



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Sistema de simulación y evaluación de maniobras compatibles  
con la regulación COLREG en escenarios con múltiples barcos*

### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Pablo Barón Argos

**DIRECTOR:** José Antonio González Prieto

**CURSO ACADÉMICO:** 2021-2022

Universida<sub>d</sub>eVigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Sistema de simulación y evaluación de maniobras compatibles  
con la regulación COLREG en escenarios con múltiples barcos*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>d</sub>eVigo



## **RESUMEN**

Las colisiones continúan siendo una de las fuentes de accidentes más importantes que involucran barcos en entornos marítimos, por lo que su prevención mediante el cumplimiento de las normas de navegación, COLREG, es de vital importancia. De esta forma, una parte importante asociada a la investigación de este tipo de normativas, consiste en la creación de herramientas que permitan realizar simulaciones de encuentros entre múltiples barcos en donde se evalúe el cumplimiento de las normas COLREG. Desde un punto de vista formativo, interesa el caso en el que es un usuario/alumno el que maneja el barco objetivo que debe maniobrar mediante el manejo de un joystick. Para ello, inicialmente se ha procedido a proponer un algoritmo que analiza situaciones de cruce entre dos barcos para establecer, mediante unos índices normalizados (0,1), la probabilidad de estar incumpliendo una norma relativa a la posible colisión o al cruce de dos barcos. Una vez validado el algoritmo se preparan los escenarios empleando modelos cinemáticos para los barcos a simular, es decir, sin tener en cuenta las dinámicas asociadas a las masas, fuerzas hidrodinámicas o las acciones generadas por el oleaje y el viento.

## **PALABRAS CLAVE**

Gemelo Digital, Simulación, Navegación Segura, COLREG, Algoritmo de Evaluación.



# AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi familia, especialmente a mis padres y hermanos, por el apoyo incondicional que han mostrado durante los cinco años de escuela, ofreciéndome su cariño y aceptando todas las decisiones que he tomado.

También debo agradecer a mi tutor José Antonio, por su gran implicación desde el primer momento, su gran dedicación durante todo el desarrollo de este trabajo y por compartir su entusiasmo, día a día, por un tema que desconocía.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis compañeros de la promoción 422-152, con los que he vivido experiencias inolvidables, ya que harán que recuerde esta etapa en la Escuela Naval Militar con mucho cariño.



## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
1 Introducción y objetivos .....	6
1.1 Descripción del apartado.....	6
1.2 Antecedentes .....	6
1.3 Motivación .....	8
1.4 Estructura del proyecto .....	10
2 Estado del arte .....	11
2.1 Descripción del apartado.....	11
2.2 Origen y evolución de la navegación .....	11
2.3 Abordajes en la mar .....	17
2.3.1 Aparición de las primeras normas de seguridad marítima.....	17
2.3.2 MV Doña Paz y MT Vector.....	18
2.3.3 SS Andrea Doria y Stockholm.....	20
2.4 Normas COLREG .....	21
2.5 Algoritmo compatible con COLREG .....	23
2.6 Escenarios .....	24
2.6.1 Maniobra de vuelta encontrada (Head on).....	25
2.6.2 Maniobra de alcance (Overtaking) .....	25
2.6.3 Maniobra de cruce (Crossing) .....	26
2.7 Análisis de sistemas de índices de colisión.....	26
2.7.1 Definiciones .....	27
2.7.2 Condición de intersección.....	28
2.7.3 Maniobra de cruce .....	29
2.7.4 Maniobra de alcance .....	29
2.7.5 Maniobra de vuelta encontrada.....	30
2.8 Críticas al sistema de índices de colisión.....	30
3 Desarrollo del TFG.....	32
3.1 Descripción del apartado.....	32
3.2 Entorno MATLAB /Simulink .....	32
3.2.1 Introducción a MATLAB .....	32
3.2.2 Introducción a Simulink .....	34
3.3 Modelo cinemático de los barcos en Simulink .....	35

