Comparativa analítica de metodologías para el cálculo de la disminución de la velocidad en buques sometidos a distintas condiciones meteorológicas

Trabajo final de Grado

Facultad de Náutica de Barcelona
Universidad Politécnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Manel Costalago Pallàs

Dirigido per:
Clara Borén

Grado en Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, 18 de octubre de 2021

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica

Versió	Data	Modificacions
1	[Data]	Creació del document
		Revisió...

Escrit per:	
Autor/a:	
Data:	

Revisat i aprovat per:	
Tutor/a:	
Data:	
Revisat i aprovat per:	
Co-Tutor/a:	
Data:	

Resumen

Este trabajo analiza por separado cuatro metodologías para el cálculo de la reducción de velocidad de un buque a causa del oleaje, para después estudiar los resultados de manera individual y ver cuál es el más adecuado para realizar este cálculo. Estas cuatro metodologías son: el método de Bowditch, el método de Aertssen, el método de Khokhlov y el método de Kwon.

Para poder completar este análisis y comparación de las metodologías, se tendrán en cuenta aspectos relacionados con las condiciones de navegación, como pueden ser la altura significativa de las olas o dirección de estas, y algunas características del propio buque a analizar.

Para ello, el caso y método de estudio se centra en varios buques distintos. Teniendo en cuenta las diferentes condiciones de navegación aplicadas a los buques seleccionados (cuyos datos se han solicitado a Puertos del Estado), se analiza el efecto en la reducción de velocidad del buque a causa del oleaje y el viento aplicando las cuatro metodologías presentadas. En definitiva, extrayendo unas conclusiones que ayuden a determinar cuál es la metodología que mejor parametriza dicha disminución de velocidad y qué diferencias existen al aplicarlas a un tipo de buque u otro. Adicionalmente, se analizará cuál de ellas se considera la óptima para ser introducida en un software de optimización de rutas.

Abstract

This work analyses separately four calculation methodologies of a ship speed reduction due to waves, in order to study the results individually and see which of the methods is the most suitable for carrying out this calculation. These four methodologies are: Bowditch's method, Aertssen's method, Khokhlov's method and Kwon's method.

In order to complete this analysis and comparison of methodologies, aspects related to navigation conditions will be taken into account, such as the significant height of the waves or their direction, as well as some of the characteristics of the vessel to be analysed.

For this purpose, the case and method of study focuses on several different vessels.

Taking into account the different navigation conditions applied to the selected vessels (whose data have been requested from *Puertos del Estado*), the effect on the reduction of vessel speed due to waves and wind is analysed by applying the four presented methodologies. In the end, conclusions will be drawn to help determine which methodology best parameterises this reduction in speed and what differences exist when applying them to one type of vessel or another. In addition, an analysis has been made on which of these methodologies is considered to be the optimum one to be introduced into route optimisation software.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1

2. ESTADO DEL ARTE 3

3. METODOLOGÍAS A ANALIZAR 5

3.1. MÉTODO DE BOWDITCH 5
3.2. MÉTODO DE AERTSSEN 6
3.3. MÉTODO DE KHOKHLOV 7
3.4. MÉTODO DE KWON 8

4. BUQUES, RUTA Y CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS 11

4.1. BUQUES 11
4.1.1. CRUISE BARCELONA 12
4.1.2. MIMMO IEVOLI 13
4.1.3. AMSTEL CONFIDENCE 13
4.1.4. CINZIA A 14
4.1.5. HARMONY OF THE SEAS 15
4.2. RUTA 15
4.3. CONDICIONES DE NAVEGACIÓN 16

5. RESULTADOS 19

5.1. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE BOWDITCH 19
5.1.1. CRUISE BARCELONA 20
5.1.2. MIMMO IEVOLI 20

5.1.3. AMSTEL CONFIDENCE 21
5.1.4. CINCIA A 22
5.1.5. HARMONY OF THE SEAS 23
5.1.6. TABLA RESUMEN DE BOWDITCH 24
5.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE AERTSSEN 25
5.2.1. CRUISE BARCELONA 25
5.2.2. MIMMO IEVOLI 26
5.2.3. AMSTEL CONFIDENCE 27
5.2.4. CINZIA A 28
5.2.5. HARMONY OF THE SEAS 29
5.2.6. TABLA RESUMEN DE AERTSSEN 30
5.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE KHOKHLOV 31
5.3.1. CRUISE BARCELONA 32
5.3.2. MIMMO IEVOLI 33
5.3.3. AMSTEL CONFIDENCE 34
5.3.4. CINZIA A 35
5.3.5. HARMONY OF THE SEAS 36
5.3.6. TABLA RESUMEN DE KHOKHLOV 37
5.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE KWON 38
5.4.1. CRUISE BARCELONA 39
5.4.2. MIMMO IEVOLI 41
5.4.3. AMSTEL CONFIDENCE 43
5.4.4. CINZIA A 45
5.4.5. HARMONY OF THE SEAS 47
5.4.6. TABLA RESUMEN DE KWON 50

6. CONCLUSIONES 51

7. BIBLIOGRAFÍA 55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: CRUISE BARCELONA. Fuente: www.vesselfinder.com [10] 12

Figura 2: MIMMO IEVOLI. Fuente: www.vesselfinder.com [12] 13

Figura 3: AMSTEL CONFIDENCE. Fuente: www.vesselfinder.com [8] 14

Figura 4: CINZIA A. Fuente: www.vesselfinder.com [9] 14

Figura 5: HARMONY OF THE SEAS. Fuente: www.vesselfinder.com [11] 15

Figura 6: Ruta Barcelona - Civitavecchia. Fuente: meteonav.aemet.es [14] 16

Figura 7: Puntos de recogida de datos meteorológicos. Fuente: www.puertos.es [13] 17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de valores de f en función de θ. [4]……6

Tabla 2: Tabla de valores de m y n [3]……7

Tabla 3: Altura de olas asociadas a número de Beaufort. Fuente: rmets.org [7]……9

Tabla 4: Datos CRUISE BARCELONA. Fuentes: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [10]……12

Tabla 5: Datos MIMMO IEVOLI. Fuentes: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [12]..13

Tabla 6: Datos AMSTEL CONFIDENCE. Fuente: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [8]……..14

Tabla 7: Datos CINZIA A. Fuentes: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [9]……15

Tabla 8: Datos HARMONY OF THE SEAS. Fuentes: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [11]……15

Tabla 9: Tabla de valores de las condiciones de navegación. Fuente: Puertos del Estado……18

Tabla 10: Tabla de resultados con el método Bowditch……24

Tabla 11: Tabla de resultados con el método Aertssen……30

Tabla 12: Tabla de resultados con el método Khokhlov……37

Tabla 13: Tabla de resultados con el método Kwon……50

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se planifica una ruta, en todo tipo de transporte, uno de los aspectos que más se tiene en cuenta es la duración en tiempo de esa ruta y el mundo del comercio marítimo no es ninguna excepción. Es por ello por lo que hoy en día, los buques están provistos de sondas, radares y sistemas de cálculo de ruta optima, para poder llegar de un punto de partida ''A'' a un punto de llegada ''B'' en el menor tiempo y gasto de combustible posible.

Los algoritmos de estos sistemas de cálculo de ruta óptima para buques, entre otras condiciones, son capaces de analizar cómo se verá afectada la velocidad del buque en diferentes zonas de esta ruta en función de las condiciones de navegación previstas y poder así, estimar la duración de la ruta programada o proponer una ruta distinta con mejores condiciones meteorológicas.

La motivación para la redacción de esta memoria es comprender a nivel teórico como se ve afectada la velocidad de un buque cuando navega sometido a diferentes condiciones de navegación, analizando y comparando 4 metodologías para el cálculo de esta reducción de velocidad. Estas metodologías son: el método de Bowditch, el método de Aertssen, el método de Khokhlov y el método de Kwon. Estas metodologías están basadas en ecuaciones que tratan de explicar cómo se ve afectada la velocidad de un buque que navega en determinadas condiciones de navegación.

En los siguientes capítulos de esta memoria se plantean los efectos de la navegación en condiciones climáticas adversas para después exponer y analizar las ecuaciones y sus variables de cada una de las metodologías para el cálculo de la reducción de velocidad a causa del oleaje.

A continuación, se presentan las diferentes condiciones de navegación y los diferentes tipos de buques a analizar junto con las características de cada uno de ellos que se tendrán en cuenta a la hora de aplicar los diferentes métodos.

El objetivo del trabajo es poder analizar estas 4 metodologías aplicadas a varios buques de diferentes características, para poder obtener unas conclusiones que ayuden a ver cómo afecta el

oleaje a diferentes tipos de buque, en diferentes condiciones meteorológicas y si alguna de estas metodologías podría ser óptima para implementar en un software de optimización de rutas.

2. ESTADO DEL ARTE

En un desplazamiento, sea cual sea el medio de transporte, el cuerpo que se desplaza debe vencer a una serie de fuerzas opuestas o resistencia al avance. En el ámbito marítimo, esta resistencia al avance se puede descomponer en 3 grandes grupos:

- Resistencia aerodinámica
- Resistencia hidrodinámica
- Resistencia accidental

La resistencia aerodinámica es la que está relacionada con los flujos de aire alrededor de la obra muerta del buque. En el medio marítimo tiene una implicación menor que la resistencia hidrodinámica en la resistencia al avance total del buque, ya que el aire tiene una densidad mucho menor que la que tiene el agua. Puede tener un peso más importante en buques rápidos.

La resistencia hidrodinámica se produce con la interacción de la obra viva del buque y el agua. Esta resistencia tiene una relevancia mayor en la resistencia al avance total del buque y está formada por varias componentes de resistencia hidrodinámica (resistencia por fricción, resistencia por formación de olas, …).

Respecto a la resistencia accidental, la principal diferencia con las 2 anteriores, es que se trata de resistencias que no están presentes de forma continua cuando el buque se encuentra en movimiento. Estas resistencias son:

- Resistencia debidas al paso por aguas poco profundas y canales
- Resistencia debido al estado del mar

La resistencia añadida que se genera cuando un buque navega con olas de una determinada altura forma parte de la resistencia accidental.

Para que un buque navegue a una velocidad de avance, venciendo a la resistencia al avance, es necesario que los motores generen una potencia que se conoce como potencia efectiva.

$$P_E = R * V$$

Que la resistencia al avance incremente a causa del oleaje afecta directamente a la potencia del buque, ya que los motores del buque tendrán que generar una mayor potencia para que el buque mantenga una determinada velocidad. Esto deriva en un aumento del consumo de combustible y emisiones generadas.

Por otro lado, se pueden dar unas condiciones de navegación en las que el buque no sea capaz de mantener la velocidad cuando se encuentra con estas y aunque los motores del buque no generen más potencia, al disminuir la velocidad, aumentará el tiempo de navegación y con ello el consumo de combustible y emisiones.

