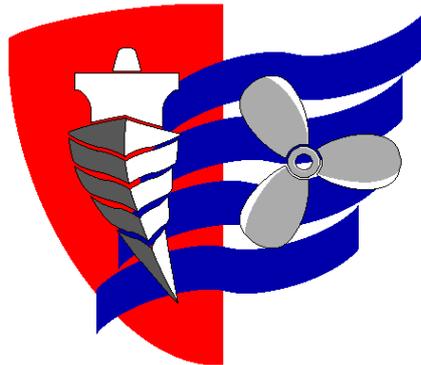


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**EFFECTOS QUE AFECTAN A LA  
MANIOBRABILIDAD DE LOS BUQUES Y  
SISTEMAS PARA COMBATIRLOS**

---

**Effects that affect the ship's manoeuvrability and  
systems to deal with them**

Para acceder al Título de Grado en  
**INGENIERÍA NÁUTICA Y TRANSPORTE  
MARÍTIMO**

Autor: Antoni Avella Torrens

Director: Francisco Vuelta Fernández

Junio - 2024

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

*Trabajo Fin de Grado*

**EFFECTOS QUE AFECTAN A LA  
MANIOBRABILIDAD DE LOS BUQUES Y  
SISTEMAS PARA COMBATIRLOS**

---

**Effects that affect the ship's manoeuvrability and  
systems to deal with them**

Para acceder al Título de Grado en  
**INGENIERÍA NÁUTICA Y TRANSPORTE  
MARÍTIMO**

Junio - 2024



## **Anexo V: AVISO DE RESPONSABILIDAD**

### **AVISO DE RESPONSABILIDAD:**

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

## **Resumen**

Este documento titulado “Efectos que afectan a la maniobrabilidad de los buques y sistemas para combatirlos”, es un Trabajo de Final de Grado que estudia algunos de los efectos que influyen en la maniobrabilidad del buque y, los sistemas de propulsión y gobierno de que dispone un barco para combatirlos y aportar mayor capacidad de maniobra al buque en cuestión.

Gracias a la ayuda de la publicación “ROM 3.1-99” se presentan las fórmulas necesarias para calcular los efectos de la corriente y del viento sobre un buque. Además, utilizando de ejemplo el M/T Monte Udala, se han realizado los cálculos explicados de manera que, acompañados de una serie de gráficos de realización propia, se puedan comprender mejor estos efectos.

Por otra parte, se han explicado los distintos tipos de propulsión y de sistemas de gobierno más comunes en la actualidad, junto a sus ventajas y sus efectos sobre el buque. Finalmente se ha definido y analizado como afecta la acción del propulsor y timón juntos en diferentes situaciones de arrancada, máquina y metida de timón.

## **Palabras clave**

Maniobrabilidad, corriente, viento, propulsor, sistema de gobierno

## **Abstract**

The present document entitled “Effects that affect the ship’s manoeuvrability and systems to deal with them”, is a Final Degree Project that studies some of the effects that influence the ship’s manoeuvrability and the propulsion and steering systems that the ship employs to deal with them and enhance its manoeuvrability.

Thanks to the help of the publication “ROM 3.1-99” are presented the necessary formulae to calculate the current and wind effects acting on the vessel. Moreover, using as an example the M/T Monte Udala, have been calculated the results of the explained calculations in order to, with the help of self-created graphs, these effect can be understood in an easier way.

Furthermore, the most common types of propeller and steering systems have been elucidated with each advantages and their impact on the ship. Finally, the combined effects of the rudder and propeller have been defined and analysed in different conditions of speed, engine and rudder’s angle.

## **Key words**

Manoeuvrability, current, wind, propeller, steering system

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>12</b>
1.1. Historia del buque . . . . .	13
1.2. Objetivos . . . . .	17
1.3. Metodología . . . . .	18
<b>2. Desarrollo</b>	<b>20</b>
2.1. Efecto de la corriente sobre la obra viva del buque . . . . .	22
2.1.1. Fuerza resultante de las presiones de la corriente sobre el buque . . . . .	25
2.1.2. Momento resultante causado por la corriente . . . . .	29
2.1.3. Fuerzas de fricción de la corriente sobre el buque . . . . .	30
2.2. Cálculos de las fuerzas y el momento que ejerce la corriente sobre un buque . . . . .	33
2.2.1. Cálculo de la fuerza resultante de las presiones de la corriente . . . . .	33
2.2.2. Cálculo del momento resultante causado por la corriente . . . . .	45
2.2.3. Cálculo de las fuerzas de fricción de la corriente sobre el buque . . . . .	47
2.3. Efecto del viento sobre la obra muerta de un buque . . . . .	53
2.3.1. Centro de giro . . . . .	54
2.3.2. Fuerza resultante de las presiones del viento sobre el buque . . . . .	59
2.3.3. Momento resultante causado por el viento . . . . .	62
2.4. Cálculos de las fuerzas y momentos que ejerce el viento sobre un buque . . . . .	65
2.4.1. Cálculo de la fuerza resultante de las presiones del viento . . . . .	65
2.4.2. Cálculo del momento resultante causado por el viento . . . . .	77
2.5. Hélices . . . . .	80
2.5.1. Conceptos generales de las hélices . . . . .	80
2.5.2. Hélices convencionales . . . . .	83

2.5.3.	Hélice de paso controlable . . . . .	87
2.5.4.	Hélices con tobera . . . . .	89
2.5.5.	Hélices azimutales . . . . .	91
2.5.6.	Hélices cicloidales . . . . .	95
2.5.7.	Water Jets . . . . .	97
2.5.8.	Hélices de proa y de popa para ayudar en las maniobras	101
2.5.9.	Efectos de la acción de la hélice . . . . .	103
2.6.	Timones . . . . .	111
2.6.1.	Conceptos generales de los timones . . . . .	111
2.6.2.	Clasificación de los timones según el montaje . . . . .	113
2.6.3.	Clasificación de los timones según su distribución . . . . .	114
2.6.4.	Timones especiales . . . . .	116
2.6.5.	Efectos causados por la acción del timón . . . . .	119
2.6.6.	Efectos del timón y la hélice juntos . . . . .	126

**3. Conclusiones 132**

## Índice de figuras

1.1. Balsa hecha de cañas usada por una tribu africana. . . . .	14
1.2. Barco egicio impulsado por vela y remos . . . . .	15
2.1. Obra viva y obra muerta de una embarcación. . . . .	23
2.2. Efecto de la corriente aparente sobre el casco de un buque . . .	23
2.3. Círculo de borneo . . . . .	25
2.4. Esfuerzos resultantes de las presiones de la corriente sobre un buque . . . . .	26
2.5. Valor del factor $C_{CT}$ . . . . .	27
2.6. Esfuerzos resultantes de las fuerzas de fricción de la corriente sobre un buque. . . . .	30
2.7. Resultado de $R_{CP}$ con 0,5 nudos de velocidad de corriente relativa	35
2.8. Resultado de $R_{CP}$ con 1 nudo de velocidad de corriente relativa	38
2.9. Resultado de $R_{CP}$ con 1,5 nudos de velocidad de corriente relativa	38
2.10. Resultado de $R_{CP}$ con 2 nudos de velocidad de corriente relativa	39
2.11. Resultado de $R_{CP}$ con 3 nudos de velocidad de corriente relativa	39
2.12. Resultado de $F_{LCP}$ con 1 nudo de velocidad de corriente relativa	43
2.13. Resultado de $F_{LCP}$ entre $\alpha_{cr} = 0^\circ$ y $\alpha_{cr} = 90^\circ$ . . . . .	44
2.14. Resultado de $F_{TCP}$ con 1 nudo de velocidad de corriente relativa	44
2.15. Resultado de $M_{TC}$ con 1 nudo de velocidad de corriente relativa	46
2.16. Resultado de $F_{TCF}$ con 1 nudo de velocidad de corriente relativa	49
2.17. Resultado de $F_{LCF}$ con 1 nudo de velocidad de corriente relativa	49
2.18. Resultado de $F_{TCTotal}$ con 1 nudo de velocidad de corriente relativa	51
2.19. Resultado de $F_{LCTotal}$ con 1 nudo de velocidad de corriente relativa	52
2.20. M/T Monte Udala . . . . .	54
2.21. Centro de giro del buque sin arrancada. . . . .	55
2.22. Centro de giro del buque con arrancada avante. . . . .	55
2.23. Centro de giro del buque con arrancada atrás. . . . .	56
2.24. Efecto del viento aparente sobre un buque . . . . .	56
2.25. Esfuerzos resultantes de las presiones del viento sobre un buque	59

2.26. Resultado de $R_{VP}$ con 1 nudo de velocidad de viento relativo . . .	66
2.27. Resultado de $R_{VP}$ con 10 nudos de velocidad de viento relativo .	69
2.28. Resultado de $R_{VP}$ con 20 nudos de velocidad de viento relativo .	69
2.29. Resultado de $R_{VP}$ con 30 nudos de velocidad de viento relativo .	70
2.30. Resultado de $R_{VP}$ con 40 nudos de velocidad de viento relativo .	70
2.31. Resultado de $F_{LVP}$ y $F_{TVP}$ con 10 nudos de velocidad de viento relativo . . . . .	76
2.32. Resultado de $F_{LVP}$ y $F_{TVP}$ entre $\alpha_{vr} = 0^\circ$ y $\alpha_{vr} = 90^\circ$ . . . . .	76
2.33. Resultados de $M_{TV}$ con 10 nudos de velocidad de viento relativo	79
2.34. Partes del sistema propulsor general de un buque . . . . .	81
2.35. Partes de una hélice . . . . .	83
2.36. Hélices de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 palas . . . . .	84
2.37. Hélices de aluminio, bronce, acero inoxidable y carbono . . . . .	85
2.38. Hélices de paso fijo . . . . .	86
2.39. Hélices de paso variable del buque hospital Esperanza del Mar .	87
2.40. Hélice de paso controlable del buque hospital Juan de la Cosa .	88
2.41. Hélice de paso controlable de la marca Kongsberg . . . . .	89
2.42. Esquema de hélice fija con tobera giratoria . . . . .	91
2.43. Hélice con tobera giratorias de proa del buque hospital Juan de la Cosa . . . . .	92
2.44. Sistema propulsor del buque hospital Juan de la Cosa . . . . .	93
2.45. Sistema Azipod de la empresa ABB Industry Oy . . . . .	94
2.46. Hélice cicloidal . . . . .	95
2.47. Hélice de Kirsten-Boeing . . . . .	96
2.48. Hélice de Voith-Schneider . . . . .	97
2.49. Partes de un Water Jet . . . . .	98
2.50. Esquema básico de un Water Jet . . . . .	98
2.51. Funcionamiento de la cuchara de un water jet . . . . .	100
2.52. Disposición del túnel antisucción y las hélices de proa de túnel .	102
2.53. Hélice de proa del B/H Juan de la Cosa . . . . .	103
2.54. Plano del la hélice retráctil de proa del B/H Juan de la Cosa . . .	104

2.55. Fuerzas ejercidas por cada pala . . . . .	105
2.56. Vista en planta de las fuerzas de cada pala . . . . .	106
2.57. Simulación de las presiones ejercidas sobre la popa estribor . . .	108
2.58. Simulación de las presiones ejercidas sobre la popa babor . . .	109
2.59. Simulación de las presiones ejercidas sobre la proa estribor . . .	110
2.60. Simulación de las presiones ejercidas sobre la proa babor . . . .	110
2.61. Partes generales de un timón . . . . .	111
2.62. Timón soportado . . . . .	113
2.63. Timón semisuspendido . . . . .	114
2.64. Timón colgante . . . . .	114
2.65. Timón sin compensar . . . . .	115
2.66. Timón semicompensado . . . . .	115
2.67. Timón compensado . . . . .	116
2.68. Timón Schiling . . . . .	116
2.69. Timón Becker . . . . .	118
2.70. Timón Becker del B/H Esperanza del Mar . . . . .	119
2.71. Fuerza resultante que actúa sobre el timón . . . . .	121
2.72. Fuerza normal sobre el timón . . . . .	122
2.73. Momento evolutivo . . . . .	124
2.74. Resultado del momento evolutivo que ejercería el timón desde a la vía hasta en perpendicular a la línea de crujía . . . . .	125
2.75. Resultado del momento evolutivo entre 35° y 37° de metida de timón . . . . .	126
2.76. Respuesta del buque sin arrancada con máquina avante . . . . .	127
2.77. Respuesta del buque sin arrancada con máquina atrás . . . . .	128
2.78. Respuesta del buque con arrancada avante con máquina avante	129
2.79. Respuesta del buque con arrancada avante con máquina atrás .	130
2.80. Respuesta del buque con arrancada atrás con máquina avante .	130

## Índice de cuadros

2.1. Valores de $R_{CP}$ con corriente relativa de 0,5 nudos . . . . .	35
2.2. Valores de $R_{CP}$ para una corriente relativa de 1 nudo . . . . .	37
2.3. Valores de $F_{LCP}$ para una corriente relativa de 1 nudo . . . . .	42
2.4. Valores de $F_{TCP}$ para una corriente relativa de 1 nudo . . . . .	45
2.5. Valores de $M_{TC}$ para una corriente de 1 nudo . . . . .	46
2.6. Valores de $F_{TCF}$ para una corriente relativa de 1 nudo . . . . .	48
2.7. Valores de $F_{LCF}$ para una corriente relativa de 1 nudo . . . . .	50
2.8. Valores de $K_{ev}$ para buques con la superestructura centrada . . .	63
2.9. Valores de $K_{ev}$ para buques con la superestructura a proa . . . .	64
2.10. Valores de $K_{ev}$ para buques con la superestructura a popa . . . .	64
2.11. Valores de $R_{VP}$ con viento relativo de 1 nudo . . . . .	67
2.12. Valores de $R_{VP}$ con viento relativo de 10 nudos . . . . .	68
2.13. Valores de $F_{LVP}$ para un viento relativo de 10 nudos . . . . .	74
2.14. Valores de $F_{TVP}$ para un viento relativo de 10 nudos . . . . .	75
2.15. Valores de $M_{TV}$ para un calado en lastre de 8 metros y un viento relativo de 10 nudos . . . . .	78
2.16. Valores de $M_{TV}$ para un calado en plena carga de 17 metros y un viento relativo de 10 nudos . . . . .	78

# 1. Introducción

Mediante la elaboración de este trabajo llamado “Efectos que afectan a la maniobrabilidad de los buques y sistemas para combatirlos”, se quiere dar a conocer los efectos que afectan a la maniobrabilidad de un buque ya sea dentro de un puerto, en un estrecho o en mar abierta. Para ello, en el caso de realizar los cálculos pertinentes sobre los efectos a estudiar, se usarán las características del buque petrolero “Monte Udala”. Dicho petrolero es un suezmax propiedad del Grupo Ibaizabal, fletado por la compañía Cepsa.

Se entiende como maniobrabilidad, aquella habilidad que tiene un buque y sus controles ya sean humanos, electrónicos o mecánicos, para controlar su movimiento. En este trabajo nos centraremos en el aspecto mecánico y en algunos efectos externos al buque que afectan directamente a la maniobrabilidad del mismo.

Durante 4 meses del verano de 2022, estuve embarcado en el anteriormente citado M/T Monte Udala, realizando parte de las prácticas de alumno de puente requeridas para obtener el título de Oficial de segunda de la Marina Mercante. Además, durante 2 meses he estado embarcado como alumno de puente a bordo del B/H Juan de la Cosa. Por ello, gracias a los datos y documentos recogidos durante esos 6 meses de embarque, junto con mi experiencia a bordo, todos los conocimientos adquiridos durante los 4 años de carrera en la Universidad de Cantabria y otras muchas fuentes como tratados, libros y manuales, se tratará de estudiar y exponer algunos de los efectos tanto mecánicos, como meteorológicos, que afectan a la maniobrabilidad de un buque.

Los efectos que se van a analizar en este trabajo son los siguientes:

- De origen meteorológico
  - Efecto que produce el viento sobre la obra muerta.
  - Efecto que produce la corriente sobre la obra viva.
- De origen mecánico

- Efectos causados por la acción del timón.
- Efectos causados al girar la hélice.
- Efectos combinados de la acción del timón y la hélice juntos.

Sin embargo, no podemos empezar a estudiar directamente estos efectos sin conocer la historia de los actuales barcos, ya que la maniobrabilidad va de la mano de las particularidades y características de los mismos.

## 1.1. Historia del buque

Según la regla 3 de la parte A del RIPA<sup>1</sup> (Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes en la mar), se puede definir la palabra *buque* como “toda clase de embarcaciones, incluidas las embarcaciones sin desplazamiento, las naves de vuelo rasante y los hidroaviones, utilizadas o que puedan ser utilizadas como medio de transporte sobre el agua”[1]. Sin embargo, como podemos imaginar, los primeros medios de transportes no fueron un buque como actualmente conocemos. Por eso, si nos remontamos a lo que fue el primer artefacto flotante utilizado como medio de transporte, nos damos cuenta que lo primero que se utilizó fue algo tan simple como un tronco de un árbol. Aquí ya aparece el primer efecto que se va a estudiar en este trabajo: la fuerza que ejerce la corriente sobre un artefacto flotante (en nuestro caso, sobre un buque).

Poco después, al ver que se podían desplazar por ríos y canales de esa manera, dependiendo de la civilización, evolucionó de una manera o de otra. Algunos, unieron varios troncos, dando origen a un artefacto flotante que llamarían balsa. En otras civilizaciones, como es la egipcia, crearon el mismo artefacto flotante pero hecho a partir de la unión de haces de caña. Algunas civilizaciones subdesarrolladas siguen utilizando dichos artefactos para navegar distancias mínimas como se muestra en la imagen 1.1. En algunas otras civilizaciones, ahuecaron los troncos dando lugar a lo que serían las canoas o piraguas.

---

<sup>1</sup>Conocido más extensamente como COLREG (Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea), siglas que adopta dicho reglamento en la lengua inglesa.

**Figura 1.1:** Balsa hecha de cañas usada por una tribu africana.



**Fuente:** Historia National Geographic

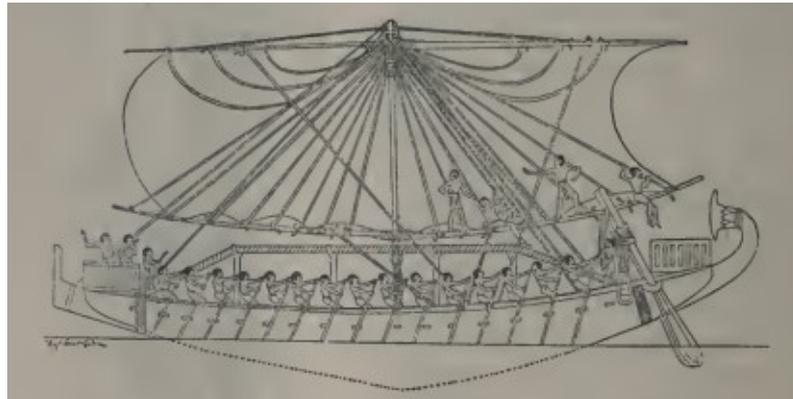
Todas estas evoluciones a distintos artefactos flotantes usados como primer medio de transporte marítimo fluvial tienen una cosa en común, el uso de remos hechos de madera y movidos por la fuerza humana para avanzar y luchar contra la fuerte fuerza que ejerce la corriente sobre dichos artefactos flotantes.

Con el paso del tiempo, fueron evolucionando y se fueron implementando nuevos elementos en los artefactos flotantes, como pueden ser las velas. De esa manera, aparecieron los actualmente conocidos como barcos. Los egipcios, a mediados del siglo III a.C., fueron los primeros en implantar este elemento hecho de papiro o lino a una embarcación, dando pie a un nuevo elemento que afectaba al barco (generalmente, ayudándolo a avanzar): el viento. Eso les permitía transportar mercancías a lo largo del río Nilo de manera mucho más fácil y rápida. Tras esta implementación, los egipcios no fueron los únicos en usar el viento para propulsar sus embarcaciones con el uso de las velas y aventurarse a la mar, un ejemplo de ello fueron los vikingos. Sin embargo, seguían siendo embarcaciones pequeñas, las cuales tenían una capacidad de maniobra bastante sencilla y reducida[2].

Por otra parte, el implemento de las velas, no substituyó el uso de los remos, sino que seguían usándose. Además, para facilitar la maniobrabilidad de la embarcación, se implementaron unos remos de cola que funcionarían como los actuales timones, permitiendo así, virar el barco de manera mucho más sencilla

y eficaz. Esto se puede observar perfectamente en la imagen 1.2 donde, a la derecha (popa del barco) se ve un remo de cola actuando como timón, a lo largo de la eslora del buque se ven marineros sentados remando y se aprecia el uso de la vela.

**Figura 1.2:** Barco egicio impulsado por vela y remos



**Fuente:** Life in Ancient Egypt and Assyria

Cabe destacar que, en ese momento, entraron en juego dos elementos básicos que van a ser objeto de estudio de este trabajo: el efecto que causa el viento sobre un barco (ya sea a vela o de propulsión mecánica por el efecto sobre la obra muerta del buque) y los efectos que causa el uso del timón.

A medida que fue pasando el tiempo, las embarcaciones empezaron a ser más grandes, lo que provocó que la capacidad de maniobra de los buques empezara a ser un problema [3]. Además al ser más grande, se requería mayor superficie velar para desplazar el buque. Por esa razón, muchos años después, en el año 1783, el marqués Claude François Dorothee de Jouffroy d'Abbans, bota el *Pyroscaphe*, el primer buque propulsado por una máquina de vapor con ruedas[4].

A partir de este buque propulsado por una máquina de vapor, llegó la revolución del sector marítimo, mejorando y perfeccionando la propulsión de los buques. De esta manera, los barcos empezaron a adaptarse a las necesidades que presentaba el sector marítimo a la hora de transportar mercancías. Eso conllevó a agrandar los buques mercantes, obligando a implementar el uso de las hélices convencionales que conocemos hoy en día. Esto obligó estudiar los

efectos causados sobre el buque debido al giro de la hélice. Dicho efecto va a ser otro objeto de estudio del presente proyecto.

## 1.2. Objetivos

Objetivo principal del proyecto:

- Definir y analizar aquellos elementos y efectos que influyen sobre la maniobrabilidad de un buque.

Objetivos específicos del proyecto:

- Definir el efecto de la corriente marina sobre la obra viva del buque y determinar las fórmulas para cuantificar dicho efecto.
- Realizar y analizar los cálculos y resultados del efecto de la corriente marina sobre el buque.
- Establecer como afecta el viento sobre la obra muerta del buque y determinar las fórmulas para cuantificar dicho efecto.
- Realizar y analizar los cálculos y resultados del efecto del viento sobre el buque.
- Detallar y comparar los tipos de hélices usados en los buques y su actuación sobre el buque.
- Presentar y analizar los tipos de timones usados en los buques y su actuación sobre el buque.
- Estudiar la respuesta de la acción del timón y la hélice juntos.

### 1.3. Metodología

Para conseguir los objetivos planteados en el subapartado anterior, me he basado en los siguientes puntos:

- Conocimientos adquiridos durante los períodos de embarque de 4 meses a bordo del petrolero M/T Monte Udala y 2 meses a bordo del buque hospital B/H Juan de la Cosa, gracias a todos los oficiales, marineros y sobre todo, capitanes y jefes de máquina de ambos buques.
- Conocimientos adquiridos en el M/T Monte Udala sobre un propulsor con una hélice y un timón compensado convencionales y en el B/H Juan de la Cosa sobre los propulsores azimutales con hélices de paso controlable y hélice de proa retráctil.
- Conocimientos adquiridos a lo largo de los 4 cursos de Ingeniería Náutica y Transporte Marítimo. En concreto, para este trabajo, las asignaturas de “Maniobra”(como base para realizar este proyecto), “Meteorología Náutica y Oceanografía”(como ayuda para comprender los fenómenos meteorológicos explicados en este trabajo) y “Habilidades, Valores y Competencias Transversales”(la parte de “LaTex”, ya que este documento se ha realizado, exceptuando las 3 primeras páginas, íntegramente con “LaTex”).
- Búsqueda bibliográfica llevada a cabo durante el proceso de elaboración de este proyecto.
- Elaboración propia de todos los cálculos presentes en este proyecto mediante hojas de cálculo del programa Excel.
- Elaboración propia de todos los gráficos presentes en este proyecto mediante hojas de cálculo del programa Excel.
- Uso extenso de la publicación ROM 3.1-99.

Finalmente, cabe destacar que se ha pedido permiso al oficial del B/H Juan de la Cosa, autor mencionado en la fuente de algunas fotografías, para usarlas

en este proyecto. Además, también se ha pedido permiso a los dos capitanes con plaza fija del B/H Juan de la Cosa para utilizar planos de dicho buque como fuente de información y parte de la bibliografía utilizada en este proyecto.

## 2. Desarrollo

La maniobra en el ámbito marítimo se puede definir como “arte que enseña a dar a las embarcaciones todos sus movimientos por medio de un timón, de velas o de cualquier otro agente”<sup>2</sup>. De esta manera, podemos decir que la maniobrabilidad de un buque es la capacidad que, gracias a todos los aparejos y medios, como timón y hélice entre otros, presenta y ofrece un buque o embarcación. Esta característica recibe gran importancia cuando se trata de un buque o embarcación navegando en una zona de peligro debido a varias situaciones. A grandes rasgos, dichas situaciones son las siguientes:

- Navegación por canales angostos.
- Navegación en aguas someras.
- Navegación con tráfico en las proximidades del buque en cuestión.
- Navegación en aguas portuarias o proximidades de las mismas.
- Necesidad de realizar una maniobra de emergencia.

Sin embargo, cabe destacar que, al ser un buque un cuerpo flotante que circula entre dos medios distintos (agua y aire), tenemos que tener en cuenta otros efectos que van a perturbar más o menos, dependiendo del tipo de buque y sus particularidades, la maniobrabilidad del mismo. Estos efectos, de manera general, son los que se han ido comentando en la introducción:

- Efecto de la corriente sobre la obra viva del buque.
- Efecto del viento sobre la obra muerta del buque.
- Efecto del oleaje.
- Efecto de navegación en aguas someras.

---

<sup>2</sup>Definición de la RAE que más se adapta a este proyecto.

Al ser la maniobrabilidad de un buque, tan importante, ha sido siempre un ámbito muy estudiado. Gracias a ello, tenemos muchos tratados y estudios que facilitan la comprensión de los nombrados efectos que afectan a la maniobrabilidad. Además, ayudan a mejorar los sistemas de los que dispone un buque para hacer frente a dichos efectos y así facilitar y permitir maniobrar de forma más segura.

Los dos sistemas en los que nos vamos a centrar en este proyecto son:

- Sistema de gobierno.
- Sistema de propulsión.

El documento que se coge de referencia y, que se usará como base para realizar el desarrollo de este proyecto y la mayoría de cálculos de dicho apartado, es obra de Puertos del Estado, titulado *Recomendaciones para Obras Marítimas*, conocido como ROM. En concreto, es de especial interés para este proyecto el ROM 3.1-99 *Proyectos de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación*. Además, otro que también nos puede ser de interés es el ROM 2.0-11, titulado *Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre*.

Al considerar estos documentos tan importantes para este proyecto, el desarrollo contará de dos partes. Una primera parte dedicada a la explicación de los efectos que pueden afectar a la maniobrabilidad de un buque, junto con la presentación de una serie de fórmulas para cuantificar dichos efectos (generalmente sacadas del citado ROM). Además, se explicarán la naturaleza de dichos efectos y alternativas que existen para combatirlos, como pueden ser distintos tipos de sistemas de gobierno o de propulsión.

La segunda parte consistirá en una serie de cálculos realizados personalmente con el fin de cuantificar dichos efectos (todos ellos siguiendo al apartado de teoría correspondiente). Además, se realizarán unos gráficos de cada uno de los efectos descritos en la primera parte con el fin de apoyar a los cálculos para una mayor claridad a la hora de entenderlo.

## **2.1. Efecto de la corriente sobre la obra viva del buque**

Lo primero que se debe tener claro, son dos conceptos: el concepto de corriente marina y el concepto de obra viva.

Las corrientes marinas pueden verse creadas y afectadas por diversas causas, como puede ser el viento continuado en superficie, o cambios del gradiente de presión en el interior del océano. Este cambio del gradiente de presión, puede ser debido a un cambio de salinidad, temperatura o densidad del agua [5]. Sin embargo, en nuestra situación de estudio, no nos interesa como se comportan las corrientes en medio del océano, sino que las corrientes en las que vamos a centrarnos son aquellas causadas por las mareas, sobre todo en puertos o canales. Cuando la marea está subiendo, nos encontramos en que tenemos una corriente en dirección hacia la tierra. En cambio, cuando la marea está bajando, nos encontramos con que la corriente es de sentido contrario. Sin embargo, cabe destacar que las corrientes en un puerto o canal pueden verse afectadas por la disposición del fondo marino. De igual manera, si tenemos una desembocadura de un río dentro del puerto, en las proximidades de la misma, nos encontraremos con una corriente.

Sin embargo, no nos interesa tanto el como se crea una corriente, sino que nos vamos a centrar en como afecta dicha corriente a nuestro buque. Para ello, cabe destacar que ésta, solamente afecta a la obra viva del buque [6].

La obra viva, tal y como se muestra en la imagen 2.1, es la parte sumergida de la embarcación. Dicho de otra manera, la obra viva de una embarcación es la parte que está por debajo de la línea de flotación. Por esto, al estar simplemente esta parte en contacto con el agua, la corriente marina afectará solamente a esta parte. Por esto mismo, dependerá de la forma únicamente de ésta, que la corriente influya más o menos, de una manera o de otra, sobre el comportamiento del buque.

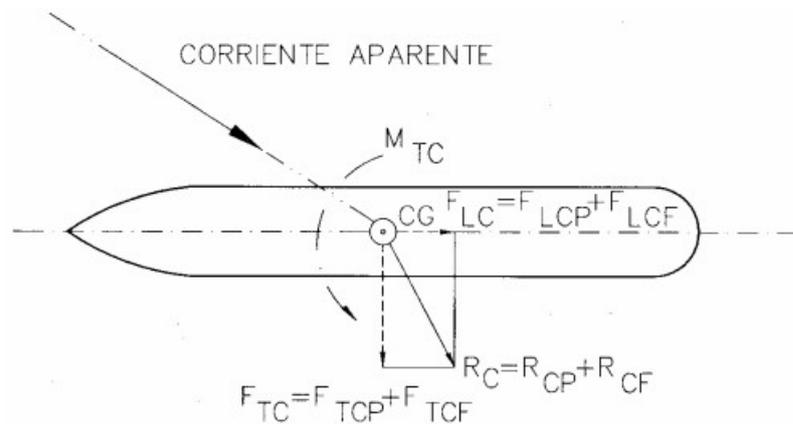
**Figura 2.1:** Obra viva y obra muerta de una embarcación.



**Fuente:** Oceánica Náutica

Para explicar como afecta la corriente al buque vamos a hacer uso de la imagen 2.2. Esta imagen representa de manera muy general como actúa la corriente sobre el casco del buque.

**Figura 2.2:** Efecto de la corriente aparente sobre el casco de un buque



**Fuente:** ROM 3.1-99

Como vemos, una corriente aparente o relativa al buque, incide sobre el casco, dando como resultado una fuerza horizontal  $R_C$ . Lo más común es que dicha fuerza no actúe sobre el centro de gravedad del buque. De esta manera, si descomponemos la fuerza  $R_C$  obtenemos lo siguiente:

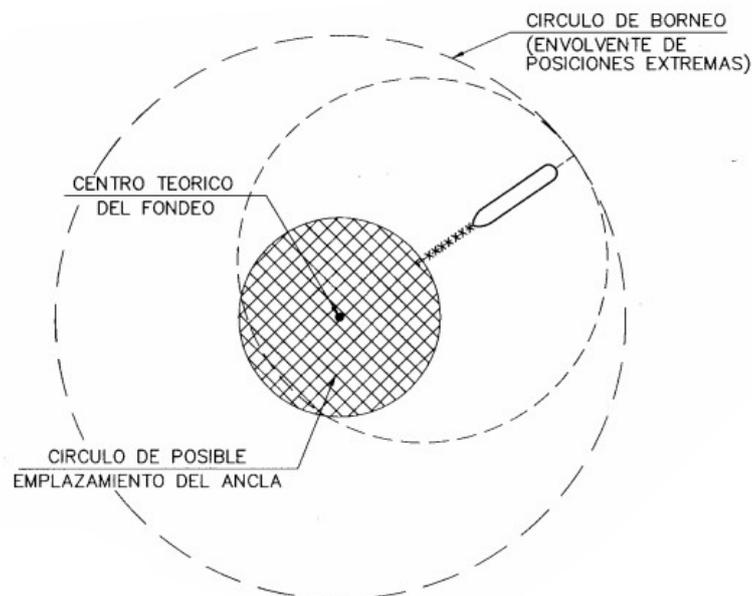
- Una fuerza  $F_{LC}$  longitudinal al casco del buque y horizontal, creada a partir de la suma de las fuerzas producidas por la presión ( $F_{LCP}$ ) y la producida por la fricción ( $F_{LCF}$ ).

- Una fuerza  $F_{TC}$  transversal al casco del buque y horizontal, creada a partir de la suma de las fuerzas producidas por la presión ( $F_{TCP}$ ) y la producida por la fricción ( $F_{TCF}$ ).
- Un momento  $M_{TC}$  causado porque las fuerzas producidas por la presión están desplazadas respecto al centro de gravedad. En el caso de que estas fuerzas se ejerzan sobre el punto de gravedad del buque, este momento desaparece.

Una vez definidas las fuerzas que actúan sobre el casco del buque en el plano horizontal, debemos destacar algunas situaciones. Dichas situaciones son muy sencillas:

- Buque a la deriva afectado por una corriente continua y uniforme: En este caso, el buque adoptará un rumbo y velocidad igual al que lleva la corriente a la que está sometida.
- Buque en navegación por una zona con una corriente continua y uniforme: En este caso, se tendrá que tomar en consideración el efecto de la corriente (en apartados posteriores se cuantificará este efecto), utilizando así los elementos de maniobra del que dispone el buque para combatir este efecto y seguir un rumbo deseado.
- Buque amarrado: En este caso, toda la fuerza que actúa sobre el buque se verá absorbida por las amarras y defensas[7].
- Buque fondeado: En este caso, la fuerza que actúa sobre el buque, aplicada o no sobre el centro de gravedad del mismo, va a provocar que el buque bornee alrededor del punto real de fondeo. Para entender esto, fijémonos en la imagen 2.3, donde se describen las posibles trayectorias que va a seguir el buque una vez fondeado y sometido a una corriente. Además, cabe destacar que el buque tenderá a poner proa a la corriente gracias a los finos del casco[8].

