las piezas que salen del núcleo y cuya función es producir el empuje que moverá al buque al girar la hélice.
- Arista: es el perfil de cada una de las palas. Se diferencia entre arista de ataque y de salida. La primera es el perfil de la pala que “choca” contra el fluido en el que se mueve la hélice durante su movimiento circular. La segunda, es el perfil de la pala por donde sale el fluido una vez que ha sido empujado por la propia pala.

Además de estas partes, todas las hélices tienen unas características que las definen y diferencian entre sí. Las más importantes son las siguientes:[9]

- El Paso: es lo que teóricamente avanza una hélice en una vuelta completa si girase en un medio sólido. El valor de este parámetro cambia según el ángulo de inclinación de las palas. Si el valor es siempre el mismo, se dice que la hélice es de paso fijo (las palas están siempre en la misma posición); mientras que si este ángulo varía cuando la hélice está en funcionamiento, se dice que es de paso variable (entiéndase que la variación es a voluntad y sin escalonamientos).
- El Retroceso: es la diferencia entre lo que debería avanzar la hélice en su paso teórico y lo que realmente avanza al dar una vuelta completa. Esto se debe a que el paso se calcula para un medio sólido, cuando en realidad la hélice trabaja en un medio líquido. Por tanto, al trabajar en un medio líquido, se produce un resbalamiento.
- Diámetro de la Hélice: es el círculo máximo que describen los extremos de las palas en su rotación. Entre el diámetro y el paso existe una estrecha relación: en función del tamaño de la hélice, se requerirá mayor o menor potencia (debido a la resistencia con el agua); mientras que con el paso llegará un momento en el que la potencia del buque no será efectiva, por lo que se tiene que buscar un equilibrio entre la resistencia que ofrece la hélice y la potencia que puede desarrollar el motor.

- La Estela: es la corriente de arrastre de agua hacia proa que debido a la fricción del casco con el agua acompaña al buque. Esto representa una pérdida del 10 por ciento en el avance teórico del buque (aproximadamente).

3.2 Tipos de Hélices

Existen diferentes tipos de hélices en función del criterio que se utilice para clasificarlas. Estos criterios son:[10]

- El número de palas: por lo general, todas las hélices tienen entre tres y cuatro palas. Pero existen también hélices con dos palas, para motores que trabajan a altas revoluciones. Por otra parte, tampoco se descartan hélices con un número mayor de palas.
- La generatriz: es la curvatura de las palas, con esto se procura que la interacción de la hélice con el agua sea lo más suave posible. El grado de curvatura de las palas es diferente en cada buque. Una adecuada generatriz puede reducir considerablemente las vibraciones producidas por la hélice.
- La situación respecto al timón: por lo general, la hélice suele estar girando libre y acoplada al eje de cola para impulsar la corriente de agua hacia el timón. También puede estar una tobera y proporcionar constantemente una corriente al timón/los timones o que el conjunto de la tobera con la hélice cambie de orientación actuando como timón.
- La variabilidad del paso: si el paso de las palas de una hélice puede variarse mecánicamente, se dice que la hélice es de paso variable. Si por el contrario, el paso de las palas es constante, se dice que la hélice es de paso fijo.

3.3 Hélices de Paso Fijo

Por lo general, las hélices de los buques son de paso fijo, lo cual quiere decir que son solidarias al eje de cola y giran en su mismo sentido. Así mismo, las hélices también pueden clasificarse según su sentido de giro, existiendo dos tipos:[10]

- **Hélices Dextrógiras**: son aquellas cuyo giro es en el sentido de las agujas del reloj, es decir, hacia la derecha.
- **Hélices Levógiras**: son aquellas cuyo giro es en el sentido contrario al de las agujas del reloj, es decir, hacia la izquierda.

El punto de referencia para observar el movimiento de la hélice es la popa del buque, mirando hacia proa. De esta forma, según el movimiento que haga la hélice cuando el buque esté en marcha avante, se distingue entre uno y otro tipo de hélice. Por otra parte, es necesario destacar que estas hélices giran en sentido contrario cuando se quiere ir marcha atrás. Entre estos dos tipos de hélices, las Dextrógiras son las mayoritarias, por lo que, de forma general se considera que los buques en su mayoría son diestros. De no ser así, se debe informar de inmediato al práctico y los oficiales que sean nuevos a bordo. ¹ En el caso de los buques con

¹Los efectos producidos por las hélices en la maniobra de un buque dextrógiro son diferentes en un buque levógiro, por no decir contrarios.

hélices gemelas, se considera que el movimiento de éstas es hacia fuera cuando la hélice de estribor es dextrógira (por lo que la de babor es levógira). Por otra parte, se considera que el movimiento de las hélices gemelas es hacia dentro cuando la hélice de estribor es levógira (por lo que la de babor es dextrógira).

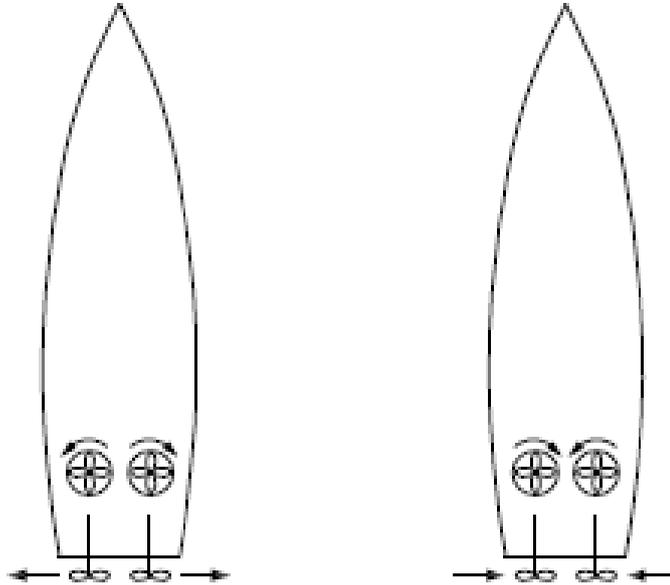


Figura 3.1: Diagrama del giro de hélices gemelas de paso fijo aplicadas a un buque tipo (Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

3.4 Efectos Producidos por la Hélice

El primer efecto en el que se piensa que produce una hélice cualquiera es el empuje del buque en el sentido de la marcha (avante o atrás). Pero ésta no es la única fuerza ejercida, existen otras corrientes generadas que es conveniente tenerlas en cuenta. Estas corrientes son:[10]

- La Corriente de Estela: es la que produce el propio buque al avanzar en el agua. Es de poca influencia, debido a que queda a popa del buque, aun así, su dirección es proa-popa debido al vacío que produce la hélice al rotar en su cara pasiva (cara mirando hacia proa).
- La Corriente de Aspiración: Cuando el buque avanza, se produce una pequeña corriente de aspiración en los costados del buque que convergen en la quilla y van hacia la hélice. Por lo general, esta corriente es mayor en los costados del buque, siendo insignificante en las partes centrales del casco. En marcha atrás, esta corriente no tiene influencia sobre el buque.
- La Corriente de Expulsión: es la corriente generada por la hélice que incide directamente sobre la pala del timón, cuando el buque está avanzando en marcha avante. El agua que es expulsada por las palas altas de la hélice ejerce una mayor fuerza sobre el timón, del mismo modo, el agua expulsada por las palas bajas de la hélice tiene una menor influencia sobre el timón. Sin embargo, cuando el buque se mueve en marcha atrás, el agua expulsada por las palas altas incide directamente en el casco, mientras

que el agua expulsada por las palas bajas se pierde bajo el codaste o la quilla. Esto último hace que la caída de la popa sea más pronunciada cuando el buque está en marcha atrás, como se verá más adelante.

Al moverse adelante, parte del agua fluye hacia la popa del buque, creando la estela en la cual opera la hélice, acelerándola y empujando al buque. Por lo general, una hélice trabaja mejor en el flujo de la estela que fuera de ella, de ahí la importancia de la ubicación de la hélice en relación con la forma y otras medidas del casco del buque.

3.5 Fuerzas y Corrientes creadas por la Hélice y la Marcha del Buque

Al considerar una sección vertical de la hélice y otra longitudinal en relación con el codaste del buque, se obtiene el diagrama de fuerzas resultantes de la figura 3.2.

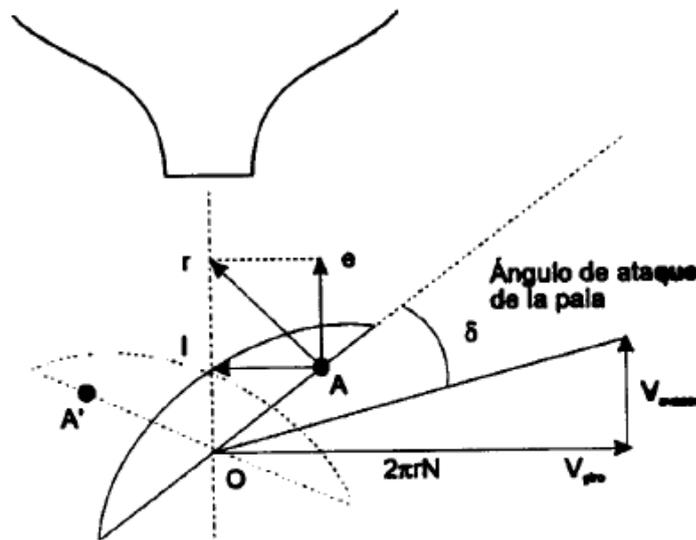


Figura 3.2: Diagrama de las fuerzas resultantes que se dan en la pala de una hélice y sus componentes desde una perspectiva vertical (Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

Una partícula cualquiera de una de las palas produce una presión normal (r). Esta fuerza se descompone en una fuerza longitudinal de empuje (e) y una transversal de presión lateral (l). A su vez, en la pala contraria, se producen los mismos efectos; una presión normal (r') que se descompone en una fuerza longitudinal de empuje (e') y una transversal de presión lateral (l'). La suma de todas las presiones normales producidas en cada una de las palas dará como resultado una fuerza total (R), cuya descomposición será la fuerza total de empuje de la hélice (E) y la fuerza lateral total de la hélice (L_r).[10]

El efecto de empuje (e) producido en todas las palas tienen el mismo signo de aplicación, por lo que el empuje total (E) tiene siempre la máxima eficacia, independientemente del sentido de giro de la hélice. Por su parte, las diferentes presiones laterales (l) son de diferente signo, por lo que la presión lateral total (L_r) será variable según el sentido de giro de la hélice.[10]

Según las condiciones de carga del buque y de si este parte o no del reposo, la presión lateral de las palas y el empuje total provocan un efecto diferente en el buque. Para explicar cómo

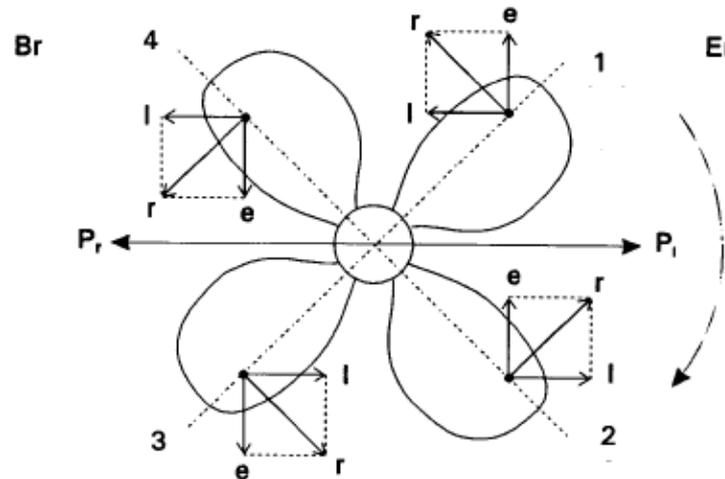


Figura 3.3: Diagrama de las fuerzas resultantes que se dan en cada pala de una hélice y sus componentes (Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

se desarrollan las diferentes fuerzas en cada una de las palas de una hélice, se muestra un caso genérico, la figura 3.3, que es una hélice de cuatro palas y de giro a la derecha (dextrógira). Detallando por cada pala, las condiciones de trabajo serían las siguientes[10]:

- **Pala número 1:** Si el buque parte del reposo, esta pala se distingue por estar en la zona con menor presión. Debido a esto, el empuje y la presión lateral en esta pala no son elevados. Con estas condiciones, esta pala provoca que la popa caiga a babor con una intensidad relativa. Por otra parte, si el buque se encuentra en movimiento, la pala se encuentra en una zona de altas velocidades de estela, lo que hace que la velocidad del avance decrezca. Aun así, los valores del empuje y la presión lateral aumentan. Esto supone que esta pala provoca que la popa caiga a babor con una intensidad media.
- **Pala número 3:** Si el buque parte del reposo, esta pala se distingue por estar en una condición opuesta a la pala número 1; es decir, está en la zona con mayor resistencia al giro. Con esta condición, esta pala provoca que la popa tienda a caer a estribor con una intensidad alta (opuesta y mayor que la pala número 1). Cuando el buque está en movimiento, la corriente de estela es menor en la zona en la que se encuentra esta pala (que es la más profunda y alejada). Por tanto, con el buque en movimiento, la pala que pasa por esta zona hace que la popa tienda a caer a estribor con una intensidad media.
- **Pala número 2:** tanto si el buque parte del reposo como si está en movimiento, la pala en esta zona se mueve hacia abajo en contra del flujo ascendente del agua que proviene de la bovedilla. En esta condición, los valores del empuje y la presión lateral aumentan respecto a la posición anterior (pala número 1). Con esto, la popa del buque tiende a caer a estribor con una intensidad media.
- **Pala número 4:** al igual que en el caso de la pala 2, no importa si el buque está en movimiento o en una situación de reposo. En este caso, el movimiento de la pala es hacia arriba, lo que provoca que la popa tienda a caer a popa con una intensidad baja, aunque ascendente.

Una vez conocido el efecto que cada pala de la hélice ejerce sobre el buque, se puede extraer una generalidad. Si se suman los efectos de las cuatro palas, se obtiene que [10]:

- Para un buque que parte del reposo, existe una clara tendencia de caída de la popa hacia la banda de giro de la hélice.
- Para un buque con arrancada (en movimiento), la corriente de agua que recibe la hélice equilibra las presiones de trabajo entre las diferentes palas, aun así la popa puede llegar a tener una ligera caída a la banda contraria a la de giro de la propia hélice.