Es decir, un aumento de la altura de las olas que dificulte la navegación incrementa la resistencia al avance y tiene consecuencias en el consumo de combustible y emisiones generadas por el buque.

Ante esta situación, las navieras o armadores pueden ver afectados sus beneficios, pero las consecuencias que sufrimos todos, son las derivadas del cambio climático, que cada vez se acentúan más y son más frecuentes (temporales con nevadas extremas, deshielo de los casquetes polares, temperaturas muy elevadas en zonas donde no es habitual, …).

Para ayudar a controlar e intentar reducir la contaminación generada por los buques mercantes, se adoptó en 1973 el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, (MARPOL). Este Convenio, que ha sufrido numerosas actualizaciones a lo largo de los años, introduce en el año 1997 un Anexo VI, que no entró en vigor hasta mayo de 2005, en el que se establecen los límites de las emisiones de óxidos de azufre y de óxidos de nitrógeno de los escapes de los buques y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan el ozono.

Vistas las posibles consecuencias de navegar en condiciones climatológicas adversas, este trabajo pretende analizar y estudiar cómo se ve afectada la velocidad de varios buques cuando se enfrentan a diferentes tipos de altura y dirección de ola en función de las características de los propios buques.

3. METODOLOGÍAS A ANALIZAR

Este trabajo analiza y compara 4 metodologías distintas para el cálculo de la reducción de velocidad. Estas son:

- Método de Bowditch
- Método de Aertssen
- Método Khokhlov
- Método Kwon

A continuación, se analizan cada una de estas metodologías por separado. Para ello, se comentarán las variables que tienen en cuenta cada una de las ecuaciones que plantea cada método para el cálculo de la reducción de la velocidad del buque a causa del oleaje.

3.1. Método de Bowditch

Esta primera metodología propuesta por Bowditch [4] [3] define la velocidad resultante de un buque en función del oleaje teniendo en cuenta la altura significativa de las olas (Hs) y un parámetro que depende del ángulo desde la proa que forman la dirección del buque con la dirección de las olas al superar el buque $\left(f(\theta)\right)$. La ecuación es la siguiente:

$$v(H,\theta) = v_0 - f(\theta) * H^2 \qquad \text{(ec. 1)}$$

Donde,

v_0 es la velocidad inicial o velocidad de diseño

H es la altura significativa de las olas

$f(\theta)$ es un parámetro que depende del ángulo que forman la dirección del buque con la dirección de las olas. El valor está tabulado como se muestra en la tabla 1.

Angulo formado entre la dirección de las olas y el buque	f (kn/ft^2)
$0^o \leq \theta \leq 45^o$	0,0083
$45^o < \theta < 135^o$	0,0165
$135^o \leq \theta \leq 225^o$	0,0248
$225^o < \theta < 270^o$	0,0165
$270^o \leq \theta \leq 360^o$	0,0083

Tabla 1: Tabla de valores de f en función de θ. [4]

3.2. Método de Aertssen

En este segundo método para el cálculo de la reducción de velocidad, Aertssen [3] tiene en cuenta también la eslora del buque (L_{BP}) y define la velocidad final de un buque a causa del oleaje como muestra la siguiente ecuación:

$$v = v_0 - (\frac{m}{L_{BP}} + n)\frac{v_0}{100} \qquad \text{(ec. 2)}$$

Donde,

v_0 es la velocidad de diseño

m y n son coeficientes tabulados y definidos en la tabla 2

L_{BP} es la eslora del buque

		α	$150^o - 180^o$		$60^o - 150^o$		$30^o - 60^o$		$0^o - 30^o$	
BN	Hs	Wspeed	m	n	m	n	m	n	m	n
5	2,5	17-21	900	2	700	2	350	1	100	0
6	4,0	22-27	1300	6	1000	5	500	3	200	1
7	5,5	28-33	2100	11	1400	8	700	5	400	2
8	7,5	34-40	3600	18	2300	12	1000	7	700	3

Tabla 2: Tabla de valores de *m* y *n* [3]

De esta tabla podemos obtener los coeficientes m y n teniendo en cuenta que α es el ángulo desde la proa que forman la dirección del buque con la dirección de las olas al superar el buque.

3.3. Método de Khokhlov

En el método de Khokhlov, sugerido por Lubkovsky [3][6], el cálculo de la velocidad resultante de un buque debido al oleaje tiene en cuenta la altura significativa de las olas y la dirección de estas y el peso muerto del buque, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$v = v_0 - (0{,}745 * H_s - 0{,}245 * \alpha * H_s) * (1{,}0 - 1{,}35 * 10^{-6} * D * v_0) \qquad \text{(ec. 3)}$$

Donde,

v_0 es la velocidad inicial

H_s es la altura significativa de las olas

α es el ángulo de incidencia de las olas en el buque desde la proa en radianes

D es el peso muerto del buque

Este método es aplicable para buques con un peso muerto de 4.000 a 20.000 DWT y velocidades de diseño entre 9 y 20 nudos.

3.4. Método de Kwon

El cuarto y último método que analizar es una extensión de la formulación original desarrollada por Townsin y Kwon, en la que este último incluye una formulación para el cálculo de la reducción de velocidad en % de perdida de velocidad, para coeficientes de bloque (C_B) 0,55 – 0,85. En este caso, el método tiene en cuenta el número de Beaufort (BN) y el volumen de desplazamiento del buque en m^3 (∇), así como un factor de reducción por la dirección del oleaje (μ). [5]

Para ello, este método hace una clasificación en función del tipo de buque y su C_B, en 3 grupos que se detallan a continuación para obtener el % de reducción de velocidad con un viento y oleaje de proa:

- Para un $C_B = 0{,}75 - 0{,}80\ y\ 0{,}85$ en buques en condiciones de carga normales, a excepción de los portacontenedores, define la siguiente formula:

$$\frac{\Delta V}{V_1}100\% = 0{,}5BN + \frac{BN^{6,5}}{2{,}7\nabla^{\frac{2}{3}}} \qquad \text{(ec. 4a)}$$

- Para un $C_B = 0{,}75 - 0{,}80\ y\ 0{,}85$ en buques en condiciones de lastre, a excepción de los portacontenedores, define la siguiente formula:

$$\frac{\Delta V}{V_1}100\% = 0{,}7BN + \frac{BN^{6,5}}{2{,}7\nabla^{\frac{2}{3}}} \qquad \text{(ec. 4b)}$$

- Para un $C_B = 0{,}55 - 0{,}60\ y\ 0{,}65$ en buques en condiciones normales de carga para portacontenedores, define la siguiente formula:

$$\frac{\Delta V}{V_1}100\% = 0{,}7BN + \frac{BN^{6,5}}{22\nabla^{\frac{2}{3}}} \qquad \text{(ec. 4c)}$$

En la tabla 3, se muestran los números de Beaufort asociado a los diferentes rangos de altura de olas.

Fuerza del viento	Altura de ola	
	Metros	Máximo
0	-	-
1	0,1	0,1
2	0,2	0,3
3	0,6	1,0
4	1,0	1,5
5	2,0	2,5
6	3,0	4
7	4	5,5
8	5,5	7,5
9	7	10
10	9	12,5
11	11,5	16
12	14+	-

Tabla 3: Altura de olas asociadas a número de Beaufort. Fuente: rmets.org [7]

Respecto al factor de reducción por la dirección del oleaje (μ), el método hace una clasificación en función del ángulo de incidencia del oleaje en el buque desde la proa, como se describe a continuación.

- $2\mu = 1{,}7 - 0{,}03 * (BN - 4)^2 \rightarrow 30^{o} - 60^{o}$ (ec. 4d)
- $2\mu = 0{,}9 - 0{,}06 * (BN - 6)^2 \rightarrow 60^{o} - 150^{o}$ (ec. 4e)
- $2\mu = 0{,}4 - 0{,}03 * (BN - 8)^2 \rightarrow 150^{o} - 180^{o}$ (ec. 4f)

4. BUQUES, RUTA Y CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

Una vez vistos los 4 métodos para el cálculo de la reducción de velocidad de un buque a causa del oleaje, pasamos al caso de estudio en el que se aplican estos 4 métodos para poder analizar y comparar los resultados de estos de manera analítica. El caso de estudio está basado en varios buques de diferentes características y una ruta marítima para poder analizar y comparar las 4 metodologías en distintos puntos de esta ruta y épocas del año para lograr un análisis y comparación en un abanico de condiciones lo más amplio posible.

4.1. Buques

Para llevar a cabo el análisis y comparativa de las 4 metodologías para el cálculo de reducción de velocidad a causa del oleaje se han escogido 5 buques, distintos entre ellos. Los motivos por los que se han escogido estos 5 buques son:

- En primer lugar, porque son buques destinados a transportar mercancías diferentes entre ellos o pasajeros.
- Navegan todos o han navegado en el mar mediterráneo, zona en la que Puertos del Estado tiene puntos de recogidas de datos de las condiciones climatológicas.
- Al ser tipos de buques diferentes, tienen formas distintas (eslora, manga, calado) y navegan a velocidades diferentes. De esta manera, se obtendrán unos resultados que ayudarán a concluir como afecta la navegación en diferentes condiciones climatológicas a diferentes tipos de buque en función de sus características.
- Las características propias de los buques, necesarias para la gran parte de los cálculos a realizar, se pueden consultar fácilmente en plataformas como ‘’vesselfinfer’’ o ‘’marinetraffic’’.

4.1.1. CRUISE BARCELONA

Este primer buque que se toma como caso de estudio es un buque ROPAX, el CRUISE BARCELONA, que se muestra en la figura 1, de la compañía italiana de transporte marítimo de pasajeros y mercancías GRIMALDI LINES.

Figura 1: CRUISE BARCELONA. Fuente: www.vesselfinder.com [10]

A continuación, en la tabla 4, se muestran algunos datos de interés del CRUISE BARCELONA que se tendrán en cuenta, para alguna de las metodologías, a la hora de analizar el efecto que tienen las diferentes condiciones de navegación en la reducción de velocidad del buque, tales como la velocidad de diseño (v_0), eslora entre perpendiculares (L_{BP}), manga (B), calado (C) y tonelaje de peso muerto (DWT).

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
25 kn	225 m	30 m	7 m	5.000 t

Tabla 4: Datos CRUISE BARCELONA. Fuentes: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [10]

4.1.2. MIMMO IEVOLI

El segundo buque escogido como caso de estudio para aplicar los 4 métodos a estudiar es el MIMMO IEVOLI. Se trata de un buque cisterna que transporta a granel aceites y productos químicos como se puede ver en la figura 2.