3.4 Descripción de escenarios .....	39
3.4.1 Maniobra vuelta encontrada (dos barcos).....	40
3.4.2 Maniobra de cruce (dos barcos).....	44
3.4.3 Maniobra de alcance (dos barcos) .....	45
3.4.4 Maniobra de vuelta encontrada y cruce (tres barcos) .....	47
3.4.5 Maniobra de alcance y cruce (tres barcos) .....	49
3.4.6 Escenario con cuatro barcos .....	52
3.5 Algoritmo generador de índices de colisión .....	53
3.5.1 Lanchas de instrucción .....	56
3.5.2 Barcos de grandes proporciones .....	59
3.5.3 Barcos menores proporciones .....	60
3.5.4 Barcos parados y en movimiento.....	60
4 Prueba del simulador COLREG .....	62
4.1 Descripción del apartado.....	62
4.2 Explicación de la prueba .....	62
4.3 Análisis de datos .....	62
5 Conclusiones y líneas futuras .....	69
5.1 Descripción del apartado.....	69
5.2 Conclusiones .....	69
5.3 Líneas futuras .....	70
6 Bibliografía.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Evolución tecnológica [2].....	6
Figura 1-2 Simulador de navegación de la ENM [3] .....	7
Figura 1-3 Feedback Control Loop [6].....	9
Figura 2-1 Barco vela egipcio [8].....	12
Figura 2-2 Birreme griego [9] .....	12
Figura 2-3 Corvus romano [11].....	13
Figura 2-4 Carabelas de Cristóbal Colón [12].....	13
Figura 2-5 Barco de vapor [13] .....	14
Figura 2-6 RMS Titanic [14].....	15
Figura 2-7 Piccard y Walsh [16] .....	16
Figura 2-8 Séptima Flota americana [17].....	16
Figura 2-9 Punto de colisión [20].....	18
Figura 2-10 Incendio tras colisión [19] .....	19
Figura 2-11 Esquema del abordaje [19] .....	20
Figura 2-12 Stockholm tras colisión [21].....	21
Figura 2-13 RIPA [22] .....	22
Figura 2-14 Luces y marcas [24].....	23
Figura 2-15 Esquema de las dos capas [25] .....	24
Figura 2-16 Maniobra de vuelta encontrada [Fuente propia].....	25
Figura 2-17 Maniobra de Alcance [Fuente propia] .....	26
Figura 2-18 Maniobra de Cruce [Fuente propia].....	26
Figura 2-19 Zonas COLREG [Fuente propia].....	27
Figura 2-20 Definiciones [Fuente propia] .....	28
Figura 3-1 Logo MATLAB [26] .....	32
Figura 3-2 Ejemplo de diagrama de bloques en Simulink [26].....	34
Figura 3-3 Diseño general [Fuente propia] .....	35
Figura 3-4 Bloque Set Pace [Fuente propia] .....	36
Figura 3-5 Bloque SHIP 1 [Fuente propia] .....	37
Figura 3-6 Bloque SHIP 2 [Fuente propia] .....	37
Figura 3-7 Bloque SHIP DINAMICS [Fuente propia].....	38
Figura 3-8 Representación de Velocidad lineal [Fuente propia].....	38
Figura 3-9 Lancha de Instrucción AI [27].....	39
Figura 3-10 Escenario Head On dos barcos [Fuente propia] .....	41

Figura 3-11 Escenario Head On dos barcos [Fuente propia] .....	42
Figura 3-12 Zona final del escenario [Fuente propia] .....	42
Figura 3-13 Posible abordaje [Fuente propia] .....	43
Figura 3-14 Vuelta encontrada por babor [Fuente propia] .....	43
Figura 3-15 Escenario Crossing dos barcos [Fuente propia] .....	44
Figura 3-16 Maniobra cruce parando máquinas [Fuente propia] .....	45
Figura 3-17 Maniobra cruce cortando la popa [Fuente propia] .....	45
Figura 3-18 Escenario Overtaking dos barcos [Fuente propia] .....	46
Figura 3-19 Maniobra de Overtaking [Fuente propia] .....	47
Figura 3-20 Maniobra Head On y Crossing tres barcos [Fuente propia] .....	48
Figura 3-21 Maniobra eficiente entre tres barcos [Fuente propia] .....	48
Figura 3-22 Maniobra Overtaking y Crossing tres barcos [Fuente propia] .....	49
Figura 3-23 Solución eficiente al escenario [Fuente propia] .....	50
Figura 3-24 Maniobra peligrosa [Fuente propia] .....	51
Figura 3-25 Maniobra incorrecta [Fuente propia] .....	51
Figura 3-26 Maniobra de cuatro barcos [Fuente propia] .....	52
Figura 3-27 Maniobra eficaz entre cuatro barcos [Fuente propia] .....	53
Figura 3-28 Esquema de las maniobras [Fuente propia] .....	53
Figura 3-29 Intersección frontal de dos lanchas [Fuente propia] .....	57
Figura 3-30 Cruce por estribor [Fuente propia] .....	57
Figura 3-31 Cruce por babor [Fuente propia] .....	58
Figura 3-32 Barcos con trayectoria paralela [Fuente propia] .....	58
Figura 3-33 Overtaking entre dos barcos [Fuente propia] .....	59
Figura 3-34 Cruce por estribor de barcos de 60 metros [Fuente propia] .....	59
Figura 3-35 Cruce por estribor con barcos de 10 metros [Fuente propia] .....	60
Figura 3-36 Alcance a un barco parado [Fuente propia] .....	60
Figura 4-1 Interfaz para el análisis [Fuente propia] .....	63
Figura 4-2 Escenario Head On (Dos barcos) [Fuente propia] .....	64
Figura 4-3 Escenario Head On incorrecto [Fuente propia] .....	64
Figura 4-4 Escenario Crossing (Dos barcos) [Fuente propia] .....	65
Figura 4-5 Escenario Overtaking (Dos barcos) [Fuente propia] .....	65
Figura 4-6 Escenario Overtaking y Crossing (Tres barcos) [Fuente propia] .....	66
Figura 4-7 Escenario Overtaking y Crossing incorrecto (Tres barcos) [Fuente propia] .....	66
Figura 4-8 Escenario Head On y Crossing incorrecto (Tres barcos) [Fuente propia] .....	67
Figura 4-9 Escenario de cuatro barcos [Fuente propia] .....	67



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Descripción del apartado

En este apartado inicial se expone el porqué de la realización de este proyecto, atendiendo a una serie de aspectos o factores que serán analizados desde un punto de vista genérico para posteriormente profundizar en el ámbito de la Armada, más concretamente en las escuelas de formación de la Armada como por ejemplo la Escuela Naval Militar. Para llevarlo a cabo se definen primero unos antecedentes, seguidos de la motivación del proyecto donde se establecerán unos objetivos a alcanzar. Finalmente, se destallará la estructura empleada en la presente memoria.

