

Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Electrónica,
Robótica y Automática.

Simulador de entrenamiento para maniobras de
buques de carga

Autor: José Luis Romero Jiménez

Tutor: Carlos Bordons Alba

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Simulador de entrenamiento para maniobras de buques de carga

Autor:

José Luis Romero Jiménez

Tutor:

Carlos Bordons Alba

Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Máster: Simulador de entrenamiento para maniobras de buques de carga

Autor: José Luis Romero Jiménez

Tutor: Carlos Bordons Alba

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mis padres

A todos los que me han apoyado

Agradecimientos

Agradezco primero a mis padres por el apoyo económico, humano y moral durante toda mi carrera universitaria. También agradezco enormemente y admiro a todas aquellas personas involucradas que me han dedicado parte de su tiempo tanto a enseñarme, aconsejarme, motivarme, guiarme y darme ideas para llevar a cabo este proyecto y lograr conseguir esta meta. Por mi parte, por supuesto, en mi carrera, no duraré en hacer lo mismo por la persona que lo necesite. Nunca hay que rendirse.

José Luis Romero Jiménez
Ingeniero electrónico industrial
Sevilla, 2022

Resumen

Este proyecto consiste en la creación de un simulador con MATLAB2020a que permite adiestrar a capitanes de puente de un buque petrolero en maniobras internacionalmente estandarizadas para prevenir los abordajes y colisiones en el mar denominadas “COLREG”.

En el primer capítulo se realiza una introducción de manera general del proyecto, además se expone el objetivo y alcance del mismo.

El segundo capítulo describe la problemática existente en el mundo de la formación de oficiales en la navegación, con sus elevados costes tanto humanos como materiales unidos a una probabilidad más elevada de riesgo de accidentes, existe la necesidad de crear simuladores para fines de entrenamiento donde esos riesgos, costes y ahorro de tiempo se reducen en gran medida.

El tercer capítulo muestra detalladamente la base teórica de cada uno de los componentes del simulador, algunas de sus principales bazas se basan en varios modelos dinámicos de buques recogidos en la bibliografía existente. Los modelos son alimentados con datos de buques reales imitando de manera muy cercana a su comportamiento real. También se muestra la base teórica de la modelización de los efectos que las condiciones meteorológicas efectúan sobre el buque y se describe al completo la interfaz gráfica del simulador creada con la herramienta App Designer de la versión de MATLAB2020a.

El cuarto capítulo muestra los resultados de los ensayos realizados sobre los modelos dinámicos de buques reales contrastados con gráficas de comportamiento real. Se realizan descripciones tanto de navegación gráfica entre pantallas del simulador como las pruebas de evaluación correspondientes a cuatro escenarios creados para que el alumno desde el puente cumpla correctamente cada una de las diferentes reglas extraídas de la normativa para evitar abordajes y colisiones.

Finalmente, en el quinto capítulo se describen las conclusiones del trabajo y posibles mejoras futuras del mismo.

Abstract

This project consists of the creation of a simulator with MATLAB2020a that let to train tank ship bridge captains in international standardised manoeuvres to prevent collisions in the sea called “COLREG”.

In the first chapter is made a general project introduction, also is exposed the objective and scope of the same one.

The second chapter describes real world difficulty in official navigation training, with human and material high costs and join with a higher accident risk probability, there is a necessity of make simulators for training where that risks, cost and time saving are reduced to a large extent.

The third chapter shows in detail the theoretical basis of each simulator components, some of their principal advantages are based on various ship dynamic models found in the bibliography. The models are fed with real ship data imitating in a very close way the real ship behaviour. Also, it is shown the theoretical basis of meteorological conditions effects modelling over the ship, and it is described the whole graphical simulator interface made with a MATLAB2020a version tool App Designer.

The fourth chapter shows trial results made over the dynamics real ships models and contrasted with real behaviour chart. Are made descriptions such as graphical navigation between simulator slides, as the assessment trials corresponding to four scenes where the student in the bridge position can accomplish correctly each different rules extracted from the normative to avoid collisions.

Finally, in the fifth chapter it is described the conclusions of this work and possible future improvements of the same one.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxv
1 Introducción	1
1.1. <i>Objetivo</i>	1
1.2. <i>Alcance</i>	1
2 Estado del Arte	3
2.1. <i>Simuladores de adiestramiento en entornos navales.</i>	3
2.1.1 Simuladores de Navegación y maniobras.	3
2.1.2 Simulación del sistema integrado de control de plataforma.	5
2.1.3 Simulación de sistemas de combate.	6
2.1.4 Simulación inmersiva.	7
2.1.5 Simulación de maniobras.	8
2.2. <i>Modelos dinámicos de comportamiento de buques.</i>	9
2.2.1 Modelos MMG (Manoeuvring Mathematical Group).	10
2.2.2 Modelos NOMOTO.	16
2.2.3 Modelos CFD (Computational Fluid Dynamics).	16
2.3. <i>Modelado de los efectos de las condiciones medioambientales sobre el buque.</i>	16
2.3.1 Efecto de la corriente sobre el buque.	16
2.3.2 Empuje del viento.	18
2.3.3 Oleaje.	21
2.4. <i>Pruebas de mar de buques.</i>	23
2.4.1 Circulo táctico o curva evolutiva.	23
2.4.2 Zig-zag.	23
2.4.3 Línea recta.	24
2.4.4 Maniobra de parada.	24
2.5. <i>Normativa internacional para la prevención de abordajes y colisiones en el mar.</i>	25
2.5.1 Regla 6. Velocidad de seguridad.	25
2.5.2 Regla 7. Riesgo de abordaje.	25
2.5.3 Regla 8. Maniobras para evitar el abordaje.	26
2.5.4 Regla 13. Buque que alcanza.	26
2.5.5 Regla 14. Situación de vuelta encontrada.	26
2.5.6 Regla 15. Situación de cruce.	27
2.5.7 Regla 16. Maniobra del buque que cede el paso.	27
2.5.8 Regla 17. Maniobra del buque que sigue a rumbo.	27
3 Desarrollo de modelos y de escenarios de entrenamiento	29

3.1	<i>Obtención de datos y pruebas reales disponibles.</i>	29
3.2	<i>Modelo matemático ESSO OSAKA.</i>	30
3.2.1	Datos reales del buque ESSO OSAKA.	30
3.2.2	Modelo del Sólido-rígido	32
3.2.3	Modelo fuerza hidrodinámica.	33
3.2.4	Modelo deslizamiento.	33
3.2.5	Modelo Propulsión.	34
3.2.6	Modelo Timón.	35
3.3	<i>Modelo matemático BAC Cantabria.</i>	37
3.3.1	Datos reales del buque BAC Cantabria.	37
3.3.2	Modelo del Sólido-rígido y fuerzas hidrodinámicas.	39
3.3.3	Modelo Timón.	40
3.3.4	Modelo Propulsión.	42
3.4	<i>Modelo condiciones medioambientales.</i>	43
3.4.1	Modelo de la corriente marina.	43
3.4.2	Modelo del efecto del viento sobre el buque.	45
3.4.3	Modelo del efecto de las olas.	48
3.5	<i>Desarrollo pruebas de mar.</i>	49
3.5.1	Curvas experimentales reales de los buques.	50
3.5.2	Actuaciones en el modelo para el desarrollo de las pruebas de mar.	51
3.6	<i>Visualización de escena.</i>	52
3.7	<i>Detección de cruces de los buques.</i>	55
3.8	<i>Procedimiento de evaluación de los ejercicios.</i>	56
3.8.1	Procedimiento de evaluación del ejercicio 1.	56
3.8.2	Procedimiento de evaluación del ejercicio 2.	58
3.8.3	Procedimiento de evaluación del ejercicio 3.	62
3.8.4	Procedimiento de evaluación del ejercicio 4.	64
3.9	<i>Creación de interfaz gráfica GUI.</i>	68
4	Resultados en simulación	77
4.1	<i>Validación de los modelos.</i>	77
4.1.1	Esso Osaka.	77
4.1.2	BAC Cantabria.	84
4.2	<i>Navegación del simulador.</i>	87
4.3	<i>Ejercicio primero.</i>	89
4.4	<i>Ejercicio segundo.</i>	93
4.5	<i>Ejercicio tercero.</i>	96
4.6	<i>Ejercicio cuarto.</i>	99
4.6.1	Mensajes escenario primero.	100
4.6.2	Mensajes escenario segundo.	102
5	Conclusiones y propuestas de mejora	104
	Referencias	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operaciones para adimensionar las distintas variables del modelo dinámico	11
Tabla 2 Datos reales recogidos en la bibliografía del buque ESSO OSAKA	32
Tabla 3 Resumen de datos reales del buque BAC CANTABRIA para el segundo buque.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen ejemplo de un simulador de puente completo	3
Figura 2. Simulador de navegación y maniobras creado por la empresa VSTEP	4
Figura 3. Simulador de la armada española de la empresa KONSBERG	4
Figura 4. Sistema integrado de control de plataforma de un barco australiano LHD Adelaide	5
Figura 5. Sistema integrado de control de plataforma del barco español BAC Cantabria	6
Figura 6. Simulador SIMTAC	6
Figura 7. Simulador CIC de la empresa CAE	7
Figura 8. Simulador con gafas de realidad inmersiva	7
Figura 9. Sesión Formativa del simulador NAVANTIS AIT	8
Figura 10. Simulación del interior de un crucero	8
Figura 11. Simulación del exterior de un crucero	9
Figura 12. Imagen del simulador European Ship Simulator	9
Figura 13. Movimientos o grados de libertad de un buque	10
Figura 14. Distintos tipos de eslora de un buque	11
Figura 15. Curva típica de empuje, torque y eficiencia para un propulsor en mar abierto	14
Figura 16. Ejemplo del buque marinero BAC Cantabria	14
Figura 17. Resultados obtenidos del modelo CFD	16
Figura 18. Velocidad media y dirección de la corriente en relación a los distintos ejes de coordenadas	17
Figura 19. Definición de la velocidad del viento y su dirección sobre el buque	20
Figura 20. Espectro de Pierson- Moskowitz para diferentes valores de altura de ola.	21
Figura 21. Maniobra para determinar el diámetro táctico de un buque.	23
Figura 22. Pruebas de maniobra zig-zag en la mar.	24
Figura 23. 190,000 DTW Tanker -20/+20 Zig-zag test.	24
Figura 24. Respuesta de parada de un buque petrolero dep. de la profundidad a la que está el buque.	25
Figura 25. Visual de la maniobra de adelantamiento del buque	26
Figura 26. Visual de la regla 14	27
Figura 27. Visual de la regla 15	27
Figura 28. ESSO OSAKA buque VLCC real con datos disponibles	29
Figura 29. BAC CANTABRIA A-15	30
Figura 30. Calculo del solido-rígido.	33
Figura 31. Calculo del modelo de fuerzas hidrodinámicas.	33
Figura 32. Calculo de las fuerzas de rozamiento	34

Figura 33. Calculo de la fuerza de propulsión del modelo dinámico	35
Figura 34. Se muestra la dinámica de la hélice ante un cambio de orden	35
Figura 35. Representación de fuerzas sobre el timón	36
Figura 36. Sección del código en Matlab para la parte de las fuerzas actuantes en el timón	37
Figura 37. Se muestra la dinámica de la hélice ante un cambio de orden	37
Figura 38. Obtención de las aceleraciones a partir de las ecuaciones del solido-rígido	40
Figura 39. Cálculo de fuerzas hidrodinámicas del modelo BAC Cantabria.	40
Figura 40. Sección de agua viva del buque y dimensiones del paralelepípedo	41
Figura 41. Relación entre C_B y a_h	41
Figura 42. Calculos de las fuerzas actuantes producidas por el timón	41
Figura 43. Calculo del módulo del fluido entrante en el timón	41
Figura 44. Calculo del ángulo de ataque del fluido en el timón	42
Figura 45. Modelo completo del timón	42
Figura 46. Cálculo de la fuerza de propulsión para el segundo buque	42
Figura 47. Vista completa del modelo de la corriente para los dos buques presentes en los escenarios	43
Figura 48. Angulo de incidencia de la dirección de la corriente respecto al barco	43
Figura 49. Curva para la obtención de $C_x(Dir_c)$ para una relación de profundidad de h/T igual a 1.5	44
Figura 50. Curva para la obtención de $C_y(Dir_c)$ para una relación de profundidad de h/T igual a 1.5	44
Figura 51. Curva para la obtención de $C_n(Dir_c)$ para una relación de profundidad de h/T igual a 1.5	44
Figura 52. Calculo de los coeficientes mediante tablas de la verdad dependiendo del angulo de incid.	45
Figura 53. Calculo de las fuerzas de la corriente actuantes en el casco del barco en Matlab	45
Figura 54. Calculo en Matlab de las variables V_w velocidad y φ_w dirección del viento	45
Figura 55. Calculo de la velocidad y angulo de la velocidad relativa respecto ejes barco en Matlab	46
Figura 56. Calculo de las fuerzas que ejerce el viento sobre el buque en matlab.	46
Figura 57. Curva experimental para la obtención de $C_{wx}(\gamma_{rw})$	46
Figura 58. Curva experimental para la obtención de $C_{wy}(\gamma_{rw})$	47
Figura 59. Curva experimental para la obtención de $C_{wn}(\gamma_{rw})$	47
Figura 60. Calculo de fuerzas del viento actuantes sobre el buque	47
Figura 61. Modelo completo del efecto de las olas sobre el casco del buque en Matlab-simulink	48
Figura 62. Calculo del sumatorio de fuerzas de cada uno de los armónicos de las olas actuantes	48
Figura 63. Calculo del vector de elevaciones de cada armónico según PM en matlab	49
Figura 64. Se muestra captura de las frecuencias del espectro PM e intervalo entre ellas	49
Figura 65. Calculo de la frecuencia de encuentro en Matlab	49
Figura 66. Calculo de la altura de la ola y frecuencia máxima según la misma en Matlab.	49
Figura 67. Esso Osaka: Circulo táctico en aguas profundas (timón 35° a estribor, u=10 nudos)	50

Figura 68. Resumen de parámetros destacables de la prueba a dos velocidades distintas: 10 kn y 7.7 kn	50
Figura 69. Comparación de círculos tácticos de una prueba a escala real y modelo a 15 nudos	50
Figura 70. Esso Osaka: Torque del motor, RPM y velocidad del buque relación	51
Figura 71. Introducción de la orden en revoluciones por minuto para las hélices en Matlab	51
Figura 72. Introducción de la orden en grados para el timón en Matlab	51
Figura 73. Función que arroja las medidas de las pruebas de mar de cada modelo	52
Figura 74. Código para obtener las mediciones de pruebas de mar	52
Figura 75. Plot 2-D donde se visualiza el escenario del simulador COLREG	53
Figura 76. Sección del código donde se convierte la referencia a ejes tierra de la posición del barco	53
Figura 77. Calculo de la velocidad del barco respecto ejes tierra	53
Figura 78. Función para el ploteo del mapa y los dos buques en Matlab simulink	54
Figura 79. Sección de código 1 de la función PLOTEO MAPA en Matlab simulink	54
Figura 80. Sección de código 2 de la función PLOTEO MAPA en Matlab simulink	55
Figura 81. Función para la detección de colisiones entre los dos buques del simulador	55
Figura 82. Sección de código de la función COLISIONES DE BUQUE en Matlab simulink	56
Figura 83. Vista inicial de la disposición de los buques en el ejercicio 1	57
Figura 84. Función para la evaluación del ejercicio primero de situación de cruce	57
Figura 85. Sección primera de código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 1	58
Figura 86. Sección segunda de código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 1	58
Figura 87. Vista inicial de la disposición de los buques en el ejercicio 2	59
Figura 88. Control de rumbo clásico para el segundo buque con mov. autónomos en el escenario	60
Figura 89. Función para la evaluación del ejercicio segundo de situación de vuelta encontrada	60
Figura 90. Sección primera de código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 2.	61
Figura 91. Vista inicial de la disposición de los buques en el ejercicio 3	62
Figura 92. Función para la evaluación del ejercicio tercero de riesgo extremo de abordaje	63
Figura 93. Sección de código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 3	63
Figura 94. Vista inicial de la disposición de los buques en el primer escenario del ejercicio 4	64
Figura 95. Vista inicial de la disposición de los buques en el segundo escenario del ejercicio 4	65
Figura 96. Función para la evaluación del ejercicio cuarto de adelantamiento buque que alcanza	66
Figura 97. Generación del número aleatorio para la carga del escenario primero y segundo en Matlab	66
Figura 98. Código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 4 para la ev. del escenario primero	66
Figura 99. Código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 4 para la ev. del escenario segundo.	67
Figura 100. Se muestra la herramienta de Matlab 2020a AppDesigner.	68
Figura 101. Esquema general sobre la navegación entre pantallas e interacción con los modelos	68
Figura 102. Aspecto del panel “PantallaPrincipal” del simulador	69

Figura 103. Código correspondiente al panel “PantallaPrincipal”	69
Figura 104. Aspecto del panel “menusel” del simulador	69
Figura 105. Programación de botones para el panel menusel	70
Figura 106. Vista de los paneles Condicionesambientales 1,2,3 o 4.	71
Figura 107. Se muestra el código del panel Condicionesambientales1.	71
Figura 108. Vista de los paneles “ControlEjercicio 1,2,3 o 4” del simulador	72
Figura 109. Programación del panel ControlEjercicio 1 similar a las de ControlEjercicio 2,3,4	73
Figura 110. Desde el GUI se escribe un “1” en el “Gain” de nombre “Stop” y para la simulación	73
Figura 111. Sección de código para el cierre de la figura tras parar la simulación	74
Figura 112. La velocidad máxima que alcanza el modelo Esso Osaka	74
Figura 113. Se muestra como el buque Esso Osaka marcha en línea recta a 10 nudos	75
Figura 114. Se muestra como el buque Esso Osaka marcha en línea recta a 7,7 nudos	75
Figura 115. Curva experimental de respuesta del modelo Esso Osaka	76
Figura 116. Valores alcanzados en la prueba de giro 35 grados a estribor	77
Figura 117. Curva experimental de respuesta 35 grados a babor del modelo Esso Osaka	77
Figura 118. Velocidad que alcanza el modelo en la prueba realizada introduciendo corriente	78
Figura 119. Comportamiento del buque ante una corriente en contra del movimiento de 1.98 nudos	78
Figura 120. Respuesta de la simulación ante una fuerza de corriente en dirección 90 grados	78
Figura 121. Respuesta de la simulación ante una fuerza de corriente en dirección 270 grados	79
Figura 122. Comportamiento obtenido en la simulación realizada con efecto de viento a favor	79
Figura 123. Comportamiento obtenido en la simulación realizada con efecto de viento en contra	80
Figura 124. Curva de respuesta cuando el viento incidente en el buque se dirige en dirección 90 grados	80
Figura 125. Curva de respuesta cuando el viento incidente en el buque se dirige en dirección 270 grados	80
Figura 126. Prueba realizada introduciendo el efecto de las olas en el modelo con dirección 0 grados	81
Figura 127. Prueba realizada introduciendo el efecto de las olas en el modelo con dirección 90 grados	81
Figura 128. Respuesta del modelo Esso Osaka con todas las condiciones ambientales incluidas	82
Figura 129. Velocidad de crucero que alcanza el modelo del buque similar para el BAC Cantabria	82
Figura 130. Respuesta buque en línea recta para el modelo del buque BAC Cantabria	83
Figura 131. Comportamiento de prueba para circulo táctico del modelo del buque BAC Cantabria	83
Figura 132. Datos de pruebas de mar obtenidas para el modelo del buque BAC Cantabria	84
Figura 133. Trayectoria del movimiento del modelo BAC Cantabria del segundo buque	84
Figura 134. Vista del panel “datos” donde se muestran los datos de navegación del modelo	85
Figura 135. Programación necesaria para la llamada periódica al panel	85
Figura 136. Sección de código del panel “datos” para la lectura de las variables	86
Figura 137. Elementos leídos por la función programada del panel datos	86

Figura 138. Vista de la página principal del simulador	87
Figura 139. Vista del menú de selección principal del simulador	87
Figura 140. Vista del panel de establecimiento de condiciones ambientales	88
Figura 141. Vista del panel de control para cada uno de los ejercicios	89
Figura 142. Vista general del ejercicio 1 del simulador COLREG	89
Figura 143. Vista del ejercicio 1 realizado las primeras maniobras sobre el cuadro de mando	90
Figura 144. Mensaje en la figura tras realizar la primera maniobra correctamente	91
Figura 145. Mensaje tras realizar la maniobra correctamente de giro de manera clara	91
Figura 146. Mensaje tras realizar la maniobra de situación de cruce correctamente	92
Figura 147. Mensaje en pantalla de ejercicio 1 superado	92
Figura 148. Mensaje en pantalla de ejercicio 1 no superado, repetir la prueba de situación de cruce	92
Figura 149. Aspecto del panel cuando se ha parado la simulación	93
Figura 150. Vista general del ejercicio 2 del simulador COLREG	93
Figura 151. Aspecto del simulador tras realizar la maniobra raudamente de todo estribor	94
Figura 152. Aspecto del simulador tras volver al rumbo original correctamente	94
Figura 153. Aspecto del simulador tras realizar la maniobra de vuelta encontrada correctamente	95
Figura 154. Mensaje en pantalla de ejercicio 2 superado	95
Figura 155. Mensaje en pantalla de ejercicio 2 no superado	96
Figura 156. Vista general del ejercicio 3 del simulador COLREG	96
Figura 157. Vista del simulador tras disminuir rápidamente la orden de velocidad del buque	97
Figura 158. Vista del simulador tras realizar correctamente la maniobra de giro	97
Figura 159. Vista del ejercicio 3 del simulador ante buena maniobra para evitar la colisión	98
Figura 160. Mensaje en pantalla de ejercicio 3 superado	98
Figura 161. Mensaje en pantalla de ejercicio 3 no superado	99
Figura 162. Vista general del ejercicio 4 del simulador COLREG para adelantamiento de buque	99
Figura 163. Vista general del ejercicio 4 del simulador COLREG abortar el adelantamiento de buque	100
Figura 164. Vista del ejercicio 4 del simulador ante buena maniobra para realizar el adelantamiento	100
Figura 165. Mensaje en pantalla de ejercicio 4 superado	101
Figura 166. Mensaje en pantalla de ejercicio 4 no superado	101
Figura 167. Vista tras realizar correctamente la maniobra de reducción de orden de velocidad	102
Figura 168. Vista del ejercicio 4 del simulador ante buena maniobra de no realizar el adelantamiento	102
Figura 169. Mensaje en pantalla de ejercicio 4 superado del segundo escenario	103
Figura 170. Mensaje en pantalla de ejercicio 4 no superado del segundo escenario	103

Notación

Δ	Masa del buque o desplazamiento.
ρ	Densidad del agua salada para x°
μ	Ratio Densidad del cuerpo
∇	Volumen de desplazamiento
g	gravedad
X', Y', N'	Fuerzas totales aplicada sobre el buque adimensionadas por prime-system
u', v', r'	Componentes de la velocidad adimensionadas por prime-system
d	Angulo de timón.
c	Velocidad del flujo de agua
T	Fuerza de empuje de las hélices
n	Numero de revoluciones por segundo del eje del motor
D	Diámetro de las hélices
L_{pp}	Longitud del buque entre perpendiculares
x_g	Distancia al centro de gravedad del buque en el eje x
beta	Efecto de deriva
t	Coefficiente de deducción de empuje
h	Profundidad del mar debajo del buque
ψ	Rumbo
V_c	Velocidad media de la corriente
β	Dirección de la corriente
Draft	Calado medio del buque
$u, v, r,$	Componentes de la velocidad del barco.
MSE	Minimum square error
X'', Y'', N''	Fuerzas totales aplicada sobre el buque adimensionadas por Bis-system
$<$	Menor o igual
$>$	Mayor o igual
\backslash	Backslash
\Leftrightarrow	Si y sólo si

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente la virtualización de elementos reales y su uso en el mundo de los simuladores de entrenamiento virtual están en pleno auge, están siendo utilizados a escala profesional en un gran número de diferentes entornos, incluso para la formación militar, ya que imitan de manera muy aproximada, el comportamiento de los elementos reales.

Se requiere de la creación de más simuladores, ya que permiten una serie de ventajas que, en el mundo real, en el caso de que se realizasen, podrían ser muy costosas o incluso imposibles de realizar, y en ocasiones, sin evitar consecuencias letales tanto materiales como humanas.

Entre las ventajas más notables del uso de los simuladores en el entorno naval se encontrarían las siguientes:

- El gran ahorro de costes de lanzar una tripulación al mar.
- Ayuda al medio ambiente con el ahorro de combustibles.
- Comodidad y liberación de estrés de los instruidos.
- Simulación de ensayos límite imposibles o no rentables.
- Gran compatibilidad con la investigación de nuevos métodos.

Se han contabilizado gran número de accidentes marítimos por no seguir las pautas sobre regulación internacional para prevenir colisiones en el mar, en el caso de grandes buques, los capitanes de puente del barco con poca experiencia no pudieron ser capaces en estos casos de evitar posibles daños ante tomas de decisiones erróneas. Estos casos podrían verse reducidos o incluso ser evitados con prácticas previas fuera del mar mediante el uso de simuladores de entrenamiento de maniobras.

Estas prácticas también se pueden aplicar en embarcaciones de recreo para la obtención de licencias, complementando la formación teórica y ahorrando horas de navegación real.

1.1. Objetivo

El objetivo principal de este proyecto es la creación de un simulador que permite el adiestramiento de capitanes de puente de un buque de carga en maniobras estandarizadas.

Los alumnos se enfrentarán a simulaciones de situaciones reales en la mar y serán capaces de tomar decisiones sobre el control del buque sin accidentes ni consecuencias reales.

Además, se obtendrá un feedback del aprendizaje en cada escenario predefinido y se sabrá si las maniobras que se han realizado durante el ejercicio de manera libre son correctas o no.

1.2. Alcance

El proyecto va a componerse de los siguientes estudios:

- Actualmente los simuladores de entrenamiento en el entorno naval están siendo muy utilizados debido a su ahorro de costos y que está exento de riesgos. Se ha realizado un análisis de simuladores de maniobra navales existentes, también profundizando en simuladores para formación para el cumplimiento del reglamento contra abordajes y colisiones, no se ha encontrado nada parecido en la práctica.
- Se pone en valor el uso de los simuladores para la formación imitando comportamientos totalmente reales de barcos mediante modelos dinámicos. Por lo que se hizo una exhaustiva búsqueda por toda la bibliografía existente para encontrar todos los datos reales de un mismo buque y sus pruebas de mar

para demostrar ese comportamiento que se va a simular. El mejor caso de los pocos datos de barcos reales encontrados fue el buque de carga ESSO OSAKA y otro buque no con los datos reales exactos, pero si muy aproximados al Buque de aprovisionamiento en la mar Cantabria (S-16).

- Se ha procedido a la búsqueda de modelos dinámicos de buque existentes e implementado su simulación en MATLAB, después de muchas pruebas con varios de ellos se ha optado por el que mejores resultados ha dado.
- Se contrasta el comportamiento simulado del buque con las pruebas reales de mar de la bibliografía y se aprecia que coinciden tras varios ajustes del modelo.
- También se ha procedido a modelar los efectos de las condiciones ambientales sobre el casco del buque de las cuales hay muy poca información aprovechable de manera práctica acerca del tema.
- Se procede a la lectura de toda la normativa internacional para la prevención de colisiones en el mar “COLREGS” del año 1972 y recopilación de normas acerca de maniobras.
- Se plantean cuatro ejercicios prácticos consistentes cada uno en distintas situaciones descritas en la normativa. La persona evaluada deberá en cada caso, de manera arbitraria, realizar las correctas actuaciones establecidas.
- Se realiza la interfaz gráfica de usuario del simulador con la nueva herramienta App Designer de Matlab, de este modo la interacción del alumno con el escenario se realizará de manera más amigable.
- Conclusiones y propuestas de mejora.
- Bibliografía.

2 ESTADO DEL ARTE

La simulación es un campo que está evolucionando a pasos agigantados, tiene un largo camino de desarrollo por delante, además, puede ser perfectamente combinada con diferentes técnicas innovadoras como la inteligencia artificial, realidad aumentada, gemelo digital, inmersión 3-D, etc., pudiendo alcanzar un nivel tecnológico aun no imaginable. La vanguardia hasta ahora del sector la dirige la rama aeronáutica, pero está calando con fuerza también en el sector naval.

Por ejemplo, aquí en España, en los astilleros, se ha conseguido el mayor contrato de la historia, el cuál, consta de la creación de cinco corbetas, pero además una parte importante de este contrato la conforma la transferencia de tecnología, de manera que, para llevarla a cabo, se crean varios centros de adiestramiento con un gran despliegue de simuladores de varios tipos para la marina “Royal Navy” de Arabia Saudí en la que sus tropas serán entrenadas en los sistemas reales de los buques.

La creación de simuladores en entornos navales proporciona de manera manifiesta una experiencia práctica y ayuda notablemente a una correcta toma de decisiones de sus tripulantes. Desde el punto de vista económico, el uso de los simuladores de entrenamiento es una práctica consolidada en el mercado ya que su eficacia y el ahorro de costes están probados.

2.1. Simuladores de adiestramiento en entornos navales.

2.1.1 Simuladores de Navegación y maniobras.

Este tipo de simuladores consiste en una réplica del puente de navegación principal de mando completo. Integra todos los elementos del barco que están siendo controlados desde la sala de control. Cámaras exteriores e interiores del barco para labores de vigilancia, el sistema de navegación que es una de las piezas eje del puente, actúa como una base de datos que recoge tanto los datos que provienen de los sensores de navegación como los datos calculados y los muestra en pantalla. También contienen los radares, cartas de náuticas, sistema autopiloto, sistema de identificación de barcos (AIS). Desde este simulador es posible comunicarse con el resto de las secciones del barco, sala de máquinas, telégrafos, etc. Otro punto fuerte es que es posible realizar el control completo del gobierno y propulsión del barco, tanto manual como automáticamente. Además, es posible visualizar el comportamiento real del barco, la posición del barco respecto a otros barcos y las condiciones medioambientales.



Figura 1. Imagen ejemplo de un simulador de puente completo obtenido de la referencia [1].

Existen numerosas empresas que han desarrollado este tipo de simuladores a los que denominan por distintos nombres, por ejemplo “NAUTIS” de la empresa VSTEP (ver figura 2).



Figura 2. Simulador de navegación y maniobras creado por la empresa VSTEP extraído de [2].

La armada española también hace uso de estos simuladores, han sido creados por la empresa noruega KONGSBERG, a continuación se muestra una imagen del mismo extraído de [3].



Figura 3. Simulador de la armada española de la empresa KONGSBERG.

Actualmente la empresa NAVANTIA también está desarrollando de manera propia junto con empresas colaboradoras uno de estos simuladores, en principio destinado para la marina saudí cuyo nombre se apoda “NAVANTIS BRIDGE”.

2.1.2 Simulación del sistema integrado de control de plataforma.

El sistema integrado de control de plataforma es un software que permite controlar y vigilar el estado de las distintas instalaciones del barco (planta eléctrica, motores, bombas, sistemas de propulsión, elementos auxiliares como gestión de aguas residuales, aceites, agua limpia, elementos contra incendios). Estas instalaciones son controladas a nivel más bajo por controladores de lógica programable (PLC), que controlan el estado de sus elementos mediante sensores, también intercambian sus señales con el sistema integrado de control de plataforma.

Este tipo de simulador comparte la misma interfaz visual que el real, pero el comportamiento de sus elementos es imitado con gran precisión mediante software sustituyendo a los elementos reales por completo, de manera que los alumnos instruidos tienen una experiencia igual a la real. Actualmente la armada española utiliza estos simuladores día a día para adiestrar a su tripulación a nivel profesional. (ver figuras 4 y 5).

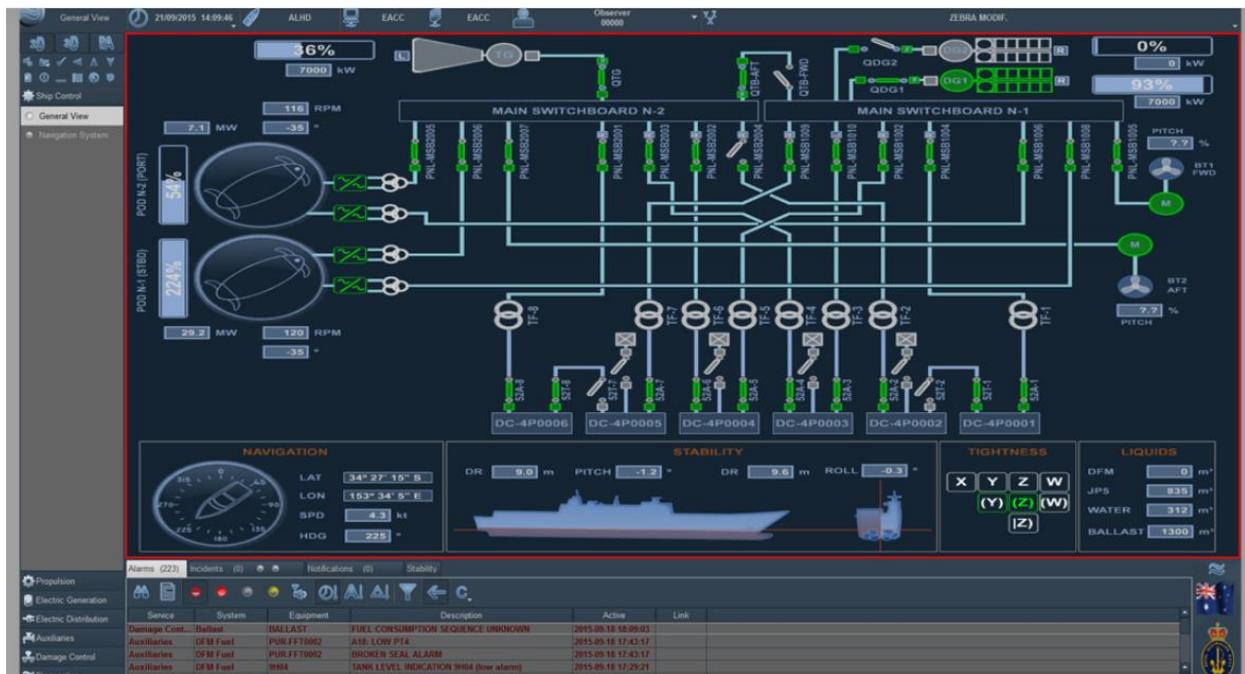


Figura 4. Imagen del sistema integrado de control de plataforma de un barco australiano LHD Adelaide obtenido de la referencia [4].



Figura 5. Captura del software del sistema integrado de control de plataforma del barco español BAC Cantabria obtenido de [4].

2.1.3 Simulación de sistemas de combate.

Tienen muchísima demanda profesional, es posible recrear situaciones de misiones tácticas reales de combate de manera fácil, sin daños humanos ni costes adicionales, ver el comportamiento del armamento seleccionado en el escenario, monitorización continua de estados de todos los elementos del sistema de combate, gestión de información provenientes de sistemas de vigilancia, radares, sensores de navegación, sonar, sistema de grabación y también integra comunicaciones entre los distintos elementos.

Se ha desarrollado en la empresa NAVANTIA una completa serie de simuladores de combate de esta clase, por ejemplo, esta el llamado SIMTAC aplicado en operaciones tácticas de submarinos donde se adiestra a los alumnos en la resolución de problemas tácticos (ver figura 6).



Figura 6. Simulador SIMTAC siendo utilizado en operaciones de combate [5].

Otro ejemplo son los simuladores de CIC (combat information centre), que son elementos que organizan y presentan información de manera adecuada al comandante al mando, algunos ejemplos han sido creados también por la misma empresa, NAVANTIA dentro de su producto gama NAVANTIS y por la empresa CAE. (ver figura 7).



Figura 7. Simulador CIC de la empresa CAE [6].

2.1.4 Simulación inmersiva.

Este tipo de simuladores permite a los usuarios sumergirse en el mundo real de manera virtual, puede ser una experiencia tanto en 2-D como 3-D. Para las empresas supone un ahorro de costes importantes que supondría por ejemplo el despliegue y logística de sacar un barco a la mar (combustible, recursos humanos, permisos, tiempo, etc...).

Algunos ejemplos serían el caso del simulador con gafas de realidad inmersiva donde el alumno podrá experimentar de primera mano e interactuar con las partes del buque (ver figura 8).



Figura 8. Simulador con gafas de realidad inmersiva creado por la empresa española NAVANTIA [7].

Otro ejemplo es el walkthrough llamado “NAVANTIS AIT” creado por una empresa colaboradora de NAVANTIA llamada “ARISNOVA” cuya interfaz sería como la de un videojuego en la que la persona que esta manejándolo puede visitar cualquier rincón del barco y conocer donde se sitúan cada una de sus dependencias sin ni siquiera haber estado dentro del mismo. Este ejemplo es muy válido para que nuevos tripulantes ya conozcan el barco antes de pisarlo. (ver figura 9).

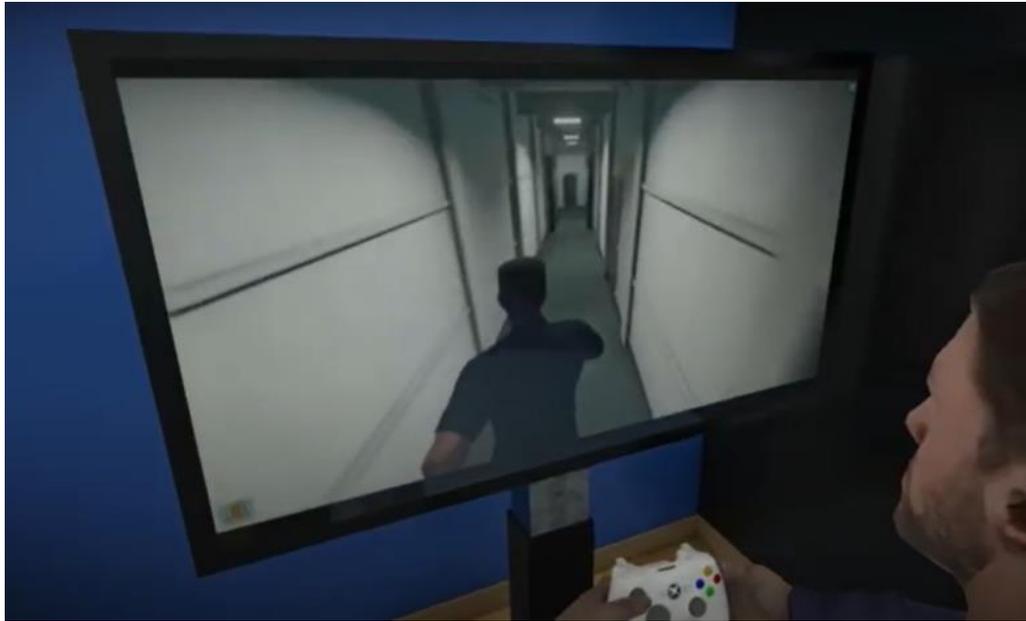


Figura 9. Sesión Formativa del simulador NAVANTIS AIT [8].

2.1.5 Simulación de maniobras.

Muestran la navegación del barco o varios barcos de distinto calado en tiempo real permitiendo al usuario experimentar situaciones reales, algunos ejemplos de este tipo son: Ship Simulator extremes creado por la empresa VSTEP que simula la navegación de un barco y aprender como ponerlo en marcha, aquí se aprecia en las siguientes imagenes (figuras 10 y 11).



Figura 10. Imagen simulada del interior de un crucero extraída de [9].

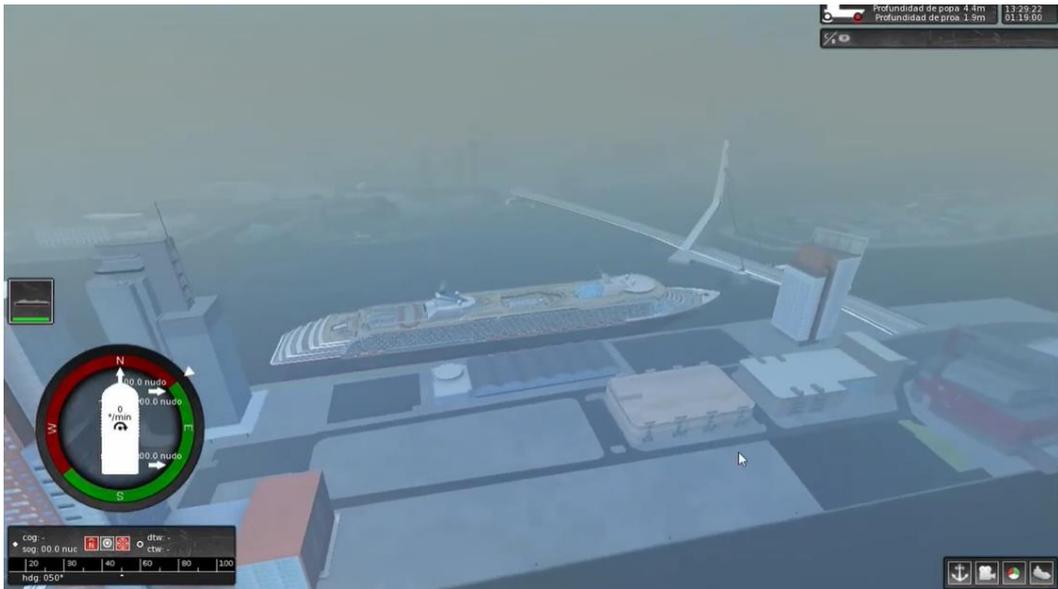


Figura 11. Imagen simulada del exterior de un crucero extraída de [9].

Otro ejemplo muy parecido de este tipo de simuladores es “European Ship Simulator” disponible en la plataforma Steam. (ver figura 12).



Figura 12. Imagen del simulador European Ship Simulator de [10].

No se encuentra ningún simulador disponible en la práctica que instruya y evalúe a los alumnos específicamente en este tipo de maniobras, cumpliendo con la normativa contra abordajes y colisiones “COLREG”. De ahí que en este proyecto, se opte por cubrir esa necesidad específica que debe de ser aplicada de manera profesional o tenerse en cuenta en todo simulador creado.

2.2. Modelos dinámicos de comportamiento de buques.

Para representar una aproximación del comportamiento real del barco se requiere un modelo matemático no lineal que represente la dinámica del mismo, tanto para 3 grados de libertad (longitudinal (Surge), transversal

(Sway) y rotacional o guiñada (Yaw)), como para 6 (longitudinal (Surge), transversal (Sway), arfada (Heave), rotacional o guiñada (Yaw), balanceo (Roll) y cabeceo (Pitch)). En el caso de modelos dinámicos de los buques se representan las fuerzas que interaccionan sobre el cuerpo para determinar sus velocidades. Hay distintas formas de expresarlas y estarían clasificadas en las siguientes formas según la literatura. El presente trabajo se centrará en los modelos de 3 grados de libertad ya que las maniobras solo se tendrán en cuenta al resultar útiles esas variables.

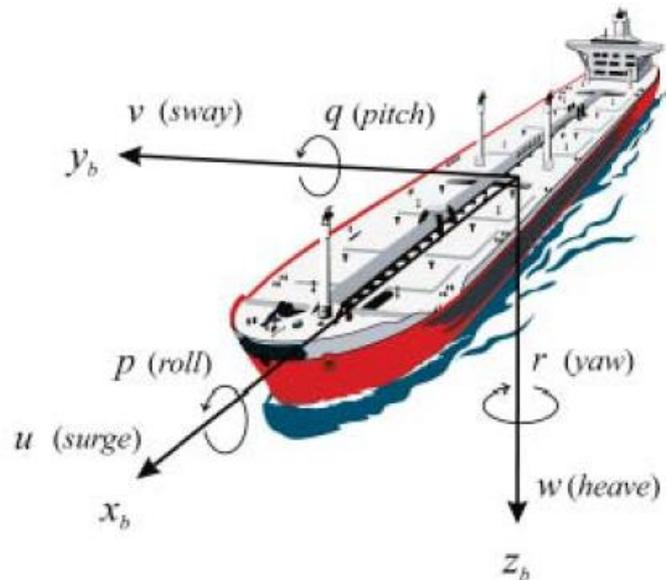


Figura 13. Movimientos o grados de libertad de un buque [11].

2.2.1 Modelos MMG (Manoeuvring Mathematical Group).

Los modelos modulares son los más utilizados por su mejor entendimiento y aplicación práctica, es posible distinguir la interacción de cada uno de los elementos por separado con el casco del barco mediante una suma de fuerzas resultantes. Estaría compuesto normalmente del modelo del barco, modelo de la propulsión, efecto del timón y los efectos de las condiciones ambientales.

2.2.1.1 Normalización de variables.

A todos los modelos MMG se les puede aplicar y es muy aconsejable una normalización de variables, ya que permite simplificar los cálculos, debido a la diversidad de unidades con las que se trabaja.

De este modo, se procede a adimensionar todas las variables del modelo para adaptarlos a los parámetros hidrodinámicos que son particulares para cada buque. Estos parámetros se obtienen mediante mediciones directas en la navegación real y son adimensionales.

Se cuenta principalmente en la práctica con dos tipos de métodos de adimensionar el modelo: Método Prime-System y método Bis-System. (Ver tabla 1).

Unit	Prime-system	Bis-system
Length	L	L
Mass	$\frac{\rho}{2} L^3$	$\mu \rho \nabla$
Inertia moment	$\frac{\rho}{2} L^5$	$\mu \rho \nabla L^2$
Time	$\frac{L}{U}$	$\sqrt{L/g}$
Reference area	L^2	$\mu \frac{\nabla}{L}$
Position	L	L
Angle	1	1
Linear velocity	U	\sqrt{Lg}
Angular velocity	$\frac{U}{L}$	$\sqrt{\frac{g}{L}}$
Linear acceleration	$\frac{U^2}{L}$	g
Angular acceleration	$\frac{U^2}{L^2}$	$\frac{g}{L}$
Force	$\frac{\rho}{2} U^2 L^2$	$\mu \rho g \nabla$
Moment	$\frac{\rho}{2} U^2 L^3$	$\mu \rho g \nabla L$

Tabla 1. Operaciones para adimensionar las distintas variables del modelo dinámico extraída de [12].