Figura 2: MIMMO IEVOLI. Fuente: www.vesselfinder.com [12]

A continuación, en la tabla 5 se muestran los datos de interés del buque que serán necesarios para aplicar alguno de los métodos para el cálculo de la reducción de velocidad de este.

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
11 kn	125 m	20 m	7 m	9.554 t

Tabla 5: Datos MIMMO IEVOLI. Fuentes: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [12]

4.1.3. AMSTEL CONFIDENCE

El tercer buque que se toma como caso de estudio es el AMSTEL CONFIDENDE. Se trata de un bulk Carrier que se muestra en la figura 3. Las características de este buque se muestran en la tabla 6.

Figura 3: AMSTEL CONFIDENCE. Fuente: www.vesselfinder.com [8]

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
13 kn	183 m	30 m	7 m	38.503 t

Tabla 6: Datos AMSTEL CONFIDENCE. Fuente: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [8]

4.1.4. CINZIA A

Como cuarto caso de estudio se toma un portacontenedores, el CINZIA A que se muestra en la figura 4.

Figura 4: CINZIA A. Fuente: www.vesselfinder.com [9]

Las características de este buque se muestran a continuación en la tabla 7.

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
18 kn	200 m	30 m	11 m	33.894 t

Tabla 7: Datos CINZIA A. Fuentes: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [9]

4.1.5. HARMONY OF THE SEAS

El último tipo de buque que se toma como caso de estudio es un crucero, el HARMONY OF THE SEAS, que se muestra en la figura 5 y sus características se muestran en la tabla 8.

Figura 5: HARMONY OF THE SEAS. Fuente: www.vesselfinder.com [11]

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
19 kn	362 m	47 m	9 m	20.236 t

Tabla 8: Datos HARMONY OF THE SEAS. Fuentes: www.vesselfinder.com y www.marinetraffic.com [11]

4.2. Ruta

Respecto a la ruta donde se analizan y comparan las distintas metodologías, se ha escogido la ruta Barcelona – Civitavecchia, como se puede ver en la figura 6.

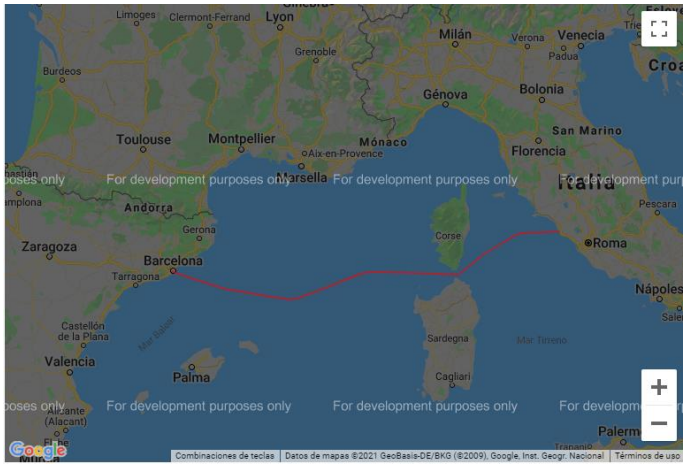

Figura 6: Ruta Barcelona - Civitavecchia. Fuente: meteonav.aemet.es [14]

4.3. Condiciones de navegación

Para poder analizar y comparar las 4 metodologías en unas condiciones de navegación que se comprendan en un abanico de posibilidades lo más amplio posible, pero sin alejarnos de la realidad, se ha solicitado a Puertos del Estado los datos de las condiciones meteorológicas del último año en 4 zonas de recogida de datos que estarían muy cercanas a la ruta mencionada anteriormente. Los puntos de los que se ha solicitado la información a Puertos del Estado son los que aparecen marcados en la figura 7.

Figura 7: Puntos de recogida de datos meteorológicos. Fuente: www.puertos.es [13]

Las boyas marcadas en la figura 4 se corresponden con los siguientes puntos:

1-> PUNTO SIMAR 2116139

2-> PUNTO SIMAR 2132132

3-> PUNTO SIMAR 2168132

4-> PUNTO SIMAR 2204144

Una vez observados los datos recibidos de Puertos del Estado de la información recogida por las 4 boyas anteriormente mencionadas, se decide realizar el estudio sobre algunos de los datos recogidos por las boyas 2 y 3 (PUNTO SIMAR 2132132 y PUNTO SIMAR 2168132 respectivamente) ya que se intuye y se corrobora viendo los datos recogidos de todo un año de las 4 boyas, que en estas 2, las condiciones de navegación durante el último año están comprendidas en un abanico de posibilidades más amplio. A continuación, en la tabla 9 se muestran los valores sobre las condiciones de navegación a analizar:

	Boya	**Fecha y hora**	**Altura significativa de las olas (m)**	**Dirección de la procedencia de las olas (N-0º, E-90º)**
Condición 1	3	21/11/2020 – 10:00h	4,37	28
Condición 2	2	21/11/2020 – 21:00h	3,19	62
Condición 3	2	09/01/2021 – 16:00h	4,31	65
Condición 4	2	11/07/2020 – 11:00h	2,52	138
Condición 5	2	22/01/2021 – 13:00h	4,61	250
Condición 6	3	27/09/2020 – 02:00h	2,63	287
Condición 7	2	03/07/2020 – 08:00h	3,51	355
Condición 8	2	26/12/2020 – 06:00h	7,49	358

Tabla 9: Tabla de valores de las condiciones de navegación. Fuente: Puertos del Estado

5. RESULTADOS

Una vez conocidos los diferentes métodos teóricos y los casos de estudio se aplican estos 4 métodos para cada uno de los buques en las distintas condiciones de navegación

Para ello, se tiene cuenta la información referente a las características de los buques y las 4 condiciones de navegación que se detalla en las tablas 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

Dado que la información recibida de Puertos del Estado expresa la dirección de procedencia del oleaje en grados (N-$\mathbf{0^o}$, E-$\mathbf{90^o}$) y que la ruta escogida es Barcelona- Civitavecchia, se toma el rumbo Este (E-$\mathbf{90^o}$) para los 5 buques.

5.1. Aplicación del método de Bowditch

Para la ecuación que plantea Bowditch (ec. 1), definimos el valor del parámetro f (tabulado en la tabla 1) para las diferentes condiciones de navegación. Hay que tener en cuenta también, que el parámetro f viene dado en (kn/ft^2), por lo que hay que tomar la altura significativa de las olas en pies (ft), no en metros (m) como viene dado en la tabla 9.

- Condición 1: $\theta = 118^o, f = 0{,}0165, H_s = 14{,}3\ ft$
- Condición 2: $\theta = 152^o, f = 0{,}0248, H_s = 10{,}5\ ft$
- Condición 3: $\theta = 155^o, f = 0{,}0248, H_s = 14{,}4\ ft$
- Condición 4: $\theta = 132^o, f = 0{,}0165, H_s = 8{,}3\ ft$
- Condición 5: $\theta = 20^o, f = 0{,}0083, H_s = 15{,}1\ ft$
- Condición 6: $\theta = 17^o, f = 0{,}0083, H_s = 8{,}6\ ft$
- Condición 7: $\theta = 85^o, f = 0{,}0165, H_s = 11{,}5\ ft$
- Condición 8: $\theta = 88^o, f = 0{,}0165, H_s = 24{,}6\ ft$

$$v(H, \theta) = v_0 - f(\theta) * H^2$$

5.1.1. CRUISE BARCELONA

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
25 kn	225 m	30 m	7 m	5.000 t

Condición 1:

$$v = 25 - 0{,}0165 * 14{,}3^2 = 21{,}6\ kn$$

Condición 2:

$$v = 25 - 0{,}0248 * 10{,}5^2 = 22{,}2\ kn$$

Condición 3:

$$v = 25 - 0{,}0248 * 14{,}4^2 = 19{,}8\ kn$$

Condición 4:

$$v = 25 - 0{,}0165 * 8{,}3^2 = 23{,}9\ kn$$

Condición 5:

$$v = 25 - 0{,}0083 * 15{,}1^2 = 23{,}1\ kn$$

Condición 6:

$$v = 25 - 0{,}0083 * 8{,}6^2 = 24{,}4\ kn$$

Condición 7:

$$v = 25 - 0{,}0165 * 11{,}5^2 = 22{,}8\ kn$$

Condición 8:

$$v = 25 - 0{,}0165 * 24{,}6^2 = 15{,}0\ kn$$

5.1.2. MIMMO IEVOLI

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
11 kn	125 m	20 m	7 m	9.554 t

Condición 1:

$$v = 11 - 0{,}0165 * 14{,}3^2 = 7{,}6\ kn$$

Condición 2:

$$v = 11 - 0{,}0248 * 10{,}5^2 = 8{,}3\ kn$$

Condición 3:

$$v = 11 - 0{,}0248 * 14{,}4^2 = 5{,}9\ kn$$

Condición 4:

$$v = 11 - 0{,}0165 * 8{,}3^2 = 9{,}9\ kn$$

Condición 5:

$$v = 11 - 0{,}0083 * 15{,}1^2 = 9{,}1\ kn$$

Condición 6:

$$v = 11 - 0{,}0083 * 8{,}6^2 = 10{,}4\ kn$$

Condición 7:

$$v = 11 - 0{,}0165 * 11{,}5^2 = 8{,}8\ kn$$

Condición 8:

$$v = 11 - 0{,}0165 * 24{,}6^2 = 1\ kn$$

5.1.3. AMSTEL CONFIDENCE

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
13 kn	183 m	30 m	7 m	38.503 t

Condición 1:

$$v = 13 - 0{,}0165 * 14{,}3^2 = 9{,}6\ kn$$

Condición 2:

$$v = 13 - 0{,}0248 * 10{,}5^2 = 10{,}3\ kn$$

Condición 3:

$$v = 13 - 0{,}0248 * 14{,}4^2 = 7{,}8\ kn$$

Condición 4:

$$v = 13 - 0{,}0165 * 8{,}3^2 = 11{,}9\ kn$$

Condición 5:

$$v = 13 - 0{,}0083 * 15{,}1^2 = 11{,}1\ kn$$

Condición 6:

$$v = 13 - 0{,}0083 * 8{,}6^2 = 12{,}4\ kn$$

Condición 7:

$$v = 13 - 0{,}0165 * 11{,}5^2 = 10{,}8\ kn$$

Condición 8:

$$v = 13 - 0{,}0165 * 24{,}6^2 = 3\ kn$$

5.1.4. CINCIA A

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
18 kn	200 m	30 m	11 m	33.894 t