## 1.2 Antecedentes

A lo largo de la historia, el ser humano ha ido evolucionando de forma constante con el objetivo siempre de mejorar su calidad de vida en todos los aspectos (ver Figura 1-1). El ingenio que el hombre ha desarrollado en busca de esa mejora en su calidad de vida ha permitido llevar a cabo innumerables descubrimientos en distintos ámbitos como en la medicina o la tecnología bélica. La bombilla, la penicilina, los motores, Internet... son algunos ejemplos de dichos descubrimientos, los cuales ha marcado el transcurso de la historia de la humanidad en varias ocasiones. Otro ejemplo de gran importancia, fue la aparición de la simulación por ordenador. El objetivo principal que se buscaba con la creación de la simulación por ordenador, es la de intentar modelizar distintos sistemas reales o hipotéticos por ordenador de tal manera que se pueda realizar un análisis de su funcionamiento y estudiar su comportamiento. [1]

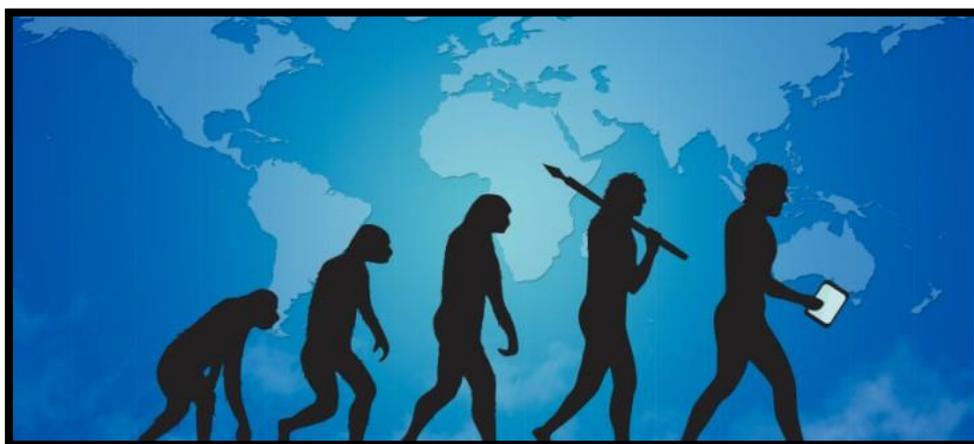


Figura 1-1 Evolución tecnológica [2]

El inicio de las primeras simulaciones lo encontramos en la Segunda Guerra Mundial, debido a la búsqueda de la solución a un problema complejo sobre el comportamiento de los neutrones por parte de dos matemáticos, J.V Neumann y S. Ulam. Esa idea surge principalmente por dos motivos: el elevado costo de la realización de experimentos basados en prueba y error, y la dificultad del problema para afrontarlo con técnicas analíticas.

Unos años más tarde, con el transcurso de la Guerra Fría, se intensificaron los experimentos y estudios mediante el uso de simulación, para resolver distintos problemas de interés militar como la guía de misiles o las trayectorias de los satélites. Es a partir de la década de los 60 cuando empiezan a aparecer a la venta distintos programas de simulación de sistemas para la resolución de problemas de ámbito civil, en donde uno de los ejemplos más reseñables es el GPSS (General Purpose System Simulator) de la empresa IBM.

La revolución que surgió en el mundo de la informática a partir de los años 80, tuvo un enorme impacto en la simulación por medio de la aplicación de los ordenadores personales. Por entonces, el uso de simuladores se generalizó en prácticamente todos los ámbitos de la ciencia y la ingeniería, por ejemplo:

- *Predicción del tiempo*: El primer modelo numérico de predicción del tiempo que dio buenos resultados fue diseñado por J.G Charney, R. Fjörtoft y J. von Neumann con el ordenador “ENIAC” (Electronic Numerical Integrator and Computer). Desde ese modelo, actualmente se han creado varios simuladores para la predicción del tiempo a corto y largo plazo.
- *Entrenamiento de pilotos*: Este tipo de simuladores son de gran importancia para los pilotos, ya que actualmente están todos obligados a entrenarse de forma periódica en avanzados simuladores, como forma de adiestramiento, para estar preparados y ser capaces de resolver cualquier situación que pueda aparecer durante su vuelo.
- *Simulador de navegación*: En el campo de la Armada, la Escuela Naval Militar cuenta con un simulador con el que los alumnos se adiestran en navegación (ver Figura 1-2), teniendo la posibilidad de navegar en distintas plataformas y bajo distintas situaciones, las cuales puedes ser modificadas para dar más realismo o dificultad, como el tráfico marítimo o las condiciones meteorológicas.



Figura 1-2 Simulador de navegación de la ENM [3]

Otra de las principales tendencias tecnológicas que más ha destacado en los últimos años, es la creación de gemelos digitales. El término de gemelo digital, se refiere a una tecnología que genere una réplica de forma virtual de un producto, servicio o proceso que simula el comportamiento de su homólogo físico, con el objetivo de analizar la reacción del gemelo ante determinadas situaciones y mejorar el rendimiento y eficacia del homólogo físico. [4]

La unión de los mundos virtual y físico mediante el empleo de gemelos digitales permite realizar un estudio en profundidad de la información, algo que combinándolo con otras tecnologías como el “big data”, el internet de las cosas o la inteligencia artificial permite llevar un control estricto de los distintos sistemas para evitar de esta forma posibles problemas en el futuro mediante el análisis de las simulaciones realizadas. Con el empleo de esta alternativa, obtenemos un gran beneficio, ya que se puede obtener “feedback” de forma inmediata del sistema en curso y aplicar las correcciones que sean necesarias.