2.2.1.1.1 Método Prime-System.

Es el método más intuitivo y utilizado por la práctica, tiene el inconveniente cuando el buque está quieto “ $U=0$ ”, se puede hacer inestable el modelo, ya que al realizar la operación de división entre el modulo de la velocidad cero se obtiene como resultado una indeterminación. También es utilizada en la adimensionalización por este método la variable “ L_{pp} ” que es la longitud entre perpendiculares del buque (ver figura 14).



Figura 14. Distintos tipos de eslora de un buque extraída de [16].

Un ejemplo de aplicación de este método, sería, el calculo para adimensionar la masa o también llamado desplazamiento del buque, se procedería de siguiente modo, llamando “ Δ ” a la variable adimensionada.

$$\Delta' = \frac{\Delta}{0.5 * \rho * L^3} = \frac{[kg]}{\left[\frac{kg}{m^3}\right] * [m^3]} \quad (2-1)$$

2.2.1.1.2 Método Bis-System.

Metodología un poco más difícil de aplicar que la anterior “Prime-System”, pero que soluciona el problema de indeterminaciones cuando el buque está parado “ $U=0$ ”, ya que este método no usa el módulo de la velocidad para adimensionar las variables sino la gravedad “ g ”. El método fue introducido por Nils H. Norbin que expuso en su publicación [13]. A pesar de su buen uso, hay ciertos conceptos que no se explican con claridad por ninguno de los autores investigados que lo aplican.

Un ejemplo de aplicación, sería, el calculo de adimensionamiento de una fuerza, se procede del siguiente modo, llamando “ X'' ” a la variable adimensionada.

$$X'' = \frac{X}{\mu * \rho * g * \nabla} = \frac{\left[\frac{kg * m}{s^2}\right]}{\left[\frac{kg}{m^3}\right] * \left[\frac{m}{s^2}\right] * [m^3]} \quad (2-2)$$

2.2.1.2 Modelo del barco.

Se compone del sólido rígido que representa el cuerpo sobre el que la fuerza está actuando. Como cuerpo en movimiento este tendrá una masa y una inercia asociada.

También es parte del modelo del barco el efecto hidrodinámico, este efecto físico es una fuerza que frena continuamente la dirección de desplazamiento del barco, depende tanto de la superficie sumergida del barco como la velocidad del mismo, cuanto más velocidad tenga el barco, más fuerza hidrodinámica tendrá en contra de su avance. A más superficie sumergida “llamada también obra muerta” más frenará también el avance del buque.

Otro efecto que se introduce en la parte del modelado del barco es el deslizamiento o rozamiento que produce el barco con el fluido y que también frena el movimiento.

2.2.1.3 Modelo del timón.

El timón ejerce una fuerza adicional de resistencia en el buque que varía en función de su ángulo respecto a la proa del barco. La misma fuerza puede ser modelada desde distintos tipos de modelos creados en la práctica, como el expuesto en la referencia [12], cuyas ecuaciones serían 2-13, 2-14, 2-15 donde se aprecia que algunos de sus componentes están afectados de la variable “ d ” que representa el ángulo de timón. Todos esos elementos representarían la fuerza de resistencia que ofrece el timón.

Otro modelo se puede encontrar en la referencia [18] donde:

$$X_r = X_{ccdd} * c^2 * d^2 \quad (2-3)$$

Siendo:

$$c^2 = [(1 - w_o)^2 - C_T^2 * \frac{X_{uu}}{1 - t}] * U^2 \quad (2-4)$$

Donde w_o es la fracción de despertar en movimiento recto, la cuál expresa en forma de porcentaje la velocidad relativa del propulsor respecto al agua con la velocidad del buque respecto a tierra, C_T coeficiente de forma del timón y t coeficiente de empuje.

$$Y_r = Y_{ccd} * c^2 * d \quad (2-5)$$

$$N_r = N_{ccd} * c^2 * d \quad (2-6)$$

Otro ejemplo sería en la referencia [19] donde el cálculo de las fuerzas resultaría de la siguiente manera:

$$X_r = -F_N * \text{sen } d \quad (2-7)$$

$$Y_r = -(1 + a_H) * F_N * \text{cos } d \quad (2-8)$$

$$N_r = -(1 + a_H) * x_R * F_N * \text{cos } d \quad (2-9)$$

Donde a_H es un coeficiente que representa la fuerza lateral adicional que se produce al deflexionarse el timón, x_R coeficiente de fuerza de interacción entre timón, casco y propulsión y F_N es la fuerza normal del timón.

2.2.1.4 Modelo de la propulsión.

El modelo de la propulsión del buque será, cuando se tengan condiciones ambientales nulas, la única fuerza de empuje que permite al barco seguir en movimiento, actúa mayormente en la componente de fuerzas sobre el buque X' . Dependerá directamente de las revoluciones que se tengan en el motor, a más revoluciones pues se tendrá más fuerza de empuje.

Existen en la bibliografía distintas formas de modelar la fuerza que ejerce la propulsión del buque, se muestran algunos ejemplos en la referencia [18] se cuenta con la siguiente forma:

$$T = T_{nn} * n^2 + T_{nv} * n * V_A \quad (2-10)$$

Siendo T_{nn} y T_{nv} parámetros de diseño del propulsor y V_A la velocidad de avance o velocidad del fluido en el propulsor.

Otra forma que usan muchos autores para calcular la fuerza de empuje es la recopilada en [20], de este modo:

$$T = K_T(J_P) * \rho * n^2 * D^4 \quad (2-11)$$

Siendo $K_T(J_P)$ dependiendo de las características de la propulsión una curva de la siguiente forma (ver figura 15):

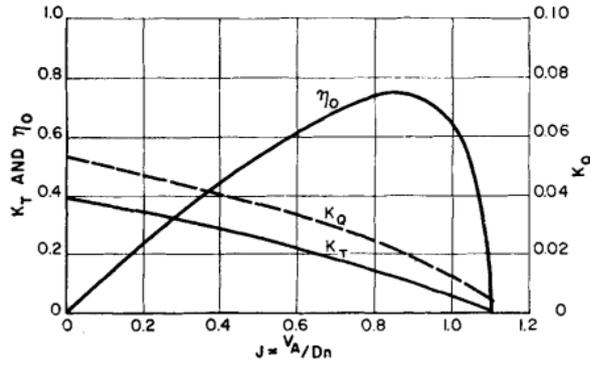


Figura 15. Curva típica de empuje, torque y eficiencia para un propulsor en mar abierto extraído de [20].

El calculo del ratio de avance del propulsor J_P , el cuál es un parámetro adimensional que expresa la relación de la velocidad relativa del propulsor respecto al agua V_A y la velocidad de la punta de la hélice, se expresaría mediante la siguiente fórmula:

$$J_P = \frac{V_A}{n * D} \tag{2-12}$$

2.2.1.5 Modelo del barco Fossen. Buques marineros.

Este modelo esta siendo aplicado en este caso para buques tipo “buques marineros”, con el aspecto aproximado que se muestra en la siguiente imagen (ver figura 15). Ya que se cuenta y aplica con datos y curvas experimentales reales obtenidas de la referencia [15].



Figura 16. Ejemplo del buque mariner BAC Cantabria extraído de la referencia [14].

Se utiliza el método de adimensionamiento de variables “Prime-System”, y calcula las fuerzas hidrodinámicas que ejerce el agua sobre el casco del barco y lo frenan en sus 3 grados de libertad, la forma general se muestra a continuación. No se incluye por el momento el modelo del sólido rígido. En el siguiente punto se desglosa y describe.

$$X' = X'_u * u' + X'_{uu} * u'^2 + X'_{uuu} * u'^3 + X'_{vv} * v'^2 + X'_{rr} * r'^2 + X'_{rv} * r' * v' + X'_{dd} * d'^2 + X'_{udd} * u' * d'^2 \dots \quad (2-13)$$

$$+ X'_{vd} * v' * d' + X'_{uvd} * u' * v' * d'$$

$$Y' = Y'_{vv} * v'^2 + Y'_{rr} * r'^2 + Y'_{vvv} * v'^3 + Y'_{vvr} * v'^2 * r' + Y'_{vu} * v' * u' + Y'_{ru} * r' * u' + Y'_d * d' + Y'_{ddd} * d'^3 \dots \quad (2-14)$$

$$+ Y'_{ud} * u' * d' + Y'_{uud} * u'^2 * d' + Y'_{vdd} * d'^2 * v' + Y'_{vvd} * v'^2 * d' + (YO' + YO_u * u' + YO_{uu} * u'^2)$$

$$N' = N'_v * v' + N'_r * r' + N'_{vvv} * v'^3 + N'_{vvr} * v'^2 * r' + N'_{vu} * v' * u' + N'_{ru} * r' * u' + N'_d * d' + N'_{ddd} * d'^3 \dots \quad (2-15)$$

$$+ N'_{ud} * u' * d' + N'_{uud} * u'^2 * d' + N'_{vdd} * d'^2 * v' + N'_{vvd} * v'^2 * d' + (NO' + NO_u * u' + NO_{uu} * u'^2)$$

Siendo $X'_u, X'_{uu}, X'_{uuu}, X'_{vv}, X'_{rr}, X'_{rv}, X'_{dd}, X'_{udd}, X'_{vd}, X'_{uvd}, Y'_{vv}, Y'_{rr}, Y'_{vvv}, Y'_{vvr}, Y'_{vu}, Y'_{ru}, Y'_d, Y'_{ddd}, Y'_{ud}, Y'_{uud}, Y'_{vdd}, Y'_{vvd}, YO'_u, YO', YO'_{uu}, N'_v, N'_r, N'_{vvv}, N'_{vvr}, N'_{vu}, N'_{ru}, N'_d, N'_{ddd}, N'_{ud}, N'_{uud}, N'_{vdd}, N'_{vvd}, NO'_u, NO', NO'_{uu}$ parámetros hidrodinámicos obtenidos directamente por experimentación.

2.2.1.6 Modelo Buque de carga VLCC (Very Large Crude Carrier).

El modelo está reflejado en la referencia [12], aplica el método de adimensionamiento Bis-System y se le aplican datos y pruebas reales obtenidos de la referencia [16]. Tiene el inconveniente que solo funciona para grados de timón entre [-20,20] grados. Si se sale de ese rango el modelo se hace inestable.

El modelo del buque está reflejado por las siguientes ecuaciones:

$$g * X'' = \frac{1}{L_{pp}} * (X_{uu} * u^2 + L_{pp} * (1 + X_{vr}) * v * r + X_{vv} * v^2 + X_{ccdd} * |c| * c * d^2 + X_{ccbd} * |c| * c * betha * d + L_{pp} * g * T(1 - t) + X_{uuz} * u^2 * z + L_{pp} * X_{vrz} * v * r * z + X_{vvzz} * v^2 * z^2) \quad (2-16)$$

$$g * Y'' = \frac{1}{L_{pp}} (Y_{uv} * u * v + Y_{vp} * |v| * v + Y_{ccd} * |c| * c * d + L_{pp} * (Y_{ur} - 1) * u * r + Y_{ccbdd} * |c| * c * |betha| * betha * |d| + YT * g * T * L_{pp} + L_{pp} * Y_{urz} * u * r * z + Y_{uvz} * u * v * z + Y_{vvz} * |v| * v * z + Y_{ccbddz} * |c| * c * |betha| * betha * |d| * z) \quad (2-17)$$

$$g * L_{pp} * N'' = \frac{1}{L_{pp}^2} * (N_{uv} * u * v + L_{pp} * N_{vr} * |v| * r + N_{ccd} * |c| * c * d + L_{pp} * (N_{ur} - x'_G) * u * r + N_{ccbdd} * |c| * c * |betha| * betha * |d| + L_{pp} * NT * g * T + L_{pp} * N_{urz} * u * r * z + N_{uvz} * u * v * z + L_{pp} * N_{vrz} * |v| * r * z + N_{ccbddz} * |c| * c * |betha| * betha * |d| * z) \quad (2-18)$$

Siendo $X_{vr}, X_{ccdd}, X_{ccbd}, X_{uuz}, X_{vrz}, X_{vvzz}, Y_{uv}, Y_{ccd}, Y_{ur}, Y_{ccbdd}, YT, Y_{urz}, Y_{uvz}, Y_{vvz}, Y_{ccbddz}, N_{uv}, N_{vr}, N_{ccd}, N_{ccbdd}, NT, N_{urz}, N_{uvz}, N_{vrz}, N_{ccbddz}$ al igual que para la ecuación 2-13, 2-14 y 2-15 parámetros hidrodinámicos obtenidos directamente por experimentación, z un parámetro dependiente de la profundidad y betha el efecto drift desviación que aparece durante el giro del buque.

$$z = \frac{Calado}{h - Calado} \quad (2-19)$$

$$betha = \frac{v}{u} \quad (2-20)$$

El modelo del sólido-rígido del barco se refleja mediante:

$$g * X'' = \dot{u} - v * r \quad (2-21)$$

$$g * Y'' = \dot{v} + u * r \quad (2-22)$$

$$g * L_{pp} * N'' = (L_{pp} * K''_z)^2 * \dot{r} + L_{pp} * x''_G * u * r \quad (2-23)$$

Siendo $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ las componentes de la aceleración del buque, K''_z es el radio de giro adimensionado por el método bis-system y x''_G es la distancia del centro de masas respecto el centro del buque también adimensionada.

2.2.2 Modelos NOMOTO.

Son llamados rudder to “yaw response model” porque matemáticamente representan una relación lineal de lo que cambia el rumbo respecto a una entrada de grados de timón. Se trata de un modelo simplificado del buque por una función de primer o segundo orden simple, particularizado sus parámetros para cada tipo de barco.

Aquí se muestra su forma genérica de segundo orden encontrada en la referencia [12]:

$$\frac{\psi}{d}(s) = \frac{K}{s * (1 + Ts)} \quad (2-24)$$

Siendo $T = T1 + T2 - T3$. La dificultad de este modelo es encontrar los parámetros K y T que corresponden al barco en cuestión definidas por experimentación.

2.2.3 Modelos CFD (Computational Fluid Dynamics).

Estos modelos estan basados en métodos numéricos que permiten calcular la interacción para cada punto del fluido sobre el casco del barco. Permite predecir el comportamiento del fluido sobre la superficie del casco. Se necesita bastante carga computacional y datos experimentales.

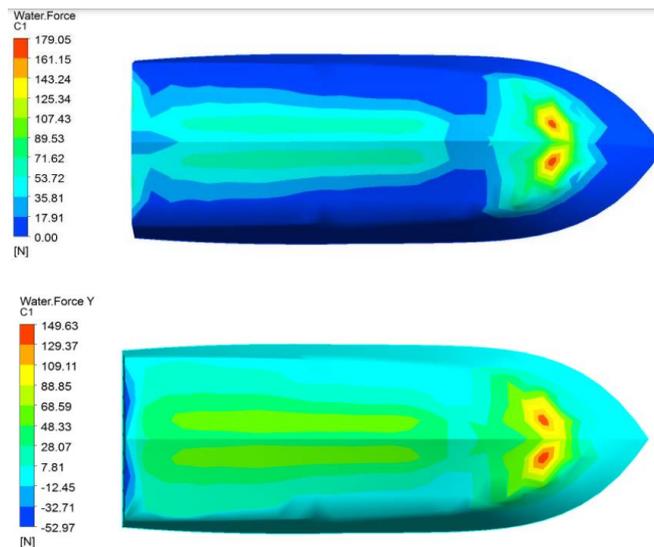


Figura 17. Resultados obtenidos del modelo CFD en la referencia [21].

2.3. Modelado de los efectos de las condiciones medioambientales sobre el buque.

Corresponden al efecto de fuerzas adicionales que producen las condiciones ambientales (corriente, viento, olas) sobre la superficie del barco y lo hacen desplazarse de su posición. El modelado de estas condiciones consiste en sumar fuerzas adicionales al modelo de tres grados de libertad del buque, las mismas variarán según intensidad de las condiciones meteorológicas y su orientación incidente sobre el barco.

2.3.1 Efecto de la corriente sobre el buque.

Previamente, lo primero que se necesita es modelar la corriente marina tanto en dirección o también llamada deriva como en velocidad en nudos y referida a los ejes del barco.

Se tiene la relación matemática siguiente de dos dimensiones que permite calcular las componentes de la

corriente referidas a ejes barco a partir de las mismas en ejes tierra haciendo una rotación de ejes, este modelo se obtiene de la referencia [12].

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sen\psi \\ -\sen\psi & \cos\psi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

Siendo u_c^E y v_c^E las componentes de la velocidad de la corriente respecto a ejes tierra, se tiene:

$$u_c^E = Vc * \cos \beta \quad (2-26)$$

$$v_c^E = Vc * \sin \beta \quad (2-27)$$

Siendo Vc la velocidad media de la corriente y β la dirección de la corriente.

Sustituyendo 2-26 y 2-27 en la ecuación 2-25 y aplicando la razón trigonométrica de ángulo doble se obtienen las componentes de la velocidad de la corriente respecto a ejes barco:

$$u_c = Vc * \cos(\beta - \psi) \quad (2-28)$$

$$v_c = Vc * \sin(\beta - \psi) \quad (2-29)$$

En la figura siguiente se muestra la representación gráfica de estos calculos recogidos de la misma referencia [12].

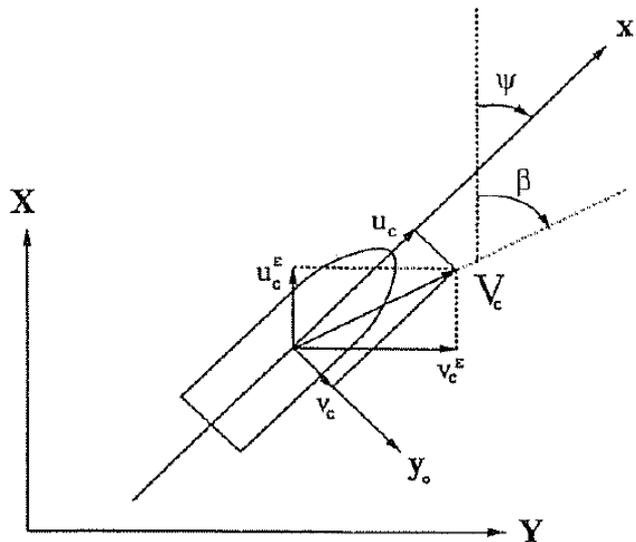


Figura 18. Velocidad media y dirección de la corriente en relación a los distintos ejes de coordenadas.

La corriente respecto ejes barco será resultado de calcular el módulo de sus componentes:

$$U_c = \sqrt{u_c^2 + v_c^2} \quad (2-30)$$

Y la dirección de corriente resultante “ Dir_c ” será:

$$Dir_c = arctang2\left(\frac{v_c}{u_c}\right) \quad (2-31)$$

Para añadirle dinámica temporal al modelado de la corriente, en la referencia [12] se suma al resultado de la ecuación 2-30, la siguiente expresión que representa la integración de un ruido blanco gaussiano:

$$\dot{U}_c(t) = w(t) \quad (2-32)$$

Una vez modelada la corriente marina, para el cálculo de la fuerza que ejerce la misma sobre el casco del buque en los tres grados de libertad X_{ec} , Y_{ec} , N_{ec} . se utilizan las siguientes expresiones extraídas de la referencia [22].

$$X_{ec} = \frac{1}{2} * C_x * \rho * U_c^2 * L_{PP} * Draft \quad (2-33)$$

$$Y_{ec} = \frac{1}{2} * C_y * \rho * U_c^2 * L_{PP} * Draft \quad (2-34)$$

$$N_{ec} = \frac{1}{2} * C_n * \rho * U_c^2 * L_{PP}^2 * Draft \quad (2-35)$$

Siendo los coeficientes C_x , C_y , C_n definidos por curvas experimentales dependiendo del ángulo de incidencia del fluido sobre el buque.

2.3.2 Empuje del viento.

Para el modelado de la intensidad y dirección del viento real y sus variaciones en el tiempo se cuenta con el modelo recogido en la referencia [12].

Se partirá de la aproximación lineal apartir de la forma no lineal del espectro Harris recogido en [23] y mostrado en la ecuación 2-36.

$$S_w(w) = k * \frac{5286 * V_w(10)}{[1 + (286 * w/V_w(10))^2]^{5/6}} \quad (2-36)$$

Siendo k el factor de turbulencia igual a 0.05, w la frecuencia de oscilaciones del viento y $V_w(10)$ la velocidad media del viento a 10 metros sobre la superficie del agua.

De este modo se obtiene la aproximación siguiente.

$$h(s) = \frac{K}{1 + Ts} \quad (2-37)$$

$$S_w(w) \approx |h(jw)|^2 = \frac{K^2}{1 + (wT)^2} \quad (2-38)$$

Asimilando elementos de las ecuaciones 2-38 a 2-36 en la referencia [12] se obtiene lo siguientes valores para la ganancia estática K y constante de tiempo T :

$$K = \sqrt{(0.05) * V_w(10) * 5285} \quad (2-39)$$

$$T = \sqrt{\frac{286}{V_w(10)}} \quad (2-40)$$

Con estos parámetros del espectro de Harris se modela la parte turbulenta de la dirección e intensidad del viento respecto ejes tierra con la siguiente relación de la referencia [12]:

$$\dot{x}_1 = w1 \quad (2-41)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{T} * (x_2 - K * w2) \quad (2-42)$$

$$V_{wt} = x_1 + x_2 \quad (2-43)$$

Siendo w1, w2 ruido blanco gaussiano para variar aleatoriamente la señal, x_1, x_2 los estados presentes y \dot{x}_1, \dot{x}_2 los estados en el siguiente tiempo de muestreo.

Para calcular la parte turbulenta de la dirección del viento respecto ejes tierra sería:

$$\dot{x}_3 = w3 \quad (2-44)$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{T} * (x_4 - K * w4) \quad (2-45)$$

$$\varphi_{wt} = x_3 + x_4 \quad (2-46)$$

Siendo del mismo modo que la tripleta anterior w3, w4 ruido blanco gaussiano para variar aleatoriamente la señal, x_3, x_4 los estados presentes y \dot{x}_3, \dot{x}_4 los estados en el siguiente tiempo de muestreo.

Se calcula con la suma del valor medio y valor turbulento tanto de la velocidad como de la dirección los valores reales siendo:

$$V_w = V_{wt} + V_w(10) \quad (2-47)$$

$$\varphi_w = \varphi_{wt} + \varphi_w(10) \quad (2-48)$$

Se realiza el calculo de las componentes de la velocidad del viento referida a ejes barco del siguiente modo.

$$u_w = V_w * \cos(\gamma_r) \quad (2-47)$$

$$v_w = V_w * \sin(\gamma_r) \quad (2-48)$$

Donde γ_r es el ángulo de la velocidad de viento relativa referida a ejes tierra.

$$\gamma_r = \phi_w - \psi \quad (2-49)$$

Se representa graficamente estas componentes mediante la siguiente figura extraída de [12].

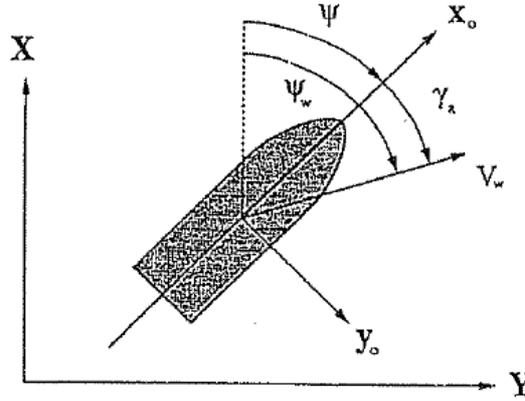


Figura 19. Definición de la velocidad del viento y su dirección sobre el buque.

Con estos datos se calcula las componentes de la velocidad relativa del viento en ejes barco mediante:

$$u_{rw} = u - u_w \quad (2-50)$$

$$v_{rw} = v - v_w \quad (2-51)$$

A partir de las componentes de la velocidad relativa se calcula el modulo de la velocidad del viento relativo a ejes del barco y su dirección del siguiente modo:

$$U_{rw} = \sqrt{u_{rw}^2 + v_{rw}^2} \quad (2-52)$$

$$\gamma_{rw} = \tan^{-1} \frac{v_{rw}}{u_{rw}} \quad (2-53)$$

Se procede al cálculo de fuerzas que ejerce el viento sobre la superficie muerta del barco, se extrae de la referencia [12].

$$X_{ew} = \frac{1}{2} * C_x(\gamma_{rw}) * \rho_w * U_{rw}^2 * A_t \quad (2-33)$$

$$Y_{ew} = \frac{1}{2} * C_y(\gamma_{rw}) * \rho_w * U_{rw}^2 * A_L \quad (2-34)$$

$$N_{ew} = \frac{1}{2} * C_n(\gamma_{rw}) * \rho_w * U_{rw}^2 * L_{PP} * A_L \quad (2-35)$$

Siendo $C_x(\gamma_{rw})$, $C_y(\gamma_{rw})$, $C_n(\gamma_{rw})$ los coeficientes dependientes de la dirección de la velocidad relativa sobre el barco, ρ_w es la densidad del aire, A_t , A_L es el area transversal y longitudinal respectivamente del

buque de la parte que esta fuera del agua “obra muerta del barco”.

2.3.3 Oleaje.

Se modelan las fuerzas que ejercen las olas sobre la superficie del buque, las mismas dependen directamente de la intensidad de viento, a más viento más oleaje compartiendo también su dirección.

El modelo se recoge en la referencia [12], el primer cálculo a realizar es el parámetro frecuencia de encuentro W_e que sería la frecuencia que tiene la ola al contactar con la superficie del barco en ese instante.

$$W_e = \left| w_o - \frac{w_o^2}{g} * u * \cos(bet) \right| \quad (2-36)$$

Siendo w_o la frecuencia de la ola o también llamada frecuencia de pico para el espectro de Pierson-Moskowitz (ver figura 20), u la velocidad longitudinal y bet la dirección entre el rumbo y la dirección de la ola.

$$bet = \psi - \varphi_w(10) \quad (2-37)$$

$$w_o = 0.4 * \sqrt{\frac{g}{H_s}} \quad (2-38)$$

Siendo H_s la altura de la ola, obtenida del calculo siguiente recogido en [12]:

$$H_s = 0.21 * \left(\frac{V_w(20)^2}{g} \right) \quad (2-39)$$

Donde $V_w(20)$ es la velocidad media del viento a veinte metros sobre la superficie del mar. Es calculada mediante la siguiente relación recogida de la referencia [24]:

$$V_w(20) = (V_w(10) * 0.51444) * \left(\frac{19.8}{10} \right)^{0.1429} \quad (2-40)$$

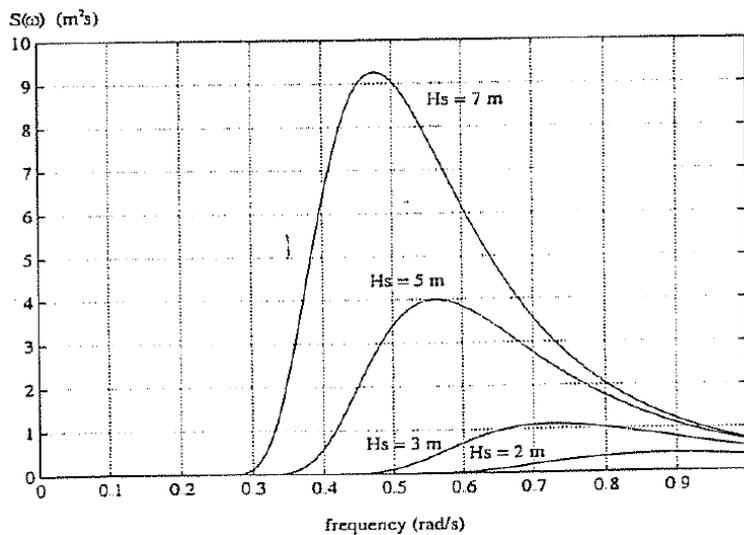


Figura 20. Espectro de Pierson- Moskowitz para diferentes valores de altura de ola.

Para el cálculo de fuerzas totales Xewave, Yewave, Newave actuando sobre la superficie del casco del buque

se cuenta con las siguientes relaciones recogidas en [12]:

$$Xewave = \sum_{i=1}^N \rho * g * Manga * L_{PP} * Draft * \cos(\text{bet}) * S_i(t) \quad (2-41)$$

$$Yewave = \sum_{i=1}^N -\rho * g * Manga * L_{PP} * Draft * \sin(\text{bet}) * S_i(t) \quad (2-42)$$

$$Newave = \sum_{i=1}^N \frac{1}{24} * \rho * g * Manga * L_{PP} * (L_{PP}^2 - Manga^2) * \sin(2 * \text{bet}) * S_i(t)^2 \quad (2-43)$$

Siendo $S_i(t)$ la elevación de la ola en ese instante respecto altura cero, se calcula mediante el calculo recogido en [20] y recorrerá todo el espectro mostrado en la figura 20:

$$S_i(t) = \sum_{i=1}^N A_i * k_i * \text{sen}(W_e + Phi) \quad (2-44)$$

Donde k_i es el número de ondas o número de armónicos por unidad de distancia, A_i la amplitud, Phi el desfase de armónicos de la ola e irá de $[0, 2\pi]$.

Para calcular k_i se recurre a la siguiente ecuación suponiendo que existe una alta profundidad debajo del buque:

$$k_i = \frac{w(i)^2}{g} \quad (2-45)$$

Siendo $w(i)$ el valor de frecuencia en cada intervalo de la función de densidad espectral en rad/s.

Para calcular A_i se recurre a la siguiente ecuación:

$$A_i = \sqrt{2 * Sw(i) * \Delta wo} \quad (2-46)$$

Siendo Δwo es el interval frecuencia fija que recorre el espectro, $Sw(i)$ es la funcion de densidad espectral de Pierson- Moskowitz mostrada en la figura 20.

$$Sw(i) = A * w(i)^{-5} * e^{-B * w(i)^{-4}} \quad (2-47)$$

Siendo A y B los parámetros Pierson-Moskovit (PM) del espectro de ola.

$$A = \frac{3.11}{Hs^2} \quad (2-48)$$

$$B = 8.1 * 10^{-3} * g^2 \quad (2-49)$$

2.4 Pruebas de mar de buques.

Los buques tras su construcción, necesitan pasar una serie de pruebas de maniobras experimentales en la navegación que permiten determinar el comportamiento exclusivo del barco para distintas profundidades. Estas pruebas reales resultan muy útiles a la hora de probar la validez de un modelo, ya que su similitud con la realidad probará su calidad.

Algunas de esas pruebas son: Circulo táctico, Zig-zag con distintos ángulos de timón, línea recta y maniobra de parada.

2.4.1 Circulo táctico o curva evolutiva.

Es el más característico y el que mejores prestaciones ofrece. Consiste a partir de una velocidad determinada del barco en línea recta, girar el timón al máximo grado a babor o estribor y mantenerlo hasta que el buque de la vuelta completa. (ver figura 21).

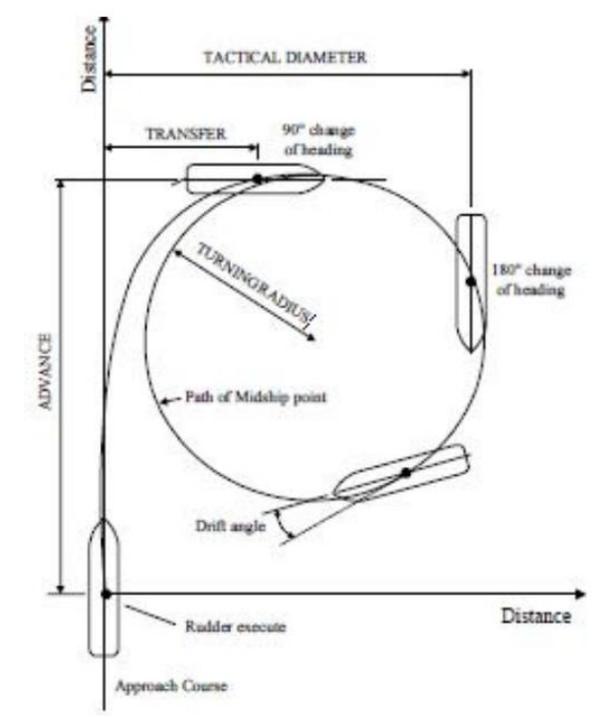


Figura 21. Maniobra para determinar el diámetro táctico de un buque extraída de la referencia [25].

Las variables destacadas a medir son:

- Avance. Que consiste en medir la distancia frontal desde que el timón alcanza el máximo ángulo con el rumbo a cero grados hasta que el rumbo alcanza los 90 grados.
- Transferencia. Que consiste medir la distancia lateral que se ha desplazado el buque desde que el timón alcanza el máximo ángulo con el rumbo a cero grados hasta que el rumbo alcanza los 90 grados.
- Diámetro Táctico. Que consiste medir la distancia lateral que se ha desplazado el buque desde que el timón alcanza el máximo ángulo con el rumbo a cero grados hasta que el rumbo alcanza los 180 grados.

2.4.2 Zig-zag.

Este tipo de maniobra consiste en poner el buque a una velocidad e ir girando el timón de manera constante

durante todo su recorrido completo que suele ser $[+35,-35]$ grados. Se muestra a continuación imagen extraída de la referencia [25] y en la figura 23 datos experimentales obtenidos en la referencia [26] de manera que se permite ver cómo se comporta la dinámica del timón y del cambio de rumbo del barco respecto a este.



Figura 22. Pruebas de maniobra zig-zag en la mar.

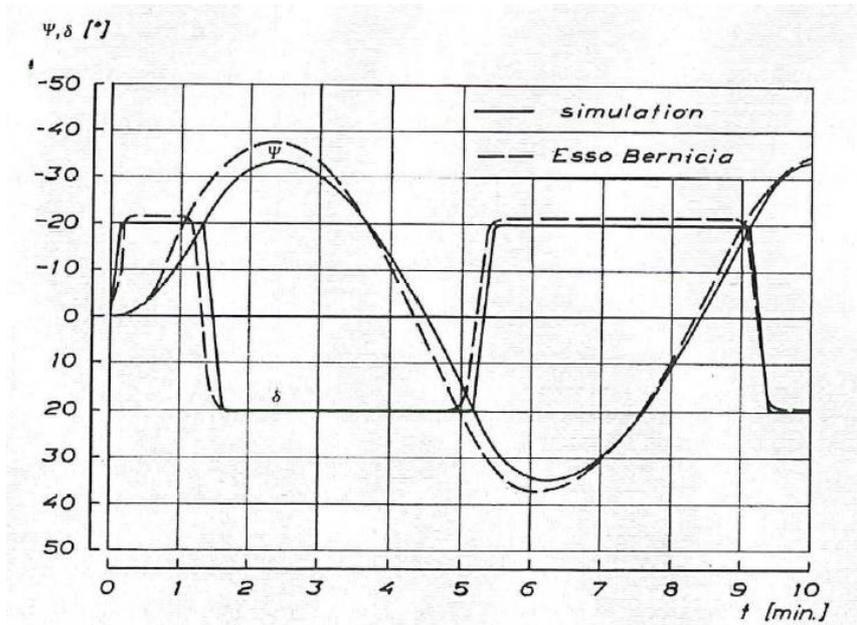


Figura 23. 190,000 DTW Tanker -20/+20 Zig-zag test.

2.4.3 Línea recta.

Consiste en poner el barco a máxima potencia de propulsión y cero grados de timón, totalmente en línea recta hasta alcanzar la velocidad de crucero, o sea la máxima velocidad que el barco puede alcanzar.

En su curva de respuesta se observará el tiempo que ha tardado en alcanzar el buque la máxima velocidad y hasta que velocidad alcanza.

2.4.4 Maniobra de parada.

Estando el barco en movimiento, se pondrá el propulsor a mínima potencia y se observará el tiempo que tarda el barco en detenerse, si se mantiene en línea recta, por ejemplo, para una velocidad de 10 nudos, la distancia de frenado podría ser alrededor de 3 o 4 esloras del barco. (ver figura 24 obtenida de la referencia [27])

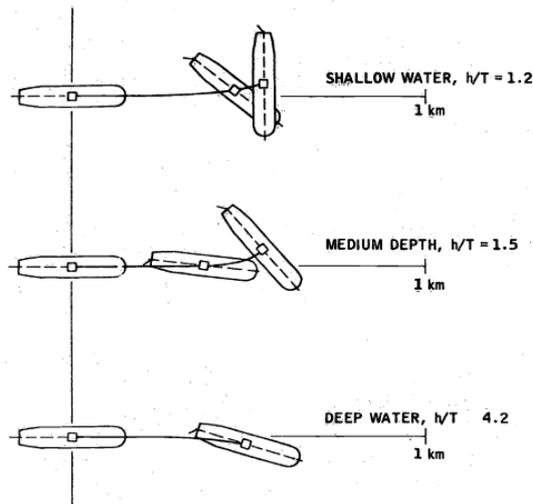


Figura 24. Respuesta de parada de un buque petrolero dependiente de la profundidad a la que está el buque.

2.5 Normativa internacional para la prevención de abordajes y colisiones en el mar.

El Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes (RIPA) o Convención de regulaciones internacionales para prevenir colisiones en el mar (COLREG), ha sido adoptado por la Organización Marítima Internacional (IMO), entró en vigor desde 1977 y de aplicación a todos los buques que estén en el mar [28].

Estas normas sirven para establecer unas normas de circulación marítima que permiten a los buques ponerse de acuerdo para efectuar maniobras de manera segura y así evitar posibles accidentes.

Esta normativa recoge también una serie de acciones con señales sonoras y lumínicas que complementan, junto a los movimientos del barco establecidos, para una mejora de entendimiento de las maniobras ante distintas situaciones haciéndolas mejor entendibles y mejorando la seguridad en la navegación.

Como pautas destacables en lo que circulación se refiere se describen las siguientes reglas de la normativa recogidas en los textos [29][30][31].

2.5.1 Regla 6. Velocidad de seguridad.

Todo buque navegará en todo momento a una velocidad de seguridad tal que le permita ejecutar la maniobra adecuada y eficaz para evitar el abordaje y pararse a la distancia que sea apropiada a las circunstancias y condiciones del momento.

Para determinar la velocidad de seguridad en todos los buques, se tendrán en cuenta, entre otros, los siguientes factores:

- i) El estado de visibilidad;
- ii) La densidad de tráfico, incluidas las concentraciones de buques de pesca o de cualquier otra clase;
- iii) La maniobrabilidad del buque teniendo muy en cuenta la distancia de parada y la capacidad de giro en las condiciones del momento;
- iv) De noche, la existencia de resplandor, por ejemplo, el producido por luces de tierra o por el reflejo de las luces propias;
- v) El estado del viento, mar y corriente, y la proximidad de peligros para la navegación;
- vi) El calado en relación con la profundidad disponible de agua.

2.5.2 Regla 7. Riesgo de abordaje.

- a) Cada buque hará uso de todos los medios de que disponga a bordo y que sean apropiados a las

circunstancias y condiciones del momento, para determinar si existe riesgo de abordaje. En caso de abrigarse alguna duda, se considerará que el riesgo existe.

b) Para determinar si existe riesgo de abordaje se tendrán en cuenta, entre otras, las siguientes consideraciones:

- i) Se considerará que existe el riesgo, si la demora de un buque que se aproxima no varía en forma apreciable.
- ii) En algunos casos, puede existir riesgo aun cuando sea evidente una variación apreciable de la demora, en particular al aproximarse a un buque de gran tamaño o a un remolque o a cualquier buque a muy corta distancia.

2.5.3 Regla 8. Maniobras para evitar el abordaje.

a) Toda maniobra que se efectúe para evitar un abordaje será llevada a cabo de conformidad con lo dispuesto en las reglas de la presente parte y, si las circunstancias del caso lo permiten, se efectuará en forma clara, con la debida antelación y respetando las buenas prácticas marineras.

b) Si las circunstancias del caso lo permiten, los cambios de rumbo y/o velocidad que se efectúen para evitar un abordaje serán lo suficientemente amplios para ser fácilmente percibidos por otro buque que los observe visualmente o por medio de radar. Deberá evitarse una sucesión de pequeños cambios de rumbo y/o velocidad.

c) Si hay espacio suficiente, la maniobra de cambiar solamente de rumbo puede ser la más eficaz para evitar una situación de aproximación excesiva, a condición de que se haga con bastante antelación, sea considerable y no produzca una nueva situación de aproximación excesiva.

d) La maniobra que se efectúe para evitar un abordaje será tal que el buque pase a una distancia segura del otro. La eficacia de la maniobra se deberá ir comprobando hasta el momento en que el otro buque esté pasado y en franquía.

e) Si es necesario con objeto de evitar el abordaje o de disponer de más tiempo para estudiar la situación, el buque reducirá su velocidad o suprimirá toda su arrancada parando o invirtiendo sus medios de propulsión.

f) Los buques que en virtud de cualquiera de las presentes reglas estén obligados a no estorbar el tránsito o tránsito seguro de otro buque maniobrarán prontamente, cuando así lo exijan las circunstancias, a fin de dejar espacio suficiente para permitir el tránsito seguro del otro buque.

2.5.4 Regla 13. Buque que alcanza.

a) Todo buque que alcance a otro se mantendrá apartado de la derrota del buque alcanzado.

b) Cuando un buque abrigue dudas de si está alcanzando o no a otro, considerará que lo está haciendo y actuará como buque que alcanza.

c) Ninguna variación posterior de la marcación entre los dos buques hará del buque que alcanza un buque que cruza, en el sentido que se da en este Reglamento, ni le dispensará de su obligación de mantenerse apartado del buque alcanzado, hasta que lo haya adelantado completamente y se encuentre en franquía.

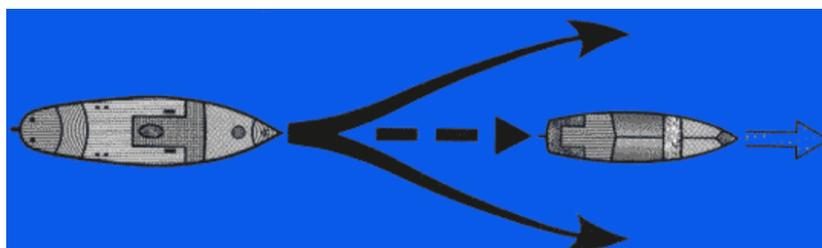


Figura 25. Visual de la maniobra de adelantamiento del buque obtenida de [32].

2.5.5 Regla 14. Situación de vuelta encontrada.

a) Cuando dos buques de propulsión mecánica naveguen de vuelta encontrada a rumbos opuestos o casi opuestos, con riesgo de abordaje, cada uno de ellos caerá a estribor de forma que pase por la banda de babor del otro.

b) Se considerará que tal situación existe cuando un buque vea a otro por su proa, o casi por su proa, de forma que de noche vería las luces de tope de ambos palos del otro enfiladas o casi enfiladas y/o las dos luces de costado, y de día observaría al otro buque bajo el ángulo de apariencia correspondiente.

c) Cuando un buque abrigue dudas de si existe tal situación, supondrá que existe y actuará en consecuencia.

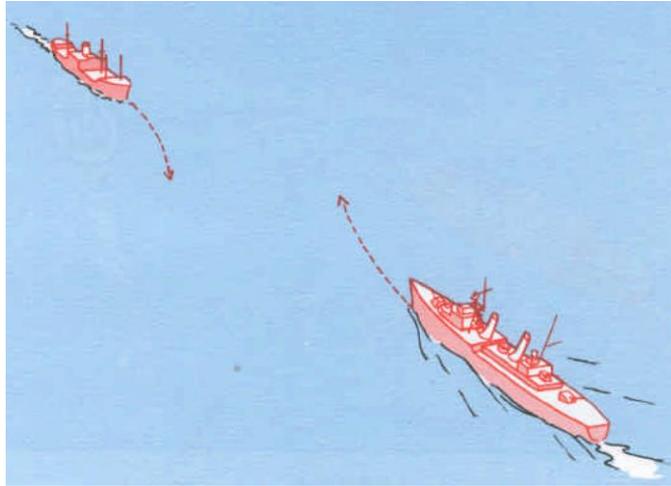


Figura 26. Visual de la regla 14 recogida en [31].

2.5.6 Regla 15. Situación de cruce.

Cuando dos buques de propulsión mecánica se crucen con riesgo de abordaje, el buque que tenga al otro por su costado de estribor se mantendrá apartado de la derrota de este otro y, si las circunstancias lo permiten, evitará cortar la proa.

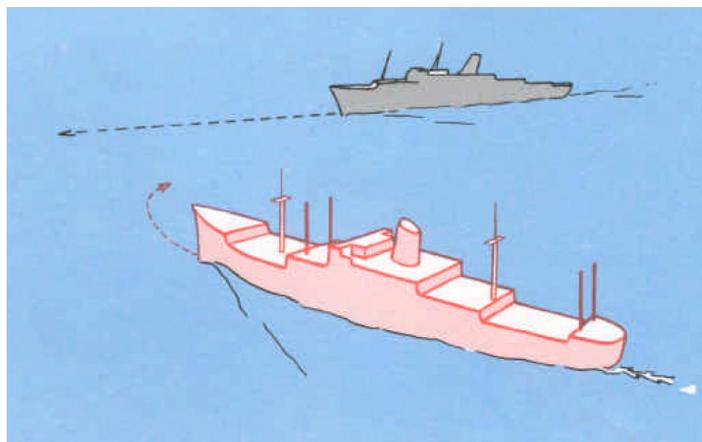


Figura 27. Visual de la regla 15 recogida en [31].

2.5.7 Regla 16. Maniobra del buque que cede el paso.

Todo buque que esté obligado a mantenerse apartado de la derrota de otro buque maniobrá, en lo posible, con anticipación suficiente y de forma decidida para quedar bien franco del otro buque.