Condición 1:

$$v = 18 - 0{,}0165 * 14{,}3^2 = 14{,}6\ kn$$

Condición 2:

$$v = 18 - 0{,}0248 * 10{,}5^2 = 15{,}3\ kn$$

Condición 3:

$$v = 18 - 0{,}0248 * 14{,}4^2 = 12{,}8\ kn$$

Condición 4:

$$v = 18 - 0{,}0165 * 8{,}3^2 = 16{,}9\ kn$$

Condición 5:

$$v = 18 - 0{,}0083 * 15{,}1^2 = 16{,}1\ kn$$

Condición 6:

$$v = 18 - 0{,}0083 * 8{,}6^2 = 17{,}4\ kn$$

Condición 7:

$$v = 18 - 0{,}0165 * 11{,}5^2 = 15{,}8\ kn$$

Condición 8:

$$v = 18 - 0{,}0165 * 24{,}6^2 = 8\ kn$$

5.1.5. HARMONY OF THE SEAS

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
19 kn	362 m	47 m	9 m	20.236 t

Condición 1:

$$v = 19 - 0{,}0165 * 14{,}3^2 = 15{,}6\ kn$$

Condición 2:

$$v = 19 - 0{,}0248 * 10{,}5^2 = 16{,}3\ kn$$

Condición 3:

$$v = 19 - 0{,}0248 * 14{,}4^2 = 13{,}8\ kn$$

Condición 4:

$$v = 19 - 0{,}0165 * 8{,}3^2 = 17{,}9\ kn$$

Condición 5:

$$v = 19 - 0{,}0083 * 15{,}1^2 = 17{,}1\ kn$$

Condición 6:

$$v = 19 - 0{,}0083 * 8{,}6^2 = 18{,}4\ kn$$

Condición 7:

$$v = 19 - 0{,}0165 * 11{,}5^2 = 16{,}8\ kn$$

Condición 8:

$$v = 19 - 0{,}0165 * 24{,}6^2 = 9\ kn$$

5.1.6. TABLA RESUMEN DE BOWDITCH

A continuación, en la tabla 10, se muestran los resultados de velocidad final de cada buque y el porcentaje de reducción de velocidad.

	BOWDITCH									
	CRUISE BARCELONA		MIMMO IEVOLI		AMSTEL CONFIDENCE		CINZIA A		HARMONY OF THE SEAS	
	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %
Cond. 1	21,6	13,6	7,6	30,9	9,6	26,1	14,6	18,9	15,6	17,9
Cond. 2	22,2	11,2	8,3	24,5	10,3	20,8	15,3	15	16,3	14,2
Cond. 3	19,8	20,8	5,9	46,4	7,8	40	12,8	28,9	13,8	27,4
Cond. 4	23,9	4,4	9,9	10	11,9	8,5	16,9	6,1	17,9	5,8
Cond. 5	23,1	7,6	9,1	17,3	11,1	14,6	16,1	10,5	17,1	10
Cond. 6	24,4	2,4	10,4	5,4	12,4	4,6	17,4	3,3	18,4	3,1
Cond. 7	22,8	8,8	8,8	20	10,8	16,9	15,8	12,2	16,8	11,6
Cond. 8	15	40	1	90,9	3	76,9	8	55,5	9	52,6

Tabla 10: Tabla de resultados con el método Bowditch

5.2. Aplicación del método de Aertssen

Para la aplicación de este método (ec. 2) se tienen en cuenta los valores de la altura significativa de ola (H_s) y el ángulo desde la proa que forman la dirección del buque con la dirección de las olas al superar el buque (α) para determinar los valores de los parámetros ''m'' y ''n'' de la tabla 2.

Este método también tiene en cuenta la eslora del buque (L_{BP}). Estos datos están reflejados en las tablas 4, 5, 6, 7 y 8.

- Condición 1: $H_s = 4{,}37\ m\ , \alpha = 118^o\ \rightarrow m = 1400\ , n = 8$
- Condición 2: $H_s = 3{,}19\ m\ , \alpha = 152^o\ \rightarrow m = 1300\ , n = 6$
- Condición 3: $H_s = 4{,}31\ m\ , \alpha = 155^o\ \rightarrow m = 2100\ , n = 11$
- Condición 4: $H_s = 2{,}52\ m\ , \alpha = 132^o\ \rightarrow m = 700\ , n = 2$
- Condición 5: $H_s = 4{,}61\ m\ , \alpha = 20^o\ \rightarrow m = 400\ , n = 2$
- Condición 6: $H_s = 2{,}63\ m\ , \alpha = 17^o\ \rightarrow m = 100\ , n = 0$
- Condición 7: $H_s = 3{,}51\ m\ , \alpha = 85^o\ \rightarrow m = 1000\ , n = 5$
- Condición 8: $H_s = 7{,}49\ m\ , \alpha = 88^o\ \rightarrow m = 2300\ , n = 12$

$$v = v_0 - (\frac{m}{L_{BP}} + n)\frac{v_0}{100}$$

5.2.1. CRUISE BARCELONA

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
25 kn	225 m	30 m	7 m	5.000 t

Condición 1:

$$v = 25 - \left(\frac{1400}{225} + 8\right) * \frac{25}{100} = 21{,}4\ kn$$

Condición 2:

$$v = 25 - \left(\frac{1300}{225} + 6\right) * \frac{25}{100} = 22\ kn$$

Condición 3:

$$v = 25 - \left(\frac{2100}{225} + 11\right) * \frac{25}{100} = 19{,}9\ kn$$

Condición 4:

$$v = 25 - \left(\frac{700}{225} + 2\right) * \frac{25}{100} = 23{,}7\ kn$$

Condición 5:

$$v = 25 - \left(\frac{400}{225} + 2\right) * \frac{25}{100} = 24\ kn$$

Condición 6:

$$v = 25 - \left(\frac{100}{225} + 0\right) * \frac{25}{100} = 24{,}9\ kn$$

Condición 7:

$$v = 25 - \left(\frac{1000}{225} + 5\right) * \frac{25}{100} = 22{,}6\ kn$$

Condición 8:

$$v = 25 - \left(\frac{2300}{225} + 12\right) * \frac{25}{100} = 19{,}4\ kn$$

5.2.2. MIMMO IEVOLI

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
11 kn	125 m	20 m	7 m	9.554 t

Condición 1:

$$v = 11 - \left(\frac{1400}{125} + 8\right) * \frac{11}{100} = 8{,}9\ kn$$

Condición 2:

$$v = 11 - \left(\frac{1300}{125} + 6\right) * \frac{11}{100} = 9{,}2\ kn$$

Condición 3:

$$v = 11 - \left(\frac{2100}{125} + 11\right) * \frac{11}{100} = 7{,}9\ kn$$

Condición 4:

$$v = 11 - \left(\frac{700}{125} + 2\right) * \frac{11}{100} = 10{,}2\ kn$$

Condición 5:

$$v = 11 - \left(\frac{400}{125} + 2\right) * \frac{11}{100} = 10{,}4\ kn$$

Condición 6:

$$v = 11 - \left(\frac{100}{125} + 0\right) * \frac{11}{100} = 10{,}9\ kn$$

Condición 7:

$$v = 11 - \left(\frac{1000}{125} + 5\right) * \frac{11}{100} = 9{,}6\ kn$$

Condición 8:

$$v = 11 - \left(\frac{2300}{125} + 12\right) * \frac{11}{100} = 7{,}6\ kn$$

5.2.3. AMSTEL CONFIDENCE

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
13 kn	183 m	30 m	7 m	38.503 t

Condición 1:

$$v = 13 - \left(\frac{1400}{183} + 8\right) * \frac{13}{100} = 11\ kn$$

Condición 2:

$$v = 13 - \left(\frac{1300}{183} + 6\right) * \frac{13}{100} = 11{,}3\ kn$$

Condición 3:

$$v = 13 - \left(\frac{2100}{183} + 11\right) * \frac{13}{100} = 10{,}1\ kn$$

Condición 4:

$$v = 13 - \left(\frac{700}{183} + 2\right) * \frac{13}{100} = 12{,}2\ kn$$

Condición 5:

$$v = 13 - \left(\frac{400}{183} + 2\right) * \frac{13}{100} = 12{,}4\ kn$$

Condición 6:

$$v = 13 - \left(\frac{100}{183} + 0\right) * \frac{13}{100} = 12{,}9\ kn$$

Condición 7:

$$v = 13 - \left(\frac{1000}{183} + 5\right) * \frac{13}{100} = 11{,}6\ kn$$

Condición 8:

$$v = 13 - \left(\frac{2300}{183} + 12\right) * \frac{13}{100} = 9{,}8\ kn$$

5.2.4. CINZIA A

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
18 kn	200 m	30 m	11 m	33.894 t

Condición 1:

$$v = 18 - \left(\frac{1400}{200} + 8\right) * \frac{18}{100} = 15{,}3\ kn$$

Condición 2:

$$v = 18 - \left(\frac{1300}{200} + 6\right) * \frac{18}{100} = 15{,}7\ kn$$

Condición 3:

$$v = 18 - \left(\frac{2100}{200} + 11\right) * \frac{18}{100} = 14{,}1\ kn$$

Condición 4:

$$v = 18 - \left(\frac{700}{200} + 2\right) * \frac{18}{100} = 17\ kn$$

Condición 5:

$$v = 18 - \left(\frac{400}{200} + 2\right) * \frac{18}{100} = 17{,}3\ kn$$

Condición 6:

$$v = 18 - \left(\frac{100}{200} + 0\right) * \frac{18}{100} = 17{,}9\ kn$$

Condición 7:

$$v = 18 - \left(\frac{1000}{200} + 5\right) * \frac{18}{100} = 16{,}2\ kn$$

Condición 8:

$$v = 18 - \left(\frac{2300}{200} + 12\right) * \frac{18}{100} = 13{,}8\ kn$$

5.2.5. HARMONY OF THE SEAS

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
19 kn	362 m	47 m	9 m	20.236 t

Condición 1:

$$v = 19 - \left(\frac{1400}{362} + 8\right) * \frac{19}{100} = 16{,}7\ kn$$

Condición 2:

$$v = 19 - \left(\frac{1300}{362} + 6\right) * \frac{19}{100} = 17{,}2\ kn$$

Condición 3:

$$v = 19 - \left(\frac{2100}{362} + 11\right) * \frac{19}{100} = 15{,}8\ kn$$

Condición 4:

$$v = 19 - \left(\frac{700}{362} + 2\right) * \frac{19}{100} = 18{,}2\ kn$$

Condición 5:

$$v = 19 - \left(\frac{400}{362} + 2\right) * \frac{19}{100} = 18{,}4\ kn$$

Condición 6:

$$v = 19 - \left(\frac{100}{362} + 0\right) * \frac{19}{100} = 18{,}9\ kn$$

Condición 7:

$$v = 19 - \left(\frac{1000}{362} + 5\right) * \frac{19}{100} = 17{,}5\ kn$$

Condición 8:

$$v = 19 - \left(\frac{2300}{362} + 12\right) * \frac{19}{100} = 15{,}5\ kn$$

5.2.6. TABLA RESUMEN DE AERTSSEN

A continuación, en la tabla 11, se muestran los resultados de velocidad final de cada buque y el porcentaje de reducción de velocidad.