La forma de aplicar los gemelos digitales es la siguiente:

- Instalación de sensores y otras herramientas que recopilen datos sobre el estado del proceso, producto o servicio en tiempo real.
- Conexión de los sistemas físicos, mencionados en el punto anterior, con un sistema basado en la nube que recibe y trata toda la información conseguida, además de compararla con otros parámetros.
- Aplicación de técnicas de modelado que permiten obtener las propiedades de las dinámicas de los barcos analizados.
- A partir de lo anterior, ya es posible generar de forma virtual el proceso, producto o servicio y probar en él cualquier modificación que se aplicará únicamente de forma física cuando se haya comprobado con éxito en el entorno digital, como si se tratara de un prototipo.

Con la existencia de los gemelos digitales y el *feedback* que obtenemos de los análisis y estudios realizados, ha permitido el diseño y creación de buques de control autónomo o sin tripulación. Actualmente, se han llevado a cabo modificaciones en la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante y en la Ley de Navegación Marítima, incorporando una norma aplicable a los buques autónomos, que estarán sujetos a las normas generales de navegación. Para ese fin se creará “un régimen de desarrollo de empresas I+D+i para el desarrollo de este tipo de buques”. Normalizar el comportamiento de este tipo de buques es de gran importancia, para evitar cualquier tipo de accidente en la mar. [5]

### 1.3 Motivación

Tras ubicar en contexto el presente trabajo, a continuación, se describirá la motivación o justificación de la realización de este proyecto. Una de las líneas principales de investigación para la Armada, es el desarrollo de los gemelos digitales como medios avanzados para la ayuda de la toma de decisiones y para introducir sistemas de seguridad. Por este motivo, uno de los principales objetivos que se quiere alcanzar, es el **desarrollo de un gemelo digital avanzado de embarcaciones existentes**, como las lanchas de instrucción. Dicho proyecto se denomina **TraBoDiT**, Training Boat Digital Twin. Para conseguir realizar TraBoDiT, se propone desglosar el trabajo en una serie de objetivos secundarios:

- Recopilación de información técnica relativa, de las lanchas de instrucción y del simulador de navegación.
- Definición de un plan de monitorización, que señale los parámetros necesarios para poder desarrollar un modelo dinámico de comportamiento de las lanchas de instrucción.

- Definir un gemelo digital dinámico, a partir de los datos obtenidos de las lanchas (BigData), para ello se emplearán herramientas como el análisis matemático o la simulación de las diferentes variables climáticas.
- Implementar las herramientas y procedimientos necesarios para incorporar el nuevo gemelo digital dinámico al simulador de navegación de la escuela.
- Definir una forma que permita replicar el proceso de creación de modelos digitales dinámicos en otras embarcaciones de la Armada, distintas a las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar.

Este gemelo digital, se basará en un bloque que tendrá una serie de entradas, procedentes por ejemplo de los timones o de las hélices, de ahí la necesidad por conocer las especificaciones técnicas de la embarcación. También tendrá otras entradas que varíen el comportamiento del bloque en forma de viento, olas o la corriente marina, las cuales serán recogidas por una serie de sensores que se distribuirán en las lanchas de instrucción, para poder luego almacenar esos datos reales en bases de datos del gemelo digital. Como salidas que se generan, dará lugar una serie de parámetros dinámicos como la posición o los movimientos de un barco. Todo esto sirve para conseguir definir el movimiento de la embarcación de cara al gemelo digital, sin embargo, hay que responder a la pregunta de, ¿cómo se regula el movimiento de un barco cuando se encuentra en escenarios que incluyen otras embarcaciones?, siendo la respuesta las normas de navegación existentes, las cuales se desarrollarán a lo largo de este trabajo.

Con este objetivo, se pretende iniciar el desarrollo de herramientas para crear la planificación de trayectorias seguras, de forma que se resuelva el denominado problema del *path planning*, la cuales permitan dirigir el barco en una ruta confiable según las normativas de navegación. Para ello el sistema debe acceder a la información de su entorno o escenario y comparar esa información con la referencia de navegación deseada para generar una ruta hacia su objetivo final. En el caso de sistemas autónomos, el sistema se complementa con algoritmos de control que se aseguran de que la trayectoria generada es la que el barco sigue con un cierto nivel de precisión.

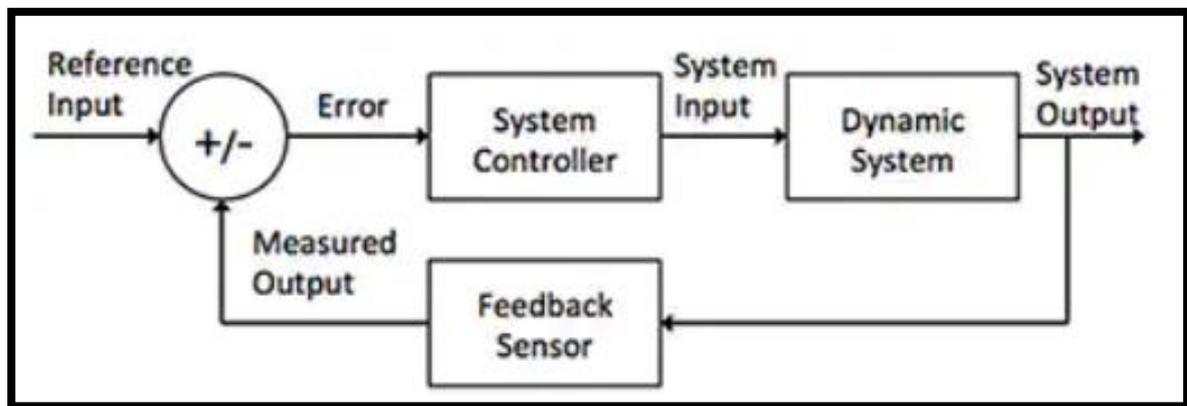


Figura 1-3 Feedback Control Loop [6]