2.5.8 Regla 17. Maniobra del buque que sigue a rumbo.

a) Cuando uno de los dos buques deba mantenerse apartado de la derrota del otro, este último mantendrá su rumbo y velocidad. No obstante, este otro buque puede actuar para evitar el abordaje con su propia maniobra, tan pronto como le resulte evidente que el buque que debería apartarse no está actuando en la forma preceptuada por este Reglamento.

b) Cuando, por cualquier causa, el buque que haya de mantener su rumbo y velocidad se encuentre tan próximo al otro que no pueda evitarse el abordaje por la sola maniobra del buque que cede el paso, el primero

ejecutará la maniobra que mejor pueda ayudar a evitar el abordaje.

c) Un buque de propulsión mecánica que maniobre en una situación de cruce, para evitar el abordaje con otro buque de propulsión mecánica, no cambiará su rumbo a babor para maniobrar a un buque que se encuentre por esa misma banda si las circunstancias del caso lo permiten.

d) La presente Regla no exime al buque que cede el paso de su obligación de mantenerse apartado de la derrota del otro.

3 DESARROLLO DE MODELOS Y DE ESCENARIOS DE ENTRENAMIENTO

En este apartado se describe el proceso completo seguido para llevar a cabo el simulador de entrenamiento de maniobras según la normativa COLREG para oficiales de puente.

La aplicación creada con la versión MATLAB 2020a consta de cuatro ejercicios evaluables del 0 al 100 y permite al usuario situarse dentro del puente del barco y manejar el comportamiento del buque real. Las maniobras serán visualizadas en pantalla de manera 2D mostrándose un mensaje feedback de si las maniobras han sido realizadas de forma correcta y regla COLREG cumplida.

Los escenarios tienen en común la visualización de dos buques, por un lado, se tiene el buque propio controlado que es un petrolero japonés llamado Esso Osaka debido a que es el barco del que se ha encontrado mayor información de datos reales y como segundo buque no controlado, que actúa como bot en el escenario, se trata de un barco del ejército español de aprovisionamiento en combate llamado Cantabria.

Se explica la composición y materialización de todos los modelos matemáticos utilizados, sus fuentes y técnicas utilizadas.

3.1 Obtención de datos y pruebas reales disponibles.

Existe gran dificultad en todos los ámbitos para obtener datos reales de barcos para completar el modelo, debido a que los barcos son propiedades de empresas o entidades militares. Siempre hay algún dato de su estructura que no es proporcionado y no es posible calcular por métodos propios si no son directamente medidos.

La dificultad es aun mayor por no decir máxima si a la necesidad de disponer de datos reales se le suma la necesidad de contar con pruebas experimentales reales mediante curvas para ser capaces de contrastar la calidad y validez del modelo con las del barco real.

De este modo, se busca en toda la bibliografía existente y con dificultad el que parece contar con todos los datos necesarios es un barco japonés llamado ESSO OSAKA (ver figura 28), aunque para sacar todos los datos necesarios se buscará en distintos artículos por separado [33-35][12] e igual pasa con sus curvas experimentales que se muestran en [36].



Figura 28. ESSO OSAKA buque VLCC real con datos disponibles obtenido de [35].

Como segundo buque, se cuenta con datos reales del barco tipo Mariner Vessel encontrado en la referencia [12], y se completa con los datos de un barco de características, dimensiones muy similares llamado CANTABRIA A-15 recogidas en la referencia [37], para las pruebas de mar se localizan en la referencia [15].



Figura 29. BAC CANTABRIA A-15 extraido de [38].

3.2 Modelo matemático ESSO OSAKA.

Para materializar el modelo del petrolero VLCC ESSO OSAKA se escoge como base el modelo representado en la referencia [33], se explicará cada sección en detalle en este apartado. En este buque el oficial de puente instruido podrá manejar y observar el comportamiento real en pantalla en el simulador. Para pasar la prueba deberá cumplir con las reglas COLREG en cada ejercicio.

3.2.1 Datos reales del buque ESSO OSAKA.

Se detalla en resumen en forma de tabla los datos extraídos de fuentes reales en este orden: parámetro, valor, unidad y referencia de donde se obtuvo el dato.

Parámetro	Valor	Descripción	Unidad	Referencia
∇	$319400 \cdot 10^3$	Desplazamiento	m^3	[34]
ρ	1025	Densidad agua salada 15 C°	$\frac{kg}{m^3}$	[33]
L_{PP}	325	Distancia entre perpendiculares	m	[33]
$Manga$	53	Ancho del barco	m	[33]
T	21.8	Calado medio	m	[33]
A1	1130	Area transversal fuera del agua	m^2	[12]
A _t	3160	Area lateral fuera del agua	m^2	[12]
m'	$2.365 \cdot 10^{-2}$	Masa adimensionada para 278k de carga.	-	[35]
x'_g	0.03169230769	Distancia al eje de coordenadas adimensionado	-	[33]

I'_{zz}	1.065502605*10 ⁻³	Inercia respecto del eje vertical z	-	[33]
PROPULSION				
t	0.7894	Coefficiente de deducción de empuje	-	[33]
Dp	9.1	Diametro de la hélice	m	[33]
W_{p0}	0.614	Coefficiente de levantamiento efectivo	-	[33]
tau	0.871	Coefficiente de hélice	-	[33]
C_p	-0.359	Coefficiente de hélice	-	[33]
x'_p	-157.27	Distancia del centro de gravedad (cg) a las hélices	m	[33]
TIMÓN				
tr	0.21732	Coefficiente por interacción entre casco, timón y hélices	-	[33]
GeomAspect	1.539	Relación aspecto geometrico del timón	-	[33]
Ar	119.817	Area del timón proyectada	m ²	[33]
ϵ	1.42	Constante determinada por experimentos	-	[33]
kcoeff	0.288	Constante determinada por experimentos	-	[33]
hr	13.85	Altura desde borde del timón	m	[33]
Ratio	0.6570397	Ratio dimensión Timón/Hélices [Dp/hr]	m	[33]
γ_r	0.408	Deflexión del flujo de agua debido a la parte del casco situada delante del timón	-	[33]
lr	-325	Constante determinada por experimentación	-	[33]
ah	0.7	Coefficiente por interacción entre casco, timón y hélices	-	[33]
xr	-162.5	Coefficiente por interacción entre casco, timón y hélices	-	[33]
xh	-162.5	Coefficiente por interacción	-	[33]

		entre casco, timón y hélices		
PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS				
$X'_{\dot{u}}$	-0.02205	-	-	Por Ajuste
$Y'_{\dot{v}}$	-0.000259	-	-	Por Ajuste
$Y'_{\dot{r}}$	0	-	-	Por Ajuste
$N'_{\dot{v}}$	0.0320	-	-	Por Ajuste
$N'_{\dot{r}}$	-0.001057	-	-	Por Ajuste
X'_{vr}	0.11228	-	-	Por Ajuste
Y'_{uv}	0.0001	-	-	Por Ajuste
Y'_{ur}	0	-	-	Por Ajuste
Y'_{vv}	-3.45375	-	-	Por Ajuste
Y'_{vr}	0	-	-	Por Ajuste
Y'_{rv}	-0.0001	-	-	Por Ajuste
N'_{uv}	0.0001	-	-	Por Ajuste
N'_{ur}	-0.0003	-	-	Por Ajuste
N'_{rr}	-0.003235	-	-	Por Ajuste
N'_{rv}	0	-	-	Por Ajuste

Tabla 2. Resumen de datos reales del buque VLCC ESSO OSAKA para el modelo dinámico.

*Por ajuste. Parámetros ajustados manualmente para obtener el comportamiento deseado en la simulación.

3.2.2 Modelo del Sólido-rígido

El modelo de tres grados de libertad consta de la siguiente forma:

$$m' * [\dot{u}' - v' * r' - x'_g * r'^2] = X' \quad (3-1)$$

$$m' * [\dot{v}' + u' * r' + x'_g * \dot{r}'] = Y' \quad (3-2)$$

$$I'_{zz} * \dot{r}' + m' * x'_g * [\dot{v}' + u' * r'] = N' \quad (3-3)$$

Materializado en Matlab simulink se ve de la siguiente forma.

```

udotprime=(Xprime/mprime)+vprime*rprime+Xgprime*(rprime)^2;
vdotprime=(Yprime/mprime)-(uprime*rprime)-(Xgprime*rdotprime);
rdotprime=(Nprime-(mprime*Xgprime*(vdotprime+(uprime*rprime))))/Izzprime;
%Dimensionando.
udot=udotprime*U^2/Lpp;
vdot=vdotprime*U^2/Lpp;
rdot=rdotprime*U^2/Lpp^2;

```

Figura 30. Calculo del sólido-rígido modelo referencia [33] en Matlab.

3.2.3 Modelo fuerza hidrodinámica.

Calculo de fuerzas actuantes sobre el casco, se trata de modelar el efecto físico del buque donde a más velocidad navegue obtendrá más resistencia del mar. Tiene la siguiente forma.

$$X_{\dot{u}} * \dot{u} - Y_{\dot{v}} * v * r = X_{AM} \quad (3-4)$$

$$Y_{\dot{v}} * \dot{v} + Y_{\dot{r}} * \dot{r} + X_{\dot{u}} * u * r = Y_{AM} \quad (3-5)$$

$$N_{\dot{v}} * \dot{v} + N_{\dot{r}} * \dot{r} = N_{AM} \quad (3-6)$$

Los términos $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$, $Y_{\dot{r}}$, $N_{\dot{v}}$, $N_{\dot{r}}$ corresponden a coeficientes hidrodinámicos particulares para cada buque obtenidos de manera empírica directamente desde campo.

Particularizando en Matlab simulink se ve de la siguiente forma.

```

%Se adimensionan coeficientes.
uprime=u/U;
vprime=v/U;
rprime=(r*Lpp)/U;
udotprime=(udot*Lpp)/(U^2);
vdotprime=(vdot*Lpp)/(U^2);
rdotprime=(rdot*Lpp^2)/(U^2);
%Hidrod coeff Values
Xudotprime=-0.02205; %original -0.02005;
Yvdotprime=-0.000259; %estable -0.002259 %original -0.2259
Yrdotprime=0;
Nvdotprime=0.0320;
Nrdothprime=-0.001057; %estable -0.0001057 %original -0.01057
Xam=(Xudotprime*udotprime)-(Yvdotprime*vprime*rprime);
Yam=(Yvdotprime*vdotprime)+(Yrdotprime*rdotprime)+(Xudotprime*uprime*rprime);
Nam=(Nvdotprime*vdotprime)+(Nrdothprime*rdotprime);

```

Figura 31. Cálculo de las fuerzas hidrodinámicas del modelo referencia [33] en Matlab.

3.2.4 Modelo deslizamiento.

Este es el modelado del efecto físico que produce la fuerza de rozamiento del casco con la superficie del agua.

$$X_{uu} * |u| * u + X_{vr} * v * r = X_{HD} \quad (3-7)$$

$$Y_{|u|v} * |u| * v + Y_{ur} * u * r + Y_{|v|v} * |v| * v + Y_{v|r} * v * |r| + Y_{r|v} * r * |v| = Y_{HD} \quad (3-8)$$

$$N_{|u|v} * |u| * v + N_{|u|r} * |u| * r + N_{r|r} * r * |r| + N_{r|v} * r * |v| = N_{HD} \quad (3-9)$$

Donde: Los términos X_{uu} , X_{vr} , $Y_{|u|v}$, Y_{ur} , $Y_{|v|v}$, $Y_{v|r}$, $Y_{r|v}$, $N_{|u|v}$, $N_{|u|r}$, $N_{r|r}$, $N_{r|v}$ corresponden a más parámetros hidrodinámicos característicos del buque.

Particularizando en Matlab simulink se ve de la siguiente forma.

```

if u ==0
    u=0.00001;
end
U=sqrt((u)^2+v^2); %Módulo de la velocidad dimensionado.
%Xuuprime=-0.002287; %-0.00899;%-0.002287; %Coeficiente de resistencia del casco.
Xvrprime=0.11228;%-0.06228; %original -0.04228;
Yuvprime=0.0001;
Yurprime=0;
Yvvprime=-3.45375;% -4.45375; original -1.05375;
Yvrprime=0;
Yrvprime=-0.0001;
Nuvprime=0.0001;
Nurprime=-0.0003;
Nrrprime=-0.003235;%-0.004135; %best choice -0.003035; %original -0.01835;
Nrvprime=0;
%Xuuprime=-0.008991;
Xhd=(Xuuprime)*uprime*abs(uprime)+(Xvrprime*vprime*rprime);%*uprime*abs(uprime)
Yhd=Yuvprime*abs(uprime)*vprime+Yurprime*uprime*rprime+ ...
    Yvvprime*vprime*abs(vprime)+ Yvrprime*vprime*abs(rprime)+ Yrvprime*rprime*abs(vprime);
Nhd=Nuvprime*abs(uprime)*vprime+Nurprime*abs(uprime)*rprime+Nrrprime*...
    rprime*abs(rprime)+Nrvprime*rprime*abs(vprime);

```

Figura 32. Cálculo de las fuerzas de rozamiento del modelo referencia [33] en Matlab.

3.2.5 Modelo Propulsión.

Se modela el efecto de la fuerza de propulsión o empuje de las hélices sobre el agua. En el caso ESSO OSAKA cuenta con un único eje motor.

El modelado de la fuerza consiste en la siguiente relación:

$$X_P = (1 - t) * \rho * n^2 * D_p^4 * K_T(J_P) \quad (3-10)$$

Donde “t” es el coeficiente de deducción de empuje, interacción del casco y las hélices, el mismo no varía con el movimiento del barco, ρ es la densidad del agua en unidad $[\text{kg}/\text{m}^3]$, n es el número de revoluciones por segundo del eje, D_p es el diámetro de las hélices en metros, J_p es el coeficiente de avance, K_t es una función en este caso de segundo orden que depende del valor del coeficiente de avance.

Para calcular los elementos que faltan serían:

$$J_P = \frac{u_p}{n * D_p} \quad (3-11)$$

$$u_p = u * (1 - w_p) \quad (3-12)$$

$$K_T = a_1 + a_2 * J_P + a_3 * J_P^2 \quad (3-13)$$

Donde K_T es una función en este caso de segundo orden que depende del valor del coeficiente de avance, a_1 , a_2 , a_3 son valores escogidos empíricamente que cambian de valor según la velocidad del eje “n” en revoluciones por segundo, u_p es la velocidad del fluido justamente antes de la hélice, en el modelo se ha tomado esta variable igual al módulo de la velocidad o sea velocidad igual a la del barco en otros puntos.

Realizando el modelo en Matlab simulink se ve de la siguiente forma.

```

up=U;
Jp=up/ (n*Dp) ;
Kt=a1+a2*Jp+a3*Jp^2;
Xp=ThrustDeduction*rho*(n)^2*(Dp)^4*Kt;
%Adimensional.
%Xpprime=Xp;
Xpprime=Xp/ (0.5*rho*U^2*Lpp^2) ;

```

Figura 33. Calculo de la fuerza de propulsión del modelo dinámico.

Para la dinámica de la hélice, se tiene en concreto un valor de 1.98 revoluciones por minuto cada segundo obtenido de [27], de forma desde que se establece la orden del oficial de puente y el sistema tardará un tiempo en alcanzar el valor deseado.

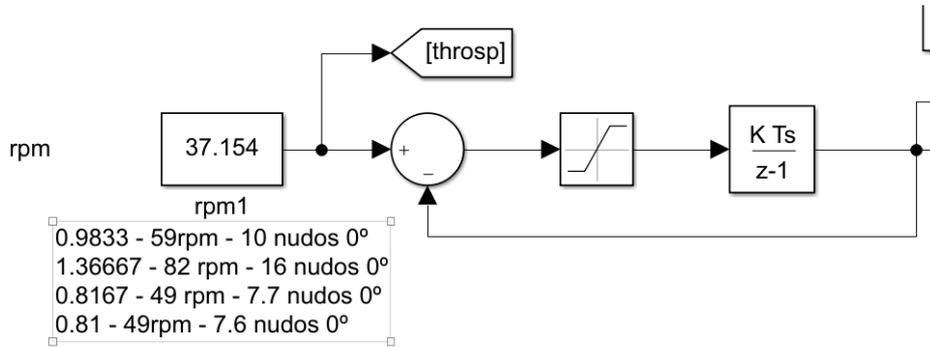


Figura 34. Se muestra la dinámica de la hélice ante un cambio de orden.

3.2.6 Modelo Timón.

El timón ejerce un efecto de resistencia al avance cuando su ángulo de pala es distinto de cero, se modela matemáticamente de la siguiente manera.

$$X_R = -(1 - t_R) * F_N * \text{sen}(d) \quad (3-14)$$

$$Y_R = -(1 + a_h) * F_N * \text{cos}(d) \quad (3-15)$$

$$N_R = -(x_r + a_h * x_h) * F_N * \text{cos}(d) \quad (3-16)$$

Donde: t_R factor de arrastre del timón, F_N es la fuerza normal sobre el timón, δ ángulo del timón en radianes. x_r , a_h y x_h fuerzas de interacción entre hélices timón y casco.

De este modo se calcula la fuerza normal.

$$F_N = \frac{1}{2} * \rho * \frac{6.13 * \text{GeomAspect}}{\text{GeomAspect} + 2.25} * A_R * U_R^2 * \text{sen}(\alpha_R) \quad (3-17)$$

Donde GeomAspect es el aspecto geométrico o relación entre ancho y largo, A_R área proyectada del timón, U_R módulo de la velocidad del flujo de agua de entrada al timón, α_R el ángulo de ataque. (ver figura 34).

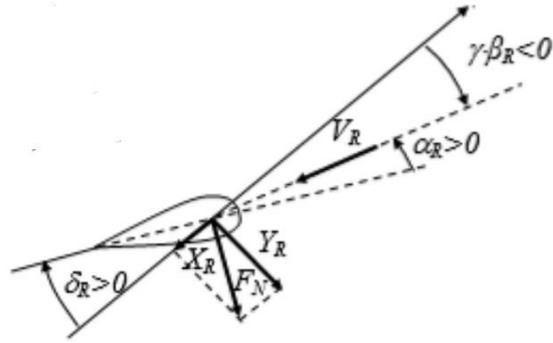


Figura 35. Representación de fuerzas sobre el timón extraído de la referencia [39].

Para calcular U_R y α_R se procede del siguiente modo.

$$u_R = \varepsilon * u_P * \sqrt{\eta * \left(1 + k_{\text{coeff}} * \left(\sqrt{1 + \frac{8 * K_T}{\pi * J_P^2}} - 1\right)\right)^2 + (1 - \eta)} \quad (3-18)$$

$$v_R = \gamma_R * (v + r * l_R) \quad (3-19)$$

$$\eta = \frac{D_P}{hr} \quad (3-20)$$

$$U_R = \sqrt{v_R^2 + u_R^2} \quad (3-21)$$

$$\alpha_R = (d - d_0) - \tan^{-1}\left(\frac{-v_R}{u_R}\right) \quad (3-22)$$

Donde: u_R , v_R , U_R es la velocidad longitudinal, transversal y módulo del fluido entrante en el timón, ε , k_{coeff} y l_R se obtienen como resultado de experimentación, η ratio entre el diámetro de las hélices y la altura del timón, hr altura del timón, γ_R factor de rectitud de flujo de agua por efecto del casco sobre el timón, d_0 ángulo de timón inicial en radianes.

Realizando el modelo para la parte del timón en Matlab simulink se ve de la siguiente forma.

```

ur=Exilon*up*sqrt(Ratio*(1+kcoeff*(sqrt(1+(8*Kt/pi*Jp^2))-1)^2+(1-Ratio));
vr=GammaR*(v+r*lr);
Ur=sqrt(ur^2+vr^2);
alphar=(delta-deltaIni)-(atan(-vr/ur));
Fn=0.5*rho*(6.13*GeomAspect/(GeomAspect+2.25))*Ar*Ur^2*sin(alphar);
%Xr=-Fn*sin(delta);
%Yr=(1+ah)*Fn*cos(delta);
%Nr=-(1+ah)*xr*Fn*cos(delta);
Xr=-(1-tr)*Fn*sin(delta);
Yr=-(1+ah)*Fn*cos(delta);
Nr=-(xr+ah*xh)*Fn*cos(delta);

```

Figura 36. Sección del código en Matlab para la parte de las fuerzas actuantes en el timón.

En este apartado también se expone como se ha modelado en Matlab simulink la dinámica del timón, es decir, el tiempo de respuesta desde que el alumno gira el timón en el puente de mando hasta que el mismo llega a la consigna marcada.

La respuesta no será instantánea, se tiene una respuesta aproximada de 3 grados de timón por segundo dato recogido de la referencia [40].

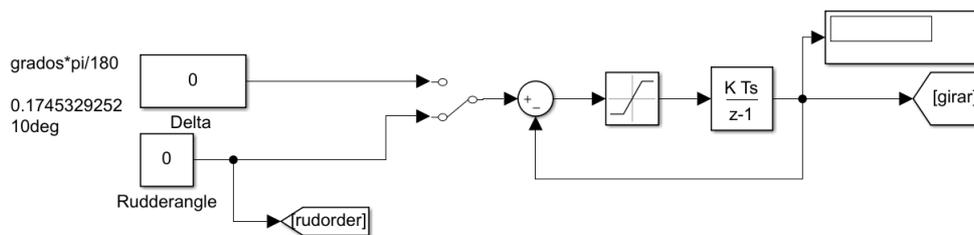


Figura 37. En esta sección se tiene el valor de la consigna del timón a la izquierda, un saturador +/-3 grados segundo y un integrador para alcanzar la consigna deseada.

3.3 Modelo matemático BAC Cantabria.

El modelo dinámico que se describe en el presente apartado, ha sido obtenido de las referencias [12] y [37], el buque real corresponde al grupo de buques marineros, pretende ser utilizado en el simulador, para simular un segundo barco real cuyos movimientos en el mapa serán aleatorios dependiendo del ejercicio sin que el alumno instruido pueda efectuar ningún tipo de acción sobre el mismo. De este modo, el modelo ha sido seleccionado del materializado por el autor de la referencia [37] y ha sido modificado e integrado de acuerdo a las necesidades del presente trabajo, por lo que no se describirá en principio con el mismo detalle que el modelo anterior pero si describiendo cada una de sus partes.

3.3.1 Datos reales del buque BAC Cantabria.

Para obtener los parámetros reales del buque BAC Cantabria A-15 se ha hecho una asimilación a un buque de dimensiones muy parecidas como está recogido en las referencias [12], [37] y [15] de clase buque mariner "Mariner vessel". Se recogen en la siguiente tabla.

Parámetro	Valor	Descripción	Unidad	Referencia
∇	18541	Desplazamiento	m^3	[12]

ρ	1000	Densidad agua salada	$\frac{kg}{m^3}$	[37]
L_{PP}	160.93	Distancia entre perpendiculares	m	[12]
<i>Manga</i>	23.17	Ancho del barco	m	[12]
T	8.23	Calado medio	m	[12]
Al	1356.576	Area transversal fuera del agua	m^2	[37]
At	501.384	Area lateral fuera del agua	m^2	[37]
m'	$798 \cdot 10^{-5}$	Masa adimensionada del buque	-	[12]
x'_g	-0.023	Distancia al eje de coordenadas adimensionado	-	[12]
I'_{zz}	$39.2 \cdot 10^{-5}$	Inercia respecto del eje vertical z	-	[12]
PROPULSION				
Dp	6.706	Diametro de la hélice	m	[15]
K0	1.32	Valor 1 escogido empíricamente	-	[37]
K1	0.14	Valor 2 escogido empíricamente	-	[37]
TIMÓN				
tr	1	Coefficiente por interacción entre casco, timón y hélices	-	[37]
GeomAspect	1.88	Relación aspecto geometrico del timón	-	[15]
Ar	30.012	Area del timón proyectada	m^2	[15]
kcoeff	0.5	Constante determinada por experimentos	-	[37]
ah	0.25	Coefficiente por interacción entre casco, timón y hélices	-	[41]
xr	80.465	Coefficiente por interacción entre casco, timón y hélices	-	[37]
PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS				
$X'_{\dot{u}}$	$-42 \cdot 10^{-5}$	-	-	Por Ajuste
$Y'_{\dot{v}}$	$-748 \cdot 10^{-5}$	-	-	Por Ajuste
$Y'_{\dot{r}}$	$-9.354 \cdot 10^{-5}$	-	-	Por Ajuste

$N'_{\dot{v}}$	$4.646*10^{-5}$	-	-	Por Ajuste
$N'_{\dot{r}}$	$-43.8*10^{-5}$	-	-	Por Ajuste
X'_{u}	$-184*10^{-5}$	-	-	[12]
X'_{uu}	$-110*10^{-5}$	-	-	[12]
X'_{uuu}	$-215*10^{-5}$	-	-	[12]
X'_{vv}	$-899*10^{-5}$	-	-	[12]
X'_{rr}	$18*10^{-5}$	-	-	[12]
X'_{rv}	$798*10^{-5}$	-	-	[12]
Y'_{v}	$-1160*10^{-5}$	-	-	[12]
Y'_{r}	$-499*10^{-5}$	-	-	[12]
Y'_{vvv}	$-8078*10^{-5}$	-	-	[12]
Y'_{vvr}	$15356*10^{-5}$	-	-	[12]
Y'_{vu}	$-1160*10^{-5}$	-	-	[12]
Y'_{ru}	$-499*10^{-5}$	-	-	[12]
N'_{v}	$-264*10^{-5}$	-	-	[12]
N'_{r}	$-166*10^{-5}$	-	-	[12]
N'_{vvv}	$1636*10^{-5}$	-	-	[12]
N'_{vvr}	$-5483*10^{-5}$	-	-	[12]
N'_{vu}	$-264*10^{-5}$	-	-	[12]
N'_{ru}	$-166*10^{-5}$	-	-	[12]

Tabla 3. Resumen de datos reales del buque BAC CANTABRIA para el segundo buque.

*Por ajuste. Parámetros ajustados manualmente para obtener el comportamiento deseado en la simulación.

3.3.2 Modelo del Sólido-rígido y fuerzas hidrodinámicas.

El modelo del sólido-rígido de tres grados de libertad se compone de las siguientes relaciones.

$$X' = (m' - X'_{\dot{u}}) * \dot{u}' \quad (3-23)$$

$$Y' = (m' - Y'_{\dot{v}}) * \dot{v}' + (m' * x'_{g} - Y'_{\dot{r}}) * \dot{r}' \quad (3-24)$$

$$N' = (m' * x'_{g} - N'_{\dot{v}}) * \dot{v}' + (I'_{zz} - N'_{\dot{r}}) * \dot{r}' \quad (3-25)$$

Al despejar $\dot{u}', \dot{v}', \dot{r}'$ según la referencia [12] se obtienen las siguientes relaciones reflejadas en Matlab.

```

% Masses and moments of inertia
m11 = m-Xudot;
m22 = m-Yvdot;
m23 = m*xG(1)-Yrdot;
m32 = m*xG(1)-Nvdot;
m33 = Iz-Nrdot;

% Dimensional state derivative
detM22 = m22*m33-m23*m32;

xdot = [
          X*(U^2/L)/m11
        -(-m33*Y+m23*N)*(U^2/L)/detM22
          (-m32*Y+m22*N)*(U^2/L^2)/detM22
          0
          0
          0
          delta_dot
];

```

Figura 38. Obtención de las aceleraciones a partir de las ecuaciones del sólido-rígido.

Para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas se tiene la siguiente relación:

$$X'_{AM} = X'_u * u' + X'_{uu} * u'^2 + X'_{uuu} * u'^3 + X'_{vv} * v'^2 + X'_{rr} * r'^2 + X'_{rv} * r' * v' \quad (3-26)$$

$$Y'_{AM} = Y'_v * v' + Y'_r * r' + Y'_{vvv} * v'^3 + X'_{vvr} * v'^2 * r' + X'_{vu} * v' * u' + Y'_{ru} * r' * u' \quad (3-27)$$

$$N'_{AM} = N'_v * v' + N'_r * r' + N'_{vvv} * v'^3 + N'_{vvr} * v'^2 * r' + N'_{vu} * v' * u' + N'_{ru} * r' * u' \quad (3-28)$$

En Matlab se refleja del siguiente modo.

```

% Forces and moments
X = Xu*u + Xuu*u^2 + Xuuu*u^3 + Xvv*v^2 + Xrr*r^2 + Xrv*r*v + Xdd*delta^2 + ...
  Xudd*u*delta^2 + Xvd*v*delta + Xuvd*u*v*delta;

Y = Yv*v + Yr*r + Yvvv*v^3 + Yvvr*v^2*r + Yvu*v*u + Yru*r*u;
% + Yd*delta + ...
%   Yddd*delta^3 + Yud*u*delta + Yuud*u^2*delta + Yvdd*v*delta^2 + ...
%   Yvvd*v^2*delta;
% + (Y0 + Y0u*u + Y0uu*u^2);

N = Nv*v + Nr*r + Nvvv*v^3 + Nvvr*v^2*r + Nvu*v*u + Nru*r*u + Nd*delta + ...
  Nddd*delta^3 + Nud*u*delta + Nuud*u^2*delta + Nvdd*v*delta^2 + ...
  Nvvd*v^2*delta;
% + (N0 + N0u*u + N0uu*u^2);

```

Figura 39. Cálculo de fuerzas hidrodinámicas del modelo BAC Cantabria.

3.3.3 Modelo Timón.

Para el cálculo de las fuerzas del modelo del timón del segundo buque, se recurrió a la misma forma del modelo ESSO OSAKA con las ecuaciones 3-14 a la 3-16. Pero el cálculo de los parámetros de estas ecuaciones como a_h y F_N atienden a relaciones distintas obtenidas según las referencias [37] y [41].

El parámetro " a_h " fué obtenido a partir de una expresión dependiente del coeficiente de bloque C_B [41].

El coeficiente de bloque es la relación entre el volumen ocupado por la superficie viva del buque y un paralelepípedo imaginario circunscrito a esta (ver figura 40). Dicho paralelepípedo tiene como dimensiones la

manga, la eslora y el calado, El coeficiente de bloque tiene una incidencia muy grande sobre la resistencia a la marcha y sobre la capacidad de carga, y, en menor medida, sobre la estabilidad, maniobrabilidad y otras consideraciones [37].

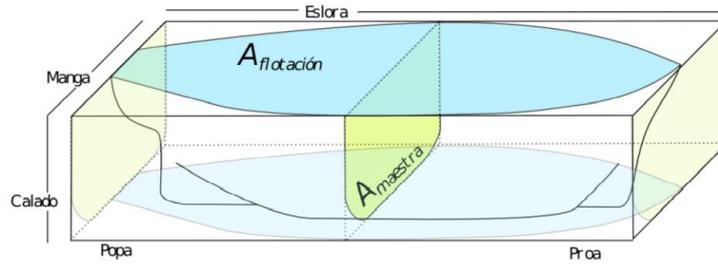


Figura 40. Sección de agua viva del buque y dimensiones del paralelepípedo [42].

El resultado obtenido en el cálculo para el BAC Cantabria fue de $C_B = 0.6110$. Con este dato según la referencia [41] se obtiene un valor de $\alpha_h = 0.25$ mediante la relación que se muestra en la figura 41.

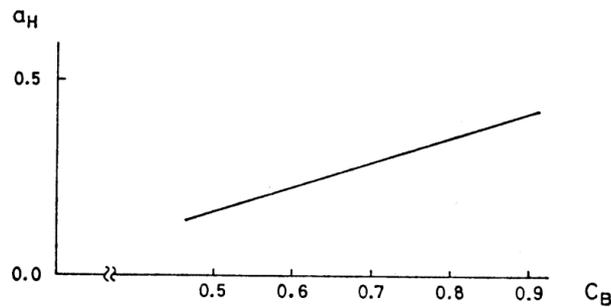


Figura 41. Relación entre C_B y α_h recogida en [41]

Para el cálculo de la fuerza normal F_N se utiliza igualmente la ecuación 3-17 pero se difiere en el cálculo de sus elementos U_R y α_R que son los siguientes.

$$U_R = \sqrt{v_R^2 + u_R^2} \quad (3-29)$$

$$\alpha_R = \delta - \tan^{-1}\left(\frac{v_R}{u_R}\right) \quad (3-30)$$

Se muestra en las siguientes imágenes el código de Matlab que refleja estas relaciones.

```

4 - Fn=0.5*p*((6.13*lambda)/(lambda+2.25))*Ar*Vr^2*sin(alpha_r);
5 - Xr=-Fn*sin(delta);
6 - Yr=(1+Ah)*Fn*cos(delta);
7 - Nr=-(1+Ah)*xr*Fn*cos(delta);

```

Figura 42. Cálculos de las fuerzas actuantes producidas por el timón.

```

4 - Vr=ur+Ku*sqrt(((8*Tp)/(pi*p*D^2))+ur^2)-ur;

```

Figura 43. Cálculo del módulo del fluido entrante en el timón.

$$6 - \quad \alpha_r = \delta - \text{atan2}(v, V_r);$$

Figura 44. Cálculo del ángulo de ataque del fluido en el timón.

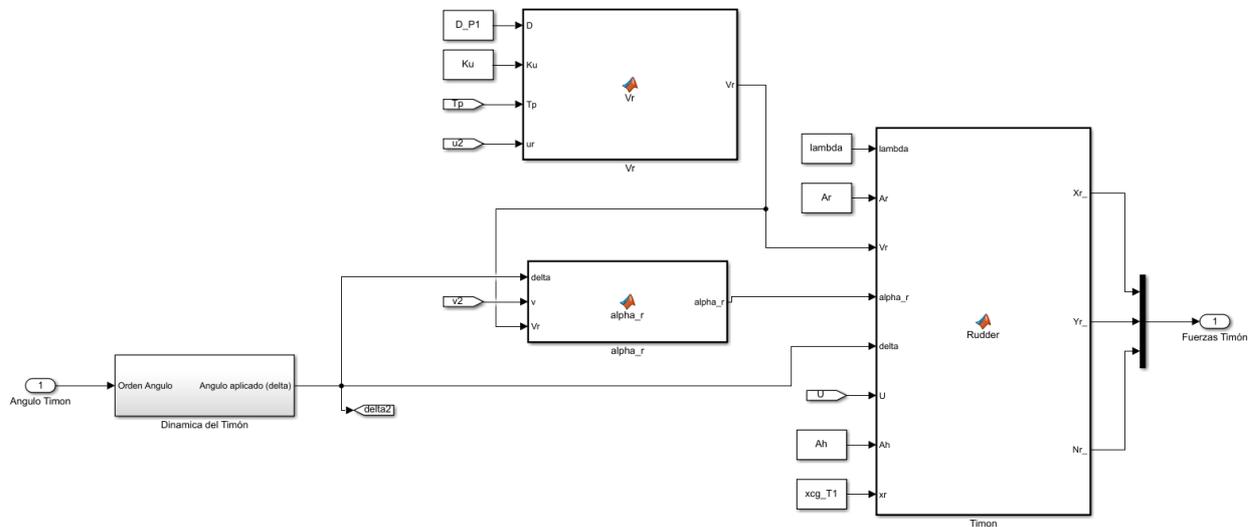


Figura 45. Modelo completo del timón extraído de la referencia [37].

3.3.4 Modelo Propulsión.

Para el cálculo de la fuerza de propulsión se recurre a la siguiente relación 2-11.

$$T = \rho * d^4 * K_T(J_P) * |n| * n \quad (3-31)$$

Donde J_P es la relación de avance representada en la ecuación 2-12 y $K_T(J_P)$ atiende a la siguiente relación.

$$K_T = K_0 + K_1 * J_P \quad (3-32)$$

Se ajustan los valores de K_0, K_1 para ajustar las revoluciones por minuto a la velocidad de 15 nudos según la referencia [15].

Se muestra la sección indicada en matlab.

```

17 -   if abs(n) <= 0.001
18 -       Tp = 0;
19 -   else
20 -       J = Va / (n * D);
21 -       Kt = K0 + K1 * J;
22 -       Tp = Kt * p * D^4 * n * abs(n);
23 -   end

```

Figura 46. Cálculo de la fuerza de propulsión para el segundo buque de la referencia [37].

3.4 Modelo condiciones medioambientales.

Los modelos para simular las condiciones ambientales son comunes a los dos buques, para que el efecto de las condiciones medioambientales en cada escena afecte a los dos buques del mismo modo (ESSO OSAKA y BAC Cantabria) dependiendo de sus características físicas. De este modo, se calculan fuerzas adicionales en el sumatorio de fuerzas actuantes sobre cada buque.

3.4.1 Modelo de la corriente marina.

Para este modelo se procedió a plasmar las ecuaciones que se muestran en el punto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se obtiéndose la vista general siguiente.

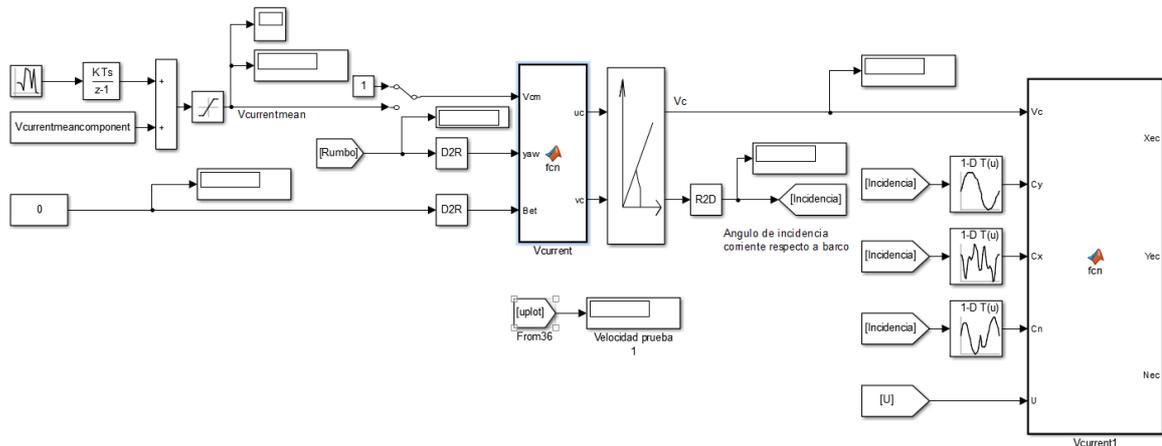


Figura 47. Vista completa del modelo de la corriente para los dos buques presentes en los escenarios.

Para la obtención de coeficientes $C_x(Dir_c)$, $C_y(Dir_c)$, $C_n(Dir_c)$ los coeficientes longitudinal, transversal y normal dependientes del ángulo de incidencia en grados de la corriente referida al barco, se ha obtenido, tras una profunda búsqueda, por las curvas experimentales genéricas para petroleros VLCC del documento [43], [44] y [45].

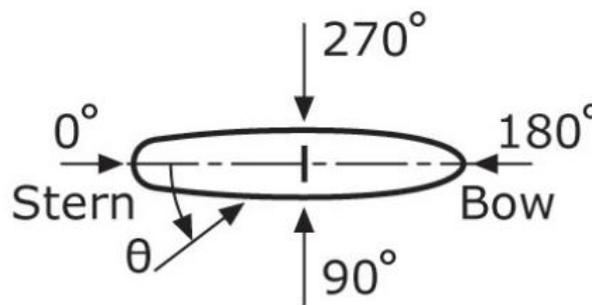


Figura 48. Ángulo de incidencia de la dirección de la corriente respecto al barco obtenida de [43].

El valor de los coeficientes variará en un rango de 0 a 360, aunque a partir de 180 en adelante los valores simplemente serán de signo opuesto a los representados por el rango de 0 a 180, es decir, las curvas serán simétricas de forma opuesta.

Para seleccionar la curva adecuada hay que tener en cuenta la relación de profundidad a la que está el barco respecto su calado esto es h/T . También se tiene en cuenta que ESSO OSAKA tiene un bulbo de proa convencional y el barco está cargado con 278 DWT. (ver figuras 49-51).

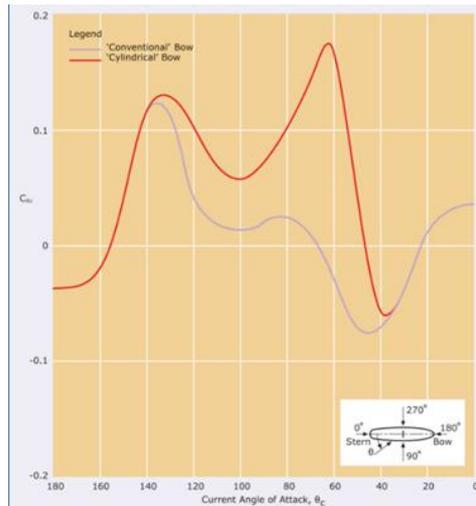


Figura 49. Curva para la obtención de $C_x(Dir_c)$ para una relación de profundidad de h/T igual a 1.5 obtenida de [43].

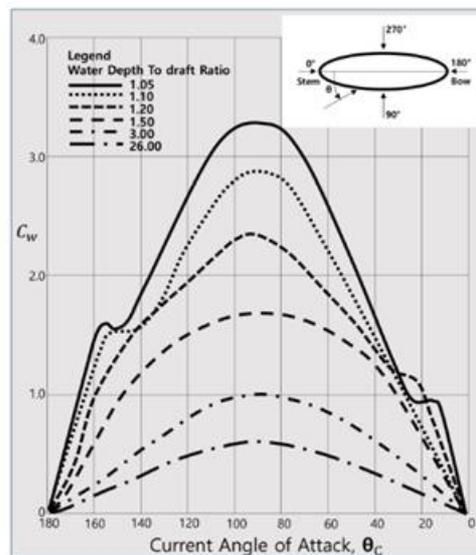


Figura 50. Curva para la obtención de $C_y(Dir_c)$ para una relación de profundidad de h/T igual a 1.5 obtenida de [44].

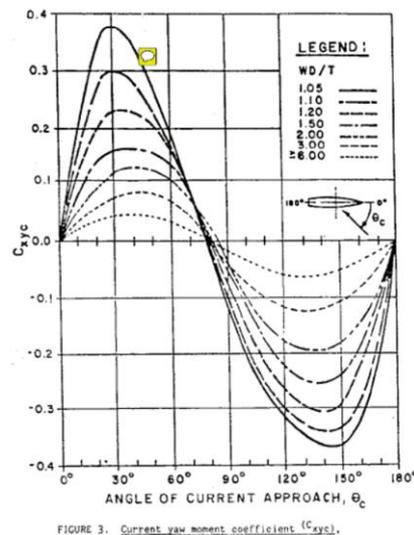


FIGURE 3. Current yaw moment coefficient (C_{nyc}).

Figura 51. Curva para la obtención de $C_n(Dir_c)$ para una relación de profundidad de h/T igual a 1.5 obtenida de [45].

Se materializa en Matlab de la siguiente forma.

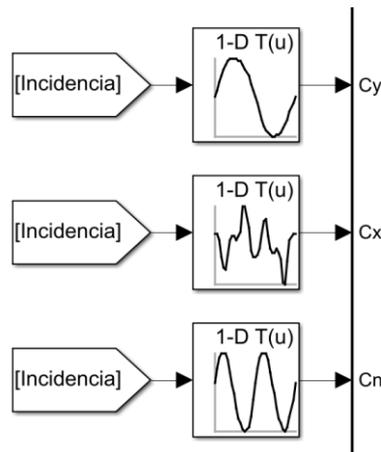


Figura 52. Cálculo de los coeficientes mediante tablas de la verdad dependiendo del ángulo de incidencia.

El cálculo de fuerzas de la corriente en Matlab es el siguiente.

```
function [Xec, Yec, Nec] = fcn (Vc, Cy, Cx, Cn, rho, Lpp, T, U)
Xec=0.5*Cx*rho*Vc*Vc*Lpp*T;
Yec=0.5*Cy*rho*Vc*Vc*Lpp*T;
Nec=0.5*Cn*rho*Vc*Vc*Lpp*Lpp*T;
Xec=Xec/ (0.5*rho*U^2*Lpp^2);
Yec=Yec/ (0.5*rho*U^2*Lpp^2);
Nec=Nec/ (0.5*rho*U^2*Lpp^3);
```

Figura 53. Cálculo de las fuerzas de la corriente actuantes en el casco del barco en Matlab.

3.4.2 Modelo del efecto del viento sobre el buque.

Para este modelo se procedió, siguiendo la dinámica explicativa de la corriente, plasmar las ecuaciones que se muestran en el punto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se obtiene la vista general siguiente, dividida las imágenes en 3 debido a sus dimensiones. (ver figuras 54-56).

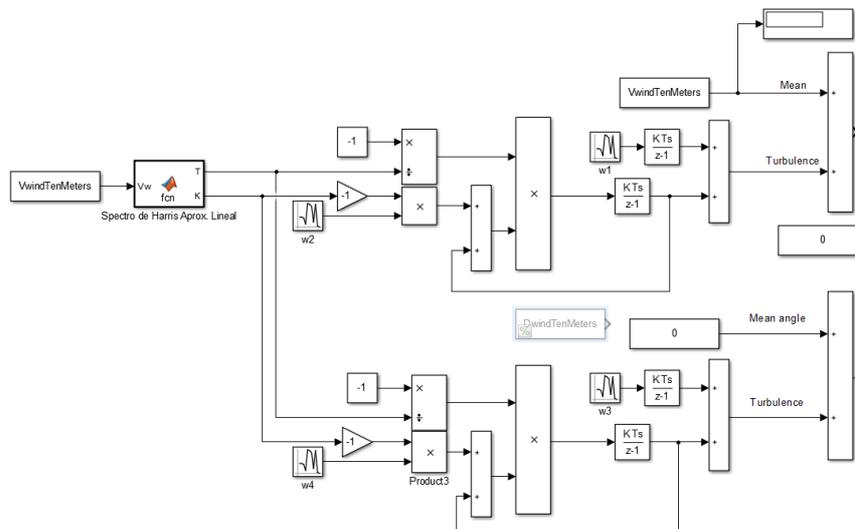


Figura 54. Cálculo en Matlab de las variables V_w velocidad y ϕ_w dirección del viento.

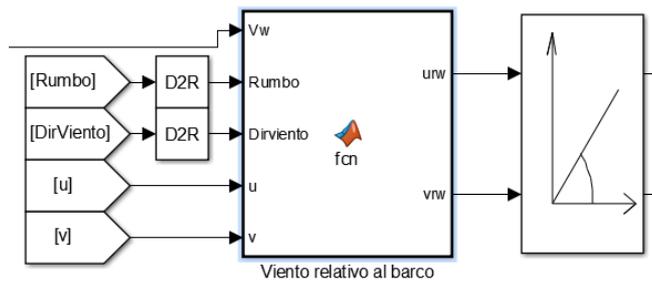


Figura 55. Cálculo de la velocidad y ángulo de la velocidad relativa respecto ejes barco en Matlab.