**Figura 2.3:** Círculo de borneo



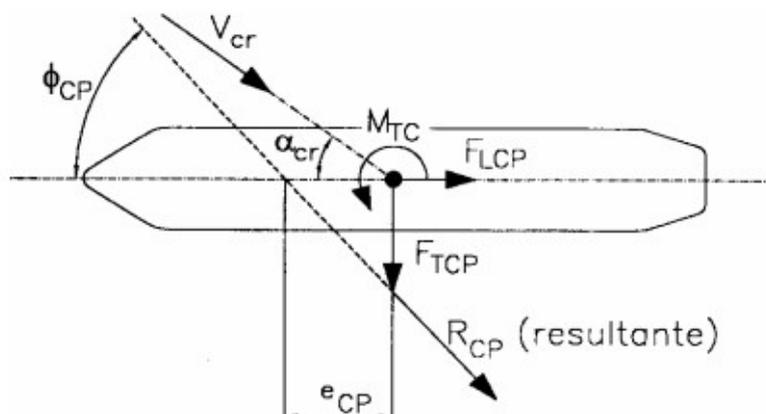
**Fuente:** ROM 3.1-99

A pesar de estas distintas situaciones, en este proyecto nos vamos a centrar en la primera y en la segunda. Para ello, se va a tomar, como se ha comentado en la introducción de este proyecto, al petrolero "M/T Monte Udala" como buque referencia para realizar el estudio, siempre suponiendo el buque parado respecto al fondo para simplificar los cálculos a no ser que se especifique lo contrario. De esta manera, la corriente real y la corriente aparente o relativa al buque, van a ser la misma.

### **2.1.1. Fuerza resultante de las presiones de la corriente sobre el buque**

Para calcular la fuerza ejercida por la corriente sobre el buque se va a usar la fórmula 2.1, la cual se ha sacado del ROM 3.1-99. Además, para comprender de donde se sacan los elementos de la fórmula y comprenderla mejor (al igual que para comprender de forma más sencilla las fórmulas posteriores), nos apoyaremos en la imagen 2.4.

**Figura 2.4:** Esfuerzos resultantes de las presiones de la corriente sobre un buque



**Fuente:** ROM 3.1-99

$$R_{CP} = \frac{\gamma_w}{2g} \cdot V_{cr}^2 \cdot \frac{C_{CL} \cdot A_{TC} \cdot \cos^2 \alpha_{cr} + C_{CT} \cdot A_{LC} \cdot \sin^2 \alpha_{cr}}{\cos(\phi_{CP} - \alpha_{cr})} \quad (2.1)$$

Donde:

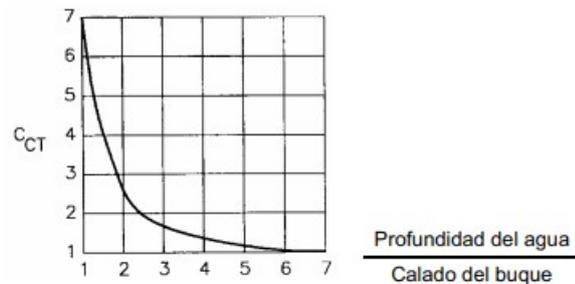
- $R_{CP}$  es la fuerza resultante de la acción de las presiones de la corriente marina sobre el buque.
- $\gamma_w$  es el peso específico del agua<sup>3</sup>.
- $g$  es la aceleración de la gravedad<sup>4</sup>.
- $V_{cr}$  es la velocidad relativa horizontal de la corriente referida al buque. Para su determinación se calculará la suma vectorial de la velocidad absoluta de la corriente (explicada en el siguiente punto) y la velocidad del buque. Cabe destacar que esta velocidad debe estar en m/s.
- $V_c$  es la velocidad absoluta horizontal de la corriente. Se toma de referencia la velocidad media de la corriente medida durante 1 minuto a una altura del 50 % del calado. Cabe destacar que esta velocidad debe estar en m/s.

<sup>3</sup>Consideraremos el peso específico del agua  $1,03t/m^3$  en agua salada y  $1,00t/m^3$  en agua dulce.

<sup>4</sup>Tomándose el valor de  $g = 9,81m/s^2$  como referencia.

- $C_{CL}$  ó  $C_{CT}$  son unos factores adimensionales para el cálculo de la resultante de las presiones de la corriente sobre el casco de un buque cuando la corriente actúa en dirección del eje longitudinal<sup>5</sup> o del eje transversal del buque respectivamente.
  - $C_{CL}$ : Este factor depende básicamente de la forma de la proa del buque, pudiendo variar entre 0,2 y 0,6. Si no se tiene un valor más preciso, como se establece en el ROM 3.1-99 "se adoptará el valor 0,2 para proa de bulbo y el valor 0,6 para proa convencional".
  - $C_{CT}$ : Este factor depende de la relación entre la profundidad del agua entre el calado del buque proyectado. Este factor puede variar entre 1,00 y 7,00, dándose el primer caso cuando se navega en aguas profundas y el segundo caso cuando  $\frac{\text{Profundidad del agua}}{\text{Calado del buque}} = 1,00$ . Para ello, disponemos de la siguiente gráfica, independientemente de la forma del buque y la dirección de la corriente respecto al buque.

**Figura 2.5:** Valor del factor  $C_{CT}$



**Fuente:** ROM 3.1-99

- $A_{TC}$  es el área transversal del buque sumergida sometida al efecto de la corriente. Para calcularla, en el caso de que no se tengan los datos exactos, se puede aproximar con la siguiente fórmula:

$$A_{TC} = B \cdot D$$

<sup>5</sup>Considerado el eje de proa a popa.

Siendo  $B$  la manga y  $D$ , el calado del buque.

- $A_{LC}$  es el área longitudinal del buque sumergida sometida al efecto de la corriente. De igual manera que en el área anterior, en el caso de que no se tengan los datos exactos, se puede aproximar con la siguiente fórmula:

$$A_{LC} = L_{PP} \cdot D$$

Siendo  $L_{PP}$  la eslora entre perpendiculares del buque.

- $\alpha_{cr}$  es el ángulo comprendido entre el eje longitudinal del buque y la dirección de donde viene la corriente relativa, es decir, la dirección de actuación de la corriente relativa, medido siempre en grados.
- $\phi_{CP}$  es el ángulo comprendido entre la dirección de la resultante de presiones de corriente y el eje longitudinal del buque, siempre medido en grados. Para calcular ese ángulo se usará la siguiente fórmula, de la cual ya se saben como sacar todos los datos:

$$\tan(\phi_{CP}) = \frac{A_{LC}}{A_{TC}} \cdot \tan(\alpha_{cr})$$

Por otra parte, para calcular las componentes en el eje transversal y en el eje longitudinal de la fuerza resultante  $R_{CP}$ , se usan las fórmulas 2.2 y 2.3.

$$F_{LCP} = R_{CP} \cdot \cos(\phi_{CP}) \quad (2.2)$$

$$F_{TCP} = R_{CP} \cdot \sin(\phi_{CP}) \quad (2.3)$$

Donde:

- $F_{LCP}$  es la componente longitudinal de la fuerza de la acción de las presiones. Dicha fuerza se considera hecha sobre un punto  $t$ , el cual no tiene porqué coincidir con el centro de gravedad del buque.
- $F_{TCP}$  es la componente transversal de la fuerza de la acción de las presiones. Dicha fuerza se considera hecha sobre el punto  $t$ .

### 2.1.2. Momento resultante causado por la corriente

La aplicación de la corriente, como hemos comentado, no tiene porqué ser sobre el centro de gravedad del buque. Eso va a crear un momento creado debido a la excentricidad del punto de aplicación  $t$  respecto del centro de gravedad.

Para calcular este momento se debe usar la fórmula 2.4.

$$M_{TC} = F_{TCP} \cdot e_{cp} = F_{TCP} \cdot K_{ec} \cdot L \quad (2.4)$$

Donde:

- $M_{TC}$  es el momento resultante aplicado sobre un eje vertical, el cual pasa por el centro de gravedad del buque<sup>6</sup>. Este momento va a estar medido en t.m.
- $e_{cp}$  es la excentricidad de la fuerza resultante de las presiones de la corriente respecto del centro de gravedad del buque. Esta distancia estará medida siempre en el eje longitudinal del buque. Además, considerando un momento resultante positivo aquel que tiene el mismo sentido que el que aparece en la figura 2.4, es decir, aquel que visto desde arriba va en sentido antihorario, se tomará:
  - $e_{cp} > 0$  aquella excentricidad que se produzca más a proa que el centro de gravedad del buque.
  - $e_{cp} < 0$  aquella excentricidad que se produzca más a popa que el centro de gravedad del buque.

Este parámetro deberá estar medido en metros.

- $K_{ec}$  es el coeficiente de excentricidad. En el caso de no disponer de los datos precisos, se podrá aproximar según la siguiente tabla:

---

<sup>6</sup>Esto significa que la acción de la corriente sobre el casco va a provocar un cambio de rumbo del buque, pivotando sobre ese eje vertical que pasa por el centro de gravedad del buque.

$\alpha_{cr}$ (en °)	$K_{ec}$
0	0
30	0,17
60	0,09
90	0
120	-0,09
150	-0,17
180	0

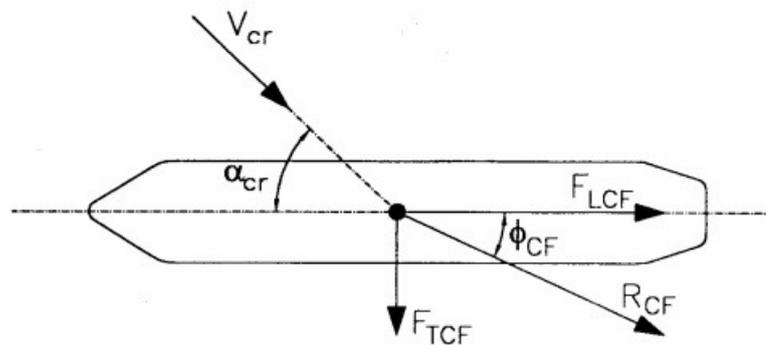
**Fuente:** ROM 3.1-99

- $L$  es la eslora del buque medida siempre en metros.

### 2.1.3. Fuerzas de fricción de la corriente sobre el buque

Además de la fuerza resultante de las presiones de la corriente a la que está sometida un buque, la fuerza de fricción es otra fuerza a tener en cuenta. Para calcular dichas fuerzas de fricción se van a usar las fórmulas 2.5 y 2.6, las cuales, al igual que en el caso anterior, se han obtenido del ROM 3.1-99. Además, de la misma manera que con el caso de la fuerza resultante de las presiones, nos apoyaremos en la imagen 2.6, para comprender mejor el concepto.

**Figura 2.6:** Esfuerzos resultantes de las fuerzas de fricción de la corriente sobre un buque.



**Fuente:**ROM 3.1-99

$$F_{TCF} = \frac{\gamma_w}{2g} \cdot C_r \cdot V_{cr}^2 \cdot A_{TCF} \cdot \text{sen}^2 \alpha_{cr} \quad (2.5)$$

$$F_{LCF} = \frac{\gamma_w}{2g} \cdot C_r \cdot V_{cr}^2 \cdot A_{LCF} \cdot \text{cos}^2 \alpha_{cr} \quad (2.6)$$

Donde:

- $F_{TCF}$  es la componente transversal de la fuerza debida a la fricción.
- $F_{LCF}$  es la componente longitudinal de la fuerza debida a la fricción.
- $C_r$  es el coeficiente de rozamiento del casco del buque. Este coeficiente va a ser variable, dependiendo de la limpieza y estado del casco. Para ello, como no se puede obtener un coeficiente de rozamiento exacto en cada instante, éste variará entre 0,001 y 0,004. Óbviamente, el primer caso se usará para buques nuevos (en proyectos de astillero) y el segundo se usará para buques en servicio. Dicho coeficiente va a ser siempre adimensional.
- $A_{TCF}$  es la superficie del buque mojada transversalmente a la línea de crujía. Esta superficie se va a medir en  $m^2$ . En el caso de no disponer de datos exactos para este elemento, se puede aproximar usando la siguiente fórmula:

$$A_{TCF} = (L_{PP} + 2D) \cdot B$$

- $A_{LCF}$  es la superficie del buque mojada longitudinalmente a la línea de crujía. Esta superficie se va a medir en  $m^2$ . De igual manera que en el caso anterior, en la situación de no disponer superficie exacta, se aproximará usando la siguiente fórmula:

$$A_{LCF} = (B + 2D) \cdot L_{PP}$$

Por otra parte, una vez calculadas las dos componentes de la fuerza de fricción resultante, debemos calcular el ángulo de dicha resultante para tener toda la

información necesaria. Para ello se usará la fórmula 2.7.

$$tg(\phi_{CF}) = \frac{A_{TCF}}{A_{LCF}} \cdot tg^2 \alpha_{cr} \quad (2.7)$$

Donde:

- $\phi_{CF}$  es el ángulo comprendido entre el eje longitudinal del buque y la dirección de la fuerza resultante de fricción. Dicho ángulo deberá estar medido siempre en grados.

Cabe destacar que todos los elementos de este apartado, que coinciden con alguno citado y descrito anteriormente, significa lo mismo.

## **2.2. Cálculos de las fuerzas y el momento que ejerce la corriente sobre un buque**

Tras haber explicado teóricamente como afecta la corriente sobre la obra viva de un buque, que fuerzas y momentos se ejercen sobre el casco y como se calculan dichas fuerzas y momentos, se han realizado todos los cálculos pertinentes.

Dichos cálculos se han llevado a cabo con el fin de que, junto a una serie de diagramas que facilitan la comprensión de los resultados, una persona, tras interpretar los resultados expuestos en este apartado, sea consciente de cuanto afecta una corriente de una cierta velocidad sobre un buque de unas determinadas dimensiones. En este caso, como se comenta al principio de todo del trabajo, se han tomado las características del petrolero suezmax M/T Monte Udala casi a plena carga, que, para simplificar al máximo los cálculos, se ha considerado la obra viva con bulbo pero sin finos, es decir, un paralelepípedo rectangular con bulbo. Además, se ha considerado el buque parado a la deriva, es decir, sin arrancada.

Las características del modelo utilizado son las siguientes:

- Eslora: 274 m
- Manga: 48 m
- Calado: 16 m

### **2.2.1. Cálculo de la fuerza resultante de las presiones de la corriente**

El primer cálculo que se ha realizado, es el cálculo de la fuerza resultante de las presiones sobre un buque de unas características comentadas anteriormente, sometido a una corriente de distintas velocidades. Se ha calculado con varias velocidades para, al final, poder sacar una relación entre la velocidad relativa de la corriente y el valor de la fuerza resultante.

Para llevar a cabo estos cálculos, se ha utilizado toda la información aportada y explicada en el apartado 2.1.1; concretamente se ha usado la fórmula

## 2.1.

Antes de empezar con las tablas y gráficos de los resultados, se van a enumerar los distintos parámetros que se han utilizado en la ecuación. Estos parámetros son constantes independientemente de la velocidad relativa de la corriente y del ángulo relativo de incidencia de la misma, de manera que una vez expuestos a continuación, se tomarán para el resto de cálculos realizados con el fin de obtener todos los resultados presentados y estudiados en esta sección.

Dichos datos invariables son, a parte de las dimensiones y características del buque ya mencionadas anteriormente, los siguientes:

- $C_{CL} = 0,2$
- $C_{CT} = 1$
- $A_{TC} = B \cdot D = 48 \cdot 16 = 768 \text{ m}^2$
- $A_{LC} = L_{PP} \cdot D = 274 \cdot 16 = 4384 \text{ m}^2$

En la siguiente tabla con resultados, y de igual manera que todas las siguientes de este mismo tipo, aparecerán 3 datos; éstos, son los tres datos de la fórmula 2.1 que varían, y son:  $\alpha_{cr}$ ,  $\phi_{CP}$  y  $R_{CP}$ .

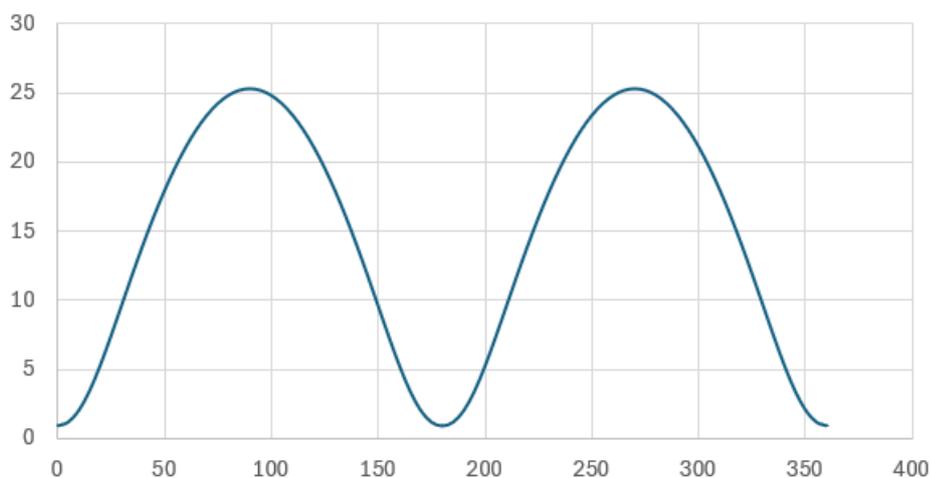
El primer caso, los resultados mostrados en la tabla 2.1, son los datos y resultados de la fuerza resultante correspondientes a una corriente con una velocidad relativa de 0,5 nudos.

Observando los datos de esta tabla, podemos observar que los valores mínimos de  $R_{CP}$  se dan cuando  $\alpha_{cr} = 0^\circ$  o cuando  $\alpha_{cr} = 180^\circ$ , y los valores máximos,  $90^\circ$  desplazados de cada uno de esos valores. Eso se puede apreciar mejor en la figura 2.7.

**Cuadro 2.1:** Valores de  $R_{CP}$  con corriente relativa de 0,5 nudos

$\alpha_{cr}$	$\phi_{CP}$	$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$\phi_{CP}$	$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$\phi_{CP}$	$R_{CP}$
0	0,000	0,886	125	-83,007	19,557	245	85,330	22,328
5	26,538	1,152	130	-81,638	17,867	250	86,352	23,388
10	45,187	1,985	135	-80,064	15,995	255	87,313	24,219
15	56,824	3,384	140	-78,207	13,964	260	88,231	24,817
20	64,298	5,228	145	-75,954	11,807	265	89,122	25,177
25	69,410	7,344	150	-73,121	9,575	270	90,000	25,297
30	73,121	9,575	155	-69,410	7,344	275	-89,122	25,177
35	75,954	11,807	160	-64,298	5,228	280	-88,231	24,817
40	78,207	13,964	165	-56,824	3,384	285	-87,313	24,219
45	80,064	15,995	170	-45,187	1,985	290	-86,352	23,388
50	81,638	17,867	175	-26,538	1,152	295	-85,330	22,328
55	83,007	19,557	180	0,000	0,886	300	-84,225	21,048
60	84,225	21,048	185	26,538	1,152	305	-83,007	19,557
65	85,330	22,328	190	45,187	1,985	310	-81,638	17,867
70	86,352	23,388	195	56,824	3,384	315	-80,064	15,995
75	87,313	24,219	200	64,298	5,228	320	-78,207	13,964
80	88,231	24,817	205	69,410	7,344	325	-75,954	11,807
85	89,122	25,177	210	73,121	9,575	330	-73,121	9,575
90	90,000	25,297	215	75,954	11,807	335	-69,410	7,344
95	-89,122	25,177	220	78,207	13,964	340	-64,298	5,228
100	-88,231	24,817	225	80,064	15,995	345	-56,824	3,384
105	-87,313	24,219	230	81,638	17,867	350	-45,187	1,985
110	-86,352	23,388	235	83,007	19,557	355	-26,538	1,152
115	-85,330	22,328	240	84,225	21,048	360	0,000	0,886
120	-84,225	21,048						

**Figura 2.7:** Resultado de  $R_{CP}$  con 0,5 nudos de velocidad de corriente relativa



Cabe destacar que todos los resultados de la fuerza resultante de las pre-

siones de la corriente, están plasmadas en este proyecto en valor absoluto para facilitar su comprensión sobre el gráfico. El signo se ha obviado ya que solamente indica el sentido de la fuerza que ejerce la corriente sobre el buque y, usando la lógica, se puede deducir sin ningún problema hacia donde actúa esa fuerza. Por ejemplo, si la corriente relativa viene del costado de babor, como es lógico, va a empujar el buque hacia estribor.

En la figura 2.7 podemos ver como, efectivamente, tal y como se ha comentado anteriormente con los resultados de la tabla 2.1, los valores mínimos se consiguen cuando la corriente relativa incide sobre el buque por proa o por popa y los valores máximos se consiguen cuando la corriente incide por el través. Eso es lógico si tenemos en cuenta que el buque tiene mayor superficie donde incide la corriente cuando viene por el través que cuando viene por proa o por popa.

Ahora, entrando en los valores calculados, podemos observar que teniendo un corriente por el través, la corriente de 0,5 nudos (suponiendo como siempre, el buque parado) va a ejercer sobre el casco, una fuerza de 25,297 toneladas. Teniendo en cuenta que los remolcadores de un puerto grande como puede ser el de Algeciras tienen una capacidad de tiro a punto fijo mínimo de 36 toneladas (tomando de referencia los remolcadores de dicho puerto de la naviera Boluda, ya que son los que remolcaron el petrolero durante mi período de embarque), con cualquier remolcador del puerto de la naviera mencionada, sería suficiente para vencer esa fuerza[9].

En cambio, si hacemos el cálculo para una corriente un poco mayor, 1 nudo de velocidad relativa, obtenemos los resultados de la tabla 2.2.

En este momento nos damos cuenta de que los valores de la fuerza resultante son mayores, pero no son el doble como podría uno pensar. Pero, veamos los gráficos 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11.

Observando estos gráficos nos damos cuenta de que, como era de esperar, la forma del gráfico que sigue la fuerza resultante al incidir sobre el casco de un buque desde distintos ángulos, no varía según la velocidad de la corriente relativa. Por ello, vamos a centrarnos en los valores de la fuerza resultante cuando

**Cuadro 2.2:** Valores de  $R_{CP}$  para una corriente relativa de 1 nudo

$\alpha_{cr}$	$\phi_{CP}$	$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$\phi_{CP}$	$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$\phi_{CP}$	$R_{CP}$
0	0,000	3,545	125	-83,007	78,226	245	85,330	89,313
5	26,538	4,609	130	-81,638	71,466	250	86,352	93,551
10	45,187	7,941	135	-80,064	63,978	255	87,313	96,877
15	56,824	13,535	140	-78,207	55,855	260	88,231	99,268
20	64,298	20,913	145	-75,954	47,229	265	89,122	100,708
25	69,410	29,376	150	-73,121	38,301	270	90,000	101,189
30	73,121	38,301	155	-69,410	29,376	275	-89,122	100,708
35	75,954	47,229	160	-64,298	20,913	280	-88,231	99,268
40	78,207	55,855	165	-56,824	13,535	285	-87,313	96,877
45	80,064	63,978	170	-45,187	7,941	290	-86,352	93,551
50	81,638	71,466	175	-26,538	4,609	295	-85,330	89,313
55	83,007	78,226	180	0,000	3,545	300	-84,225	84,192
60	84,225	84,192	185	26,538	4,609	305	-83,007	78,226
65	85,330	89,313	190	45,187	7,941	310	-81,638	71,466
70	86,352	93,551	195	56,824	13,535	315	-80,064	63,978
75	87,313	96,877	200	64,298	20,913	320	-78,207	55,855
80	88,231	99,268	205	69,410	29,376	325	-75,954	47,229
85	89,122	100,708	210	73,121	38,301	330	-73,121	38,301
90	90,000	101,189	215	75,954	47,229	335	-69,410	29,376
95	-89,122	100,708	220	78,207	55,855	340	-64,298	20,913
100	-88,231	99,268	225	80,064	63,978	345	-56,824	13,535
105	-87,313	96,877	230	81,638	71,466	350	-45,187	7,941
110	-86,352	93,551	235	83,007	78,226	355	-26,538	4,609
115	-85,330	89,313	240	84,225	84,192	360	0,000	3,545
120	-84,225	84,192						

$\alpha_{cr} = 0^\circ$  y  $\alpha_{cr} = 90^\circ$  en los 4 casos de velocidades relativas mencionados, de manera que se va a sacar una relación para, a partir de los valores de la tabla 2.2 y sabiendo la velocidad relativa de la corriente en cualquier momento, podamos sacar la  $R_{CP}$  para la nueva velocidad.

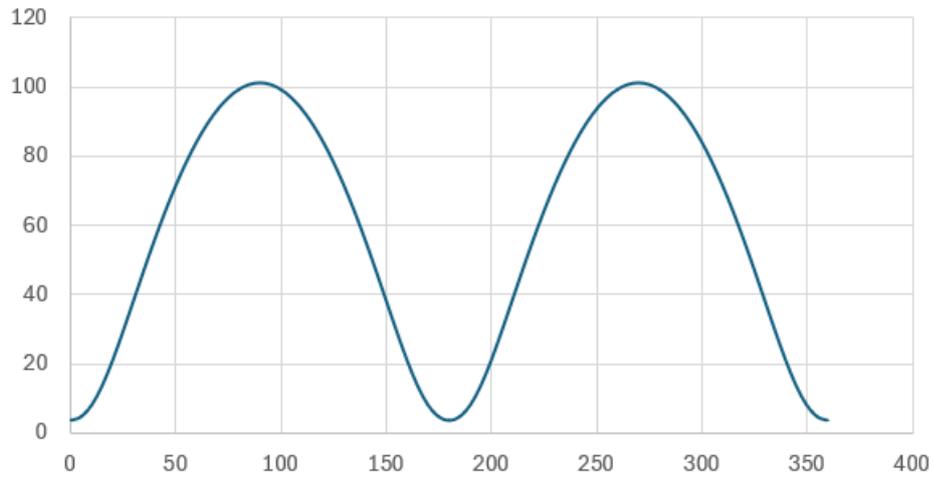
Sustituyendo los datos deseados en la fórmula 2.1 obtenemos los siguientes datos:

- $V_{cr} = 0,5$  nudos

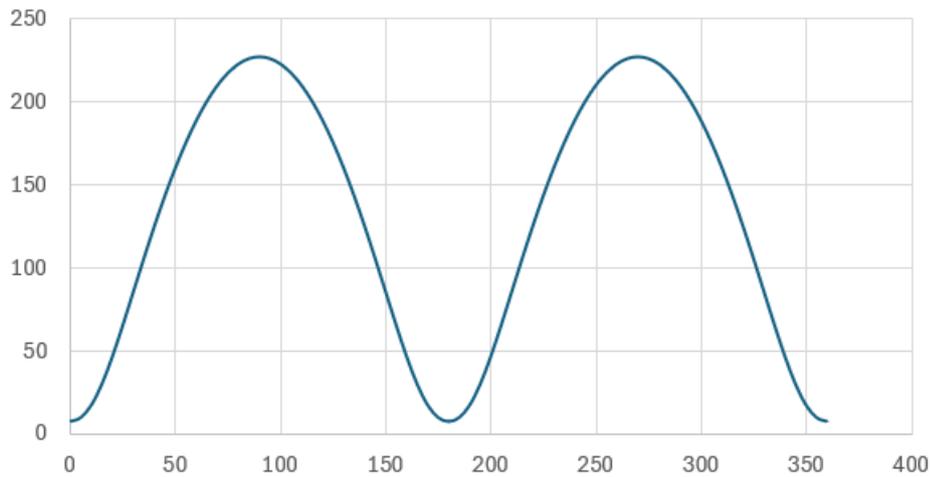
- $\alpha_{cr} = 0^\circ$

$$R_{CP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 0,257 \cdot \frac{0,2 \cdot 768 \cdot \cos^2 0^\circ + 1 \cdot 4384 \cdot \sin^2 0^\circ}{\cos(0^\circ - 0^\circ)} = 0,886$$

**Figura 2.8:** Resultado de  $R_{CP}$  con 1 nudo de velocidad de corriente relativa



**Figura 2.9:** Resultado de  $R_{CP}$  con 1,5 nudos de velocidad de corriente relativa



- $\alpha_{cr} = 90^\circ$

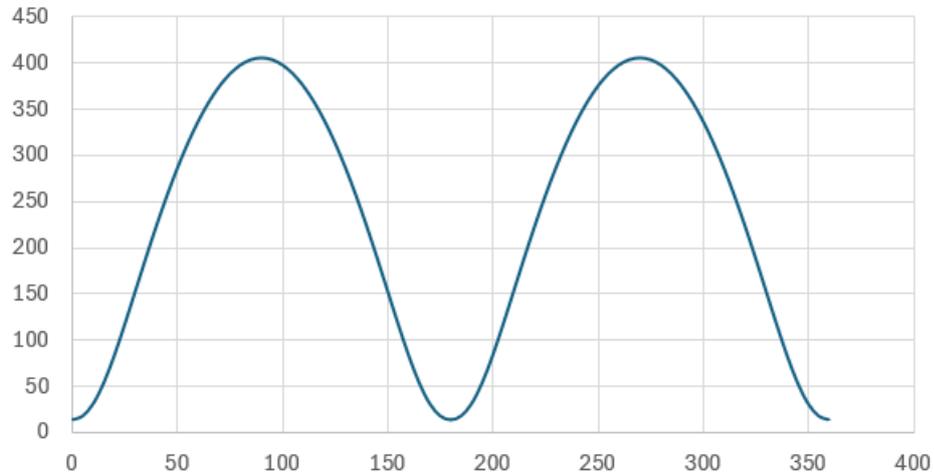
$$R_{CP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 0,257 \cdot \frac{0,2 \cdot 768 \cdot \cos^2 90^\circ + 1 \cdot 4384 \cdot \sin^2 90^\circ}{\cos(90^\circ - 90^\circ)} = 25,297$$

- $V_{cr} = 1,5$  nudos

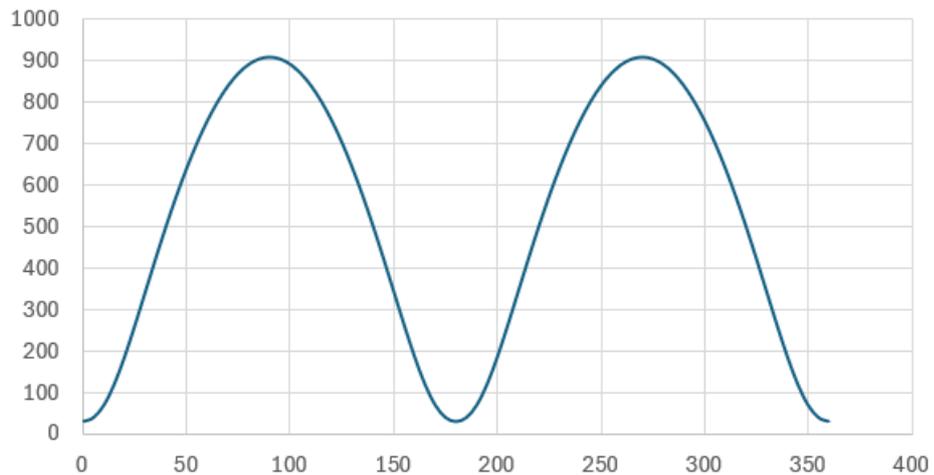
- $\alpha_{cr} = 0^\circ$

$$R_{CP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 0,772 \cdot \frac{0,2 \cdot 768 \cdot \cos^2 0^\circ + 1 \cdot 4384 \cdot \sin^2 0^\circ}{\cos(0^\circ - 0^\circ)} = 7,977$$

**Figura 2.10:** Resultado de  $R_{CP}$  con 2 nudos de velocidad de corriente relativa



**Figura 2.11:** Resultado de  $R_{CP}$  con 3 nudos de velocidad de corriente relativa



- $\alpha_{cr} = 90^\circ$

$$R_{CP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 0,772 \cdot \frac{0,2 \cdot 768 \cdot \cos^2 90^\circ + 1 \cdot 4384 \cdot \sin^2 90^\circ}{\cos(90^\circ - 90^\circ)} = 227,676$$

- $V_{cr} = 2$  nudos

- $\alpha_{cr} = 0^\circ$

$$R_{CP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,029 \cdot \frac{0,2 \cdot 768 \cdot \cos^2 0^\circ + 1 \cdot 4384 \cdot \sin^2 0^\circ}{\cos(0^\circ - 0^\circ)} = 14,181$$

- $\alpha_{cr} = 90^\circ$

$$R_{CP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,029 \cdot \frac{0,2 \cdot 768 \cdot \cos^2 90^\circ + 1 \cdot 4384 \cdot \sin^2 90^\circ}{\cos(90^\circ - 90^\circ)} = 404,757$$

- $V_{cr} = 3$  nudos

- $\alpha_{cr} = 0^\circ$

$$R_{CP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,543 \cdot \frac{0,2 \cdot 768 \cdot \cos^2 0^\circ + 1 \cdot 4384 \cdot \sin^2 0^\circ}{\cos(0^\circ - 0^\circ)} = 31,908$$

- $\alpha_{cr} = 90^\circ$

$$R_{CP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,543 \cdot \frac{0,2 \cdot 768 \cdot \cos^2 90^\circ + 1 \cdot 4384 \cdot \sin^2 90^\circ}{\cos(90^\circ - 90^\circ)} = 910,704$$

Ahora, teniendo estos resultados, si dividimos cualquiera de los resultados con su respectivo resultado con un nudo de velocidad relativa, vamos a ver que siempre va a dar el cuadrado de la velocidad relativa de la corriente calculada. Por ejemplo, en el primer caso, cogiendo el resultado obtenido para un ángulo de  $90^\circ$  con una corriente relativa de 0,5 nudos y lo dividimos entre su respectivo resultado para una corriente relativa de 1 nudo, da lo siguiente:

$$\frac{25,297}{101,189} = 0,25$$

Como se puede apreciar en la fórmula 2.1, la velocidad relativa de la corriente va elevado al cuadrado. Vamos a proceder a hacer la raíz cuadrada del resultado anterior, dando el valor de la velocidad relativa de la nueva corriente estudiada.

$$\sqrt{0,25} = 0,5$$

Para no quedarse con la duda de si eso pudiese ser una coincidencia, hagamos el proceso a la inversa y establezcamos una función para definir esta relación y probemos que funciona realmente con algunos de los resultados calculados anteriormente.

La relación, según los resultados obtenidos es la siguiente:

$$R_{CP_{1nudo}} = \frac{R'_{CP}}{V'_{cr}{}^2}$$
$$R_{CP_{1nudo}} \cdot V'_{cr}{}^2 = R'_{CP} \quad (2.8)$$

Esta relación se puede demostrar de la siguiente manera. Se divide  $R_{CP}$  entre  $R'_{CP}$ . Al ser todo constante excepto la velocidad relativa de la corriente, se puede simplificar resultando lo siguiente:

$$\frac{R_{CP_{1nudo}}}{R'_{CP}} = \frac{V'_{cr}{}^2}{V'_{cr}{}^2}$$

Al estar  $V_{cr}$  y  $V'_{cr}$  dividiendo, las unidades que se usen en este caso, no importa, por lo que se ha tomado de referencia la tabla de valores de un nudo y para facilitar los cálculos ya que en la mar se usan siempre nudos. De esta manera, al ser  $V_{cr} = 1$  nudo, obtenemos la ecuación 2.8.