	AERTSSEN									
	CRUISE BARCELONA		MIMMO IEVOLI		AMSTEL CONFIDENCE		CINZIA A		HARMONY OF THE SEAS	
	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %
Cond. 1	21,4	14,4	8,9	19,1	11	15,4	15,3	15	16,7	12,1
Cond. 2	22	12	9,2	16,4	11,3	13,1	15,7	12,8	17,2	9,5
Cond. 3	19,9	20,4	7,9	28,2	10,1	22,3	14,1	21,7	15,8	16,8
Cond. 4	23,7	5,2	10,2	7,3	12,2	6,1	17	5,5	18,2	4,2
Cond. 5	24	4	10,4	5,4	12,4	4,6	17,3	3,9	18,4	3,1
Cond. 6	24,9	0,4	10,9	0,9	12,9	0,8	17,9	0,5	18,9	0,5
Cond. 7	22,6	9,6	9,6	12,7	11,6	10,8	16,2	10	17,5	7,9
Cond. 8	19,4	22,4	7,6	30,9	9,8	24,6	13,8	23,3	15,5	18,4

Tabla 11: Tabla de resultados con el método Aertssen

5.3. Aplicación del método de Khokhlov

Para la obtención de los resultados por este método, se tienen en cuenta valores de las diferentes condiciones de navegación como la altura significativa de las olas (H_s) y el ángulo de incidencia de las olas en el buque desde la proa en radianes (α) (tabla 9).

- Condición 1: $H_s = 4{,}37\ m\ , \alpha = \frac{31}{90}\pi\ rad$
- Condición 2: $H_s = 3{,}19\ m\ , \alpha = \frac{7}{45}\pi\ rad$
- Condición 3: $H_s = 4{,}31\ m\ , \alpha = \frac{5}{36}\pi\ rad$
- Condición 4: $H_s = 2{,}52\ m\ , \alpha = \frac{4}{15}\pi\ rad$
- Condición 5: $H_s = 4{,}61\ m\ , \alpha = \frac{8}{9}\pi\ rad$
- Condición 6: $H_s = 2{,}63\ m\ , \alpha = \frac{163}{180}\pi\ rad$
- Condición 7: $H_s = 3{,}51\ m\ , \alpha = \frac{19}{36}\pi\ rad$

- Condición 8: $H_s = 7{,}49\ m\ , \alpha = \frac{23}{45}\pi\ rad$

También hay que tener en cuenta el peso muerto en toneladas de cada uno de los buques, valores que se encuentran en las tablas 4, 5, 6, 7 y 8.

$$v = v_0 - (0{,}745 * H_s - 0{,}245 * \alpha * H_s) * (1{,}0 - 1{,}35 * 10^{-6} * D * v_0)$$

5.3.1. CRUISE BARCELONA

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
25 kn	225 m	30 m	7 m	5.000 t

Condición 1:

$$v = 25 - \left(0{,}745 * 4{,}37 - 0{,}245 * \frac{31}{90}\pi * 4{,}37\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 5000 * 25) = 23{,}2\ kn$$

Condición 2:

$$v = 25 - \left(0{,}745 * 3{,}19 - 0{,}245 * \frac{7}{45}\pi * 3{,}19\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 5000 * 25) = 23{,}3\ kn$$

Condición 3:

$$v = 25 - \left(0{,}745 * 4{,}31 - 0{,}245 * \frac{5}{36}\pi * 4{,}31\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 5000 * 25) = 22{,}7\ kn$$

Condición 4:

$$v = 25 - \left(0{,}745 * 2{,}52 - 0{,}245 * \frac{4}{15}\pi * 2{,}52\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 5000 * 25) = 23{,}7\ kn$$

Condición 5:

$$v = 25 - \left(0{,}745 * 4{,}61 - 0{,}245 * \frac{8}{9}\pi * 4{,}61\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 5000 * 25) = 24{,}8\ kn$$

Condición 6:

$$v = 25 - \left(0{,}745 * 2{,}63 - 0{,}245 * \frac{163}{180}\pi * 2{,}63\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 5000 * 25) = 24{,}9\ kn$$

Condición 7:

$$v = 25 - \left(0{,}745 * 3{,}51 - 0{,}245 * \frac{19}{36}\pi * 3{,}51\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 5000 * 25) = 24\ kn$$

Condición 8:

$$v = 25 - \left(0{,}745 * 7{,}49 - 0{,}245 * \frac{23}{45}\pi * 7{,}49\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 5000 * 25) = 22{,}8\ kn$$

5.3.2. MIMMO IEVOLI

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
11 kn	125 m	20 m	7 m	9.554 t

Condición 1:

$$v = 11 - \left(0{,}745 * 4{,}37 - 0{,}245 * \frac{31}{90}\pi * 4{,}37\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 9554 * 11) = 9{,}2\ kn$$

Condición 2:

$$v = 11 - \left(0{,}745 * 3{,}19 - 0{,}245 * \frac{7}{45}\pi * 3{,}19\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 9554 * 11) = 9{,}3\ kn$$

Condición 3:

$$v = 11 - \left(0{,}745 * 4{,}31 - 0{,}245 * \frac{5}{36}\pi * 4{,}31\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 9554 * 11) = 8{,}6\ kn$$

Condición 4:

$$v = 11 - \left(0{,}745 * 2{,}52 - 0{,}245 * \frac{4}{15}\pi * 2{,}52\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 9554 * 11) = 9{,}8\ kn$$

Condición 5:

$$v = 11 - \left(0{,}745 * 4{,}61 - 0{,}245 * \frac{8}{9}\pi * 4{,}61\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 9554 * 11) = 10{,}7\ kn$$

Condición 6:

$$v = 11 - \left(0{,}745 * 2{,}63 - 0{,}245 * \frac{163}{180}\pi * 2{,}63\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 9554 * 11) = 10{,}9\ kn$$

Condición 7:

$$v = 11 - \left(0{,}745 * 3{,}51 - 0{,}245 * \frac{19}{36}\pi * 3{,}51\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 9554 * 11) = 10\ kn$$

Condición 8:

$$v = 11 - \left(0{,}745 * 7{,}49 - 0{,}245 * \frac{23}{45}\pi * 7{,}49\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 9554 * 11) = 8{,}7\ kn$$

5.3.3. AMSTEL CONFIDENCE

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
13 kn	183 m	30 m	7 m	38.503 t

Condición 1:

$$v = 13 - \left(0{,}745 * 4{,}37 - 0{,}245 * \frac{31}{90}\pi * 4{,}37\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 38503 * 13) = 12{,}3\ kn$$

Condición 2:

$$v = 13 - \left(0{,}745 * 3{,}19 - 0{,}245 * \frac{7}{45}\pi * 3{,}19\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 38503 * 13) = 12{,}3\ kn$$

Condición 3:

$$v = 13 - \left(0{,}745 * 4{,}31 - 0{,}245 * \frac{5}{36}\pi * 4{,}31\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 38503 * 13) = 12{,}1\ kn$$

Condición 4:

$$v = 13 - \left(0{,}745 * 2{,}52 - 0{,}245 * \frac{4}{15}\pi * 2{,}52\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 38503 * 13) = 12{,}5\ kn$$

Condición 5:

$$v = 13 - \left(0{,}745 * 4{,}61 - 0{,}245 * \frac{8}{9}\pi * 4{,}61\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 38503 * 13) = 12{,}9\ kn$$

Condición 6:

$$v = 13 - \left(0{,}745 * 2{,}63 - 0{,}245 * \frac{163}{180}\pi * 2{,}63\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 38503 * 13) = 12{,}9\ kn$$

Condición 7:

$$v = 13 - \left(0{,}745 * 3{,}51 - 0{,}245 * \frac{19}{36}\pi * 3{,}51\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 38503 * 13) = 12{,}6\ kn$$

Condición 8:

$$v = 13 - \left(0{,}745 * 7{,}49 - 0{,}245 * \frac{23}{45}\pi * 7{,}49\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 38503 * 13) = 12{,}1\ kn$$

5.3.4. CINZIA A

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
18 kn	200 m	30 m	11 m	33.894 t

Condición 1:

$$v = 18 - \left(0{,}745 * 4{,}37 - 0{,}245 * \frac{31}{90}\pi * 4{,}37\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 33894 * 18) = 17{,}6\ kn$$

Condición 2:

$$v = 18 - \left(0{,}745 * 3{,}19 - 0{,}245 * \frac{7}{45}\pi * 3{,}19\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 33894 * 18) = 17{,}6\ kn$$

Condición 3:

$$v = 18 - \left(0{,}745 * 4{,}31 - 0{,}245 * \frac{5}{36}\pi * 4{,}31\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 33894 * 18) = 17{,}5\ kn$$

Condición 4:

$$v = 18 - \left(0{,}745 * 2{,}52 - 0{,}245 * \frac{4}{15}\pi * 2{,}52\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 33894 * 18) = 17{,}8\ kn$$

Condición 5:

$$v = 18 - \left(0{,}745 * 4{,}61 - 0{,}245 * \frac{8}{9}\pi * 4{,}61\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 33894 * 18) = 17{,}9\ kn$$

Condición 6:

$$v = 18 - \left(0{,}745 * 2{,}63 - 0{,}245 * \frac{163}{180}\pi * 2{,}63\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 33894 * 18) = 18\ kn$$

Condición 7:

$$v = 18 - \left(0{,}745 * 3{,}51 - 0{,}245 * \frac{19}{36}\pi * 3{,}51\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 33894 * 18) = 17{,}8\ kn$$

Condición 8:

$$v = 18 - \left(0{,}745 * 7{,}49 - 0{,}245 * \frac{23}{45}\pi * 7{,}49\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 33894 * 18) = 17{,}5\ kn$$

5.3.5. HARMONY OF THE SEAS

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
19 kn	362 m	47 m	9 m	20.236 t

Condición 1:

$$v = 19 - \left(0{,}745 * 4{,}37 - 0{,}245 * \frac{31}{90}\pi * 4{,}37\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 20236 * 19) = 18\ kn$$

Condición 2:

$$v = 19 - \left(0{,}745 * 3{,}19 - 0{,}245 * \frac{7}{45}\pi * 3{,}19\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 20236 * 19) = 18\ kn$$

Condición 3:

$$v = 19 - \left(0{,}745 * 4{,}31 - 0{,}245 * \frac{5}{36}\pi * 4{,}31\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 20236 * 19) = 17{,}7\ kn$$

Condición 4:

$$v = 19 - \left(0{,}745 * 2{,}52 - 0{,}245 * \frac{4}{15}\pi * 2{,}52\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 20236 * 19) = 18{,}3\ kn$$

Condición 5:

$$v = 19 - \left(0{,}745 * 4{,}61 - 0{,}245 * \frac{8}{9}\pi * 4{,}61\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 20236 * 19) = 18{,}9\ kn$$

Condición 6:

$$v = 19 - \left(0{,}745 * 2{,}63 - 0{,}245 * \frac{163}{180}\pi * 2{,}63\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 20236 * 19) = 18{,}9\ kn$$

Condición 7:

$$v = 19 - \left(0{,}745 * 3{,}51 - 0{,}245 * \frac{19}{36}\pi * 3{,}51\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 20236 * 19) = 18{,}4\ kn$$

Condición 8:

$$v = 19 - \left(0{,}745 * 7{,}49 - 0{,}245 * \frac{23}{45}\pi * 7{,}49\right) * (1 - 1{,}35 * 10^{-6} * 20236 * 19) = 17{,}7\ kn$$

5.3.6. TABLA RESUMEN DE KHOKHLOV

A continuación, en la tabla 12, se muestran los resultados de velocidad final de cada buque y el porcentaje de reducción de velocidad.