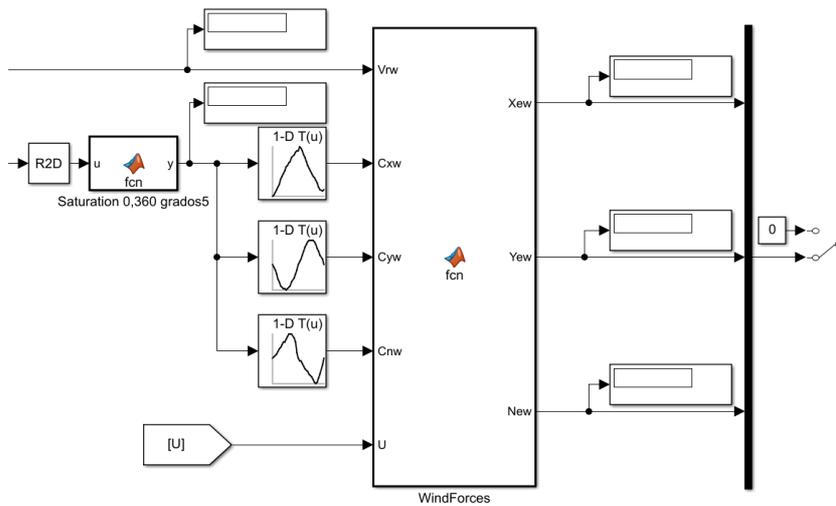


Figura 56. Cálculo de las fuerzas que ejerce el viento sobre el buque en matlab.

Para la obtención de coeficientes $C_{wx}(\gamma_{rw})$, $C_{wy}(\gamma_{rw})$, $C_{wn}(\gamma_{rw})$ los coeficientes longitudinal, transversal y normal dependientes del ángulo de incidencia en grados de la dirección relativa del viento referido al barco " γ_{rw} ". Se encuentran las siguientes curvas reales obtenidas de la referencia [12].

Para seleccionar la curva correcta entre las tres que se muestran en la figura 57, se tiene que el barco petrolero VLC Esso Osaka con 270000 toneladas de carga peso muerto sin contar el peso del buque con lo que el buque estaría totalmente cargado "fully loaded tanker". Y también se cuenta, como se ha comentado, con un bulbo de proa convencional "conventional bow".

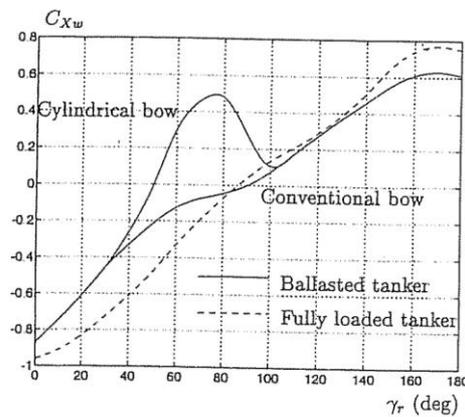


Figura 57. Curva experimental para la obtención de $C_{wx}(\gamma_{rw})$ obtenida de [12].

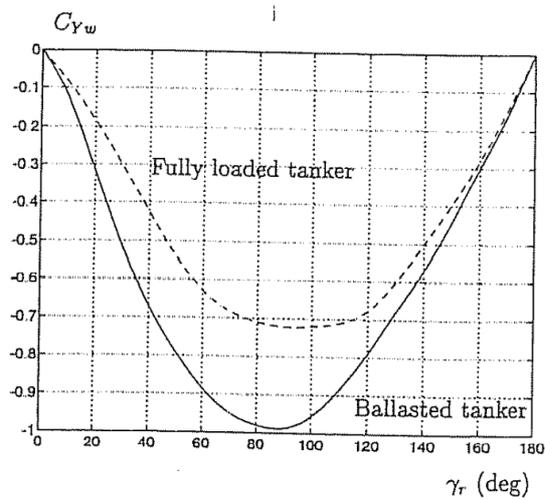


Figura 58. Curva experimental para la obtención de $C_{wy}(\gamma_{rw})$ obtenida de [12].

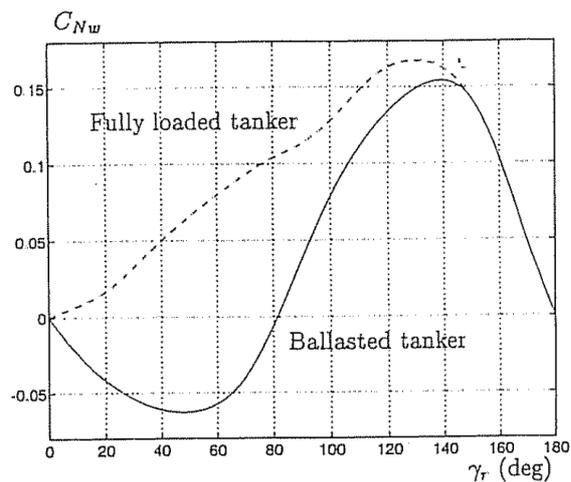


Figura 59. Curva experimental para la obtención de $C_{wn}(\gamma_{rw})$ obtenida de [12].

El cálculo de fuerzas del viento sobre el buque en Matlab es el siguiente.

```
Xew=0.5*Cxw*rhoaire*Vrw*Vrw*At;
Yew=0.5*Cyw*rhoaire*Vrw*Vrw*Al;
New=0.5*Cnw*rhoaire*Vrw*Vrw*Al*Lpp;
%Adimensionar antes de sacar fuerzas.
Xew=Xew/(0.5*rho*U^2*Lpp^2);
Yew=Yew/(0.5*rho*U^2*Lpp^2);
New=New/(0.5*rho*U^2*Lpp^3);
```

Figura 60. Cálculo de fuerzas del viento actuantes sobre el buque.

3.4.3 Modelo del efecto de las olas.

Para materializar este modelo se realizaron los pasos que contiene el punto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Como referencias destacables se tomaron [12] y [46]. Así se llega a la siguiente configuración general en Matlab. (ver figura 61).

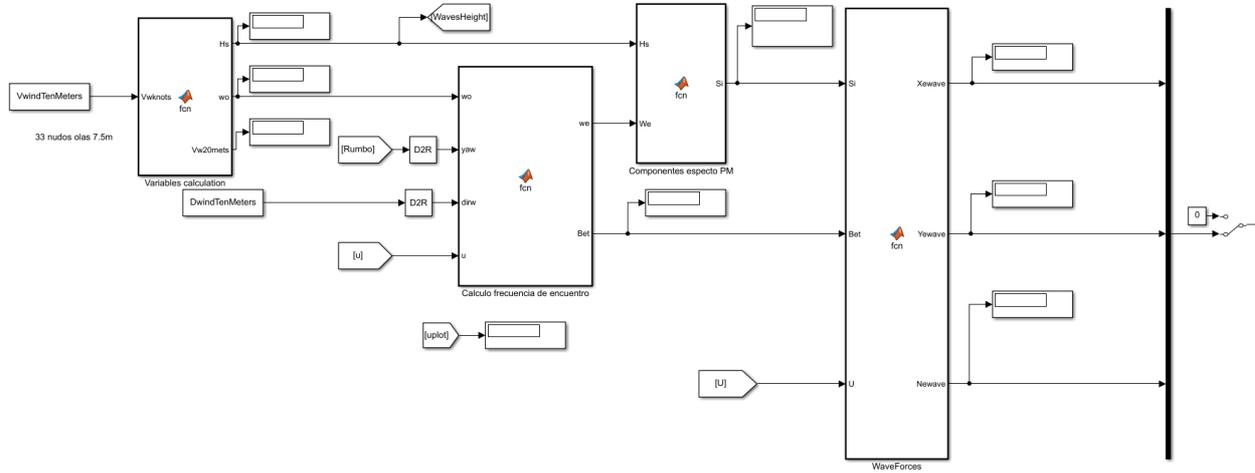


Figura 61. Modelo completo del efecto de la fuerza de las olas sobre el casco del buque en Matlab-simulink. Para calcular la fuerza actuante sobre el casco del barco se usan las ecuaciones 2-41, 2-42 y 3-43, en Matlab se presentan del siguiente modo (ver figura 62).

```

%Número de armónicos de la ola.
N=50;
%Dimensionado vector de fuerzas de armónicos.
Xwave=zeros(1,50);
Ywave=zeros(1,50);
Nwave=zeros(1,50);
for i=1:N
    Xwave(i)=rho*g*Breadth*Lpp*T*cos(Bet)*Si(i);
    Ywave(i)=-rho*g*Breadth*Lpp*T*sin(Bet)*Si(i);
    Nwave(i)=(1/24)*rho*g*Breadth*Lpp*(Lpp^2-Breadth^2)*sin(2*Bet)*Si(i)^2;
end
Xewave=sum(Xwave);
Yewave=sum(Ywave);
Newave=sum(Nwave);
%Adimensionalización de fuerzas de la ola.
Xewave=Xewave/(0.5*rho*U^2*Lpp^2);
Yewave=Yewave/(0.5*rho*U^2*Lpp^2);
Newave=Newave/(0.5*rho*U^2*Lpp^3);

```

Figura 62. Cálculo del sumatorio de fuerzas de cada uno de los armónicos de las olas actuantes sobre el buque en Matlab.

Para el cálculo de la elevación de las olas $S_i(t)$ (ecuación 2-44) y sus armónicos según el espectro de densidad de Pierson- Moskovit. Se supone siempre que existe un desfase $\Phi=0$. Se realiza la creación de un vector donde se guardan cada una de las 50 elevaciones (ver figura 63), para luego realizar un sumatorio con ella como se aprecia en la figura anterior (figura 62).

```

%Calculo de parametros Pierson-Moskovit (PM) del espectro de ola.
A=3.11/(Hs^2);
B=8.1e-3*(g)^2;
%Número de iteraciones para cálculo de vector de elevación de ola.
N=50;
%Dimensionado vector elevaciones de ola.
Si=zeros(1,50);
for i=1:N
    %Formula espectro PM
    Sw=A*w(i)*1e-5*exp(-B*w(i)*1e-4);
    %Amplitud.
    Ai=sqrt(2*Sw*IncWo);
    %Número de onda.
    Ki=w(i)^2/g;
    %Calculo de la elevación de la ola respecto z0=0
    Si(i)=Ai*Ki*sin(We+Phi);
end
if Hs==0
    Si=zeros(1,50);
end

```

Figura 63. Cálculo del vector de elevaciones de cada armónico según PM en matlab.

```

%Muestra de 50 Frecuencias seleccionadas dentro del rango [0,1] rad/s.
w=[0.314 0.328 0.342 0.356 0.3700 0.3840 0.3980 0.4120 0.4260 0.4400 ...
    0.4540 0.4680 0.4820 0.4960 0.5100 0.5240 0.5380 0.5520 0.5660 0.5800 ...
    0.5940 0.6080 0.6220 0.6360 0.6500 0.6640 0.6780 0.6920 0.7060 0.7200 ...
    0.7340 0.7480 0.7620 0.7760 0.7900 0.8040 0.8180 0.8320 0.8460 0.8600 ...
    0.8740 0.8880 0.9020 0.9160 0.9300 0.9440 0.9580 0.9720 0.9860 1.0000];
IncWo=0.014; %intervalo de frecuencia.

```

Figura 64. Se muestra captura de las frecuencias del espectro PM seleccionadas dentro del rango [0,1] rad/s y el intervalo entre ellas.

Lo que faltaría por presentar es el cálculo de la frecuencia de encuentro presentada en la ecuación 2-36 (ver figura 65) y además parte importante lo que es el cálculo de la altura de la ola que determinará el valor de la frecuencia de pico del espectro PM (ver figuras 66 y 20).

```

function [we,Bet] = fcn(wo,g,yaw,dirw,u)
%calculo ángulo de encuentro.
Bet=yaw-dirw;
we=abs(wo-(wo^2/g)*u*cos(Bet));

```

Figura 65. Cálculo de la frecuencia de encuentro en Matlab.

```

function [Hs,wo,Vw20mets] = fcn(Vwknots,g)
%Cálculo velocidad de viento a 20 metros sobre el nivel del mar.
Vw20mets=(Vwknots*0.51444)*(19.8/10)^0.1429;
%Calculo altura de la ola.
Hs=(Vw20mets^2/g)*0.21;
%Frecuencia modal o de pico para el espectro de Pierson-Moskowitz.
wo=0.4*sqrt(g/Hs);

```

Figura 66. Cálculo de la altura de la ola y frecuencia máxima según la misma en Matlab.

3.5 Desarrollo pruebas de mar.

Para demostrar la fiabilidad y calidad de los modelos se desarrollan una serie de pruebas con las mismas condiciones reales y se comparan con los resultados obtenidos en las curvas reales.

3.5.1 Curvas experimentales reales de los buques.

Se hace una exhaustiva búsqueda en la bibliografía sobre pruebas reales de buques. Pruebas similares a las descritas en el punto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se escogen como referencias de pruebas reales del buque Esso Osaka la [36]. En la siguiente imagen se muestran a la derecha la trayectoria del buque en la prueba de donde se extraen los parámetros importantes en metros y a la derecha se muestra la velocidad que alcanza el buque en la prueba.

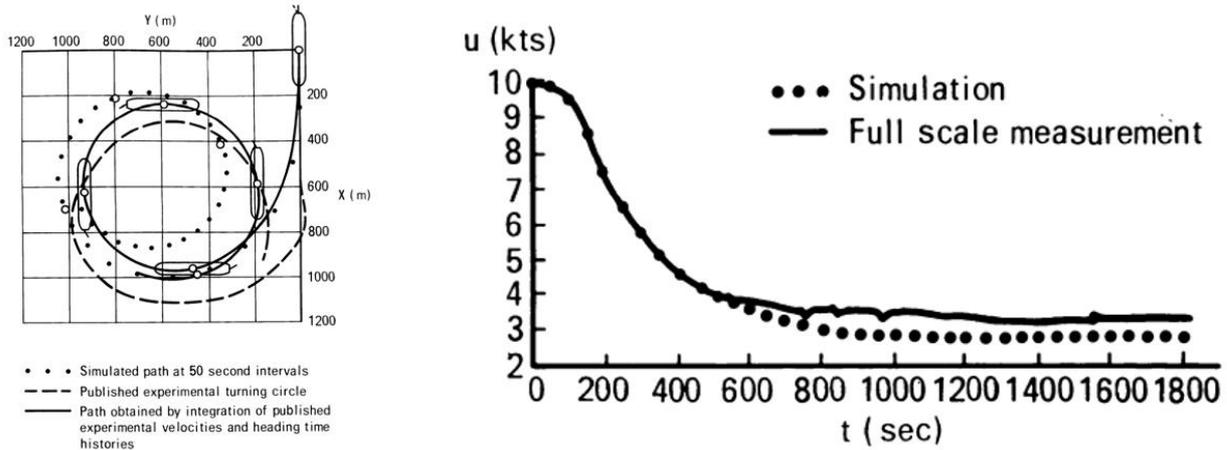


Figura 67. Esso Osaka: Círculo táctico en aguas profundas (timón 35° a estribor, u=10 nudos).

En la siguiente figura aparece un resumen de los parámetros medidos en la figura 67. No se especifica la profundidad a la que se encuentra el buque.

	7.7 knots (not defined depth)	10 knots (not defined depth)
D _{tactico}	1010	940
avance	960	980
transfer	520	480

Figura 68. Resumen de parámetros destacables de la prueba a dos velocidades distintas: 10 nudos y 7.7 nudos.

Otro dato de navegación interesante es la velocidad de crucero o velocidad de diseño, es decir, la máxima velocidad que el barco es capaz de alcanzar en línea recta. Se obtiene este dato para el Esso Osaka de las referencias [12], [26] y [36], en concreto se refleja que el buque alcanza los 16 nudos.

En el caso del buque segundo que aparece del mapa, la referencia fue [15], se aprecia en la figura la gráfica de la que se extraen los datos. Su velocidad de crucero son 15 nudos.

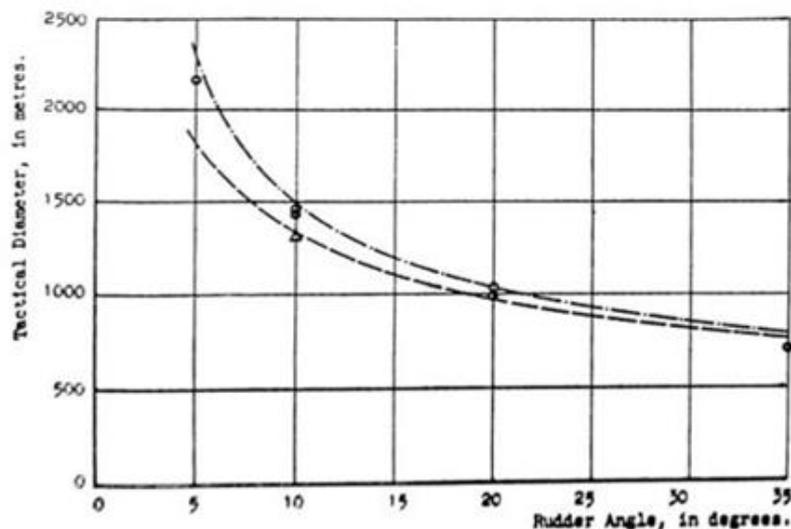


Figura 69. Comparación de círculo táctico de una prueba a escala real y predicción de modelo a 15 nudos.

3.5.2 Actuaciones en el modelo para el desarrollo de las pruebas de mar.

Para realizar estas pruebas en los modelos se ha realizado la siguiente programación en Matlab.

En primer lugar, se pone la propulsión a máxima potencia, para ello, se deberá dar la orden a las hélices en revoluciones por minuto, según la referencia [36] a través de la figura que se muestra a continuación (figura 70), para alcanzar los 16 nudos las RPM a las que se tiene que poner el eje son los 82 revoluciones por minuto. Esto se refleja en la siguiente figura 71.

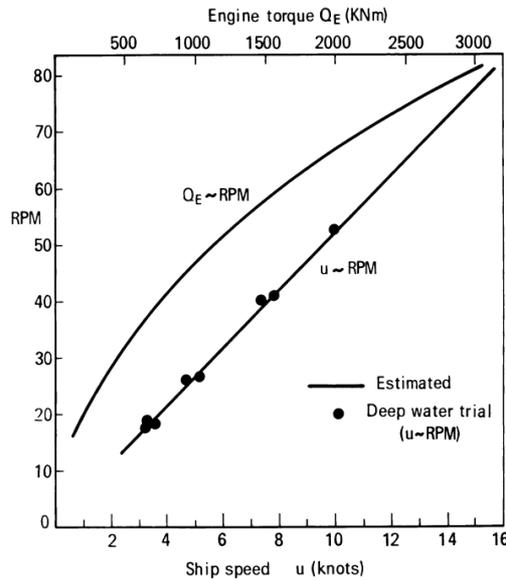


Figura 70. Esso Osaka: Torque del motor, RPM y velocidad del buque relación.

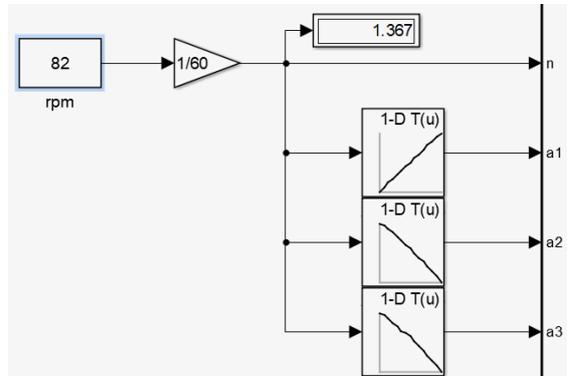


Figura 71. Introducción de la orden en revoluciones por minuto para las hélices en Matlab.

Para la orden de timón en grados se realiza la siguiente actuación en Matlab, también se aprecia la medida de como va variando en el modelo la velocidad longitudinal del buque en nudos y sistema de coordenadas ejes tierra.

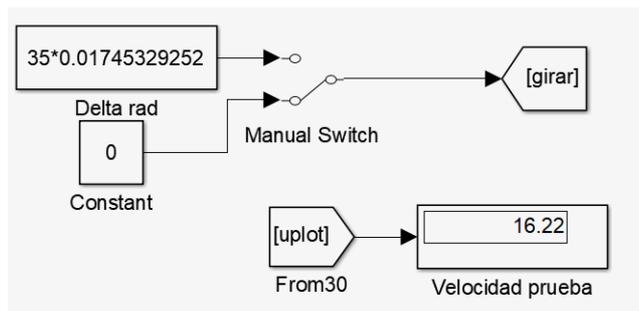


Figura 72. Introducción de la orden en grados para el timón en Matlab.

Para las mediciones de la prueba se ha creado una función que permite obtener a partir de la posición del barco respecto a tierra, el rumbo y el grado de timón, las mediciones descritas en el punto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

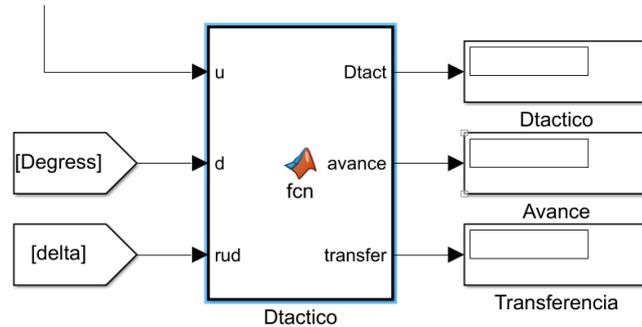


Figura 73. Función que arroja las medidas de las pruebas de mar de cada modelo.

Dentro de la función, se tiene el siguiente código que complementa la secuencia de prueba del modelo que se explica a continuación.

```

1 function [Dtact,avance,transfer] = fcn(u,d,rud)
2 persistent D av T offsetinilong state
3 if isempty(D)
4     D=0;
5     av=0;
6     T=0;
7     offsetinilong=0;
8     state=0;
9 end
10 if rud~=0 && state == 0
11     offsetinilong=u(1);
12     state =1;
13 end
14 %mod=sqrt(u(1)^2+u(2)^2);
15 if d>89.8 && d<90.2
16     av=u(1)-offsetinilong;
17     T=u(2);
18 end
19 if d>179.8 && d<180.2
20     D=u(2);
21 end
22 avance=av;
23 Dtact=D;
24 transfer=T;

```

Figura 74. Código para obtener las mediciones de pruebas de mar.

La secuencia de la prueba es la siguiente: Las condiciones iniciales son “0 grados” de timón, máxima potencia en la propulsión “82 RPM”. De manera que se dejará el sistema transcurrir hasta que el buque alcanza la velocidad de prueba “10 nudos”, tal cuál se muestra en la figura 67. En ese momento, se comanda la orden de timón a “35 grados” a estribor, de este modo se espera hasta que el buque realice el giro completo. Las medidas se irán arrojando en los displays que aparecen en la figura 73.

La misma operación se realizará para orden de timón a -35 grados a babor.

3.6 Visualización de escena.

Para visualizar el escenario donde el oficial de puente en pruebas moverá el buque y realizará sus maniobras COLREG, se crea una figura “plot” de Matlab Simulink 2-D donde se verá el comportamiento real y como se mueve el buque. El eje vertical del plot será el X y el horizontal el Y ambos escalados en metros. (Ver figura 75).

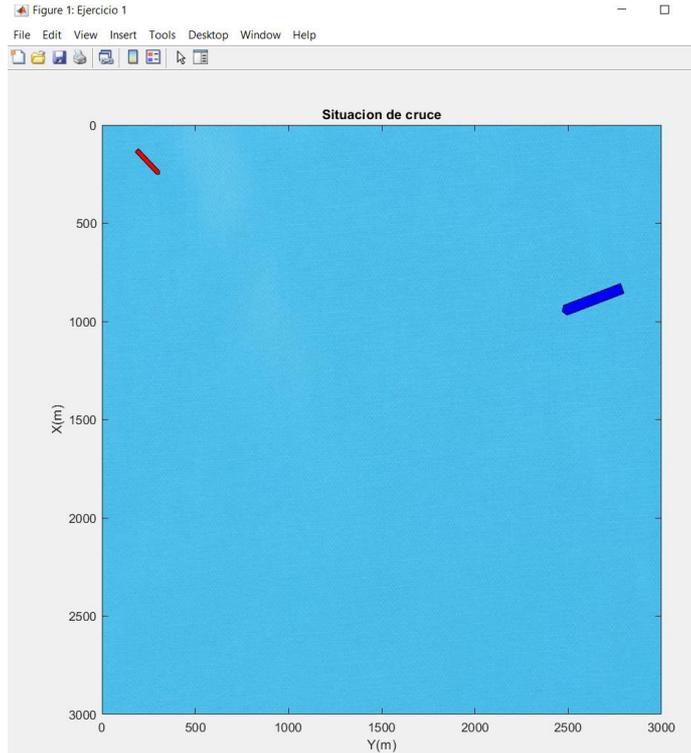


Figura 75. Plot 2-D donde se visualiza el escenario del simulador COLREG.

La programación de esta visualización la comprenden los siguientes elementos.

El primer paso es convertir la posición de ejes barco a sistema de referencia ejes tierra que son las posiciones que se pintaran en el plot, esto se consigue con la siguiente sección ver figura 76.

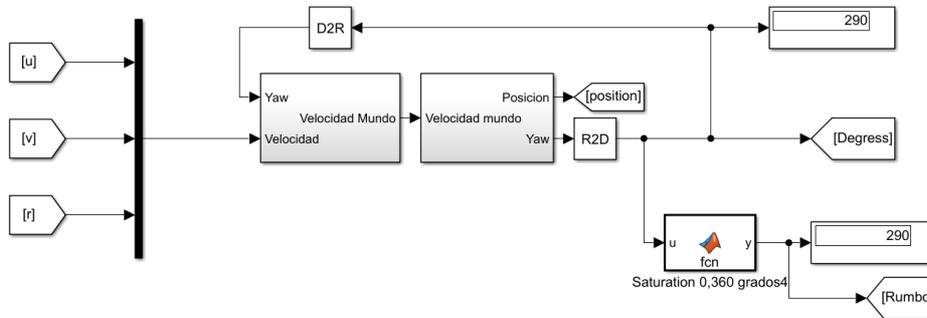


Figura 76. Sección del código donde se convierte la referencia a ejes tierra de la posición del barco.

El cálculo más destacado es el encontrado en la referencia [47], donde gracias a la ecuación siguiente se realiza la conversión, se trata de multiplicar la matriz de rotación por el rumbo. (ver figura 77).

$$u_e = u_b * \psi * R_z \quad (3-33)$$

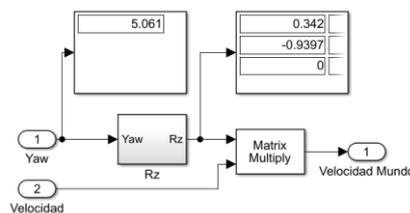


Figura 77. Cálculo de la velocidad del barco respecto ejes tierra.

La función que alberga el código del ploteo del mapa y el movimiento de los dos buques en cada instante de muestreo es el siguiente (figura 78). Se comentan en varias secciones su contenido. Se menciona que en cada instante de muestreo entra en la función la posición de cada buque estos son “u2” del buque dos y “u” del buque uno y adicionalmente entrará el mensaje que se muestre al usuario de las maniobras que realice correctamente “txt”.

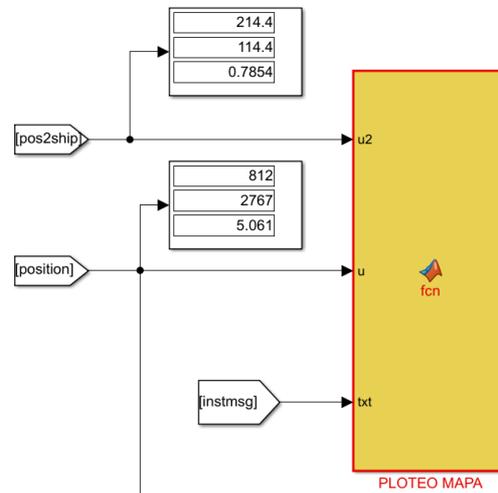


Figura 78. Función para el ploteo del mapa y los dos buques en Matlab simulink.

```

1  function fcfn(u2,u,Y,X, Y2, X2,txt)
2  coder.extrinsic('patch','set','imagesc','annotation','delete');
3  %resto de estados para plot
4  persistent state H H2 h
5  if isempty(state)
6  state=0;
7  H=patch;
8  H2=patch;
9  end
10 if isempty(h)
11 h=text();
12 end
13 figure(1);
14 title("Situacion de cruce");
15 %subplot (1, 4, 2:4);
16 Xrot=zeros(1,5);
17 Yrot=zeros(1,5);
18 Xrot2=zeros(1,5);
19 Yrot2=zeros(1,5);
20 img=0;
21 if state == 0
22 img = imread('m_fondo mar4k.jpg');
23 imagesc(img);
24 H= patch(X,Y,'blue');
25 H2=patch(X2,Y2,'red');
26 axis([0 3000 0 3000]);
27 xlabel('Y(m)');
28 ylabel('X(m)');
29 set(gcf,'Position',[755 0 785 1920],'Name','Ejercicio 1'); %desplaz horiz/desplazvertical/anch/alto

```

Figura 79. Sección de código 1 de la función PLOTEO MAPA en Matlab simulink.

Comentando cada una de las líneas de la figura 79 se muestra que en la función adicionalmente entran como parámetros las variables Y, X, Y2 y X2 que son las posiciones iniciales de cada punto de cada buque. Cada buque contiene cinco puntos que definen su silueta como se aprecia en la figura 75.

Luego en las líneas 4 a 12 se inicializan las variables como tipo persistentes para que no pierdan su valor al siguiente instante de muestreo. Dos de ellas “H” y “H2” se indica que se inicialicen como tipo objeto patch que esta función de matlab tiene la funcion de mostrar cada uno de los cinco puntos para cada buque y su actualización de posición. También “h” como tipo texto persistente que albergará el mensaje mostrado en el plot como se ha comentado.

Después en la línea 14 se añade titulo a la figura dependiendo del ejercicio en concreto “Situacion de cruce”.

Líneas 16,17,18 y 19 se inicializan a cero las matrices de cinco elementos que albergarán la posición o coordenadas de cada punto de los dos buques.

La línea 21 a la 32 solo ocurrirá en el primer instante y permitirá primero cargar la imagen de fondo azul imitando el agua marina, después se define donde se pinta los buques y su color en el primer instante de muestreo. El buque manejado por el alumno será de color azul y el Segundo buque en “modo bot” será de color rojo. También en la línea 26 se define el tamaño de los ejes de la figura y en la línea 29 los márgenes para permitir que la figura ocupe el valor deseado en pantalla.

```

31 - state=1;
32 - end
33 - %Rotación 5 puntos con la matriz de rotacion.
34 - for i=1:5
35 -     %Rotación eso osaka buque.
36 -     Xrot(i)=X(i)*cos(u(3))-Y(i)*sin(u(3))+u(1);
37 -     Yrot(i)=X(i)*sin(u(3))+Y(i)*cos(u(3))+u(2);
38 -     %Rotación segundo buque.
39 -     Xrot2(i)=X2(i)*cos(u2(3))-Y2(i)*sin(u2(3))+u2(1);
40 -     Yrot2(i)=X2(i)*sin(u2(3))+Y2(i)*cos(u2(3))+u2(2);
41 - end
42 - set(H,'Vertices',[Yrot ; Xrot]');
43 - set(H2,'Vertices',[Yrot2 ; Xrot2]');
44 -
45 - %Parte display mensaje
46 - %y=text(50,2800,txt,'Color','blue','FontSize',22,'Editing','on');
47 - delete(h)
48 - h=text(50,2800,txt,'Color','green','FontSize',22);
49 - end
50 -

```

Figura 80. Sección de código 2 de la función PLOTEO MAPA en Matlab simulink.

Comentando las líneas de la figura 80 de las líneas 34 a la 41 se realizará el cálculo del movimiento de rotación en el plano de cada buque teniendo en cuenta su rumbo y sumando la posición en los ejes X e Y en la que el buque se encuentra en cada instante.

Las líneas 42 y 43 lo que harán será actualizar el pintado de la posición de cada buque en la figura.

En la línea 47 se hará un clear del texto que se estuviera mostrando en ese instante para dejar paso al texto correspondiente a la siguiente maniobra correcta por parte del alumno.

En la línea 48 se define el color, tipo de fuente y posición del texto en la figura.

3.7 Detección de cruces de los buques.

El oficial de puente en prácticas deberá de eludir en todo momento el abordaje del segundo buque, sea cual sea el ejercicio según COLREG que este realizando. Para realizar este efecto de detección de cruces de segmentos en Matlab-Simulink se recurre a un método encontrado en la web [48], que entraría dentro del ámbito para nada trivial de la geometría computacional “computación de conjunto de segmentos”. El método seleccionado esta aplicado a la detección de cruce de segmentos. El segmento ha sido seleccionado dentro de la forma barco manejado e igualmente otro segmento del segundo buque, para las rocas se ha escogido otro segmento dentro de la forma de la roca.

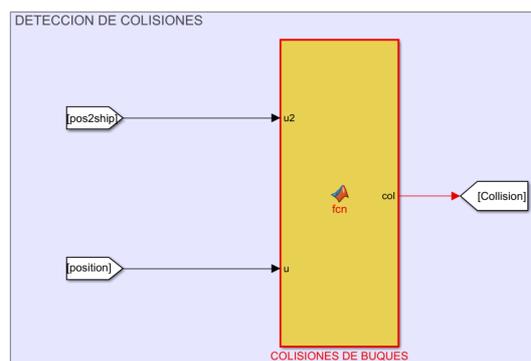


Figura 81. Función para la detección de colisiones entre los dos buques del simulador.

```

COLISIONES DE BUQUES Y TERRENO1 x +
14 for i=1:5
15     %Rotación esso osaka buque.
16     Xrotc(i)=Xc(i)*cos(u(3))-Yc(i)*sin(u(3))+u(1);
17     Yrotc(i)=Xc(i)*sin(u(3))+Yc(i)*cos(u(3))+u(2);
18     %Rotación segundo buque.
19     Xrot2(i)=X2(i)*cos(u2(3))-Y2(i)*sin(u2(3))+u2(1);
20     Yrot2(i)=X2(i)*sin(u2(3))+Y2(i)*cos(u2(3))+u2(2);
21 end
22 %Minimo y maximo barco y bot.
23 maxX1=max(Xrotc(2), Xrotc(5));
24 minX1=min(Xrotc(2), Xrotc(5));
25 maxX2=max(Xrot2(2), Xrot2(5));
26 minX2=min(Xrot2(2), Xrot2(5));
27 maxY1=max(Yrotc(2), Yrotc(5));
28 minY1=min(Yrotc(2), Yrotc(5));
29 maxY2=max(Yrot2(2), Yrot2(5));
30 minY2=min(Yrot2(2), Yrot2(5));
31 %Minimo y maximo piedra.
32 maxPY2c=max(XP(2)+150, XP(3)+150);
33 minPY2c=min(XP(2)+150, XP(3)+150);
34 maxPX2c=max(YP(2), YP(3));
35 minPX2c=min(YP(2), YP(3));
36
37 %Condiciones de intersección
38 if ((minX1 <= maxX2) && (maxX1 >= minX2) && (minY1 <= maxY2) && (maxY1 >= minY2)) || ...
39     ((minX1 <= maxPX2c) && (maxX1 >= minPX2c) && (minY1 <= maxPY2c) && (maxY1 >= minPY2c))
40     col=1;
41 else
42     col=0;
43 end

```

Figura 82. Sección de código de la función COLISIONES DE BUQUE en Matlab simulink.

Se comenta por líneas de código la función representada en la figura 82. Como entradas a la función se imitarán prácticamente a las presentadas en la función del plot de la figura a excepción del texto, también se realizarán calculos iguales a los de esa function. Se decide realizar esta parte del Código en dos funciones distintas para que se vea con mas claridad su funcion.

En las líneas 23 y 35 se seleccionan de los segmentos los puntos máximo y mínimo tanto en el eje Y como del X.

En las líneas de la 38 a la 42 se estudia las condiciones de si alguno de los segmentos del buque uno se cruzan con los segmentos del buque dos en algun instante, o bien los segmentos del buque uno se cruzan con el segmento de la roca, en cuanto se crucen se tendrá como salida “col” un uno indicando que hay colisión.

3.8 Procedimiento de evaluación de los ejercicios.

Se describe a continuación la programación utilizada para la evaluación de cada uno de los cuatro ejercicios. Están resumidas dentro de una matlab function “EVALUACIONES EJERCICIO 1” particularizada para cada uno de los mismos.

3.8.1 Procedimiento de evaluación del ejercicio 1.

El primer ejercicio tratará sobre una situación de cruce desfavorable. Los buques al arrancar la simulación tendrán la disposición en el mapa que se muestra en la figura 83. La principal actuación correcta que deberá de realizar el buque manejado Esso Osaka (en color azul), con el correspondiente cumplimiento a la normativa COLREG para situaciones de cruce será que, siempre que se tenga un buque a estribor con el que se cruza su trayectoria, se deberá de ceder el paso al mismo. Esta norma esta recogida en la regla número 15. Por lo tanto, se deberá en el ejercicio ceder el paso al buque rojo.

Como primera actuación correcta será el cumplimiento de la regla 6 o sea, moderación de la velocidad. La siguiente será el cumplimiento de realizar una maniobra con la suficiente antelación y de manera clara recogida en la normativa COLREG tanto en las reglas número 8 como 16.

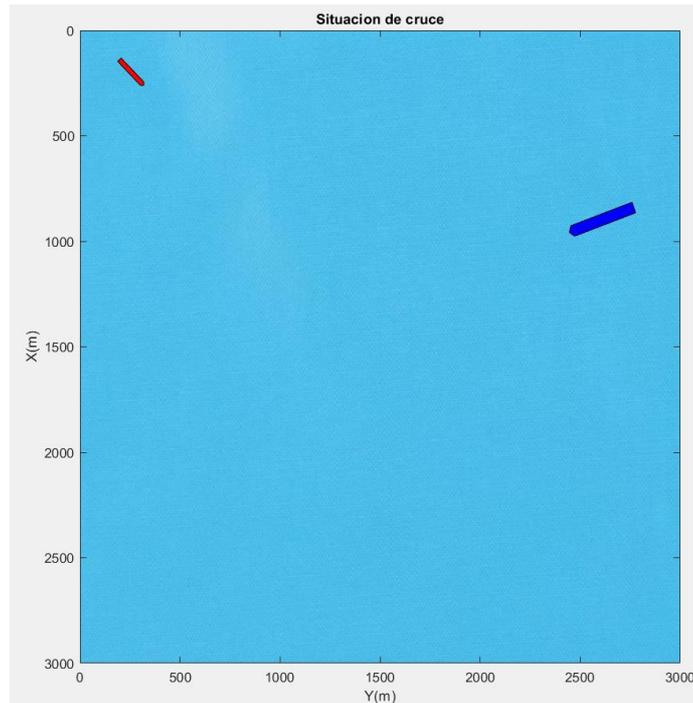


Figura 83. Vista inicial de la disposición de los buques en el ejercicio 1.

La programación de la evaluación en Matlab-Simulink esta recogida en la siguiente seccion (ver figura 84). La misma se resume en una función de Matlab que recibirá tanto la posición actual de los buques como las órdenes de puente que el alumno tiene control. Según sus actuaciones, la función sacará un mensaje distinto y mostrará en pantalla la puntuación en cada instante que el alumno vaya obteniendo hasta finalizar el ejercicio.

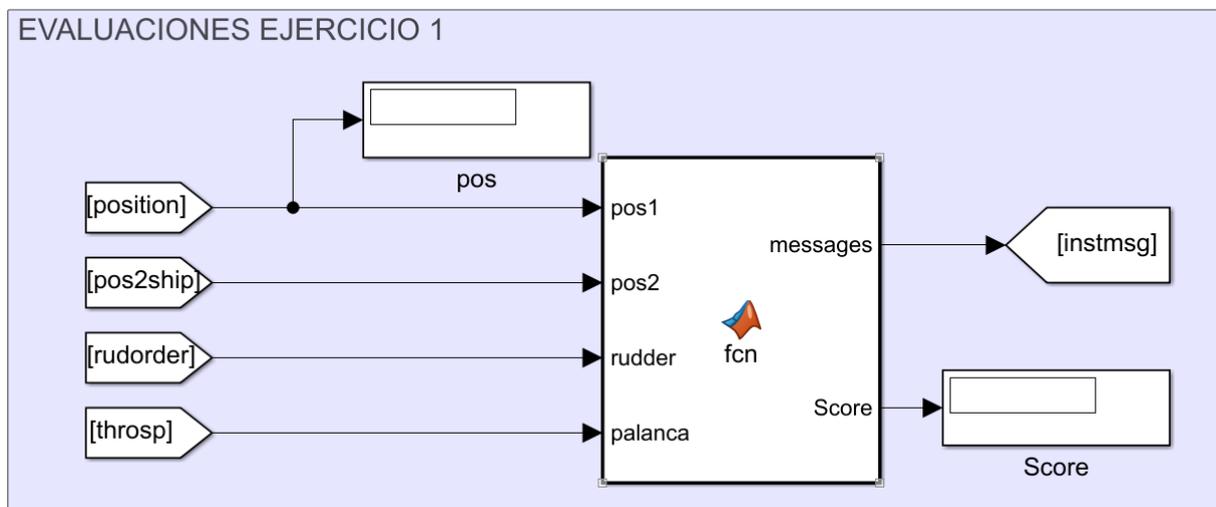


Figura 84. Función para la evaluación del ejercicio primero de situación de cruce.

```

33 -   if (pos2(2) <= 345 && pos2(2) >= 339.8) && Acc1==0 && palanca<=68
34 -       puntuacion=10;
35 -       Acc1=1;
36 -       mess= "Correcto Regla 6 moderar velocidad";
37 -   end
38 -   if (pos2(2) <= 595 && pos2(2) >= 585) && (rudder >= 25 || rudder <= -25) && Acc2==0
39 -       puntuacion=puntuacion+15;
40 -       Acc2=1;
41 -       mess= "Reglas 8 y 16 realizadas correctamente";
42 -   end
43 -   if (pos2(2) <= 595 && pos1(2) >= 585) && Acc31==0
44 -       staterud= rudder;
45 -       statepalanca=palanca;
46 -       Acc31=1;
47 -   end
48 -   if (pos2(2) <= 600) && (rudder~=staterud || palanca ~= statepalanca)
49 -       correctoej3=0;
50 -   end
51 -   if (pos2(2) <= 1468 && pos2(2) >= 1458) && correctoej3==1 && Acc3==0
52 -       puntuacion=puntuacion+15;
53 -       Acc3=1;
54 -   end
55 -   if (pos2(2) <= 1468 && pos2(2) >= 1458) && pos1(1)<= pos2(1)-200 && Acc4==0
56 -       puntuacion=puntuacion+60;
57 -       Acc4=1;
58 -       mess= "Regla 15 correcta buque por estribor pref.";
59 -   end

```

Figura 85. Sección primera de código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 1.

Comentando el código presentado en la figura 85 se indica, como de las líneas 33 a 37 se estudia si se cumple la condición que cuando el buque uno se encuentra entre las posiciones de los ejes entre la 345 y la 339.8, y el valor de orden de la palanca es igual o menor a 68 revoluciones por minuto, se otorgará un valor de puntuación de 10 puntos y se mostrará como salida el mensaje “Correcto Regla 6 moderar velocidad”.

Entre las líneas 38 y 42. Realiza si se cumple la condición de que el buque se encuentra en esa posición y el grado de timón es grande (mayor a 25 grados), se suman 15 puntos al resultado obtenido hasta ese momento y se muestra en la salida el mensaje “Reglas 8 y 16 realizadas correctamente”.

Las líneas de la 43 a 54 van a controlar si cuando el oficial ha empezado la maniobra de dejar paso ante cruce no debe de cambiar la orientación con el ángulo de timón ni la velocidad del barco con la palanca. Si no lo hace y llega el buque uno a la posición indicada se sumarán 15 puntos a la puntuación final.

En las líneas 55 a 59 se estudia si al llegar a una determinada posición el buque uno ha dejado pasar al buque dos con un margen de mas de 20 metros. Se sumarán 60 puntos a la calificación final y se mostrará el siguiente mensaje correspondiente de maniobra correcta en pantalla.

```

60 -   if (pos2(2) <= 1500 && pos2(2) >= 1490) && puntuacion>=60
61 -       mess= "Se ha realizado la prueba satisfactoriamente";
62 -   elseif (pos2(2) <= 1500 && pos2(2) >= 1490) && puntuacion<60
63 -       mess= "Suspendido. Repetir la prueba";
64 -   end
65 -   Score=puntuacion;
66 -   messages=mess;

```

Figura 86. Sección segunda de código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 1.

Las líneas de la 60 a la 64 servirán para definir la puntuación obtenida del ejercicio uno. Es decir, si ha sido mayor o igual a 60 se mandará el mensaje de que se ha aprobado el ejercicio o de lo contrario si la puntuación es menor a 60 se ha suspendido la prueba y el oficial en ese caso debe repetir la prueba.

3.8.2 Procedimiento de evaluación del ejercicio 2.

El Segundo ejercicio propuesto del simulador COLREG es como resolver según normativa una situación de vuelta encontrada.

El aspecto inicial del escenario será el que se muestra en la figura 87. La principales actuaciones que el buque controlado “Esso Osaka” debe realizar según la normativa COLREG es, cuando el mismo se encuentre en la situación de frente con el otro buque, serán las de girar a estribor y al sobrepasar al otro buque se tendrá un margen de distancia de seguridad entre esloras de 20 metros en todo momento. Cumpliendo así la regla 14.

La primera actuación será el giro notable de timón hacia estribor (mayor a 30 grados) y con suficiente antelación para determinar una maniobra clara según indica la normativa COLREG en su regla número 8.

La segunda actuación a tener en cuenta es una vez sobrepasado el buque Volver a la trayectoria inicial del buque en este caso son 90 grados. Durante este tránsito esta prohibido cambiar de orden de velocidad del buque.