De esta manera, mucho más simple que calculando todos los datos con la ecuación 2.1, tomando de referencia la tabla 2.2, podemos obtener cualquier resultado solo sabiendo la velocidad relativa de la corriente estudiada.

Hagamos la prueba para 1,5 nudos de velocidad relativa desde la proa y para 2 y 3 nudos por el través:

$$3,545 \cdot 1,5^2 = 7,977$$

$$101,189 \cdot 2^2 = 404,757$$

$$101,189 \cdot 3^2 = 910,704$$

Además, como conclusión extra, a partir de esta relación nos damos cuenta de que, a medida que aumente la velocidad relativa de la corriente, la fuerza resultante que ejerce esta última sobre el casco del buque, aumenta exponencialmente, lo que, llega un punto que impide que el buque siga aumentando la

velocidad, o le cueste mucho más, a pesar de aumentar su propulsión.

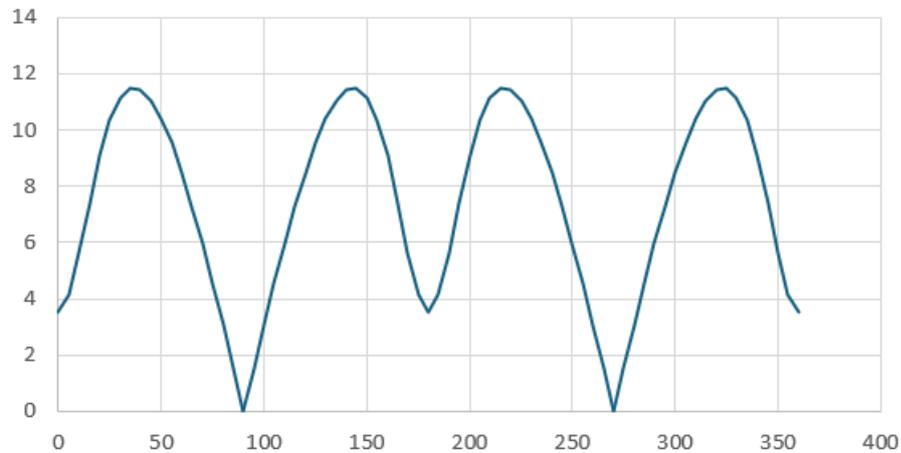
Ahora bien, estos últimos cálculos se han hecho teniendo en cuenta que la corriente relativa incide sobre el buque por la proa o por el través (por la popa o por el otro través, los resultados serían los mismos respectivamente, pero de signo contrario, lo que significa que la fuerza resultante es en sentido contrario). Pero, como sabemos, la corriente relativa no siempre incide en esos ángulos, si no que lo normal es que incida por la amura, por la aleta o con cualquier otro ángulo que no sea 0° ni 90° sobre el casco, por lo que la resultante no va a estar sobre el eje longitudinal o transversal del buque, si no que vamos a tener que descomponer esa resultante. Para ello, usamos las fórmulas 2.2 y 2.3. Aplicando estas fórmulas y tomando de referencia siempre la tabla de resultados 2.2, obtenemos los siguientes resultados de la tabla 2.3.

**Cuadro 2.3:** Valores de  $F_{LCP}$  para una corriente relativa de 1 nudo

$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$F_{LCP}$	$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$F_{LCP}$	$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$F_{LCP}$
3,545	0	3,545	78,226	125	9,524	89,313	245	7,272
4,609	5	4,123	71,466	130	10,394	93,551	250	5,953
7,941	10	5,597	63,978	135	11,040	96,877	255	4,542
13,535	15	7,407	55,855	140	11,415	99,268	260	3,065
20,913	20	9,070	47,229	145	11,463	100,708	265	1,543
29,376	25	10,331	38,301	150	11,121	101,189	270	0,000
38,301	30	11,121	29,376	155	10,331	100,708	275	1,543
47,229	35	11,463	20,913	160	9,070	99,268	280	3,065
55,855	40	11,415	13,535	165	7,407	96,877	285	4,542
63,978	45	11,040	7,941	170	5,597	93,551	290	5,953
71,466	50	10,394	4,609	175	4,123	89,313	295	7,272
78,226	55	9,524	3,545	180	3,545	84,192	300	8,472
84,192	60	8,472	4,609	185	4,123	78,226	305	9,524
89,313	65	7,272	7,941	190	5,597	71,466	310	10,394
93,551	70	5,953	13,535	195	7,407	63,978	315	11,040
96,877	75	4,542	20,913	200	9,070	55,855	320	11,415
99,268	80	3,065	29,376	205	10,331	47,229	325	11,463
100,708	85	1,543	38,301	210	11,121	38,301	330	11,121
101,189	90	0,000	47,229	215	11,463	29,376	335	10,331
100,708	95	1,543	55,855	220	11,415	20,913	340	9,070
99,268	100	3,065	63,978	225	11,040	13,535	345	7,407
96,877	105	4,542	71,466	230	10,394	7,941	350	5,597
93,551	110	5,953	78,226	235	9,524	4,609	355	4,123
89,313	115	7,272	84,192	240	8,472	3,545	360	3,545
84,192	120	8,472						

Para entender mejor estos datos, véase el gráfico 2.12

**Figura 2.12:** Resultado de  $F_{LCP}$  con 1 nudo de velocidad de corriente relativa



Cabe destacar que, tanto en la tabla 2.3 como en el gráfico 2.12 están plasmados los resultados de la componente longitudinal de la fuerza, al igual que cuando se han expuesto los resultados de la fuerza resultante total, en valor absoluto para evitar confusiones y simplificar la comprensión.

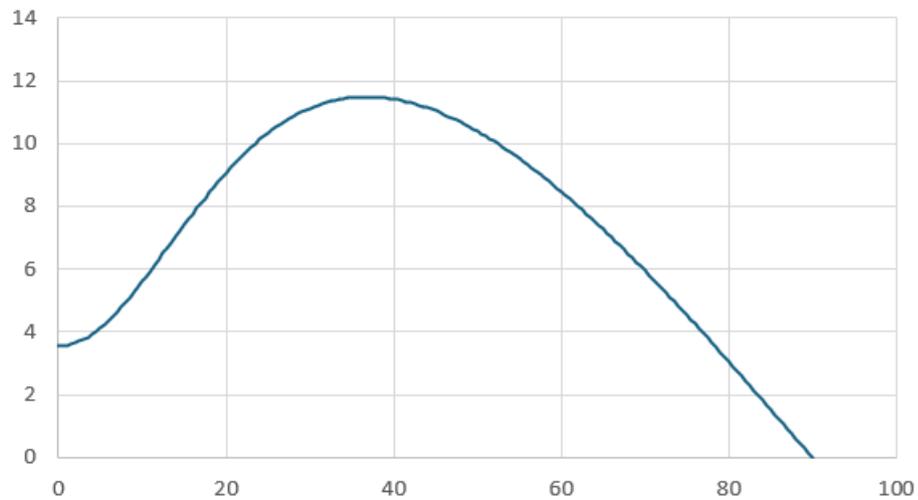
Previamente a realizar los cálculos pertinentes, uno podría pensar que habría los máximos de fuerza en el eje longitudinal cuando  $\alpha_{cr} = 0^\circ$  o cuando  $\alpha_{cr} = 180^\circ$ , cuando lo cierto es que, una vez realizados los cálculos, en valor absoluto, en esos puntos lo que obtenemos son unos mínimos relativos. Esto sucede debido a la poca superficie que tiene el buque en el plano transversal en relación a la gran superficie que tiene el buque en el plano longitudinal. En cambio, como sí es lógico, los dos mínimos absolutos se obtienen cuando la corriente relativa incide por el través, de manera que no ejerce nada de fuerza sobre el eje longitudinal del buque.

Por otra parte, prestando atención a los máximos del gráfico estudiado, vemos que tenemos 4 máximos iguales absolutos. Aunque, no sabemos exactamente donde están estos máximos, así que, ampliando el primer cuadrante (desde  $\alpha_{cr} = 0^\circ$  hasta  $\alpha_{cr} = 90^\circ$ ) obtenemos el gráfico 2.13.

Como se puede observar, el máximo de la componente longitudinal de la fuerza resultante, se da en un ángulo de  $\alpha_{cr} = 37^\circ$ <sup>7</sup>.

<sup>7</sup>Este valor está calculado en una hoja de cálculo a parte para tener mayor precisión, aun-

**Figura 2.13:** Resultado de  $F_{LCP}$  entre  $\alpha_{cr} = 0^\circ$  y  $\alpha_{cr} = 90^\circ$

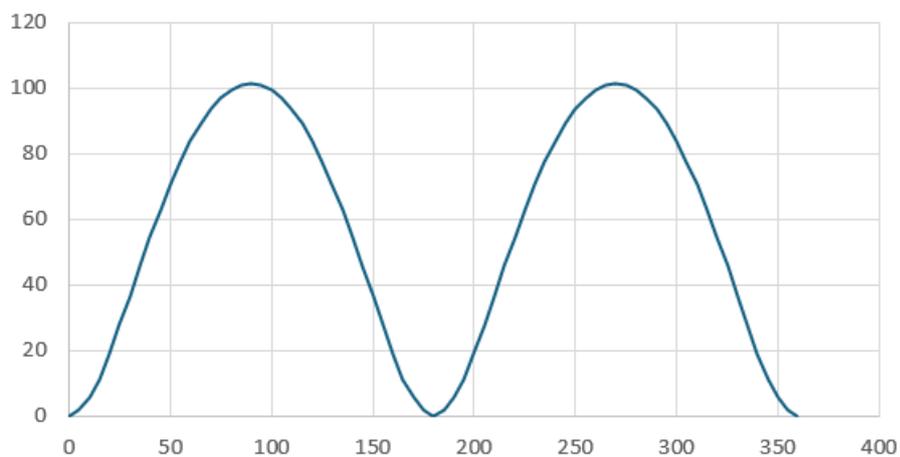


Ahora, observando el gráfico 2.12 podemos ver como los máximos de la componente longitudinal de la fuerza resultante de las presiones, se producen cuando la corriente relativa incide por  $53^\circ$  a proa y a popa de cada través.

Por otra parte, tenemos la componente transversal, cuyos resultados son los plasmados en la tabla 2.4.

Como se ha hecho cada vez, véase el gráfico 2.14 para comprender mejor los resultados calculados.

**Figura 2.14:** Resultado de  $F_{TCP}$  con 1 nudo de velocidad de corriente relativa



En este caso, a diferencia que el anterior, los resultados obtenidos son los que no se han puesto en el proyecto ya que no tienen mayor relevancia excepto el valor máximo estudiado. Cabe destacar que este valor tiene una certeza de  $0,5^\circ$  ya que es cada cuanto se ha calculado el valor de  $F_{LCP}$  para realizar el gráfico 2.13

**Cuadro 2.4:** Valores de  $F_{TCP}$  para una corriente relativa de 1 nudo

$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$F_{TCP}$	$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$F_{TCP}$	$R_{CP}$	$\alpha_{cr}$	$F_{TCP}$
3,545	0	0,000	78,226	125	77,644	89,313	245	89,017
4,609	5	2,059	71,466	130	70,707	93,551	250	93,362
7,941	10	5,633	63,978	135	63,019	96,877	255	96,770
13,535	15	11,329	55,855	140	54,676	99,268	260	99,220
20,913	20	18,844	47,229	145	45,817	100,708	265	100,696
29,376	25	27,500	38,301	150	36,651	101,189	270	101,189
38,301	30	36,651	29,376	155	27,500	100,708	275	100,696
47,229	35	45,817	20,913	160	18,844	99,268	280	99,220
55,855	40	54,676	13,535	165	11,329	96,877	285	96,770
63,978	45	63,019	7,941	170	5,633	93,551	290	93,362
71,466	50	70,707	4,609	175	2,059	89,313	295	89,017
78,226	55	77,644	3,545	180	0,000	84,192	300	83,765
84,192	60	83,765	4,609	185	2,059	78,226	305	77,644
89,313	65	89,017	7,941	190	5,633	71,466	310	70,707
93,551	70	93,362	13,535	195	11,329	63,978	315	63,019
96,877	75	96,770	20,913	200	18,844	55,855	320	54,676
99,268	80	99,220	29,376	205	27,500	47,229	325	45,817
100,708	85	100,696	38,301	210	36,651	38,301	330	36,651
101,189	90	101,189	47,229	215	45,817	29,376	335	27,500
100,708	95	100,696	55,855	220	54,676	20,913	340	18,844
99,268	100	99,220	63,978	225	63,019	13,535	345	11,329
96,877	105	96,770	71,466	230	70,707	7,941	350	5,633
93,551	110	93,362	78,226	235	77,644	4,609	355	2,059
89,313	115	89,017	84,192	240	83,765	3,545	360	0,000
84,192	120	83,765						

esperados previos a realizar los cálculos, con sus máximos (los cuales son el valor total de la fuerza resultante) cuando la corriente relativa incide por el través y los mínimos (los cuales son 0) cuando la corriente relativa incide por la proa o por la popa del buque.

### 2.2.2. Cálculo del momento resultante causado por la corriente

El segundo cálculo que se ha realizado, es el cálculo del momento resultante causado por la corriente sobre el buque debido a la excentricidad del punto de aplicación  $t$  de la corriente respecto del centro de gravedad del buque.

Para llevar a cabo estos cálculos, se ha utilizado toda la información aportada y explicada en el apartado 2.1.2, concretamente se ha usado la fórmula

## 2.4.

Para calcular estos momentos en cada situación, se tomarán los datos de la componente transversal de la fuerza resultante necesarios calculados en el subapartado anterior.

Al no disponer de los datos precisos del coeficiente de excentricidad del buque, usaremos los datos aproximados de la tabla expuesta en el apartado 2.1.2. De esta manera, se obtienen los siguientes datos:

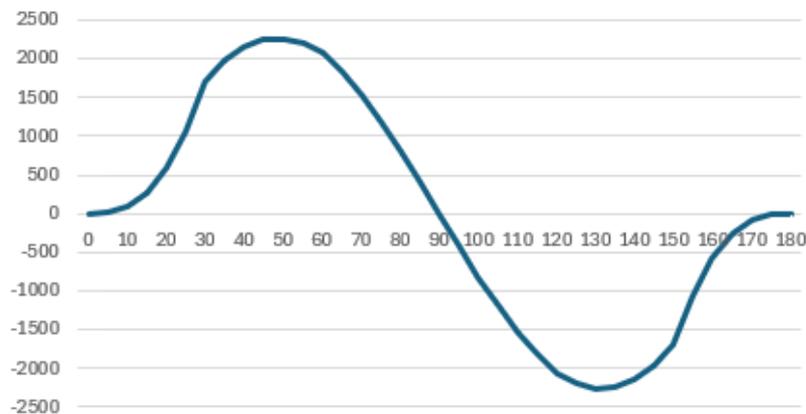
**Cuadro 2.5:** Valores de  $M_{TC}$  para una corriente de 1 nudo

$\alpha_{cr}$ (en °)	$M_{TC}$	$K_{ec}$
0	0	0
30	1707,20	0,17
60	2065,64	0,09
90	0	0
120	-2065,64	-0,09
150	-1707,20	-0,17
180	0	0

Como se ha comentado en el apartado 2.1.2, se considera un momento positivo cuando hace caer el buque hacia babor y negativo cuando hace caer el buque hacia estribor.

De igual manera que cada cálculo que se hace, véanse los datos plasmados sobre el gráfico 2.15.

**Figura 2.15:** Resultado de  $M_{TC}$  con 1 nudo de velocidad de corriente relativa



Cabe destacar que, aunque en la tabla 2.5 solo aparecen los datos cada

30°, para realizar el gráfico, se ha calculado el momento cada 5° interpolando los datos de  $K_{ec}$  para obtener un gráfico más exacto.

Como se puede observar, cuando la corriente relativa incide con un ángulo menor a 90°, el momento es mayor a 0, lo que significa que hará caer el barco hacia babor. Sin embargo, cuando la corriente incide por popa del través, el momento pasa a ser negativo, lo que significa que hará caer el barco hacia estribor. El ángulo en que la corriente no produce ningún momento de fuerzas sobre el buque y por lo tanto, no alterará el rumbo de aguja del buque es 90°, es decir, cuando la corriente relativa incide sobre el buque con un ángulo de 90°, independientemente de la intensidad que tenga la corriente.

### 2.2.3. Cálculo de las fuerzas de fricción de la corriente sobre el buque

El tercer cálculo que se ha realizado, es el cálculo de las fuerzas de fricción debidas a la corriente sobre el buque. Estas fuerzas se han calculado para una corriente de 1 nudo de velocidad relativa, para poder seguir con el mismo patrón que en los cálculos anteriores y con un coeficiente de rozamiento del casco del buque de 0,004 ya que el casco del buque estudiado no se había tratado ni limpiado desde su botadura. Además, de esta manera, después de calcular estas dos últimas fuerzas, se podrá calcular la fuerza total en cada eje que se ejerce sobre un buque por una corriente de 1 nudo.

Para llevar a cabo estos cálculos, se ha utilizado toda la información aportada y explicada en el apartado 2.1.3, concretamente se han usado las fórmulas 2.5 y 2.6.

Empezando calculando la componente transversal de la fuerza de fricción y usando la fórmula:

$$F_{TCF} = \frac{\gamma_w}{2g} \cdot C_r \cdot V_{cr}^2 \cdot A_{TCF} \cdot \text{sen}^2 \alpha_{cr}$$

Se obtienen los datos de la tabla 2.6.

Para facilitar la comprensión de estos resultados, se puede observar el gráfico 2.16, en el cual aparecen reflejados.

**Cuadro 2.6:** Valores de  $F_{TCF}$  para una corriente relativa de 1 nudo

$\alpha_{cr}$	$F_{TCF}$	$\alpha_{cr}$	$F_{TCF}$	$\alpha_{cr}$	$F_{TCF}$
0	0,0000	125	0,5477	245	0,6705
5	0,0062	130	0,4790	250	0,7208
10	0,0246	135	0,4081	255	0,7616
15	0,0547	140	0,3373	260	0,7917
20	0,0955	145	0,2685	265	0,8101
25	0,1458	150	0,2041	270	0,8163
30	0,2041	155	0,1458	275	0,8101
35	0,2685	160	0,0955	280	0,7917
40	0,3373	165	0,0547	285	0,7616
45	0,4081	170	0,0246	290	0,7208
50	0,4790	175	0,0062	295	0,6705
55	0,5477	180	0,0000	300	0,6122
60	0,6122	185	0,0062	305	0,5477
65	0,6705	190	0,0246	310	0,4790
70	0,7208	195	0,0547	315	0,4081
75	0,7616	200	0,0955	320	0,3373
80	0,7917	205	0,1458	325	0,2685
85	0,8101	210	0,2041	330	0,2041
90	0,8163	215	0,2685	335	0,1458
95	0,8101	220	0,3373	340	0,0955
100	0,7917	225	0,4081	345	0,0547
105	0,7616	230	0,4790	350	0,0246
110	0,7208	235	0,5477	355	0,0062
115	0,6705	240	0,6122	360	0,0000

Por otra parte, aplicando la siguiente fórmula, se calcula la componente longitudinal de la fuerza de fricción debido a la corriente:

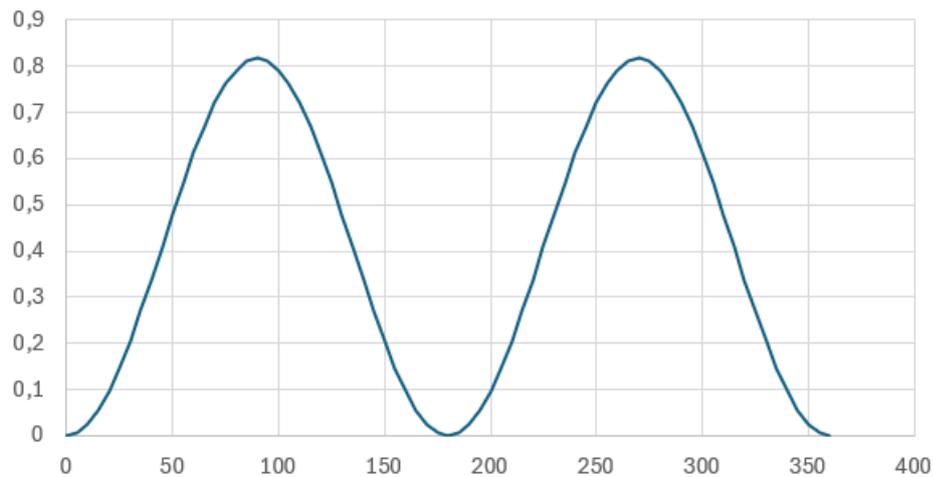
$$F_{LCF} = \frac{\gamma_w}{2g} \cdot C_r \cdot V_{cr}^2 \cdot A_{LCF} \cdot \cos^2 \alpha_{cr}$$

De esa manera y teniendo en cuenta que tenemos 1 nudo de corriente relativa, obtenemos los resultados de la tabla 2.7.

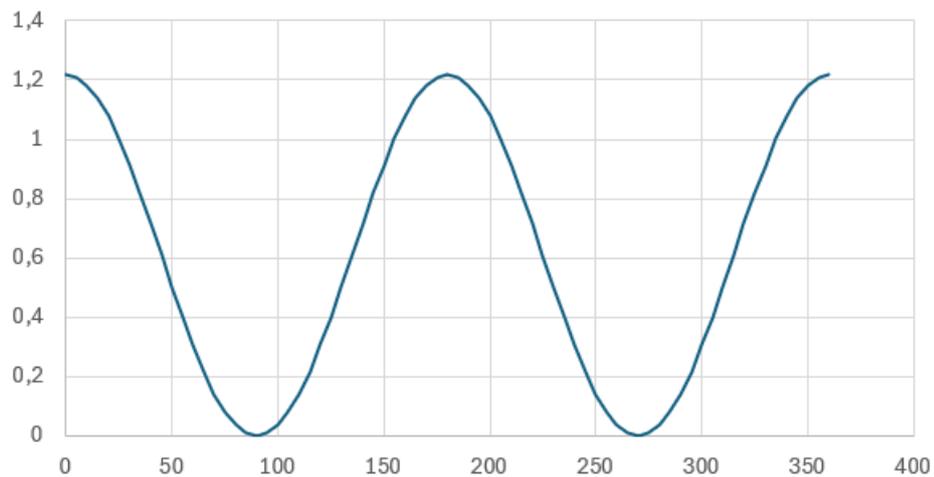
Para comprender mejor los resultados, véase el gráfico 2.17.

Cabe destacar que, de igual manera que ocurría con la fuerza resultante de las presiones de la corriente, en este caso, a partir de los valores de  $F_{TCF}$  y  $F_{LCF}$  calculados por una corriente de 1 nudo, se pueden sacar los valores de estas fuerzas por una corriente de cualquier velocidad. Simplemente se

**Figura 2.16:** Resultado de  $F_{TCF}$  con 1 nudo de velocidad de corriente relativa



**Figura 2.17:** Resultado de  $F_{LCF}$  con 1 nudo de velocidad de corriente relativa



deben multiplicar los resultados de una velocidad de 1 nudo por la velocidad (en nudos) al cuadrado, de la corriente estudiada.

Como podemos observar tanto en las tablas de los resultados calculados como en los gráficos, las fuerzas debidas a la fricción, son considerablemente menores a las calculadas en apartados anteriores. Sin embargo, si un buque va navegando, la corriente relativa va aumentar y, estas fuerzas, con ella.

Ahora, para finalizar los cálculos de los efectos de la corriente sobre un buque, se va a realizar la suma de las componentes de las fuerzas calculadas, de manera que obtendremos la fuerza total longitudinal y la fuerza total transversal, las cuales son las que provocan el movimiento de deriva de un buque. Todos esos resultados, recordemos que están calculados para una corriente

**Cuadro 2.7:** Valores de  $F_{LCF}$  para una corriente relativa de 1 nudo

$\alpha_{cr}$	$F_{LCF}$	$\alpha_{cr}$	$F_{LCF}$	$\alpha_{cr}$	$F_{LCF}$
0	1,2182	125	0,4008	245	0,2176
5	1,2089	130	0,5033	250	0,1425
10	1,1815	135	0,6091	255	0,0816
15	1,1366	140	0,7149	260	0,0367
20	1,0757	145	0,8174	265	0,0093
25	1,0006	150	0,9136	270	0,0000
30	0,9136	155	1,0006	275	0,0093
35	0,8174	160	1,0757	280	0,0367
40	0,7149	165	1,1366	285	0,0816
45	0,6091	170	1,1815	290	0,1425
50	0,5033	175	1,2089	295	0,2176
55	0,4008	180	1,2182	300	0,3045
60	0,3045	185	1,2089	305	0,4008
65	0,2176	190	1,1815	310	0,5033
70	0,1425	195	1,1366	315	0,6091
75	0,0816	200	1,0757	320	0,7149
80	0,0367	205	1,0006	325	0,8174
85	0,0093	210	0,9136	330	0,9136
90	0,0000	215	0,8174	335	1,0006
95	0,0093	220	0,7149	340	1,0757
100	0,0367	225	0,6091	345	1,1366
105	0,0816	230	0,5033	350	1,1815
110	0,1425	235	0,4008	355	1,2089
115	0,2176	240	0,3045	360	1,2182
120	0,3045				

relativa de 1 nudo y con unidades de toneladas.

$$F_{TCTotal} = F_{TCP} + F_{TCF}$$

- $\alpha_{cr} = 0^\circ$

$$0,000 + 0,0000 = 0$$

- $\alpha_{cr} = 30^\circ$

$$36,651 + 0,2041 = 36,8551$$

- $\alpha_{cr} = 60^\circ$

$$83,765 + 0,6122 = 84,3772$$

- $\alpha_{cr} = 90^{\circ}$

$$101,189 + 0,8163 = 102,0053$$

- $\alpha_{cr} = 120^{\circ}$

$$83,765 + 0,6122 = 84,3772$$

- $\alpha_{cr} = 150^{\circ}$

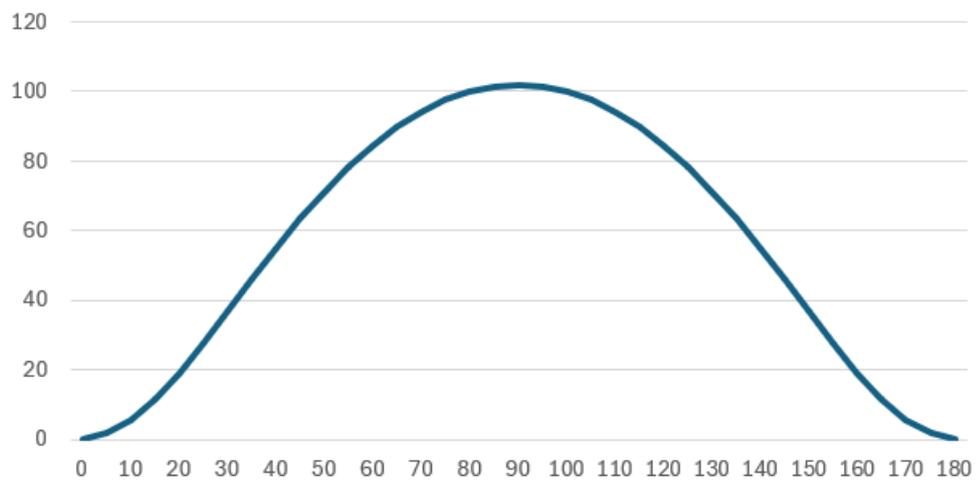
$$36,651 + 0,2041 = 36,8551$$

- $\alpha_{cr} = 180^{\circ}$

$$0,000 + 0,0000 = 0$$

En el gráfico 2.18 se puede observar como resultaría la fuerza total sobre el eje transversal del buque.

**Figura 2.18:** Resultado de  $F_{TCTotal}$  con 1 nudo de velocidad de corriente relativa



$$F_{LCTotal} = F_{LCP} + F_{LCF}$$

- $\alpha_{cr} = 0^{\circ}$

$$3,545 + 1,2182 = 4,7632$$

- $\alpha_{cr} = 30^{\circ}$

$$11,121 + 0,9136 = 12,0346$$

- $\alpha_{cr} = 60^\circ$

$$8,472 + 0,3045 = 8,7765$$

- $\alpha_{cr} = 90^\circ$

$$0,000 + 0,0000 = 0$$

- $\alpha_{cr} = 120^\circ$

$$8,472 + 0,3045 = 8,7765$$

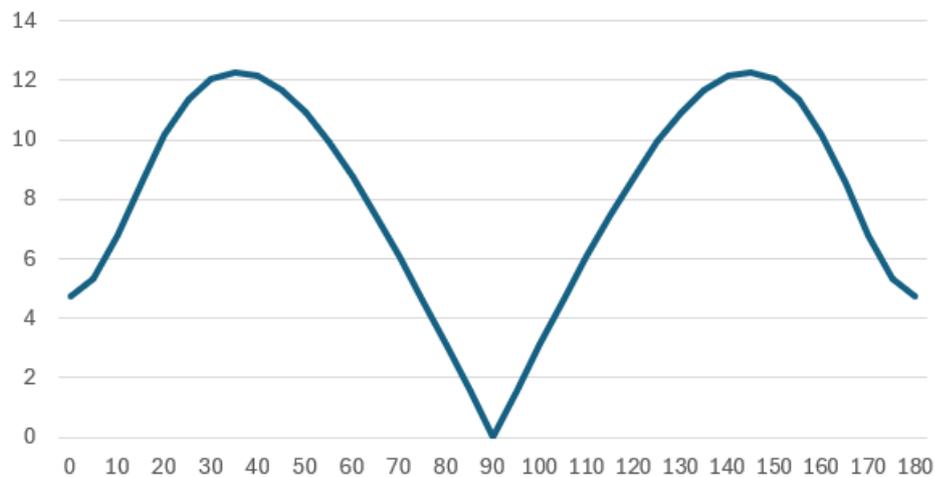
- $\alpha_{cr} = 150^\circ$

$$11,121 + 0,9136 = 12,0346$$

- $\alpha_{cr} = 180^\circ$

$$3,545 + 1,2182 = 4,7632$$

**Figura 2.19:** Resultado de  $F_{LCTotal}$  con 1 nudo de velocidad de corriente relativa



Finalmente, como se puede observar, tanto en el gráfico 2.18 como en el 2.19 los resultados mantienen la misma forma que en los gráficos que representan los datos de las fuerzas transversales y longitudinales debidas a las presiones. Eso viene dado porque las fuerzas por fricción mucho menores, aunque es necesario tenerlas en cuenta.

### **2.3. Efecto del viento sobre la obra muerta de un buque**

El viento, de manera muy general y breve, se podría describir como una masa de aire en movimiento. Este movimiento puede estar creado por diferentes causas, como por ejemplo, un gradiente de presión en la atmósfera debido a una diferencia de temperatura entre dos zonas diferentes[10]. Sin embargo, tal y como se ha explicado al inicio del apartado 2.1, para llegar al objetivo de este proyecto, no es tan importante definir que es el viento y como se mueve u organiza en la atmósfera, sino como afecta a un buque cuando incide sobre su obra muerta.

En el apartado 2.1, en la imagen 2.1 se representa que es la obra muerta de un buque. Explicado en palabras, la obra muerta es aquella parte de un buque que no está sumergida, es decir, aquella parte del buque situada por encima de la línea de flotación en el momento observado. Por esto, al estar solamente esta parte en contacto con el aire, dependerá de su forma como afecte el viento sobre el comportamiento del buque. Por ejemplo, en un petrolero, como se puede apreciar en la imagen 2.20, la superestructura está situada en la parte de popa del buque. Eso provocará que la acción del viento sobre la obra muerta, a parte de desplazar el buque lateralmente debido a su gran francobordo, que la proa del buque tienda a caer hacia el viento. Eso es debido a que la parte que mayor resistencia al viento ofrece es la superestructura, la cual está a popa del centro de giro del buque (ver el subapartado 2.3.1).

**Figura 2.20:** M/T Monte Udala



**Fuente:** Creación propia

En cambio, en un buque portacontenedores, en situación de carga completa, el efecto más notorio de la incidencia del viento va a ser un desplazamiento lateral ya que su superficie velar (considerada como aquella superficie que ofrece resistencia al viento) se reparte, aproximadamente hablando, uniformemente a lo largo del buque. Este efecto va a suceder suponiendo un viento lateral. Si el viento fuese de proa o de popa, frenaría o aceleraría el buque respectivamente.

### **2.3.1. Centro de giro**

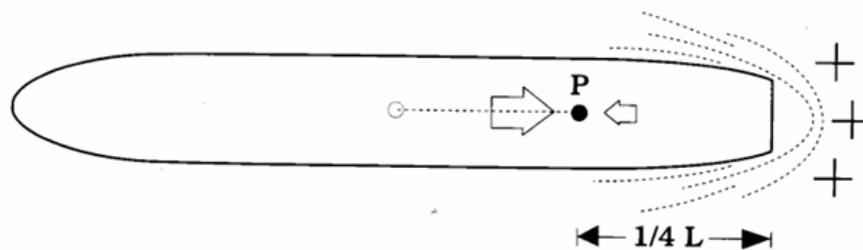
Cuando se habla de maniobrabilidad en un buque, es muy importante tener en cuenta, a parte de que efectos influyen a la trayectoria de un buque, como cambia la trayectoria el mismo. Para ello debemos entender como gira un buque, en el sentido de, cuando el buque cambia de rumbo de aguja, sobre que punto pivota.

La verdad es que ese punto, llamado centro de giro o también conocido como punto de pivote, no es un punto fijo[11]. Para ello, se van a explicar 3 situaciones, todas ellas, para evitar otras perturbaciones, estudiadas en un buque en aguas iguales y en mar en calma.



mento debido a la arrancada del buque y la presión positiva en la parte de detrás del buque que se opone al movimiento del buque. De esta manera, el centro de giro se desplaza hasta alcanzar una posición aproximada situada a  $1/4$  de la eslora del buque desde la popa como se enseña en la figura 2.23.

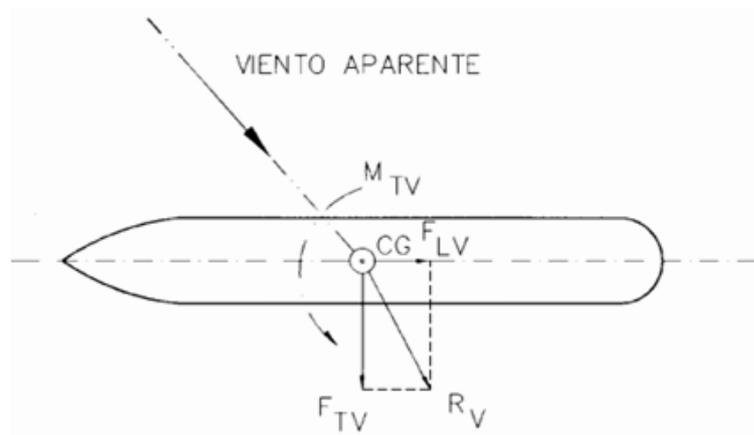
**Figura 2.23:** Centro de giro del buque con arrancada atrás.