La fuerza lateral es importante desde que el buque parte del reposo hasta que se obtiene la suficiente arrancada y se crea el flujo de estela que equilibra las diferencias de trabajo entre las palas de la hélice. El resultado de la diferencia de trabajo entre las palas, al partir del reposo, es un efecto de guiñada de la popa en la dirección de giro. Esta guiñada de la popa es a estribor cuando la hélice es dextrógira y a babor cuando la hélice es levógira. Esta tendencia se reduce, se anula e incluso cambia de banda al incrementarse la velocidad del buque.[10]

La posición de la hélice es un factor a tener en cuenta. Los efectos descritos hasta ahora no se dan en igual medida según la cercanía de la hélice a la superficie del agua. Existe un mejor equilibrio de fuerzas cuando la hélice trabaja en aguas más profundas. Estas aguas profundas se consiguen con el buque a plena carga y/o con un asiento apopante. Por el contrario, los buques en lastre y/o con un asiento aproante, son muy propensos a que las palas superiores de la hélice rompan la superficie del agua. Esto último supone una pérdida importante en el efecto de empuje, lo que hace que la caída de la popa sea más acusado a la banda de giro de la hélice.[10]

4 Buques Equipados con Hélices de Paso Variable

4.1 ¿Qué es el Paso Variable?

El Paso Variable consiste en modificar el ángulo de ataque de las palas de una hélice para obtener un rendimiento mayor del empuje que ésta proporciona al buque. Como se ha explicado anteriormente en la sección 3.1, el paso es lo que teóricamente avanza una hélice al dar una vuelta completa en un medio sólido. Al modificar el ángulo de inclinación de las palas, se modifica el valor del paso, pudiendo ser mejor o peor. Por otra parte, se establece que la variación del paso es efectiva siempre que la hélice realice un mismo número de Revoluciones Por Minuto (rpm). La finalidad de los sistemas de Paso Variable es modificar la velocidad del buque sin modificar las rpm y que esta velocidad, junto con los efectos que produce una hélice, sean los más adecuados a cada situación.

4.2 Sistema Kamewa

A la hora de hablar de hélices de paso variable, la marca más reconocida es Kamewa, debido a su largo historial en materia de investigación y desarrollo de propulsores marinos. Aunque la marca Kamewa se dedica a todo tipo de propulsores, es más conocida por su sistema patentado para cambiar el ángulo de ataque de las palas de una hélice. Debido a esto, las hélices de paso variable se relacionan directamente con Kamewa, aunque existen otros métodos. Los principales componentes de una hélice de paso variable tipo Kamewa son[8]:

- El núcleo de la hélice con las palas.
- Las líneas de ejes de la hélice junto con la caja distribuidora del aceite.
- El sistema hidráulico que acciona el movimiento rotatorio de las palas.
- El control remoto de todo el sistema.

Los controles de este sistema se suelen hallar en el puente y en la sala de control de máquinas. No obstante, el control de la propulsión y las maniobras se ejerce desde el puente, dejando al control de la sala de máquinas como repetidor de respeto. El empuje de la hélice se lleva desde “Avante Toda” hasta “Atrás Toda” mediante el cambio del paso, sin cambiar el sentido de giro de la hélice. Por otra parte, el paso de la hélice y la velocidad de rotación del eje se programan para obtener el mejor rendimiento y optimización del motor.

4.3 Principio de Funcionamiento del Sistema Kamewa

En el núcleo de la hélice hay un pequeño servomotor auxiliar, el cual produce el giro de las palas (cambiando el paso de éstas). Este servomotor consta de un pistón que se mueve axialmente cuando el aceite a presión fluye a una u otra cara del mismo pistón. Este pistón va equipado con cuatro o cinco cavidades en las que hay un canal transversal por el que se desliza un pequeño patín. En este patín se encaja un anillo soporte de cigüeña, el cual va roscado al núcleo y unido a la pala mediante pernos. De esta manera, cuando se mueve el pistón, el anillo soporte de cigüeña gira con movimiento circular transmitido a través del movimiento transversal del pistón mediante el patín deslizante que se encuentra en la cavidad del mismo pistón, haciendo girar a la pala que va empernada al anillo soporte.

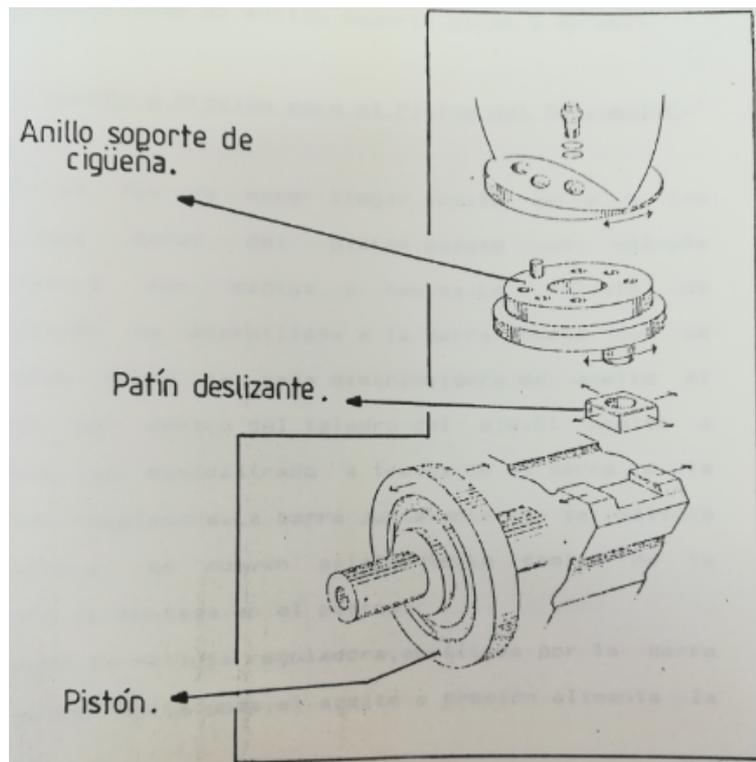


Figura 4.1: Dibujo del Pistón que hace posible variar el paso de la hélice
(Fuente: *Hélice de paso Variable*).[8]

Para que el aceite llegue a las dos caras del pistón, existe una válvula reguladora. Esta válvula va atornillada a la barra hueca que se prolonga, por el interior del eje, desde la caja distribuidora de aceite hasta el mismo pistón. El aceite a presión se suministra a través de la barra hueca a la válvula reguladora, la cual tiene espiga y camisa. La barra hueca junto con la válvula reguladora se mueve axialmente.

4.3.1 Paso Atrás

Cuando la válvula reguladora, auxiliada por la barra hueca, se mueve hacia popa, el aceite a presión alimenta la cara anterior del pistón. Mientras tanto, por su cara posterior, se abre un orificio para que el aceite salga al interior del eje. De esta forma, por diferencia de presiones (por tanto, de volumen), el pistón se mueve hacia popa, poniendo a las palas en paso hacia atrás.

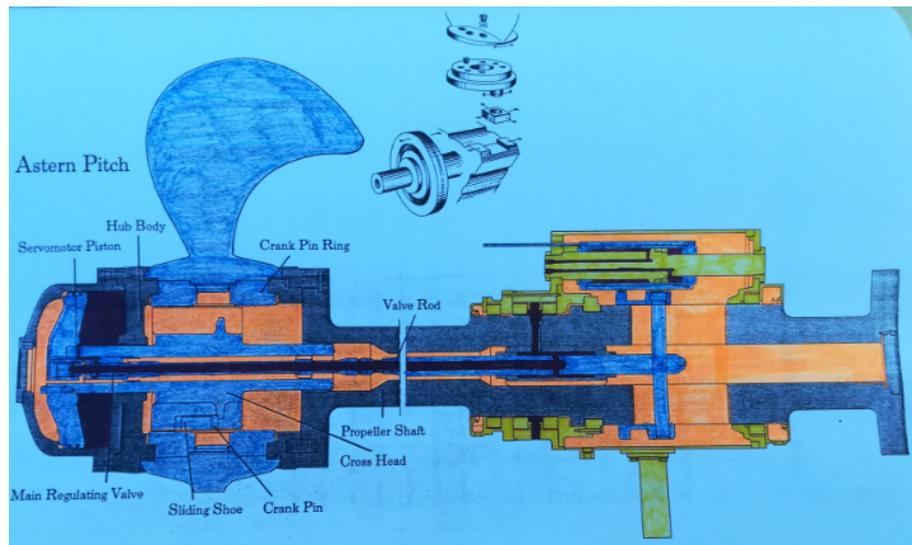


Figura 4.2: Hélice de Paso Variable dispuesta para ir marcha atrás (Fuente: *Hélice de Paso Variable*).[8]

4.3.2 Paso Avante

En el caso contrario, cuando la válvula reguladora se mueve hacia proa, se suministra el aceite a presión a la cara posterior del pistón. Al mismo tiempo, en la cara anterior del pistón, se abre un orificio para que retorne el aceite a la barra hueca. De esta forma, el pistón se mueve hacia adelante impulsado por el aceite a presión, poniendo las palas en paso avante.

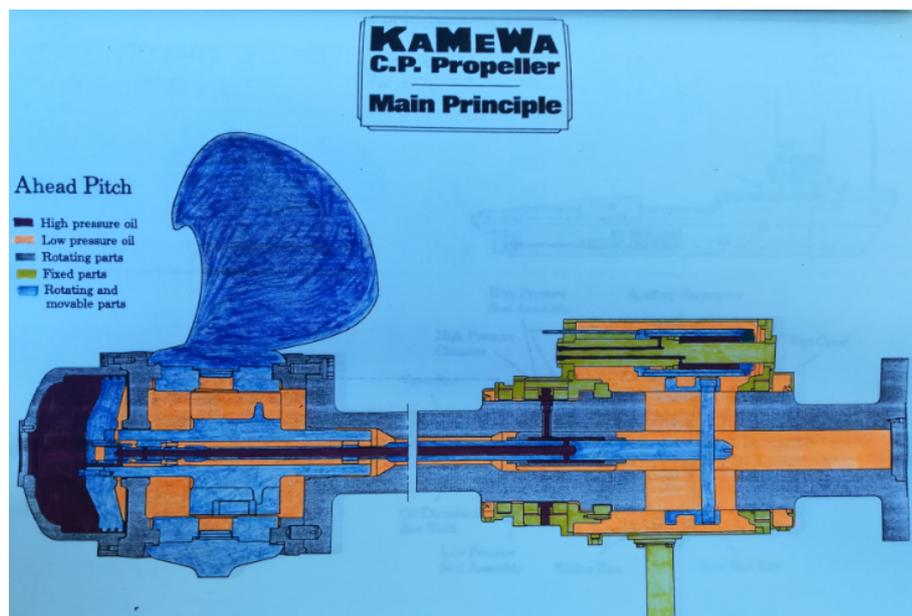


Figura 4.3: Hélice de Paso Variable dispuesta para ir marcha avante (Fuente: *Hélice de Paso Variable*).[8]

4.3.3 Paso Cero

En los movimientos antes descritos, la válvula reguladora parte de la posición cero, es decir, el conjunto barra-válvula está en una posición intermedia. Esto hace que las palas también estén en un paso cero, es decir, en una posición en la que no son capaces de producir empuje alguno al buque (a pesar de que la hélice se encuentre girando). Cuando la válvula reguladora se encuentra en esta posición intermedia (paso cero), el recubrimiento de los orificios de la válvula tiene un perfil que permite que se dé un flujo constante de aceite entre las dos caras del pistón que mueve las palas de la hélice. Por consiguiente, cualquier movimiento de la válvula reguladora produce enseguida un cambio en el paso de la hélice.

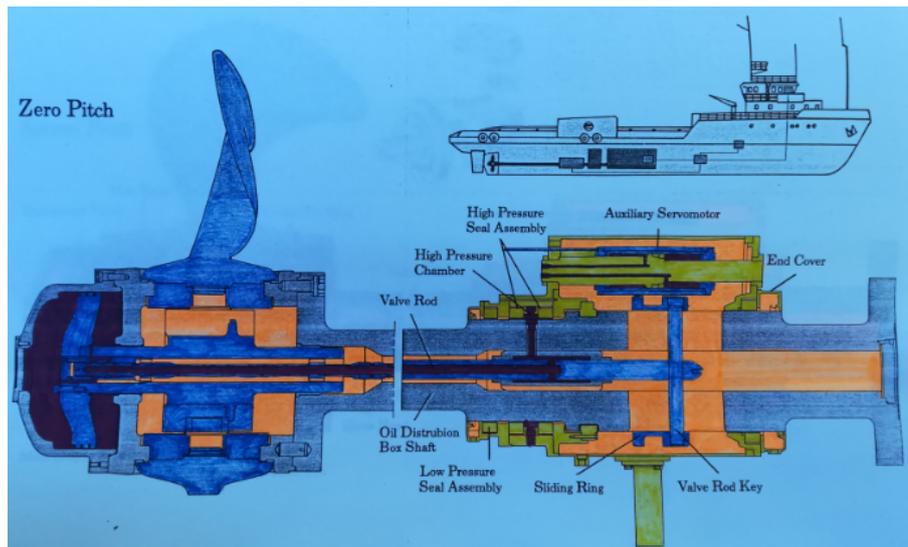


Figura 4.4: Hélice de Paso Variable dispuesta en paso cero, el buque no avanza aunque la hélice gire (Fuente: *Hélice de Paso Variable*).[8]

Los movimientos adelante y atrás del conjunto barra-válvula están limitados por un tope situado a la distancia exacta para permitir abrir y cerrar los orificios. Por lo tanto, la válvula no puede ser forzada a desplazarse ni más ni menos de lo que se desplaza el pistón. Por lo tanto, el pistón sigue los movimientos de la barra y viceversa. Por su parte, el aceite de retorno fluye por fuera de la barra hueca, pero sin salir del eje propulsor, hacia la caja distribuidora de aceite. Es necesario recordar que por dentro de la barra hueca circula aceite a mayor presión procedente de la caja distribuidora y cuyo destino es el núcleo de la hélice (es decir, a la cara anterior o posterior del pistón que mueve las palas).

4.4 La Caja Distribuidora de Aceite (Sist. Kamewa)

Como se ha visto en este capítulo, el movimiento de las palas es hidráulico; es decir, se precisa de un fluido para accionar todo el sistema que cambia el paso de la hélice. Por lo general, este fluido suele ser un aceite que soporta bien las altas temperaturas, la fricción y las altas presiones de trabajo. Para que este aceite haga correctamente su función dentro del sistema, existe la Caja Distribuidora.