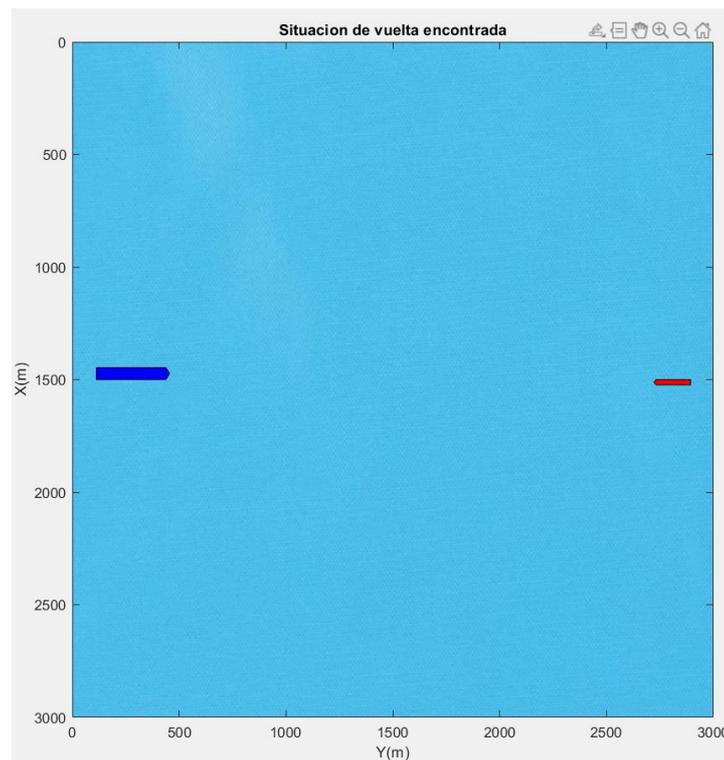


Figura 87. Vista inicial de la disposición de los buques en el ejercicio 2.

Para la simulación de este ejercicio se necesita otorgar al segundo buque de un movimiento real predefinido, imitando buenas prácticas COLREG. Se pretende que el barco caiga a su estribor por un determinado tiempo y luego prosiga su rumbo inicial y que todo esto lo realice de forma automática.

Para ello se recurre a un control de rumbo estándar referencia ejes tierra. El control se realiza con un controlador PI tradicional ajustado experimentalmente por prueba y error ya que no se requieren para este caso sintonías más precisas. El actuador para alcanzar el rumbo deseado una vez el barco esté en movimiento es el timón de popa con una velocidad de 3 grados segundo. El set point de rumbo variará en dos ocasiones, una para el giro a estribor y la segunda para volver a su rumbo original que son 270 grados, el cambio de setpoint se realiza gracias a la función “SetPointSel” que se aprecia en la figura 88.

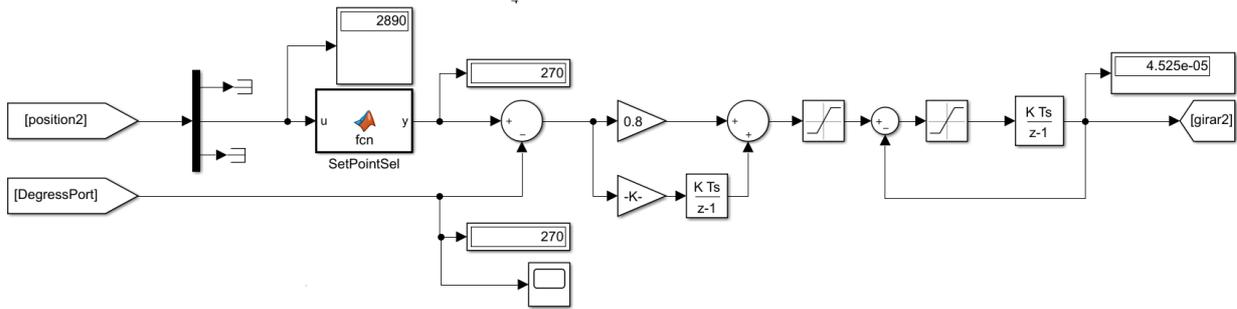


Figura 88. Control de rumbo clásico para el segundo buque con movimientos autónomos en el escenario.

La parte del Código en Matlab que recoge la evaluación continua del ejercicio se resume en la siguiente figura 89 con la función “EVALUACIONES EJERCICIO 2” en la cuál entran las posiciones de los dos buques, las órdenes de timón y velocidad según actúe el oficial alumno y también entra el rumbo del buque uno para evaluar que el buque vuelve a su trayectoria inicial. Las salidas de la función son el mensaje de maniobra correcta y la puntuación del ejercicio hasta el momento.

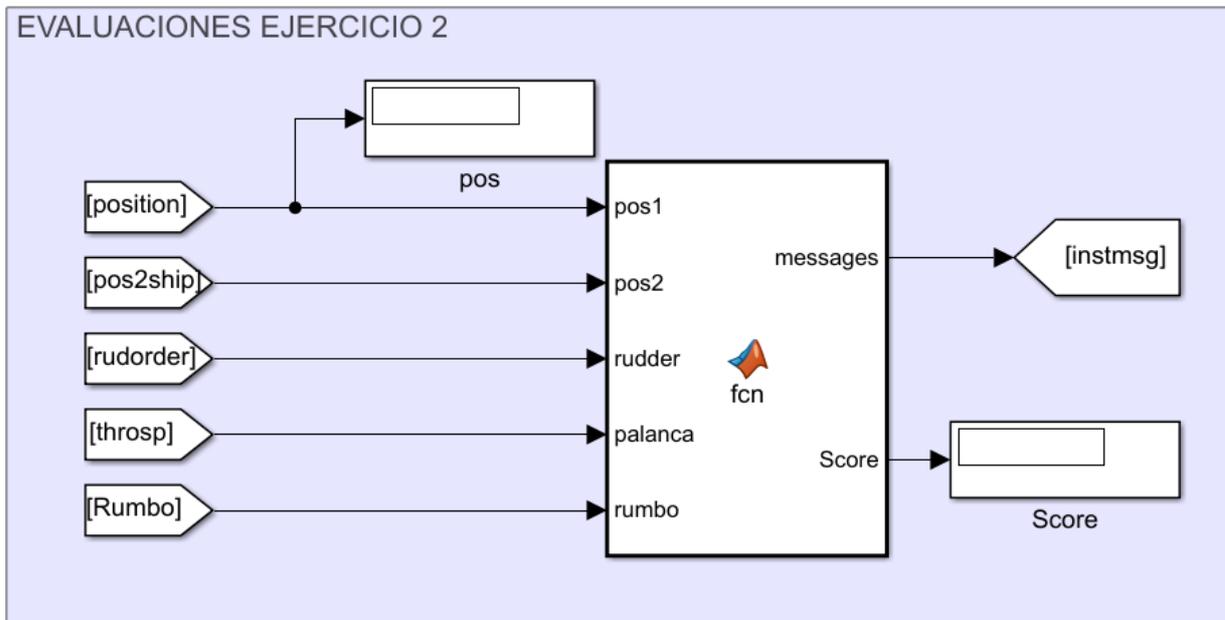


Figura 89. Función para la evaluación del ejercicio segundo de situación de vuelta encontrada.

```

27 - if (pos2(2) <= 2890 && pos2(2) > 2602) && Acc1==0 && rudder <= -30
28 -     puntuacion=25;
29 -     Acc1=1;
30 -     mess= "Correctas Maniobra con antelación y clara";
31 - end
32
33 - if (pos2(2) >= 2592 && pos2(2) < 2597)
34 -     statepalanca=palanca;
35 - end
36 - if (pos2(2) > 490.5) && (pos2(2) <= 2597) && (palanca ~= statepalanca)
37 -     correctoej2=0;
38 - end
39 - if (pos2(2) >= 480 && pos2(2) <= 490.5) && (rumbo>=80 && rumbo<=100) && correctoej2==1 && Acc2==0
40 -     puntuacion=puntuacion+25;
41 -     Acc2=1;
42 -     mess= "Correcto vuelta a rumbo inicial";
43 - end
44
45 - if (pos2(2) <= 260 && pos2(2) >= 250) && pos1(1)>= pos2(1)+20 && Acc3==0 && pos1(1)>= 1500
46 -     puntuacion=puntuacion+50;
47 -     Acc3=1;
48 -     mess= "Regla 14 bien Maniobra vuelta encontrada";
49 - end
50 - if (pos2(2) <= 112.7 && pos2(2) >= 102.7) && puntuacion>=50
51 -     mess= "Se ha realizado la prueba satisfactoriamente";
52 - elseif (pos2(2) <= 112.7 && pos2(2) >= 102.7) && puntuacion<50
53 -     mess= "Suspendido. Repetir la prueba";
54 - end

```

Figura 90. Sección primera de código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 2.

Comentando la sección del código presentado en la figura 90, se tiene que en las líneas de la 27 a 31 se estudia si en la posición que ha alcanzado el buque uno el timón se encuentra a menos de -30 grados para girar el buque a estribor, si esto se cumple se otorgarán 25 puntos a la puntuación final y se escribirá el mensaje “Correctas Maniobra con antelación y clara”.

Entre las líneas 33 y 43 se tiene que si en algún momento antes de llegar al punto determinado la orden de velocidad no se ha alterado y el rumbo Vuelve a ser el inicial o ronda el mismo se otorgarán 25 puntos a la puntuación final y se muestra el mensaje “Correcto vuelta a rumbo inicial”.

Entre las líneas 45 y 49 se estudia si cuando el buque uno llega a esa posición se encuentra a por lo menos 20 metros de separación entre él mismo y el otro buque y por situación de babor.

Finalmente, entre las líneas 50 y 54 se arroja al oficial alumno el mensaje feedback si el ejercicio ha sido realizado satisfactoriamente si la puntuación es mayor o igual a 50 puntos y de lo contrario si es menor a 50 se suspende y se debe repetir la prueba.

3.8.3 Procedimiento de evaluación del ejercicio 3.

El tercer ejercicio propuesto en el simulador COLREG consiste en eludir una colisión con otro buque inminente.

El aspecto inicial del escenario que se muestra en este ejercicio se muestra en la figura 91. La principal acción correcta en este ejercicio será la de evitar a toda costa colisionar con el otro buque a pesar de las condiciones meteorológicas adversas cumpliendo con la regla 17 de la normativa.

La primera acción que el oficial de puente en prácticas debe de realizar en este caso de riesgo extremo de abordaje es la de reducir considerablemente la velocidad del buque. Así se cumplirá la regla 6 de la normativa COLREG.

La segunda acción será la de realizar un cambio de rumbo notable para evitar la colisión e intentar parar inmediatamente el buque correspondiente a la regla 8 de la normativa COLREG.

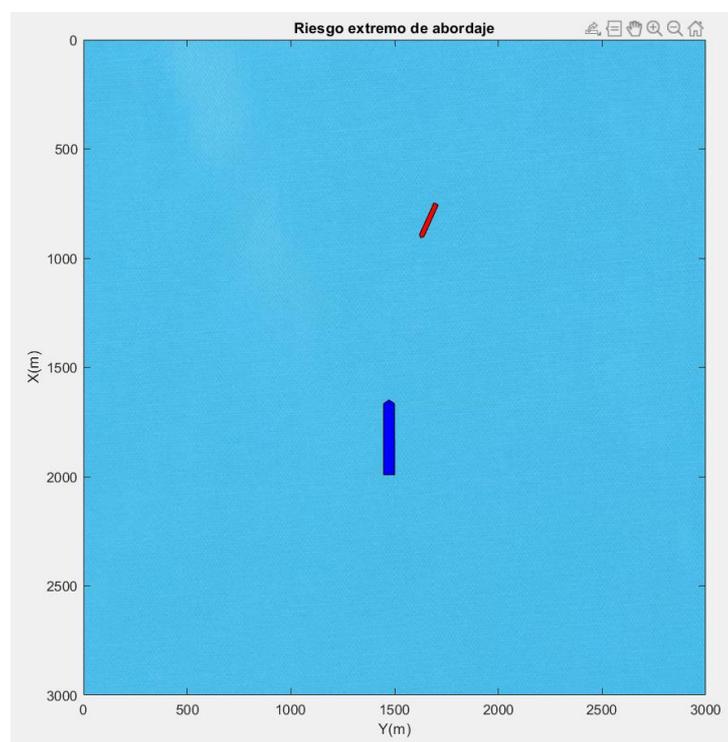


Figura 91. Vista inicial de la disposición de los buques en el ejercicio 3.

La parte del Código en Matlab que recoge la evaluación continua del ejercicio se resume en la figura 92 con la función “EVALUACIONES EJERCICIO 3”, en la cuál las entradas de la función serán las posiciones de los dos buques, las órdenes de timón y velocidad según actúe el oficial alumno y también si el sistema ha detectado la de colisión con otro buque. Las salidas de la función son de nuevo el mensaje de maniobra correcta y la puntuación del ejercicio hasta el momento.

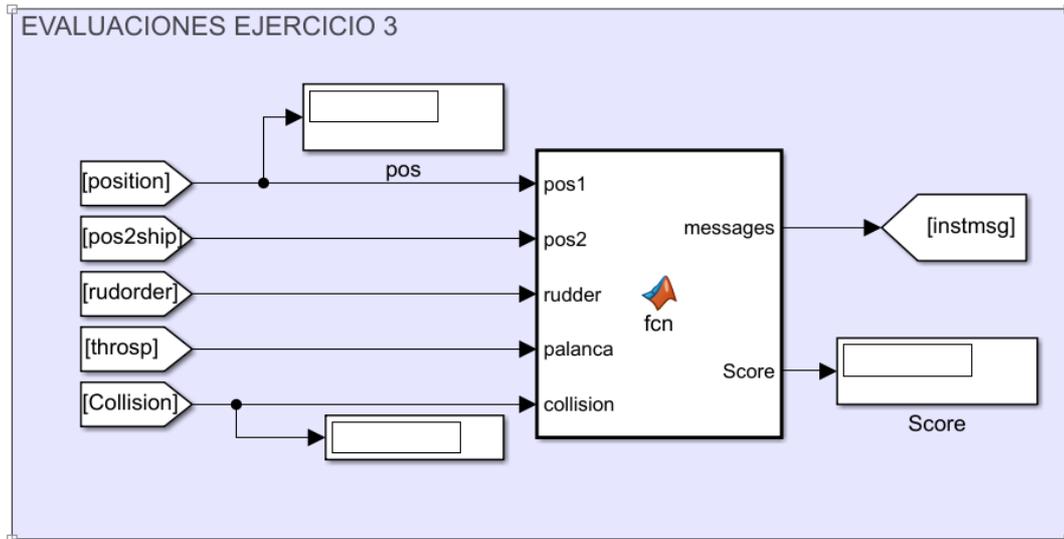


Figura 92. Función para la evaluación del ejercicio tercero de riesgo extremo de abordaje.

```

19 - if (pos1(1) >= 1850 && Acc1==0 && palanca<=30)
20 -     puntuacion=20;
21 -     Acc1=1;
22 -     mess= "Correcto Regla 6 moderar velocidad";
23 - end
24 - if (pos1(1) >= 1820 && Acc2==0 && palanca<=30 && (rudder<=-30 || rudder>=30))
25 -     puntuacion=puntuacion+20;
26 -     Acc2=1;
27 -     mess= "Regla 8 correcto cambio claro y notable";
28 - end
29 - if (pos2(2) >= 1195) && collision==1
30 -     choque=1;
31 - end
32 - if (pos2(2) >= 1175 && pos2(2) <= 1195) && choque==0 && Acc3==0
33 -     puntuacion=puntuacion+60;
34 -     Acc3=1;
35 -     mess= "Regla 17 evitar riesgo de choque logrado";
36 - end
37 -
38 - if (pos2(2) <= 1155 && puntuacion>=60)
39 -     mess= "Se ha realizado la prueba satisfactoriamente";
40 - elseif (pos2(2) <= 1155 && puntuacion<60)
41 -     mess= "Suspendido. Repetir la prueba";
42 - end
43 - Score=puntuacion;
44 - messages=mess;

```

Figura 93. Sección de código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 3.

Se comenta a continuación el código presentado en la figura 93. En las líneas de la 19 a la 23 se comprueba la condición que se ha enviado una orden de reducir la orden de la palanca de velocidad desde el puente considerable, debe ser 30 o menos revoluciones por minuto. Tras cumplirse esto se lanzará el mensaje de texto “Correcto Regla 6 moderar velocidad” y se sumarán 20 puntos a la puntuación total del ejercicio.

Líneas 24 a la 28 se evalúa la condición de si el buque uno se encuentra entre dichas posiciones, la orden de la palanca sigue siendo de 30 o menos revoluciones por minuto y la orden de mover el timón supera los 30 grados tanto estribor como a babor independientemente. Se lanzará el mensaje de salida “Regla 8 correcto cambio claro y notable” y se sumarán otros 20 puntos a la puntuación total del ejercicio.

Las líneas de la 29 a la 36 estarán vigilando en todo momento que la entrada de colisión “collision” este siempre a valor cero, queriendo decir, que no ha habido colisión hasta el momento. De manera que, si no ha habido aún colisión cuando el buque dos con su trayectoria llega a un punto determinado entre 1175 y 1195 metros, se otorgarán 60 puntos a la calificación final del ejercicio y se manda el mensaje de texto “Regla 17 evitar riesgo de choque logrado”.

Entre las líneas 38 y 42 se sitúa como referencia para marcar el final del ejercicio el buque dos, durante ese

tiempo el alumno que este manejando el simulador puede realizar las maniobras con total libertad sobre el buque uno Esso Osaka. Así, se evalúa la condición de que cuando el buque segundo alcanza la posición de 1175 metros, si se cumple de que la puntuación obtenida hasta ese punto es mayor o igual a 60. Se lanzará el mensaje de “Se ha realizado la prueba satisfactoriamente, consecuentemente, el alumno habrá superado el ejercicio. De lo contrario, si no se supera o iguala la puntuación se lanzará el mensaje “Suspendido. Repetir la prueba” debiendo repetir la prueba.

3.8.4 Procedimiento de evaluación del ejercicio 4.

El cuarto ejercicio propuesto en el simulador COLREG se trata de realizar una situación de adelantamiento pudiéndose dar dos escenarios distintos aleatoriamente dentro del mismo ejercicio.

El primer escenario solo alberga los dos buques siendo el primer buque Esso Osaka que será el que deba adelantar al Segundo buque.

El Segundo escenario, además de los dos buques, contiene obstáculos adicionales simulando un terreno de rocas. En este caso, el buque controlado Esso Osaka deberá de abortar la maniobra de adelantamiento sin chocar con ningún elemento en todo momento.

Los aspectos iniciales de los posibles escenarios pertenecientes a este ejercicio se muestran en la figura 94 el primer escenario y la figura 95 el segundo. Las mismas se muestran a continuación.

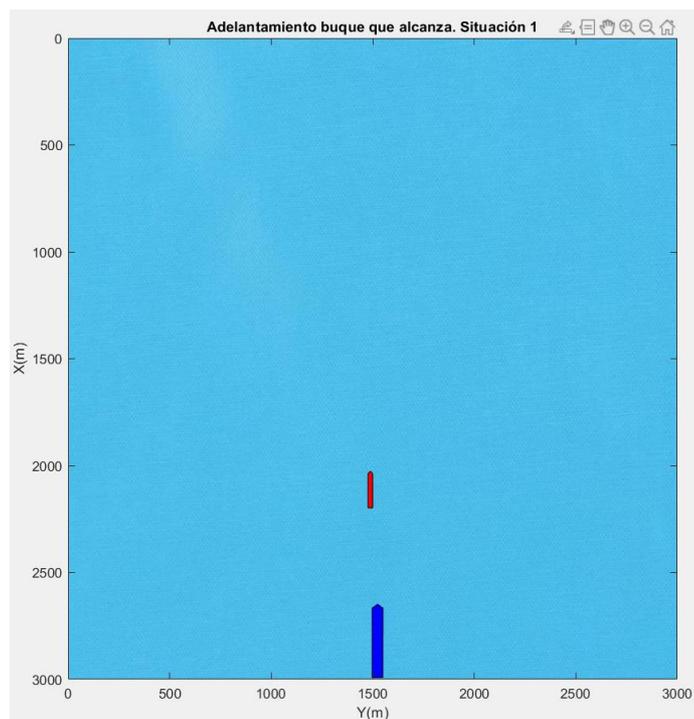


Figura 94. Vista inicial de la disposición de los buques en el primer escenario del ejercicio 4.

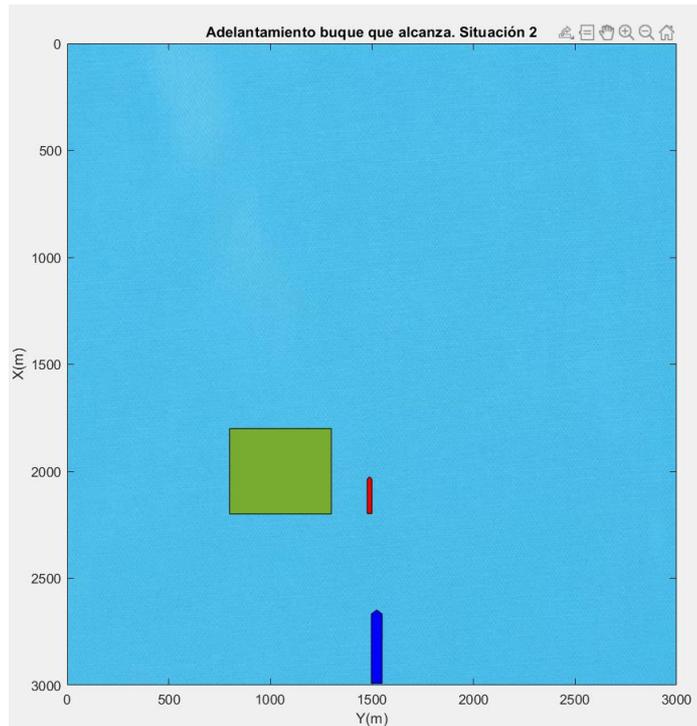


Figura 95. Vista inicial de la disposición de los buques en el segundo escenario del ejercicio 4.

En el primer escenario la acción principal a realizar por parte del alumno oficial de puente será apartarse de la derrota del buque que va a adelantarse y cuando lo haya superado y en posición de franquía con margen de seguridad volver a su rumbo inicial. También será vital no colisionar con el segundo buque en ningún momento. Con todo esto, se cumplirá con lo establecido en la normativa COLREG número 13.

En el segundo escenario la situación es distinta, al no ser posible adelantar con seguridad, la principal acción que se deberá de tomar será abortar la maniobra de adelantamiento y evitar la colisión. Cumpliendo así también con la misma regla 13 de la normativa COLREG.

Siguiendo las acciones correctas a tomar para este segundo escenario, la primera acción será ordenar parar totalmente el buque con una orden de palanca de 0 revoluciones por minuto cumpliendo así con la regla 6 de la normativa COLREG cuando hay riesgo de colisión se debe parar el buque.

La parte del Código en Matlab que recoge la evaluación continua del ejercicio se resume en la figura 96 con la función "EVALUACIONES EJERCICIO 4", en la cuál las entradas de la función serán las posiciones de los dos buques, las órdenes de timón y velocidad según actúe el oficial alumno, también si el sistema ha detectado la de colisión con otro buque y por último la entrada "carga" con un número aleatorio indicando si se desea cargar el escenario primero o segundo. Las salidas de la función son de nuevo el mensaje de maniobra correcta y la puntuación del ejercicio hasta el momento.

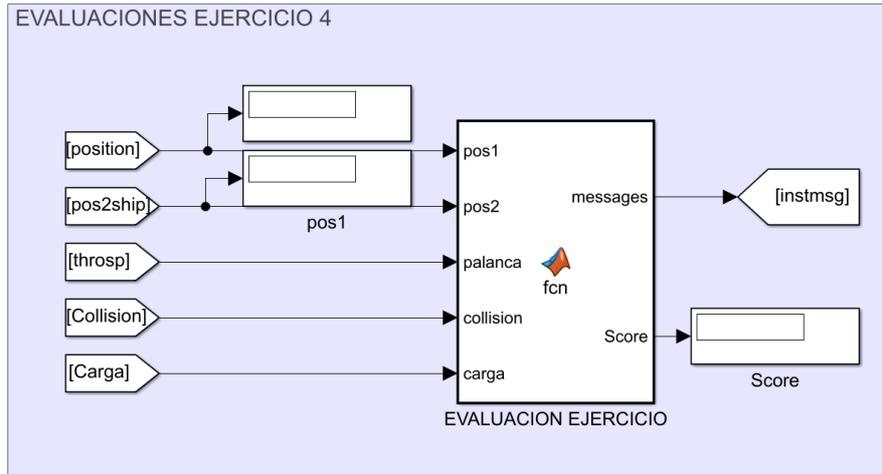


Figura 96. Función para la evaluación del ejercicio cuarto de adelantamiento buque que alcanza.

Para generar el número aleatorio se utiliza el Código Matlab mostrado en la figura 97. Se ha recurrido dentro de la función “Casos escenarios” a la generación de un número aleatorio de 1 a 5 a través de la función “randi [1 5]”. Dependiendo del valor se cargará un escenario u otro, como se comenta un poco más abajo en la explicación del Código de evaluación del ejercicio.

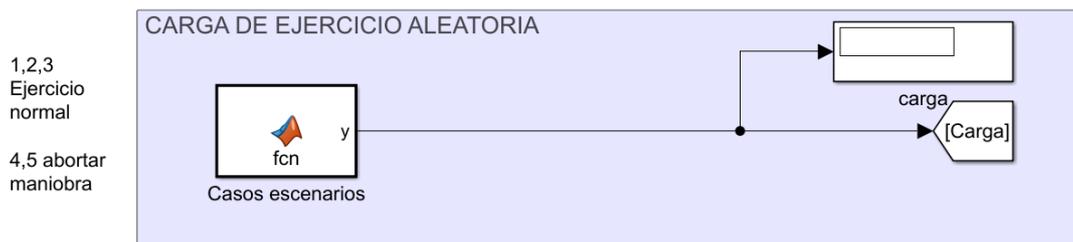


Figura 97. Generación del número aleatorio para la carga del escenario primero y segundo en Matlab.

Se muestra a continuación el código que se encuentra dentro de la función mostrada en la figura 98 “EVALUACIONES EJERCICIO 4” comentando sus líneas.

```

26 -   if carga == 1 || carga == 2 || carga == 3
27 -       if collision==1
28 -           choque=1;
29 -       end
30 -   if (pos1(1)<pos2(1)-50) && (pos1(2)<=pos2(2)+2300) && (pos1(2)>=pos2(2)-2300) && choque==0 && Acc1==0
31 -       puntuacion=100;
32 -       mess= "Correcto Regla 13 apartar de la derrota";
33 -       Acc1=1;
34 -   end
35 -
36 -   if (pos1(1) <= 800 && puntuacion>=60)
37 -       mess= "Se ha realizado la prueba satisfactoriamente";
38 -   elseif (choque==1)
39 -       mess= "Colision cercana.Suspendido.Repetir prueba";
40 -   end
41 - end

```

Figura 98. Código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 4 para la evaluación del escenario primero.

Comentando las líneas de la figura 99 correspondientes al primer escenario donde el buque Esso Osaka deberá adelantar al Segundo buque sin obstáculos se establece en la línea 26 que se tiene que dar que el valor de la entrada “carga” correspondiente al número aleatorio generado debe de ser “1, 2 o 3” para que se cumpla la condición.

En las líneas de la 27 a la 29 se detectará si en algún momento existe colisión con el Segundo buque.

En las líneas de la 30 a la 34 se evalúa dependiendo si se cumple la condición de que el buque cumpla con una

distancia de seguridad respecto del buque adelantado de 50 metros a lo ancho y una posición de franquía a lo largo se define en 2300 metros, además no se ha producido en ningún momento del adelantamiento colisión entre los dos buques. La puntuación final será de 100 puntos y se mostrará en la salida “Correcto Regla 13 apartar de la derrota”.

Finalmente, para el escenario primero, se estudia si se ha obtenido una calificación de más o igual a 60. De manera que, cumpliéndose la condición se muestra el mensaje “Se ha realizado la prueba correctamente”. De lo contrario, si se detecta para este primer escenario del ejercicio 4 colisión, esto ocurre por que el algoritmo de detección de colisiones creado en este primer escenario detecta colisión con un offset de distancia de seguridad de manera que, si la detección arroja el valor “1” se mostrará el mensaje “Colisión cercana. Suspendido. Repetir la prueba”.

```

42 %Segundo escenario aleatorio.
43 - if carga == 4 || carga == 5
44 -     if collision==1
45 -         choque=1;
46 -     end
47 %Primer paso parar.
48 -     if palanca==0 && Acc2==0 && Acc3==0
49 -         puntuacion=40;
50 -         Acc2=1;
51 -         mess= "Correcto Regla 6. parar riesgo colisión";
52 -     end
53 %Segundo evitar choque y evitar adelantar.
54 -     if (pos1(1)<= pos2(1))
55 -         adel=1;
56 -     end
57 -     if choque==0 && Acc3==0 && adel==0 && pos2(2)> 1820
58 -         Acc3=1;
59 -         puntuacion=puntuacion+60;
60 -         mess= "Correcto Regla 13. Riesgo no adelantar";
61 -     end
62 -     if (pos2(2) > 1877 && puntuacion>=50)
63 -         mess= "Se ha realizado la prueba satisfactoriamente";
64 -     elseif (pos2(2) > 1877 && puntuacion<50) || choque==1
65 -         mess= "Suspendido. Repetir la prueba";
66 -     end
67 - end
68 - Score=puntuacion;
69 - messages=mess;

```

Figura 99. Código de la función EVALUACIONES EJERCICIO 4 para la evaluación del escenario segundo.

Comentando las líneas de la figura 99 correspondientes al segundo escenario, donde el buque Esso Osaka deberá de abortar el adelantamiento al segundo buque con obstáculos de rocas a su babor. Se establece en la línea 43 que se tiene que dar que el valor de la entrada “carga” correspondiente al número aleatorio generado debe de ser “4 o 5” para que se ejecute esta parte del código correspondiente al segundo escenario.

De las líneas de la 48 a la 52 se estudia la condición de si la orden de palanca se ha establecido en 0 revoluciones por minuto, si esto es así se sumarán 40 puntos a la calificación final del ejercicio y se muestra en la salida el mensaje “Correcto Regla 6. parar riesgo de colisión”.

De las líneas 54 a 56 se estudia si en cualquier momento la posición del buque manejado es menor a la del buque segundo se ha producido adelantamiento, ya que en el escenario que se muestra en la figura 99, el buque uno se encuentra en una posición mayor que el segundo.

De las líneas 57 a la 61 se estudia la condición de si no se detecta choque o adelantamiento “adel” y el buque segundo a llegado a un determinado lugar del mapa. Esta acción sumaría al ejercicio 60 puntos sobre la calificación final y se muestra en la salida el mensaje “Correcto regla 13. Riesgo no adelantar”.

Finalmente, de las líneas de la 62 a la 66 para el escenario segundo se estudia si se ha obtenido una calificación de más o igual a 50. De manera que, cumpliéndose la condición se muestra el mensaje “Se ha realizado la prueba correctamente”. De lo contrario, si se detecta para este segundo escenario del ejercicio 4 el valor de colisión “1” o la puntuación del ejercicio es menor a 50, se mostrará el mensaje “Suspendido. Repetir la prueba”.

3.9 Creación de interfaz gráfica GUI.

Se procede a la creación de la interfaz de usuario para que el mismo interactúe con el simulador y vea los datos de una manera fácil e intuitiva. Para ello se utiliza la herramienta AppDesigner del propio Matlab2020a. (Ver figura 100).

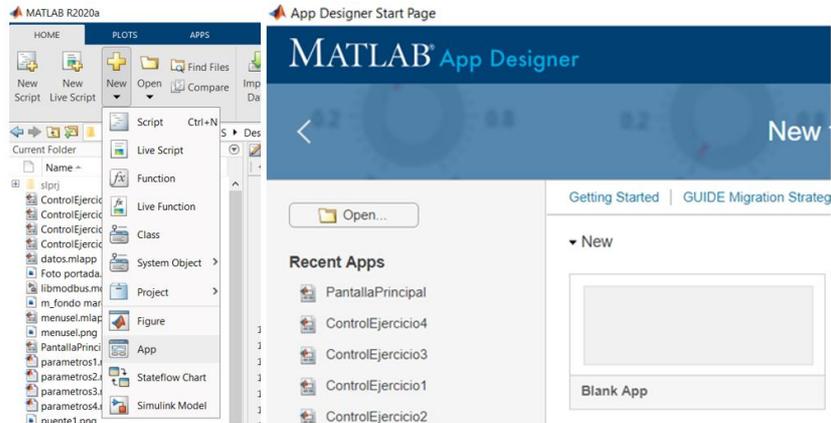


Figura 100. Se muestra la herramienta de Matlab 2020a AppDesigner.

Se comienza mostrando el esquema general de navegación y llamadas entre pantallas del simulador COLREG. (Ver figura 101). Desde AppDesigner se permite tanto compartir datos, navegar entre pantallas, como entre cualquier pantalla y el modelo de Matlab Simulink pudiéndose incluso iniciar, detener y cerrar la simulación desde el mismo panel.

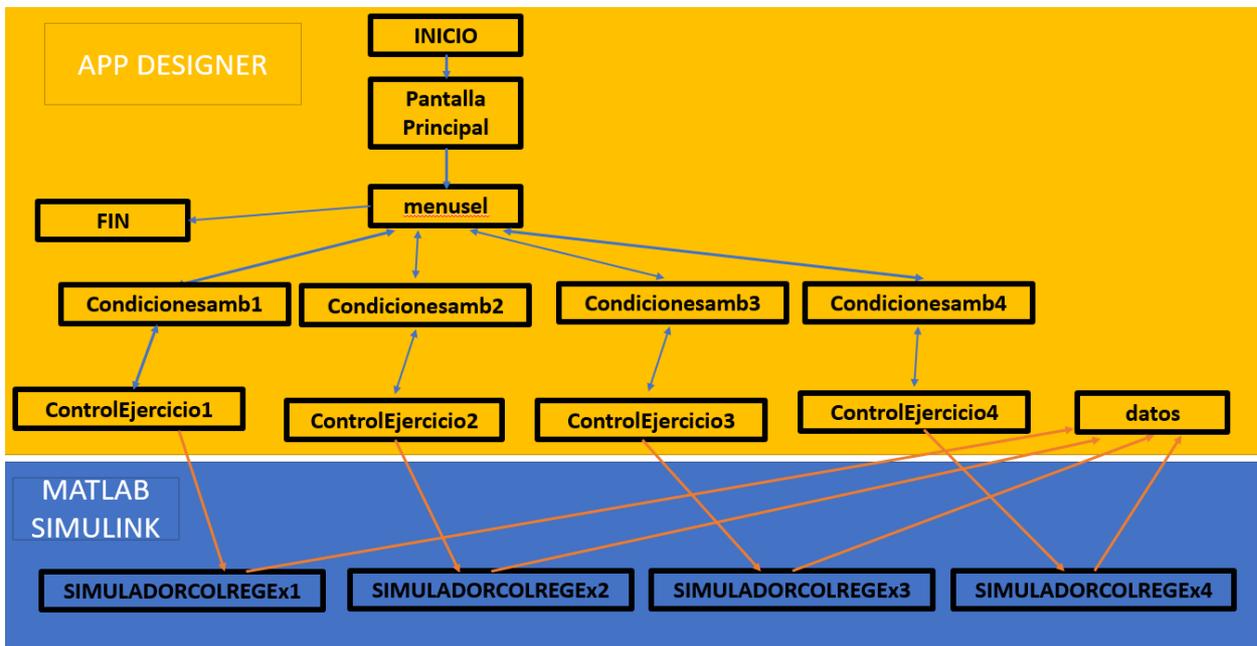


Figura 101. Esquema general sobre la navegación entre pantallas e interacción con los modelos de Matlab-Simulink formando en su conjunto el simulador para evaluar maniobras COLREG.

Se irá a continuación describiendo uno a uno el flujo de datos y la programación de cada una de las pantallas que aparecen en el simulador.

Inicialmente, el simulador se encontrará en la pantalla principal, la misma tiene de nombre “PantallaPrincipal”, Su aspecto, componente y dimensiones del panel se muestran en la siguiente figura 102.



Figura 102. Aspecto del panel “PantallaPrincipal” del simulador.

En la programación de este panel se ha modificado la programación del pulsador “EMPEZAR” que permite acceder al clickear sobre el abrir el panel “menusel” y cerrar “PantallaPrincipal” (ver figura 103).

```
function EMPEZARButtonPushed(app, event)
    % Open the options dialog and pass inputs
    menusel()
    delete(app)
end
```

Figura 103. Código correspondiente al panel “PantallaPrincipal” para que al detectar pulsación sobre el pulsador se abra el siguiente panel.

Una vez que el usuario ha pulsado el pulsador “EMPEZAR” se accede al panel “menusel”. Su aspecto, componentes y dimensiones del panel se muestran en la siguiente figura 104.

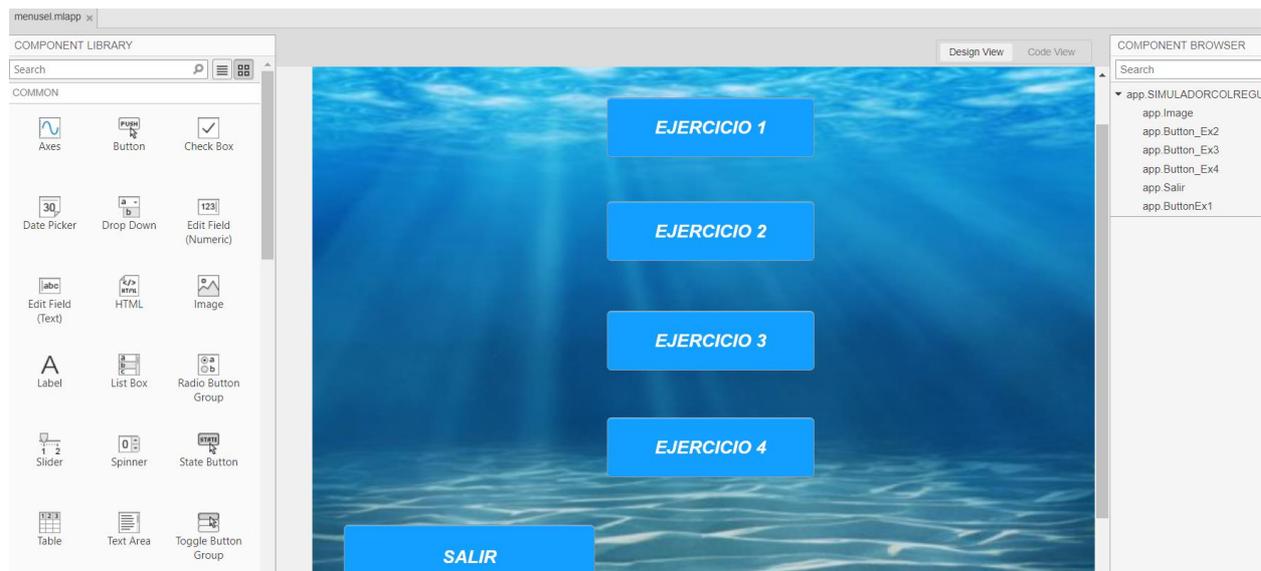


Figura 104. Aspecto del panel “menusel” del simulador.

Este panel permite al usuario tanto acceder a cada ejercicio del simulador, como de salir de la aplicación directamente y terminar el programa con el pulsador salir. Se muestra la programación de cada uno de los pulsadores del panel “menusel” a continuación (ver figura 105):

```

39 % Button pushed function: Salir
40 function SalirButtonPushed(app, event)
41     delete(app)
42 end
43
44 % Button pushed function: Button_Ex2
45 function Button_Ex2Pushed(app, event)
46     open_system('SIMULADORCOLREGEx2');
47     %ControlEjercicio2();
48     Condicionesambientales2();
49     delete(app)
50 end
51
52 % Button pushed function: Button_Ex3
53 function Button_Ex3Pushed(app, event)
54     open_system('SIMULADORCOLREGEx3');
55     %ControlEjercicio3();
56     Condicionesambientales3();
57     delete(app)
58 end
59
60 % Button pushed function: Button_Ex4
61 function Button_Ex4Pushed(app, event)
62     open_system('SIMULADORCOLREGEx4');
63     %ControlEjercicio4();
64     Condicionesambientales4();
65     delete(app)
66 end
67
68 % Button pushed function: ButtonEx1
69 function ButtonEx1Pushed2(app, event)
70     open_system('SIMULADORCOLREGEx1');
71     %ControlEjercicio1();
72     Condicionesambientales1();
73     delete(app)
74
75 end

```

Figura 105. Programación de botones para el panel menusel.

Comentando la programación línea a línea. De las líneas 40 a la 42 se tiene la programación del pulsador “SALIR” ejecutándose cuando se acciona sobre el haciendo click, de manera que cuando se ejecuta se cierra la ventana saliendo por completo del simulador COLREG.

Líneas 46 a la 49 se ejecutan cuando se hace una pulsación sobre el pulsador “EJERCICIO 2”. Así, cuando ocurra este suceso, la línea 46 permite abrir el programa de simulink asociado al ejercicio 2 de nombre “SIMULADORCOLREGEx2”, la línea 48 abre el panel siguiente de nombre “Condicionesambientales2” y la línea 49 cierra la ventana actual “menusel”.

De las líneas 54 a la 57 servirán para detectar el evento de pulsación sobre el pulsador “EJERCICIO 3”. La línea 54 permite abrir el programa de simulink asociado al ejercicio 3 de nombre “SIMULADORCOLREGEx3”, la línea 56 abre el panel siguiente de nombre “Condicionesambientales3” y la línea 55 cierra la ventana actual “menusel”.

De las líneas de la 62 a la 65 corresponden igualmente que para las anteriores pero aplicado al “EJERCICIO 4”. La línea 62 permite abrir el programa de simulink asociado al ejercicio 4 de nombre “SIMULADORCOLREGEx4”, la línea 64 abre el panel siguiente de nombre “Condicionesambientales4” y la línea 65 cierra la ventana actual “menusel”.

De las líneas de la 70 a la 73 corresponden igualmente que para las anteriores cuando se pulse el pulsador, pero aplicado al pulsador “EJERCICIO 1”. La línea 70 permite abrir el programa de simulink asociado al ejercicio 1 de nombre “SIMULADORCOLREGEx1”, la línea 72 abre el panel siguiente de nombre “Condicionesambientales1” y la línea 73 cierra la ventana actual “menusel”.

Tras pulsar sobre cualquiera de los pulsadores cuyos nombres son “EJERCICIO 1,2,3 o 4”, se abrirán respectivamente cada uno de los siguientes paneles “Condicionesambientales 1,2,3 o 4” con aspecto idéntico. (Ver figura 106). Cerrándose también el panel “menusel”.

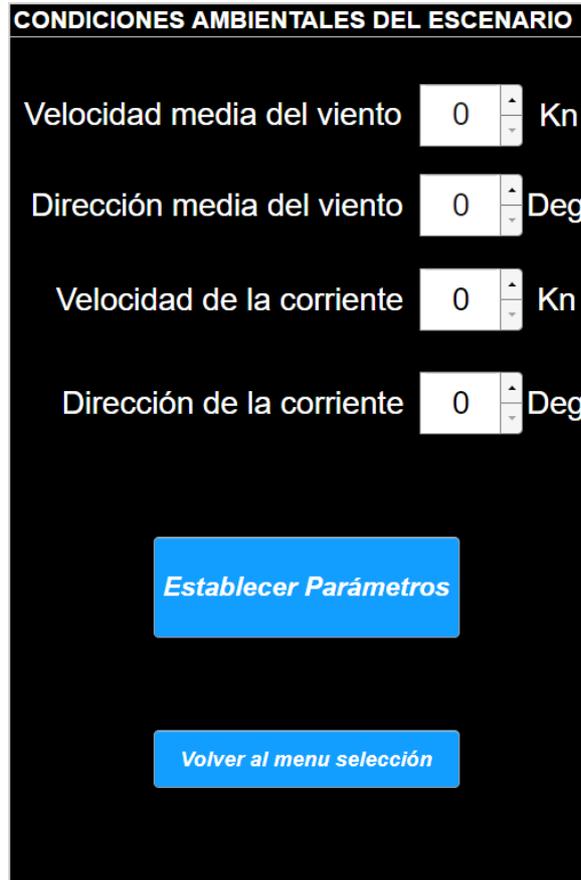


Figura 106. Vista de los paneles Condicionesambientales 1,2,3 o 4.

Este panel permitirá al alumno establecer antes del inicio de la simulación las condiciones ambientales del escenario. Su código se muestra en la siguiente figura.

```

31 % Button pushed function: EstablecerParmetrosButton
32 function EstablecerParmetrosButtonPushed(app, event)
33     value = app.DireccindelacorrienteSpinner.Value;
34     set_param('SIMULADORCOLREGEx1/Dcorriente', 'Value', num2str(value));
35     value = app.VelocidaddelacorrienteSpinner.Value;
36     set_param('SIMULADORCOLREGEx1/Vcurrentmeancomponent', 'Value', num2str(value));
37     value = app.DireccinmediadelvientoSpinner.Value;
38     set_param('SIMULADORCOLREGEx1/DwindTenMeters', 'Value', num2str(value));
39     value = app.VelocidadmediadelvientoSpinner.Value;
40     set_param('SIMULADORCOLREGEx1/VwindTenMeters', 'Value', num2str(value));
41     ControlEjercicio1();
42     delete(app)
43
44 end
45
46 % Button pushed function: VolveralmenuseleccinButton
47 function VolveralmenuseleccinButtonPushed(app, event)
48     close_system('SIMULADORCOLREGEx1',0);
49     menusel();
50     delete(app)

```

Figura 107. Se muestra el código del panel Condicionesambientales1.