**Fuente:** The Shiphander's Guide, Capitán R.W. Rowe

Para explicar como afecta el viento al buque vamos a hacer uso de la imagen 2.24. Esta imagen representa de manera muy general como actúa el viento sobre el buque.

**Figura 2.24:** Efecto del viento aparente sobre un buque



**Fuente:** ROM 3.1-99

Como vemos, el viento aparente o relativo al buque, incide sobre el mismo, dando como resultado una fuerza horizontal  $R_V$ , la cual produce un abatimien-

to del barco. Lo más común es que dicha fuerza no actúe sobre el centro de gravedad del buque. De esta manera, si descomponemos la fuerza  $R_V$  obtenemos lo siguiente:

- Una fuerza  $F_{LV}$  longitudinal al casco del buque y horizontal. Esta fuerza tiende a hacer avanzar o retroceder el buque según la dirección del viento respecto a nuestro rumbo.
- Una fuerza  $F_{TV}$  transversal al casco del buque y horizontal. Esta fuerza tiende a desplazar lateralmente el buque. A este movimiento se le llama movimiento de deriva.
- Un momento  $M_{TV}$  causado porque la mayor superficie velar está descentrada del centro de giro del buque. Eso provoca que el viento trate de hacer evolucionar el buque haciéndolo caer en el sentido correspondiente, siempre girando sobre un eje vertical que pasa por el centro de giro.

Además, a parte de estas fuerzas a lo largo del plano horizontal definidas anteriormente, el viento puede someter un buque a otros movimientos aunque siempre con menor medida cuanto mayor sea el buque. Estos movimientos son los siguientes:

- Sobre el eje longitudinal del buque nos encontramos con un movimiento de balance. Esto es debido a que el viento afecta siempre en mayor medida sobre el centro de gravedad del buque.
- Sobre el eje transversal del buque nos encontramos con el movimiento de cabeceo. Este efecto es mucho menor que el anterior ya que la estabilidad del buque es mucho mayor en el sentido longitudinal que en el sentido transversal.

Una vez definidas las fuerzas y momentos que actúan sobre un casco del buque causadas por el viento, debemos destacar algunas situaciones. Dichas situaciones son muy sencillas (todas ellas en ausencia de oleaje y corriente):

- Buque a la deriva afectado por un viento continuo y uniforme: En este caso se pueden dar 3 situaciones.
  - Buque con superestructura en proa: El buque tenderá a ponerse de popa al viento.
  - Buque con superestructura en el centro: El buque tenderá a desplazarse lateralmente hacia sotavento.
  - Buque con superestructura en popa: El buque tenderá a ponerse de proa al viento.
  
- Buque en navegación por una zona con viento continuo y uniforme: En este caso, se tendrá que tomar en consideración el efecto del viento teniendo en cuenta su intensidad y su dirección (en apartados posteriores se cuantificará este efecto), utilizando así los elementos de maniobra del que dispone el buque para combatir este efecto y seguir un rumbo deseado. La disposición de la superestructura también afectará en este caso como en el anterior aunque de una manera menos significativa ya que con los elementos de gobierno del buque, generalmente podremos combatir ese efecto.
  
- Buque amarrado: En este caso, toda la fuerza que actúa sobre el buque se verá absorbida por las amarras y defensas<sup>8</sup>. Cabe destacar que, en el caso de que el viento sea de alta o muy alta intensidad, se deberán tomar medidas especiales para hacer frente a la fuerza ejercida sobre el buque (generalmente, reforzando las amarras).
  
- Buque fondeado: En este caso, la fuerza que actúa sobre el buque, independientemente de la posición y disposición de la obra muerta, de igual manera que ocurría con la corriente, va a provocar que el buque bornee alrededor del punto real de fondeo, actuando en este caso de centro de giro. Para entender esto, tómesese de referencia la imagen 2.3.

---

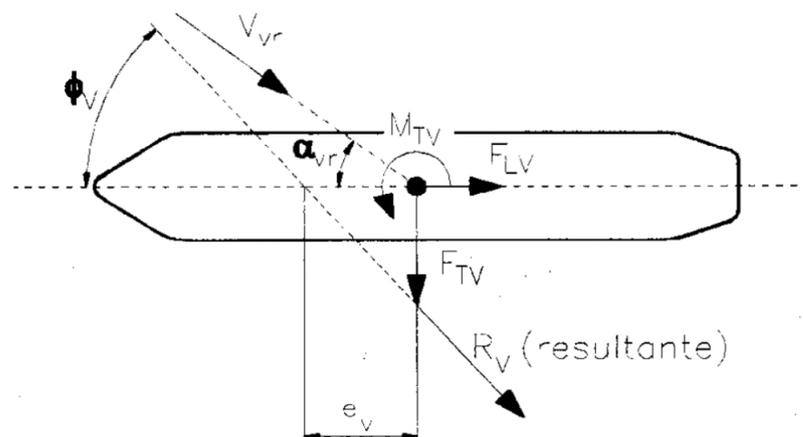
<sup>8</sup>Los criterios para la cuantificación de este efecto se pueden encontrar en el ROM 02.90 *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias*.

A pesar de estas distintas situaciones, de igual manera que pasaba con los efectos de la corriente, en este proyecto nos vamos a centrar en la primera y en la segunda. Para ello, se va a tomar, como se ha comentado en la introducción de este proyecto y en el apartado anterior, al petrolero "M/T Monte Udala" como buque referencia para realizar el estudio. Para facilitar el estudio, se va a considerar un buque bajo ningún efecto de corriente.

### 2.3.2. Fuerza resultante de las presiones del viento sobre el buque

Para calcular la fuerza ejercida por el viento sobre el buque, se va a usar la fórmula 2.9, la cual se ha sacado del ROM 3.1-99. Además, para comprender de donde se sacan los elementos de la fórmula y comprenderla mejor, de igual manera que en el apartado 2.1, nos apoyaremos en la imagen 2.25.<sup>9</sup>

**Figura 2.25:** Esfuerzos resultantes de las presiones del viento sobre un buque



Fuente: ROM 3.1-99

$$R_v = \frac{\rho}{2g} \cdot V_{vr}^2 \cdot \frac{C_{VL} \cdot A_{TV} \cdot \cos^2 \alpha_{vr}}{\cos(\phi_V - \alpha_{vr})} + \frac{C_{VT} \cdot A_{LV} \cdot \cos^2 \alpha_{vr}}{\cos(\phi_V - \alpha_{vr})} \quad (2.9)$$

Donde:

- $R_v$  es la fuerza resultante horizontal de la acción de las presiones del

<sup>9</sup>Se considerará al buque absento de cualquier efecto externo excepto el del viento y un buque sin arrancada, coincidiendo así el centro de giro con el centro de gravedad.

viento sobre el buque.

- $\rho$  es el peso específico del aire<sup>10</sup>.
- $V_{vr}$  es la velocidad relativa del viento referida al buque. Para su determinación se calculará la suma vectorial de la velocidad absoluta del viento  $V_v$  (explicada en el siguiente punto) y la velocidad del buque. Cabe destacar que esta velocidad debe estar en m/s.
- $V_v$  es la velocidad absoluta horizontal del viento correspondiente a 10 metros de altura. Se podrá tomar una velocidad media correspondiente a ráfagas durante 1 minuto para buques de eslora mayor o igual a 25m. Cabe destacar que esta velocidad debe estar en m/s.
- $C_{VL}$  ó  $C_{VT}$  son dos factores adimensionales de forma para el cálculo de la resultante de la acción del viento sobre el buque. Sus valores son muy variables dependiendo de las características de cada buque e incluso de las condiciones de carga del buque en el momento. Como primera aproximación se pueden tomar los siguientes valores:
  - $C_{VL}$ : En este caso se usa para calcular la acción del viento en el eje longitudinal. Se usará 0,80 para viento de proa ( $\alpha_{vr} = 000^\circ$ ) y 1,00 para viento de popa ( $\alpha_{vr} = 180^\circ$ ), según establece el ROM 3.1-99.
  - $C_{VT}$ : En este caso se usa para calcular la acción del viento en el eje transversal. Se aproximará usando un valor de 1,25 para el viento lateral ( $\alpha_{vr} = 090^\circ$ ) según establece el ROM 3.1-99.
- $A_{TV}$  es el área de la proyección transversal del buque medida en  $m^2$  sometida al efecto del viento. Para calcularla, en el caso de que no se tengan los datos exactos, se puede aproximar usando la siguiente fórmula:

$$A_{TV} = B \cdot (G + h_T)$$

---

<sup>10</sup>Consideraremos el peso específico del aire  $1,225 \cdot 10^{-3} t/m^3$ .

Siendo  $B$  la manga del buque, la  $G$  el francobordo del buque<sup>11</sup> y  $h_T$  altura media de la superestructura del buque por encima de la cubierta, proyectada sobre un plano transversal.

- $A_{LV}$  es el área de la proyección longitudinal del buque medida en  $m^2$  sometida al efecto del viento. Para calcularla, de igual manera que en el caso anterior, a falta de valores conocidos, se puede aproximar el valor usando la siguiente fórmula:

$$A_{LV} = L_{pp} \cdot (G + h_L)$$

Siendo  $L_{pp}$  la eslora entre perpendiculares del buque y  $h_L$  altura media de la superestructura del buque por encima de la cubierta, proyectada sobre un plano longitudinal.

- $\alpha_{vr}$  es el ángulo comprendido entre el eje longitudinal del buque y la dirección de actuación del viento relativo, es decir, la dirección de donde viene el viento relativo, medido siempre en grados.
- $\phi_v$  es el ángulo comprendido entre el eje longitudinal del buque y la fuerza resultante horizontal del viento, siempre medido en grados. Para calcular ese ángulo se usará la siguiente fórmula, de la cual ya se saben como sacar todos los datos:

$$\tan(\phi_v) = \frac{A_{LV}}{A_{TV}} \cdot \tan(\alpha_{vr}) \quad (2.10)$$

Por otra parte, cuando no se disponga de una información más precisa de los factores de forma  $C_{VT}$  y  $C_{VL}$  se podrá aplicar una formulación simplificada usando la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} R_{VP} &= \frac{\rho}{2g} \cdot C_{VF} \cdot V_{vr}^2 (A_{TV} \cdot \cos^2 \alpha_{vr} + A_{LV} \cdot \sin^2 \alpha_{vr}) \\ &= \frac{C_{VF} \cdot V_{vr}^2}{16000} (A_{TV} \cdot \cos^2 \alpha_{vr} + A_{LV} \cdot \sin^2 \alpha_{vr}) \end{aligned} \quad (2.11)$$

---

<sup>11</sup>Francobordo=Puntal-Calado

Donde:

- $C_{VF}$  es un factor de forma adimensional que puede variar entre 1,0 y 1,3 dependiendo de la forma del buque. Sin embargo, a falta de estudios en modelos de una determinación más precisa, se puede adoptar el valor 1,3 para cualquier forma del buque y dirección de actuación del viento sobre el mismo.

Además, independientemente de en el caso general o en el caso simplificado, se pueden usar las siguientes fórmulas para calcular: la componentes de la fuerza resultante en el eje transversal, con la fórmula 2.12 y en el eje longitudinal, la fórmula 2.13.

$$F_{TVP} = R_{VP} \cdot \text{sen}\phi_v \quad (2.12)$$

$$F_{LVP} = R_{VP} \cdot \text{cos}\phi_v \quad (2.13)$$

Donde:

- $F_{TV}$  es la componente en el sentido transversal del buque de la fuerza resultante del viento, en t.
- $F_{LV}$  es la componente en el sentido longitudinal del buque de la fuerza resultante del viento, en t.

### 2.3.3. Momento resultante causado por el viento

La aplicación de la fuerza del viento no tiene porque ser sobre el centro de gravedad del buque. Eso va a crear un momento creado debido a la excentricidad del punto de aplicación  $t$  respecto del centro de gravedad.

Para calcular este momento se debe usar la fórmula 2.14.

$$M_{TV} = F_{TV} \cdot e_v = F_{TV} \cdot K_{ev} \cdot L \quad (2.14)$$

Donde:

- $M_{TC}$  es el momento resultante aplicado sobre un eje vertical, el cual pasa por el centro de gravedad del buque, provocando un cambio de rumbo al buque. Este momento va a estar medido en toneladas métricas (t.m.).
- $e_{cp}$  es la excentricidad de la fuerza resultante del viento respecto al centro de gravedad del buque a lo largo del plano de crujía. Considerando un momento resultante positivo aquel que tiene el mismo sentido que el que aparece en la figura 2.25, es decir, aquel que visto en planta va en sentido antihorario, se tomará:
  - $e_{cp} > 0$  aquella excentricidad que se produzca desde el centro de gravedad hacia la proa del buque.
  - $e_{cp} < 0$  aquella excentricidad que se produzca desde el centro de gravedad hacia la popa del buque.

Este parámetro deberá estar medido en metros.

- $K_{ec}$  es el coeficiente de excentricidad (siendo siempre adimensional). En el caso de no disponer de datos mas exactos, se podrá aproximar a partir de las siguientes 3 tablas dependiendo de la situación de su superestructura:

**Cuadro 2.8:** Valores de  $K_{ev}$  para buques con la superestructura centrada

<b>BUQUES CON SUPERESTRUCTURA CENTRADA</b>		
$\alpha_{vr}$ (en °.)	$K_{ev}$	
	En lastre	A plena carga
0	0	0
30	0,15	0,10
60	0,05	0,03
90	-0,02	0,02
120	-0,10	0,10
150	-0,20	0,10
180	0	0

**Fuente:** ROM 3.1-99

**Cuadro 2.9:** Valores de  $K_{ev}$  para buques con la superestructura a proa

<b>BUQUES CON SUPERESTRUCTURA A PROA</b>		
$\alpha_{vr}$ (en °.)	$K_{ev}$	
	En lastre	A plena carga
0	0	0
30	0,33	0,37
60	0,18	0,27
90	-0,04	0,16
120	-0,05	0,12
150	-0,16	0,10
180	0	0

**Fuente:** ROM 3.1-99

**Cuadro 2.10:** Valores de  $K_{ev}$  para buques con la superestructura a popa

<b>BUQUES CON SUPERESTRUCTURA EN POPA</b>		
$\alpha_{vr}$ (en °.)	$K_{ev}$	
	En lastre	A plena carga
0	0	0
30	0,16	-0,10
60	0,05	-0,12
90	-0,04	-0,16
120	-0,18	-0,27
150	-0,33	-0,37
180	0	0

**Fuente:** ROM 3.1-99

## **2.4. Cálculos de las fuerzas y momentos que ejerce el viento sobre un buque**

Tras haber explicado teóricamente como afecta el viento sobre la obra muerta de un buque, que fuerzas y momentos se ejercen sobre el casco y como se calculan dichas fuerzas y momentos, se han realizado todos los cálculos pertinentes. Estos cálculos se han llevado a cabo con el fin de que, junto a una serie de diagramas que facilitan la comprensión de los resultados, una persona, tras interpretar los resultados expuestos en este apartado, sea consciente de cuanto afecta un viento de una cierta velocidad sobre un buque de unas determinadas dimensiones. En este caso, y de igual manera que se ha hecho en la sección de los cálculos de la corriente 2.2, se usarán las características ya mencionadas del buque suezmax M/T Monte Udala casi a plena carga. Además, se ha considerado el buque parado, es decir, sin arrancada.

### **2.4.1. Cálculo de la fuerza resultante de las presiones del viento**

Al igual que en el apartado 2.2, el primer cálculo que se ha realizado, es el cálculo de la fuerza resultante de las presiones sobre un buque sometido a un viento de distintas velocidades. Se ha calculado con varias velocidades para, al final poder sacar una relación entre la velocidad relativa de la corriente y el valor de la fuerza resultante.

Para llevar a cabo estos cálculos, se ha utilizado toda la información aportada y explicada en el apartado 2.3.2, concretamente se ha usado la fórmula 2.11.

Antes de empezar con las tablas y gráficos de los resultados, se van a enumerar los distintos parámetros que se han utilizado en la ecuación. Dichos parámetros son constantes independientemente de la velocidad relativa del viento y del ángulo relativo de incidencia del mismo, de forma que una vez expuestos a continuación, se tomarán para el resto de cálculos realizados para obtener todos los resultados presentados y estudiados en esta sección.

Dichos datos invariables son, a parte de las dimensiones y características

del buque ya mencionadas anteriormente, los siguientes:

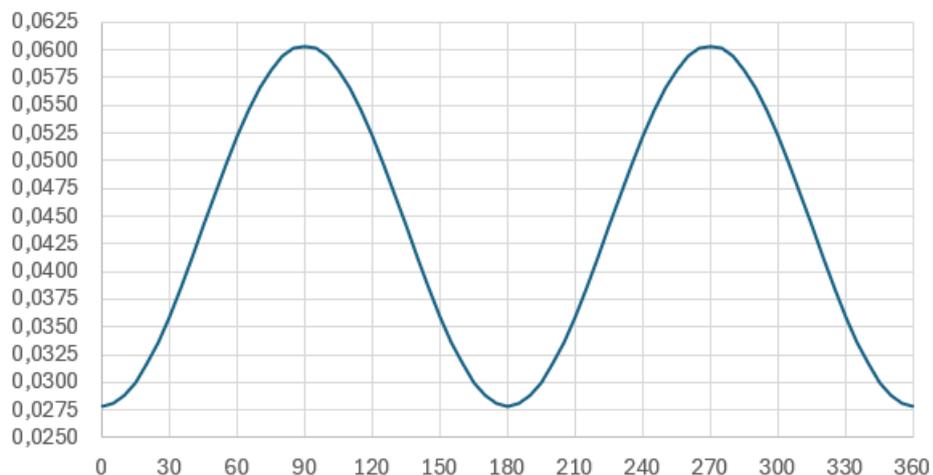
- $C_{VF} = 1,3$
- Francobordo de 7,7 metros con un calado de 16 metros.
- Altura de la superestructura (en popa) sobre la cubierta de 20 metros.
- Eslora de la superestructura de 35 metros.
- $A_{TV} = 1296,0 \text{ m}^2$
- $A_{LC} = 2809,8 \text{ m}^2$

Para resumir un poco los cálculos, se plasmarán los resultados en forma de tabla. En la tabla, aparecen tres datos. Dos de ellos,  $\alpha_{vr}$  y  $R_{VP}$  son los datos de la fórmula 2.11. El otro dato que aparece en la tabla,  $\phi_{CP}$  (calculado con la fórmula 2.10), es el valor del ángulo entre el eje longitudinal del barco y  $R_V$ .

El primer caso, los resultados mostrados en la tabla 2.11, son los datos y resultados de la fuerza resultante correspondientes a un viento con una velocidad relativa de 1 nudo.

Observando los datos de esa tabla, podemos observar que los valores mínimos de  $R_{VP}$  se dan cuando  $\alpha_{vr} = 0^\circ$  o cuando  $\alpha_{vr} = 180^\circ$ , y los valores máximos, desplazados  $90^\circ$  de cada uno de esos valores. Eso se puede apreciar mejor en la figura 2.26.

**Figura 2.26:** Resultado de  $R_{VP}$  con 1 nudo de velocidad de viento relativo



**Cuadro 2.11:** Valores de  $R_{VP}$  con viento relativo de 1 nudo

$\alpha_{vr}$	$R_{VP}$	$\phi_{CP}$	$\alpha_{vr}$	$R_{VP}$	$\phi_{CP}$	$\alpha_{vr}$	$R_{VP}$	$\phi_{CP}$
0	0,0278	0,00	125	0,0497	-72,10	245	0,0545	77,86
5	0,0281	10,74	130	0,0469	-68,84	250	0,0566	80,47
10	0,0288	20,92	135	0,0441	-65,24	255	0,0582	82,95
15	0,0300	30,15	140	0,0413	-61,20	260	0,0594	85,35
20	0,0316	38,28	145	0,0385	-56,63	265	0,0601	87,69
25	0,0336	45,31	150	0,0360	-51,38	270	0,0604	90,00
30	0,0360	51,38	155	0,0336	-45,31	275	0,0601	-87,69
35	0,0385	56,63	160	0,0316	-38,28	280	0,0594	-85,35
40	0,0413	61,20	165	0,0300	-30,15	285	0,0582	-82,95
45	0,0441	65,24	170	0,0288	-20,92	290	0,0566	-80,47
50	0,0469	68,84	175	0,0281	-10,74	295	0,0545	-77,86
55	0,0497	72,10	180	0,0278	0,00	300	0,0522	-75,09
60	0,0522	75,09	185	0,0281	10,74	305	0,0497	-72,10
65	0,0545	77,86	190	0,0288	20,92	310	0,0469	-68,84
70	0,0566	80,47	195	0,0300	30,15	315	0,0441	-65,24
75	0,0582	82,95	200	0,0316	38,28	320	0,0413	-61,20
80	0,0594	85,35	205	0,0336	45,31	325	0,0385	-56,63
85	0,0601	87,69	210	0,0360	51,38	330	0,0360	-51,38
90	0,0604	90,00	215	0,0385	56,63	335	0,0336	-45,31
95	0,0601	-87,69	220	0,0413	61,20	340	0,0316	-38,28
100	0,0594	-85,35	225	0,0441	65,24	345	0,0300	-30,15
105	0,0582	-82,95	230	0,0469	68,84	350	0,0288	-20,92
110	0,0566	-80,47	235	0,0497	72,10	355	0,0281	-10,74
115	0,0545	-77,86	240	0,0522	75,09	360	0,0278	0,00
120	0,0522	-75,09						

Al igual que pasaba con los resultados de los cálculos para la corriente, en este caso, cabe destacar que todos los resultados de la fuerza resultante de las presiones del viento, están plasmados en este proyecto en valor absoluto para facilitar su comprensión sobre el gráfico. El signo se ha obviado ya que solamente indica el sentido de la fuerza que ejerce el viento sobre el buque y, usando la lógica, se puede deducir sin ningún problema hacia donde actúa esa fuerza.

En la figura 2.26 podemos ver como, efectivamente, tal y como se ha comentado anteriormente con los resultados de la tabla 2.11, los valores mínimos se consiguen cuando el viento relativo incide sobre la obra muerta del buque por proa o por popa y los valores máximos se consiguen cuando el viento incide por el través. Eso es lógico si tenemos en cuenta que el buque tiene mayor

área longitudinal que transversal donde incide el viento.

Ahora bien, los datos calculados para un viento relativo de 1 nudo, de momento no nos son demasiado útiles ya que la fuerza que hace sobre el buque es ínfimo comparado con un viento relativo normal de 10 nudos. Por otra parte, más adelante se usarán los datos de la tabla 2.11, para sacar la misma relación entre velocidades y fuerzas resultantes que se ha sacado con la corriente.

Si seguimos, calculando la fuerza resultante para un viento relativo mayor, 10 nudos de velocidad relativa, obtenemos los resultados de la tabla 2.12.

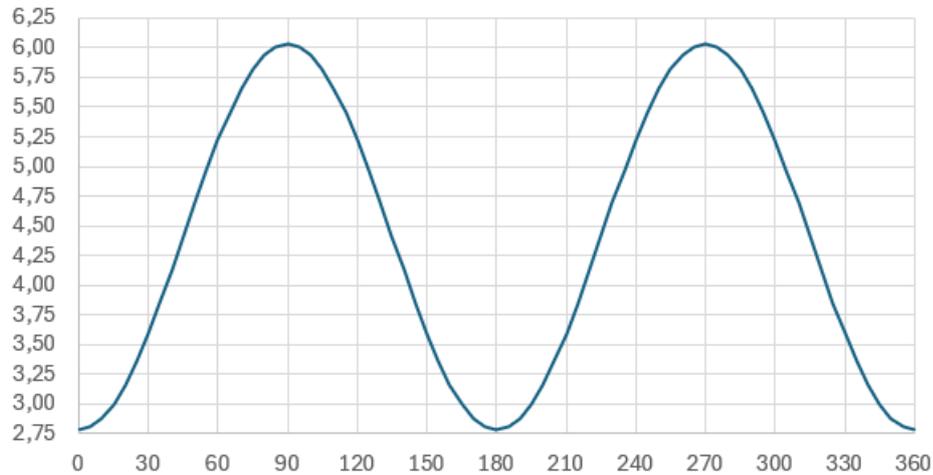
**Cuadro 2.12:** Valores de  $R_{VP}$  con viento relativo de 10 nudos

$\alpha_{vr}$	$R_{VP}$	$\alpha_{vr}$	$R_{VP}$	$\alpha_{vr}$	$R_{VP}$
0	2,784	125	4,966	245	5,455
5	2,809	130	4,692	250	5,655
10	2,882	135	4,410	255	5,818
15	3,002	140	4,128	260	5,938
20	3,164	145	3,854	265	6,011
25	3,365	150	3,597	270	6,036
30	3,597	155	3,365	275	6,011
35	3,854	160	3,164	280	5,938
40	4,128	165	3,002	285	5,818
45	4,410	170	2,882	290	5,655
50	4,692	175	2,809	295	5,455
55	4,966	180	2,784	300	5,223
60	5,223	185	2,809	305	4,966
65	5,455	190	2,882	310	4,692
70	5,655	195	3,002	315	4,410
75	5,818	200	3,164	320	4,128
80	5,938	205	3,365	325	3,854
85	6,011	210	3,597	330	3,597
90	6,036	215	3,854	335	3,365
95	6,011	220	4,128	340	3,164
100	5,938	225	4,410	345	3,002
105	5,818	230	4,692	350	2,882
110	5,655	235	4,966	355	2,809
115	5,455	240	5,223	360	2,784
120	5,223				

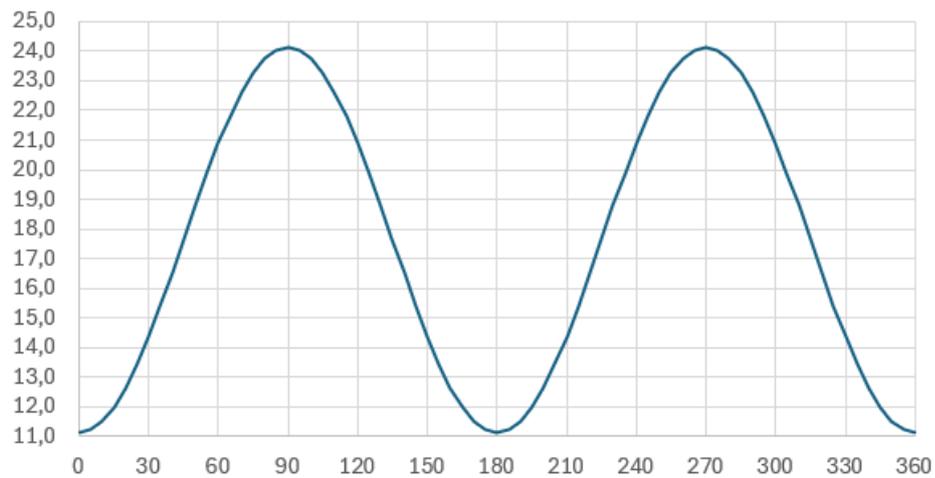
En este momento nos damos cuenta de que los valores de la fuerza resultante son mayores, pero, tal y como pasaba con la corriente, no son 10 veces mayor como podría uno pensar. Pero, veamos los gráficos 2.27, 2.28, 2.29 y

2.30.

**Figura 2.27:** Resultado de  $R_{VP}$  con 10 nudos de velocidad de viento relativo

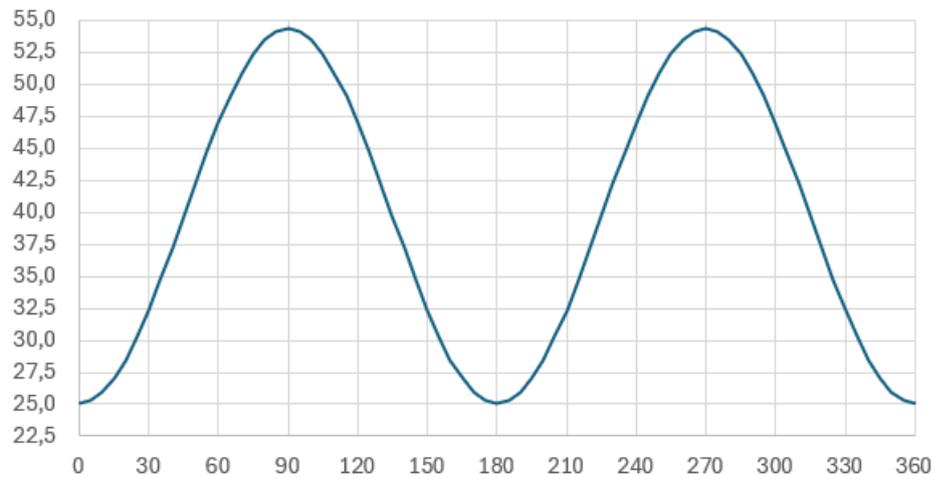


**Figura 2.28:** Resultado de  $R_{VP}$  con 20 nudos de velocidad de viento relativo

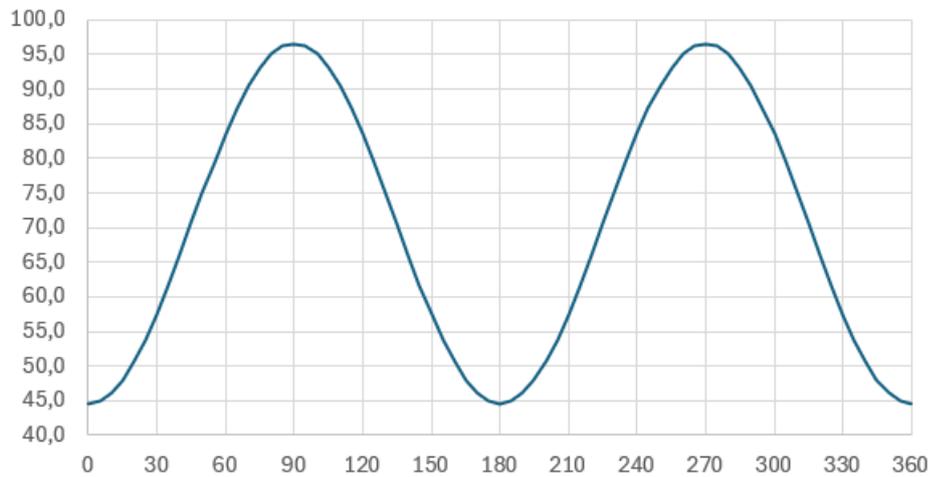


Observando estos gráficos nos damos cuenta de que, de igual manera que pasaba con la corriente, la forma del gráfico que sigue la fuerza resultante al incidir el viento sobre la obra muerta de un buque desde distintos ángulos, no varía según la velocidad del viento relativo. Por ello, vamos a centrarnos en los valores de la fuerza resultante cuando  $\alpha_{vr} = 0^\circ$  y  $\alpha_{vr} = 90^\circ$  en los 4 casos de velocidades relativas mencionados. De esta manera, de igual manera que se ha hecho con la corriente, se va a sacar una relación para, a partir de los valores de la tabla 2.11 y sabiendo la velocidad relativa del viento en cualquier momento, podamos sacar la  $R_{VP}$  para la nueva velocidad.

**Figura 2.29:** Resultado de  $R_{VP}$  con 30 nudos de velocidad de viento relativo



**Figura 2.30:** Resultado de  $R_{VP}$  con 40 nudos de velocidad de viento relativo



Sustituyendo los datos deseados en la fórmula 2.11 obtenemos los siguientes datos:

- $V_{vr} = 10$  nudos

- $\alpha_{vr} = 0^\circ$

$$R_{VP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,3 \cdot 5,144^2 (1296 \cdot \cos^2 0 + 2809,8 \cdot \sin^2 0) = 2,784$$

- $\alpha_{vr} = 90^\circ$

$$R_{VP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,3 \cdot 5,144^2 (1296 \cdot \cos^2 90 + 2809,8 \cdot \sin^2 90) = 6,036$$

■  $V_{vr} = 20$  nudos

•  $\alpha_{vr} = 0^\circ$

$$R_{VP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,3 \cdot 10,289^2 (1296 \cdot \cos^2 0 + 2809,8 \cdot \sin^2 0) = 11,136$$

•  $\alpha_{vr} = 90^\circ$

$$R_{VP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,3 \cdot 10,289^2 (1296 \cdot \cos^2 90 + 2809,8 \cdot \sin^2 90) = 24,143$$

■  $V_{vr} = 30$  nudos

•  $\alpha_{vr} = 0^\circ$

$$R_{VP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,3 \cdot 15,433^2 (1296 \cdot \cos^2 0 + 2809,8 \cdot \sin^2 0) = 25,056$$

•  $\alpha_{vr} = 90^\circ$

$$R_{VP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,3 \cdot 15,433^2 (1296 \cdot \cos^2 90 + 2809,8 \cdot \sin^2 90) = 54,322$$

■  $V_{vr} = 40$  nudos

•  $\alpha_{vr} = 0^\circ$

$$R_{VP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,3 \cdot 20,578^2 (1296 \cdot \cos^2 0 + 2809,8 \cdot \sin^2 0) = 44,543$$

•  $\alpha_{vr} = 90^\circ$

$$R_{VP} = \frac{1,03}{2 \cdot 9,81} \cdot 1,3 \cdot 20,578^2 (1296 \cdot \cos^2 90 + 2809,8 \cdot \sin^2 90) = 96,572$$

Ahora, teniendo estos resultados, si dividimos cualquiera de los resultados con su respectivo resultado con un nudo de velocidad relativa, vamos a ver que siempre va a dar el cuadrado de la velocidad relativa del viento calculado. Por ejemplo, en el tercer caso, cogiendo el resultado obtenido para un ángulo

de 90° con un viento relativo de 30 nudos y lo dividimos entre su respectivo resultado para un viento relativo de 1 nudo, da lo siguiente:

$$\frac{54,322}{0,0604} = 899,37$$

Como se puede apreciar en la fórmula 2.11, la velocidad relativa del viento va elevado al cuadrado, por lo que vamos a proceder a calcular la raíz cuadrada del resultado anterior, dando el valor de la velocidad relativa del viento nuevo estudiado.

$$\sqrt{899,37} = 29,99$$

Cabe destacar que, ya que un viento relativo de 1 nudo ejerce una fuerza tan pequeña sobre el buque, los resultados van a tener un pequeño error debido a que la cantidad de decimales que se deberían coger para conseguir un cálculo exacto es muy grande. Sin embargo, para un cálculo rápido para tener un resultado orientativo, es más que suficiente. Eso se va a ver reflejado en los siguientes ejemplos.