Este elemento tiene diversas funciones dentro del sistema de paso variable. La primera de estas funciones es introducir el aceite a presión dentro de la barra hueca para que éste vaya hacia el pistón del núcleo de la hélice. La segunda función es reconducir el aceite a baja presión que retorna entre la barra hueca y las paredes del eje de cola. La tercera función

que realiza la Caja Distribuidora es controlar el movimiento de la barra-válvula para enviar el aceite a presión a la cara correspondiente del pistón del núcleo. Esto último lo hace mediante el servomotor auxiliar, el cual, a su vez, se controla telemáticamente desde el puente o la sala de control de la máquina. En caso de fallo, el servomotor puede controlarse manualmente mediante unos pulsadores que hay en la propia Caja Distribuidora.

Para realizar estas funciones, el sistema cuenta con dos depósitos de aceite. Uno grande construido entre cuadernas en el doble fondo del buque y otro más pequeño conectado a la Caja Distribuidora. El primero de estos se utiliza para bombear el aceite a alta presión que acciona al pistón que mueve las palas. El aceite que retorna a menor presión es devuelto a este depósito mediante la Caja Distribuidora. El segundo depósito se utiliza para mantener una presión estable dentro del circuito y de paso lubricar la Caja Distribuidora y el servomotor auxiliar.

Cabe mencionar que, en la Caja Distribuidora hay un índice que señala el paso real de la hélice. Este índice va conectado al cilindro del servomotor auxiliar. Las palas están conectadas mecánicamente con el servomotor auxiliar a través de un anillo soporte, el pistón del núcleo, la barra-válvula y la horquilla que conecta al servomotor con la barra. Por tanto, a cada posición del índice le corresponde un paso determinado. Esta escala tiene varias posiciones marcadas:

- El paso de diseño, marcado con una K.
- El paso para “Avante Toda”, marcado como FF.
- El paso para “Atrás Toda”, marcado como FB.
- El paso cero, marcado con un cero. Esta marca se hace tras las primeras pruebas de mar del buque.

5 Efectos Combinados de la Hélice y el Timón

Aunque la idea principal de este trabajo es averiguar si existen diferencias a la hora de maniobrar con una hélice Fixed Pitch (Hélice de Paso Fijo) (FP) o CPP, es necesario conocer, aunque sea de forma general los efectos que el conjunto de una hélice cualquiera y el timón producen en las maniobras de un buque. Por este motivo se desarrolla este capítulo.

5.1 Tratamiento de Variables

El efecto combinado de la hélice y el timón es el resultado de considerar el trabajo conjunto de ambos elementos y la incidencia de cada una de sus variables en la maniobra del buque. Como el estudio analítico de cada una de las variables puede ser muy engorroso y complejo, se suponen una serie de condiciones genéricas. Estas condiciones son las siguientes:[10]

- El uso del timón supone una resistencia adicional que reduce la velocidad del buque.
- Las diferentes corrientes creadas por la hélice (aspiración, expulsión y estela) junto con la dirección de la marcha y los efectos que se producen sobre el timón y en la estructura crean un empuje en el buque resultante del empuje total de la hélice y la disminución de la eficacia de la misma debido a resistencias producidas por flujos turbulentos. Así mismo, el movimiento del buque crea un efecto en el timón, denominado Presión Normal (P_n).
- Se tiene en cuenta que el giro de una hélice provoca un Empuje efectivo (E) y una Presión Lateral (Pl), en especial cuando el buque parte del reposo.
- En todos los supuestos se considera que la hélice es dextrógira, es decir, de giro a la derecha en régimen de marcha avante.

5.2 Buque partiendo del Reposo

Es el caso en el que el buque inicia una maniobra partiendo de una velocidad de máquina nula, es decir, bajo la influencia de los agentes externos y sin arrancada inicial en ningún sentido. Para el análisis de este caso se consideran los supuestos de máquina avante y máquina atrás. Además, en cada uno de estos supuestos se tiene en cuenta las diferentes posiciones del timón (a la vía, a estribor y a babor).

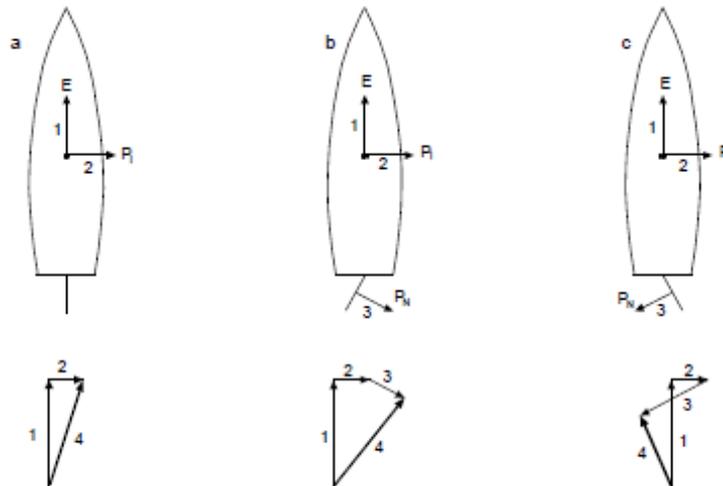


Figura 5.1: Diagrama de los efectos producidos en el buque al partir del reposo para ir adelante (Fuente: *Maniobra de los Buques*). [10]

5.2.1 Buque partiendo del Reposo para ir Avante

En los diagramas de la figura 5.1, el vector 1 corresponde al empuje (E), el vector 2 corresponde a la P_l , el vector 3 corresponde a la P_n del timón y el vector 4 corresponde a la intensidad y dirección a la que tiende a moverse la popa.

En el supuesto a) no existe el vector 3 debido a que el timón se encuentra a la vía y por lo tanto no se da lugar a que exista una presión normal; aun así, el efecto combinado del empuje y la presión lateral hacen que la popa caiga a estribor. En los supuestos b) y c), con el timón metido a babor y estribor respectivamente, el vector de la P_n ya se aplica, puesto que el timón ya tiene influencia en el avance del buque. Debe tenerse en cuenta que la tendencia de caída de la popa provoca una caída igual y opuesta de la proa. En estos tres supuestos se confirma la preponderancia del timón, es decir, el buque siempre obedece al timón cuando está metido a una banda.

5.2.2 Buque partiendo del Reposo para ir Atrás

Ahora se pasa a estudiar el caso opuesto (la figura 5.2), cuando el buque parte del reposo hacia atrás. Con la máquina atrás, los vectores están numerados del mismo modo que en máquina avante. Por otra parte, se puede decir que los efectos producidos son contrarios a los de máquina avante partiendo del reposo.

En el supuesto d), con el timón a la vía, no existe el vector 3 debido a que no se da una presión normal (P_n) sobre la pala del timón. Aun así, la combinación del empuje y la presión lateral hacen que la popa caiga a babor, justo al contrario que en el supuesto a); esto se debe a que la hélice ahora gira en el sentido contrario. Por su parte, en los supuestos e) y f), ya se aplica la presión normal (P_n), dado que el timón está metido a una banda u otra y por tanto influye en el avance del buque. Al igual que en la marcha avante, la caída de la popa provoca una caída igual y opuesta de la proa.

En estos tres últimos supuestos, se confirma la preponderancia de la presión lateral de la hélice, es decir, la popa del buque tiende a caer siempre a babor cuando éste inicia su arrancada atrás. Esta caída estará apoyada por la acción del timón cuando el timón esté metido a babor. En caso contrario, con el timón a estribor, la presión lateral de la hélice

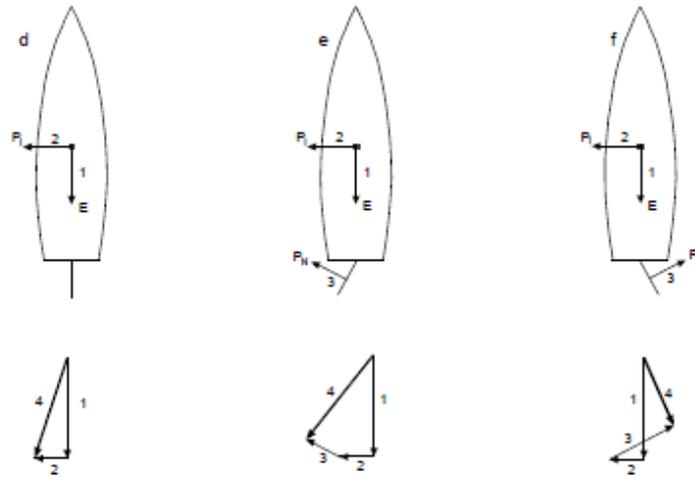


Figura 5.2: Diagrama de los efectos producidos en el buque al partir del reposo para ir hacia atrás(Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

puede llegar a tener más influencia que la propia pala del timón, lo que supone que en los momentos iniciales la popa caiga ligeramente a babor (pese a tener todo el timón a la banda contraria).

5.3 Buque con Arrancada Avante

Cuando el buque tiene una determinada arrancada avante, pueden darse dos situaciones:

5.3.1 Buque con Arrancada Avante y Máquina Avante

La primera de estas situaciones es cuando al buque con una arrancada avante se le ordena más máquina avante(ver figura 5.3). En esta situación, el efecto producido por la presión lateral queda muy reducido, por lo que el buque caerá según caiga el timón. Conforme se dé una orden de máquina a mayor velocidad, se genera un flujo superior sobre la pala del timón, provocando una mayor presión normal y por tanto una mayor eficacia del timón. En el caso del timón a la vía, la presión lateral se anula e incluso se puede observar una pequeña tendencia de caída del buque a la banda contraria a la del giro de la hélice (esto último depende de las revoluciones del motor o el asiento del buque).

5.3.2 Buque con Arrancada y Máquina Atrás

La segunda situación que puede darse es cuando al buque con una arrancada avante, se le invierte el sentido de giro de la máquina, es decir, se le ordena máquina atrás (ver figura 5.4). Como el buque no se mueve en un medio sólido, éste seguirá con una cierta arrancada avante residual que irá disminuyendo poco a poco. Conforme disminuye la arrancada avante, la efectividad del timón lo hace en igual medida hasta que el buque alcanza una velocidad mínima de gobierno en la que el timón ya no es operativo y queda a merced de los efectos producidos por la hélice.

Con el timón a la vía, el buque mantiene con cierta facilidad su proa mientras la arrancada sea suficiente y la presión lateral de la hélice no muy elevada. Cuando la velocidad es inferior

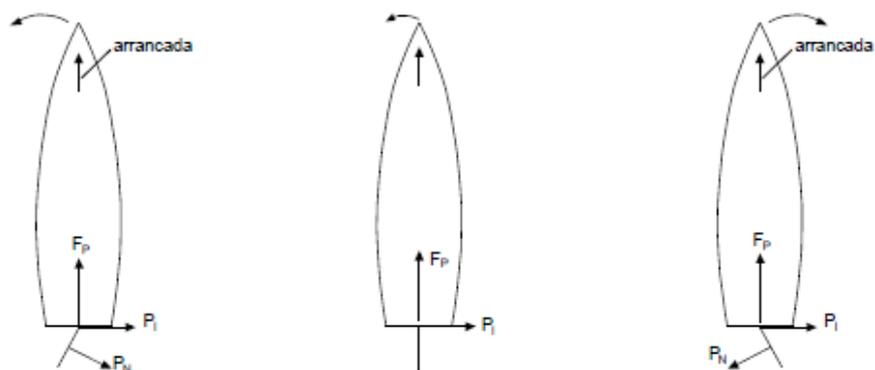


Figura 5.3: Diagrama de los efectos producidos en el buque cuando tiene arrancada avante y se le ordena más máquina avante (Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

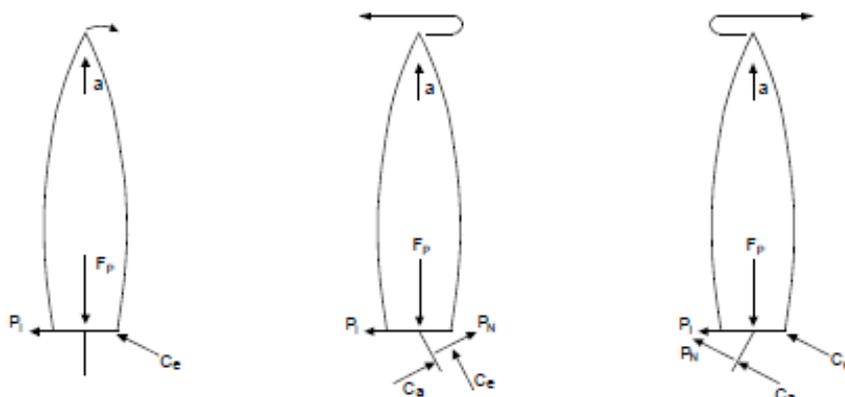


Figura 5.4: Diagrama de los efectos producidos en el buque cuando tiene arrancada avante y se le ordena máquina atrás (Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

a la de gobierno (por lo general unos dos nudos), la presión lateral de la hélice aumenta. Esto provoca que la popa caiga a la banda de giro de la hélice en marcha atrás. Este efecto se incrementa debido a la incidencia de la Corriente de Expulsión (C_e) sobre la bovedilla en la banda contraria a la del giro. Con el timón a la vía, el buque mantiene con cierta facilidad su proa mientras la arrancada sea suficiente y la presión lateral de la hélice no muy elevada. Cuando la velocidad es inferior a la de gobierno (por lo general unos dos nudos), la presión lateral de la hélice aumenta. Esto provoca que la popa caiga a la banda de giro de la hélice en marcha atrás. Este efecto se incrementa debido a la incidencia de la C_e sobre la bovedilla en la banda contraria a la del giro.

Cuando el timón se encuentra metido a estribor, el buque mantiene su caída a esa banda según la arrancada y grado de timón metido impuestos. Esta caída a estribor se va reduciendo a medida que se reduce la velocidad del buque hasta la mínima de gobierno, aun así, la presión normal del timón (P_n) mantiene la caída a estribor mientras haya arrancada avante. Cuando el buque detiene totalmente su arrancada avante y comienza a incrementar su arrancada atrás, el timón empieza a recibir el agua que hay a su popa y la Corriente de Aspiración (C_a) sobre la cara activa del timón (parte de babor en este caso). A partir de este momento, si la presión normal (P_n) es suficiente y supera a la presión lateral (P_l), la popa tiende a cambiar su caída hacia la misma banda de metida del timón (a estribor);

como si se tratase de un buque que parte del reposo con máquina atrás y timón a estribor. Por tanto, la proa que al principio de la maniobra caía hacia estribor, acaba cayendo hacia babor; y viceversa con la popa.