La Figura 1-3 muestra la estructura clásica de control de un sistema basado en la retroalimentación, el cual explicará cómo se quiere realizar la decisión de que path planning a elegir por parte del gemelo digital. Está compuesto por:

- *Reference Input*: el cual consistirá en el la ruta deseada u objetivo final a alcanzar, establecido para generar una ruta que va a llevar por el barco para ir de un punto a otro sin tener en cuenta ningún factor externo (como otro barco en ruta de colisión) que pueda modificarlo.
- *System Controller*: Esta fase es la encargada del control del barco, para que se siga la derrota establecida en el path planning, es decir, la ruta deseada pero modificada en base

las condiciones del entorno. Aquí se desarrollan las distintas modificaciones (cambios de rumbo o de velocidad) que se tengan que hacer para cumplir el path planning generado a partir de la entrada, de forma que la ruta modificada cumpla con las normativas COLREG.

- *Dynamic System*: Se trata, básicamente, del modelo dinámico de la planta (barco), la cual es controlada por la señal generada por el controlador.
- *Feedback Sensor*: Consiste en los sensores del barco que son los que observan y se comunican con el entorno para establecer si hay otros barcos u obstáculos o las propiedades actuales del propio barco (posición, orientación, estado de propulsión, etc.).

Básicamente, con este sistema el objetivo a estudiar cómo debe comportarse el barco, para navegar de forma segura, respetando las normas de navegación en vigor y sobre todo buscando la eficiencia en el planeamiento de las rutas.

Un paso previo a la generación de trayectorias seguras consiste en establecer una especificación matemática que establezca una forma de medir las normativas COLREG de forma coherente, ya que contienen, en general, cierta ambigüedad en sus definiciones si se plantean en situaciones de cruce de barcos muy específicas. Debido a esto es necesario disponer de una herramienta de evaluación de situaciones de cruce de barcos que genere un valor numérico asociado a cada una de las especificaciones de COLREG que se desean evaluar, lo cual se convierte en el objetivo principal de este proyecto.

Por otra parte, se pretende poder emplear esta herramienta para desarrollar el aprendizaje de los alumnos empleando un mando manual (joystick) para manejar un barco en diferentes escenarios comprobando las puntuaciones obtenidas empleando diferentes estrategias. Es decir, se trata de crear una **herramienta que fomente y mejore el plan de adiestramiento** de los alumnos en la Escuela Naval Militar y demás centros de formación pertenecientes a la Armada. Con la creación de este modelo, los alumnos asentarán los conocimientos de una mejor forma, ya que podrán ver de forma práctica muchas más situaciones de encuentros de barcos en comparación a la forma de adiestramiento en la actualidad.

## 1.4 Estructura del proyecto

El presente trabajo está dividido de la siguiente forma:

- *Introducción y objetivos*: Primero se exponen una serie de antecedentes para contextualizar el trabajo, y después se explica de forma breve una introducción y objetivos a conseguir con este trabajo.
- *Estado del arte*: Se explica de forma resumida el origen y evolución de las normas de navegación, desde los orígenes de esta. Luego se describen los escenarios más relevantes que se han utilizado en ciertos estudios, para la creación de un algoritmo de índices que evalúen como se realizan ciertas maniobras.
- *Desarrollo del TFG*: En este apartado, se desarrolla el sistema de simulación creado para las mismas maniobras descritas en el estado del arte, y el algoritmo de índices que evalúan la maniobra realizada.
- *Resultado/ Validación/ Pruebas*: Se exponen los resultados experimentales obtenidos tras la realización de una variedad de pruebas por alumnos de quinto año de la Escuela Naval Militar.
- *Conclusiones y líneas futuras*: En base al trabajo realizado y los resultados obtenidos en la fase de pruebas, se exponen una serie de conclusiones y posibles líneas futuras con las que se podrá continuar el presente trabajo.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Descripción del apartado

En este apartado se trata, en primer lugar, de introducir la evolución de la navegación desde sus orígenes hasta la actualidad. A continuación, se presentan las normas COLREG (Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea) establecidas para garantizar la seguridad en la navegación marítima; mencionando los distintos tipos de regulaciones que existen y las consecuencias que generan. Una vez presentadas las normativas COLREG se introduce el modelo matemático empleado para la implementación de una herramienta en donde poder simular y evaluar las condiciones, en diferentes escenarios, asociadas a las regulaciones de tráfico marítimo y en particular respecto a la posibilidad de evitar una posible colisión. El marco del desarrollo de esta herramienta tiene como objetivo futuro la implementación de algoritmo de planificación de rutas óptimas. Por último, se describirán los escenarios creados para realizar los test comentando sus características respecto a las normativas presentadas.