Para no quedarse con la duda de si eso pudiese ser una coincidencia, hagamos el proceso a la inversa y establezcamos una función para definir esta relación y probemos que funciona realmente con algunos de los resultados calculados anteriormente.

La relación, según los resultados obtenidos es la siguiente:

$$R_{VP_{1nudo}} = \frac{R'_{VP}}{V'_{vr}{}^2}$$

$$R_{VP_{1nudo}} \cdot V'_{vr}{}^2 = R'_{VP} \quad (2.15)$$

Esta relación se puede demostrar de la siguiente manera. Se divide  $R_{VP}$  entre  $R'_{VP}$ . Al ser todo constante excepto la velocidad relativa del viento, se puede simplificar, resultando lo siguiente:

$$\frac{R_{VP_{1nudo}}}{R'_{VP}} = \frac{V_{vr}^2}{V'_{vr}{}^2}$$

Al estar  $V_{vr}$  y  $V'_{vr}$  dividiendo, las unidades que se usen en este caso, no importa, por lo que se ha tomado de referencia la tabla de valores de un nudo para facilitar los cálculos ya que en la mar se usan siempre nudos. De esta manera, al ser  $V_{vr} = 1$  nudo, obtenemos la ecuación 2.15.

De esta manera, mucho más simple que calculando todos los datos con la ecuación 2.9, tomando de referencia la tabla 2.11, podemos obtener cualquier resultado solo sabiendo la velocidad relativa del viento estudiado.

Hagamos la prueba para 10 nudos de velocidad relativa por la proa y para 20 y 40 nudos por el través:

$$0,0278 \cdot 10^2 = 2,78 \approx 2,784 \text{ (valor calculado con la fórmula 2.11)}$$

$$0,0604 \cdot 20^2 = 24,16 \approx 24,143 \text{ (valor calculado con la fórmula 2.11)}$$

$$0,0604 \cdot 40^2 = 96,64 \approx 96,572 \text{ (valor calculado con la fórmula 2.11)}$$

Además, como conclusión extra, a partir de esta relación nos damos cuenta de que, a medida que aumente la velocidad relativa del viento, la fuerza resultante que ejerce esta última sobre la obra muerta del buque, aumenta exponencialmente, de igual manera que sucedía con la fuerza que ejercía la corriente sobre el casco del buque.

Ahora bien, estos últimos cálculos se han hecho teniendo en cuenta que el viento relativa incide sobre el buque por la proa o por el través (por la popa o por el otro través, los resultados serían los mismos respectivamente, pero de signo contrario, lo que significa que la fuerza resultante es en sentido contrario). Pero, como sabemos, el viento relativo no siempre incide sobre el buque en esos ángulos por lo que la resultante no va a estar sobre el eje longitudinal

o transversal del buque, si no que vamos a tener que descomponer esa resultante. Para ello, usamos las fórmulas 2.12 y 2.13. Aplicando estas fórmulas y tomando de referencia esta vez la tabla de resultados 2.12 para no trabajar con unos números tan pequeños, obtenemos en primer lugar los resultados de la tabla 2.13.

**Cuadro 2.13:** Valores de  $F_{LVP}$  para un viento relativo de 10 nudos

$R_{VP}$	$\alpha_{vr}$	$F_{LVP}$
2,784	0	2,784
2,809	5	2,798
2,882	10	2,838
3,002	15	2,900
3,164	20	2,974
3,365	25	3,049
3,597	30	3,115
3,854	35	3,157
4,128	40	3,162
4,410	45	3,118
4,692	50	3,016
4,966	55	2,848
5,223	60	2,611
5,455	65	2,305
5,655	70	1,934
5,818	75	1,506
5,938	80	1,031
6,011	85	0,524
6,036	90	0,000
6,011	95	0,524
5,938	100	1,031
5,818	105	1,506
5,655	110	1,934
5,455	115	2,305
5,223	120	2,611

$R_{VP}$	$\alpha_{vr}$	$F_{LVP}$
4,966	125	2,848
4,692	130	3,016
4,410	135	3,118
4,128	140	3,162
3,854	145	3,157
3,597	150	3,115
3,365	155	3,049
3,164	160	2,974
3,002	165	2,900
2,882	170	2,838
2,809	175	2,798
2,784	180	2,784
2,809	185	2,798
2,882	190	2,838
3,002	195	2,900
3,164	200	2,974
3,365	205	3,049
3,597	210	3,115
3,854	215	3,157
4,128	220	3,162
4,410	225	3,118
4,692	230	3,016
4,966	235	2,848
5,223	240	2,611

$R_{VP}$	$\alpha_{vr}$	$F_{LVP}$
5,455	245	2,305
5,655	250	1,934
5,818	255	1,506
5,938	260	1,031
6,011	265	0,524
6,036	270	0,000
6,011	275	0,524
5,938	280	1,031
5,818	285	1,506
5,655	290	1,934
5,455	295	2,305
5,223	300	2,611
4,966	305	2,848
4,692	310	3,016
4,410	315	3,118
4,128	320	3,162
3,854	325	3,157
3,597	330	3,115
3,365	335	3,049
3,164	340	2,974
3,002	345	2,900
2,882	350	2,838
2,809	355	2,798
2,784	360	2,784

Por otra parte, tenemos la componente transversal, cuyos resultados son los plasmados en la tabla 2.14.

Para entender mejor los datos de ambas tablas, véase el gráfico 2.31.

Cabe destacar que, tanto en las tablas 2.13 y 2.14, como en el gráfico 2.31, los resultados plasmados están en valor absoluto para evitar confusiones y simplificar la comprensión.

De igual manera que pasaba con la corriente, previamente a realizar los

**Cuadro 2.14:** Valores de  $F_{TVP}$  para un viento relativo de 10 nudos

$R_{VP}$	$\alpha_{vr}$	$F_{TVP}$
2,784	0	0,000
2,809	5	0,245
2,882	10	0,500
3,002	15	0,777
3,164	20	1,082
3,365	25	1,422
3,597	30	1,798
3,854	35	2,210
4,128	40	2,653
4,410	45	3,118
4,692	50	3,594
4,966	55	4,068
5,223	60	4,523
5,455	65	4,944
5,655	70	5,314
5,818	75	5,620
5,938	80	5,848
6,011	85	5,988
6,036	90	6,036
6,011	95	5,988
5,938	100	5,848
5,818	105	5,620
5,655	110	5,314
5,455	115	4,944
5,223	120	4,523

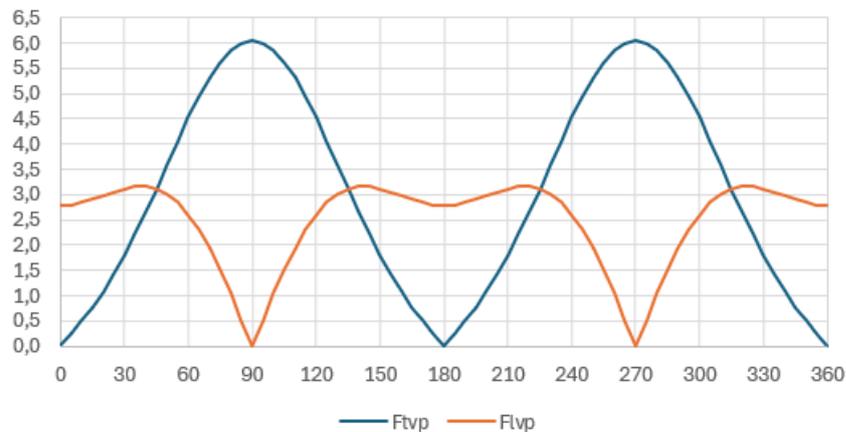
$R_{VP}$	$\alpha_{vr}$	$F_{TVP}$
4,966	125	4,068
4,692	130	3,594
4,410	135	3,118
4,128	140	2,653
3,854	145	2,210
3,597	150	1,798
3,365	155	1,422
3,164	160	1,082
3,002	165	0,777
2,882	170	0,500
2,809	175	0,245
2,784	180	0,000
2,809	185	0,245
2,882	190	0,500
3,002	195	0,777
3,164	200	1,082
3,365	205	1,422
3,597	210	1,798
3,854	215	2,210
4,128	220	2,653
4,410	225	3,118
4,692	230	3,594
4,966	235	4,068
5,223	240	4,523

$R_{VP}$	$\alpha_{vr}$	$F_{TVP}$
5,455	245	4,944
5,655	250	5,314
5,818	255	5,620
5,938	260	5,848
6,011	265	5,988
6,036	270	6,036
6,011	275	5,988
5,938	280	5,848
5,818	285	5,620
5,655	290	5,314
5,455	295	4,944
5,223	300	4,523
4,966	305	4,068
4,692	310	3,594
4,410	315	3,118
4,128	320	2,653
3,854	325	2,210
3,597	330	1,798
3,365	335	1,422
3,164	340	1,082
3,002	345	0,777
2,882	350	0,500
2,809	355	0,245
2,784	360	0,000

cálculos pertinentes, uno podría pensar que habría los máximos de fuerza en el eje longitudinal cuando  $\alpha_{vr} = 0^\circ$  o cuando  $\alpha_{vr} = 180^\circ$ , cuando lo cierto es que, una vez realizados los cálculos, en valor absoluto, en esos puntos lo que obtenemos son unos mínimos relativos. Esto sucede debido a la poca superficie que tiene el buque en el plano transversal en relación a la gran superficie que tiene el buque en el plano longitudinal. En cambio, como sí es lógico, los dos mínimos absolutos se obtienen cuando la corriente relativa incide por el través, de manera que no ejerce nada de fuerza sobre el eje longitudinal del buque.

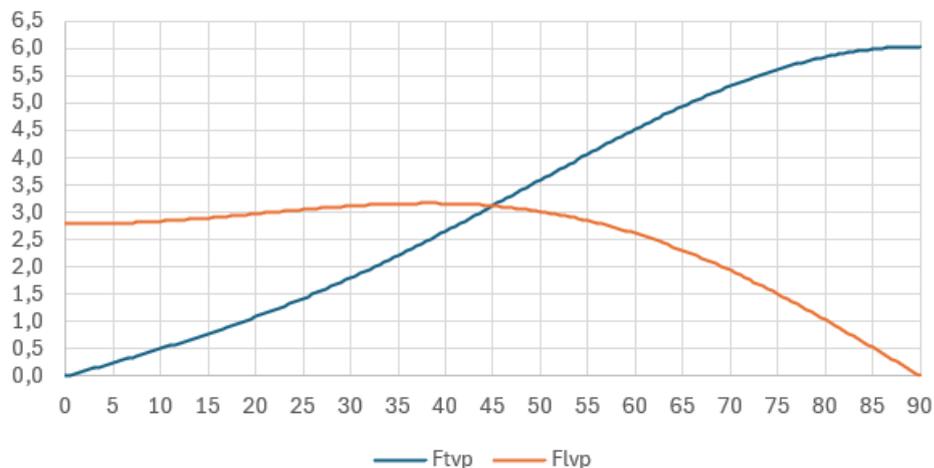
Fijándonos ahora en los resultados de  $F_{TVP}$ , vemos lo esperado, dos máximos absolutos cuando el viento incide por el través y dos mínimos cuando el viento incide por proa o por popa.

**Figura 2.31:** Resultado de  $F_{LVP}$  y  $F_{TVP}$  con 10 nudos de velocidad de viento relativo



Por otra parte, volviendo a los resultados de  $F_{LVP}$  vemos que tenemos 4 máximos iguales absolutos. Aunque, no sabemos exactamente donde están estos máximos, así que, ampliando el primer cuadrante (desde  $\alpha_{vr} = 0^\circ$  hasta  $\alpha_{vr} = 90^\circ$ ) obtenemos el gráfico 2.32.

**Figura 2.32:** Resultado de  $F_{LVP}$  y  $F_{TVP}$  entre  $\alpha_{vr} = 0^\circ$  y  $\alpha_{vr} = 90^\circ$



Como se puede observar, el máximo de la componente longitudinal de la fuerza resultante, se da en un ángulo de  $\alpha_{vr} = 38^\circ$ <sup>12</sup>.

Ahora, observando el gráfico 2.31 podemos ver como los máximos de la componente longitudinal de la fuerza resultante de las presiones, se producen

<sup>12</sup>Este valor está calculado en una hoja de cálculo a parte para tener mayor precisión, aunque no se han puesto los resultados en el proyecto ya que no tienen mayor relevancia excepto el valor máximo estudiado. Cabe destacar que este valor tiene una certeza de  $0,5^\circ$  ya que es el intervalo cada cuanto se ha calculado el valor de  $F_{LVP}$  para realizar el gráfico 2.32.

cuando el viento relativo incide por  $52^\circ$  a proa y a popa de cada través.

#### **2.4.2. Cálculo del momento resultante causado por el viento**

El segundo cálculo que se ha realizado, es el cálculo del momento resultante causado por la incidencia del viento sobre el buque debido a la excentricidad del punto de aplicación  $t$  de la fuerza del viento respecto del centro de gravedad del buque.

Para llevar a cabo estos cálculos, se ha utilizado toda la información aportada y explicada en el apartado 2.3.3, concretamente se ha usado la fórmula 2.14.

Para calcular estos momentos en cada situación, se tomarán los datos de la componente transversal de la fuerza resultante necesarios calculados en el subapartado anterior.

Al no disponer de los datos precisos del coeficiente de excentricidad del buque, usaremos los datos aproximados de la tabla 2.10.

En este caso, tenemos dos posibles situaciones que debemos estudiar por separado: el buque en lastre y el buque cargado <sup>13</sup>.

En este apartado, a diferencia de con los cálculos del momento causado por la corriente, hemos calculado el momento al que se somete el barco según sus diferentes calados (aunque algunos de ellos no sean calados con suficiente estabilidad para navegar) debido a la incidencia del viento ya que varía mucho según cuanta obra muerta tenga en el momento del estudio. En cualquier calado, todos los gráficos sacados para los resultados de los cálculos de la corriente, tenían la misma forma (con unos resultados mayores o menores, pero con la misma forma). Sin embargo, ahora se va a ver que con el viento y el cálculo del momento resultante, no ocurre lo mismo.

---

<sup>13</sup>Se han tomado como calados del buque en lastre 8 metros y cargado 17 metros. Hay que tener en cuenta que el resto de cálculos se han hecho con un calado medio de 16 metros, ya que era lo habitual durante mi período de embarque en el buque.

**Cuadro 2.15:** Valores de  $M_{TV}$  para un calado en lastre de 8 metros y un viento relativo de 10 nudos

$\alpha_{vr}$ (en °)	$M_{TV}$	$K_{ev}$
0	0,000	0,000
30	2,670	0,160
60	2,402	0,050
90	-2,660	-0,040
120	-8,646	-0,180
150	-5,508	-0,330
180	0,000	0,000

**Cuadro 2.16:** Valores de  $M_{TV}$  para un calado en plena carga de 17 metros y un viento relativo de 10 nudos

$\alpha_{vr}$ (en °)	$M_{TV}$	$K_{ev}$
0	0,000	0,000
30	-1,044	-0,100
60	-3,059	-0,120
90	-5,395	-0,160
120	-6,883	-0,270
150	-3,862	-0,370
180	0,000	0,000

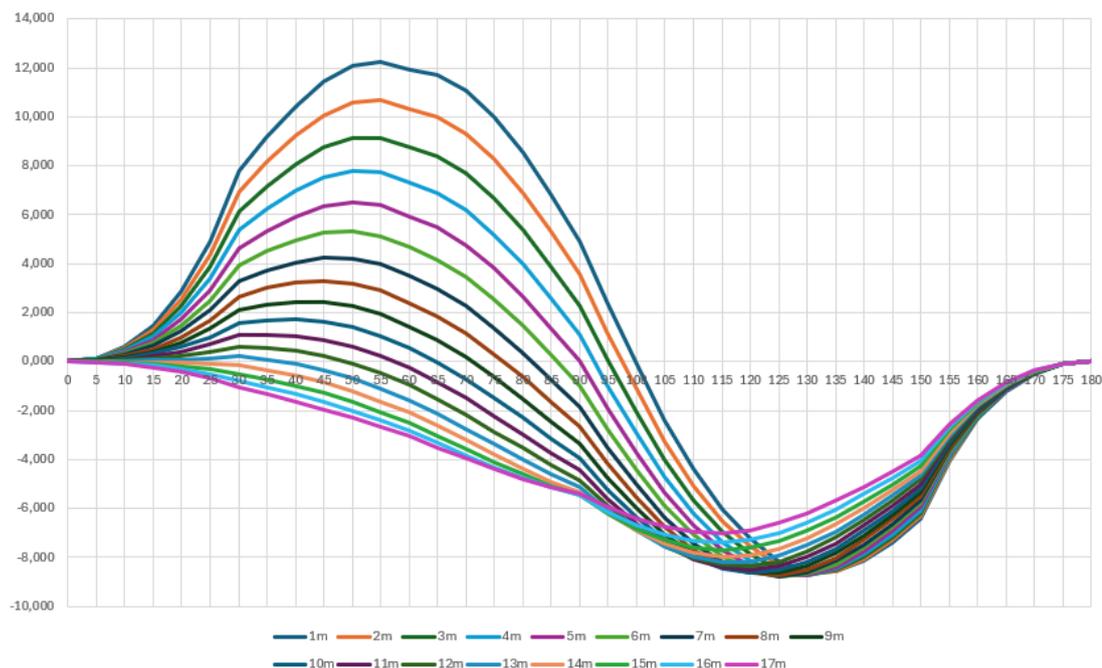
Como se ha comentado en el apartado 2.3.3, se considera un momento positivo cuando hace caer el buque hacia babor y negativo cuando hace caer el buque hacia estribor.

De igual manera que cada cálculo que se hace, véanse los datos plasmados sobre el gráfico 2.33 junto a los resultados de los momentos transversales en cada situación de carga del buque.

Cabe destacar que aunque en las tablas 2.15 y 2.16 solo aparecen los datos cada 30°, para realizar el gráfico se ha calculado el momento cada 5° interpolando los datos de  $K_{ev}$  para obtener un gráfico más exacto.

Como se puede observar, tenemos algunas situaciones de carga donde, dependiendo del ángulo de incidencia del viento, tenemos momentos positivos o momentos negativos. Estos son desde 1 metro de calado hasta los 13

**Figura 2.33:** Resultados de  $M_{TV}$  con 10 nudos de velocidad de viento relativo



metros de calado (ambos incluidos), lo cual significa que navegando con uno de estos calados, por ejemplo, en 8 metros, en lastre, vamos a tener un ángulo de incidencia del viento relativo que es neutro, es decir, que no va a hacer caer la proa del buque hacia ninguna banda. Por ejemplo, para 8 metros de calado, este ángulo neutro está entre  $75^\circ$  y  $80^\circ$ . Cabe destacar también que, cuanto menor sea el calado, mayor va a ser ese ángulo neutro y por lo contrario, cuanto mayor sea el calado, menor será el ángulo neutro. Eso viene dado porque, cuanto menor es el calado, mayor es el francobordo, por lo que este coge mucha importancia frente a la superestructura situada en popa. En cambio, cuanto mayor es el calado, mayor importancia coge la superestructura, creando un momento muy pronto que tiende a orzar el buque. Esto último se demuestra con que a partir de los 14 metros, todos los momentos son negativos, es decir que el buque se aproa al viento excepto con un ángulo de incidencia del viento relativo de  $0^\circ$  o  $180^\circ$ .

## 2.5. Hélices

Una vez explicados y calculados los efectos debidos a la corriente y al viento que afectan a un buque, vamos a estudiar, que medios tiene el buque para maniobrar y hacer frente a los efectos estudiados. Sin embargo, a su vez, estos mismos elementos tienen otros efectos que deberemos tener en cuenta a la hora de llevar a cabo alguna maniobra con un buque. Lo primero de que dispone el buque para hacer frente a todos los efectos meteorológicos estudiados anteriormente, es el sistema de propulsión. En este caso nos centraremos en los tipos de hélices, ventajas y desventajas de cada una y que otros efectos tienen estas mismas sobre el buque según su tipo o el número de hélices que lleven.

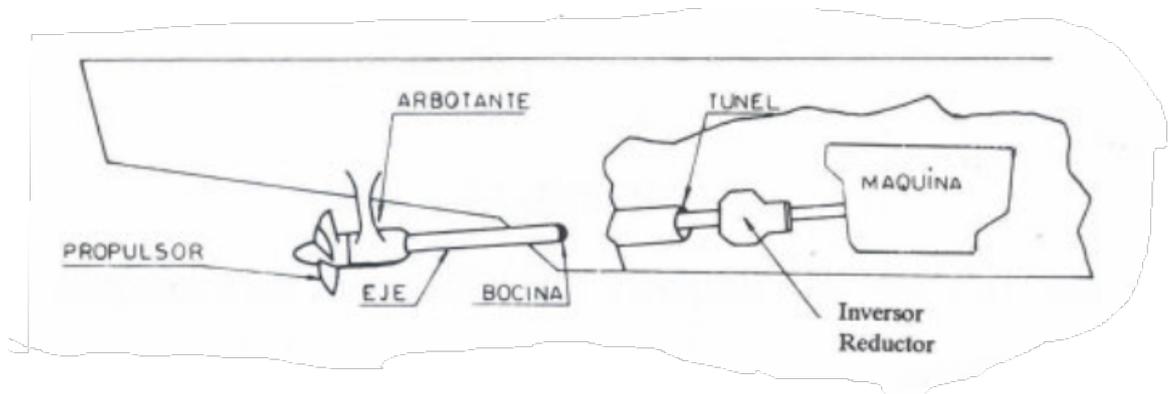
### 2.5.1. Conceptos generales de las hélices

El sistema de propulsión es el conjunto mecánico que da energía al buque y permite que este avance. A pesar de que todos los sistemas de propulsión varían en cada barco, en la mayoría de casos, los sistemas de propulsión de un buque consta de 4 partes[12]:

- Motores: Esta parte es la encargada de transformar el combustible en la energía mecánica necesaria para impulsar el buque. Cabe destacar que estos motores no siempre tienen la finalidad de aportar la energía mecánica, si no que, como se verá más adelante, en algunos casos, van a ser generadores eléctricos.
- Caja reductora: Esta parte es la encargada de adaptar las revoluciones del motor a las requeridas sobre el eje de la hélice. Estas cajas reductoras, a parte de ser reductoras, a veces pueden actuar también como inversores, de manera que permita al eje de la hélice girar en ambos sentidos.
- Eje de propulsión: Es la parte que transmite la energía mecánica desde la reductora hasta la hélice.

- Propulsores o hélices: Hay muchos tipos de hélices, los cuales se van a explicar los casos más comunes y utilizados. Esta es la parte encargada de transformar la energía mecánica del eje de propulsión en un chorro de agua que va a empujar el buque. Por esta razón, al ser esta la parte propiamente dicho, encargada de impulsar el barco, vamos a centrarnos en ella.

**Figura 2.34:** Partes del sistema propulsor general de un buque



**Fuente:** Tratado de maniobra: Tomo I, E. Barbudo[13]

Como se ha comentado, hay muchos tipos de hélices y propulsores (algunos de ellos no requieren de las cuatro partes explicadas anteriormente y otras necesitan alguna parte mas), los cuales se van a explicar con detenimiento más adelante. Dichos tipos de propulsores son los siguientes:

- Hélice convencional de paso fijo.
- Hélice convencional de paso variable.
- Hélice de paso controlable.
- Hélice con tobera.
- Propulsor azimutal.
- Hélice cicloidal.
- Water jet.

- Otros tipos de hélices usadas para las maniobras y no para propulsar el buque:
  - Hélice de proa transversal.
  - Hélice de proa azimutal.

Para entender cada tipo de hélice, su funcionamiento y sus ventajas y desventajas, se tienen que tener claras todas las partes de una hélice y saber como funciona.

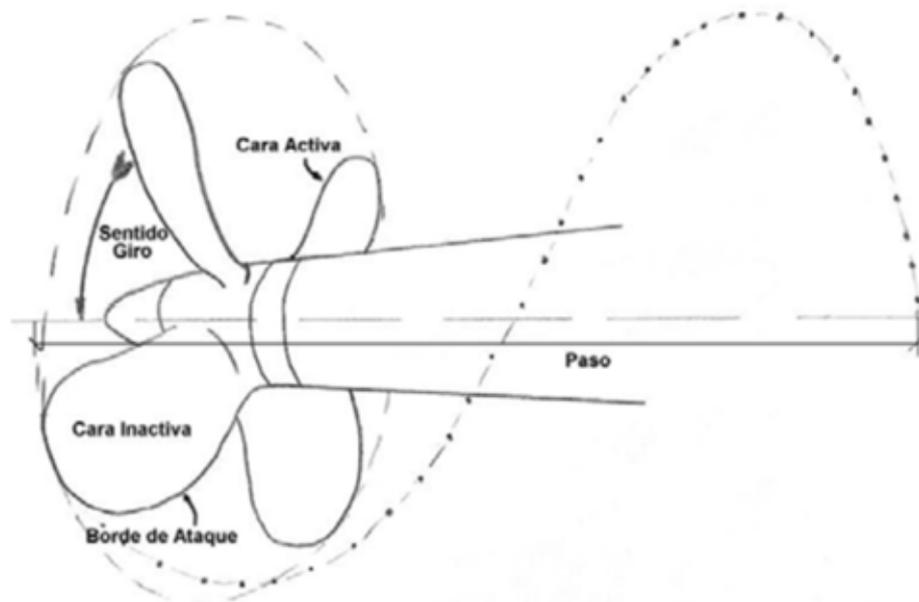
El funcionamiento de una hélice se basa en una diferencia de flujo entre las dos caras de una pala, la cara activa y la cara pasiva. Este flujo que es el que provoca el empuje, va a depender del ángulo de la pala, llamado paso[14]. Para ello, y ayudándonos de la imagen 2.35, la pala tiene las siguientes partes:

- Núcleo: cuerpo cilíndrico al que se unen las palas.
- Capacete: pieza cónica colocada y fijada en la parte de popa en el centro del núcleo
- Eje: barra al que van acopladas las palas y el núcleo. Es el elemento que hace girar las palas.
- Palas: piezas acopladas al núcleo que proporcionan un empuje al buque. Las palas constan de 4 partes:
  - Borde de ataque: es la arista por la que entra el agua a la pala.
  - Arista de salida: es la arista por la que sale el agua de la pala.
  - Cara activa: es la cara que empuja el chorro del agua.
  - Cara pasiva: es la cara contraria a la activa.

Por otra parte, cabe destacar algunas de las características que tiene una hélice.

- Sentido de giro de la hélice: las hélices pueden ser levógiras, (aquellas que giran en sentido antihorario al ir avante visto desde la popa) o dex-

**Figura 2.35:** Partes de una hélice



**Fuente:** El sistema propulsivo del buque: las hélices marinas y el fenómeno de la cavitación, R. H. Zurita

tróginas (aquellas que giran en sentido horario al ir avante visto desde la popa)[15].

- Paso: es la distancia que avanzaría una hélice a través de un sólido con una vuelta[16].
- Retroceso: es la diferencia entre el avance teórico dado por el paso de la hélice y el avance real del buque[17].

### 2.5.2. Hélices convencionales

Las hélices convencionales de paso fijo son las primeras hélices que se usaron. Hoy en día hay muchos tipos de hélices convencionales, las cuales podemos clasificar de tres maneras. Una manera es según el número de palas<sup>14</sup>, las cuales existen de:

<sup>14</sup>No se va a entrar a explicar en profundidad cada tipo de hélice enumerado a continuación ya que no es parte del objetivo de este trabajo.

- 1 pala. Las hélices monopalas tienen el inconveniente de que no están compensadas por la falta de la masa de la pala opuesta. Por esa razón, lo que se hace es poner una pequeña masa en la unión de la pala con el núcleo[14].
- 2 palas. Las hélices bipalas son las más usadas en veleros debido a su sencillez de fabricación.[14].
- 3 palas. Las tres palas de este tipo de hélices están repartidas equitativamente a lo largo del núcleo de manera que se compensen las masas y se eviten vibraciones[14].
- 4 palas o mas. Este tipo de hélices son las más usadas en los buques mercantes debido a que son las hélices que mayor torque absorben para impulsar el buque[18].

**Figura 2.36:** Hélices de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 palas



**Fuente:** centramar.es

Otra manera de clasificar las hélices convencionales es según su material, lo cual no afecta al objetivo de este trabajo, por lo que simplemente se nom-

brarán algunos de los materiales utilizados: aluminio, bronce, acero inoxidable, acero al carbono, carbono y materiales compuestos[14].

**Figura 2.37:** Hélices de aluminio, bronce, acero inoxidable y carbono



**Fuente:** centramar.es

La última manera de clasificar las hélices convencionales y la clasificación más importante para este trabajo es según la forma de las palas. Las palas pueden ser de paso fijo o de paso variable <sup>15</sup>. Cabe destacar que este tipo de hélices requiere o un inversor para cambiar el sentido de giro de las hélices o que el motor gire en el sentido contrario para cambiar de avance a atrás.

- Hélices de paso fijo. También conocidas como hélices de paso constante, son las más usadas debido a su sencillez y a su bajo coste de fabricación. Este tipo de hélices tienen la peculiaridad de que sus palas, exceptuando los ángulos donde se unen las palas con el núcleo de la hélice, en todo su radio, el paso es constante. Eso, a diferencia del siguiente tipo de hélice, hace que las puntas de las palas estén sometidas a un mayor esfuerzo. Para una velocidad en concreto, este tipo de hélice es más eficiente que la hélice de paso variable. Sin embargo, al variar la velocidad de rotación y por lo tanto del buque, la hélice pierde eficacia debido a que el paso ya no es el óptimo para el régimen de marcha[12].
- Hélice de paso variable. Este tipo de hélices tienen aplicación en buques grandes o de alta velocidad donde conseguir la máxima eficacia es primordial. La peculiaridad de este tipo de hélices es que, como su nombre

<sup>15</sup>No se deben confundir con hélices de paso controlable.

**Figura 2.38:** Hélices de paso fijo



**Fuente:** fundicionesrice.com

indica, el paso de sus palas varía según aumenta el radio, dependiendo de su diseño, pero generalmente, siendo en las puntas de la hélice, de paso menor. Con eso se consigue evitar, en mayor medida, el efecto de cavitación y de la misma manera, reducir los esfuerzos en los extremos de las palas[12].

Las ventajas de las hélices convencionales, sean de paso fijo o variable, son varias[19]:

- Bajo coste de fabricación en comparación con otros tipos de hélices.
- Bajo mantenimiento y bajo costo de reparaciones.
- Debido a los grandes avances en los estudios hidrodinámicos, se han mejorado mucho este tipo de hélices, lo que se traduce en una mayor eficacia en la navegación. Esto implica un menor consumo de combustible, conllevando a una reducción de gases de escape a la atmósfera.
- El montaje de la hélice sobre el eje es muy sencillo gracias a que las palas y el núcleo es un mismo sólido.

**Figura 2.39:** Hélices de paso variable del buque hospital Esperanza del Mar



**Fuente:** Foto tomada por el oficial de puente Kevin Señedo

### 2.5.3. Hélice de paso controlable

Las hélices de paso controlable o también llamadas CPP<sup>16</sup>, son aquellas hélices en las cuales, como su nombre indica, se puede controlar el paso. Eso significa que la hélice no es un bloque sólido, si no que las palas pueden moverse sobre un eje perpendicular al eje rotativo que sale del motor propulsor. Por eso mismo, ese tipo de hélice consta de un sistema hidráulico que permite a las palas variar su orientación con el fin de adaptar el paso a la velocidad que se requiera en cada momento.

Cabe destacar que para la instalación de este tipo de hélice, la potencia mínima desarrollada por el motor debe ser de aproximadamente 500kW y deben tener un diámetro mínimo de 1 metro según indican algunos fabricantes, sin límite superior[19].

Este tipo de hélice es muy común en buques de ruta regular o que llevan a cabo muchas maniobras debido a la rápida respuesta de las palas. Estas héli-

---

<sup>16</sup>Control Pitch Propeller.

ces van acopladas a una máquina propulsora que transmite al eje una velocidad de giro constante. Eso significa que las palas giran a velocidad constante, por lo que, al variar el paso, va a proporcionar más o menos empuje sobre el buque. Al tener que poner máquina atrás, lo que se debe hacer es poner un paso negativo en la pala, por lo que la hélice, aún girando en el mismo sentido, va a generar un empuje en sentido opuesto[20].

**Figura 2.40:** Hélice de paso controlable del buque hospital Juan de la Cosa



**Fuente:** Foto tomada por el oficial de puente Kevin Señedo

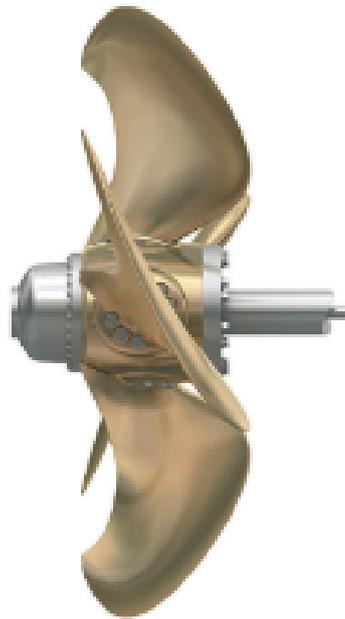
Las ventajas de este tipo de hélices son[19]:

- Gran eficiencia y se aprovecha muy bien el empuje al variar el paso sin cambiar las revoluciones por minuto.
- Rápida respuesta en maniobras.
- No tienen la necesidad de revertir el giro del eje para cambiar el sentido del empuje.
- Se puede ajustar muy bien el paso con el fin de conseguir el empuje requerido en cada situación.

Aunque también aparecen algunas desventajas, como son[19]:

- Alto precio de fabricación y mantenimiento.

**Figura 2.41:** Hélice de paso controlable de la marca Kongsberg



**Fuente:** kongsberg.com

- Necesita sistemas auxiliares que en una hélice convencional no se necesitan.
- A la hora de bajar de velocidad, si se para a paso cero, rompe el flujo de agua que llega al timón y éste pierde mucha capacidad de maniobra.

#### **2.5.4. Hélices con tobera**

Una hélice con tobera es una hélice, generalmente fija, con un tubo de estructura cónica alrededor. Al tener la forma cónica hacia la parte de popa de la embarcación, produce un empuje adicional al de la hélice ya que el agua tiene que pasar a mayor velocidad. De esta manera se consigue un mayor empuje que con una hélice convencional con la misma potencia.

Al ofrecer una resistencia al movimiento vertical y aumentar el empuje, hasta cierto punto reduce el movimiento de cabeceo, por lo que no se pierde tanta

velocidad debido a dicho movimiento. Por otra parte, al aumentar la resistencia de la misma tobera en función del cuadrado de la velocidad de avance, aproximadamente, las aplicaciones con mayor ventajas de las hélices con tobera son en los remolcadores y pesqueros, es decir, buques de fuerte empuje pero de baja velocidad[21].