Comentando el código se indica como de la línea 33 a la 42 se ejecutará cuando el usuario pulse el pulsador del panel “Establecer”. En la línea 33 se asocia una variable de nombre “value” al elemento “app.DireccindelacorrienteSpinner”. En la línea 34 se establece ese valor al elemento de simulink de nombre “Dcorriente”. En la línea 35 se asocia una variable de nombre “value” al elemento “app.VelocidaddelacorrienteSpinner”. En la línea 36 se establece ese valor al elemento de simulink de nombre “Vcurrentmeancomponent”. En la línea 37 se asocia una variable de nombre “value” al elemento

“app.DireccionmediadelvientoSpinner”. En la línea 38 se establece ese valor al elemento de simulink de nombre “DwindTenMeters”. En la línea 39 se asocia una variable de nombre “value” al elemento “app.VelocidadmediadelvientoSpinner”. En la línea 40 se establece ese valor al elemento de simulink de nombre “VwindTenMeters”. La línea 41 permite al usuario abrir el panel de nombre “ControlEjercicio1” y la línea 42 cerrar el panel actual.

De las líneas 47 a la 49 se ejecutarán con el evento de pulsación del pulsador de nombre “Volveralmenuseleccin”, la línea 47 cierra el modelo de simulink “SIMULADORCOLREGEx1”, la línea 48 abre el panel “menusel” y la línea 49 cierra el panel actual.

Tras pulsar sobre cualquiera de los pulsadores “Establecer” visto en la figura 110 se accede a los paneles correspondientes cuyos nombres son “EJERCICIO 1,2,3 o 4”, se abrirán respectivamente cada uno de los siguientes paneles “ControlEjercicio 1,2,3 o 4” con aspecto idéntico al resto. (Ver figura 108). Cerrándose también el panel “menusel”.

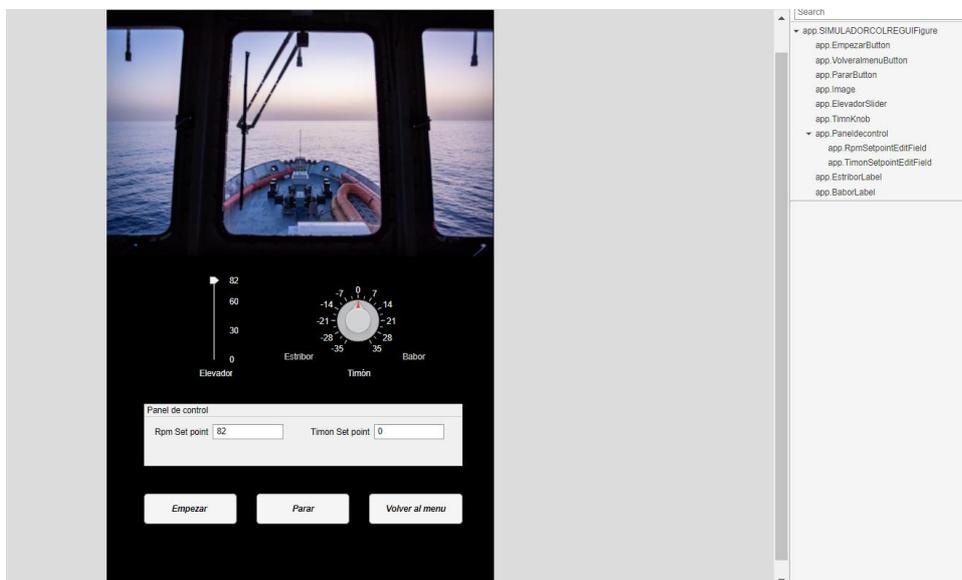


Figura 108. Vista de los paneles “ControlEjercicio 1,2,3 o 4” del simulador.

Este panel permitirá al alumno oficial instruido sumergirse en el entorno real, teniendo la posibilidad de encontrarse dentro del puente de gobierno del barco. En este panel se pueden dar ordenes de timón y de palanca, se puede visualizar el valor de las órdenes indicadas en el panel de control, también será capaz de iniciar la simulación en Matlab simulink para empezar el ejercicio, parar la simulación y volver al menú de selección de ejercicios.

A continuación se muestra la programación de los elementos de este panel comentando cada una de sus líneas. (Ver figura 109). Para la animación del timón y de la palanca se ha intentado poner imágenes en movimiento para que tuviese más realismo, pero esa capacidad en AppDesigner de introducir elementos se ha introducido en Matlab 2022 y no en Matlab 2020a con la que se ha hecho el simulador.

```

30 % Code that executes after component creation
31 function startupFcn(app)
32     app.PararButton.Enable='off';
33
34 end
35
36 % Button pushed function: EmpezarButton
37 function EmpezarButtonPushed(app, event)
38     app.PararButton.Enable='on';
39     app.VolveralmenuButton.Enable='off';
40     app.EmpezarButton.Enable='off';
41     sim('SIMULADORCOLREGEx1');
42
43 end
44
45 % Button pushed function: VolveralmenuButton
46 function VolveralmenuButtonPushed(app, event)
47     close_system('SIMULADORCOLREGEx1',0);
48     menusel();
49     delete(app)
50
51 end
52
53 % Button pushed function: PararButton
54 function PararButtonPushed(app, event)
55     app.EmpezarButton.Enable='off';
56     app.VolveralmenuButton.Enable='on';
57     g = get_param('SIMULADORCOLREGEx1/Stop','Gain');
58     v = str2double(g) + 1;
59     set_param('SIMULADORCOLREGEx1/Stop','Gain',num2str(v));
60
61 end
62
63 % Value changed function: TimKnob
64 function TimKnobValueChanged(app, event)
65     value = app.TimKnob.Value;
66     set_param('SIMULADORCOLREGEx1/Rudderangle','Value',num2str(value));
67     app.TimonSetpointEditField.Value=num2str(value);
68
69 end
70
71 % Value changed function: ElevadorSlider
72 function ElevadorSliderValueChanged(app, event)
73     value2 = app.ElevadorSlider.Value;
74     set_param('SIMULADORCOLREGEx1/rpm1','Value',num2str(value2));
75     app.RpmSetpointEditField.Value=num2str(value2);
76
77 end
78
79 end

```

Figura 109. Programación del panel ControlEjercicio 1 similar a las de ControlEjercicio 2,3,4.

De las líneas 31 a la 34 mostradas en la figura 109 se ejecuta el evento “startupFcn” nada más abrirse el panel “ControlEjercicio 1”, en la línea 32 se deshabilita el pulsador de nombre “PararButton” para parar la simulación, ya que en el momento de abrir el panel la simulación se encuentra inicialmente en modo stop hasta que el usuario accione el pulsador “Empezar”.

De las líneas de la 37 a la 43 se muestra la programación del evento que se produce al pulsar el pulsador “Empezar”. En la línea 38 se habilita el pulsador “Parar”, En la línea 39 el pulsador “Volver al menú” se deshabilita. En la línea 40 el pulsador “Empezar” se deshabilita y en la línea 41 se ejecuta o arranca la simulación del modelo en Matlab-Simulink.

De las líneas 46 a 50 se programa el evento del pulsador “Volver al menú” de manera que en la línea 47 permite cerrar directamente el modelo de Matlab-Simulink que se encuentre abierto. En la línea 48 se abre el panel “menusel” para poder volver a seleccionar un nuevo ejercicio. En la línea 49 de cierra el panel actual “ControlEjercicio 1”.

De las líneas 53 a la 60 se programa el evento del pulsador “Parar” que permite parar la simulación. En la línea 54 se deshabilita el pulsador “Empezar” ya que se deberá volver al menú selección “menusel” para cargar de nuevo el ejercicio. En la línea 55 se habilita el pulsador “Volver al menú”. En la línea 56, 57 y 58 lo que se hace es que se escribe un valor de “1” en un elemento tipo “Gain” de Matlab simulink para permitir que el ejercicio pare. (ver figura 110).

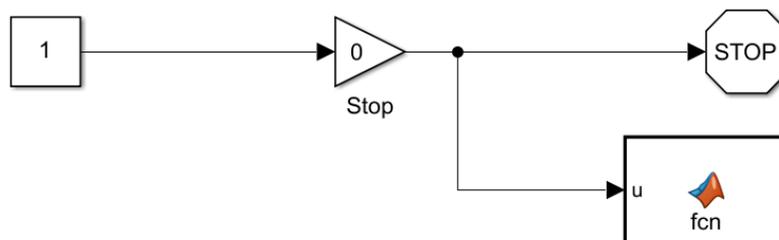


Figura 110. Desde el GUI se escribe un “1” en el “Gain” de nombre “Stop” y para la simulación.

Tras parar la simulación hay que tener en cuenta que hace falta cerrar la figura también y para esto se crea la siguiente sección de código encontrado en la referencia [49]. (ver figura 111).

```

1 function fcn(u)
2     if u==1
3         close
4         %Estas dos lineas de abajo cierran la ventana que se queda abierta de
5         %datos al parar desde GUI.
6         fh=findall(0,'Type','Figure');
7         close(fh(1));
8     end

```

Figura 111. Sección de código para el cierre de la figura tras parar la simulación.

Siguiendo con la descripción de las líneas de la figura 111 se procede a programar como el panel es capaz de escribir valores en los elementos del modelo “SIMULADORCOLREGEx1” en Matlab simulink para ello, en las líneas de la 63 a la 67 se programa la escritura de valores para la rueda del timón. En la línea 64 se guarda el valor del objeto del panel en la variable “value”, en la línea 65 se escribe el valor de “value” en el elemento de Matlab simulink constante “RudderAngle”, para ello se convierte previamente el valor de “value” de tipo numérico a string. En la línea 66 se escribe el valor de “value” en el elemento “Editfield” del mismo panel “ControlEjercicio 1” que permite ver la orden seleccionada.

En las líneas de la 70 a la 74 se programa la escritura de valores para la palanca de velocidad en revoluciones por minuto de manera que de anera análoga que para el timón. En la línea 71 se guarda el valor del objeto del panel en la variable “value2”, en la línea 72 se escribe el valor de “value2” en el elemento de Matlab simulink constante “rpm1”, para ello se convierte previamente el valor de “value2” de tipo numérico a string. En la línea 73 se escribe el valor de “value2” en el elemento “Editfield” del mismo panel “ControlEjercicio 1” que permite ver la orden seleccionada.

Para ofrecer al usuario un resumen de los datos de navegación que se están produciendo en tiempo real y pueda interpretar mejor la situación en la que está sumergido, se programa el panel “datos”. Se requiere un algoritmo especial para que el panel “datos” de “AppDesigner” pueda leer directamente variables del modelo de Matlab-Simulink. Ya que no puede ser resuelto este problema de manera trivial, se realiza una profunda búsqueda en la web y todos los usuarios coinciden con la misma solución descrita en la referencia siguiente [50] por lo que se hace uso de este método aplicado al simulador COLREG y da buen resultado.

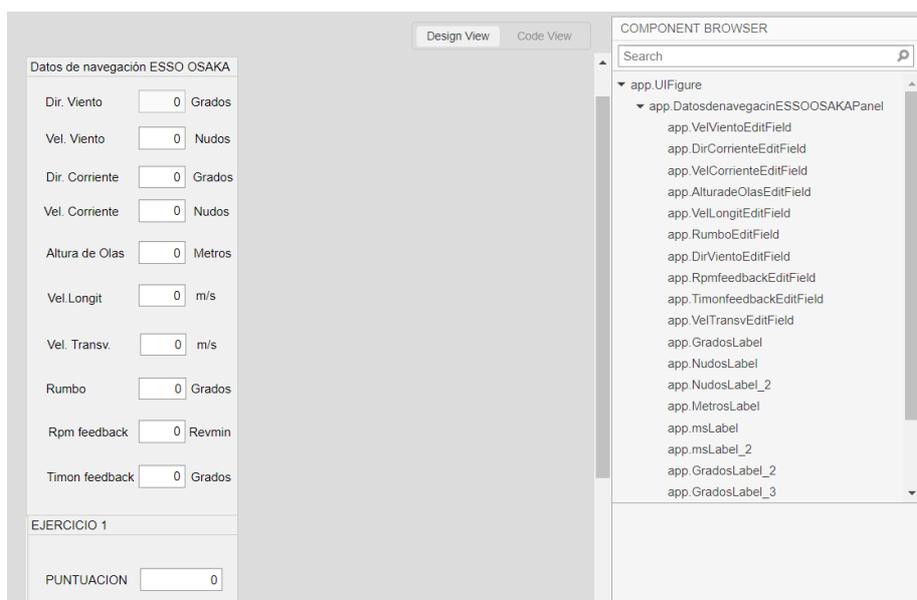


Figura 112. Vista del panel “datos” donde se muestran los datos de navegación del modelo.

La programación para la lectura de los datos del modelo desde el panel ha sido la siguiente (ver figuras 113 y 114). El flujo de datos se produce desde el modelo de simulink al panel “datos”. La llamada se realiza cada vez que simulink ejecuta el elemento descrito con el nombre de variable “blk”.

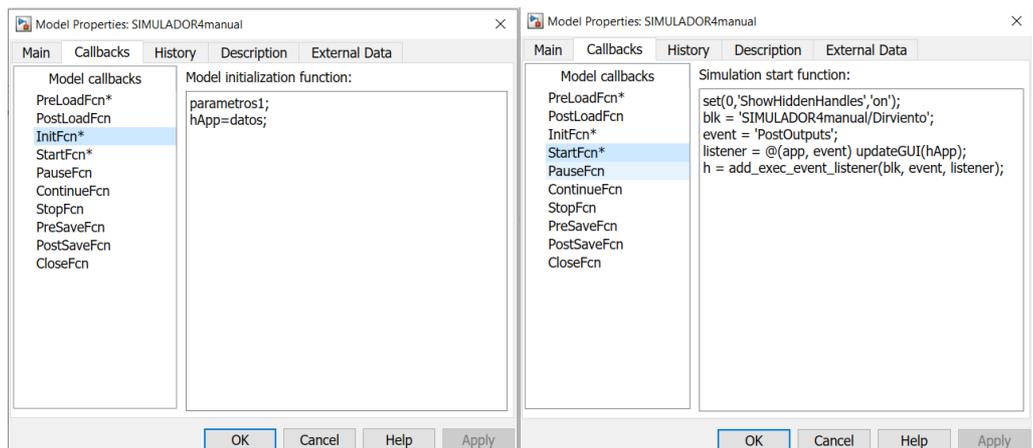


Figura 113. Programación necesaria para la llamada periódica al panel en la sección de model properties de Matlab-Simulink.

En el panel se programa la siguiente función que es la que escucha los datos que Matlab-simulink esta enviando de forma continua (ver figura 114). En el presente caso por cada variable que se quiera compartir se ha añadido dos líneas de código.

```

44 methods (Access = public)
45
46 function updateGUI(app, varargin)
47     rto = get_param([bdroot, '/Dirviento'], 'RuntimeObject');
48     app.DirvientoEditField.Value = rto.InputPort(1).Data;
49     rto_2 = get_param([bdroot, '/Velviento'], 'RuntimeObject');
50     app.VelvientoEditField.Value = rto_2.InputPort(1).Data;
51     rto_3 = get_param([bdroot, '/Dircorriente'], 'RuntimeObject');
52     app.DirCorrienteEditField.Value = rto_3.InputPort(1).Data;
53     rto_4 = get_param([bdroot, '/Velcorriente'], 'RuntimeObject');
54     app.VelCorrienteEditField.Value = rto_4.InputPort(1).Data;
55     rto_5 = get_param([bdroot, '/Alturaolas'], 'RuntimeObject');
56     app.AlturadeOlasEditField.Value = rto_5.InputPort(1).Data;
57     rto_6 = get_param([bdroot, '/LongSpeed'], 'RuntimeObject');
58     app.VelLongitEditField.Value = rto_6.InputPort(1).Data;
59     rto_7 = get_param([bdroot, '/TransvSpeed'], 'RuntimeObject');
60     app.VelTransvEditField.Value = rto_7.InputPort(1).Data;
61     rto_8 = get_param([bdroot, '/Course'], 'RuntimeObject');
62     app.RumboEditField.Value = rto_8.InputPort(1).Data;
63     rto_9 = get_param([bdroot, '/rpmdisplay'], 'RuntimeObject');
64     app.RpmfeedbackEditField.Value = rto_9.InputPort(1).Data;
65     rto_10 = get_param([bdroot, '/ruddisplay'], 'RuntimeObject');
66     app.TimonfeedbackEditField.Value = rto_10.InputPort(1).Data;
67     %rto_11 = get_param([bdroot, '/mess'], 'RuntimeObject');
68     %app.INCIDENTIASEditField.Value = string(rto_11.InputPort(1).Data);
69     rto_12 = get_param([bdroot, '/Score'], 'RuntimeObject');
70     app.PUNTUACIONEditField.Value = rto_12.InputPort(1).Data;
71
72     % Pause to see the changes
73     pause(0.5);
74
75 end
76
77
78
79
80 % Callbacks that handle component events
81 methods (Access = private)
82
83 % Close request function: UIFigure
84 function UIFigureCloseRequest(app, event)
85     delete(app)
86 end
87 end

```

Figura 114. Sección de código del panel “datos” para la lectura de las variables.

Por último, se muestra en la siguiente figura 115 los elementos que están siendo leídos desde el panel “datos”.

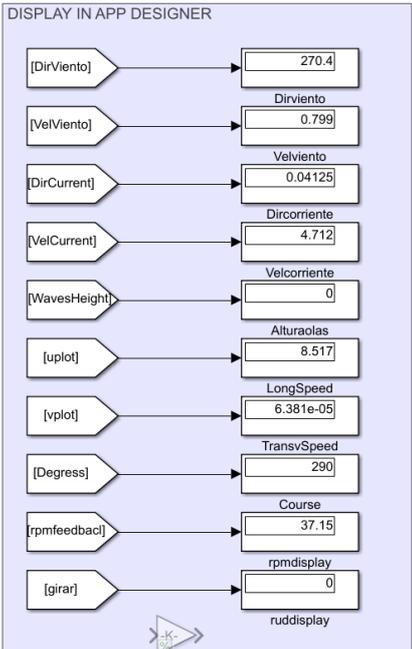


Figura 115. Elementos leídos por la función programada del panel “datos”.

4 RESULTADOS EN SIMULACIÓN

En esta sección se muestra al completo la materialización física del simulador COLREG en distintas secciones, permitiéndolo ver totalmente la interacción del usuario final con el mismo.

4.1 Validación de los modelos.

Como se describe en el punto **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se han obtenido las siguientes curvas de los ensayos preparados para tal fin, previo a la integración de los dos modelos de barcos distintos en un mismo modelo de Matlab-Simulink.

4.1.1 Esso Osaka.

Para el ESSO OSAKA lo primero que se prueba es la velocidad máxima que alcanza el buque en línea recta que son unos 16 nudos. (Ver figura 116).

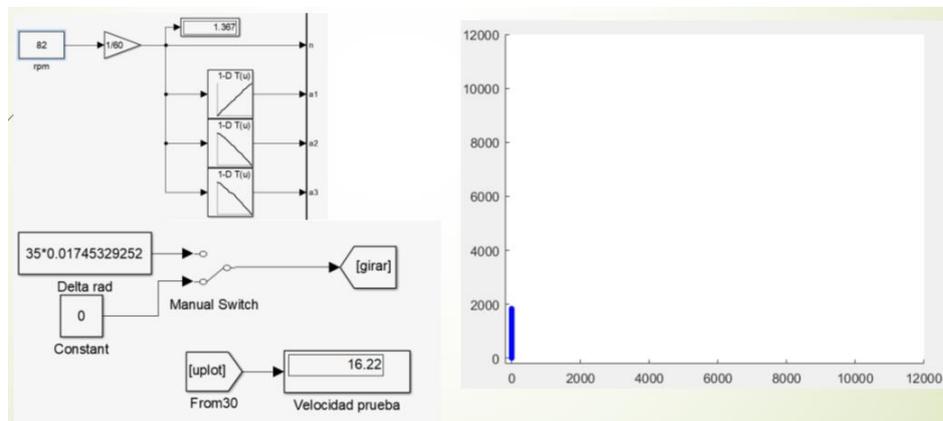


Figura 116. La velocidad máxima que alcanza el modelo Esso Osaka coincide aproximadamente con la esperada.

La prueba siguiente que se realiza es bajar la potencia de propulsión del barco, esto es, bajando las revoluciones por minuto del eje del motor “59 rpm” y la velocidad se aprecia que baja a los 10 nudos.

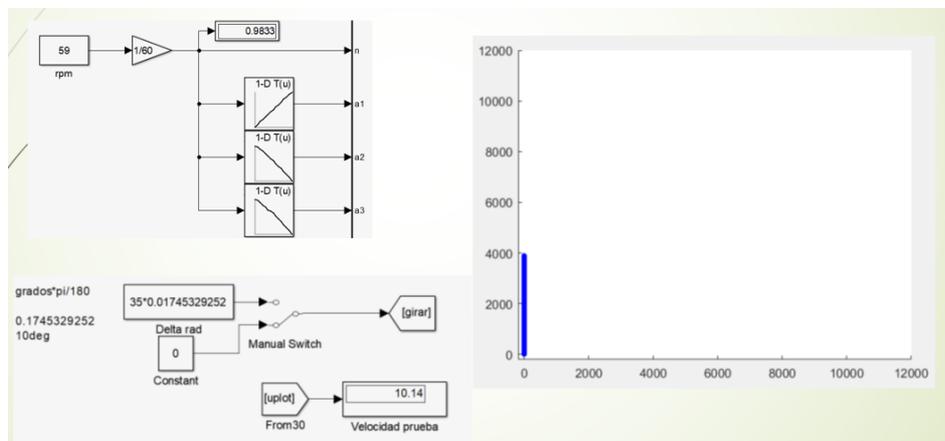


Figura 117. Se muestra como el buque Esso Osaka marcha en línea recta a 10 nudos.

Si se siguen bajando las revoluciones por minuto del motor la velocidad que alcanza el buque sigue bajando,

por ejemplo, para 49 revoluciones por minuto se alcanzan los 7,7 nudos. (Ver figura 118).

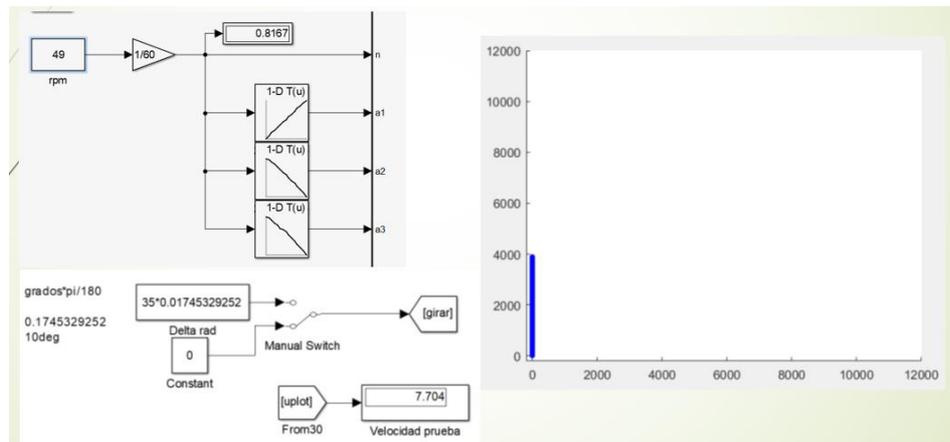


Figura 118. Se muestra como el buque Esso Osaka marcha en línea recta a 7,7 nudos.

Para unas condiciones de 10 nudos y -35 ángulo de timón a estribor se consigue la siguiente curva de respuesta mostrada en la figura 156, también los siguientes datos de pruebas experimentales de mar mostrados en la figura 154, en concreto, en el modelo se obtiene un diámetro táctico de 941 metros respecto los 940 metros del real. 980.6 metros de avance respecto de los 980 metros de la curva real y 441.8 metros de transferencia respecto los 480 metros del real. Se observa como en el giro la velocidad del buque baja a los 4.6 nudos.

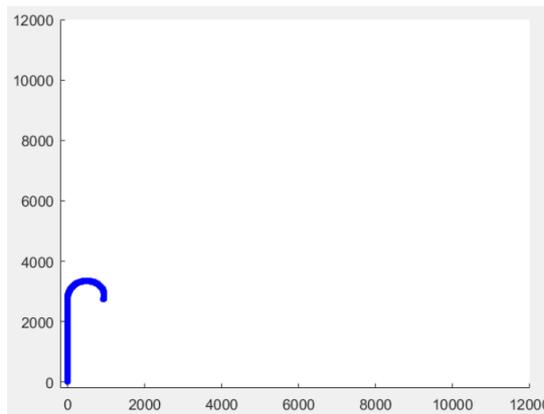


Figura 119. Curva experimental de respuesta del modelo Esso Osaka.

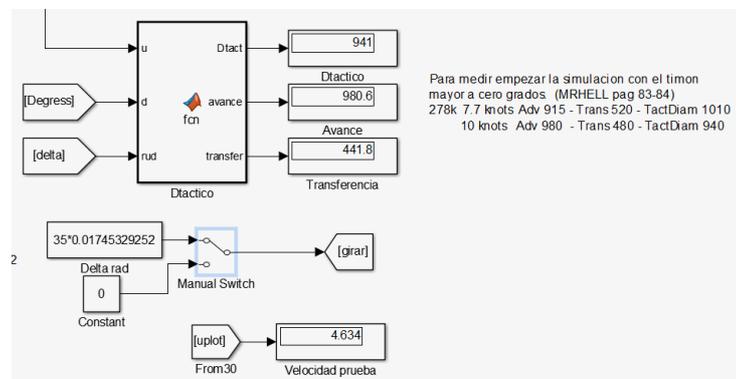


Figura 120. Valores alcanzados en la prueba de giro 35 grados a estribor.

Para las mismas condiciones anteriores, pero +35 ángulo de timón a babor se consigue la siguiente curva de respuesta. (Ver figura 121).

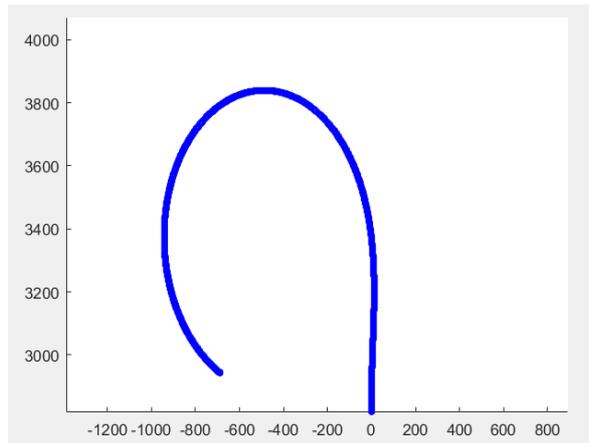


Figura 121. Curva experimental de respuesta 35 grados a babor del modelo Esso Osaka.

En la siguiente prueba se introducen condiciones ambientales en la simulación. Para ver como afecta la misma al comportamiento del barco, en concreto, el efecto de una velocidad de corriente de 1.98 nudos y en dirección cero grados al norte (mismo sentido del movimiento). El resto de condiciones son las mostradas en la figura 117 para 59 revoluciones por minuto. Al añadir el efecto de la corriente en la misma se aprecia en la figura 122 como la velocidad del movimiento aumenta de 10.14 nudos a 10.24 nudos.

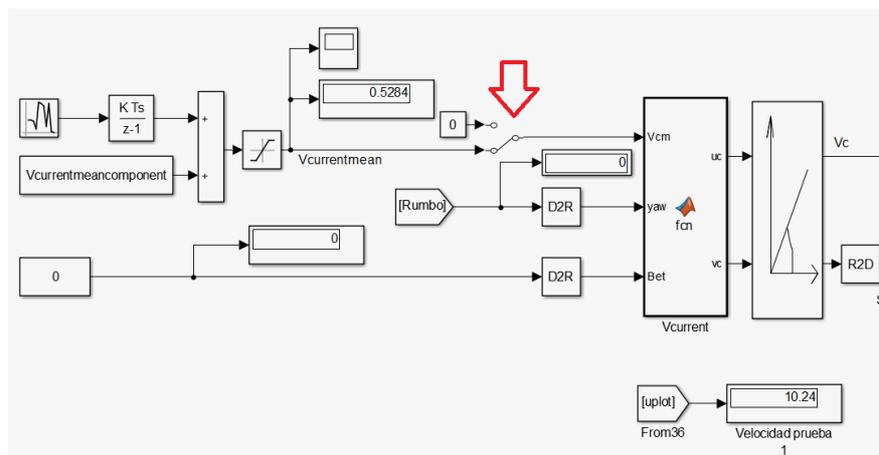


Figura 122. Velocidad que alcanza el modelo en la prueba realizada introduciendo corriente.

Si bajo las mismas condiciones tan solo se cambia la dirección de la corriente y se pone totalmente en contra del movimiento con una dirección de corriente de 180 grados se observa que la velocidad disminuye de 10.14 nudos a 10.09. (Ver figura 123).

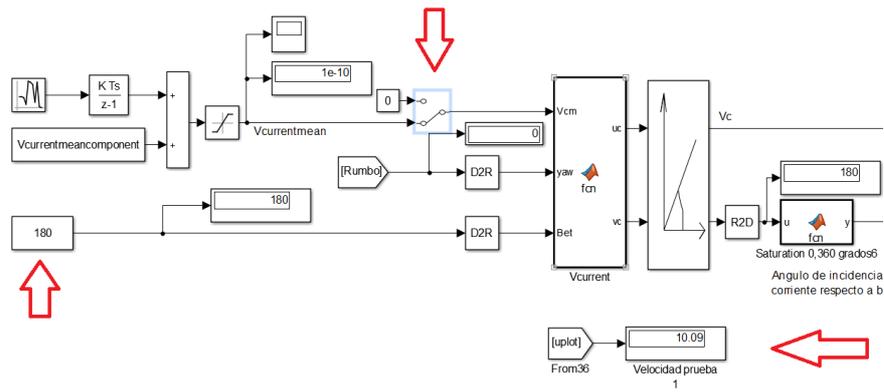


Figura 123. Comportamiento del buque ante una corriente en contra del movimiento de 1.98 nudos.

En el siguiente ensayo, respecto al anterior, se vuelve a modificar tan solo la dirección de la corriente, en esta ocasión su dirección será la de 90 grados. Los grados de timón se sitúan en cero. De este modo, la respuesta del buque será la siguiente. El buque es desplazado en la dirección que sigue la corriente (Ver figura 124).

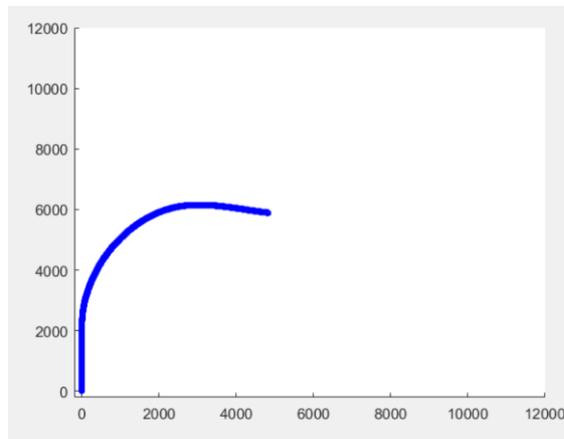


Figura 124. Respuesta de la simulación ante una fuerza de corriente en dirección 90 grados.

En el siguiente ensayo, de nuevo, se vuelve a modificar tan solo la dirección de la corriente, en esta ocasión su dirección será la de 270 grados. Los grados de timón se sitúan en cero. De este modo, la respuesta del buque será la siguiente. El buque es de nuevo desplazado en la dirección que sigue la corriente (Ver figura 125).

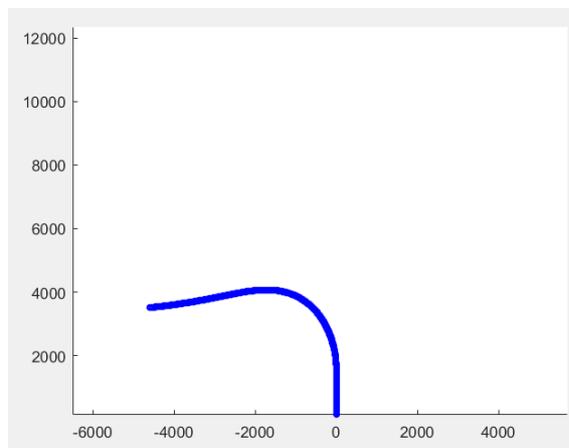


Figura 125. Respuesta de la simulación ante una fuerza de corriente en dirección 270 grados.

Para la siguiente prueba se introduce tan solo el efecto del viento en el modelo en concreto 15 nudos de viento medio y 0 grados de dirección (mismo sentido del movimiento). Se aprecia un aumento de la velocidad del barco, en concreto de 10.14 nudos que tendría para una velocidad de ejes de 54 revoluciones por minuto a 10.24 nudos. (Ver figura 126).

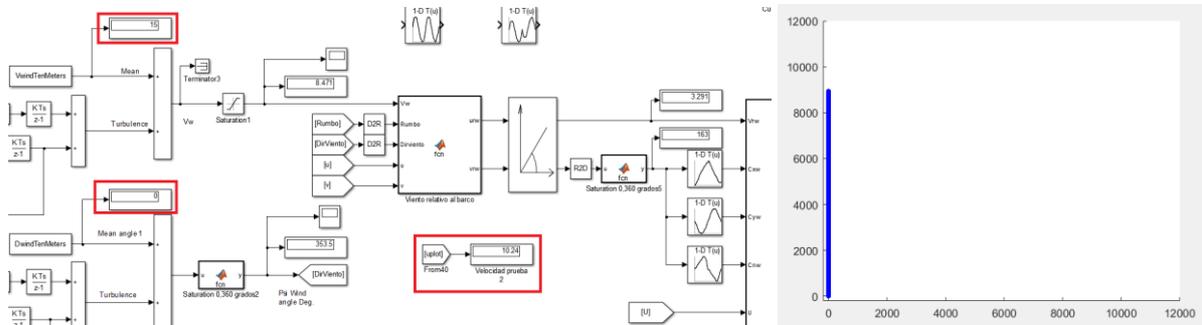


Figura 126. Comportamiento obtenido en la simulación realizada con efecto de viento a favor.

Si en el siguiente ensayo tan solo se modifica de nuevo la dirección del viento a 180 grados (en contra del movimiento del buque). Se observa como frena su velocidad. (Ver figura 127).

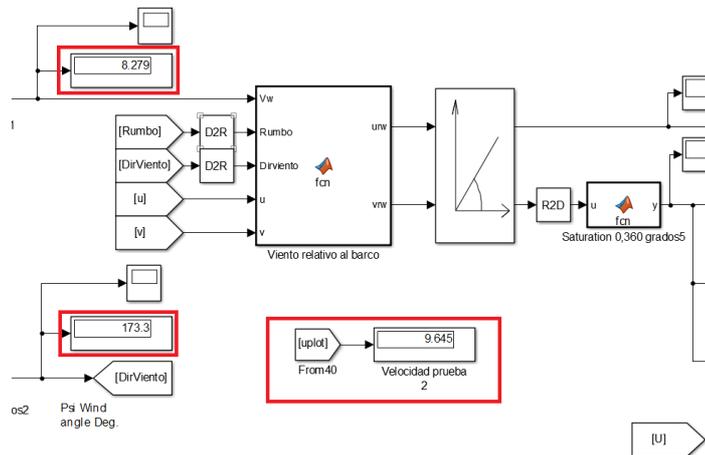


Figura 127. Comportamiento obtenido en la simulación realizada con efecto de viento en contra.

Nuevo ensayo, con las siguientes condiciones de prueba:

- ESSO OSAKA 10 nudos – 59 rpm hélices
- Viento medio 40 nudos.
- Dirección viento 90 grados

Se obtiene la siguiente curva de respuesta de movimiento. (Ver figura 128).

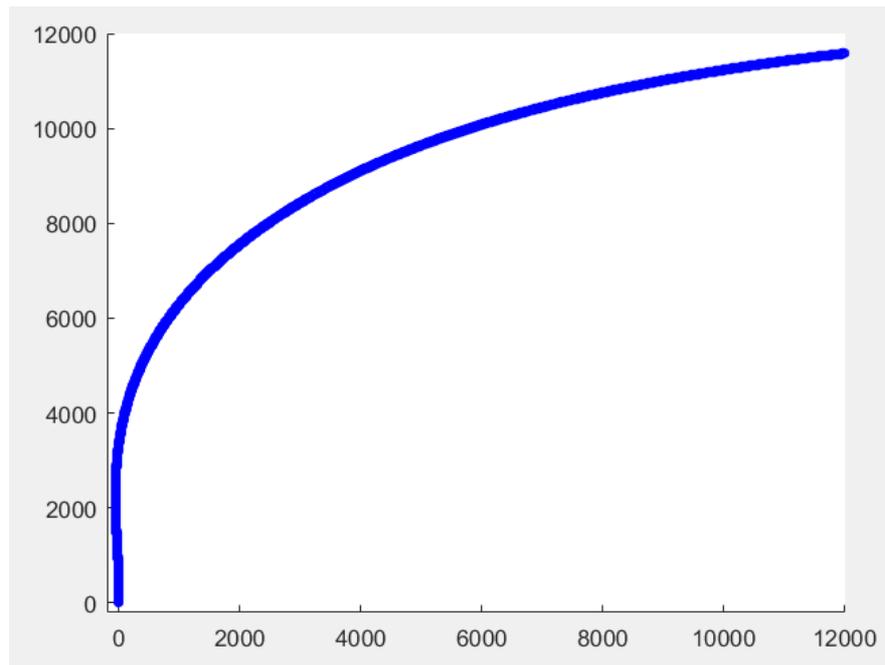


Figura 12828. Curva de respuesta cuando el viento incidente en el buque se dirige en dirección 90 grados.

Nuevo ensayo, con las siguientes condiciones de prueba:

-ESSO OSAKA 10 nudos – 59 rpm hélices

-Viento media 40 nudos.

-Dirección viento 270 grados

Se obtiene la siguiente curva de respuesta. (Ver figura 129).

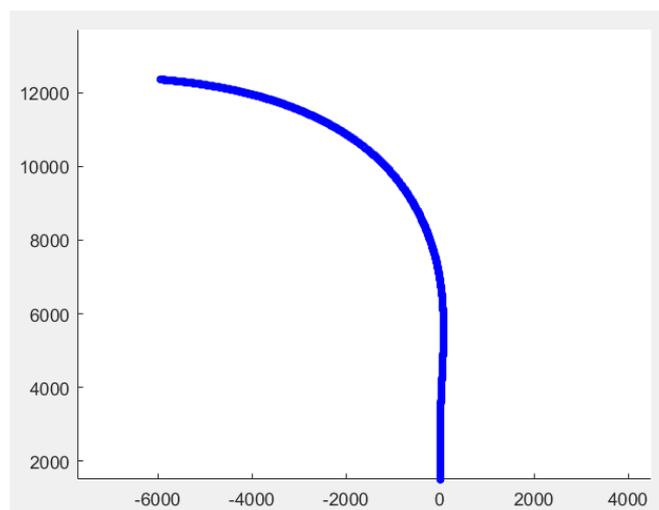


Figura 129. Curva de respuesta cuando el viento incidente en el buque se dirige en dirección 270 grados.

En la siguiente prueba se introduce el efecto de las olas en el buque obteniendo la siguiente respuesta.

Condiciones prueba:

-ESSO OSAKA 10 nudos – 59 rpm hélices.

-Viento media 33 nudos.

-Dirección olas 0 grados.

*Se observa un aumento de la velocidad del buque al tener la misma dirección que la del movimiento. Pasa de 10.14 nudos a 10.6 nudos. (Ver figura 130).

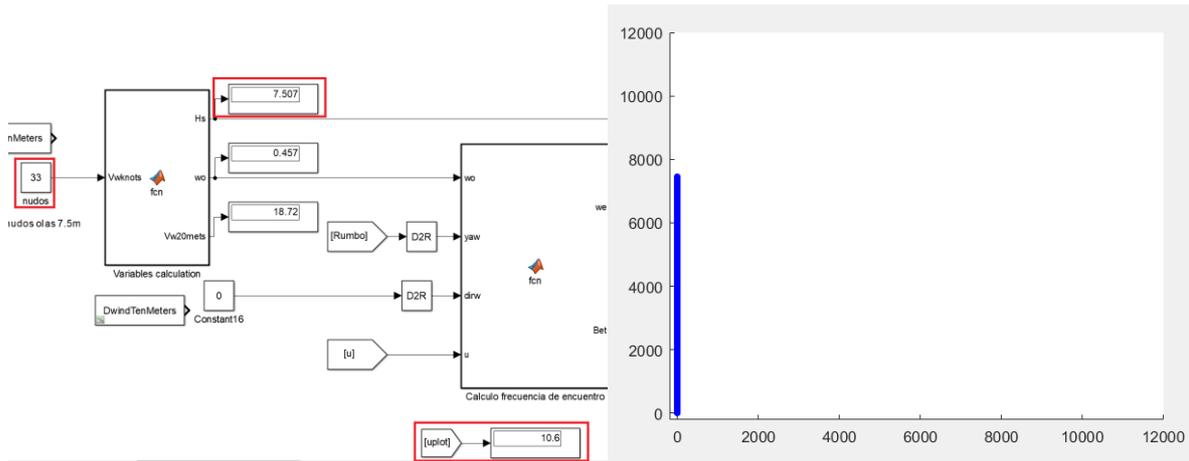


Figura 13030. Resultado de la prueba realizada introduciendo el efecto de las olas en el modelo con dirección 0 grados.

Nueva prueba introduciendo efecto de las olas sobre el buque.

Condiciones prueba:

-ESSO OSAKA 10 nudos – 59 rpm hélices

-Viento media 33 nudos.

-Dirección olas 90 grados.

Se obtiene la siguiente curva de respuesta. (Ver figura 131).

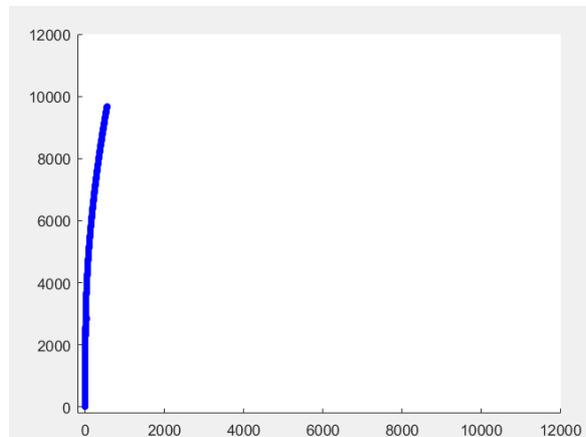


Figura 13131. Resultado de la prueba realizada introduciendo el efecto de las olas en el modelo con dirección de las olas hacia los 90 grados.

Se realiza con este modelo, por último, un ensayo sobre el modelo donde se introducen todas las condiciones ambientales modeladas (corriente, viento y oleaje), para ver el comportamiento del movimiento del buque en tal caso.

Condiciones prueba:

- ESSO OSAKA– 82 rpm hélices
- Viento media 15 nudos.
- Dirección viento y olas 90 grados
- Corriente 1.98 nudos.
- Grados corriente 0 grados.

La respuesta de comportamiento del movimiento del buque fue la siguiente. (Ver figura 132).

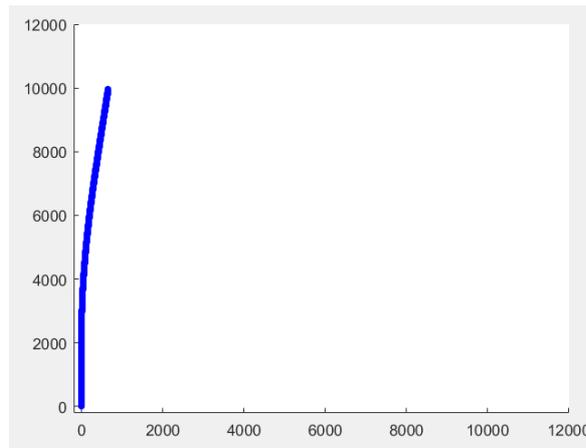


Figura 132. Curva de respuesta del modelo Esso Osaka con todas las condiciones ambientales incluidas en el modelo.

4.1.2 BAC Cantabria.

Para el Segundo modelo de buque que actuará como “bot” en los escenarios y recogido de la referencia [37], se realizan las siguientes pruebas de comportamiento del modelo.

Primero se pone el modelo a velocidad de crucero que son 15 nudos, esto se alcanza para una orden de velocidad de 70 revoluciones por minuto de las hélices. (Ver figura 133) donde se aprecia la velocidad que el buque alcanza.

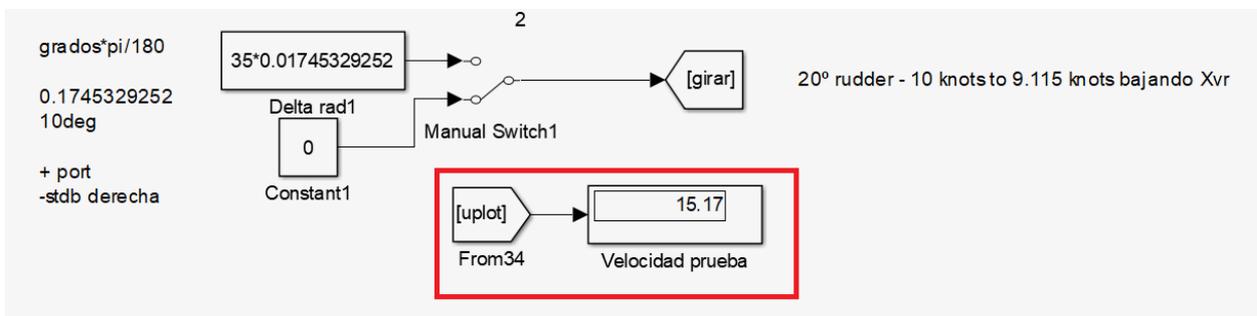


Figura 133. Velocidad de crucero que alcanza el modelo del buque es muy similar a la de los datos para el BAC Cantabria.

La respuesta del buque en esta prueba a sido la propia para condiciones ambientales nulas y cero grados de timón, el movimiento a sido totalmente en línea recta. (Ver figura 134).