### 2.2 Origen y evolución de la navegación

La navegación es una actividad que lleva realizándose a lo largo de la historia y cuyo papel ha tenido una gran importancia en el desarrollo de la humanidad. El concepto de navegación aparece con la observación de un tronco flotando en el río y esto provoca que surgiera el pensamiento de poder moverse sobre los troncos. El ser humano sobre un madero flotante evolucionaría a un hombre dirigiendo la embarcación mediante una gruesa rama que llegara al fondo. Luego vendría la balsa, hecha de troncos unidos con lianas. [7]

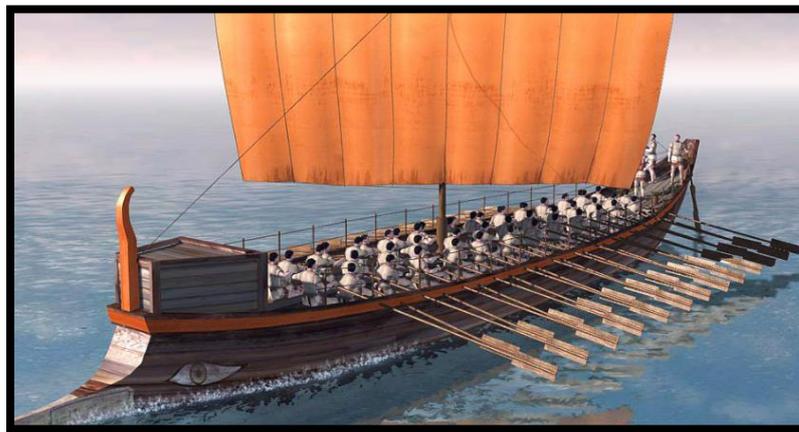
La forma de navegar iba mejorando las prestaciones de las nuevas embarcaciones, pero cuando se pretendía explorar áreas que están fuera del resguardo natural de los ríos, surgieron nuevos problemas, como impulsar la embarcación en aguas marinas. La idea de utilizar la fuerza del viento para contrarrestar la fuerza del mar, mediante el empleo de velas, surge en Egipto (aunque se estima que el invento es más antiguo).

Gracias a las innovaciones en sus embarcaciones, Egipto se convirtió en la potencia dominante del Mediterráneo oriental, de forma que llevó a cabo innumerables expediciones militares, transportando tropas en grandes naves; al igual que le facilitó impulsar su actividad comercial, mediante el transporte de cobre, incienso o marfil de Somalia, entre otros materiales (ver Figura 2-1). Tras este florecer de la navegación comercial y militar, se fueron disputando el dominio del mar entre diversos pueblos: cretenses, fenicios y otras poblaciones costeras. Hacia el año 800 a.c, los griegos inventan el navío que revolucionaría los próximos mil años: el birreme, como el mostrado en la Figura 2-2 que era la primera embarcación con cubierta y puente de mando.



**Figura 2-1 Barco vela egipcio [8]**

Entre los años 750 y 550 a.c, gracias estas naves se produjeron diversos hitos históricos: Corinto fundó Siracusa, la flota de Mileto rodeó el Mar Negro, entre otras gestas. Se conseguía, de esta forma, extender las fronteras de los imperios gracias a los avances en la tecnología marina.



**Figura 2-2 Birreme griego [9]**

Trasladándonos a finales del siglo III a.c, vemos como el Imperio Romano ya había aprendido a utilizar los birremes y trirremes de estilo griego. Fueron los responsables de crear un arma temible denominado “corvus”, que se puede ver en la Figura 2-3, que consistía en una plataforma para atrapar el barco enemigo y poder abordarlo. En tiempos del emperador Augusto, durante la República, Roma pasó a ser la mayor potencia marítima del mundo tras derrotar a todos y cada uno de los pueblos griegos, consolidando su primera gran flota, la cual estaba compuesta por expertos navegantes de diversos pueblos: griegos, fenicios y egipcios. Mientras tanto, en Oriente, otros pueblos como el Imperio Chino se aventuraban a la mar en embarcaciones mucho menos sólidas que los navíos romanos.

Tras la caída del Imperio Romano, la presencia marítima de los vikingos, los cuales destacaron a lo largo de la historia por sus excelentes habilidades como marinos, es de notable interés. De hecho, la traducción del término vikingo en antiguo escandinavo significa literalmente: “el que frecuenta un fiordo”. Llevaron a cabo múltiples incursiones, destacando las conquistas en Europa Occidental, como la conquista de la mitad de Irlanda sobre el 795, invasiones a poblaciones pertenecientes al reino de Francia sobre el 885 o las incursiones en España y el Mediterráneo hacia el año 1090. De las incursiones realizadas en España, cabe destacar el ataque a Sevilla en el año 844, el cual se realizó durante siete días. Ante esta situación, Abd al-Rahmân II movilizó un ejército para derrotar a los vikingos, resultando vencedores los musulmanes. Muchos de los vikingos supervivientes se convirtieron al islamismo y aplicaron sus técnicas a la cría de ganado, las cuales dieron una gran reputación de los quesos, famosos hasta la actualidad. [10]



**Figura 2-3 Corvus romano [11]**

Dando un salto en la historia hasta los siglos XV y XVI, vemos como se llevan a cabo grandes descubrimientos marítimos debido a los progresos técnicos, científicos y de carácter geográfico, como la mejora de la técnica naval (brújula y el timón) o la difusión de la idea de la esfericidad de la Tierra. Fruto de esa mejora para la navegación, se llevaron a cabo grandes expediciones: [7]