Cuando el timón se encuentra metido a babor, el buque mantiene su caída a esa banda mientras éste tenga arrancada avante suficiente. En este caso, la caída es más lenta debido a que la presión lateral de la hélice trabaja en el sentido contrario a la acción del timón cuando el buque va avante. Desde que el buque inicia su arrancada atrás, el timón cobra protagonismo y el buque le obedece, ayudado por la presión lateral, la corriente de expulsión (Ce) hacia la bovedilla y la corriente de aspiración (Ca). Esto provoca una importante caída de la popa hacia babor.

5.4 Buque con Arrancada Atrás y Máquina Avante

Esta situación se da cuando el buque tiene una cierta arrancada hacia atrás y se quiere detener o vencer esta arrancada mediante la acción del propulsor. Al igual que en los supuestos anteriores de máquina avante, la posición del timón es muy influyente en los efectos producidos al movimiento del buque. Por tanto, se vuelven a dar los tres supuestos básicos en función de la posición del timón:

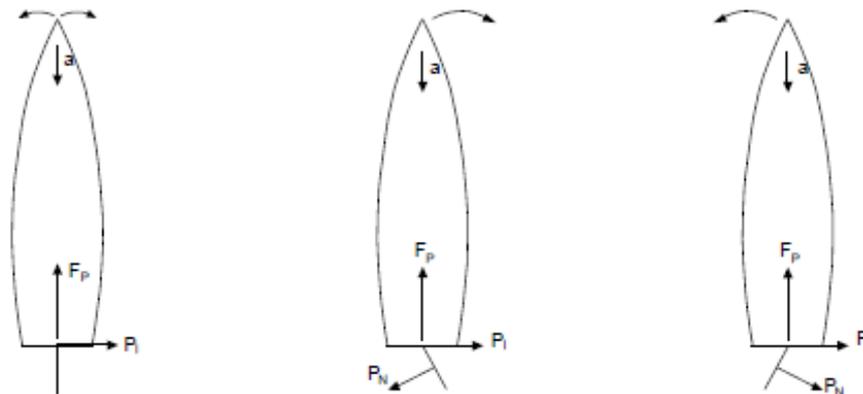


Figura 5.5: Diagrama de los efectos producidos en el buque cuando tiene arrancada atrás y se le ordena máquina avante (Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

Cuando el timón se encuentra a la vía, la popa del buque tiende a caer hacia la banda de giro de la hélice en régimen de marcha atrás (levógira). A medida que se reduce la arrancada hacia atrás (debido al empuje avante de la hélice en máquina avante), crece la presión lateral (Pl) de la hélice, la que tiende a reducir la caída inicial de la popa. Esto hace que la popa mantenga en una fase inicial su caída hacia babor, posteriormente esta caída se reduce quedando en una posición de equilibrio y, por último, la popa se comportaría como si de un buque partiendo del reposo se tratase (popa con caída a estribor). Es decir, la popa en estas condiciones tiene siempre una caída hacia la banda de giro de la hélice.

Cuando el timón se encuentra metido a estribor, popa tiende a caer a esta misma banda. Esto es así mientras el buque tenga una arrancada suficiente hacia atrás, puesto que el timón y la presión lateral (Pl) de las palas de la hélice trabajan conjuntamente. Pero, cuando cambia el sentido de giro de la hélice, las corrientes de expulsión (Ce) pasan a tener incidencia sobre la pala del timón, lo que hace que la caída de la popa a estribor se vaya

reduciendo hasta anularse por completo. En este momento, la popa obedece por completo al timón, cayendo a babor (por consecuente la proa cae a estribor).

Siguiendo con los planteamientos anteriores, cuando el timón se encuentra metido a babor, la popa tiende a caer a la misma banda de forma decidida mientras el buque tenga una arrancada suficiente hacia atrás. Cuando la hélice pasa a girar en régimen de avance, las corrientes de expulsión de esta (C_e) pasan a incidir sobre la pala del timón y la caída a babor se reduce hasta llegar a un punto neutral. Finalmente, cuando el empuje de la hélice vence la arrancada, la popa obedece al timón y tiende a caer hacia estribor.

5.5 Efectos Combinados en buques de 2 Hélices

A la hora de estudiar los buques con 2 hélices o más, se tienen en consideración ciertas particularidades. La primera de ellas es que el timón se encuentra en la línea de crujía del buque, entre las dos hélices. La segunda de ellas es el régimen de trabajo, se entiende que trabajan hacia afuera; es decir, que en régimen de marcha adelante, la hélice de estribor es dextrógira y la de babor es levógira. Por lo general, si las hélices trabajan en el mismo régimen de revoluciones, se puede decir que una compensa a la otra, por lo que el buque se comporta como si se tratase de uno equipado con una sola hélice; excepto para la maniobra de la ciaboga.

La ciaboga de un buque es su capacidad para cambiar su proa un número importante de grados, por ejemplo 180 grados en una zona en la que el diámetro de la curva de evolución normal del buque es superior al espacio transversal. En buques con dos hélices o más, esto se consigue combinando los giros y regímenes de trabajo de cada una de las hélices. Tener una buena ciaboga es muy importante para un buque, pues lo dota de independencia y capacidad para realizar maniobras en lugares muy complicados o estrechos.

5.5.1 Ciaboga partiendo del Reposo

La primera maniobra de ciaboga a considerar es partiendo del reposo y con el giro de las hélices hacia el exterior en máquina adelante. Tanto si se quiere caer a babor como a estribor, se aprovecha el par de giro que proporcionan las dos hélices girando en sentidos opuestos (una adelante y la otra atrás). Para caer inicialmente a estribor, se pone la hélice de estribor atrás y la de babor adelante. Para caer a la banda contraria, a babor, se ponen las hélices al contrario de lo descrito anteriormente (estribor adelante y babor atrás). Por tanto, partiendo del reposo, se puede decir que el buque ciaboga hacia la banda de la hélice que está marcha atrás (Como se aprecia en la figura 5.6).

No obstante, se debe tener en cuenta que, para un mismo número de revoluciones, la hélice que está en marcha atrás tiene una menor eficacia, hasta un 25 por ciento menos que la hélice que trabaja en marcha adelante. Por este motivo, se le debe imponer un régimen mayor de revoluciones a la hélice que trabaja en marcha atrás para compensar dicha pérdida de rendimiento. De este modo se consigue que un buque ciabogue sobre su eslora sin ir adelante.

La segunda maniobra de ciaboga a considerar es también partiendo del reposo y con el giro de las hélices hacia fuera, pero con el timón metido a una banda (figura 5.7). Si se mete el timón a la banda a la cual se quiere iniciar la caída, la corriente de aspiración (C_a) de la hélice que cía (que “tira” hacia atrás), perturba la caída debido a que dicha corriente choca con el timón, provocando que la caída sea la contraria a la deseada. Por tanto, se puede decir que el timón no ayuda a que la ciaboga se desarrolle con su máxima eficacia. Aun así, en la práctica, si el timón tiene un pequeño ángulo de metida hacia la banda

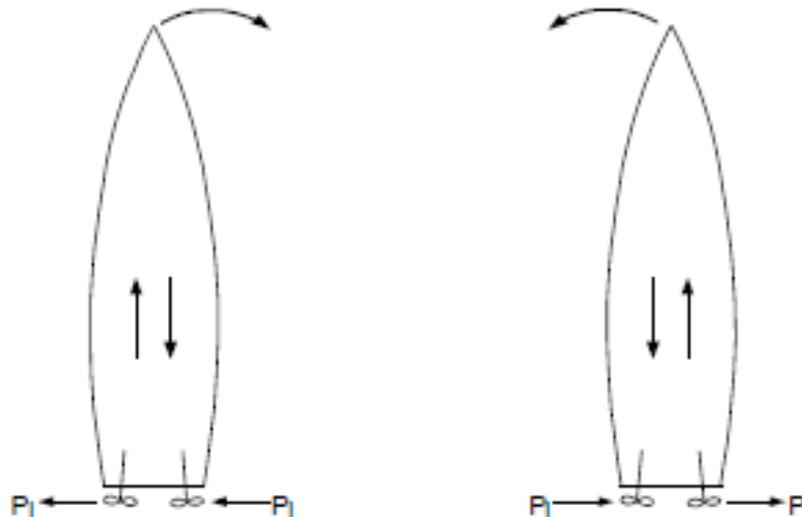


Figura 5.6: Diagrama de la maniobra de Ciaboga de un buque con dos hélices, partiendo del Reposo(Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

que se pretenda caer (máximo 10 grados), se reduce la resistencia que el timón ofrece al desplazamiento lateral del buque. Por otra parte, si el buque tiene una cierta arrancada adelante, la presión lateral de las palas es insignificante. Por lo tanto, la acción del timón será efectiva para aumentar la velocidad y efectividad de la ciaboga.

5.5.2 Maniobra de Ciaboga con Hélices de giro hacia dentro

La tercera maniobra de ciaboga a considerar es con el giro de las hélices hacia adentro (figura 5.8). Cuando las hélices gemelas giran hacia adentro en marcha adelante, las maniobras son al contrario de lo esperado. Al girar al contrario, la presión lateral (P_1) de las palas es de sentido contrario, haciendo que el efecto conseguido por el par de giro también sea inverso a los casos anteriores. Para evitar este aspecto negativo, se debe abordar la maniobra como si se pretendiera ciabogar a la banda contraria a la deseada y luego invertir el sentido de giro de las hélices una vez iniciada la caída. Otra solución es considerar al buque como si fuese de una sola hélice, actuando las dos hélices adelante con el timón metido a la banda deseada y luego poner las dos hélices marcha atrás y siempre obedeciendo al timón. El inconveniente de esta solución es el avance inicial del buque, lo que anula la posibilidad de que la ciaboga se haga sobre la propia eslora.

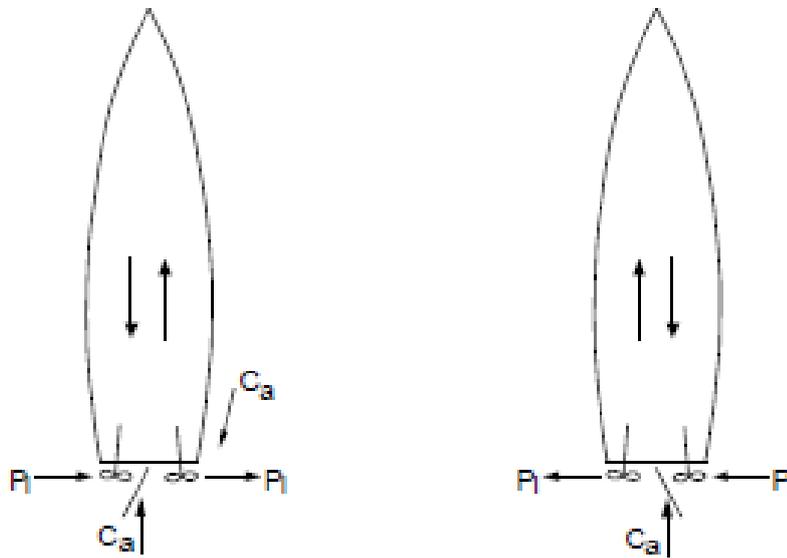


Figura 5.7: Diagrama de la maniobra de Ciaboga de un buque con dos hélices, partiendo del Reposo y haciendo uso del timón (Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

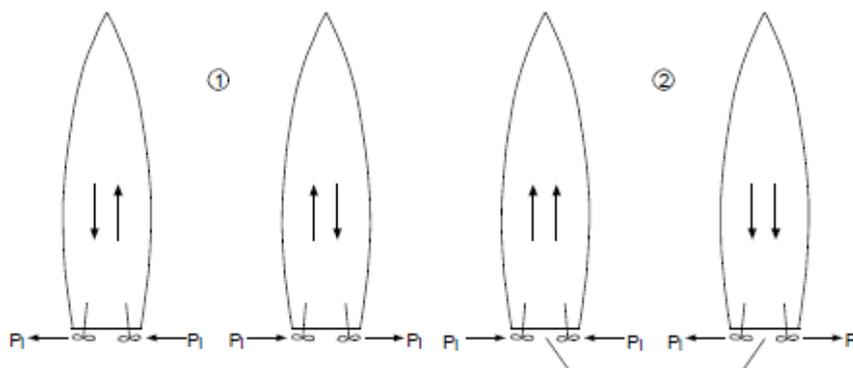


Figura 5.8: Diagrama de la maniobra de Ciaboga de un buque con dos hélices de giro hacia dentro (Fuente: *Maniobra de los Buques*).[10]

6 Comparación entre Paso Fijo y Paso Variable

Actualmente, se puede decir que todos los buques que utilicen hélices como medio de propulsión pueden tener dos tipos diferentes, paso variable y/o paso fijo. No se puede establecer como norma que un tipo de hélice sea mejor que otra, simplemente se adaptan mejor a las necesidades del buque. Aún así, existen ciertas diferencias que determinan que un armador se decante más por un tipo de hélice u otro para sus buques.

Tradicionalmente, la mayoría de los buques están equipados con hélices de paso fijo. Esta mayoría suelen ser buques grandes, los cuales aprovechan mejor los efectos que producen las hélices al maniobrar. Otra razón por la que suelen ser buques grandes es por la duración de sus viajes, largos períodos de tiempo con la hélice trabajando a pleno rendimiento. Otro buen motivo, quizás el más evidente, es el reducido gasto que supone instalar hélices de paso fijo en comparación con hélices de paso variable, además de su poco mantenimiento.

Por otra parte, los buques equipados con hélices de paso variable suelen ser más pequeños y con trayectos más reducidos. En esta situación se encuentran la gran mayoría de los ferry y buques de cabotaje, los cuales precisan tener una buena maniobrabilidad y aprovechar al máximo el rendimiento de sus elementos propulsores.

Técnicamente, la principal diferencia entre las hélices de paso variable/controlable y las de paso fijo, radica precisamente en la posibilidad de variar el paso. Una hélice paso variable es aquella capaz de modificar el ángulo de ataque de sus palas para obtener un mejor paso. Mientras tanto, una de paso fijo no es capaz de hacer esto, sus palas tienen siempre el mismo ángulo de ataque, por lo tanto, el paso de esa hélice siempre será el mismo.