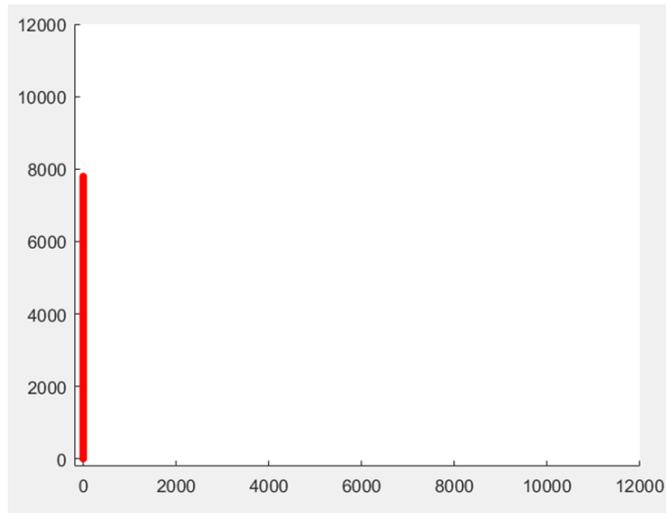


Figura 134. Respuesta buque en línea recta para el modelo del buque BAC Cantabria.

Para las pruebas de mar del modelo han sido contrastadas con la referencia [15], con efectos ambientales nulos, +35 grados de timón en dirección a estribor y una velocidad en nudos de 15. La curva de respuesta obtenida ha sido la siguiente (ver figura 135).

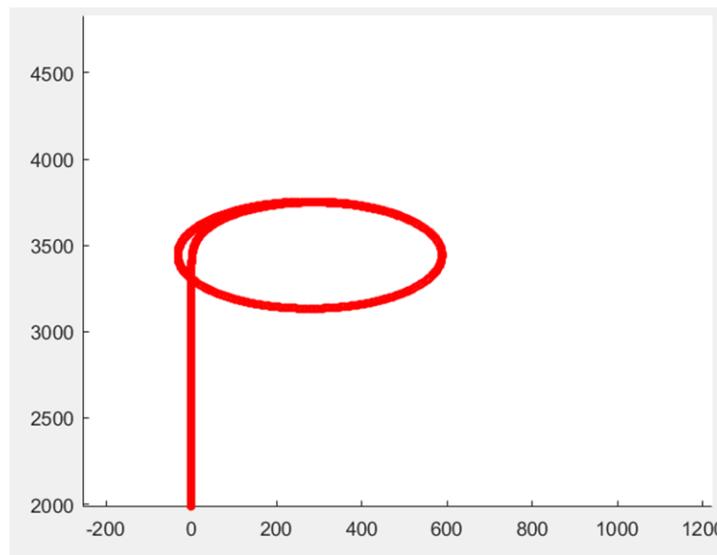


Figura 135. Respuesta de comportamiento de prueba para círculo táctico del modelo del buque BAC Cantabria.

En el caso de este modelo se toma tan solo como dato real a contrastar el diámetro táctico que según la curva de la referencia [15] fue para 15 nudos unos 565 metros obteniéndose en el modelo 587.7 metros. Para el avance y la transferencia se obtienen unos datos en el modelo que no han sido posibles contrartarlos con la realidad ante ausencia de los datos de las pruebas de mar para el mismo buque.

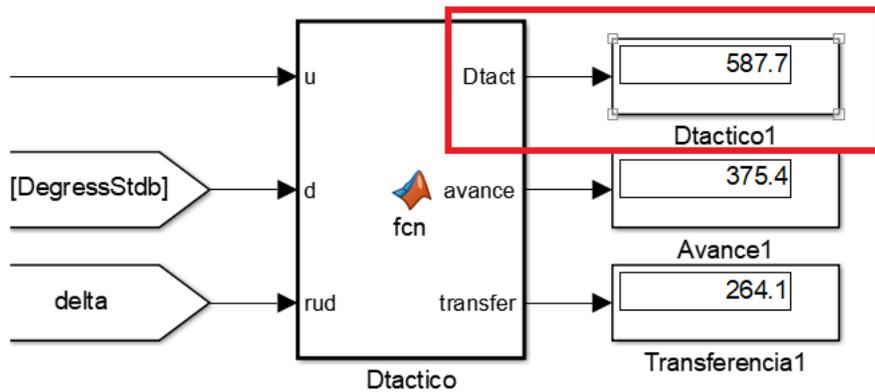


Figura 136. Datos de pruebas de mar obtenidas para el modelo del buque BAC Cantabria.

Como prueba de fuego de este modelo ha sido someterlo a las pruebas ambientales creadas para este trabajo, ya que los signos del modelo están intercambiados. Para este modelo (al contrario que el del primer buque), estribor es positivo y babor es negativo con sus consecuencias.

Condiciones de la prueba a la que se somete el modelo del BAC Cantabria:

- BAC Cantabria– 70 rpm hélices (15 nudos)
- Viento media 15 nudos.
- Dirección viento y olas 90 grados
- Corriente 1.98 nudos.
- Grados corriente 0 grados.

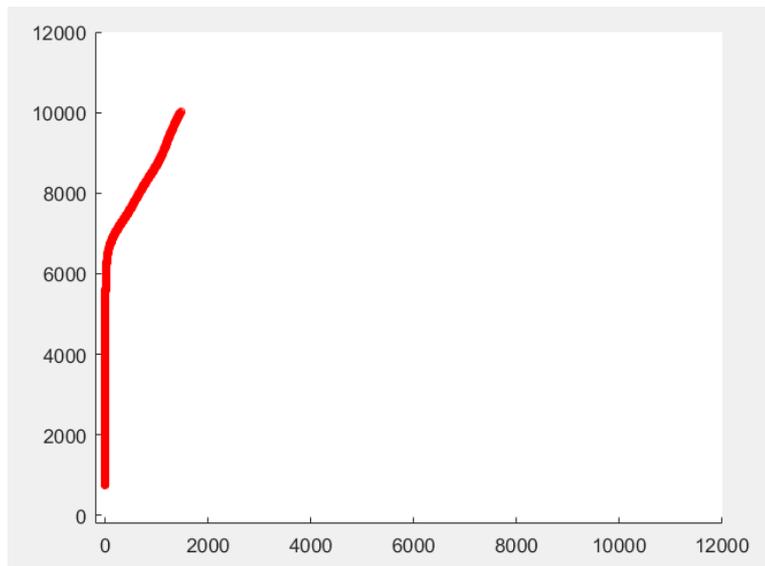


Figura 137. Trayectoria del movimiento del modelo BAC Cantabria del segundo buque ante distintas condiciones ambientales.

4.2 Navegación del simulador.

Para abrir el simulador COLREG se siguen los pasos siguientes:

1. Se abre el archivo en Matlab que contienen todos los elementos.
2. Hacer doble pulsación sobre el elemento “PantallaPrincipal.mlapp” y esperar que se abra el entorno “AppDesigner”.
3. Una vez abierto pulsar el botón play.

Una vez seguidos estos pasos se abrirá el simulador COLREG tendrá el siguiente aspecto (ver figura 138).



Figura 138. Vista de la página principal del simulador.

Tras pulsar sobre el pulsador “EMPEZAR” se accede al siguiente panel, ver siguiente imagen (ver figura 139).

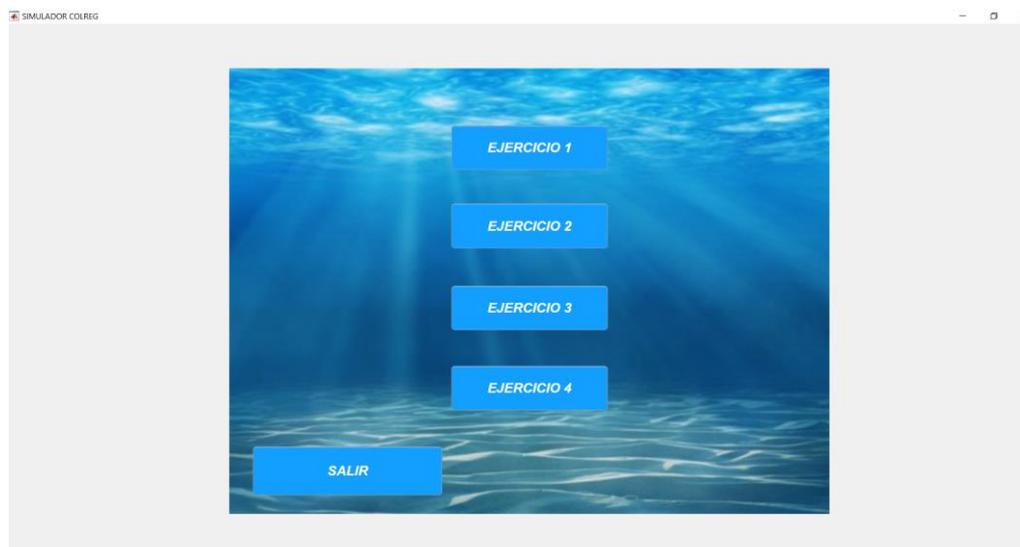


Figura 139. Vista del menú de selección principal del simulador.

Si se pulsa sobre el pulsador “SALIR” el simulador se cierra. Si se pulsa sobre los pulsadores diferentes “EJERCICIO 1,2,3,4” se accederá al panel de selección de condiciones ambientales para el escenario correspondientemente a cada uno de los cuatro ejercicios. (Ver figura 140).

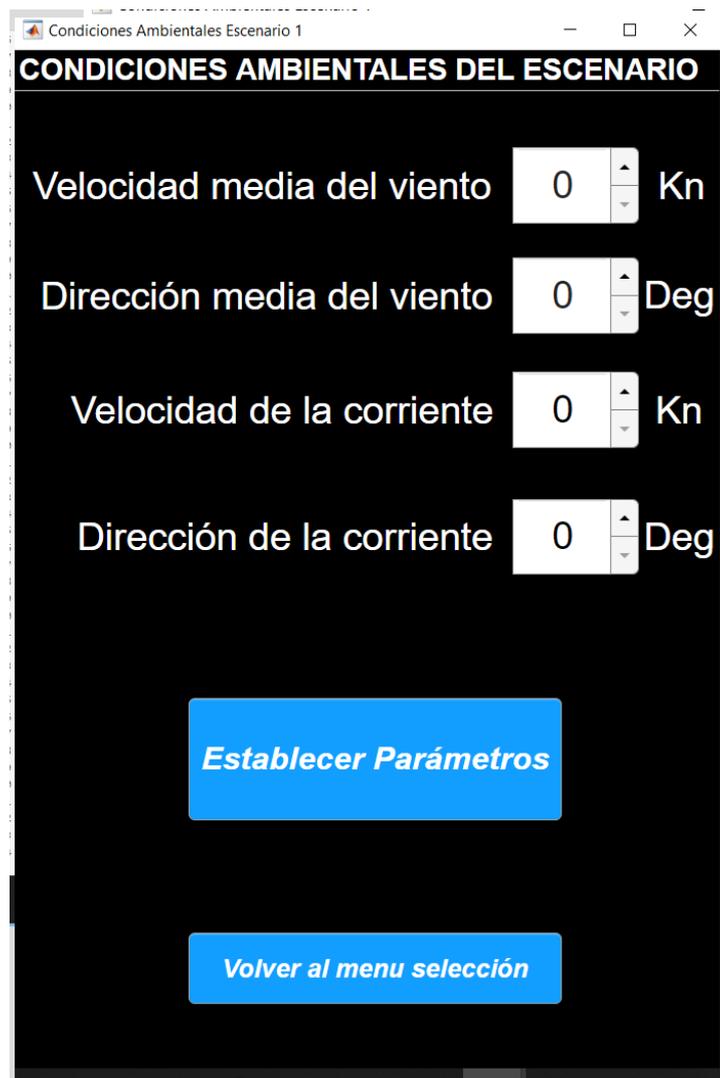


Figura 140. Vista del panel de establecimiento de condiciones ambientales previas al inicio de la simulación. Al pulsar sobre el pulsador “Establecer parámetros” se accederá al panel del cuadro de mando correspondientemente a cada uno de los cuatro ejercicios. (Ver figura 141).

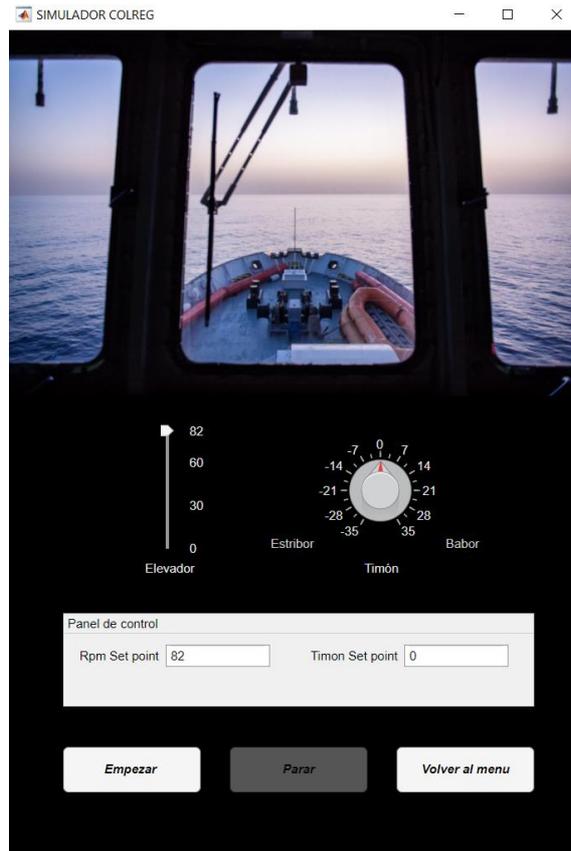


Figura 141. Vista del panel de control para cada uno de los ejercicios.

4.3 Ejercicio primero.

Si se pulsa sobre el pulsador “Empezar” de la figura 141 comienza la simulación de la situación de cruce, se muestra tal y como se aprecia en la siguiente figura 142 para el ejercicio 1.

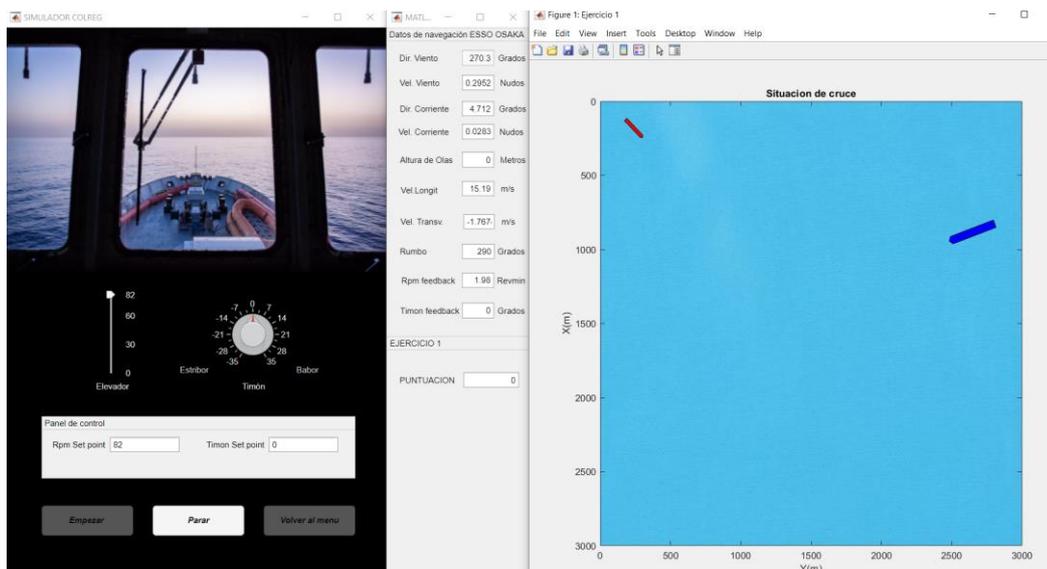


Figura 142. Vista general del ejercicio 1 del simulador COLREG.

Durante el desarrollo del ejercicio aparecerán distintos mensajes sobre la “figura 1” indicando que se han realizado las maniobras correctamente. (Ver figuras 143, 144, 145, 146 y 147).

Se establece inicialmente para hacer menos duradera la simulación que la velocidad del buque sea de 8 metros por segundo, esto produce en los instantes iniciales de la simulación unas oscilaciones indeseables en la velocidad del buque al cabo de unos segundos vuelve a su velocidad real. La primera acción ha sido reducir la velocidad del buque desde el puente de mando y girar el buque al máximo a estribor para ceder el paso al segundo buque (ver figura 143).

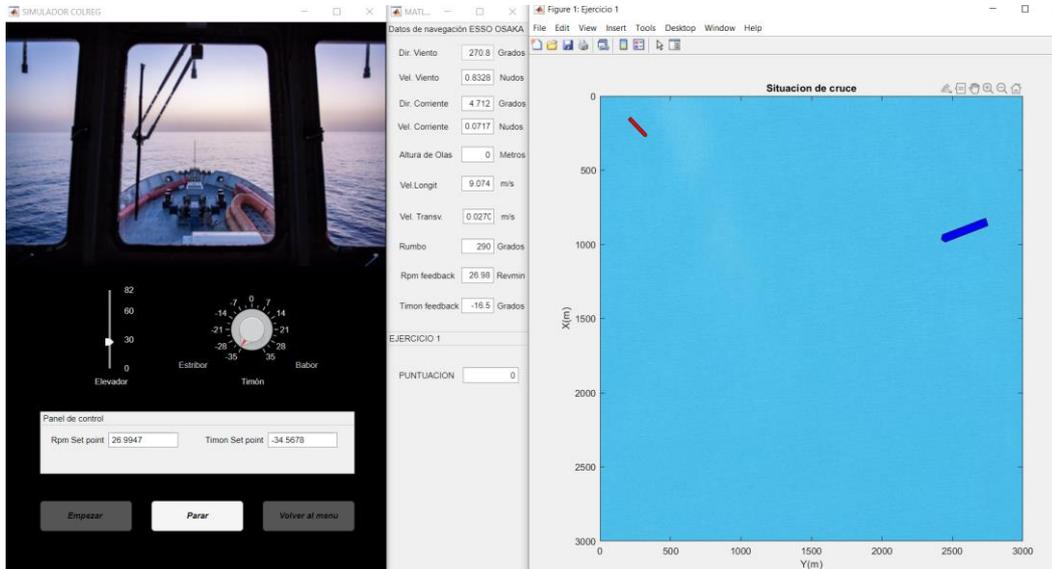


Figura 143. Vista del ejercicio 1 realizado las primeras maniobras sobre el cuadro de mando.

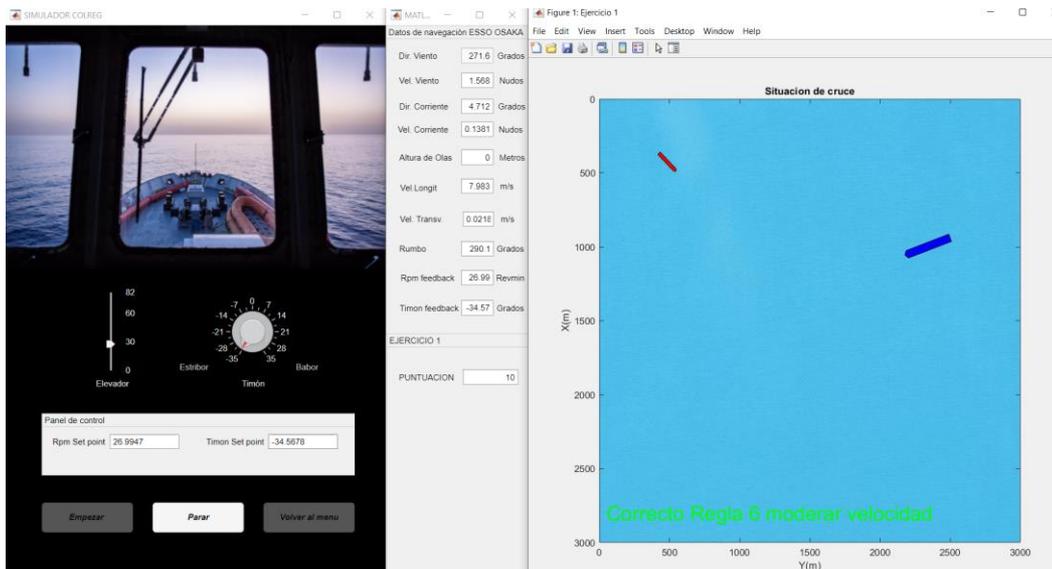


Figura 144. Mensaje en la figura tras realizar la primera maniobra correctamente.

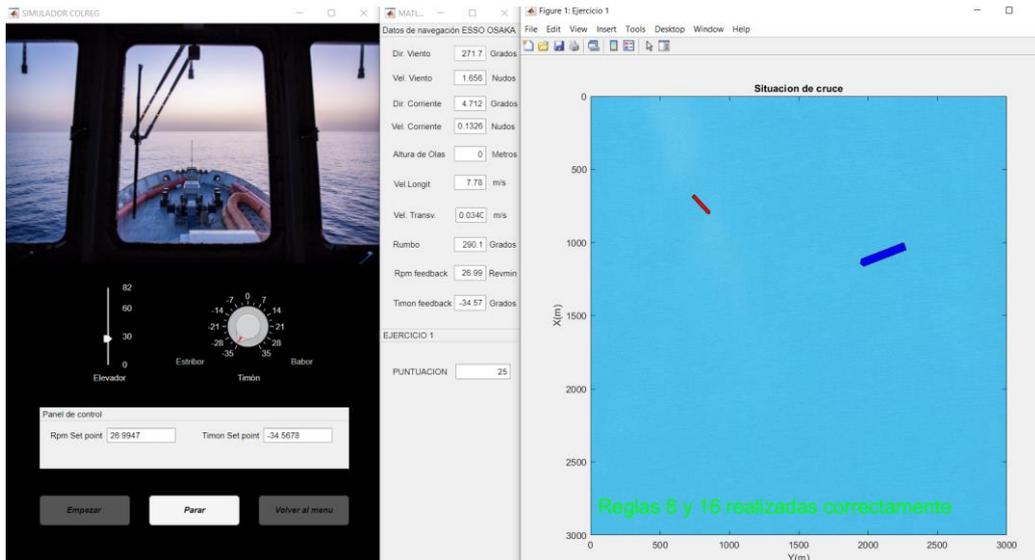


Figura 145. Mensaje tras realizar la maniobra correctamente de giro de manera clara.

Se completa la maniobra cediendo el paso al otro buque al situarse por estribor del buque propio como se muestra en las siguientes figuras.

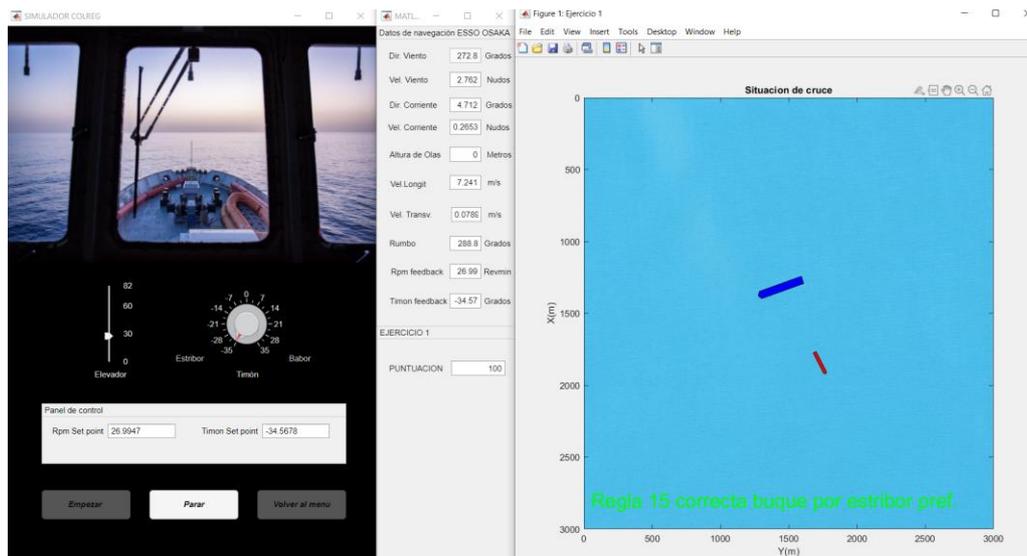


Figura 146. Mensaje tras realizar la maniobra de situación de cruce correctamente.

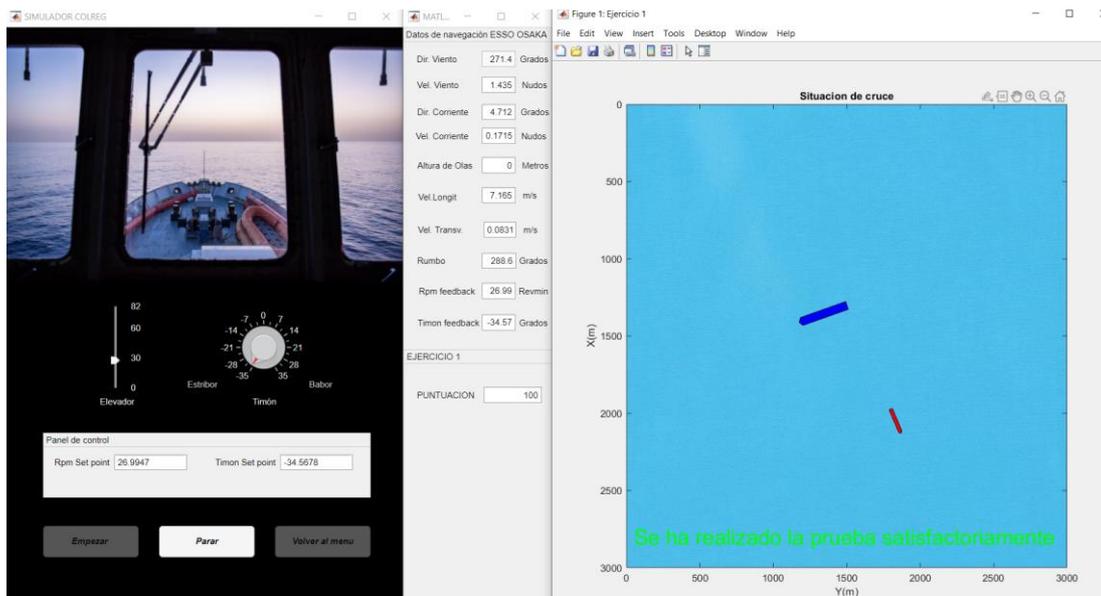


Figura 147. Mensaje en pantalla de ejercicio 1 superado.

Se añade la imagen que aparece si el ejercicio ha sido realizado de manera no satisfactoria (ver figura 148).

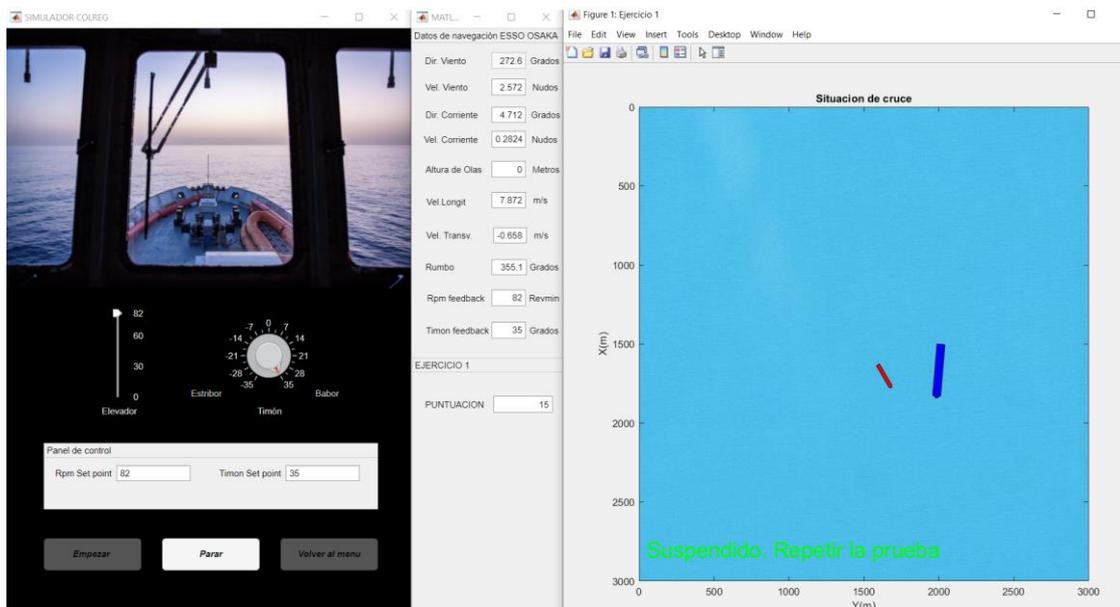


Figura 148. Mensaje en pantalla de ejercicio 1 no superado, se debe repetir la prueba de situación de cruce.

Una vez terminado el ejercicio al accionar el pulsador “Parar” se habilitará el pulsador para volver al menú “Volver al menú”. (Ver figura 149).

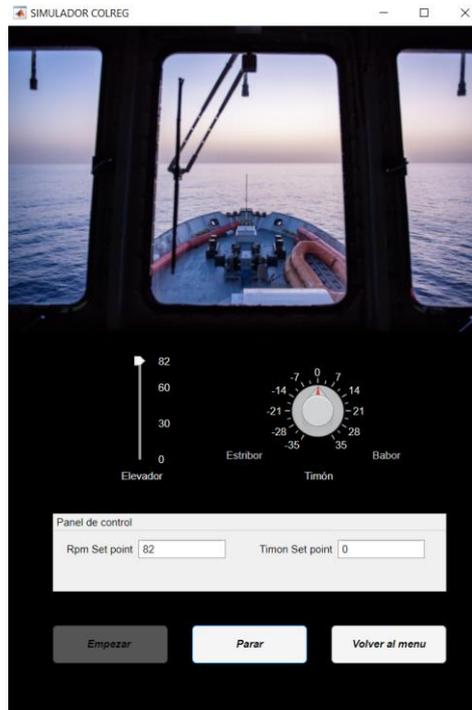


Figura 149. Aspecto del panel cuando se ha parado la simulación.

4.4 Ejercicio segundo.

Si se pulsa sobre el pulsador “Empezar” de la figura 141 comienza la simulación para la situación de vuelta encontrada, se muestra tal y como se aprecia en la siguiente figura 150 para el ejercicio 2.

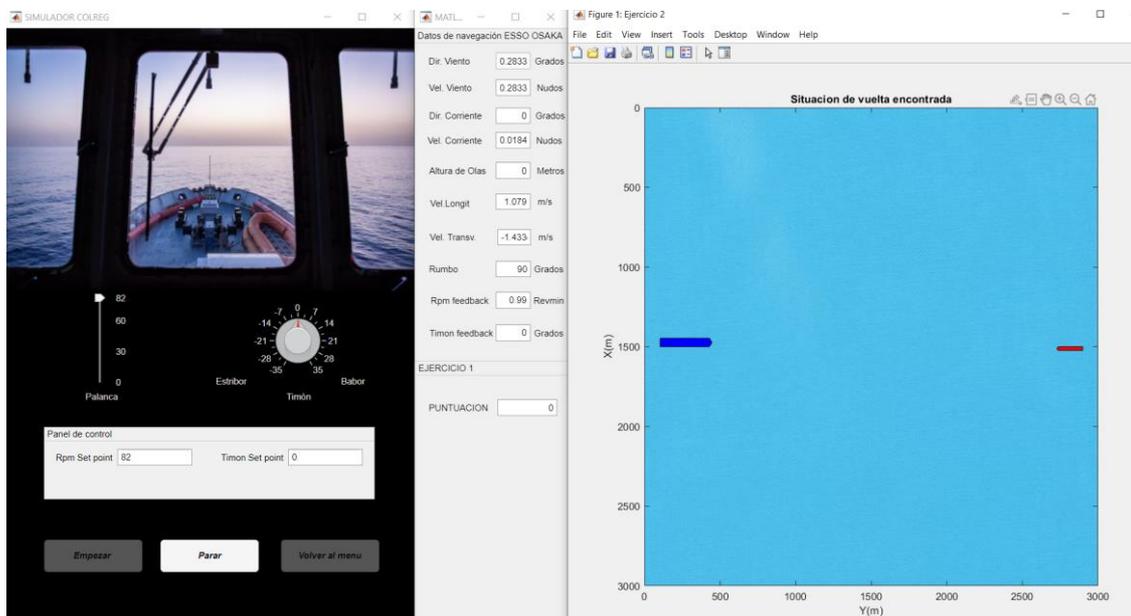


Figura 150. Vista general del ejercicio 2 del simulador COLREG.

En el desarrollo del ejercicio irán apareciendo los mensajes en pantalla en color verde a medida que se vayan realizando las maniobras correctamente. (Ver figuras 151, 152, 153 y 154).

Se tienen las mismas condiciones iniciales que para el ejercicio anterior. La primera acción correcta es hacer el giro a estribor completo del barco, así aparecerá el siguiente mensaje. (Ver figura 151).

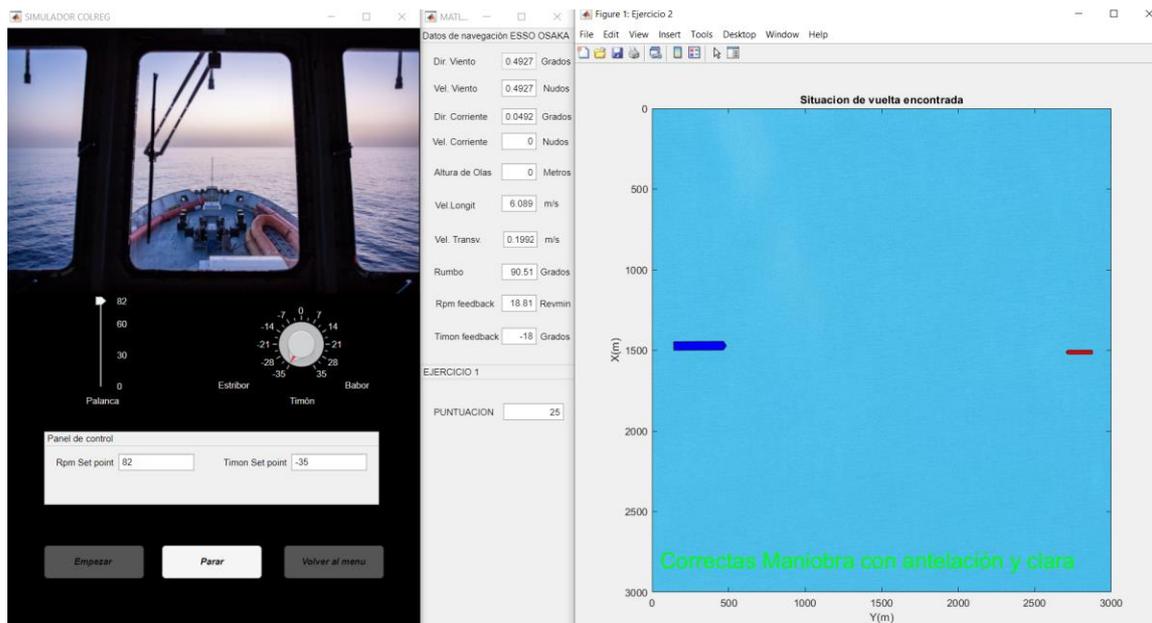


Figura 151. Aspecto del simulador tras realizar la maniobra raudamente de todo a estribor.

La siguiente acción correcta que se muestra en el simulador es la de volver al rumbo inicial, presentando el siguiente aspecto que aparece en la figura 152.

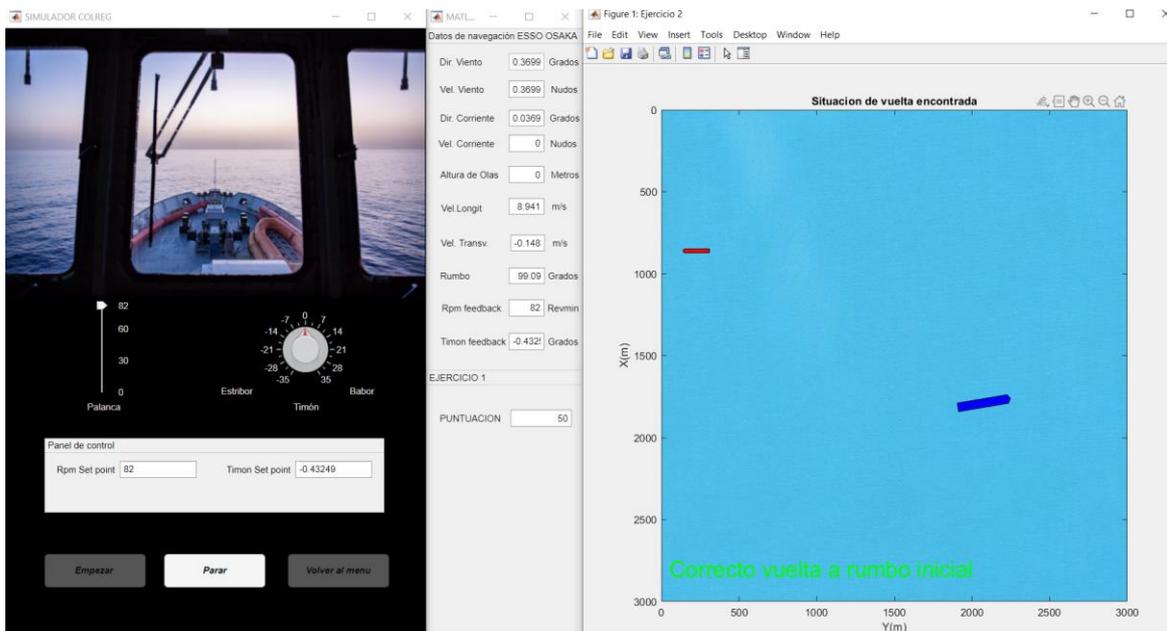


Figura 152. Aspecto del simulador tras volver al rumbo original correctamente.

Finalmente, se mostraría en el simulador el mensaje de ejercicio aprobado como se muestra en la figura 154.

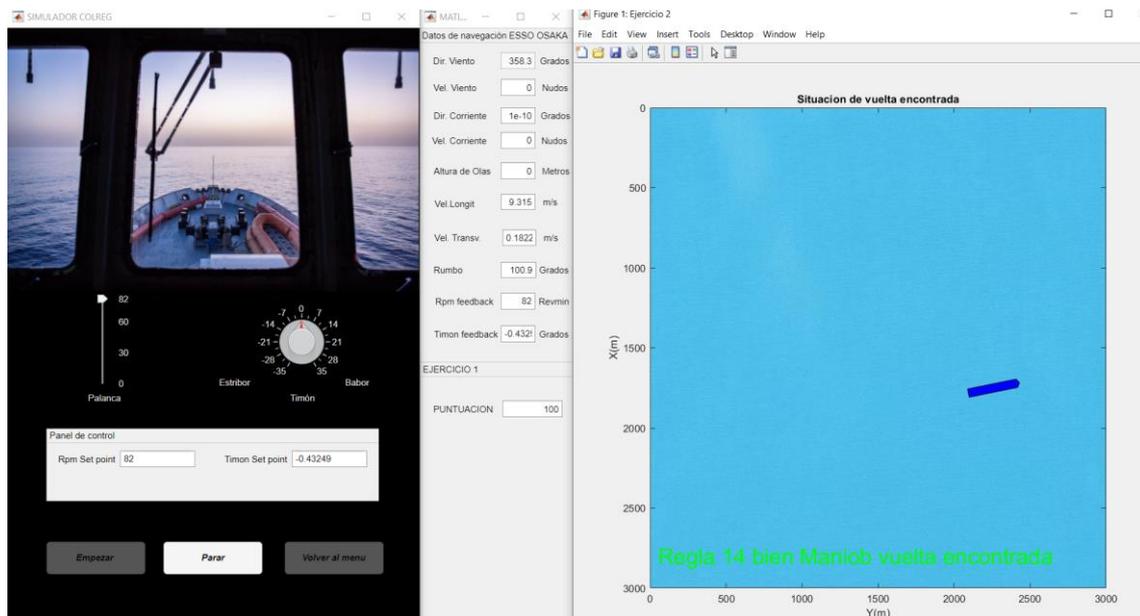


Figura 153. Aspecto del simulador tras realizar la maniobra de vuelta encontrada correctamente.

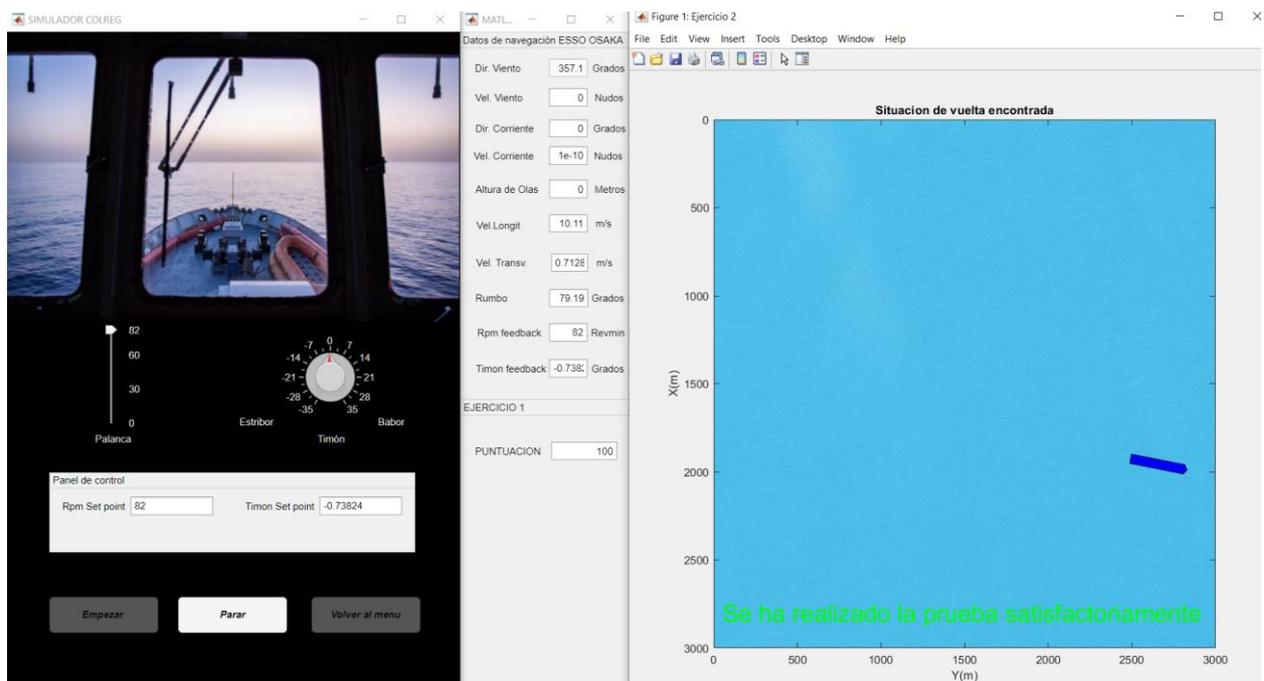


Figura 154. Mensaje en pantalla de ejercicio 2 superado.

Por último se muestra el aspecto del simulador si la prueba no ha terminado de la manera satisfactoria, es decir, no se han tomado las decisiones correctas por parte del alumno oficial de puente. (Ver figura 155).

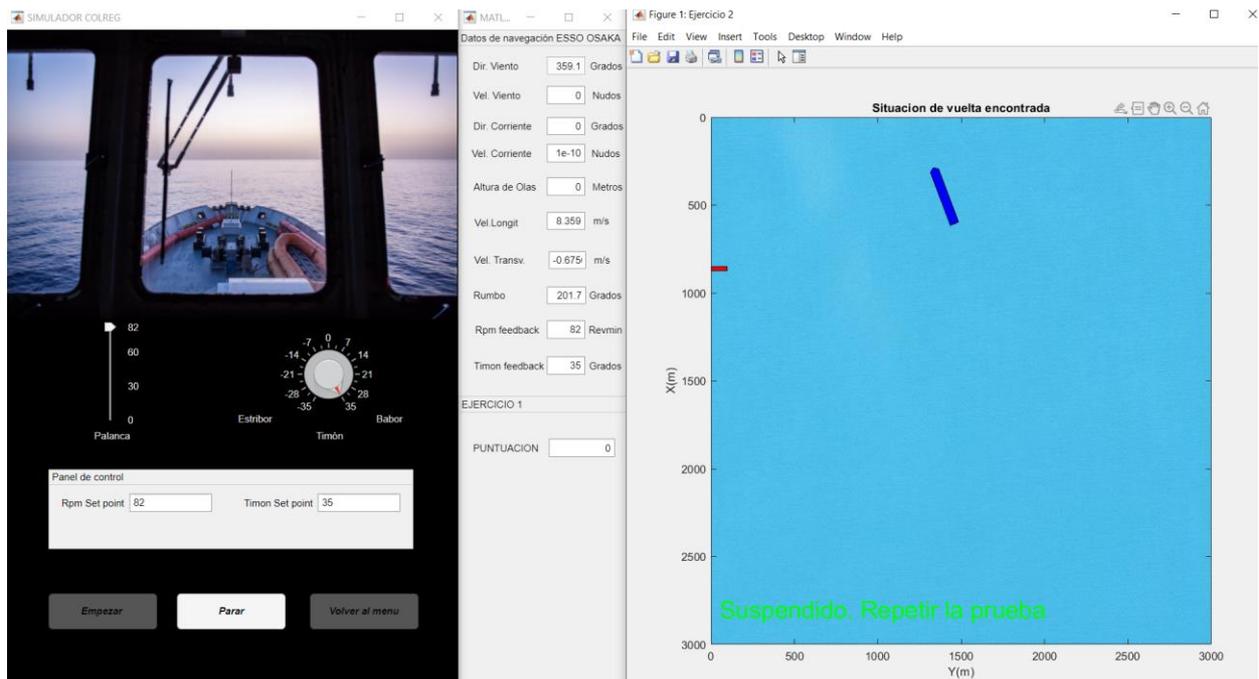


Figura 155. Mensaje en pantalla de ejercicio 2 no superado, se debe repetir la prueba de situación de vuelta encontrada.

4.5 Ejercicio tercero.

Si se pulsa sobre el pulsador “Empezar” de la figura 141 comienza la simulación de la situación de riesgo extremo de abordaje, se muestra tal y como se aprecia en la siguiente figura 156 para el ejercicio 3.