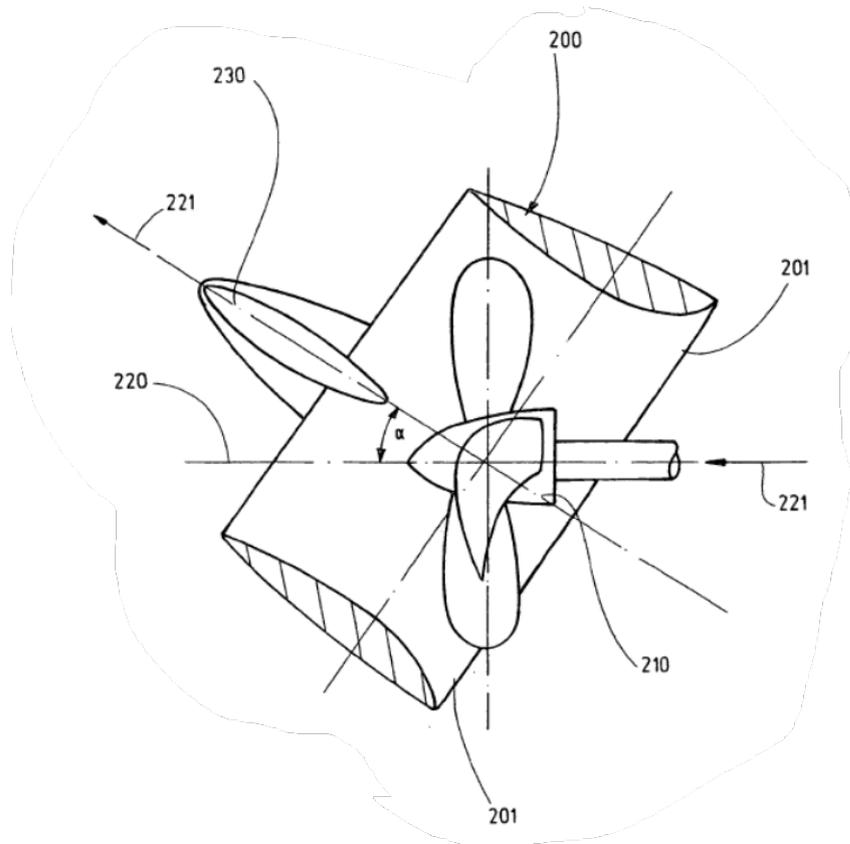
Por otra parte, a la hora de dirigir el chorro y maniobrar, hay distintos tipos de toberas:

- Hélices fijas con toberas fijas: en este caso se requeriría de un timón en la parte de popa de la hélice.
- Hélice fija con tobera giratoria: en este caso, la hélice no gira sobre el eje vertical, sino que simplemente gira la tobera, de forma que quedaría como la imagen 2.42. En este tipo de toberas pueden tener parte del timón por encima, parte en popa y parte del timón por debajo, compartiendo el mismo eje de giro. De esta manera, la tobera impulsaría el chorro del agua hacia una banda u otra, ayudando a maniobrar y el timón recibiría el agua de los finos del buque. Este tipo de hélices con tobera pueden maniobrar con un ángulo máximo de timón de entre 30° o 35° a cada banda[21].
- Hélice con tobera giratorias: Este es el sistema que mayor maniobrabilidad ofrece ya que permite girar la hélice 360° por lo que se puede dirigir el chorro hacia donde se desee.

Finalmente, las ventajas de este tipo de hélices son:

- Mayor empuje con la misma potencia, lo que se traduce en un ahorro del combustible.
- De esta manera, se evita el efecto de las presiones laterales de las palas (efecto explicado en el apartado 2.5.9).

**Figura 2.42:** Esquema de hélice fija con tobera giratoria



**Fuente:** Solicitud de patente de la Tobera Kort, M. Kluge

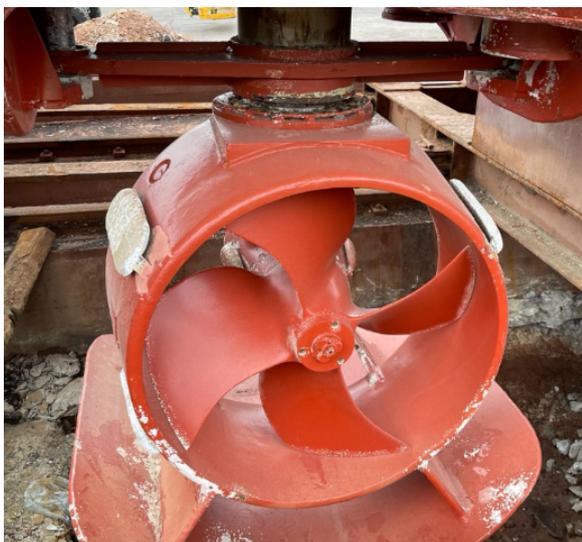
### 2.5.5. Hélices azimutales

Otro tipo de propulsores son las hélices azimutales o Azipod. Ambos tipos son unas hélices instaladas en un sistema rotatorio sobre un eje vertical que permite a la hélice dirigir el chorro de expulsión a los 360°. La diferencia en la denominación de hélice azimutal o los llamados coloquialmente Azipod<sup>17</sup> es que, en el primer caso se trata de una transmisión mecánica y en el segundo caso, la hélice recibe la energía de un motor eléctrico.

Las hélices azimutales de tracción mecánica constan generalmente de 4 partes: el motor de combustión propulsor, caja reductora, eje transmisor y el conjunto azimutal. A su vez, dentro del conjunto azimutal, vamos a tener un eje vertical, conjunto de engranajes para cambiar la dirección del eje transmisor y la hélice.

<sup>17</sup>Azipod es una marca registrada de la empresa ABB Industry Oy.

**Figura 2.43:** Hélice con tobera giratorias de proa del buque hospital Juan de la Cosa



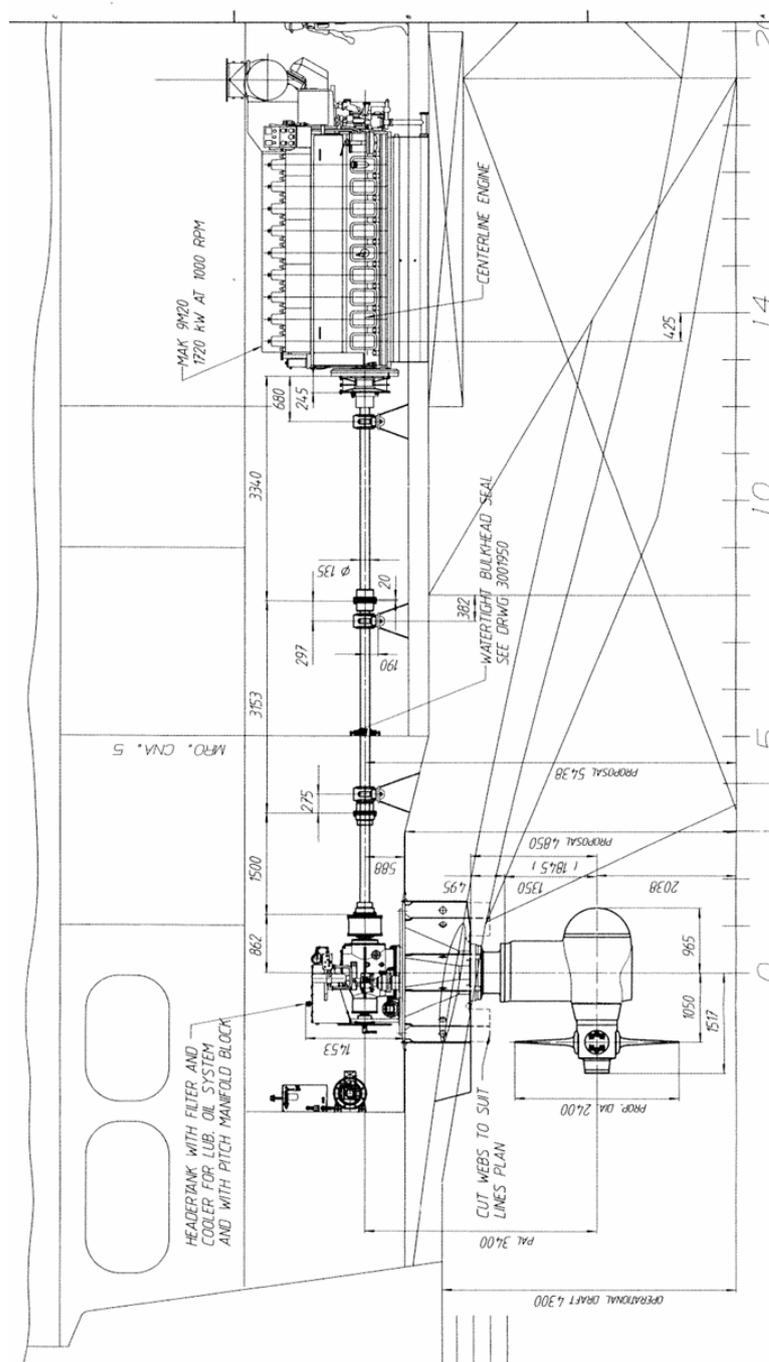
**Fuente:** Foto tomada por el oficial de puente Kevin Señedo

Una manera de diferenciar este tipo de hélices es según el eje de transmisión ya que pueden ser denominados de “eje en Z” o de “eje en L”. Como se puede suponer, el “eje en Z” será el tipo en el que tengamos el motor de combustión, del cual sale un eje horizontal. Este llega hasta la vertical del sistema azimutal, donde mediante una serie de engranajes, pasa la energía a un eje vertical que baja hasta la altura de la hélice donde, mediante otros engranajes, transmite la energía a otro eje horizontal que es el encargado de hacer girar la hélice. Este sistema podemos encontrarlo plasmado en la figura 2.44.

El sistema de propulsión azimutal con el “eje en L” será el tipo en el que tengamos el motor de combustión, sobre la vertical de la hélice azimutal. De esta manera, no necesitamos un eje horizontal que llegue hasta dicha vertical, sino que el eje va directamente hacia abajo hasta el sistema azimutal[22].

Por otra parte, nos encontramos con los llamados Azipod, los cuales, la parte de la hélice y el principio de poder girar la hélice en cualquier dirección sería igual, pero con la diferencia de que la energía viene suministrada por un motor eléctrico. Dicho motor eléctrico va instalado dentro de la barquilla que va en el agua tal y como se muestra en la imagen 2.45. En dicha imagen, el número 9 es el motor y está sumergido desde por debajo de el elemento

**Figura 2.44:** Sistema propulsor del buque hospital Juan de la Cosa



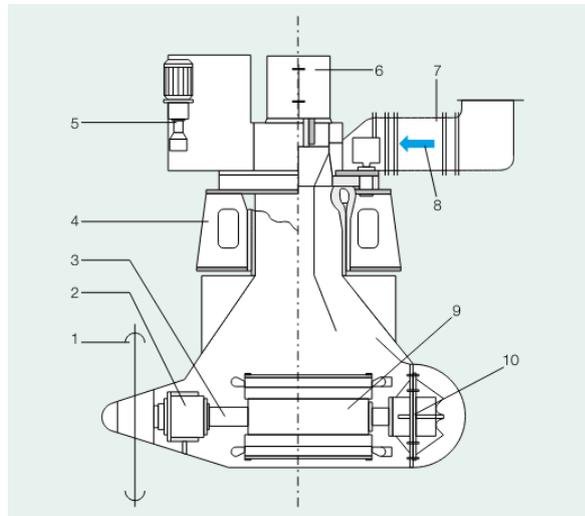
**Fuente:** Manual de instrucciones del sistema azimutal del B/H Juan de la Cosa

número 4, que es el bloque de montaje. Además, consta de un sistema de ventilación (7), una unidad de anillos rozantes<sup>18</sup> (6) y el grupo hidráulico de gobierno (5). Finalmente, en el número 1 iría situada la hélice por lo que el 3,

<sup>18</sup>Que es por donde se transmite la energía y los datos que recibe el motor.

la línea de ejes, es extremadamente corta[23].

**Figura 2.45:** Sistema Azipod de la empresa ABB Industry Oy



**Fuente:** Propulsión Azipod, experiencia con los sistemas a bordo de buques marinos, R. Pakaste, K. Laukia, M. Wilhelmson and J. Kuuskoski

Cabe destacar que entre las desventajas que tiene este sistema es que requiere una planta eléctrica para dar suministro a los motores eléctricos de cada Azipod. Además, cada Azipod no puede exceder de 25MW de potencia. Esta es la razón por lo que los grandes buques llevan instalados varios Azipods y no una sola hélice como ocurría con las hélices convencionales. Por otra parte, al ser los motores propulsores eléctricos, permite variar la velocidad de giro de la hélice según sea necesario. Por esta razón, la hélice no hace falta sea de paso controlable, lo que hace que el mantenimiento de la misma se reduzca mucho[23].

De cara a la comodidad, este sistema tiene una ventaja muy clara sobre el sistema azimutal de transmisión mecánica. Dicha ventaja es que, al tener el motor eléctrico dentro de la barquilla y un eje tan corto, se evitan muchas vibraciones provocadas por las cajas reductoras, las largas líneas de ejes y los grandes motores de combustión necesarios para impulsar un sistema azimutal como el del buque hospital Juan de la Cosa.

Además, ambos sistemas, tanto los de transmisión mecánica como los eléctricos, al permitir girar 360°, aportan una gran maniobrabilidad al buque

permitiendo eliminar las hélices transversales de popa. De esta manera, ese espacio se puede aprovechar de una manera óptima[23].

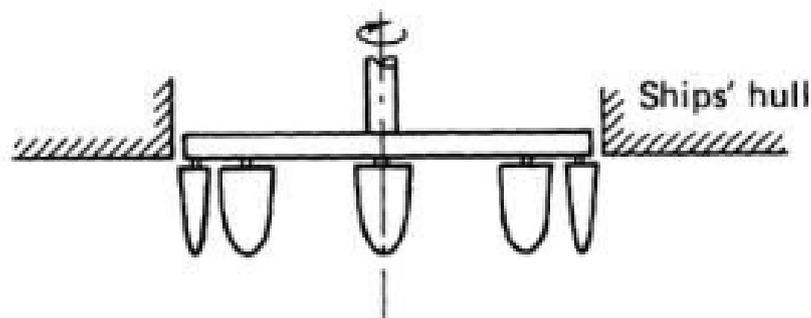
Por otra parte, en los sistemas de transmisión eléctrica, al no necesitar un motor de combustión cerca, los generadores eléctricos se pueden situar en un espacio óptimo de manera que se puede aprovechar mucho mejor el espacio de carga.

Finalmente cabe destacar que, cuando se está maniobrando con este sistema de propulsión y se tiene 2 o más propulsores, se tiene que tener en cuenta que no se pueden enfrentar los chorros, ni el chorro de una hélice puede incidir sobre la otra. Esto es debido a que si lo hacemos, se podría debilitar el sistema azimutal sometido al chorro de agua[24].

#### 2.5.6. Hélices cicloidales

Las hélices cicloidales son aquellas que giran sobre un eje vertical, tal y como se enseña en la figura 2.46. En la década del año 1920, Kirsten-Boeing y Voith-Schneider, presentaron sus propios diseños de este tipo de propulsores. El primero en hacerlo, Kirsten-Boeing, desde el punto de vista hidrodinámico, presentó un diseño muy similar al diseño que tenía el molino horizontal de agua desarrollada por Robert Hooke en el año 1681[25].

**Figura 2.46:** Hélice cicloidal

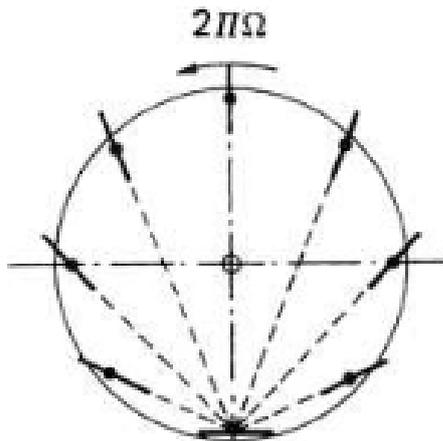


**Fuente:** Marine propellers and propulsion, J. Carlton

En la imagen 2.47 se puede ver el sistema que presentó Kirsten-Boeing. Ese diseño consistía en un conjunto de seis u ocho aspas montadas sobre un

eje vertical. Cada una de ellas, de manera que el movimiento de cada aspa era independiente del resto. Todas esas aspas estaban montadas sobre un plano horizontal o casi horizontal de modo que orientando esas aspas de una manera o de otra (unidas por un enlace mecánico) se conseguía el empuje deseado. Por ello cada aspa rotaba sobre su propio eje vertical dependiendo del giro del grupo propulsor en general. Viendo la figura 2.47, podemos ver que el movimiento de cada aspa estaba establecido respecto a un punto fijo situado sobre la circunferencia que sostenía todas las aspas. Eso hacía que el empuje del conjunto propulsor solo pudiese ser variado según la velocidad de giro de la hélice y, la dirección del flujo, cambiando de posición el punto tomado de referencia para la orientación de cada aspa[25].

**Figura 2.47:** Hélice de Kirsten-Boeing



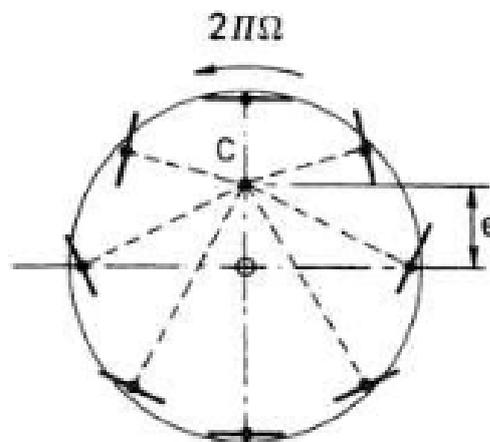
**Fuente:** Marine propellers and propulsion, J. Carlton

Por otra parte, en la imagen 2.48, podemos ver como era el diseño de la hélice de Voith-Schneider. De antemano, el sistema puede parecer el mismo: mismo número de palas, mismo principio con cada aspa con su propio eje vertical de giro,... Sin embargo, lo que cambia de uno a otro, y es lo que marca la diferencia entre ambos sistemas, es el punto que se toma de referencia para orientar las aspas. A diferencia del caso anterior, Voith-Schneider obtuvo por poner el punto de referencia en medio de la rueda<sup>19</sup>. Eso permitió (y a día de hoy

<sup>19</sup>Eso lo consiguió mediante una serie compleja de enlaces mecánicos.

sigue siendo igual) que, variando el valor  $e$ , conocida como la excentricidad del punto de control de las aspas, se pudiesen orientar las aspas hacia donde fuese necesario para direccionar el chorro de agua y por lo tanto, el empuje. Además, de esta manera, variando la orientación de las palas de la forma adecuada, se puede variar la fuerza del empuje, lo cual permite tener mayor o menor empuje sin tener que variar la velocidad del conjunto y de manera prácticamente inmediata[25].

**Figura 2.48:** Hélice de Voith-Schneider



**Fuente:** Marine propellers and propulsion, J. Carlton

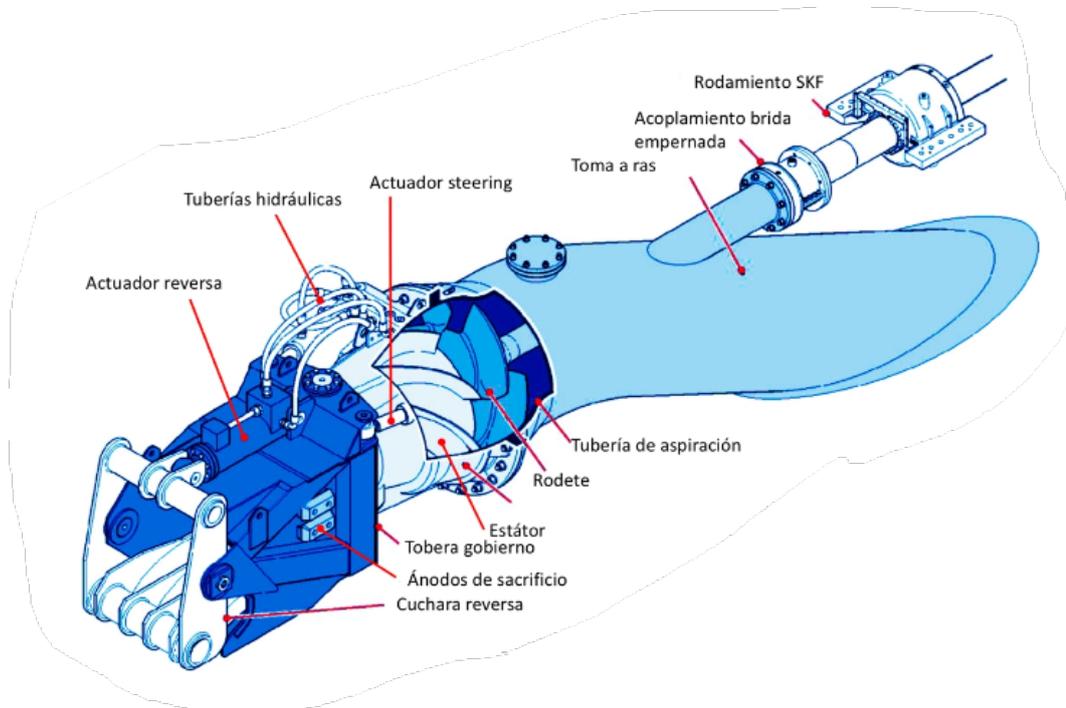
Este sistema de propulsión (de ahora en adelante llamado Voith-Schneider debido a que el otro diseño no prosperó), tiene una gran utilidad en buques que necesitan gran capacidad de maniobra, como son los remolcadores, ya que el cambio de la dirección (a 360°) e intensidad de empuje es prácticamente inmediato y no requiere de ningún timón para dirigir el chorro de agua.

### 2.5.7. Water Jets

El sistema propulsor water jet, chorro de agua traducido del inglés, funciona, como dice su nombre, expulsando un chorro de agua. Este sistema es un sistema pensado para un tipo de embarcaciones de alta velocidad, ya sean desde buques de alta velocidad a motos de agua. Para explicar su funcionamiento, miremos las imágenes 2.49 y 2.50, donde se muestran las partes y un

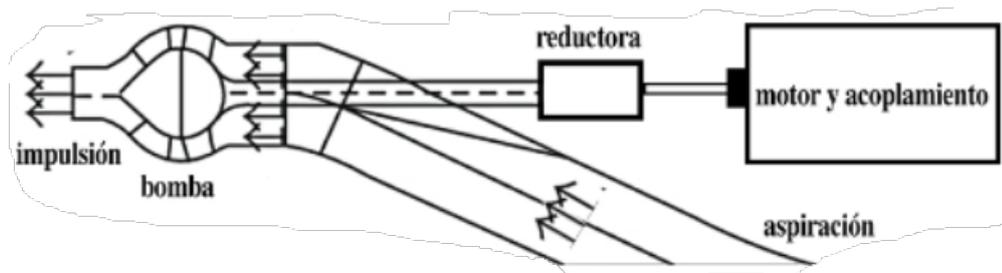
esquema básico de este sistema.

**Figura 2.49:** Partes de un Water Jet



**Fuente:** ingenieromarinero.com

**Figura 2.50:** Esquema básico de un Water Jet



**Fuente:** ingenieromarinero.com

Observamos que este sistema propulsor está compuesto por cinco partes generales:

- Motor: este es el que suministra energía a la bomba. Suele ser de combustión interna alternativo, diésel o gasolina, aunque a veces también pueden ser turbinas de gas. Son motores de mucha potencia compara-

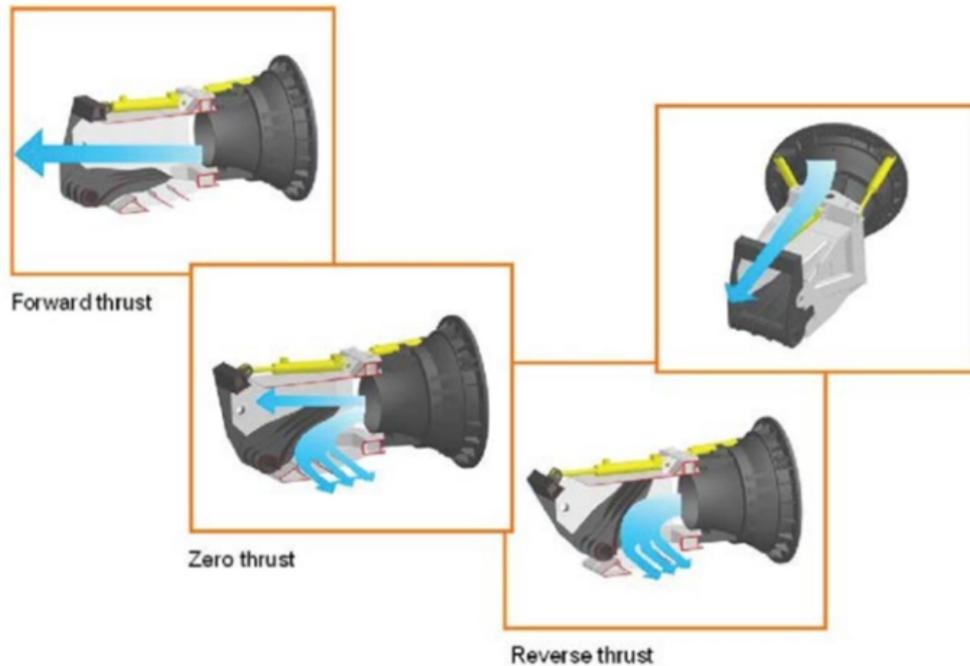
do con los de las hélices convencionales debido al gran flujo de agua que deben impulsar[26].

- Reductora: entra el eje que viene del motor y sale otro eje directo a la bomba con otra velocidad de giro.
- Toma de agua o aspiración: conducto por donde se abastece la bomba de agua.
- Bomba: esta es la parte más importante del water jet. Es la encargada de transmitir la energía recibida del eje al flujo de agua, impulsándola a gran velocidad de manera que produzca un empuje sobre el buque como reacción[26].
- Impulsión y elementos de control: la impulsión es el orificio por donde sale el agua a alta velocidad orientable en un ángulo limitado por popa del buque para dirigir el chorro de agua y poder maniobrar. Aquí es donde va situada la cuchara reversa. La función de esta pieza es que, en caso de querer ir en reversa o simplemente no tener empuje pero sin dejar de propulsar un chorro de agua, se pone la cuchara y desvía el chorro de salida.
  - En el caso de querer tener empuje hacia proa, la cuchara no interviene.
  - En el caso de no querer tener empuje hacia ningún sentido, la cuchara se pone a media posición, lo que permite expulsar parte del chorro hacia popa y otra parte del chorro desviarlo hacia proa.
  - En el caso de querer ir hacia popa, se pone la cuchara y esta desvía todo el chorro de agua hacia proa.

Se puede ver gráficamente como funciona la cuchara en la imagen 2.51.

Las ventajas de este tipo de propulsores frente a hélices convencionales son notorias sobre todo en altas velocidades y en maniobrabilidad. Estas son las siguientes[27]:

**Figura 2.51:** Funcionamiento de la cuchara de un water jet



**Fuente:** ingenieromarion.com

- Alto rendimiento en un rango de velocidades muy amplio.
- Mayor retardo y seguridad ante erosión por cavitación.
- Reducción de vibraciones.
- Seguridad ante varadas accidentales.
- Alta maniobrabilidad.
- Capacidad de trabajar en aguas poco profundas sin problema.

Por otra parte, también tiene algunos inconvenientes como pueden ser[27]:

- Alto coste.
- Mayor peso.
- A bordo, ocupa más espacio que otros sistemas de propulsión.

### **2.5.8. Hélices de proa y de popa para ayudar en las maniobras**

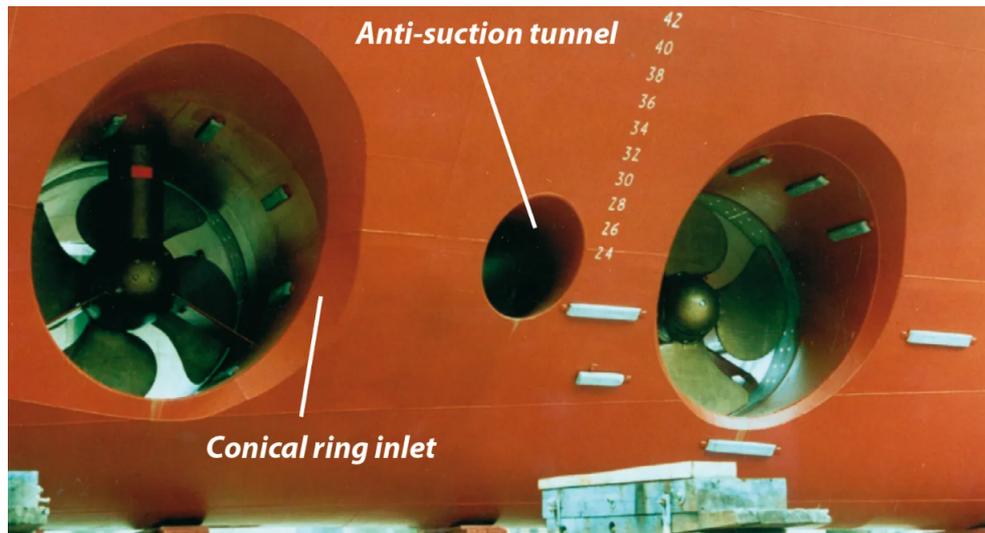
El último tipo de hélices que se va a explicar en este proyecto son aquellas hélices situadas en proa o en popa llamadas hélices de maniobra y que no se usan con el fin de propulsar el barco, si no que ayudan a la maniobrabilidad del buque. Por ejemplo, un petrolero como el Monte Udala, lleva una hélice convencional con un timón. Un buque de este tipo tiene una capacidad de maniobra muy reducida y cada vez que entra en un puerto necesita la ayuda de como mínimo 3 remolcadores. En cambio, un buque como el portacontenedores MSC Gülsün, con 126 metros más de eslora, pero equipado con dos hélices transversales en proa, dentro del puerto y a velocidades muy reducidas, brinda una mucho mayor maniobrabilidad.

Hay varios tipos de hélices de maniobra pero nos vamos a centrar en los dos tipos más comunes y más utilizados a día de hoy. Estos tipos son las hélices de túnel y las retráctiles. Dichas hélices se deben instalar lo mas a proa posibles para generar un par de fuerzas mayor y ofrecer una mayor maniobrabilidad con una menor potencia.

Las hélices de túnel tienen el problema de que, cuando se utiliza mientras el buque avanza, el empuje que genera se ve contrarrestado parcialmente por un vacío creado debido a la actuación de los propulsores principales del buque. Por encima de 6 nudos, la hélice de proa de túnel, no tiene efecto sobre el buque debido a su poca capacidad de empuje en comparación de los sistemas de maniobra principales. Entre 4 y 6 nudos es cuando el efecto comentado al principio del párrafo se acentúa. Por ello, se acompaña a la hélice de túnel con un túnel antisucción (se puede ver en la imagen 2.52), lo que alivia el vacío generado por los propulsores principales y permite a la hélice actuar. Por debajo de los 4 nudos, la hélice de túnel puede funcionar en su régimen óptimo[28].

Por otra parte, tenemos las hélices retráctiles. Cabe destacar que este sistema es muy útil para un buque con poco calado o para un buque que, en los puertos y áreas donde tiene que maniobrar, no tenga restricciones de calado, ya que es un sistema que añade entre 1 y 2 metros al calado del buque en el

**Figura 2.52:** Disposición del túnel antisucción y las hélices de proa de túnel



**Fuente:** wartsila.com

momento de la maniobra. Es así porque, como su nombre indica, son hélices que durante la navegación están recogidas dentro del casco del buque y a la hora de utilizarse, se extraen verticalmente hacia abajo. Esto se puede observar en la figura 2.54, donde, con trazado continuo se muestra la disposición de la hélice en su estiba y con trazado discontinuo, como quedaría en orden de funcionamiento.

Este tipo de hélices son mas versátiles que las anteriores gracias a que pueden girar 360° y dirigir el flujo de agua de expulsión hacia donde se requiera en cada momento (tienen un funcionamiento muy similar al de las hélices azimutales). A pesar de que a bajas velocidades actúan con mayor eficacia, no se requiere que el buque vaya tan lento como las hélices de túnel para poder actuarla. Además, en caso de parada de emergencia, ésta se podría usar, según dicen algunos manuales, para ayudar a parar el buque. Por otra parte, éstas, al ser eléctricas, pueden variar su velocidad de giro y por lo tanto, actuar a la perfección como se desee[29].

**Figura 2.53:** Hélice de proa del B/H Juan de la Cosa



**Fuente:** Foto tomada por el oficial de puente Kevin Señedo

### 2.5.9. Efectos de la acción de la hélice

Al actuar la hélice, ésta crea dos fuerzas sobre el buque. Una en sentido longitudinal y otro en sentido transversal.

La fuerza ejercida sobre el eje longitudinal ya se ha comentado varias veces a lo largo de este trabajo ya que es la finalidad de la hélice. Esa fuerza se llama empuje y es la que desplaza al buque.