A la hora de trabajar o maniobrar con uno u otro tipo de hélices, es necesario saber que no se comportan igual. La primera diferencia que se aprecia es que las hélices de paso variable están siempre girando, incluso con el telégrafo en posición de “Parado”. Esto es posible debido a que la hélice paso variable modifica la posición de sus palas hasta obtener un paso cero, es decir, las palas de la hélice quedan en un ángulo tal que no ejercen fuerza alguna en cuanto a avance o retroceso del buque se refiere. Por su parte, una de paso fijo se detiene o va bajando sus vueltas conforme baja la demanda de fuerza propulsora. Esto plantea una serie de consideraciones a tener en cuenta:[1]

- Si el buque está equipado con hélices de paso fijo, cuando se pase de marcha adelante a atrás (o viceversa), se ha de esperar a que la hélice se detenga o gire muy lentamente. Es decir, tiene que haber obligatoriamente un momento de punto muerto entre un sentido de giro y otro, lo que conlleva que la maniobra probablemente sea lenta y que se tengan que medir muy bien los tiempos de reacción. Por su parte, las de paso variable, al cambiar la orientación de las palas, no es necesario que se detengan para cambiar el sentido de la marcha del buque. Esto da lugar a maniobras más rápidas y precisas, aun así, no hay que descuidar los tiempos de reacción/respuesta del buque.

- El hecho de que un tipo de hélice siempre gire y la otra no plantea una cuestión muy importante. Las hélices de paso variable siempre están girando, por lo que hay que tener mucho cuidado de no enredar ningún cabo, especialmente cuando se estén dando o largando del atraque. Es muy importante también que el paso cero esté bien calibrado, de lo contrario, se puede dar la situación de que el buque se apoye en el muelle o tire de él con los cabos.
- Las hélices de paso fijo se consideran por lo general dextrógiras, es decir, de giro hacia la derecha en régimen de máquina avante. Por su parte las de paso variable se consideran levógiras, es decir, de giro a la izquierda en régimen de máquina avante. Esto se hace así para que ambos tipos de hélices se comporten igual en régimen de máquina atrás. Una hélice de paso fijo dextrógira cambia a levógira en marcha atrás; mientras que una de paso variable permanece siempre como levógira (cambia la orientación de las palas, no el sentido de giro de la hélice completa).
- A la hora de maniobrar, las hélices de paso fijo suelen ser algo más fiables. Una hélice de paso variable tiene menor rendimiento, se aprovecha menos, a velocidades bajas. Mientras que una de paso fijo es más eficaz en este sentido, es decir, las maniobras pueden resultar más lentas, pero a su vez son más eficaces o certeras. Por su parte, las hélices de paso variable dotan de mayor maniobrabilidad al buque pues permiten cambiar de forma rápida la potencia requerida, lo cual puede ser favorable para que a un buque no le sea necesaria la asistencia de remolcadores en sus maniobras portuarias. Esto último es algo muy útil para buques que realizan maniobras con mucha frecuencia.
- El mantenimiento es un aspecto a tener en cuenta a la hora de comparar entre hélices de paso fijo y variable. En este sentido, las segundas son mucho más complejas y vulnerables. El hecho de que las palas de la hélice cambien de orientación hace que requieran un mantenimiento y unas revisiones más exhaustivas que una hélice de paso fijo (con el consecuente gasto de recursos y tiempo que ello supone).
- Un último detalle que comentar es el económico. Si se colocan en una balanza un tipo de hélice y otro, existen casi los mismos gastos. Las hélices de paso variable son costosas de instalar y mantener, aunque por otra parte dan mucha independencia al buque para operar sin necesidad de asistencia. Por su lado, las hélices de paso fijo son más sencillas a la hora de instalar y mantener; pero hacen que el buque sea más dependiente o precise de más servicios externos para operar en los diferentes puertos.

En conclusión, como se dijo al inicio de este capítulo, no hay un tipo de hélice propulsora mejor que otra; simplemente se adapta mejor a las necesidades y usos del buque en el que se instala. En el caso de las hélices de paso controlable, se adaptan mejor a buques que requieren una muy buena maniobrabilidad, reducir al mínimo gastos en servicios portuarios y aprovechar al máximo las capacidades de sus elementos propulsores. Algunos ejemplos serían: ferry, cruceros, remolcadores o buques de investigación. Por otra parte, las hélices de paso fijo se adaptan mejor a buques que hacen rutas muy largas y que precisan de un propulsor con menor mantenimiento. Algunos ejemplos serían: petroleros, buques de carga general o portacontenedores.

7 Caso práctico I: B/T Tinerfe (Paso Fijo)

7.1 Ship's Particulars Tinerfe

El Buque Tanque (B/T) Tinerfe es un pequeño petrolero de productos, de bandera española con puerto base en Santa Cruz de Tenerife. Este buque es propiedad de la compañía Distribuidora Marítima Petrogás (rama naval del grupo DISA) desde el año 2009. Este petrolero de doble casco fue construido originalmente en los astilleros Samho Shipyard Co., en Tongyeong (Corea del Sur). Actualmente, se encuentra fletado por la Compañía Logística de Hidrocarburos (CLH) y realiza sus travesías mayoritariamente entre puertos del Mediterráneo; aunque alguna vez cubre servicios en Canarias o algunos fletes en el extranjero. [7] Sus características principales son:

- Eslora total: 144 metros
- Eslora entre perpendiculares: 136 metros
- Manga: 22.6 metros
- Puntal: 12.5 metros
- Calado mínimo (en lastre): 5.8 metros
- Calado máximo (en carga): 9.2 metros
- Arqueo bruto: 11259*GT*
- Arqueo neto: 5265*TN*
- Peso Muerto: 17539*TN*
- Desplazamiento: 22541*TN*
- Velocidad Máxima: 14 nudos (en lastre)
- Velocidad de Servicio: 13 nudos
- Máquina Principal: un único motor *MAN B&W 8S35MC* con una potencia de 5950*KW* a 173*rpm*.
- Auxiliares: 3 auxiliares *YANMAR* con una potencia de 745*KW* a 900*rpm* (cada uno de ellos).
- Propulsor: Una hélice de 4 palas de paso fijo.

- Hélices de Maniobra: Una hélice de 4 palas de accionamiento hidráulico y con una potencia de $500KW$.
- Equipo de Gobierno: timón convencional con servomotor tipo “*Slyde*”.
- Capacidad de combustible: $911m^3$ de Fuel Oil (F.O.) y $113m^3$ de Motor Diesel Oil (M.D.O.).
- Consumos diarios: 19.3 toneladas de F.O. y 1.97 toneladas de M.D.O..
- Capacidad de carga: $18000m^3$ distribuidos en 14 tanques de carga y un tanque más pequeño.



Figura 7.1: El B/T Tinerfe atracado en la terminal de Mahon, Menorca (Fotografía realizada por el alumno durante su periodo de prácticas a bordo).

7.2 Curvas de Evolución del B/T Tinerfe

Como se ha explicado en capítulos anteriores, las curvas de evolución ofrecen información acerca de la maniobrabilidad y otras características del buque. Como también se ha mencionado, estas curvas se obtienen en las pruebas de mar. Es necesario destacar que este buque está propulsado por una única hélice de paso fijo dextrógira, por lo que las curvas de evolución que se exponen en el puente deberían tener ciertas diferencias notables respecto al buque que se va a estudiar más adelante.

En este buque, toda la información relativa a la maniobrabilidad se encuentra expuesta en dos documentos. En el primero de ellos se exponen diversas tablas con información relativa a:

- Los diferentes regímenes de máquina y la velocidad que alcanza el buque con cada orden de máquina:

Tabla 7.1: Relación entre regímenes de máquina y sus respectivas velocidades.

Orden de Máquinas	RPM	Vel.Cargado (kn)	Vel.Lastre (kn)
Avante Toda	153	13.00	14.00
Avante/Atrás Toda	140	11.50	12.45
Media Avante/Atrás	90	6.60	8.15
Poca Avante/Atrás	70	5.00	6.01
Muy Poca Avante/Atrás	62	3.40	5.26

- Particularidades de la propulsión del buque:
 - Revoluciones mínimas: 37.6 rpm
 - Revoluciones críticas: entre 47 y 59 rpm
 - La fuerza o velocidad que alcanza el buque en marcha atrás es un 60 por ciento de la marcha avante.
 - El buque es capaz de arrancar hasta 24 veces seguidas sin necesidad de esperar a recargar los compresores de aire.
- Los datos básicos sobre el funcionamiento de la hélice de maniobra que hay instalada en la proa:
 - La hélice tarda 5 segundos en girar a pleno rendimiento desde que se ordena desde el mando del puente.
 - La hélice tarda 10 segundos en cambiar su sentido de giro cuando opera a pleno rendimiento.
 - La hélice deja de ser efectiva cuando el buque supera los 4 nudos de velocidad.
 - Cuando el buque está parado, la hélice es capaz de hacer que la proa se desvíe a razón de 15.0 grados/min hacia estribor y 14.5 grados/min hacia babor.
- Particularidades sobre el gobierno del buque:
 - El timón es de tipo semi compensado.
 - El ángulo máximo del timón es de 35 grados a una banda.
 - Cuando los dos servomotores están activos, el timón tarda 14 segundos en cambiar de una banda a otra (si sólo hay uno, el timón tarda 24 segundos).
 - La velocidad mínima de gobierno sin que la hélice intervenga es de 4.1 nudos.
 - Para que el timón tenga un efecto nulo, que esté a la vía, debe estar en 0 grados.
- Valores del Efecto Squat y su relación con el Under Keel Clearance.
- Calados del buque:

Tabla 7.2: Calados del B/T Tinerfe según condición de carga (m).

Cargado	Lastre
9.110 en proa	9.270 en popa
5.250 en proa	6.350 en popa

7.2.1 Maniobras de Giro

La primera y más llamativa de las maniobras que se exponen en la segunda parte de las curvas de evolución de este buque, son las maniobras de giro, a ambas bandas y tanto en carga como en lastre. En los tres casos que se exponen, las condiciones externas son las siguientes:

- Dirección del viento: 246.
- Velocidad del viento: 7,5m/seg (14,6kn)
- Condición del mar: mar de fondo de 0.5m.

- Revoluciones de la máquina antes y después de la maniobra: $167,2rpm$.
- Rumbo inicial del buque: 200.
- Ángulo de timón de 35 en todos los casos.

Cabe destacar, que en este buque se han realizado empíricamente sólo las maniobras a babor. Las maniobras a la banda de estribor son simuladas. Con estas condiciones, se realiza la primera maniobra de giro con el buque cargado y en aguas profundas, obteniendo los siguientes datos:

Tabla 7.3: Datos obtenidos de la primera Maniobra de Giro.

Parámetro	Evolución a Br.	Evolución a Er.
Diám. Giro	–	–
Diám. Táctico	344.23	406.34
Traslado Lateral	–	–
Avance	396.15	430.58

Aunque estas curvas de evolución sólo ofrecen estos datos, son los necesarios para determinar si la maniobrabilidad del buque es la ideal o no. Para ello, se debe recurrir a los Criterios de Maniobrabilidad de la OMI (sección 2.3), concretamente al punto 3a (Capacidad de Giro), donde se especifica que el avance no debe ser superior a 4.5 esloras y el diámetro táctico no debe sobrepasar el equivalente a 5 esloras de distancia. Para este buque, se puede considerar que los valores que se muestran en la tabla son correctos:

$$AvanceBabor = 396,15m \rightarrow \frac{396,15}{144,06} = 2,75esloras \quad (7.1)$$

$$AvanceEstribor = 430,58m \rightarrow \frac{430,58}{144,06} = 2,99esloras \quad (7.2)$$

$$Diam.Tac.Babor = 344,23m \rightarrow \frac{344,23}{144,06} = 2,39esloras \quad (7.3)$$

$$Diam.Tac.Estribor = 406,34m \rightarrow \frac{406,34}{144,06} = 2,82esloras \quad (7.4)$$

Si se realiza la misma maniobra, pero en aguas poco profundas, o con una profundidad mucho menor que en el caso anterior, el valor de los parámetros que se reflejan en la tabla varían. Teniendo esto en cuenta, se obtienen los siguientes datos:

Tabla 7.4: Datos obtenidos de la segunda Maniobra de Giro.

Parámetro	Evolución a Br.	Evolución a Er.
Diám. Giro	–	–
Diám. Táctico	440.26	452.61
Traslado Lateral	–	–
Avance	473.51	502.04

Al igual que en la primera maniobra de giro, se debe comprobar que los datos obtenidos dan unos resultados óptimos. Por lo tanto, aplicando nuevamente el criterio 3a de Maniobrabilidad de la OMI, se obtiene que los valores son correctos:

$$AvanceBabor = 473,51m \rightarrow \frac{473,51}{144,06} = 3,29esloras \quad (7.5)$$

$$\text{AvanceEstribor} = 502,04m \rightarrow \frac{502,04}{144,06} = 3,48\text{esloras} \quad (7.6)$$

$$\text{Diam.Tac.Babor} = 440,26m \rightarrow \frac{440,26}{144,06} = 3,05\text{esloras} \quad (7.7)$$

$$\text{Diam.Tac.Estribor} = 452,61m \rightarrow \frac{451,61}{144,06} = 3,14\text{esloras} \quad (7.8)$$

Respecto a la primera maniobra, todos los valores que se han medido aumentan. Esto prueba que la distancia entre el fondo y el casco del buque tiene efectos en la maniobrabilidad de éste.

Por otra parte, la condición de carga del buque es otro aspecto a tener en cuenta. Por este motivo, se realiza una tercera maniobra de giro con el buque en condición de lastre y en aguas profundas. En esta nueva condición, los calados del buque son de 5,25metros en la Proa (Pr) y 6,35metros en la Popa (Pp). Dicho esto, los datos obtenidos de esta tercera maniobra de giro son los que siguen:

Tabla 7.5: Datos obtenidos de la tercera Maniobra de Giro.

Parámetro	Evolución a Br.	Evolución a Er.
Diám. Giro	–	–
Diám. Táctico	421.63	443.61
Traslado Lateral	–	–
Avance	426.73	450.10

Al igual que en las dos maniobras anteriores, se debe comprobar que los valores que se reflejan en la tabla 7.5 entran dentro de los Criterios de Maniobrabilidad de la OMI (sección2.3). Aplicando nuevamente el criterio 3a, se obtiene que dichos valores son correctos:

$$\text{AvanceBabor} = 426,73m \rightarrow \frac{426,73}{144,06} = 2,96\text{esloras} \quad (7.9)$$

$$\text{AvanceEstribor} = 450,10m \rightarrow \frac{450,10}{144,06} = 3,12\text{esloras} \quad (7.10)$$

$$\text{Diam.Tac.Babor} = 421,63m \rightarrow \frac{421,63}{144,06} = 2,92\text{esloras} \quad (7.11)$$

$$\text{Diam.Tac.Estribor} = 443,61m \rightarrow \frac{443,61}{144,06} = 3,08\text{esloras} \quad (7.12)$$

Respecto a la primera Maniobra de Giro, los valores de los parámetros aumentan, aunque el aumento no es tan acusado como en la segunda Maniobra de Giro. Esto demuestra que la condición de carga es influyente en la capacidad de maniobra de un buque y por ende sus calados.