	KHOKHLOV									
	CRUISE BARCELONA		MIMMO IEVOLI		AMSTEL CONFIDENCE		CINZIA A		HARMONY OF THE SEAS	
	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %	$v_f(kn)$	↓ %
Cond. 1	23,2	7,2	9,2	16,4	12,3	5,4	17,6	2,2	18	5,3
Cond. 2	23,3	6,8	9,3	15,4	12,3	5,4	17,6	2,2	18	5,3
Cond. 3	22,7	9,2	8,6	21,8	12,1	6,9	17,5	2,8	17,7	6,8
Cond. 4	23,7	5,2	9,8	10,9	12,5	3,8	17,8	1,1	18,3	3,7
Cond. 5	24,8	0,8	10,7	2,7	12,9	0,8	17,9	0,5	18,9	0,5
Cond. 6	24,9	0,4	10,9	0,9	12,9	0,8	18	0	18,9	0,5
Cond. 7	24	4	10	9,1	12,6	3,1	17,8	1,1	18,4	3,1
Cond. 8	22,8	8,8	8,7	20,9	12,1	6,9	17,5	2,8	17,7	6,8

Tabla 12: Tabla de resultados con el método Khokhlov

5.4. Aplicación del método de Kwon

Este método tiene en cuenta tanto el número de Beaufort (BN), como el volumen de desplazamiento en $\mathrm{m}^3(\nabla)$ y el coeficiente de bloque (C_B). El número de Beaufort para cada una de las condiciones a analizar lo podemos encontrar en la tabla 3.

- Condición 1: BN = 7
- Condición 2: BN = 6
- Condición 3: BN = 7
- Condición 4: BN = 5
- Condición 5: BN = 7
- Condición 6: BN = 5
- Condición 7: BN = 6
- Condición 8: BN = 8

Se necesita conocer también el C_B de cada uno de los buques, para ello se hace el cálculo con la fórmula de Barrass [2] que se muestra a continuación para obtener un resultado aproximado de este coeficiente.

$$C_B = 1{,}2 - 0{,}39 * \left(\frac{v(kn)}{\sqrt{L_{PP}(m)}}\right) \quad \text{(ec. 5)}$$

Conocidos las variables que requiere la ecuación anterior (tablas 4, 5, 6, 7 y 8) se obtienen los siguientes coeficientes de bloque.

- CRUISE BARCELONA: $C_B = 0{,}55$
- MIMMO IEVOLI: $C_B = 0{,}82$
- AMSTEL CONFIDENCE: $C_B = 0{,}82$
- CINZIA A $C_B = 0{,}70$
- HARMONY OF THE SEAS: $C_B = 0{,}81$

Los resultados obtenidos son aproximados, ya que hay más métodos para el cálculo de este coeficiente.

Una vez se tienen los coeficientes de bloque, se puede calcular el volumen de desplazamiento (∇) con la siguiente ecuación:

$$C_B = \frac{\nabla}{L*B*T} \qquad \text{(ec. 6)}$$

- CRUISE BARCELONA: $\nabla = 25.987{,}5\ \mathrm{m}^3$
- MIMMO IEVOLI: $\nabla = 14.350\ \mathrm{m}^3$
- AMSTEL CONFIDENCE: $\nabla = 31.512{,}6\ \mathrm{m}^3$
- CINZIA A: $\nabla = 46.200\ \mathrm{m}^3$
- HARMONY OF THE SEAS: $\nabla = 124.032{,}06\ \mathrm{m}^3$

Por último, hay que definir el factor de reducción por la dirección del oleaje (μ). Para ello, se toma como rumbo del barco, rumbo este (E - 90°) y se obtiene con los datos de las condiciones de navegación de la tabla 9 y las ecuaciones ''4d, 4e y 4f''.

- Condición 1: $\alpha = 62^{\mathrm{o}};\ \mu = \frac{0{,}9-0{,}06*(6-6)^2}{2} = 0{,}45$
- Condición 2: $\alpha = 28^{\mathrm{o}};\ \mu = 1$
- Condición 3: $\alpha = 25^{\mathrm{o}};\ \mu = 1$
- Condición 4: $\alpha = 48^{\mathrm{o}};\ \mu = \frac{1{,}7-0{,}03*(5-4)^2}{2} = 0{,}83$
- Condición 5: $\alpha = 160^{\mathrm{o}};\ \mu = \frac{0{,}4-0{,}03*(7-8)^2}{2} = 0{,}18$
- Condición 6: $\alpha = 163^{\mathrm{o}};\ \mu = \frac{0{,}4-0{,}03*(5-8)^2}{2} = 0{,}06$
- Condición 7: $\alpha = 95^{\mathrm{o}};\ \mu = \frac{0{,}9-0{,}06*(6-6)^2}{2} = 0{,}45$
- Condición 8: $\alpha = 92^{\mathrm{o}};\ \mu = \frac{0{,}9-0{,}06*(8-6)^2}{2} = 0{,}33$

En las condiciones de navegación 2 y 3, el ángulo de incidencia del oleaje en el buque desde la proa es menor que 30°. Al ser tan pequeño el ángulo α, se toma $\mu = 1$, asumiendo de que se trata de condiciones de navegación con oleaje de proa.

5.4.1. CRUISE BARCELONA

En el caso del CRUISE BARCELONA se calcula el % de reducción de velocidad aplicando la ecuación ''4c'', ya que según la aproximación del coeficiente de bloque que se ha calculado, el resultado de este dista mucho de los rangos de C_B indicados para las ecuaciones ''4a y 4b''.

$$\frac{\Delta V}{V_1}100\% = 0{,}7BN + \frac{BN^{6,5}}{22\nabla^{\frac{2}{3}}}$$

Cabe recalcar que el método de Kwon indica que esta ecuación debe aplicarse en portacontenedores, pero tomando como válida la aproximación del coeficiente de bloque calculado, no estaría dentro de los rangos que se indican en las ecuaciones ''4a y 4b'' pero estaría dentro del rango de coeficientes para el que se indica la ecuación que se aplica.

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
25 kn	225 m	30 m	7 m	5.000 t

<u>*Condición1:*</u> BN = 7, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{22 * 25987{,}5^{\frac{2}{3}}} = 21{,}02\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 9{,}46\% \rightarrow v_{final} = 25 * (1 - 0{,}0946) = 22{,}6\ kn$$

<u>*Condición2:*</u> BN = 6, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{22 * 25987{,}5^{\frac{2}{3}}} = 10{,}12\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 10{,}12\% \rightarrow v_{final} = 25 * (1 - 0{,}1012) = 22{,}5\ kn$$

<u>*Condición 3:*</u> BN = 7, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{22 * 25987{,}5^{\frac{2}{3}}} = 21{,}02\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 21{,}02\% \rightarrow v_{final} = 25 * (1 - 0{,}2102) = 19{,}7\ kn$$

<u>*Condición 4:*</u> BN = 5, $\mu = 0{,}83$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{22 * 25987{,}5^{\frac{2}{3}}} = 5{,}31\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 4{,}40\% \rightarrow v_{final} = 25 * (1 - 0{,}0440) = 23{,}9\ kn$$

Condición 5: BN = 7, $\mu = 0{,}18$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{22 * 25987{,}5^{\frac{2}{3}}} = 21{,}02\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 3{,}78\% \rightarrow v_{final} = 25 * (1 - 0{,}0378) = 24\ kn$$

Condición 6: BN = 5, $\mu = 0{,}06$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{22 * 25987{,}5^{\frac{2}{3}}} = 5{,}31\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 0{,}32\% \rightarrow v_{final} = 25 * (1 - 0{,}0032) = 24{,}9\ kn$$

Condición 7: BN = 6, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{22 * 25987{,}5^{\frac{2}{3}}} = 10{,}12\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 4{,}55\% \rightarrow v_{final} = 25 * (1 - 0{,}0455) = 23{,}9\ kn$$

Condición 8: BN = 8, $\mu = 0{,}33$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 8 + \frac{8^{6{,}5}}{22 * 25987{,}5^{\frac{2}{3}}} = 44{,}01\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 14{,}52\% \rightarrow v_{final} = 25 * (1 - 0{,}1452) = 21{,}4\ kn$$

5.4.2. MIMMO IEVOLI

En el caso del MIMMO IEVOLI se calcula el % de reducción de velocidad aplicando la ecuación ''4a'', ya que según la aproximación del coeficiente de bloque que se ha calculado, el resultado de este estaría dentro de los rangos de C_B indicados para esta ecuación.

$$\frac{\Delta V}{V_1}100\% = 0{,}5BN + \frac{BN^{6{,}5}}{2{,}7\nabla^{\frac{2}{3}}}$$

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
11 kn	125 m	20 m	7 m	9.554 t

<u>*Condición1:*</u> BN = 7, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{2{,}7 * 14350^{\frac{2}{3}}} = 198{,}73\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 89{,}43\% \rightarrow v_{final} = 11 * (1 - 0{,}8943) = 1{,}2\ kn$$

<u>*Condición2:*</u> BN = 6, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{2{,}7 * 14350^{\frac{2}{3}}} = 74{,}68\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 74{,}68\% \rightarrow v_{final} = 11 * (1 - 0{,}7468) = 2{,}8\ kn$$

<u>*Condición 3:*</u> BN = 7, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{2{,}7 * 14350^{\frac{2}{3}}} = 198{,}73\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 198{,}73\% \rightarrow v_{final} = 11 * (1 - 1{,}9873) = 0\ kn$$

<u>*Condición 4:*</u> BN = 5, $\mu = 0{,}83$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{2{,}7 * 14350^{\frac{2}{3}}} = 24{,}41\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 20{,}26\% \rightarrow v_{final} = 11 * (1 - 0{,}2026) = 8{,}8\ kn$$