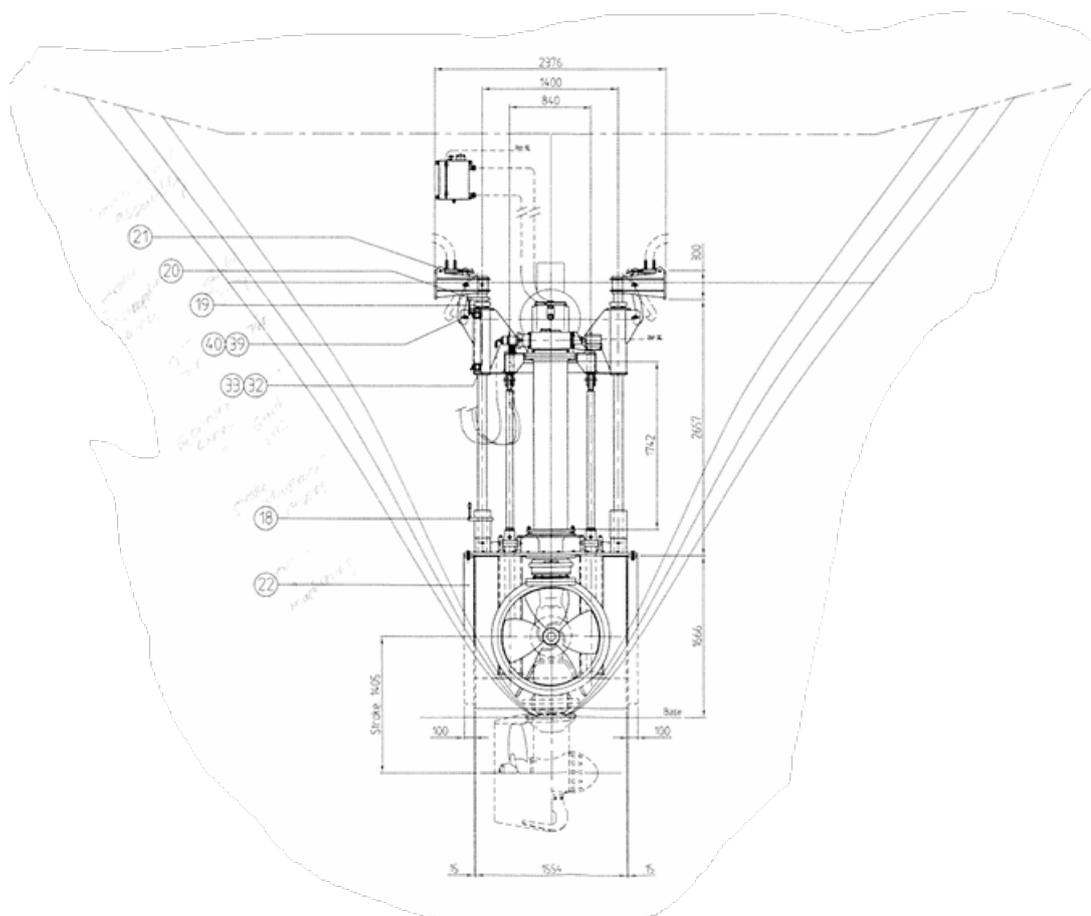
El empuje se puede calcular con la siguiente fórmula[30]:

$$T = K_T \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4$$

Donde:

- T es el empuje de la hélice.
- $K_T$  es el coeficiente de empuje particular de cada hélice.
- $\rho$  es la densidad del fluido por el que se navega. Generalmente  $1,03t/m^3$  para agua salada y  $1,00t/m^3$  para agua dulce.
- $n$  son las revoluciones por segundo de la hélice

**Figura 2.54:** Plano del la hélice retráctil de proa del B/H Juan de la Cosa



**Fuente:** Operation Manual SMP 360 RT HRP Control System, HRP

- $D$  es el diámetro de la hélice.

Muchas de las veces no se tiene el valor del coeficiente de empuje. Sin embargo, para tener alguna referencia numérica de un caso real, los datos presentados en el manual del sistema de propulsión del buque hospital Juan de la Cosa, son los siguientes:

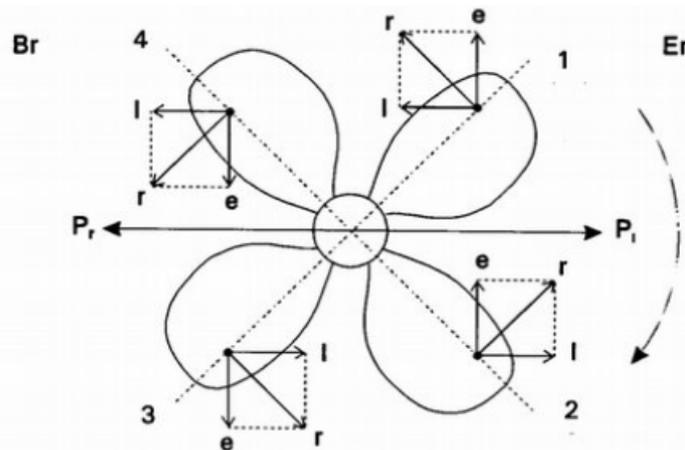
- Revoluciones por minuto de la hélice: 266 rpm
- Número de palas: 4 palas
- Diámetro de la hélice: 2400 mm
- Paso al 85 %
- El empuje proporcionado es de 128 kN aproximadamente.

Desde este momento hasta que se diga lo contrario, para la explicación de este subapartado se ha usado la referencia [31]. Si se usa cualquier otra referencia se especificará donde corresponda.

Por otra parte, tenemos el efecto en el eje transversal que produce la hélice al girar. Aquí nos encontramos con dos fuerzas distintas: una es la fuerza llamada presión lateral de las palas y la otra es la fuerza en ese eje debido a la corriente de expulsión.

Centrándonos en la presión lateral de las palas nos encontramos con que las palas altas trabajan en un medio relativamente menos denso que las palas bajas. Eso produce que las palas bajas tengan una mayor eficacia. Eso significa que la fuerza que hacen las palas en la parte baja de la hélice es mayor que la que hacen las palas de la parte superior de la hélice. Ahora, fijándonos en la figura 2.55, podemos separar que fuerza ejerce cada pala y ver como afecta al barco por separado y finalmente, lo uniremos.

**Figura 2.55:** Fuerzas ejercidas por cada pala



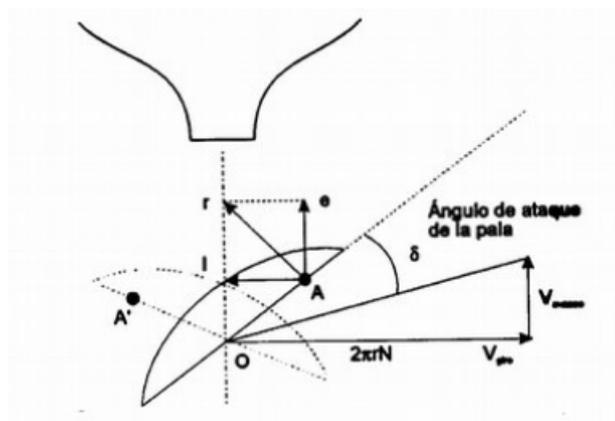
**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

En la pala número 1, vemos que hay una partícula de agua que ejerce una fuerza normal sobre la cara activa de la pala. Esa fuerza normal (debido a que la hélice empuja esta partícula formando la corriente de expulsión) la llamamos con el vector "r" el cual se puede descomponer en dos fuerzas, una fuerza "e" de empuje que, debido a la vista del esquema no se ve claramente pero, esta

fuerza está en el sentido longitudinal del buque y siempre en el mismo sentido de aplicación aunque en este esquema, debido a que está en 2 dimensiones parezca que se aplica de manera vertical y en sentido contrario (se puede apreciar mejor en la imagen 2.56, donde se presenta una vista en planta de estas fuerzas). Esta fuerza siempre es del mismo sentido de aplicación en todas las palas independientemente del giro de la hélice.

La otra fuerza que aparece es en el sentido transversal del buque. Esta fuerza, al ser creada por el empuje de un medio relativamente menos denso, va a ser menor que en la pala opuesta, la número 3. Por eso, esta pala, la número 1, con el buque sin arrancada, va a hacer que la popa caiga a babor con una intensidad relativa.

**Figura 2.56:** Vista en planta de las fuerzas de cada pala



**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

En la pala número 3, vemos que la fuerza del eje transversal, la fuerza lateral ejercida por la pala, es hacia estribor pero, al estar ejercida por el empuje de un fluido relativamente más denso, va a ser de mayor intensidad que la fuerza ejercida por la pala 1. Por ello, la pala 3 tiende a hacer caer la popa hacia estribor con una intensidad alta.

En la pala número 2, vemos que la fuerza transversal también es hacia estribor. Al igual que en la pala 3, tiende a hacer caer la popa hacia estribor.

En la pala número 4, pasa algo parecido que en la pala 1. Por ello, como se ve en la figura 2.55, hace caer la popa hacia babor pero con baja intensidad

debido a la menor densidad relativa.

Finalmente, tras este estudio podemos afirmar que, con el buque parado, cuando una hélice gira en sentido horario va a hacer caer la popa del buque hacia estribor.

Ahora bien, cuando el buque coge arrancada cambian algunos aspectos de la siguiente manera. La pala número 1 trabaja en una zona donde la velocidad del agua, debido a la estela, es relativamente mayor por lo que la velocidad del avance decrece, aumentando el ángulo de ataque de la pala (se puede ver gráficamente en la imagen 2.56). Eso hace que la pala actúe de manera más efectiva aumentando la fuerza normal. Eso conlleva un aumento del empuje y también de la presión lateral de la pala. En este momento, la pala 1 tiende a hacer caer la popa hacia babor con una intensidad media.

La pala número 3, a diferencia de la pala 1, está trabajando en una zona donde la influencia de la corriente de la estela es menor por lo que la fuerza lateral también será menor. Esta pala ahora va a hacer caer la popa hacia estribor pero con una intensidad media

La pala 2 al sumergirse se encuentra con el flujo de agua que sube de debajo la bovedilla. Por ello, la fuerza lateral es hacia estribor con intensidad media.

Finalmente, la pala 4, al venir de la posición de la pala 3 y llegando a la parte superior, provoca un empuje hacia babor, pero con un valor creciente.

Como conclusión, en el caso de que el buque vaya con arrancada, nos encontramos en que el efecto de que las palas altas trabajen bajo la influencia de la corriente de agua, equilibra las presiones laterales ejercidas por las palas bajas, pudiendo, en algunos casos, superar a estas últimas haciendo caer la popa ligeramente en el sentido contrario al giro.

Por otra parte, el chorro de expulsión de la hélice, también a bajas velocidades, tiene un efecto evolutivo sobre el buque. Teniendo las situaciones en que el chorro va hacia popa o va hacia proa.

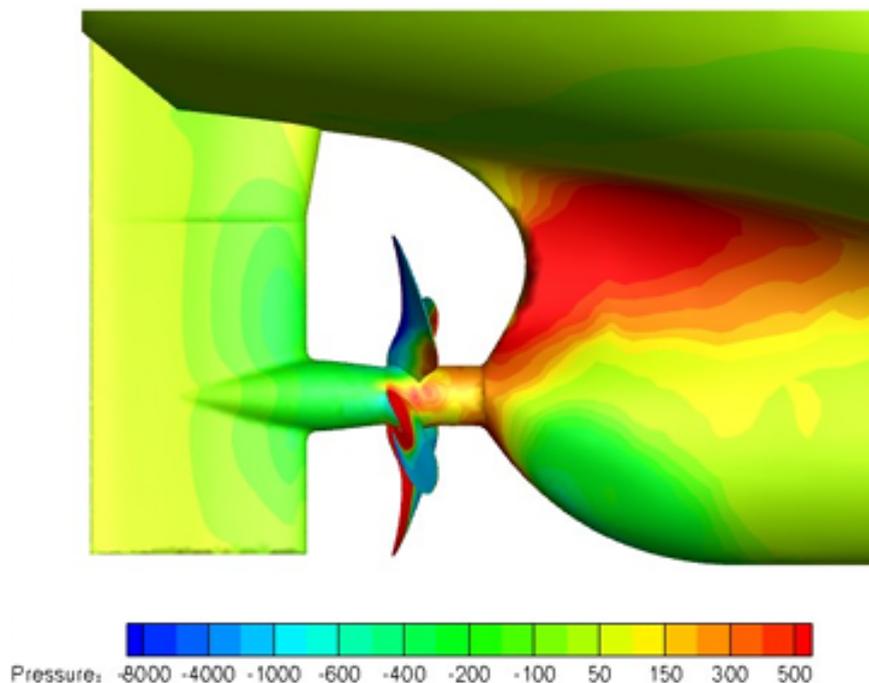
Cuando el chorro de expulsión va hacia popa, teniendo en cuenta que estamos con un buque con hélice y timón, lógicamente, el chorro incidirá sobre

el timón. Eso permite que, con el buque parado, metiendo un ángulo al timón y dando paladas a la hélice, se consiga un efecto evolutivo según la banda que se haya metido timón siendo esta, mayor a las fuerzas laterales ejercidas por esas paladas. Sin embargo, si el timón está a la vía, el chorro de expulsión de las palas altas incidirá sobre el timón; mientras tanto, el chorro de expulsión de las palas bajas incidirá sobre la parte baja del timón perdiéndose sustancialmente parte del chorro.

Desde este punto hasta el final de este subapartado se ha usado la referencia [32].

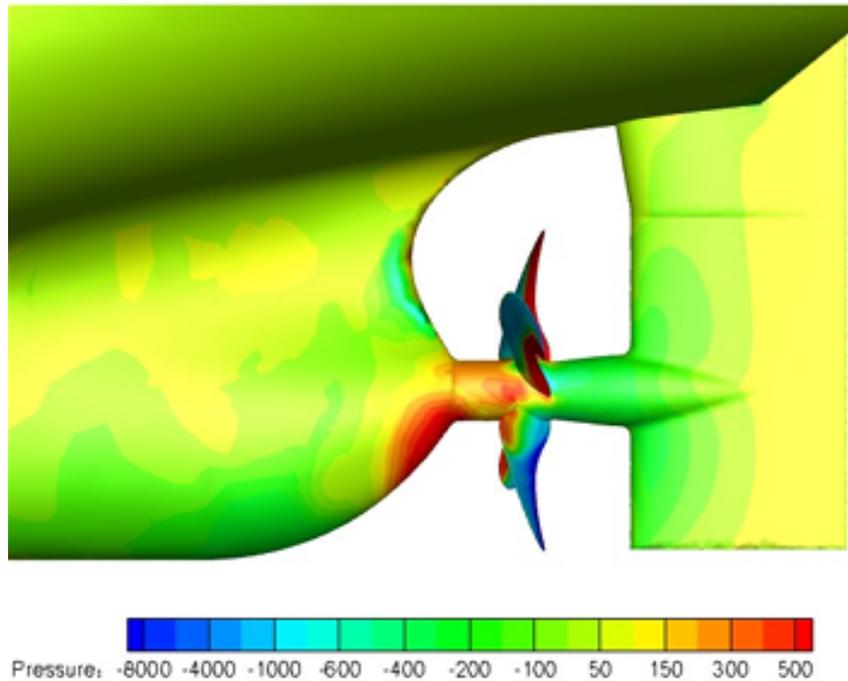
Finalmente, si el chorro va hacia proa, nos encontramos con que el chorro incide sobre el casco del buque. Aunque, como es de suponer, no incide homogéneamente. Por ello, se han analizado los resultados de un estudio llevado a cabo por los científicos Lucia Sileo y Sverre Steen sobre un buque con una hélice convencional. Los resultados son los expuestos en las imágenes 2.57, 2.58, 2.59 y 2.60.

**Figura 2.57:** Simulación de las presiones ejercidas sobre la popa estribor



**Fuente:** Lateral force and turning moment on a reversing ship, L. Sileo y S. Steen

**Figura 2.58:** Simulación de las presiones ejercidas sobre la popa babor



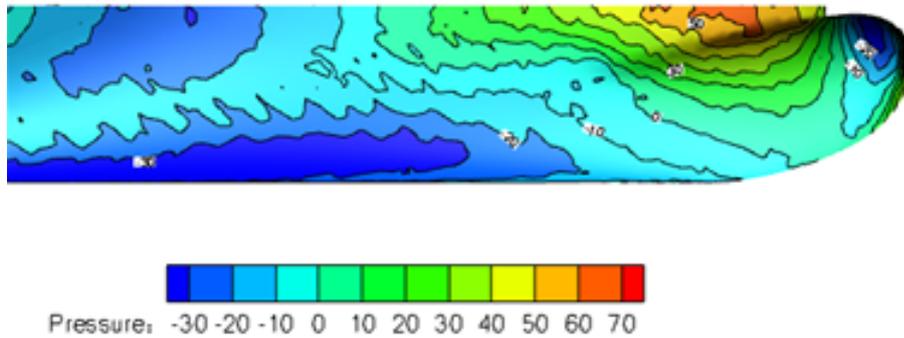
**Fuente:** Lateral force and turning moment on a reversing ship, L. Sileo y S. Steen

Esta es una hélice dextrógira girando hacia atrás, es decir girando en sentido antihorario.

Como se puede observar, al girar en sentido antihorario, el chorro de expulsión de la pala 1 al completo (visto desde popa y cogiendo como referencia el orden seguido en la imagen 2.55) incide sobre la bovedilla del buque actuando ésta como un gran timón. Por otra parte, nos encontramos con la pala número 3, chorro de la cual (una parte) incide sobre la parte de babor del codaste (la mayoría del chorro se pierde por debajo de la quilla). Finalmente, el chorro de expulsión de las palas 2 y 4 no inciden sobre el casco del buque de manera que no afectan a este estudio.

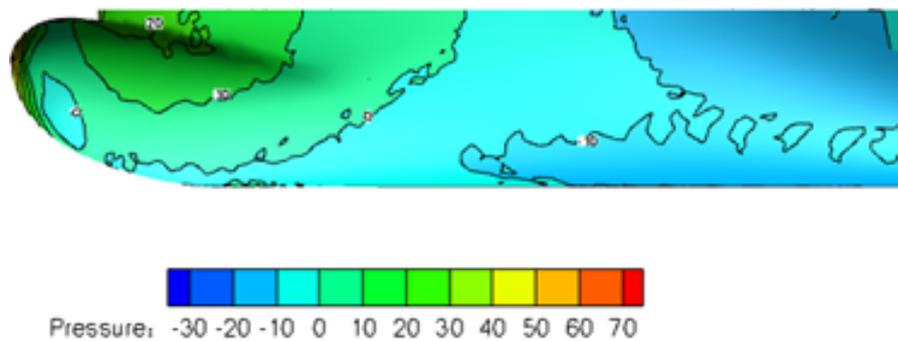
Por otra parte, fijándonos en la parte de proa del buque vemos como en la parte de estribor tenemos una depresión mucho mayor a la que podemos observar en la parte de babor. Sin embargo en la parte de estribor sobre el bulbo, encontramos una zona donde hay una alta presión, aunque insignificante comparada con la gran depresión a lo largo de dicha banda.

**Figura 2.59:** Simulación de las presiones ejercidas sobre la proa estribor



**Fuente:** Lateral force and turning moment on a reversing ship, L. Sileo y S. Steen

**Figura 2.60:** Simulación de las presiones ejercidas sobre la proa babor



**Fuente:** Lateral force and turning moment on a reversing ship, L. Sileo y S. Steen

Aunque cabe destacar que este estudio (sobre todo la parte de proa) podría variar dependiendo de la forma del casco del buque, podemos afirmar que por la parte de popa, tiende a hacer caer ésta hacia babor y, por la proa, ésta tiende a caer a estribor, resultando en un efecto evolutivo en sentido horario. Ahora, si nos fijamos en el sentido de giro de la hélice y aplicamos lo explicado sobre las presiones laterales de la hélice, vemos como ambos efectos llevan al mismo efecto evolutivo. De esta manera, cuando un buque parado hace girar la hélice para ir hacia popa, el momento evolutivo es mucho mayor al momento evolutivo ejercido sobre el buque cuando la hélice dirige el chorro de expulsión hacia popa con el timón a la vía.

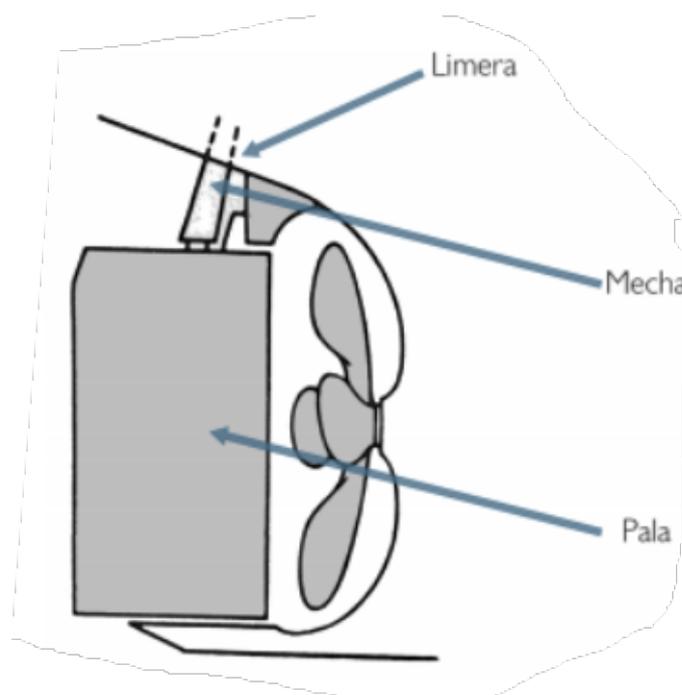
## 2.6. Timones

### 2.6.1. Conceptos generales de los timones

Como nos podemos imaginar, una de las partes más importantes del buque cuando de maniobras y capacidad para maniobrar de un buque hablamos, es el timón. Éste puede ser de muchas formas y diseños, pero siempre actúa de manera que, al incidir unas partículas de agua sobre una de sus dos caras, se crea una fuerza normal sobre el timón. Esto crea un momento de fuerzas que hace que la popa caiga a una banda o la otra, según se haya accionado el timón.

Para empezar, debemos aprender cuales son las partes de un timón. Para ello nos podemos apoyar en la imagen 2.61 y la siguiente explicación[33]:

**Figura 2.61:** Partes generales de un timón



**Fuente:** neptuno.es

- Pala: es la pieza sobre la cual incide el flujo de agua. Esta pieza consta de dos cantos:
  - Canto de ataque: es la arista que está a proa de la pala.

- Canto de salida: es la arista que está a popa de la pala.
- Mecha: eje de la pala que, unido a un servomotor, proporciona el movimiento a la pala. La mecha debe ser de unas dimensiones y materiales con una resistencia suficiente para resistir el impacto del flujo del agua sobre la pala.
- Limera: es el orificio que atraviesa el casco por donde la mecha entra hacia el servomotor.
- Talón del codaste: esta parte no es común en todos los timones. Sirve de apoyo y refuerzo al timón.

El timón tiene que tener una serie de características[33]:

- El timón es el que permite cambiar de rumbo al barco. Por esta razón, tiene que tener una resistencia suficiente para soportar los esfuerzos dinámicos necesarios.
- Los soportes del timón deben ser resistentes y deben tener la menor fricción posible.
- Las posibles deformaciones que sufra por su propio peso no deben bloquear nunca el funcionamiento del timón.
- Al igual que las hélices, cuanto menor sea su mantenimiento, mejor.

Finalmente, antes de empezar a nombrar y explicar los distintos tipos de timones, cabe destacar de que depende la eficacia de los mismos. Dicha eficacia depende de lo siguiente[33]:

- La superficie de la pala.
- Su posición respecto de los propulsores.
- La forma del codaste.
- El número de timones del que disponga el buque.

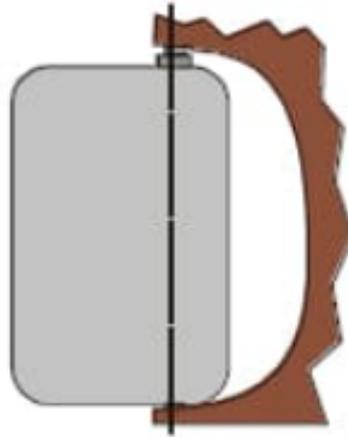
### 2.6.2. Clasificación de los timones según el montaje

Toda la información de este subapartado, a no ser que se indique lo contrario, se ha realizado en base a la referencia bibliográfica[34].

Hay diferentes maneras de clasificar los timones. La primera manera es diferenciándolos según el montaje. De esta manera nos encontramos con:

- Soportado: este tipo de timón es aquel que, a parte del soporte superior, en la parte baja está apoyado sobre el talón del codaste tal y como se muestra en la figura 2.62.

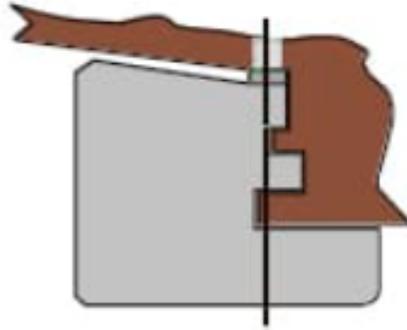
**Figura 2.62:** Timón soportado



**Fuente:** centramar.es

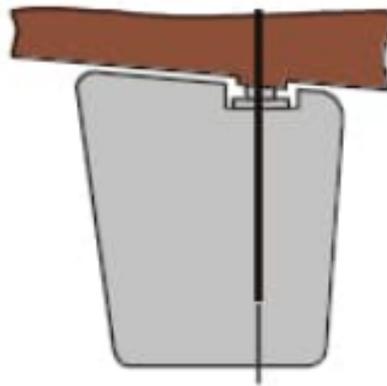
- Semisuspendidos: este tipo de timón es aquel que, a diferencia del anterior, no tiene el soporte del talón del codaste en la parte baja de la mecha sino que tiene uno o más soportes en la parte media de la pala tal y como se ve en la figura 2.63.
- Colgante: es aquel timón que solo está sujeto por la parte superior de la mecha como se muestra en la figura 2.64.

**Figura 2.63:** Timón semisuspendido



**Fuente:** centramar.es

**Figura 2.64:** Timón colgante



**Fuente:** centramar.es

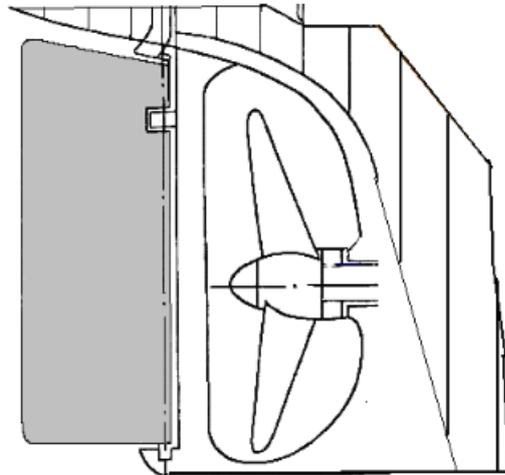
### **2.6.3. Clasificación de los timones según su distribución**

Toda la información de este subapartado, a no ser que se indique lo contrario, se ha realizado en base a la referencia bibliográfica[33].

Otra manera de clasificar los timones es según la distribución de la pala respecto de la mecha. De esta manera nos encontramos con:

- Sin compensar: este tipo de timón es aquel que toda la pala se encuentra en la parte de popa de la mecha o eje de giro del timón tal y como se enseña en la imagen 2.65. Este tipo de timones requieren un servomotor mayor.

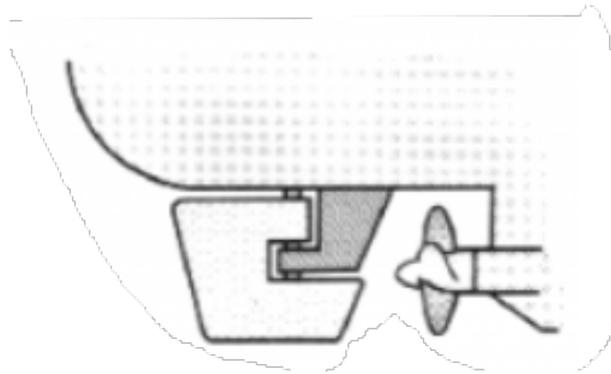
**Figura 2.65:** Timón sin compensar



**Fuente:** estatxa.com

- Semicompensados: a un timón se le llama semicompensado cuando parte de la pala (sin llegar a un 20 % de la superficie) está por proa de la mecha. Un ejemplo es el timón de la figura 2.66.

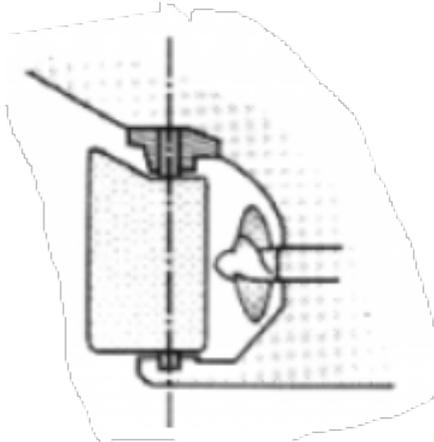
**Figura 2.66:** Timón semicompensado



**Fuente:** estudiasonavegas.com

- Compensado: se le llama compensado a un timón cuya pala está, como mínimo, con un 20 % de la superficie por delante de la mecha o eje de giro tal y como se ve en la imagen 2.67. Eso ayuda al giro de la pala permitiendo al servomotor no tener que ejercer tanta fuerza para girar la pala bajo la influencia del agua.

**Figura 2.67:** Timón compensado



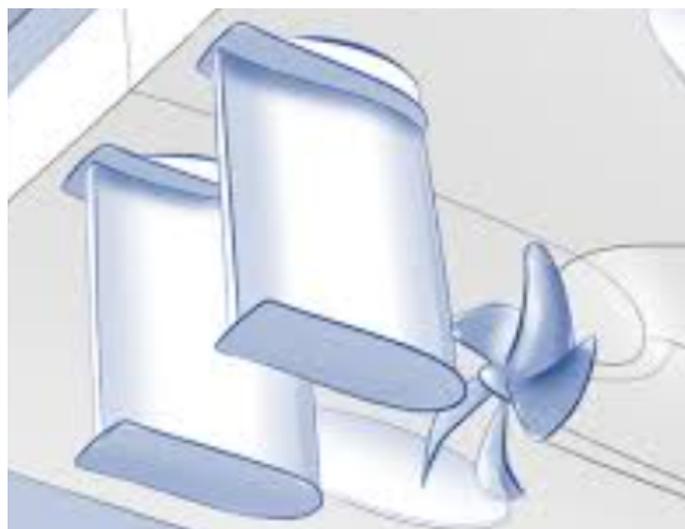
**Fuente:** estudiasonavegas.com

#### **2.6.4. Timones especiales**

A parte de las clasificaciones anteriores (todas ellas para timones de una pala sin articulaciones), hay otros tipos de timones, aunque vamos a explicar dos tipos en concreto, ambos, diseños y patentes de la empresa Becker Marine Systems.

El primero es el llamado timón Schiling. Éste tiene un diseño sin articular pero con una forma propia de la cola de un pez. Véase la imagen 2.68.

**Figura 2.68:** Timón Schiling



**Fuente:** ingenieromarino.com

Este timón tiene una forma peculiar en la parte de popa. La parte de proa es igual al resto de timones, pero, a medida que va pasando el flujo de agua a lo largo de la pala, se encuentra con una pala mucho más estrecha que en un timón convencional. A continuación, en la popa del timón, vuelve a ensanchar un poco el perfil de la pala. Además, añadieron una plancha horizontal en la parte superior de la pala y otra en la parte inferior de manera que se obliga al flujo de agua a pasar por el timón. Eso imposibilita que el agua pegada a la pala se pierda por arriba o por abajo. De esta manera se consigue un mayor flujo y por lo tanto una mayor eficiencia[35].

Según el fabricante, algunas de las ventajas de este diseño son las siguientes [35]:

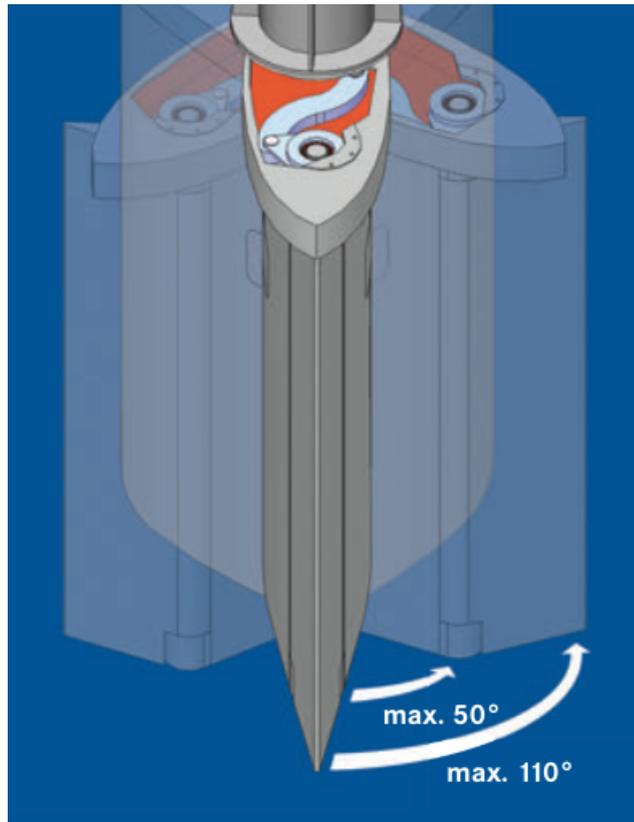
- Reduce el peso frente a otro tipo de timones.
- Al no tener piezas de desgaste, minimiza el mantenimiento.
- Mejor mantenimiento del rumbo.
- Junto a un sistema de gobierno con un ángulo alto de metida de timón se puede usar en buques de posicionamiento dinámico.
- Mayor maniobrabilidad por lo que reduce la asistencia de remolcadores.
- Mejor aprovechamiento del chorro de expulsión de la hélice.

En esta segunda parte del subapartado también se ha sacado información de la referencia bibliográfica[36]

Por otra parte, el otro timón especial que se va a estudiar en este trabajo es el llamado timón Becker. Este diseño consta de un timón con dos partes: una parte convencional y otra parte más corta en la popa que actúa de alerón, aumentando así el ángulo. Eso se puede apreciar en la imagen 2.69.

Este sistema consta de dos mechas: la mecha principal, que es la que va unida al servomotor que hace girar el timón entero llegando a permitir un ángulo de hasta 50°; y otra mecha secundaria, unida a la principal, que hace girar el alerón de popa del timón. De esta manera se consigue llegar a los 110°.

**Figura 2.69:** Timón Becker



**Fuente:** Becker product brochure, B. M. Systems

Eso permite:

- Tener una mucho mayor maniobrabilidad, siendo el timón con alerón más eficiente de la industria.
- Promete ser el timón con mayor maniobrabilidad en todo el rango de velocidades influyendo así en el consumo de combustible.
- Dependiendo del tipo del buque, con este tipo de timón, el capitán será capaz de desplazar el buque lateralmente
- Con un timón más pequeño se consigue el mismo efecto que con uno convencional de mayores dimensiones.
- Con un menor ángulo de la pala principal se consigue mantener el rumbo, reduciendo así la pérdida de velocidad que supone meter el timón.

- Este timón es ideal para los buques de posicionamiento dinámico que tengan hélices convencionales.

**Figura 2.70:** Timón Becker del B/H Esperanza del Mar



**Fuente:** Foto tomada por el oficial de puente Kevin Señedo

### **2.6.5. Efectos causados por la acción del timón**

En esta sección, todas las fórmulas, explicaciones e imágenes aportadas están basadas en la referencia bibliográfica [31], a no ser que se diga lo contrario.

Una vez explicados los tipos de timones, vamos a explicar como afecta al buque cuando actuamos el timón. Para ello, lo primero es establecer los efectos que causa meter el timón a una banda. Dichos efectos son:

- Escora de saludo.
- Perdida de velocidad del buque.
- Momento evolutivo del buque.

Empezando por el primero, el menos significativo y el menos conocido, nos encontramos con que cuando el buque va avante y mete el timón a una banda, el barco se escora ligeramente a la misma banda. Eso se debe a que, sobre un timón, al meter un ángulo a una banda, aparece una fuerza normal sobre la pala. Esta fuerza es perpendicular a la pala, por lo que no es perpendicular al plano transversal del buque. Por ello, si descomponemos esta fuerza en el eje longitudinal y transversal del buque y las analizamos, vemos que esta última es de mayor intensidad. Ahora, esta fuerza se actúa sobre el timón, una pieza que está más abajo que el punto de gravedad, lo que va a generar un par de fuerzas.