- Viajes alrededor del continente africano por el famoso príncipe Enrique de Portugal el Navegante.
- El descubrimiento de América por Cristóbal Colón amparado por los Reyes Católicos en 1492 (ver Figura 2-4).
- Grandes avances del marino y cosmógrafo italiano Américo Vespucio, dando a conocer que las tierras descubiertas por Colón formaban un nuevo continente.
- El descubrimiento del paso entre el Océano Atlántico y el Pacífico, abriendo una nueva ruta comercial hacia las islas de las especias (“islas Molucas”) por el navegante portugués Fernando de Magallanes en 1520.
- La primera circunnavegación del mundo empezada por Magallanes y completada por el vasco Juan Sebastián Elcano entre 1519-1522.



**Figura 2-4 Carabelas de Cristóbal Colón [12]**

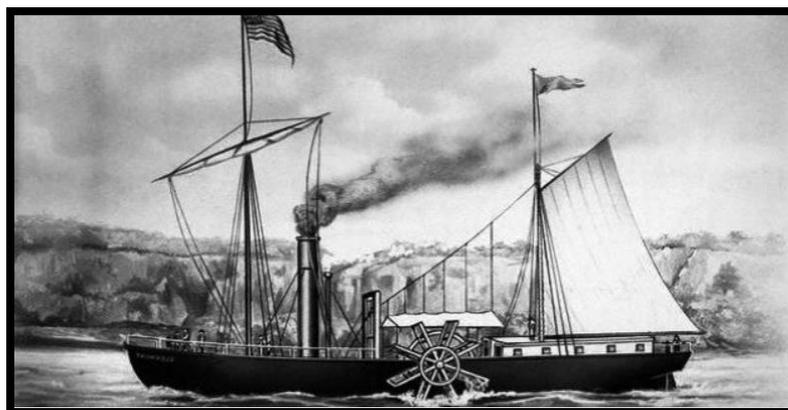
Tras todos estos sucesos históricos, en el periodo que va desde Colón hasta la llegada de las máquinas de vapor, el dominio del mar por las grandes potencias se convirtió en uno de los principales objetivos, ya que determinaría el poder militar y la riqueza de un país. Este dominio, entre los siglos XV y XVII, fue cambiando entre países como España, Países Bajos, Portugal y Francia, debido a los conflictos, crisis y problemas internos del país que iban acaeciendo.

Gran Bretaña entra en este juego del dominio marítimo a finales del siglo XVII e inicios del siglo XVIII, convirtiéndose en la primera potencia naval y primera potencia comercial del mundo, tras la decadencia de Países Bajos y Francia. Es en este siglo donde la construcción de los barcos a vela y el poder de maniobra llegan a su máximo esplendor: barcos con dos o tres puentes, con enormes velas y mástiles altos y delgados. Por otra parte, este siglo estuvo muy marcado por el éxito de la piratería, lo cual obligó a los buques de la época a portar una cantidad cada vez mayor de cañones y a adaptar sus estructuras a una forma defensiva, que les permitiera a la vez maniobrar, escapar con facilidad o hacer frente al adversario si se decidía el combate.

En la segunda mitad del siglo XIX, surgen nuevos tipos de naves, ya que la navegación a vela estaba condenada al fracaso debido a nuevos factores:

- El afán por mantener y superar el propio poderío económico de las potencias, provocaba que el comercio creciera y se aumentaran la capacidad de los navíos, otorgándoles mayores velocidades y más maniobrabilidad.
- Los pasajes empezaban a constituir una preocupación real, ya que los viajeros no se embarcaban en una navegación en cualquier condición como en siglos pasados. Eran los inicios del turismo marítimo.
- Las embarcaciones viejas de madera, aunque fueran de grandes dimensiones para la época, tenían unas limitaciones de capacidad de carga y de viajeros, pero sobre todo de seguridad.
- Los naufragios frecuentaban, y los incendios a bordo eran temidos por las tripulaciones de todo el mundo.

La llegada del vapor (ver Figura 2-5) dejó a la vela como un testimonio de tiempos más heroicos. Este gran cambio, que se produjo gracias al científico Robert Fulton, abrió una carrera de creciente progreso y mejora continua. Se mejoró no sólo la potencia y la velocidad, sino también la seguridad personal de los viajeros y su comodidad a bordo.



**Figura 2-5 Barco de vapor [13]**

A partir del nacimiento de los barcos propulsados por vapor, la competencia se hace muy presente entre Inglaterra y Estados Unidos, lo cual motivó la introducción de infinidad de pequeños y grandes modificaciones. Como cuando surgió la navegación a vapor, se llevaba a cabo únicamente por los ríos, faltaba lanzarse a la conquista de los océanos. Tras cumplir el hito de la navegación transoceánica, llega

la era de los barcos de acero, acompañada de grandes avances tecnológicos como el mejor rendimiento de los motores o la disminución del carbón consumido.

Tras la finalización de la Primera Guerra Mundial en 1918, Europa sufre una crisis económica. Poco antes de empezar la guerra, se había comenzado a emplear el petróleo como combustible de sustitución del carbón, pero no es hasta después de la crisis económica cuando se perfecciona ese avance. Durante esos años, famosos barcos fueron botados por distintos países para consolidar su poder comercial. Algunos de estos son el RMS Titanic (mayor transatlántico del momento) de los ingleses de la Figura 2-6, el Normandie de los franceses o el Rex de Italia.