<u>*Condición 5:*</u> BN = 7, $\mu = 0{,}18$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{2{,}7 * 14350^{\frac{2}{3}}} = 198{,}73\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 35{,}77\% \rightarrow v_{final} = 11 * (1 - 0,) = 7{,}1\ kn$$

Condición 6: BN = 5, $\mu = 0{,}06$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{2{,}7 * 14350^{\frac{2}{3}}} = 24{,}41\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 1{,}46\% \rightarrow v_{final} = 11 * (1 - 0{,}0146) = 10{,}8\ kn$$

Condición 7: BN = 6, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{2{,}7 * 14350^{\frac{2}{3}}} = 74{,}68\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 33{,}61\% \rightarrow v_{final} = 11 * (1 - 0{,}3361) = 7{,}3\ kn$$

Condición 8: BN = 8, $\mu = 0{,}33$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 8 + \frac{8^{6{,}5}}{2{,}7 * 14350^{\frac{2}{3}}} = 469{,}03\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 154{,}78\% \rightarrow v_{final} = 11 * (1 - 1{,}5478) = 0\ kn$$

5.4.3. AMSTEL CONFIDENCE

En el caso del AMSTEL CONFIDENDE, se calcula la reducción de velocidad con la ecuación 4a, igual que en el anterior caso.

$$\frac{\Delta V}{V_1}100\% = 0{,}5BN + \frac{BN^{6{,}5}}{2{,}7\nabla^{\frac{2}{3}}}$$

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
13 kn	183 m	30 m	7 m	38.503 t

Condición1: BN = 7, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{2{,}7 * 31512{,}6^{\frac{2}{3}}} = 119{,}05\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 53{,}57\% \rightarrow v_{final} = 13 * (1 - 0{,}5357) = 6\ kn$$

Condición2: BN = 6, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{2{,}7 * 31512{,}6^{\frac{2}{3}}} = 45{,}42\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 45{,}42\% \rightarrow v_{final} = 13 * (1 - 0{,}4542) = 7{,}1\ kn$$

Condición 3: BN = 7, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{2{,}7 * 31512{,}6^{\frac{2}{3}}} = 119{,}05\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 119{,}05\% \rightarrow v_{final} = 13 * (1 - 1{,}1905) = 0\ kn$$

Condición 4: BN = 5, $\mu = 0{,}83$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{2{,}7 * 31512{,}6^{\frac{2}{3}}} = 15{,}47\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 12{,}84\% \rightarrow v_{final} = 13 * (1 - 0{,}1284) = 11{,}3\ kn$$

Condición 5: BN = 7, $\mu = 0{,}18$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{2{,}7 * 31512{,}6^{\frac{2}{3}}} = 119{,}05\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 7{,}14\% \rightarrow v_{final} = 13 * (1 - 0{,}0714) = 12{,}1\ kn$$

Condición 6: BN = 5, $\mu = 0{,}06$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{2{,}7 * 31512{,}6^{\frac{2}{3}}} = 15{,}47\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 0{,}93\% \rightarrow v_{final} = 13 * (1 - 0{,}0093) = 12{,}9\ kn$$

Condición 7: BN = 6, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{2{,}7 * 31512{,}6^{\frac{2}{3}}} = 45{,}42\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 20{,}44\% \rightarrow v_{final} = 13 * (1 - 0{,}2044) = 10{,}3\ kn$$

Condición 8: BN = 8, $\mu = 0{,}33$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 8 + \frac{8^{6{,}5}}{2{,}7 * 31512{,}6^{\frac{2}{3}}} = 279{,}25\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 92{,}15\% \rightarrow v_{final} = 13 * (1 - 0{,}9215) = 1\ kn$$

5.4.4. CINZIA A

Para el CINZIA A se aplica la ecuación 4c, ya que se trata de un portacontenedores y el C_B calculado está dentro del rango para el que se propone esta ecuación.

$$\frac{\Delta V}{V_1}100\% = 0{,}7BN + \frac{BN^{6{,}5}}{22\nabla^{\frac{2}{3}}}$$

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
18 kn	200 m	30 m	11 m	33.894 t

Condición1: BN = 7, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{22 * 46200^{\frac{2}{3}}} = 15{,}89\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 7{,}15\% \rightarrow v_{final} = 18 * (1 - 0{,}0715) = 16{,}7\ kn$$

Condición2: BN = 6, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{22 * 46200^{\frac{2}{3}}} = 8{,}23\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 8{,}23\% \rightarrow v_{final} = 18 * (1 - 0{,}0823) = 16{,}5\ kn$$

Condición 3: BN = 7, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{22 * 46200^{\frac{2}{3}}} = 15{,}89\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 15{,}89\% \rightarrow v_{final} = 18 * (1 - 0,) = 15{,}1\ kn$$

Condición 4: BN = 5, $\mu = 0{,}83$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{22 * 46200^{\frac{2}{3}}} = 4{,}73\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 3{,}92\% \rightarrow v_{final} = 18 * (1 - 0{,}0392) = 17{,}3\ kn$$

Condición 5: BN = 7, $\mu = 0{,}18$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{22 * 46200^{\frac{2}{3}}} = 15{,}89\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 2{,}86\% \rightarrow v_{final} = 18 * (1 - 0{,}0286) = 17{,}5\ kn$$

Condición 6: BN = 5, $\mu = 0{,}06$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{22 * 46200^{\frac{2}{3}}} = 4{,}73\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 0{,}28\% \rightarrow v_{final} = 18 * (1 - 0{,}0028) = 17{,}9\ kn$$

Condición 7: BN = 6, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{22 * 46200^{\frac{2}{3}}} = 8{,}23\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 3{,}70\% \rightarrow v_{final} = 18 * (1 - 0{,}0370) = 17{,}3\ kn$$

Condición 8: BN = 8, $\mu = 0{,}33$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}7 * 8 + \frac{8^{6{,}5}}{22 * 46200^{\frac{2}{3}}} = 31{,}77\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 10{,}48\% \rightarrow v_{final} = 18 * (1 - 0{,}1048) = 16{,}1\ kn$$

5.4.5. HARMONY OF THE SEAS

En el caso del HARMONY OF THE SEAS, la reducción de velocidad de calcula con la ecuación 4a, ya que el C_B calculado está dentro del rango para el que se propone esta ecuación y no se trata de un portacontenedores.

$$\frac{\Delta V}{V_1}100\% = 0{,}7BN + \frac{BN^{6{,}5}}{22\nabla^{\frac{2}{3}}}$$

v_0	L_{BP}	B	T	DWT
19 kn	362 m	47 m	9 m	20.236 t

Condición1: BN = 7, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{2{,}7 * 124032{,}06^{\frac{2}{3}}} = 49{,}85\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 22{,}43\% \rightarrow v_{final} = 19 * (1 - 0{,}2243) = 14{,}7\ kn$$

Condición2: BN = 6, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{2{,}7 * 124032{,}06^{\frac{2}{3}}} = 20{,}02\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 20{,}02\% \rightarrow v_{final} = 19 * (1 - 0,) = 15{,}2\ kn$$

Condición 3: BN = 7, $\mu = 1$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{2{,}7 * 124032{,}06^{\frac{2}{3}}} = 49{,}85\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 49{,}85\% \rightarrow v_{final} = 19 * (1 - 0{,}4985) = 9{,}5\ kn$$

Condición 4: BN = 5, $\mu = 0{,}83$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{2{,}7 * 124032{,}06^{\frac{2}{3}}} = 7{,}70\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 6{,}39\% \rightarrow v_{final} = 19 * (1 - 0{,}0639) = 17{,}8\ kn$$

Condición 5: BN = 7, $\mu = 0{,}18$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 7 + \frac{7^{6{,}5}}{2{,}7 * 124032{,}06^{\frac{2}{3}}} = 49{,}85\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 8{,}97\% \rightarrow v_{final} = 19 * (1 - 0{,}0897) = 17{,}3\ kn$$

Condición 6: BN = 5, $\mu = 0{,}06$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 5 + \frac{5^{6{,}5}}{2{,}7 * 124032{,}06^{\frac{2}{3}}} = 7{,}70\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 0{,}46\% \rightarrow v_{final} = 19 * (1 - 0,) = 18{,}9\ kn$$

Condición 7: BN = 6, $\mu = 0{,}45$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 6 + \frac{6^{6{,}5}}{2{,}7 * 124032{,}06^{\frac{2}{3}}} = 20{,}02\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 9{,}01\% \rightarrow v_{final} = 19 * (1 - 0{,}0901) = 17{,}3\ kn$$

Condición 8: BN = 8, $\mu = 0{,}33$

$$\frac{\Delta v}{v}100\% = 0{,}5 * 8 + \frac{8^{6{,}5}}{2{,}7 * 124032{,}06^{\frac{2}{3}}} = 114{,}41\%$$

$$\mu * \frac{\Delta v}{v} = 37{,}75\% \rightarrow v_{final} = 19 * (1 - 0{,}3775) = 11{,}8\ kn$$

5.4.6. TABLA RESUMEN DE KWON

A continuación, en la tabla 13, se muestran los resultados de velocidad final de cada buque y el porcentaje de reducción de velocidad.

	KWON									
	CRUISE BARCELONA		MIMMO IEVOLI		AMSTEL CONFIDENCE		CINZIA A		HARMONY OF THE SEAS	
	$v_f(kn)$	$\downarrow$ %	$v_f(kn)$	$\downarrow$ %	$v_f(kn)$	$\downarrow$ %	$v_f(kn)$	$\downarrow$ %	$v_f(kn)$	$\downarrow$ %
Cond. 1	22,6	9,6	1,2	89,1	6	53,8	16,7	7,2	14,7	22,6
Cond. 2	22,5	10	2,8	74,5	7,1	45,4	16,5	8,3	15,2	20
Cond. 3	19,7	21,2	0	100	0	100	15,1	16,1	9,5	50
Cond. 4	23,9	4,4	8,8	20	11,3	13,1	17,3	3,9	17,8	6,3
Cond. 5	24	4	7,1	35,4	12,1	6,9	17,5	2,8	17,3	8,9
Cond. 6	24,9	0,4	10,8	1,8	12,9	0,8	17,9	0,5	18,9	0,5
Cond. 7	23,9	4,4	7,3	33,6	10,3	20,8	17,3	3,9	17,3	8,9
Cond. 8	21,4	14,4	0	100	1	92,3	16,1	10,5	11,8	37,9

Tabla 13: Tabla de resultados con el método Kwon

6. CONCLUSIONES

Una vez vistas las 4 metodologías y conocidos los resultados de los casos estudio que se recogen en las tablas 10, 11, 12 y 13, se extraen las siguientes conclusiones para intentar determinar cuál es la metodología que mejor parametriza la disminución de velocidad y como afectan las características del buque a esa disminución de velocidad.