Pongamos un ejemplo, un buque navega a 13 nudos avante y se mete 25° a babor<sup>20</sup>. Esto va a crear una fuerza normal sobre la pala que, si la descomponemos sobre el eje transversal, ésta tendrá un sentido contrario a la banda donde se ha metido el timón, es decir, a estribor en este caso. Al estar actuando esta fuerza sobre un punto situado más abajo que el centro de gravedad del buque, esto va a provocar que se genere un par de fuerzas que hará escorar el buque hacia babor, es decir, hacia la parte que se ha metido la pala.

Sin embargo, este efecto va a ser ligero y durará poco tiempo ya que una vez el buque empieza a coger inercia, esta va a hacer que el buque escore hacia la banda contraria.

Ahora, entrando en los efectos importantes del timón, vamos a explicar las fuerzas nombradas anteriormente de manera más extensa con alguna imagen. Pero primero vamos a ver como se puede calcular la superficie que debería tener el timón de un barco. Para ello usaremos la siguiente fórmula:

$$S_T = \frac{E \cdot C_v}{n} \quad (2.16)$$

Donde:

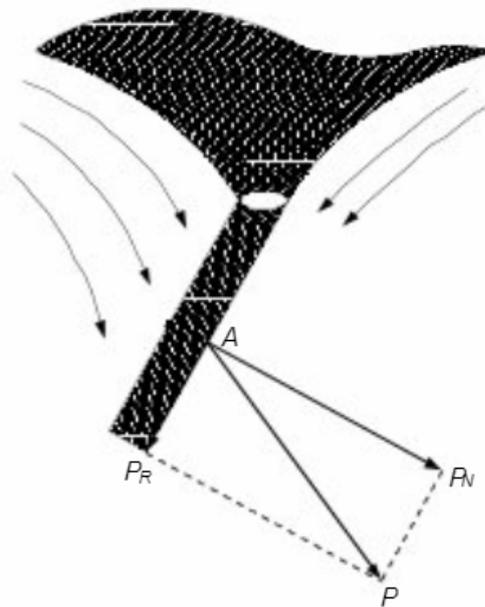
- $E$  es la eslora del buque en metros.

---

<sup>20</sup>A lo largo del embarque a bordo del M/T Monte Udala aprendí que, a no ser que sea estrictamente necesario, a una velocidad así, no se debe meter más de entre 5° y 7° de timón ya que la pala sufre mucho. Sin embargo, estamos tratando un ejemplo y para que se entienda mejor, se ponen unos supuestos extremos.

- $C_v$  es el calado de verano en metros.
- $n$  es un coeficiente que adquiere los siguientes valores:
  - 20 para remolcadores de aguas quietas.
  - 40 para remolcadores de altura.
  - 60 para buques de navegación marítima.

**Figura 2.71:** Fuerza resultante que actúa sobre el timón



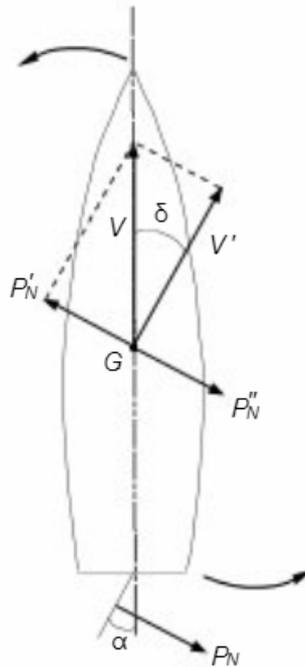
**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

Como vemos en la imagen 2.71, sobre la pala actúan las fuerzas de los flujos de agua de diferentes direcciones de manera que, la suma de todas ellas resultan en la fuerza  $P$ . Esta se puede descomponer en dos fuerzas: la normal, que es perpendicular a la pala y una fuerza que ejerce de resistencia al avance paralela a la pala. Ahora bien, fijémonos en la fuerza normal con la ayuda de la imagen 2.72.

Esta fuerza normal se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$P_N = \frac{k \cdot S \cdot V^2 \cdot \sin \alpha}{0,2 + 0,3 \cdot \sin \alpha}$$

**Figura 2.72:** Fuerza normal sobre el timón



**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

Donde:

- $k$  es un coeficiente que varía según las unidades usadas para la velocidad. Si se usan nudos,  $k = 5,3$ , y si se usan metros por segundo,  $k = 41,35$ .
- $S$  es la superficie de la pala del timón en  $m^2$ .
- $V$  es la velocidad del buque en m/s o nudos.
- $\alpha$  el ángulo metido del timón.

Ahora bien, al ser la velocidad del buque solo constante en los primeros instantes de medida del timón, como mas adelante se explicará, quedaría para usarse la fórmula 2.17.

$$P_N = \frac{k \cdot S \cdot V^2 \cdot \sin(\alpha - \delta)}{0,2 + 0,3 \cdot \sin(\alpha - \delta)} \quad (2.17)$$

En el caso de no saber el valor de  $\delta$ , se puede tomar como referencia que  $\alpha - \delta = \frac{2}{3} \cdot \alpha$

Ahora bien, si descomponemos la fuerza normal a la pala del timón sobre el eje transversal y el longitudinal, tenemos una fuerza que tiende a hacer evolucionar el buque y otra fuerza que tiende a frenar el buque. Aquí tenemos los dos efectos que se han mencionado al principio del subapartado, pero, no nos vamos a quedar aquí, sino que vamos a calcular el valor de la fuerza que frena el buque y el valor del momento evolutivo que crea la fuerza en el sentido transversal del buque.

Para calcular la fuerza que frena el buque es muy sencillo. Para ello simplemente se tiene que aplicar la siguiente fórmula:

$$P_F = P_N \cdot \sin \alpha \quad (2.18)$$

Ahora, para calcular el momento de evolución vamos a basarnos en la imagen 2.73.

Aplicando un porcentaje del 80 % por la reducción de velocidad perdida en la metida de timón, y substituyendo los datos adecuados, obtenemos la fórmula 2.19.

$$M_e = \frac{S \cdot V^2 \cdot E \cdot \sin (2\alpha)}{0,2 + 0,3 \cdot \sin \alpha} \quad (2.19)$$

Estando la velocidad en nudos.

Ahora, una vez presentadas las fórmulas, vamos a calcular con el ejemplo del buque M/T Monte Udala, los valores explicados anteriormente.

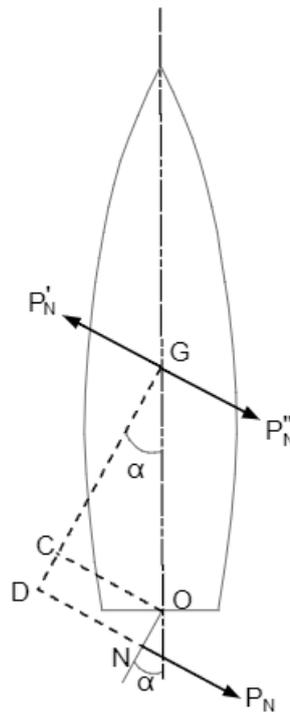
Para calcular la superficie de la pala del timón aplicaremos la fórmula 2.16.

Tomaremos como referencia una eslora de 274 metros y un calado de verano de 17,02 metros.

$$S_T = \frac{274 \cdot 17,02}{60} = 77,7 \text{ m}^2$$

Comparándolo con el valor real tomado del manual de navegación del propio buque, la superficie del timón es de 81,60  $\text{m}^2$ , lo cual supera no por mucho

**Figura 2.73: Momento evolutivo**



**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

el valor calculado.

Ahora, calculemos la fuerza normal  $P_N$  sobre la pala del timón suponiendo que metemos  $25^\circ$  a babor con una velocidad de 13 nudos y la superficie de la pala del timón calculada. Para ello aplicaremos la fórmula 2.17.

$$P_N = \frac{5,3 \cdot 77,7 \cdot 13^2 \cdot \sin\left(\frac{2}{3} \cdot 25^\circ\right)}{0,2 + 0,3 \cdot \sin\left(\frac{2}{3} \cdot 25^\circ\right)} = 69781,4 \text{ kgf}$$

Una vez calculada la fuerza  $P_N$  ya solo nos queda calcular la componente de esta fuerza que frena el buque y el momento evolutivo.

Para calcular la fuerza que frena el buque  $P_F$ , utilizamos la fórmula 2.18.

$$P_F = 69781,4 \cdot \sin 25^\circ = 29490,9 \text{ kgf}$$

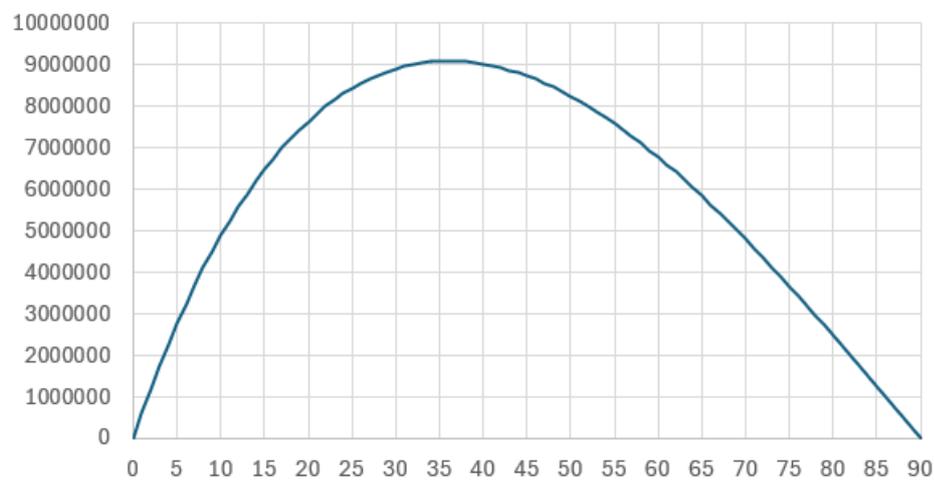
Con este resultado nos damos cuenta de la importancia que tiene el poder mantener un rumbo metiendo el mínimo timón posible. A pesar de que es un ejemplo exagerado como se ha comentado anteriormente, este último dato

demuestra la gran pérdida de velocidad que supone meter un gran ángulo de timón. Concretamente, yendo a 13 nudos, meter 25 grados a una banda supondría la misma frenada que tener un remolcador en popa tirando con una fuerza de 30 toneladas.

Finalmente, para el cálculo del momento evolutivo se va a calcular para un ángulo de timón de 25° como se ha hecho hasta ahora (aunque ese dato no es de especial interés en este trabajo) y se presentará un gráfico donde se pueda ver en que ángulo ejerce el timón un mayor momento evolutivo (lo cual sí es muy interesante desde el punto de vista de la maniobrabilidad). Para ello se usará la fórmula 2.19.

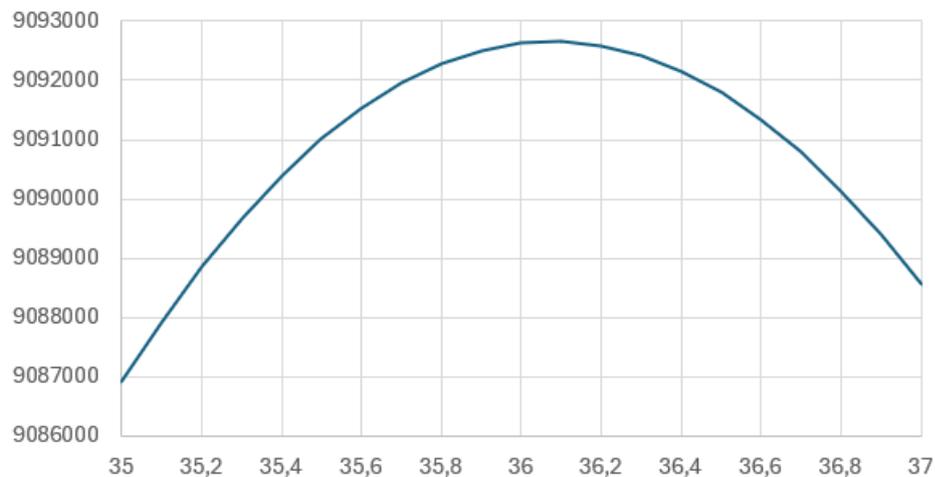
$$M_e = \frac{77,7 \cdot 13^2 \cdot 274 \cdot \sin 2 \cdot 25^\circ}{0,2 + 0,3 \cdot \sin 2 \cdot 25^\circ} = 8434308,9 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

**Figura 2.74:** Resultado del momento evolutivo que ejercería el timón desde a la vía hasta en perpendicular a la línea de crujía



Como podemos ver en el gráfico, el máximo del momento evolutivo no es sobre los 45° de timón como podría uno pensar, sino que está alrededor de los 35 grados. Para poder decirlo con certeza, mírese el gráfico 2.75 realizado a partir de los cálculos entre 35° y 37° cada 6 minutos de medida de timón. De esa manera nos damos cuenta de que el ángulo con mayor efectividad del timón es 36,1°.

**Figura 2.75:** Resultado del momento evolutivo entre 35° y 37° de metida de timón



### 2.6.6. Efectos del timón y la hélice juntos

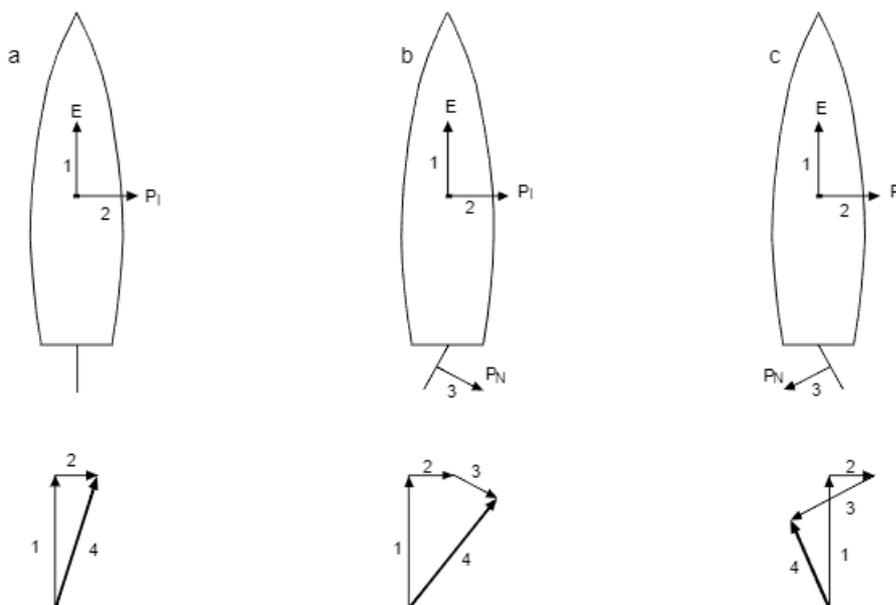
Para terminar ya la parte del desarrollo de este proyecto, se va a explicar como afecta al buque la acción conjunta del timón y la hélice. Estos efectos, cuando se habla de maniobras se deben tener muy claros, sobre todo cuando se navega en zonas de peligro debido al poco espacio para maniobrar.

Cabe destacar que para realizar este análisis, también se partirá de la base de la referencia bibliográfica [31]. Además, se usará de referencia un buque con un timón convencional, con una hélice de paso fijo dextrógira.

#### ■ Buque partiendo sin arrancada

- Máquina avante
  - Timón a la vía (a): Al empuje (vector 1) se le añade la fuerza lateral de las palas (vector 2), resultando el vector 4 sobre la popa, por lo que la popa caería a estribor.
  - Timón a babor (b): Al empuje (vector 1) se le añade la fuerza lateral de las palas (vector 2) y la presión normal del timón (vector 3) por tenerlo metido a babor, resultando el vector 4 que hace caer la popa hacia estribor.
  - Timón a estribor (c): Al empuje (vector 1) se le añade la fuerza lateral de las palas (vector 2) y la presión normal del timón (vec-

**Figura 2.76:** Respuesta del buque sin arrancada con máquina avante



**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

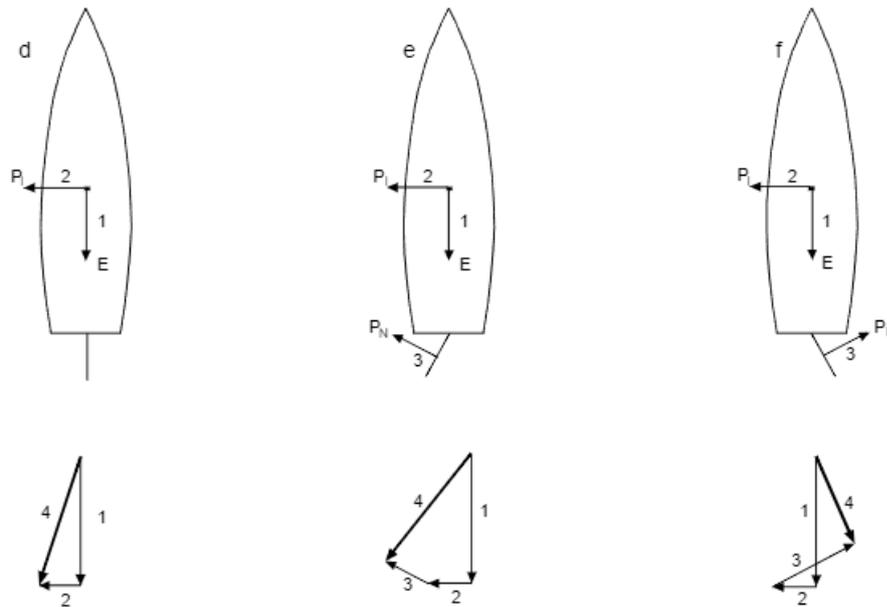
tor 3) por tenerlo metido a estribor, resultando el vector 4 que hace caer la popa hacia babor.

Con estos tres casos nos damos cuenta de que, con el buque parado y máquina avante, el buque obedecerá al timón.

• Máquina atrás

- Timón a la vía (d): Al empuje (vector 1) se le añade la fuerza lateral de las palas (vector 2) y al no haber presión normal por tener el timón a la vía, resulta el vector 4 sobre la popa, por lo que ésta caería a babor.
- Timón a babor (e): Al empuje (vector 1) se le añade la fuerza lateral de las palas (vector 2) y la presión normal del timón (vector 3) por tenerlo metido a babor, resultando el vector 4 que hace caer la popa hacia babor.
- Timón a estribor (f): Al empuje (vector 1) se le añade la fuerza lateral de las palas (vector 2) y la presión normal del timón (vector 3) por tenerlo metido a estribor, resultando el vector 4 que

**Figura 2.77:** Respuesta del buque sin arrancada con máquina atrás



**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

hace caer la popa hacia estribor.

En estos casos, hasta que el buque coge arrancada y le llegue flujo de agua al timón, va a predominar el efecto de las presiones laterales de la hélice.

#### ■ Buque con arrancada avante

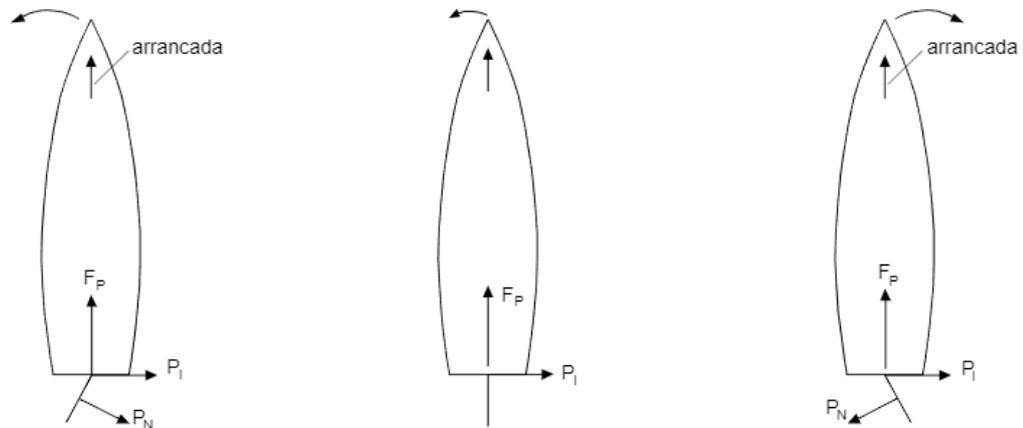
##### • Máquina avante

En este caso, al ir con arrancada y la máquina avante, el timón recibe gran flujo de agua por lo que su efecto será el predominante.

- Timón a la vía: en este caso, al estar el timón a la vía, solo actuaría la presión lateral de la hélice, pero, como se vio en apartados anteriores, una vez el buque coge arrancada, esta fuerza desaparece o incluso se llega a girar.
- Timón a babor: la popa del buque caerá a estribor rápidamente.
- Timón a estribor: la popa del buque caerá a babor rápidamente.

##### • Máquina atrás

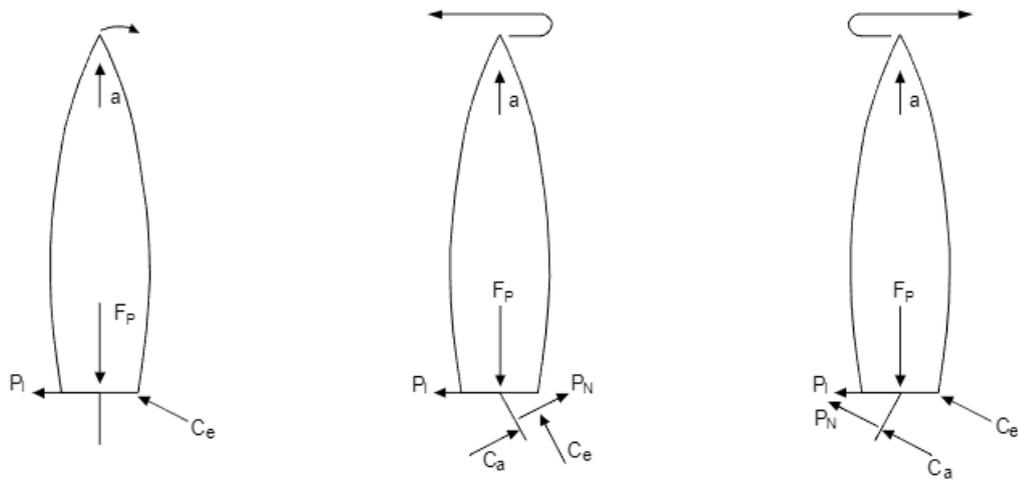
**Figura 2.78:** Respuesta del buque con arrancada avante con máquina avante



**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

- Timón a la vía: mientras el buque vaya con arrancada y el timón siga teniendo un flujo de agua suficiente para tener gobierno, el buque mantendrá su rumbo. Sin embargo, cuando el buque baje de la velocidad mínima de gobierno (alrededor de 2 nudos), la fuerza lateral de la hélice empezará a coger importancia de igual manera que la incidencia del chorro sobre la bovedilla. De esta manera, finalmente la popa terminará cayendo a babor.
- Timón a babor: inicialmente, gracias al flujo de agua que recibe el timón, la popa caerá a estribor pero desacelerando gracias a la importancia que gana fuerza lateral de la hélice a medida que disminuye la velocidad. Una vez que el buque empiece a coger arrancada atrás, el timón cobrará importancia y ahora la popa del buque caerá hacia babor.
- Timón a estribor: con un planteamiento similar al anterior, mientras el buque vaya con arrancada avante, el timón mandará, haciendo caer la popa a babor (ayudado también por la fuerza lateral de la hélice). Una vez el buque empiece a coger arrancada atrás, como en el caso anterior, el timón empezará a coger importancia de manera que la popa del buque ahora caerá ha-

**Figura 2.79:** Respuesta del buque con arrancada avante con máquina atrás



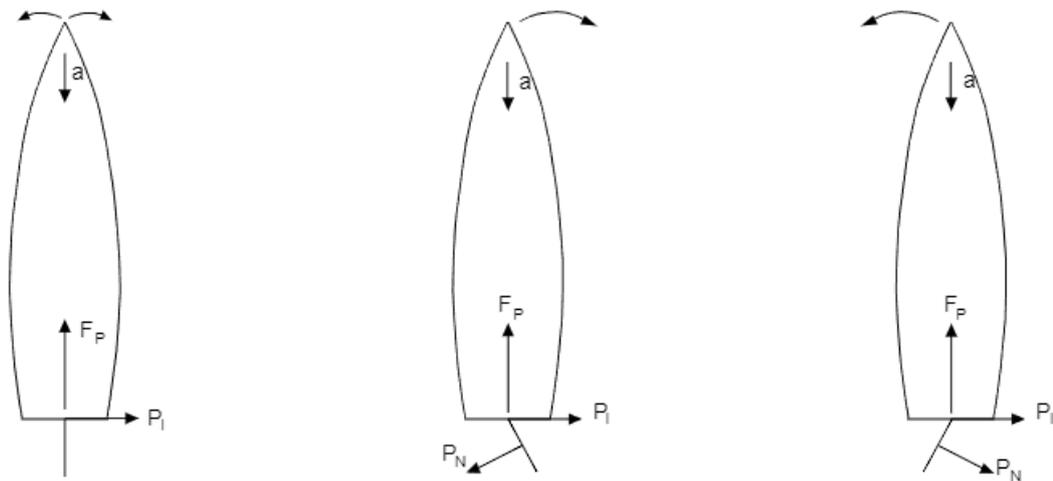
**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

cia estribor.

■ **Buque con arrancada atrás**

- Máquina avante

**Figura 2.80:** Respuesta del buque con arrancada atrás con máquina avante



**Fuente:** Maniobra de los buques, R. M. Sagarra

- Timón a la vía: en esta situación empezaría el buque con una caída de la popa a la banda de giro de la hélice residual de cuando se ha dado máquina atrás para coger arrancada. A medida

que la velocidad vaya disminuyendo gracias al empuje de la máquina avante, la presión lateral de la hélice cogerá importancia haciendo caer ahora la popa del buque a estribor. Desde que el buque ha perdido la arrancada, estaríamos en la situación de buque en reposo con máquina avante.

- Timón a babor: empezaría la situación con la popa del buque cayendo de manera rápida a babor. A medida que fuese disminuyendo la velocidad, la fuerza lateral de la hélice empezase a coger importancia y el chorro de expulsión de la hélice incidiese sobre la cara de babor del timón, haría que la popa cayese rápidamente a la banda contraria que la inicial, es decir, a estribor.
- Timón a estribor: de manera similar a la anterior, al inicio, la popa caería a estribor debido a la acción del timón y la presión lateral de la hélice. Sin embargo, a medida que el chorro de expulsión de la hélice dejase de verse obstruido por el flujo de agua de popa y empezase a incidir sobre la cara de estribor del timón, el buque empezaría a responder a la acción del timón y la popa empezaría a caer a babor.

### 3. Conclusiones

Para finalizar este proyecto, las conclusiones que se pueden sacar son las siguientes:

**Primero.** La capacidad de maniobra de cada buque, no solo depende de la propulsión y sistemas de gobierno, también depende de la forma del casco del buque, de la superestructura y de la disposición de la carga si se lleva encima de cubierta. Eso supone que cada buque tendrá una capacidad de maniobra muy distinta a la de otro.

**Segundo.** Los efectos externos del buque dependen mayoritariamente de las condiciones de carga del momento observado. Un buque cargado va a ser mucho más vulnerable a los efectos de la corriente (si es un buque portacontenedores, cuanto más se cargue en cubierta, más le afectará el efecto del viento). Por otra parte, es cierto que las condiciones de carga de un buque afectará a los efectos producidos por la acción de la hélice y el timón, pero con mucho menor medida.

**Tercero.** Los efectos externos causados por la corriente, sobre todo en buques petroleros o graneleros, son notablemente más intensos que aquellos efectos causados por la acción del viento. Eso es debido a que la superficie de incidencia de la corriente es mucho mayor y a que el agua es un fluido mucho más denso que el aire.

Sin embargo, generalmente, el viento va a causar un mayor momento resultante que la corriente sobre el buque.

**Cuarto.** Al hacer maniobras en un puerto o en aguas donde no haya mucho espacio, es muy recomendable apoyarse en remolcadores ya que eso va a ayudar a combatir todos los posibles efectos externos que afectan al barco.

**Quinto.** Cada sistema de propulsión tiene unas características y ofrece una cierta facilidad a la hora de navegar o maniobrar distintas a los demás. Por eso, es recomendable que cada tipo de buque utilice el sistema de propulsión que más se adapta a sus necesidades.

Por ejemplo, para un buque de pasaje, como es un fast-ferry, es recomen-

dable el water-jet ya que funciona muy bien a muy altas velocidades y a bajas velocidades, proporcionando buen rendimiento en las maniobras de puerto. En cambio, en un buque como los petroleros o de carga general, es mas recomendable el uso de una hélice convencional gracias a su bajo coste de instalación y mantenimiento y su alto rendimiento en la navegación a una velocidad fija. Por otra parte, los sistemas azimutales son recomendables para buques de pasaje como los cruceros ya que, a pesar de tener que llevar varios equipos debido a la limitación de potencia, al llegar a puerto, ofrecen una altísima capacidad de maniobra.

**Sexto.** De igual manera que en el caso anterior, cuando se trata el tema de los timones, es muy importante saber las ventajas de cada tipo y saber cual es la finalidad de cada buque.

Por ejemplo, un buque que necesita una amplia capacidad de maniobra como puede ser el B/H Esperanza del Mar, necesita unos timones Becker. Sin embargo, un buque de carga general o petrolero, el cual pase la mayor parte de su tiempo navegando en mar abierto, es más recomendable el uso de un timón convencional compensado. Eso es debido a que los gastos de mantenimiento son mucho menores y las características que le ofrece este tipo de timón, son suficientes.

**Séptimo.** A la hora de navegar en aguas con un espacio de maniobra reducido, es muy importante conocer el comportamiento conjunto del uso de la hélice y timón. Eso es debido a que en cada situación el buque actúa de una manera distinta y si no se toma en consideración o uno se equivoca, supondrá un gran peligro para la navegación.

## Referencias

- [1] OMI, “Reglamento internacional para prevenir los abordajes,” 1972.
- [2] G. Maspéro, *Life in ancient Egypt and Assyria*, A. Morton, Ed. Chapman and Hall. Id, 1892.
- [3] M. I. V. Maroto, *La construcción naval*, 2008, pp. 549–592.
- [4] M. P. Hornero, “Modelado y recreación virtual de un motor a vapor vertical de un cilindro tipo ”grasshopper”,” 2023.
- [5] R. H. Stewart, *Introduction To Physical Oceanography*, T. A. University, Ed., 2004.
- [6] MOPU, *ROM 3.1-99 Proyecto de la configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación*, D. general de puertos y costas, Ed., 1999.
- [7] —, *ROM 0.2-90 Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias*, D. general de puertos y costas, Ed., 1990.
- [8] S. R. García, “El arte de fondear,” 2015.
- [9] B. C. Marítima, “Flota de remolcadores,” consultado el 2024-05-02. [Online]. Available: <https://www.boluda.com.es/es/flota/remolcadores/>
- [10] A. A. R. de la Fuente, “Análisis de las condiciones meteorológicas en las inmediaciones del puerto de barcelona y su afectación en el tráfico,” 2021.
- [11] R. W. Rowe, *The shiphandler’s guide for masters and navigating officers, pilots and tug masters*. Nautical Institute, 2000.
- [12] B. Ibarra, “Propulsión en barcos,” 2020, consultado el 2024-05-03. [Online]. Available: <http://fundicionesrice.com/assets/frontend/cartas/TNL111/TNL111esp.htm>

- [13] E. Barbudo, *Tratado de maniobra*, 8th ed. Fragata Libros Náuticos, 1995, vol. I.
- [14] R. H. Zurita, “El sistema propulsivo del buque: las hélices marinas y el fenómeno de la cavitación,” 2013.
- [15] A. N. Marinos, “Efecto de la hélice en un barco,” 2016, consultado el 2024-05-03. [Online]. Available: <https://marinos.es/el-efecto-de-la-helice-en-un-barco/>
- [16] K. Helices, “¿qué es el paso de una hélice?” consultado el 2024-05-03. [Online]. Available: [https://heliceskelly.com/2017/08/10/que\\_es\\_paso/](https://heliceskelly.com/2017/08/10/que_es_paso/)
- [17] Álvaro Manuel Álvarez Hernández, “Hélices y timones de maniobra,” 2015.
- [18] K. Helices, “¿qué es mejor 2, 3, 4 o 5 aspas?” 2018, consultado el 2024-05-04. [Online]. Available: <https://heliceskelly.com/2018/04/03/3-o-4-aspas/>
- [19] M. M. Herrera, “Estudio técnico, económico y comparativo de las hélices de paso fijo y de paso variable,” 2022.
- [20] Wärtsilä, “Controllable pitch propeller (cpp) systems,” consultado el 2024-05-04. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/marine/products/propulsors-and-gears/propellers/wartsila-controllable-pitch-propeller-systems>
- [21] M. Kluge, “Solicitud de patente de la tobera kort,” 2012.
- [22] P. D. Echave, “Estudio técnico de un sistema de propulsión azimutal,” 2014.
- [23] R. Pakaste, K. Laukia, M. Wilhelmson, and J. Kuuskoski, “Propulsión azipod, experiencia con los sistemas a bordo de buques marinos,” 1999.
- [24] W. P. Netherlands, *Manual de instrucciones*, 2005.

- [25] J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2nd ed., 2007.
- [26] A. Lara, "Sistema de propulsión waterjet," consultado el 2024-05-05. [Online]. Available: [https://ingenieromarino.com/sistema-de-propulsion-waterjet/#2-Partes\\_del\\_Waterjet](https://ingenieromarino.com/sistema-de-propulsion-waterjet/#2-Partes_del_Waterjet)
- [27] V. I. i Solà, "Estudio del sistema propulsivo waterjet," 2014.
- [28] Wärtsilä, "Bow thruster," consultado el 2024-05-06. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/bow-thruster>
- [29] HRP, "Operation manual smp 360 rt hrp control system," 2005.
- [30] G. R. Cuixeres, "Dimensionamiento, predicción de potencia y diseño de las hélices y timón de un buque mercante," 2011.
- [31] R. M. Sagarra, *Maniobra de los buques*, E. UPC, Ed., 1998.
- [32] L. Sileo and S. Steen, "Lateral force and turning moment on a reversing ship," 2011.
- [33] R. G. Soutullo, "El timón de un barco," consultado el 2024-05-07. [Online]. Available: <https://ingenieromarino.com/timon/>
- [34] D. B. Basallote, "Análisis, diseño y dimensionado del timón de un bulk carrier," 2016.
- [35] B. M. Systems, "Becker schilling rudder," consultado el 2024-05-07. [Online]. Available: <https://www.becker-marine-systems.com/products/product-detail/becker-schilling-rudder.html>
- [36] —, "Becker product brochure."