Como resultado genérico de las tres maniobras, se puede concluir que este buque siempre necesitará más espacio para maniobrar si lo hace hacia Estribor (Er). En todos los casos, en la evolución a estribor siempre se obtienen distancias superiores a la evolución a Babor (Br). Esto demuestra que, para un buque con una hélice dextrógira de paso fijo, se aprovecha más el efecto de la hélice al maniobrar hacia Br (obteniendo siempre una curva de evolución en un menor espacio).

7.2.2 Maniobra de Emergencia

La otra maniobra expuesta en este tablón es la de “Parada de Emergencia”. Esta maniobra consiste en frenar el avance del buque mediante la acción contraria del propulsor. Es decir, si el buque se encuentra en “Toda Avante”, se ordena “Toda Atrás” para detener el avance del buque y viceversa.

En el caso del B/T Tinerfe, las condiciones iniciales para esta maniobra son:

- El buque se encuentra en condición de carga, por lo que sus calados son de $9,11\text{metros}$ en Pr y $9,27\text{metros}$ en Pp.
- La máquina se encuentra funcionando a 173rpm , lo cual supone una velocidad de $14,40\text{nudos}$, antes de comenzar la maniobra (a toda máquina).
- Hay un viento de $7,1\text{m/seg}$ (unos $13,8\text{nudos}$) proveniente del NE (rumbo 043), el buque hace un rumbo de 128 (rumbo SE) en el momento de iniciar la maniobra, por lo que el viento que hay le entra por su costado de Br.

Como resultado de esta maniobra, se obtienen los siguientes datos en caso de que se requiera detener el avance del buque cuando está en “Avante Toda”:

- El buque ha tardado en detenerse completamente un total de 9minutos y 1segundo , de los cuales, 6minutos y 10segundos se han empleado en detener la rotación del eje de la hélice.
- En el tiempo que ha tardado en detenerse, el buque ha recorrido 2261metros , el equivalente a $1,23\text{mn}$ o $12,3\text{cables}^1$ (a esta distancia se le denomina en inglés: *Head Reach*).
- Si a este tiempo y distancia, se prolonga hasta que el buque coge arrancada hacia atrás (4 nudos), entonces se puede decir que el buque ha tardado 12minutos y 18segundos en pasar de “Todo Avante” a “Atrás” y en ese tiempo el buque ha recorrido 2522metros ($1,36\text{mn}$ o $13,6\text{cables}$).
- Durante esta maniobra, el buque ha experimentado un traslado lateral de $164,25\text{metros}$ a Br.
- Si esta misma maniobra se realiza con el buque en condición de lastre, los calados serían de $5,25\text{metros}$ en Pr y $6,35\text{metros}$ en Pp y el buque se desplazaría unos 1468metros ($0,79\text{mn}$ o $7,9\text{cables}$) hasta detenerse por completo y experimentaría un traslado lateral de $121,15\text{metros}$ a Br.

Con estos datos se puede obtener una idea aproximada del espacio que requiere este buque para evitar una posible colisión en caso de emergencia. Tanto si el buque va en lastre como si va en condición de carga. A raíz de esto último, se puede observar que el buque se detiene en un espacio más corto si va en lastre. Esto demuestra que la hélice está colocada a la profundidad adecuada para que el buque no tenga demasiados problemas de cavitación o resbalamiento a la hora de maniobrar en condición de lastre. Esto es así debido a que al quitar toda la carga, se reducen el efecto de inercia y los calados, pero la distancia recorrida no se mantiene ni aumenta, sino que se reduce.

¹Un cable es la décima parte de una milla náutica: $1\text{cable} = 0,1\text{nm}$

7.3 Maniobra de atraque del B/T Tinerfe en Ibiza

El B/T Tinerfe suele recalar en el puerto de Ibiza para abastecer principalmente a la ciudad y el aeropuerto de Ibiza. Este puerto tiene una gran concentración de tráfico, sobre todo conforme se acerca el verano, especialmente tráfico de líneas regulares (ferry), cruceros y de recreo (desde pequeñas lanchas hasta enormes yates). El puerto entero es una bahía natural y el atraque destinado a la recepción de hidrocarburos se encuentra en uno de sus extremos (alejado del núcleo urbano que se encuentra en el lado opuesto). Aún así, la operación de entrada es algo complicada debido al tráfico continuo y a la proximidad de rocas a baja profundidad entorno a la luz roja de entrada. Destacar que para las maniobras en puerto de este buque, se requiere la presencia de un remolcador como mínimo.

El atraque para la recepción de hidrocarburos se encuentra en el Muelle de Botafoch, al lado del Faro de Botafoch, cercano a la Estación Marítima de Ibiza. Es el atraque más alejado que hay, prácticamente se encuentra en la misma entrada al puerto, junto a la luz verde. Este muelle es a su vez un rompeolas que protege al puerto cuando sopla viento fuerte del SE (ver figuras 7.2 y 7.3).



Figura 7.2: Señalado en la imagen, el muelle de Botafoch, donde atraca el B/T Tinerfe cuando recala en Ibiza (Fuente: *Google Earth*).[4]

Estando a 3 millas del punto de recogida del práctico, se ordena moderar de “Avante Toda” a “Avante Media”, por lo que el buque reduce su velocidad de 14 a 6-7 nudos.

En la aproximación a puerto, se ha de tener especial atención a los bajos y roques que hay frente al casco antiguo de Ibiza. En la aproximación, estos quedan a babor y se pasa relativamente cerca de ellos. El más cercano de estos obstáculos es el conocido como “Illa Negra”, el cual tiene además la función de faro rojo, por su situación en la misma bocana del puerto.

Cuando el buque está a una milla del puerto, aproximadamente, se modera a “Avante Poca”. En ese momento, el práctico sube a bordo y se hace firme al remolcador en la popa, normalmente por la aleta de babor. Este remolcador tiene una potencia de tiro de unas 50 toneladas, suficiente para ayudar en la maniobra de atraque y desatraque de este buque.

Estando próximo al puerto y con práctico a bordo, se procura que el buque quede enfilado a la luz roja de la dársena interior. Una vez conseguido, conforme se acerca el buque a la luz verde de entrada, se va moviendo la proa hacia la estación marítima. Se modera a “Muy Poca Avante” y se mete timón a estribor.

Cuando la proa está a la altura de la verde, se acaba de meter todo el timón a estribor. Si es necesario, el remolcador dará un pequeño tirón de la aleta de babor para ayudar en el reviro. A su vez, se pondrá a trabajar la hélice de proa hacia estribor. Según el capitán que esté al mando, esta parte de la maniobra se puede hacer con la máquina en “Parado”; es decir, con la propia inercia del buque.

Cuando el buque quede paralelo al muelle, se detiene su arrancada metiendo “Muy Poca Atrás” y manteniendo el timón todo a estribor. Si fuese necesario, el remolcador puede apoyarse en la aleta de babor para frenar el rabeo de la popa hacia babor. Si la proa queda apuntando a la esquina del muelle (es decir, con la proa más metida que la popa), es beneficioso para hacer más eficaz la maniobra.

El muelle de Botafoch es multipropósito, es decir, además de ser para recepción de hidrocarburos, se utiliza algunas veces para alojar algún ferry o crucero. Por lo tanto, en su extremo tiene un tacón que debe rebasarse. Es importante que el buque quede detenido una vez se rebase ese tacón, cuidando que también haya también suficiente espacio por la proa.

Si el buque no queda muy lejos del muelle, se puede dar una palada avante con el timón todo a babor para acercar la popa. Por otra parte, la hélice de maniobra debe trabajar hacia estribor para acercar la proa. Con esto se consigue acercar el buque al muelle, pero, por otra parte, el movimiento también es hacia adelante, por lo que se deben controlar muy bien las distancias. Si el buque no está muy alejado del muelle, se puede corregir luego con los cabos.

Si después del movimiento anterior, el buque sigue muy alejado o se va muy avante, se debe frenar la arrancada avante dando una palada atrás. Con el buque detenido nuevamente, se acerca la popa al muelle con ayuda del remolcador (apoyándose en la popa). El timón se deja en todo a babor y la hélice de proa continúa trabajando hacia estribor.

Cuando el buque ya está junto al muelle, o a unos 10-15 metros como mínimo se dan los primeros cabos, los esprines de proa y popa. Una vez encapillados, se vira de ellos y se coloca al buque en la posición óptima (unos metros más adelantados o atrás). Una vez dados los primeros cabos, se para la hélice de proa y se coloca el timón a la vía.

Se dan los demás cabos. A proa se dan dos largos y un través. A popa se dan un través, dos largos y una codera. Una vez está todo firme, se procede a preparar el buque para su descarga.

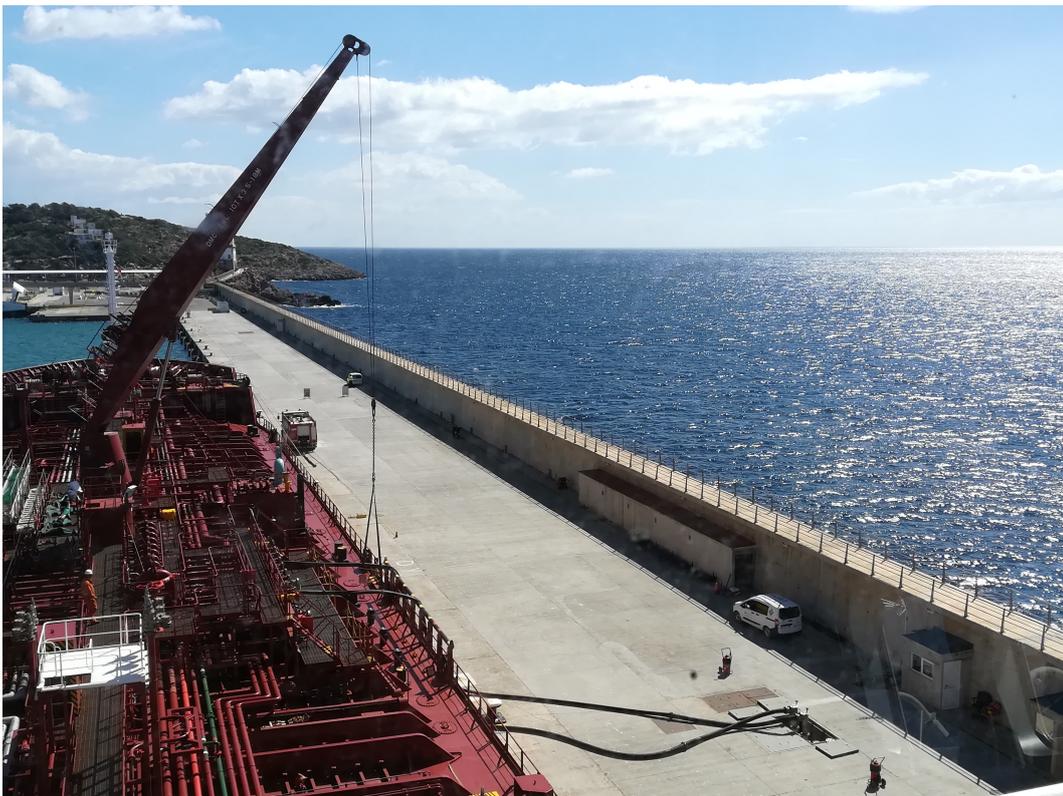


Figura 7.3: B/T Tinerfe atracado y descargando en el muelle de Botafoch, Ibiza (Fotografía realizada por el alumno durante su período de prácticas a bordo).

8 Caso práctico II: S/F Bahama Mama (Paso Variable)

8.1 Ship's Particular S/F Bahama Mama

El S/F Bahama Mama es un buque mixto, es decir, transporta pasaje y carga rodada (Ropax); de bandera maltesa con puerto base en Valleta (Malta). Este buque es propiedad de la compañía Euro-líneas Marítimas Balearia S.A. desde el año 2009. Este ferry fue construido por el astillero gallego H.J. Barreras, en Vigo. Además, este ferry fue el primero de la compañía Balearia en operar entre los EE. UU. y las Bahamas. Anteriormente, el buque era de bandera española y se le conocía como "S/F Alhucemas". Actualmente, este buque se encuentra realizando diversas rutas entre la Península (Barcelona, Denia o Valencia) y las Islas Baleares (Ibiza, Mahón, Ciutadella, Alcudia o Palma de Mallorca) o la Península (Málaga o Almería) y el Norte de África (Melilla, Nador o Mostaganem). Sus características principales son:

- Eslora total: 154.5 metros
- Eslora entre perpendiculares: 137 metros
- Manga: 24.2 metros
- Puntal: 13.5 metros
- Calado mínimo (en lastre): 4.7 metros
- Calado máximo (en carga): 5.5 metros
- Arqueo bruto: 20238GT
- Peso Muerto: 3520TN
- Desplazamiento: 10343TN
- Velocidad Máxima: 23nudos (en lastre)
- Velocidad de Servicio: 21nudos
- Máquina Principal: dos motores *MAK 9M43C* con una potencia de 9000KW a 500rpm (cada uno de ellos).
- Auxiliares: 3 auxiliares *MAK 6M20C* con una potencia de 1140KW a 1000rpm (cada uno de ellos).
- Propulsores: Dos hélices de 4 palas de paso variable.

- Hélices de Maniobra: Dos hélices de maniobra de 4 palas, accionamiento por motor eléctrico con una potencia de $750KW$ cada una.
- Equipo de Gobierno: timones convencionales con servomotores independientes (SV650-3FCP).
- Capacidad de combustible: $600m^3$ de F.O. y $82m^3$ de M.D.O.
- Consumos diarios: 48 toneladas de F.O. y 0.3 toneladas de M.D.O.
- Capacidad para $1200metroslineales$ de carga rodada repartidos en dos grandes bodegas (Cubiertas 3 y 4 del buque) y 1000 pasajeros (sin contar con la tripulación, de unas 50 personas).