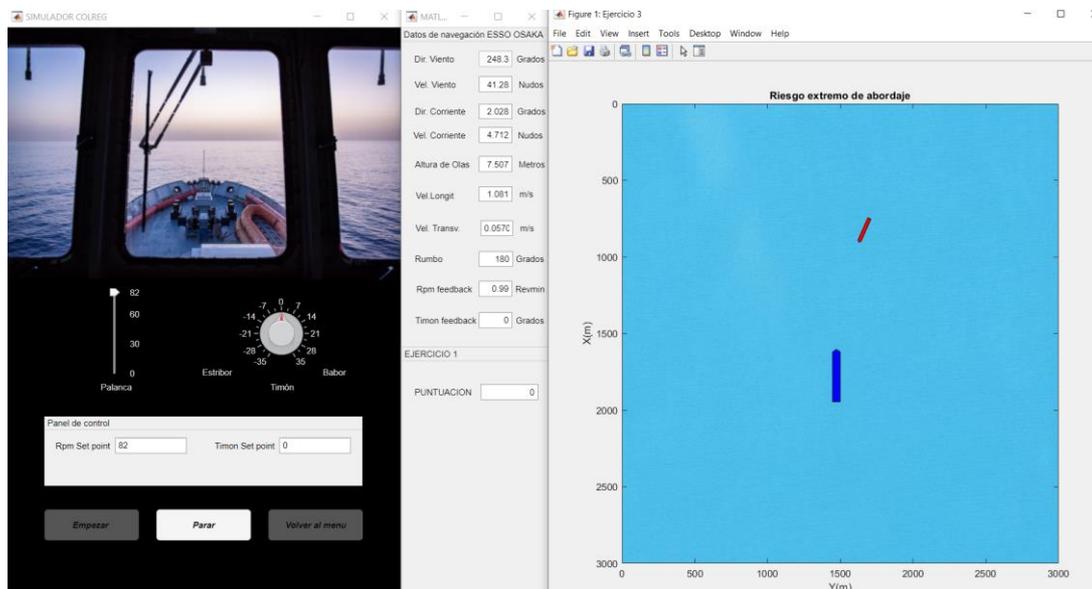


Figura 156. Vista general del ejercicio 3 del simulador COLREG.

Para este ejercicio irán apareciendo los mensajes en pantalla que se muestran en color verde a medida que se vayan realizando las maniobras correctamente. (Ver figuras 157, 158, 159 y 160).

Las condiciones iniciales se establecen en 8.34 metros segundos y coordenadas del barco respecto a tierra (1950, 1500). La primera acción correcta es moderar la velocidad del barco, así aparecerá el siguiente mensaje. (Ver figura 157).

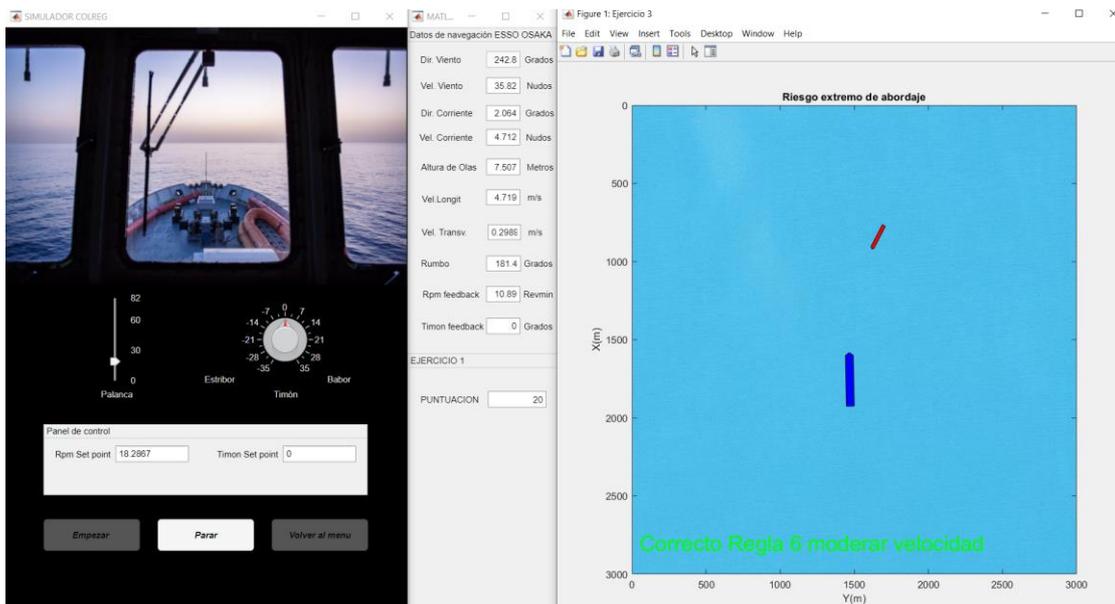


Figura 157. Vista del simulador tras disminuir rápidamente la orden de velocidad del buque.

La siguiente acción que provoca que un nuevo mensaje aparezca es el giro considerable del timón y de manera rauda. (Ver figura 158).

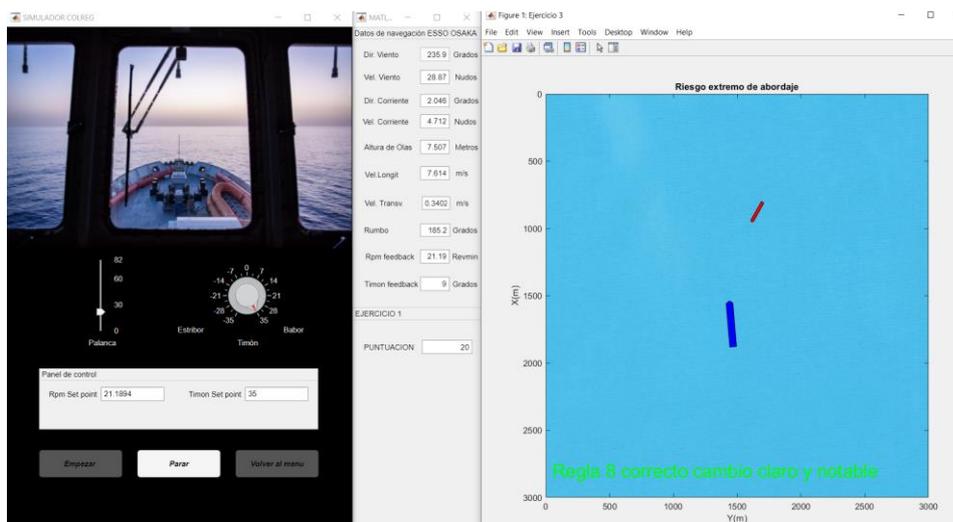


Figura 158. Vista del simulador tras realizar correctamente la maniobra de giro.

Si no se detecta colisión entre los dos buques se considera aprobado el ejercicio 3 de riesgo extremo de abordaje. (Ver figura 159).

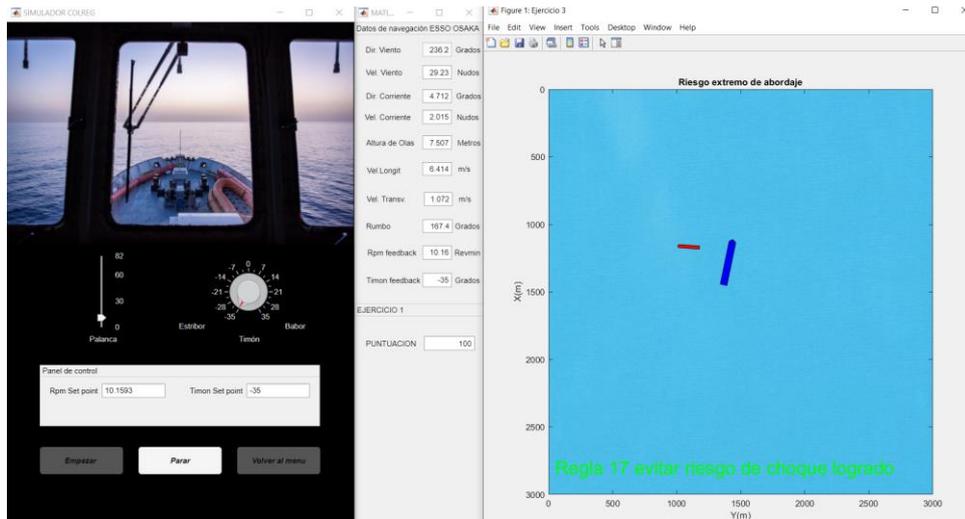


Figura 159. Vista del ejercicio 3 del simulador ante buena maniobra para evitar la colisión.

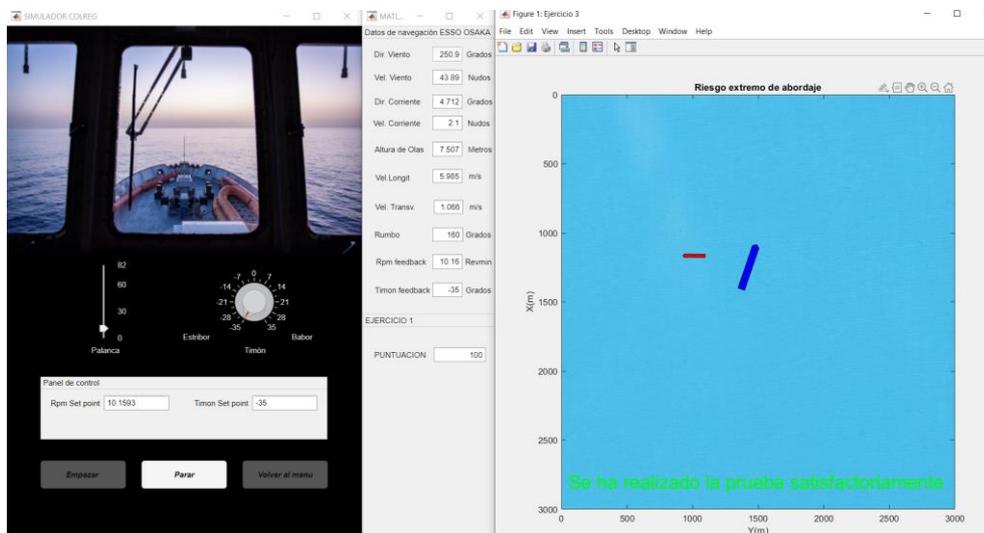


Figura 160. Mensaje en pantalla de ejercicio 3 superado.

Por último, se muestra el aspecto del simulador si la prueba no ha terminado de la manera satisfactoria, es decir, no se han tomado las decisiones correctas por parte del alumno oficial de Puente. (Ver figura 161).

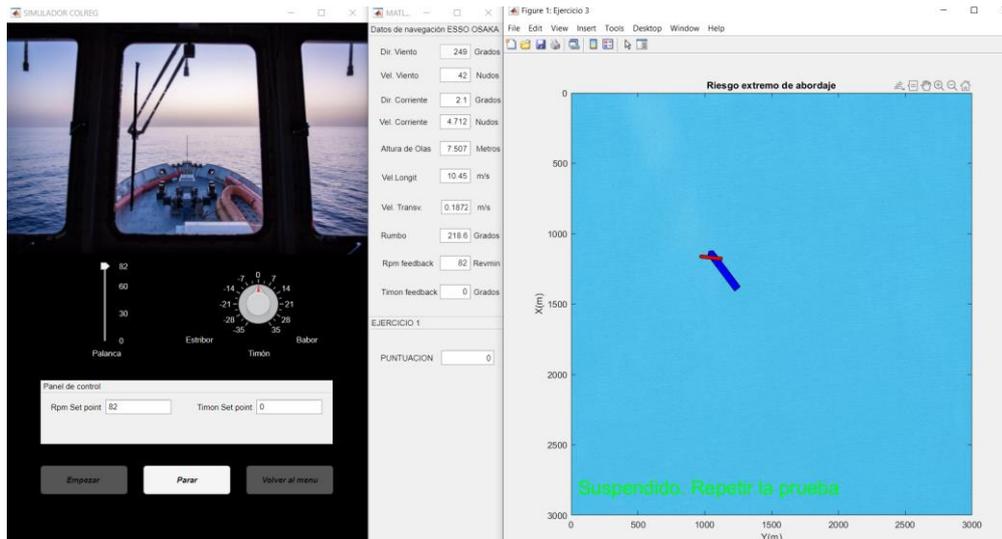


Figura 161. Mensaje en pantalla de ejercicio 3 no superado, se debe repetir la prueba de situación de riesgo extremo de abordaje.

4.6 Ejercicio cuarto.

Este ejercicio cargará aleatoriamente uno de dos tipos de escenarios posibles. Si se pulsa sobre el pulsador “Empezar” de la figura 141 comienza la simulación de situación de adelantamiento, se muestra tal y como se aprecian en las siguientes figuras 162 para realizar la maniobra de adelantamiento y 163 en una situación para abortar la maniobra de adelantamiento en el ejercicio 4.

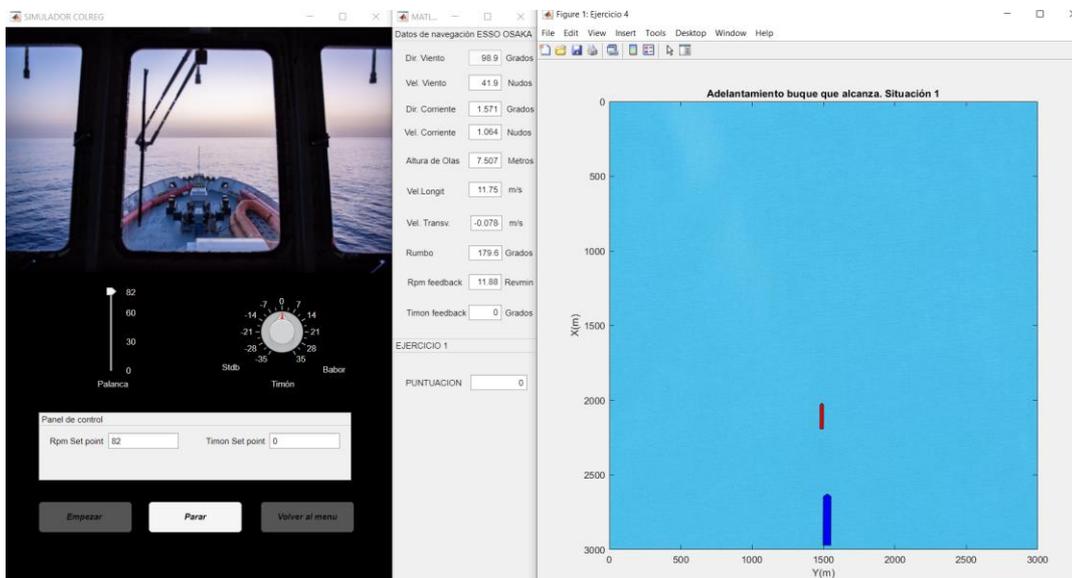


Figura 162. Vista general del ejercicio 4 del simulador COLREG para adelantamiento de buque.

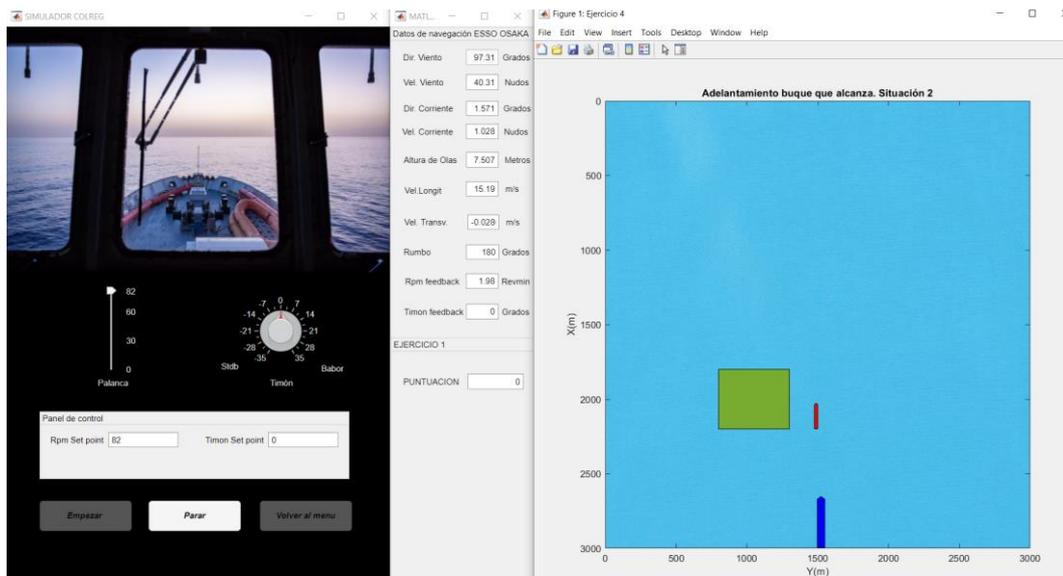


Figura 163. Vista general del ejercicio 4 del simulador COLREG para abortar el adelantamiento de buque.

4.6.1 Mensajes escenario primero.

Para este ejercicio de todo propicio para la maniobra de adelantamiento del buque irán apareciendo los mensajes en pantalla que se muestran en color verde a medida que se vayan realizando las maniobras correctamente. (Ver figuras 164 y 165).

Las condiciones iniciales se establecen en 8.34 metros segundos y coordenadas del barco respecto a tierra (3000, 1550). La acción correcta para este escenario es apartarse de la derrota del segundo buque y completar el adelantamiento, así aparecerá el siguiente mensaje. (Ver figura 164).

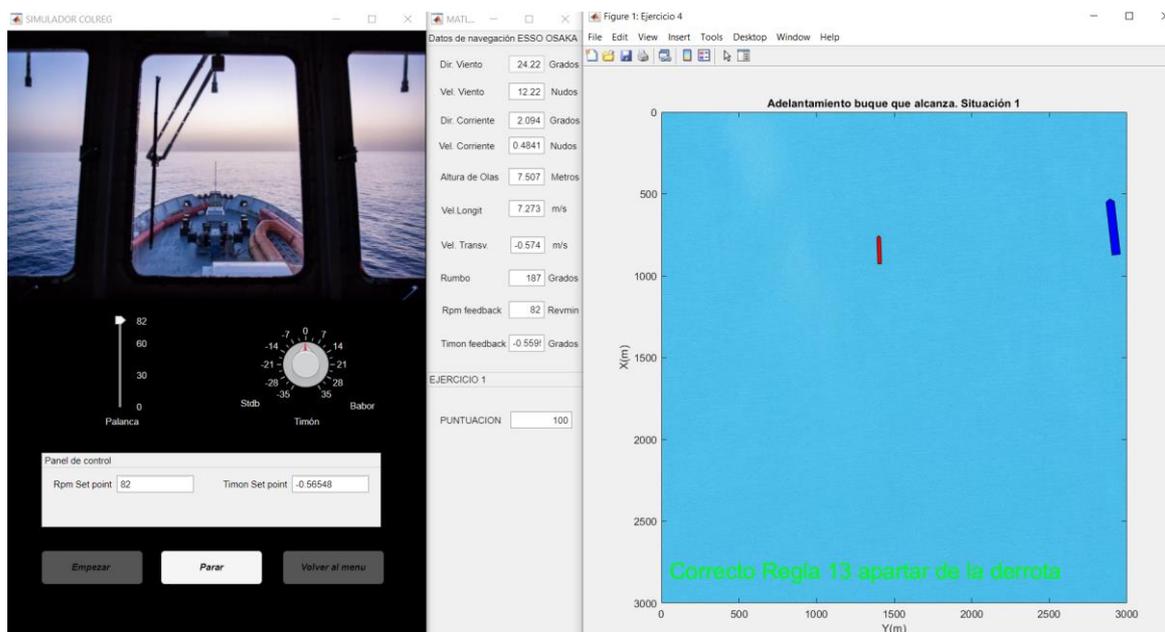


Figura 164. Vista del ejercicio 4 del simulador ante buena maniobra para realizar el adelantamiento.

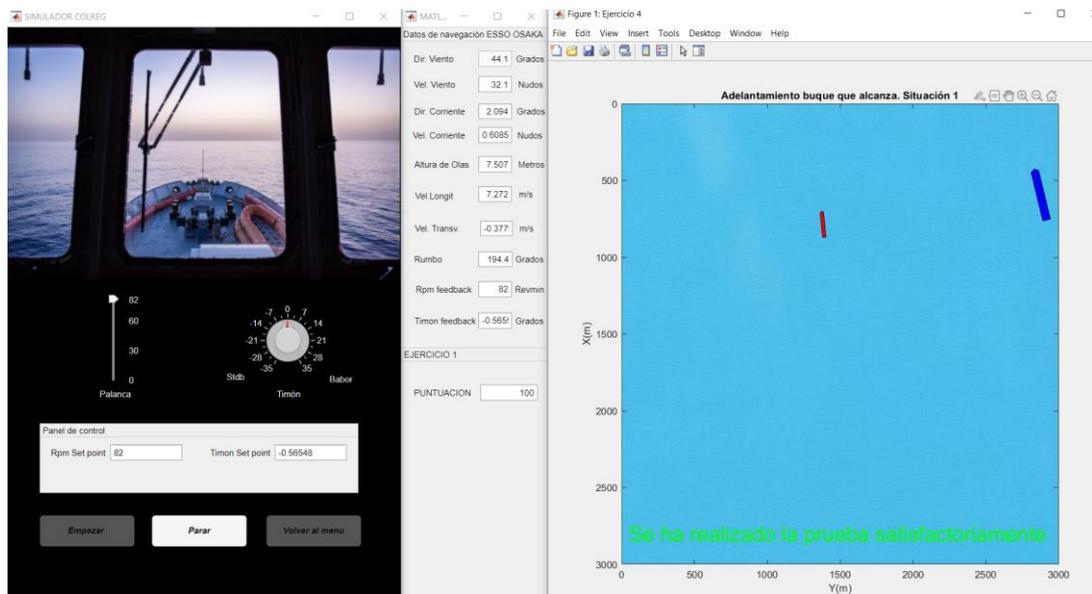


Figura 165. Mensaje en pantalla de ejercicio 4 superado.

Por último, se muestra el aspecto del simulador si la prueba no ha terminado de la manera satisfactoria, es decir, no se han tomado las decisiones correctas por parte del alumno oficial de Puente o como es el caso el buque no ha seguido la regla de distancia de seguridad con el segundo buque. (Ver figura 166).

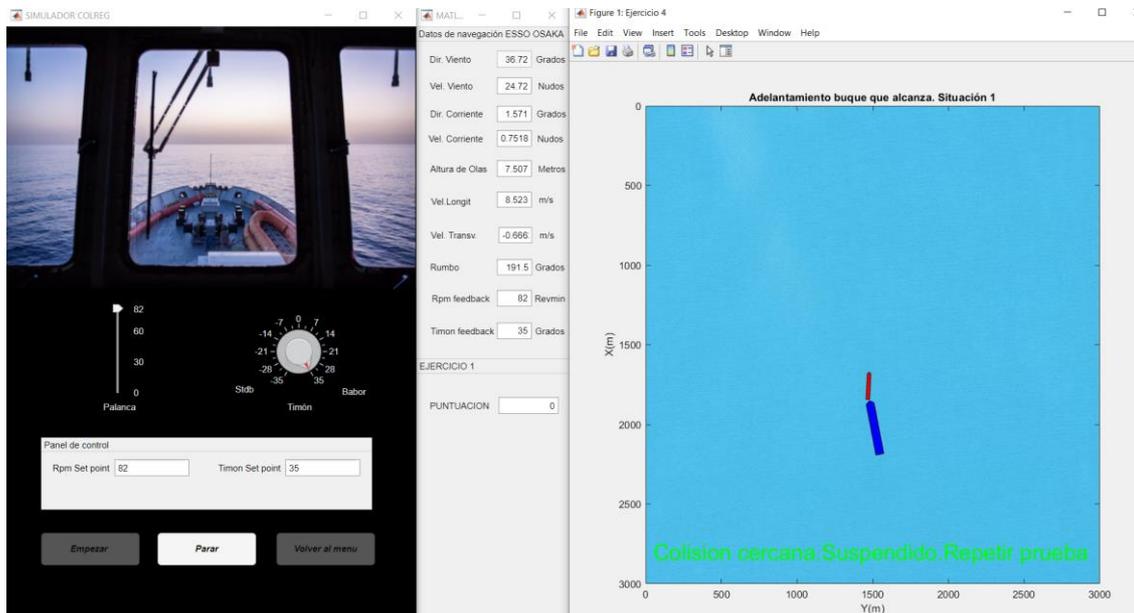


Figura 166. Mensaje en pantalla de ejercicio 4 no superado, se debe repetir la prueba de ejercicio de adelantamiento.

4.6.2 Mensajes escenario segundo.

Para este ejercicio de situación de obstáculos inesperados en los alrededores del buque y movimientos inesperados del buque a adelantar, no se podrá realizar la maniobra de adelantamiento de manera que igualmente irán apareciendo distintos mensajes en pantalla que se muestran en color verde a medida que se vayan realizando las maniobras correctamente. (Ver figuras 167 y 168).

Las condiciones iniciales se establecen en 8.34 metros segundos y coordenadas del barco respecto a tierra (3000, 1550). La acción correcta para este escenario es abortar la maniobra de adelantamiento y evitar a toda costa la colisión de los buques, lo primero es parar totalmente el buque, así aparecerá el siguiente mensaje. (Ver figura 167).

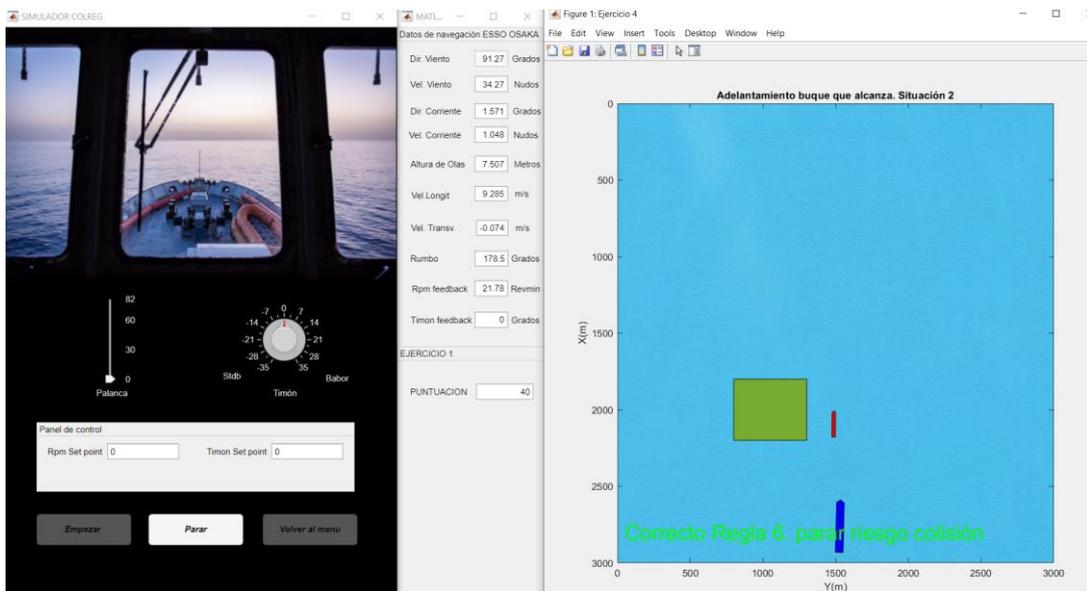


Figura 167. Vista del simulador tras realizar correctamente la maniobra de reducción de orden de velocidad.

La siguiente decision correcta es la de no adelantar al buque segundo, de manera que cuando se cumple el simulador presentará el siguiente aspecto lanzando el mensaje siguiente en color verde. (Ver figura 168).

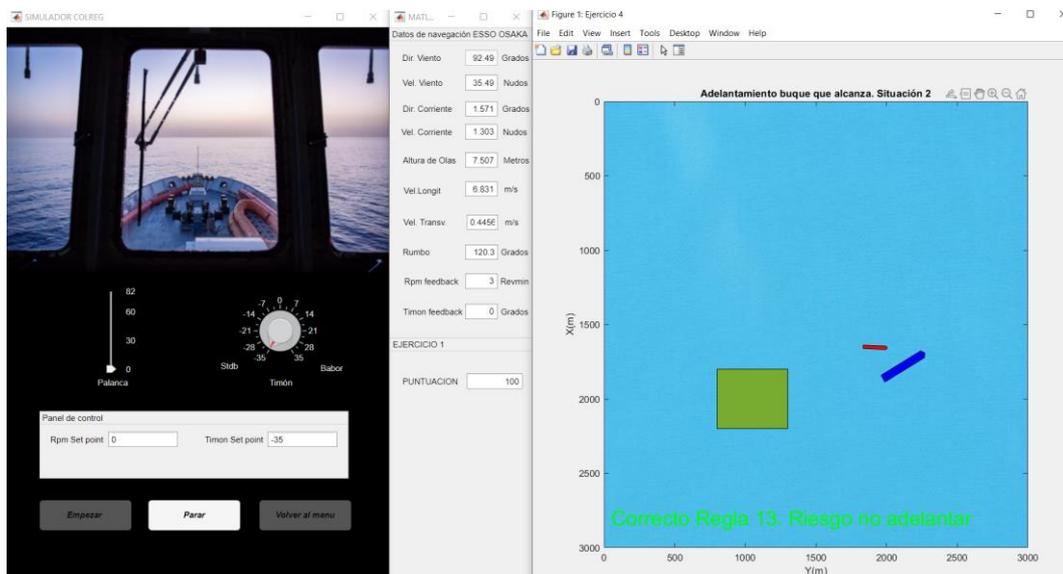


Figura 168. Vista del ejercicio 4 del simulador ante buena maniobra de no realizar el adelantamiento.

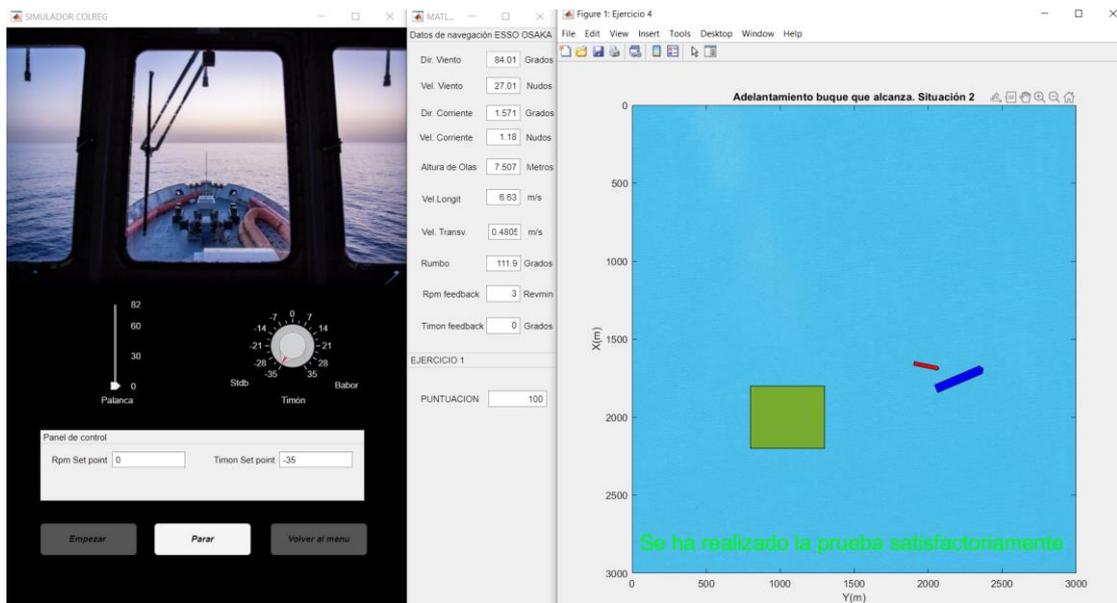


Figura 169. Mensaje en pantalla de ejercicio 4 superado del segundo escenario.

De lo contrario, si se ha suspendido la prueba, como es el caso de que ha existido colision, el simulador presentará el siguiente aspecto (ver figura 170).

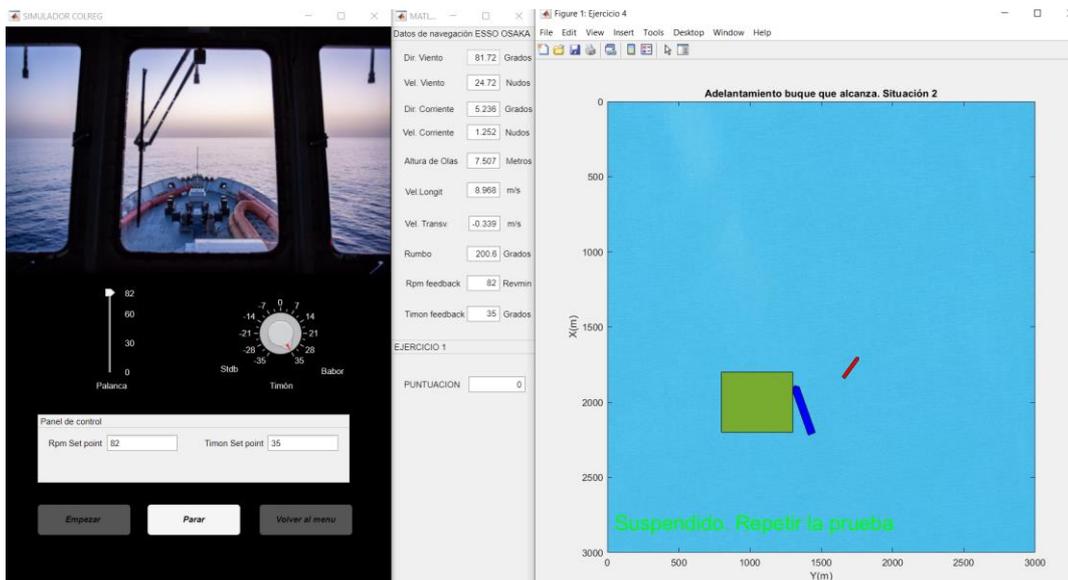


Figura 170. Mensaje en pantalla de ejercicio 4 no superado del segundo escenario

5 CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA

En este capítulo se describen las experiencias y opiniones destacadas en el desarrollo del trabajo y propuestas de como se puede mejorar las capacidades del mismo.

- Se descubre de primera mano el gran potencial del uso de simuladores para entrenamiento y el gran margen de mejora tecnológica de los mismos.
- El estado del arte de los modelos dinámicos de buques ha sido tan bueno y se ha comprobado que es tan aproximado a la realidad, que la bibliografía está un poco estancada desde hace algunos años acerca del tema. Habría que volver a profundizar sobre el tema, darle un nuevo enfoque y así crear nuevos modelos.
- Una pieza clave para tener mejores modelos de buques reales y validarlos consistiría en obtener datos de maniobras reales de cada buque y en distintas condiciones meteorológicas, Los datos más destacables a extraer para el modelo dinámico serían velocidad, posición, aceleraciones y actuadores del buque.
- Otra pieza, que en varios años no ha cambiado, es el reglamento contra colisiones en el mar, pienso que debería de revisarse nuevamente y oficializarse por que hay bastantes accidentes marítimos en la actualidad.
- Como herramienta de creación de interfaces gráficas se comprueba el potencial de AppDesigner en la version Matlab2022a. Se descubre que a nivel de código tiene limitaciones, por ejemplo, editar visualmente elementos del panel o la posibilidad de ejecutar el HMI (Human Machine Interface) sin tener matlab instalado. Existen métodos mejores para crear interfaces gráficas e integrarlas con los modelos de matlab simulink.
- Me pareció interesante los métodos existentes de calcular el cruce entre segmentos para detectar colisiones en el simulador, se escogió el más simple, entendible y que dio buenos resultados. Parece un mundo complejo, su nombre es geometría computacional.

Como propuestas de mejora se plantean las siguientes afirmaciones:

- Siempre que se tenga la posibilidad de contar con datos reales sobre la fuerza que producen las diferentes condiciones ambientales sobre el buque y curvas de comportamiento de los mismos, se podrá ajustar los modelos creados en este trabajo de forma óptima de manera que aumente su calidad/precisión en buena manera.
- Mejorar el algoritmo de detección de colisiones con el buque, ya que el algoritmo seleccionado para este trabajo cumple con las condiciones mínimas para detectar colisiones entre dos segmentos.
- Las condiciones de este simulador pueden ser aplicadas perfectamente a motores gráficos más potentes otorgándolo de mucha más entidad a la hora de comercializarse.
- Sobre este simulador se pueden hacer mejoras para realizar nuevas técnicas avanzadas de inteligencia artificial, conducción autónoma, detección de obstáculos sobre el buque.
- Se puede mejorar la forma de evaluar los ejercicios para una mejor instrucción en normativa COLREG.
- Se pueden añadir en otra fase del simulador maniobras COLREG con luces de navegación y sonidos para practicar navegaciones nocturnas.

REFERENCIAS

- [1] Centro de Investigacion y Entrenamiento Maritimo y Fluvial, "Simulador de Navegación y Maniobras", [Online]. Available: <http://ciemf.com.ar/simuladores/> [Accesed: Mar. 26, 2022].
- [2] Empresa VSTEP Simulation, "NAUTIS Maritime Simulator", [Online]. Available: <https://www.vstepsimulation.com/nautis-simulator/nautis-maritime-simulator/> [Accesed: Mar. 26, 2022].
- [3] Flickr repositorio de fotos, "Simulador de maniobra y navegación marítima", [Online]. Available: <https://www.flickr.com/photos/fomentogob/5686981243/> [Accesed: Mar. 26, 2022].
- [4] Empresa ARISNOVA Ingeniería de sistemas, "COMPLEX (Control y Monitorizacion de Plataformas Extensibles)", [Online]. Available: <http://www.arisnova.com/naval/complex/> [Accesed: Mar. 26, 2022].
- [5] Productos NAVANTIA, "Simulador Táctico de Combate SIMTAC", Available: <https://www.navantia.es/es/productos-y-servicios/sistemas/simtac/> [Accesed: Mar. 27, 2022].
- [6] Empresa CAE defense-security, "Simulador de centro de información de combate CIC", Available: <https://www.cae.com/defence-security/what-we-do/training-systems/combat-information-centre-cic-operations-room-trainer> [Accesed: Mar. 27, 2022].
- [7] Universidad politécnica de Cartagena, "Visita de alumnos a un aula de simulación para formación en NAVANTIA", Available: https://www.upct.es/destacados/cdestacados.php?id_buscar=8994 [Accesed: Mar. 27, 2022].
- [8] Empresa NAVANTIS, "Productos y servicios, sistema de adiestramiento NAVANTIS", Available: <https://www.navantia.es/es/productos-y-servicios/sistemas/navantis/> [Accesed: Mar. 27, 2022].
- [9] Simulador de maniobras, "Ship Simulator Extremes", Available: <https://www.youtube.com/watch?v=PIr4SHdYDso> [Accesed: Mar. 27, 2022].
- [10] Simulador de maniobras, "European Ship Simulator", Available: https://store.steampowered.com/app/299250/European_Ship_Simulator/ [Accesed: Mar. 27, 2022].
- [11] J.Mathiesen, "Revised simulation model for a Very Large Crude Carrier (VLCC)," M.S. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2014.
- [12] T. I. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons, 1994
- [13] N.H. Norbin, "Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in deep and Confined Waters", Publications of the Swedish State ShipBuilding Experimental Tank, Goteborg, Nr.68, 1971
- [14] Galicia Artabra, "El BAC Cantabria regresó en la mañana de este lunes a su base de Ferrol", Available: <https://www.galiciaartabradigital.com/archivos/187277> [Accesed: Mar. 31, 2022].

- [15] M.S Chislett, J.Strom-Tejsen, "Planar Motion Mechanism Test and Full Scale Steering and Manoeuvring Prediction for a Mariner Class Vessel," International Shipbuilding Progress, vol. 12, no. 129, pp. 201-224, 1965
- [16] Slideshare, "Ramón Velasco stoll, curso apeseg parte 1 terminología", Available: <https://es.slideshare.net/RamonVelascoStoll/01-curso-apeseg-parte-1-terminologia> [Accesed: Mar. 31, 2022].
- [17] Galicia Artabra, "El BAC Cantabria regresó en la mañana de este lunes a su base de Ferrol", Available: <https://www.galiciaartabradigital.com/archivos/187277> [Accesed: Mar. 31, 2022].
- [18] M.Blanke, "Ship Propulsion Losses Related to Automatic Steering and Prime Mover Control," Servolaboratory Technical University of Denmark, Lyngby, build 327, Dec. 1981
- [19] M.Inoue, M.Hirano, K. Kijima and J. Takashina "A Practical Calculation Method of Ship Manoeuvring Motion," International Shipbuilding Progress, vol. 28, no. 325, Sep., pp. 207-222, 1981
- [20] J.D. Van Manen, P. Van Oossanen, "Principles of Naval Architecture Second Revision" E.V. Lewis, Eds. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers ,1988, pp-127-145.
- [21] J.Bartrons, "Estudio Hidrodinámico por CFD del Casco de una Lancha Motora" PFC, Facultad nautica de Barcelona, Barcelona, 2014
- [22] M.J Oh, S. Ham, N.Ku "The Coefficients of Equipment Number Formula of Ships," Journal of Marine Science and Engineering, vol. 8, no 11, p. 898, 2020
- [23] R.I Harris "The Nature of the Wind," En Proceedings of the Seminar on the Modern Design of Wind Sensitive Structures. London, UK: Institution of Civil Engineers, p. 29-55, 1970
- [24] T. I. Fossen, Handbook of Marine Craft Hydrodynamic and Motion Control, John Wiley & Sons, 2011
- [25] Juan J. Azpiroz, "Oteando desde Getxo", Available: <https://desdegetxo.blogspot.com/2011/11/maniobrabilidad-0-j-3-0.html> [Accesed: Abr. 07, 2022].
- [26] B. Van Berlekom, A. Goddard "Maneuvering of Large Tankers," Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1972
- [27] V. O. Gray, "Esso Osaka Maneuvering Trials Shallow Draft Maneuvering of VLCC's," presented at , API Tanker Conference, 1978
- [28] Wikipedia, "Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes ," Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Reglamento_Internacional_para_Prevenir_Abordajes [Accesed: Abr. 08, 2022].
- [29] Instrumento de Adhesión de España al Convenio sobre el Reglamento Internacional para prevenir los abordajes, BOE, España, Ministerio de Asuntos Exteriores, 2017
- [30] Articles of the Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, Lloyd's Register, 2005

- [31] Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes, Federación Mediterránea para una Pesca Responsable, 1972.
- [32] Masmar, "Conducta de los buques que se encuentren a la vista uno del otro," Available: <http://www.masmar.net/esl/N%C3%A1utica/Reglamentaci%C3%B3n/Reglamento-Internacional-para-prevenir-abordajes-en-la-Mar/SECCI%C3%93N-II.-CONDUCTA-DE-LOS-BUQUES-QUE-SE-ENCUENTREN-A-LA-VISTA-UNO-DEL-OTRO> [Accesed: Abr. 09, 2022].
- [33] K. Bhawsinka, "Maneuvering Simulation of Displacement Type Ship and Planing Hull," M.S. Thesis, Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, 2011.
- [34] K. Christos, "Container Vessel Maneuvering model in shallow waters and assessment of maneuvering coefficients through system identification," M.S. Thesis, KTH Royal Institute of Technology School of Architecture and the Built Environment, Stockholm, Sweden, 2017.
- [35] Auke Visser's International Esso Tankers site, "Esso Osaka - (1973-1985)," Available: <http://www.aukevisser.nl/inter-2/id427.htm> [Accesed: Abr. 09, 2022].
- [36] M.R Heller, "Maritime Simulation," In Proc. First Intercontinental Symposium, Munich, 1985.
- [37] F.A Rodriguez, "Sistema de control Automático de Reabastecimiento de Buques en Marcha," TFM, Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Cádiz, 2019.
- [38] Los barcos de Eugenio, "A-15 Cantabria," Available: https://www.losbarcosdeeeugenio.com/barcos/es/es/ae_A15.html [Accesed: Abr. 10, 2022].
- [39] K. Zelazny "Approximate Method of Calculating Forces on Rudder During Ship Sailing on a Shipping Route," Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 8, no 3, p. 459-464, 2014
- [40] K. McTaggart "Simulation of Hydrodynamic Forces and Motions for a Freely Maneuvering Ship in a Seaway," Defence Research and Development Canada, 2005
- [41] M. Hirano "On calculation method of ship maneuvering motion at initial design phase". Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol. 1980, no 147, 144-153, 1980
- [42] Wikipedia commons, "File:Coeficientes de bloque.svg," Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64831876> [Accesed: Abr. 15, 2022].
- [43] OCIMF, "Estimating the environmental loads on anchoring systems," In Proc. Oil Companies International Marine Forum, first edition october 2010
- [44] M.J Oh, S.H Ham, N. Ku "The Coefficients of Equipment Number Formula of Ships,". Journal of marine science and engineering, vol. 8, no 11, 898, 2020
- [45] Calculations for mooring systems, Department of the Navy Naval sea systems command, Washington, DC, 1987
- [46] K. Claes, "Identification and Adaptive Control Applied to Ship Steering " Lund University, Tech. Report. May. 1979
- [47] T. I. Fossen, Handbook of marine Craft Hydrodynamics and motion control, John Wiley & Sons, 2011

- [48] Martin Thoma, "How to check if two line segments intersect," Available: <https://martin-thoma.com/how-to-check-if-two-line-segments-intersect/> [Accessed: Abr. 26, 2022]
- [49] Robert Seifert, "How to close all graphs in GUI without closing the GUI itself?," Available: <https://stackoverflow.com/questions/38973332/how-to-close-all-graphs-in-gui-without-closing-the-gui-itself> [Accessed: Abr. 30, 2022]
- [50] MathWorks Support Team, "How do I update a GUI designed in App Designer with data from a running Simulink model?," Available: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/answers/446302-how-do-i-update-a-gui-designed-in-app-designer-with-data-from-a-running-simulink-model> [Accessed: Abr. 30, 2022]