Para ello a continuación, se analizan los resultados obtenidos, comparando los porcentajes de reducción de velocidad entre condiciones de navegación en las que la dirección de las olas es similar pero la altura de ola es distinta, para ver cómo afecta a cada tipo de barco.

BOWDITCH

La reducción de velocidad en este método, como se observa en la tabla 10, al únicamente depender de la velocidad inicial del buque, de la altura de ola y del ángulo que forma la proa del buque con la dirección del oleaje una vez estas superan al buque, se puede observar que el porcentaje de reducción de velocidad depende, a parte de la dirección y altura de las olas, en gran medida de la velocidad inicial del buque, es decir, a una velocidad inicial del buque mayor, menor es el porcentaje de reducción de velocidad. Se puede comprobar comparando los porcentajes de reducción obtenidos con este método en los buques CIANZIA A y HARMONY OF THE SEAS, donde en todas las condiciones se obtienen resultados de porcentaje de reducción de velocidad muy semejantes, siendo buques de características muy diferentes entre ellos pero que navegan a velocidades muy similares.

AERTSSEN

Este método tiene en cuenta la velocidad inicial del buque, la altura y dirección de las olas y la eslora del buque.

Comparando los porcentajes de reducción de velocidad de la tabla 11 entre las condiciones 1-4, 2-3, 5-6 y 7-8 se observa que en todas las comparaciones se mantiene una relación más o menos

constante en todos los buques, en cuanto a porcentaje de reducción de velocidad se refiere, independientemente de la eslora y velocidad inicial particular de cada buque.

Comparación condición 1 y 4: La relación que guardan los porcentajes de reducción de velocidad de estas 2 condiciones oscila entre 2,5 y 2,8 veces mayor el porcentaje de reducción de velocidad de la condición 1 en todos los buques, siendo la altura de ola de la condición 1, 1,7 veces mayor la altura de ola de la condición 2.

Comparación condición 2 y 3: La relación que guardan los porcentajes de reducción de velocidad de estas 2 condiciones es de 1,7 veces mayor el porcentaje de reducción de velocidad de la condición 3 en todos los buques, siendo la altura de ola de la condición 3, 1,35 veces mayor la altura de ola de la condición 2. En estas 2 condiciones, los porcentajes de reducción de velocidad son mayores ya que los buques navegan con un oleaje de proa.

Comparación condición 5 y 6: En este caso, se observa en todos los buques que el porcentaje de reducción de velocidad en la condición 6 es prácticamente nulo navegando con oleaje de popa y que en la condición 5, con un oleaje con un poco más de ángulo y una altura de ola mayor, el porcentaje de reducción de velocidad oscila en todos los buques entre un 3,1% y un 5,4%.

Comparación condición 7 y 8: La relación que guardan los porcentajes de reducción de velocidad de estas 2 condiciones oscila entre 2,2 y 2,4 veces mayor el porcentaje de reducción de velocidad de la condición 8 en todos los buques, siendo la altura de ola de la condición 8, 2,3 veces mayor la altura de ola de la condición 8. En estas 2 condiciones el buque navega con un oleaje de banda.

KHOKHLOV

En la tabla 12, se observa que los buques que están fuera de los límites de rangos de DWT y/o velocidad inicial para los que la metodología indica que es válido este método de cálculo (son todos a excepción del MIMMO IEVOLI) muestran en todas las condiciones de navegación unos porcentajes de reducción de velocidad muy bajos y similares entre ellos. Es sin duda, la metodología más restrictiva debido a que los buques que se encuentran fuera de unos rangos de DWT y velocidad inicial determinados, no muestran unos resultados lógicos.

KWON

En la tabla 13 se observan los resultados obtenidos para el método de Kwon.

En este caso, hay que destacar que la ecuación que se aplica a cada buque varía en función del tipo de buque y el coeficiente de bloque de este.

Comparando los datos del CRUISE BARCELONA y el CINZIA A, los cuales se han obtenido de aplicar la ecuación ''4c'' en los 2 casos, se observa que las condiciones de navegación que se comparan por similitud de ángulo de incidencia de las olas (1-4, 2-3, 5-6 y 7-8) ofrecen unos resultados en los que la relación del porcentaje de reducción de velocidad es muy similar en los 2 buques.

Por el contrario, analizando los resultados obtenidos con la ecuación ''4a'' para el MIMMO IEVOLI, AMSTEL CONFIDENDE y HARMONY OF THE SEAS, esta relación de porcentaje de reducción de velocidad de las condiciones que se comparan no es para nada similar en los diferentes buques. Este método también indica que tanto en el MIMMO IEVOLI como en el AMSTEL CONFIDENCE, en la condición de navegación 3, con olas de 4m de proa, el porcentaje de reducción de velocidad es del 100%.

Habiendo analizado los resultados obtenidos de los 4 métodos en los 5 barcos, se concluye que:

- Bowditch: Es un método que tiene en cuenta pocas características del buque (únicamente la velocidad inicial) y por ese motivo no es un método que haya que tener demasiado en cuenta si se quieren obtener unas estimaciones de porcentaje de reducción de velocidad algo precisas.
- Aertssen: Este método ofrece unos resultados en los que la reducción de velocidad con ángulos similares de incidencia de ola y altura de ola distinta guarda una relación en todos los buques analizados.
- Khoklov: Es un método muy restrictivo a un tipo de buques que se encuentran en unos rangos de DWT y velocidad de navegación determinados y puesto que los rangos son, 4.000t < DWT < 20.000t y 9 kn < velocidad < 20 kn, es un método aplicable a un número bastante limitado de buques mercantes ya que, según la búsqueda inicial de buques para analizar, es fácil que estos superen el DWT de 20.000t y/o los 20 kn de velocidad.
- Kwon: Este método ofrece unos resultados para los buques a los que se les aplica la ecuación ''4c'' bastante lógicos, pero generan bastante incertidumbre los resultados obtenidos para los buques a los que se les ha aplicado la ecuación ''4a''. Hay que tener en

cuenta, que datos como el coeficiente de bloque o el volumen de desplazamiento en m^3 no resultan fáciles de encontrar y se han calculado con ecuaciones que dan una aproximación.

Como conclusión, el método que tiene en cuenta más parámetros a la hora de calcular la reducción de velocidad a causa del oleaje es el método de Kwon, pero son necesarios datos de los buques que no siempre resultan fáciles de obtener y los resultados obtenidos para algunos de los casos estudiados generan algo de incertidumbre. Por otro lado, el método de Aertssen, ofrece unos resultados razonables y resultaría más fácil implementar en un software de optimización de rutas, ya que los parámetros requeridos para el cálculo con este método se pueden conocer más fácilmente.

Como líneas de investigación futuras, habría que corroborar hasta qué punto son de aproximados los resultados que ofrece del método de Aertssen e intentar afinar más a la hora hacer el cálculo con el método de Kwon en algunos parámetros, ya que es una metodología más completa, y comprobar si los resultados obtenidos pueden ser más precisos que los obtenidos con el método de Aertssen.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Aertssen, G.: The effect of weather on two classes of container ship in the North Atlantic. The Naval Architect, 1975; 1:11-13.

[2] Barrass, C. B., Ship Design and Performance for Masters and Mates. Elsevier, 2004. ISBN 0 7506 60007. [Consulta: 14 septiembre 2021]. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2KaLDCpZgbQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=ship+design+and+performance&ots=I0k3NI_4A7&sig=XsWvUlMJO_CG2saoq3qdHN2wzNo#v=onepage&q=ship%20design%20and%20performance&f=false

[3] Borén, C., L. Falevitch, M. Castells-Sanabra, M. Grifoll, ''Added resistance parametrizations due to waves in a weather ship routing system''. NAŠE MORE 2019, 1st International Conference of Maritime Science & Technology. Octubre 2019, p. 50-59.

[4] Bowditch, N., The American practical navigator. Washington, 1914. National Imagery and Mapping Agency, Bethesda, Maryland, USA. [Consulta: 25 junio 2021]. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=W3JNAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=THE+AMERICAN+PRACTICAL+NAVIGATOR&ots=HBh6PalCFN&sig=LMgQ1okz-G122a0SOeFCpDDER5A#v=onepage&q=THE%20AMERICAN%20PRACTICAL%20NAVIGATOR&f=false

[5] Kwon, Y.J., ''Speed los due to added resistance in wind and waves''. The Naval Architect. Marzo 2008, p. 14-16.

[6] Lubkovsky, VK.: Determination of wind-wave speed loss of vessels for mixed type navigation with measurement of wave parameters by means of orthogonally-linear wave meters. Ph.D. thesis, Novosibirsk, 2009, VAK 05.22.19, No. 390890.

[7] RMetS Editor, The Beaufort Scale. How is wind speed measured?, 2018. [Consulta: 22 septiembre 2021]. Disponible en: https://www.rmets.org/resource/beaufort-scale

Otros datos consultados:

[8] Características AMSTEL CONFIDENCE. Disponible en: https://www.vesselfinder.com/es/vessels/AMSTEL-CONFIDENCE-IMO-9623659-MMSI-255806206

https://www.marinetraffic.com/es/ais/details/ships/shipid:406904/mmsi:255806206/imo:9623659/vessel:AMSTEL_CONFIDENCE

[9] Características CINZIA A. Disponible en: https://www.vesselfinder.com/es/vessels/CINZIA-A-IMO-9226516-MMSI-215421000

https://www.marinetraffic.com/es/ais/details/ships/shipid:686479/mmsi:215421000/imo:9226516/vessel:CINZIA_A

[10] Características CRUISE BARCELONA. Disponible en: https://www.vesselfinder.com/es/vessels/CRUISE-BARCELONA-IMO-9351488-MMSI-247243600

https://www.marinetraffic.com/es/ais/details/ships/shipid:279635/mmsi:247243600/imo:9351488/vessel:CRUISE_BARCELONA

[11] Características HARMONY OF THE SEAS. Disponible en: https://www.vesselfinder.com/es/vessels/HARMONY-OF-THE-SEAS-IMO-9682875-MMSI-311000396

https://www.marinetraffic.com/es/ais/details/ships/shipid:372127/mmsi:311000396/imo:9682875/vessel:HARMONY_OF_THE_SEAS

[12] Características MIMMO IEVOLI. Disponible en: https://www.vesselfinder.com/vessels/MIMMO-IEVOLI-IMO-9147746-MMSI-247253200

https://www.marinetraffic.com/es/ais/details/ships/shipid:279804/mmsi:247253200/imo:9147746/vessel:MIMMO_IEVOLI

[13] Condiciones de navegación. Disponible en: http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx

[14] Ruta. Disponible en: http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/meteonav