Figura 8.1: El S/F Bahama Mama entrando al Puerto de Denia, Alicante (Fotografía realizada por el alumno).

8.2 Curvas de Evolución del S/F Bahama Mama

A pesar de que este buque está equipado con dos hélices, las maniobras se realizan como si se estudiara a un buque con una sola hélice. No obstante, sigue existiendo una diferencia primordial con el otro buque que se muestra en este trabajo, y esa diferencia es el tipo de hélice. Al tratarse de tipos de hélices diferentes, aunque en buques con dimensiones similares, los datos deberían variar entre un buque y otro.

Las diferentes maniobras y los datos obtenidos a partir de ellas se encuentran expuestas en el puente, a la vista de todos los oficiales, el capitán y el práctico. Por otra parte, se debe tener en cuenta que, durante las pruebas de mar, el buque tiene unas condiciones fijas o básicas. Estas condiciones son:

- El buque se encuentra en todo momento en condición de lastre.
- Los calados del buque son de 4,556 metros en Pr y 5,454 metros en Pp.
- El desplazamiento del buque es de 10343 toneladas métricas.

8.2.1 Maniobras de Giro

La primera de las maniobras expuestas es la de giro, tanto a una banda como a la otra. En ambos giros la máquina trabaja al total de su capacidad y los condicionantes son:

- Velocidad al inicio de la maniobra de unos $22nudos$ ($22,45nudos$ en el giro a Br y $21,68nudos$ en el giro a Er).
- Ángulo de timón de 35 en ambos casos.
- Velocidad del viento de $13nudos$.
- Profundidad de $136metros$.
- Sin corriente en ambos giros.

Con este régimen de máquina y bajo los condicionantes anteriores, los datos obtenidos en las primeras maniobras de giro son los siguientes:

Tabla 8.1: Datos obtenidos de las primeras Maniobras de Giro.

Parámetro	Evolución a Br.	Evolución a Er.
Diám. Giro	409.32	392.04
Diám. Táctico	445.97	419.82
Traslado Lateral	241.31	223.80
Avance	438.95	394.30

Para saber si los datos obtenidos son correctos, se debe recurrir a los Criterios de Maniobra de la OMI. En este caso, se debe consultar el punto $3a$ de la Capacidad de Giro, donde se especifica que el avance no debe ser superior a 4.5 esloras y el diámetro táctico no debe exceder a 5 esloras. En el caso de este buque, se puede considerar que los valores del avance y el diámetro táctico son correctos:

$$AvanceBabor = 438,95m \rightarrow \frac{438,95}{154,51} = 2,84esloras \quad (8.1)$$

$$AvanceEstribor = 394,30m \rightarrow \frac{394,30}{154,51} = 2,55esloras \quad (8.2)$$

$$Diam.Tac.Babor = 445,97m \rightarrow \frac{445,97}{154,51} = 2,89esloras \quad (8.3)$$

$$Diam.Tac.Estribor = 419,82m \rightarrow \frac{419,82}{154,51} = 2,72esloras \quad (8.4)$$

Si se realiza la misma maniobra, pero con un régimen de máquinas inferior, un 80 por ciento de carga, la velocidad inicial de la maniobra se reduce (quedando en $21,34nudos$ en el giro a Br y $21,69nudos$ en el giro a Er). Esto hace que el valor de los parámetros cambie y por ende el resultado de la maniobra. Teniendo esto en cuenta, los datos que se obtienen son los que siguen:

Tabla 8.2: Datos obtenidos de las primeras Maniobras de Giro.

Parámetro	Evolución a Br.	Evolución a Er.
Diám. Giro	422.36	373.03
Diám. Táctico	465.69	426.87
Traslado Lateral	254.51	240.36
Avance	390.37	393.37

Al igual que en la primera maniobra de giro, se debe comprobar que los datos obtenidos dan unos resultados óptimos. Por lo tanto, aplicando nuevamente el criterio 3a de Maniobrabilidad de la OMI, se obtiene:

$$AvanceBabor = 390,37m \rightarrow \frac{390,37}{154,51} = 2,53esloras \quad (8.5)$$

$$AvanceEstribor = 393,37m \rightarrow \frac{393,37}{154,51} = 2,55esloras \quad (8.6)$$

$$Diam.Tac.Babor = 465,69m \rightarrow \frac{465,69}{154,51} = 3,02esloras \quad (8.7)$$

$$Diam.Tac.Estribor = 426,87m \rightarrow \frac{426,87}{154,51} = 2,76esloras \quad (8.8)$$

Respecto a la primera maniobra, todos los valores aumentan, salvo el avance como consecuencia directa de la disminución de velocidad a la hora de maniobrar. No obstante, el resultado global de esta maniobra es que el buque necesita un mayor espacio para describir el giro y en todo momento éste es menor cuando se cae a Er.

8.2.2 Maniobra Crash Stop

La segunda maniobra expuesta en esta tabla es la de “Crash-Stop” o “Parada de Emergencia”. Esta maniobra consiste en frenar el avance del buque mediante la acción contraria de los propulsores. Es decir, si el buque se encuentra en “Toda Avante”, se ordena “Toda Atrás” para detener el avance del buque y viceversa.

En el caso de este buque, las condiciones iniciales para esta maniobra son:

- Velocidad del viento: 13nudos.
- Velocidad inicial del buque (cuando se ordena detener el buque): 23,20nudos.

El resultado de esta maniobra ofrece los siguientes datos en caso de que se requiera detener el avance del buque cuando está en “Avante Toda”:

- El buque ha tardado en detenerse 134 segundos (2 minutos y 14 segundos).
- Desde que se ordena “Toda Atrás” hasta que la velocidad es cero, el buque ha avanzado 909,58metros, equivalente a 0,49mn o 4,9cables.
- Después de realizar esta maniobra, el buque ha experimentado un traslado lateral hacia babor de 40,00metros.

Con estos datos se puede obtener una idea aproximada del espacio que requiere este buque para evitar una posible colisión en caso de emergencia.

8.2.3 Maniobra de Zig-Zag

La tercera de las maniobras expuestas en el tablón es la de Zig-Zag, pero para cambios de 10. Las condiciones iniciales en las que se ha desarrollado esta maniobra son:

- El rumbo inicial es 270, es decir, hacia el Oeste. Por lo tanto, los rumbos en los que se desarrolla esta maniobra van desde el 260 hasta el 280.

- La velocidad inicial del buque es de 21,60 nudos.

Para realizar esta maniobra se han realizado un total de cuatro cambios de rumbo durante 230 segundos (3 minutos y 50 segundos). De estos cambios de rumbo, se extraen los tiempos que tarda el buque en variar su rumbo y los ángulos de rebasamiento. Estos ángulos de rebasamiento son:

Tabla 8.3: Ángulos de Rebasamiento en la Maniobra de Zig- Zag).

Ángulo	Rebasamiento
1er ángulo	16.20°
2do ángulo	16.00°
3er ángulo	18.00°
4to ángulo	18.40°

Para saber si los valores de estos ángulos son apropiados, se deben consultar los criterios sobre maniobrabilidad de la OMI. De acuerdo con el criterio 3c1 de la Capacidad de la Detención de la Maniobra, el primer ángulo de rebasamiento se puede considerar que es el correcto, como queda demostrado en las ecuaciones 8.9 8.10 y 8.11:

$$\frac{L}{V} = \frac{154,51m}{21,6kn} \rightarrow 21,6 \frac{mn}{h} = 21,6 \frac{mn}{h} * \frac{1852m}{1nm} * \frac{1h}{3600seg} = 11,112 \frac{m}{seg} \rightarrow \frac{L}{V} = \frac{154,51m}{11,112m/seg} = 13,905seg \quad (8.9)$$

$$1stOvershoot < [5 + (\frac{L}{V/2})]grados \rightarrow 10sec < \frac{L}{V} < 30sec \quad (8.10)$$

$$1stOvershoot < [5 + (\frac{L}{V/2})]grados = [5 + (\frac{154,51m}{\frac{21,6mn/h}{2}})]grados = 32,81grados \quad (8.11)$$

Comparando el resultado obtenido con la tabla 8.3, el primer ángulo de rebasamiento es claramente inferior a 32.81°. Por lo tanto, se puede establecer que el primer ángulo de rebasamiento es ideal.

Por otra parte, continuando con el criterio 3c2 de la sección 2.3, el segundo ángulo de rebasamiento también es el correcto, puesto que este segundo valor no solo no supera en más de 15 grados al primer ángulo de rebasamiento, sino que además es menor que el primero. Como puede observarse en la tabla 8.3.

Además de los ángulos de rebasamiento, de la maniobra de zig-zag se extraen los tiempos que tarda el buque en reaccionar a los cambios de rumbo. Aunque no hay un criterio fijo sobre los tiempos de reacción mínimos de un buque en relación con esta maniobra. Aun así, no deja de ser información que puede tener alguna utilidad para conocer la reacción del buque ante los cambios de rumbo. Por ejemplo, de los diferentes puntos en los que se toma medida del tiempo (figura 8.2), se observa que este buque tarda entre 12 y 14 segundos en reaccionar desde que se ordena el cambio de rumbo hasta que el buque alcanza el rumbo ordenado o deseado.

8.3 Maniobra de atraque del S/F Bahama Mama en Barcelona

Uno de los puertos que frecuenta este ferry es el puerto de Barcelona. Este buque de pasaje tenía el atraque en la cara norte del Muelle de Barcelona, al lado de la estación

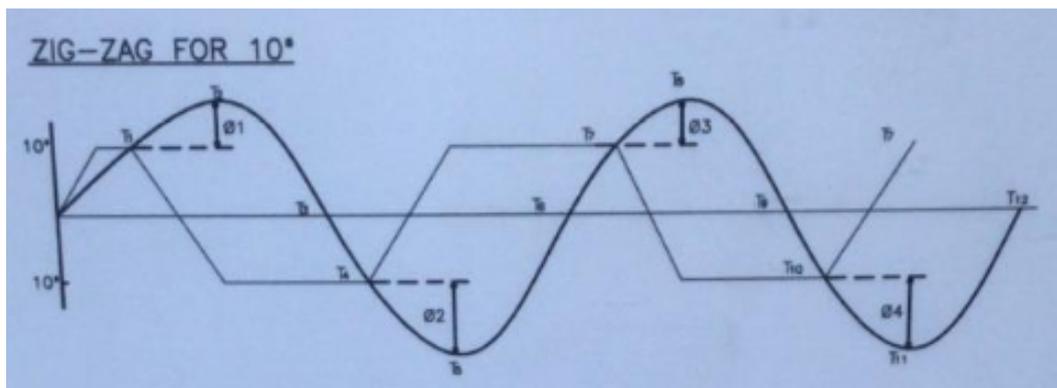


Figura 8.2: Diagrama de la Maniobra de Zig-Zag 10/10 del S/F Bahama Mama (Fuente: Curvas de Evolución del S/F Bahama Mama).

marítima de Balearia en Barcelona, cerca del Port Vell. Aunque es un atraque muy cercano al núcleo urbano de Barcelona, la dársena para llegar hasta él es algo estrecha para este ferry de 150 metros. Además de esta complicación, en algunas ocasiones hay que lidiar con el tráfico interno del puerto de Barcelona, especialmente con los yates grandes que salen de los astilleros y de los atraques del Port Vell. A pesar de estas complicaciones, el buque no requiere de asistencia de remolcadores para realizar sus maniobras (salvo en casos de condiciones meteorológicas adversas).

Para entrar en el puerto de Barcelona hay dos vías: la entrada Sur y la entrada Norte. Este buque y la mayoría de los ferris entraban por la segunda de estas. Antes de proceder a la entrada por bocana, el buque debe circular por un dispositivo de separación de tráfico. (Figuras 8.3 y 8.4)

En el caso del dispositivo de la zona norte, éste empezaba en la boya de recalada “November” (a unas 2-3 millas de la bocana), cuando el buque se encuentra con esta boya por su través de babor, debe avisar a la torre (Barcelona Port Control) para informar de su posición y moderar en base a la disponibilidad del práctico. Si el práctico está disponible, el buque puede proceder en el dispositivo con una velocidad no superior a 10 nudos; esto supone pasar de 10 puntos a 6 puntos en el paso de las hélices.

Conforme el buque avanza por el dispositivo y el práctico se aproxima, se modera de 6 a 4 puntos; lo que equivale a moderar hasta una velocidad de 5-6 nudos. Una vez el práctico está a bordo, se enfila a lo alto del monte “Montjuïc” o en su defecto al silo más a babor de un conjunto de ellos que se encuentra en la misma enfilación.

Cuando el buque está a unos 5 cables de la luz verde de la bocana (acompañada de un arco luminoso también verde), se mete timón todo a estribor hasta enfilarse la luz roja de entrada a la Marina Vela Barcelona. Esta es una pequeña marina de yates situada al sur del edificio W de Barcelona, entre el Muelle de Levante y el Nuevo Paseo del Rompeolas. Prácticamente cuando ya se está enfilado a esta luz, se tiene que ir dejando caer el buque hacia babor para pasar por la estrecha bocana.

Es muy importante que el buque pase la bocana lo menos atravesado posible, dado que es un canal angosto. Para que el buque pase en buenas condiciones este canal, se debe empezar a meter timón a babor desde que el puente se encuentre al través de la Terminal de Cruceros que hay en la escollera de babor. La proa va cayendo a babor desde la luz roja de entrada a Marina Vela Barcelona hasta la luz verde del Muelle de Levante, situada al final de la bocana.

Al igual que antes, apenas se tiene enfilada la luz verde del Muelle de Levante, se cambia objetivo. En esta ocasión se debe enfilarse al edificio World Trade Centre de Barcelona. En

este momento se debe tener especial cuidado con el rabeo de la popa y se debe intentar mantener el rumbo del buque lo más firme posible. Es en esta fase cuando el buque está atravesando la estrecha bocana.

Una vez que el buque deja la bocana y entra en la dársena, se reduce la máquina a tres o dos puntos (según el capitán que haya en ese momento). Es importante saber que con este régimen de máquinas el buque tarda mucho en responder a las órdenes de timón, por lo que serán requeridos grandes ángulos de metidas del timón para variar un poco el rumbo. Recapitulando, estando el buque ya en la dársena, se cae unos pocos grados a estribor y se enfila al centro comercial Maremagnum, situado en el Port Vell de Barcelona.

El buque debe seguir en la enfilación del Maremagnum hasta llegar al punto de reviro en la dársena que hay entre el Muelle de Barcelona y el Port Vell. Para pasar de una dársena a otra, debe pasar por otro canal angosto formado por la cabecera del Muelle de Barcelona y el Muelle de Cataluña (de los astilleros para los yates grandes). Esta es también una fase bastante delicada puesto que puede haber buques atracados en ambos muelles, lo que supone una reducción considerable del espacio disponible; además del riesgo de enredar algún cabo.

En cuanto el buque asome la proa en la dársena de su atraque, se pondrán las máquinas en paso cero (parado) y se enfilará hacia la esquina del Maremagnum. Una vez enfilado, para quitar la arrancada residual, se ponen las dos máquinas a 4 puntos atrás; aún así, la proa del buque quedará a unos 30-40 metros del muelle del Maremagnum. A partir de aquí comienza el reviro.

Con el buque detenido y enfilado hacia el Maremagnum, se aumenta el paso de la máquina de estribor a 6 puntos atrás y se pone el paso de la máquina de babor en 3 o 4 puntos adelante. Al mismo tiempo, se ponen a trabajar las dos hélices de proa hacia estribor. Para ayudar a dar mayor giro, se pueden poner los dos timones todo a babor. Con esta configuración en los mandos se consigue hacer ciaboga y además llevar el buque hacia atrás. No obstante, durante el reviro hay que poner especial atención a la distancia de la popa con el muelle (o el buque que pudiera haber atracado) y de la proa con los pantalanés del Muelle Balears (muelle de pesqueros y lanchas de Aduana, ubicados al este del Maremagnum).

Una vez queda la proa libre de los pantalanés del Muelle Balears, se ponen todos los mandos en cero. El buque seguirá con su tendencia a caer a estribor e ir hacia atrás. A continuación, se ponen ambas máquinas en 3 o 4 puntos atrás y se frena la caída de la proa hacia estribor con las hélices de proa trabajando hacia babor. La intención es que el buque quede con arrancada hacia atrás y con la popa apuntando hacia la esquina del atraque. En cuanto el buque tiene suficiente arrancada y se dirige hacia el lugar indicado, se moderan ambas máquinas a 2 puntos atrás.

Cuando el buque ya está a unos 100 metros de la posición de atraque (y haya librado del último buque atracado en el muelle), se pone el paso de la máquina de babor en 3 puntos adelante para que frene y saque la popa un poco hacia fuera. Para ayudar algo más a sacar la popa, se puede poner el timón de babor todo a estribor. La máquina de babor se puede poner en paso cero dejarse como está durante algo más de tiempo para hacer efectivo el par de fuerzas de giro entre las dos máquinas. A su vez, las hélices de maniobra se ponen a trabajar hacia estribor, para acercar la proa al muelle. Con esta configuración de mandos se consigue reducir la arrancada atrás y poner el buque en paralelo al muelle y casi en su posición.

Para terminar de poner el buque en su posición, se ponen ambos timones enfrentados; esto es: el de babor, todo a estribor y el de estribor, todo a babor. Con esto se hace un efecto pantalla con los dos timones que ayuda a reducir la arrancada. Mientras tanto, si hace falta acercar más la popa al muelle, se puede hacer aplicando un par de giro con ambas máquinas.

Para este caso, el par adecuado sería: la máquina de babor atrás y la de estribor adelante. Por su parte, para acercar la proa bastaría con poner a trabajar las hélices de maniobra hacia estribor. Con esta configuración se consigue que el buque se desplace de forma lateral. Si fuese necesario, antes de todo esto, se puede dar un apretón de 3 o 4 puntos adelante para reducir al mínimo la arrancada atrás.

Cuando el buque ya está en posición, o a falta de unos pocos metros, se lanzan los primeros cabos a tierra. En este caso, los primeros cabos a tierra son el largo de proa y el spring de popa, de esta forma se acaba de reducir por completo la arrancada atrás remanente. Acto seguido se dan el spring de proa y el largo de popa, para terminar de colocar el buque en su posición. Cuando ya está en el sitio, se dan los traveses y cabos de refuerzo necesarios si se diera el caso, quedando el buque como se ve en la figura 8.5.



Figura 8.3: Zona norte del puerto de Barcelona (Fuente: *Google Earth*).[4]



Figura 8.4: Lugar donde atraca el S/F Bahama Mama en Barcelona (Fuente: *Google Earth*).[4]



Figura 8.5: S/F Bahama Mama atracado en Barcelona (Fotografía realizada por el alumno durante su período de prácticas a bordo).

9 Conclusiones

Una vez aclarados todos los conceptos, la teoría relacionada con la Maniobrabilidad y expuesto los casos prácticos, se puede proceder a establecer unas conclusiones finales.

La primera conclusión se determina mediante la comparación de las maniobras de giro de ambos buques cuando éstas se realizan en aguas profundas y en condición de lastre (tablas 7.5 y 8.1). Es en esta situación cuando los dos buques se encuentran en una condición muy similar. También hay que destacar que sólo se pueden comparar el Diámetro Táctico y el Avance, aunque sean pocos parámetros, son los más importantes. Dicho todo esto, se puede decir que el B/T Tinerfe tiene mejor capacidad de maniobra para variar su rumbo que el S/F Bahama Mama. Esto es debido a que la diferencia entre los valores de una evolución respecto a otra, son menores en el caso del B/T Tinerfe; es decir, las maniobras hacia una banda u otra son más parecidas en este último buque. No obstante, cabe mencionar que el S/F Bahama Mama es capaz de variar su rumbo en un menor espacio que el B/T Tinerfe, lo cual le otorga cierta ventaja para maniobrar más fácilmente en algunos puertos (esto puede observarse al comparar los resultados de las ecuaciones 7.5 a 7.8 y 8.1 a 8.4; ver tabla 10.1).

Tabla 9.1: Datos obtenidos de las maniobras de giro (en esloras).

Parámetro	B/T Tinerfe	S/F Bahama Mama
Avance Br.	2.96	2.53
Avance Er.	3.12	2.55
Diam. Tac. Br.	2.92	3.02
Diam. Tac. Er.	3.08	2.76

Además de la ventaja de hacer la Maniobra de Giro en un menor espacio, el S/F Bahama Mama cuenta con dos propulsores. Esto hace que le sea posible ciabogar sobre sí mismo, pudiendo maniobrar con total independencia en lugares donde el B/T Tinerfe no puede si no es con la ayuda de remolcadores.

La segunda conclusión se determina mediante la maniobra de parada de emergencia o *Crash - Stop*. En ambos casos, los buques avanzan a toda máquina (en condición de lastre) y tienen que detenerse en el menor espacio y tiempo posibles. Para observar mejor la información que ofrece esta maniobra, se muestran en tabla los datos recopilados en las secciones 7.2.2 y 8.2.2:

Tabla 9.2: Datos obtenidos de las maniobras de parada de emergencia.

Parámetro	B/T Tinerfe	S/F Bahama Mama
Tiempo empleado	09'01"	02'14"
Distancia recorrida	0.79 mn	0.49 mn
Traslado Lateral	121.15 m	40 m
Velocidad Punta	14.40 kn	23.20 kn

A la vista de los datos mostrados en la tabla 9.2, queda claro que el tipo de propulsor influye mucho en cuestión de seguridad o maniobras de emergencia. En este caso, el S/F Bahama Mama tiene mejor maniobrabilidad que el B/T Tinerfe. El S/F Bahama Mama puede detenerse en casi la mitad de espacio y casi cuatro veces más rápido que el B/T Tinerfe incluso con una velocidad punta que es casi el doble. No obstante, cabe recordar que el S/F Bahama Mama tiene dos propulsores, mientras que el B/T Tinerfe tiene solo uno; aun así, es muy probable que el resultado fuera el mismo si el S/F Bahama Mama tuviera solo un propulsor.

Con estas dos conclusiones se puede decir que el propulsor de Paso Variable (CPP) ofrece una mayor capacidad de maniobra al buque en el que se encuentre instalado. Sin embargo, el aspecto económico sigue teniendo mucha importancia a la hora de decidir qué propulsor instalar en un buque, a pesar de las prestaciones o mejoras en maniobrabilidad que éste pueda ofrecer. Como se ha dicho anteriormente, el mantenimiento de los propulsores CPP es mucho más costoso y requiere de un mayor seguimiento que los propulsores FP, algo que no es viable o requiere de mucho esfuerzo (económico y de recursos) en buques que están constantemente cubriendo grandes distancias.

10 Conclusions

Once cleared all the concepts, the theory related with Maneuverability and exposed the practical cases, you can proceed to establish some final conclusions.

The first conclusion can be determined by comparing the turning maneuvers of both vessels when those maneuvers are done in deep waters and in ballast condition (tables 7.5 y 8.1). Is in this situation when the two vessels are in a quite similar condition. It should also be noted that only can be compared the Tactical Diameter and the Advance, although they are few parameters, they are the most important. Said all this, it can be said that the Motor Tanker (M/T) Tinerfe has better maneuverability for change her course than the S/F Bahama Mama. This is because the difference between the values of an evolution curve respect the other are minor for the M/T Tinerfe; that is, the maneuvers towards any band are more similar in M/T Tinerfe than in S/F Bahama Mama. However, it is worth mentioning that the S/F Bahama Mama can alter her course in an smaller space than the M/T Tinerfe, which gives her some advantage for maneuver more easily in some harbours (this can be observed when comparing the results from the equations 7.5 to 7.8 and from the equations 8.1 to 8.4; see table 10.1).

Tabla 10.1: Data obtained from the turning maneuvers (in lengths).

Parameter	M/T Tinerfe	S/F Bahama Mama
Advance Pt.	2.96	2.53
Advance Sb.	3.12	2.55
Tac. Diam. Pt.	2.92	3.02
Tac. Diam. Sb.	3.08	2.76

In addition to the advantage of doing the Turning Maneuver in a smaller space, the S/F Bahama Mama has two propellers. This makes it possible to turn on herself, being able to maneuver with absolute independence in places where the M/T Tinerfe cannot without the help of tugboats.

The second conclusion can be determined by the emergency stop maneuver or *Crash-Stop*. In both cases, the vessels proceed full ahead (in ballast condition) and have to stop in the least possible space and time. To observe better the information which this maneuver offers, the data collected in sections 7.2.2 and 8.2.2 are shown in the table:

Tabla 10.2: Data obtained from the emergency stop maneuvers.

Parameter	M/T Tinerfe	S/F Bahama Mama
Time spent	09'01"	02'14"
Distance traveled	0.79 nm	0.49 nm
Lateral Transfer	121.15 m	40 m
Top Speed	14.40 kn	23.20 kn

In view of data shown in the table 10.2, it is clear that the type of propeller influences greatly in a safety issue or emergency maneuvers. In this case, the S/F Bahama Mama has better maneuverability than the M/T Tinerfe. The S/F Bahama Mama can stop in almost the half space and almost four times faster than M/T Tinerfe even with a top speed which is almost the double. However, remember that the S/F Bahama Mama has two propellers, while the M/T Tinerfe has only one propeller; even so, it is very likely that the result was the same if the S/F Bahama Mama had only one propeller.

With this two conclusions it can be said that the Controlable Pitch Propeller (CPP) offers a greater maneuver capacity to the vessel where it is installed. However, the economic aspect is still very important when deciding which type of propeller to install in a vessel, despite the benefits or improvements in maneuverability that the propeller may offer. As said before, the maintenance of the CPP propellers is much more expensive and requires a greater tracing than Fixed Pitch Propellers, this is something which is not viable or requires a great effort (economic and from resources) in vessels who are constantly covering large distances.

Anexos

A Imágenes de CPP

Para tener una idea más visible acerca del aspecto de una hélice de Paso Variable, se muestran a continuación fotografías tomadas de las hélices del buque *Passió Per Formentera* durante su estancia en los astilleros de Gibraltar. Este buque pertenece a la compañía Euro-líneas Marítimas Balearia S.A. y su construcción es muy similar a la del S/F Bahama Mama; aunque es de menor tamaño.



Figura A.1: Vista general de las CPP del buque *Passió Per Formentera* (Fotografía tomada por el alumno durante su período de prácticas a bordo).



Figura A.2: Vista en detalle de una de las CPP del buque *Passió Per Formentera* (Fotografía tomada por el alumno durante su período de prácticas a bordo).



Figura A.3: Vista en detalle de una de las CPP del buque *Passió Per Formentera* (Fotografía tomada por el alumno durante su período de prácticas a bordo).

Bibliografía

- [1] ARMSTRONG C. BROWN, *Practical Ship Handling*. , Son and Ferguson, 1995.
- [2] CAPITÁN J.B. COSTA, *Tratado de Maniobra y Tecnología Naval*. 2ª Edición, Editorial Costa, 1991. ISBN: 84-604-0387-4.
- [3] FRANCISCO PÉREZ ARRIBAS Y RICARDO ZAMORA RODRIGUEZ, *Influencia de los Parámetros Generales del Buque en sus Características de Maniobrabilidad*. 2000. Documento del II Congreso Internacional de Ingeniería Oceánica.
- [4] GOOGLE INC., “Google Earth”. 2018. URL <https://earth.google.es>, Buscador utilizado para obtener fotografías aéreas de los puertos de Ibiza y Barcelona.
- [5] IGNACIO BARBUDO, *Maniobras a Bordo y en la Mar*. Libros y publicaciones náuticas Fragata, 2000.
- [6] IMO, “Explanatory notes to the Interim Standards for Ship Manoeuverability”. 2006. URL <https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC-1729-14/1>, Página Web del gobierno Holandés donde se puede consultar el documento original de la resolución A.751(18) de la IMO.
- [7] JUAN CARLOS DÍAZ LORENZO, “*Tinerfe*”, *buque insignia de DMP*. Página Web, 2014, [Consultado el 15 de mayo de 2019]. URL: <https://delacontecerportuario.wordpress.com/tag/tinerfe/>.
- [8] MANUEL ENRIQUE GONZALEZ MESA, *Hélice de Paso Variable*. Universidad de La Laguna, 1990. Se puede encontrar en el archivo de la Biblioteca de Náutica bajo la referencia ML/19.
- [9] MASMAR, “Hélices,paso y retroceso. Diámetro”. 2013. URL www.masmar.net/index.php/es1/Apuntes-Nauticos/Tecnologia-Naval/Helices,-paso-y-retroceso.
- [10] SAGARRA R.M., *Maniobra de los Buques*. , Ediciones UPC, 1999.
- [11] WILLIAM MARTÍN CIPRIANO QUINTEROS, *Maniobrabilidad de Buques*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima (Perú), 2009.