Pasada la Segunda Guerra Mundial, se empezó a desarrollar la propulsión nuclear, con fines plenamente militares, siendo el primer ejemplo el submarino americano Nautilus. La Unión Soviética por otra parte no se quedó atrás en este aspecto ya que en 1957 botó el rompehielos Lenin de propulsión nuclear.



**Figura 2-6 RMS Titanic [14]**

Tras la Segunda Guerra Mundial, vemos como la navegación y las tecnologías continúan desarrollándose en diversos campos:

- En la industria, el transporte marítimo se convierte en el principal medio de comercialización entre los países, debido a su gran capacidad de transporte, permitiendo de este modo el comercio de bienes en sectores como los petroleros o graneleros. La pesca también es impulsada debido a los avances tecnológicos, como lo es el desarrollo de la tecnología sónar.
- En el sector del turismo y del ocio, se mejoran y se descubren nuevas estructuras permitiendo la aparición de nuevas embarcaciones como los modernos cruceros o barcos de regatas.
- Estos años estuvieron marcados también por las expediciones científicas que se llevaron a cabo, destacando las de carácter submarino como la comprobación de vida existente más allá de los 7000 m, realizada en la fosa de las Marianas por el científico Jacques Piccard y el teniente de la Marina Don Walsh (ver Figura 2-7). [15]
- Se avanzó en los instrumentos y en las ayudas a la navegación mediante la mejora de los faros, radiobalizas o de las comunicaciones entre barco-barco y barco-tierra.
- La aparición del sistema de posicionamiento global o GPS, el cual permitía ubicar una persona o a un objeto con una exactitud inferior a los 5 metros.
- Por último, se comenzó a utilizar la automatización de sistemas, como los vehículos no tripulados para investigación.



**Figura 2-7 Piccard y Walsh [16]**

Llegando a la actualidad (siglo XXI), vemos como gracias a la experiencia obtenida a lo largo de la historia de la navegación, y a lo aprendido durante la misma, se construyen barcos repletos de tecnología avanzada, se diseñan instrumentos y facilidades para llevar a cabo navegaciones seguras y se forman flotas poderosas por distintos países (un ejemplo es la Séptima Flota americana de la Figura 2-8). El motivo de impulsar estas herramientas y medidas, por las principales potencias del mundo, tiene como objetivo, el dominio en la lucha por liderar la economía del mundo y liderar el ranking en cuanto a poder naval.



**Figura 2-8 Séptima Flota americana [17]**

Poniendo la vista en el futuro, ya se está investigando y estudiando nuevos sistemas para la navegación centrándose esta vez, además de la capacidad militar y comercial, en la reducción de emisiones perjudiciales para el medioambiente. Estos nuevos objetivos ambientales están provocando el inicio de proyectos muy interesantes, como la construcción de barcos híbridos (combinando los sistemas actuales con energías renovables), consiguiendo de esta manera crear naves más limpias y sostenibles.

Finalmente, en cuanto a la Armada Española, siendo una de las más antiguas del mundo, ha mostrado siempre una gran capacidad de adaptación y evolución a la situación de su alrededor, en las distintas épocas de la historia. Actualmente, cuenta con múltiples unidades, equipadas con las mejores tecnologías del momento, como por el ejemplo las fragatas clase Álvaro de Bazán o también llamadas F-100, las cuales cuentan con uno de los sistemas de combate más avanzados del mundo. Además, continúa incrementando sus capacidades y mejorando sus tecnologías como la futura adquisición de las nuevas fragatas F-110, clase Bonifaz, o la nueva serie de submarinos S-80.

## 2.3 Abordajes en la mar

En el apartado anterior se desarrolló de manera resumida el origen y la evolución de la navegación en cuanto al progreso de las tecnologías, de la construcción naval, del poder militar o del poder comercial en las distintas épocas de la historia humana. Sin embargo, en este apartado nos centraremos en conocer las normas que se crearon y establecieron de cara a mejorar un aspecto primordial: la seguridad de la navegación marítima. Durante las primeras épocas de la historia como la Edad Antigua o Edad Media, este aspecto no se estudió, es decir, navegaban por el mar por donde querían sin restricciones de ningún tipo. De ahí que se dijera que el mar es un lugar inseguro para todo aquel que se aventuraba en él.

### 2.3.1 Aparición de las primeras normas de seguridad marítima

La historia ha demostrado la necesidad de establecer una serie de normas sobre la navegación; ya que, debido a distintos accidentes y desastres, se comenzó a percibir la seguridad como uno de los aspectos a tener en cuenta en el desarrollo de nuevos barcos. Esos accidentes provocaron grandes cambios en la forma de participar en actividades marítimas individual y colectivamente. Es razonable el pensamiento de que, en esas épocas, los peligros del mar fueran limitados al propio entorno natural, debido al reducido número y tamaño de los barcos, que además usaban como forma de propulsión velas o remos y no se alejaban demasiado de la costa. [18]

Es a mediados del siglo XIX, cuando se establecen unas primeras normas de seguridad para la navegación marítima. Los distintos avances tecnológicos del momento, como la introducción de máquinas de vapor y la construcción de los cascos en acero y hierro, provocó un aumento de los riesgos navegando, debido al mayor número, tamaño y velocidad de las embarcaciones. Por este motivo, algunos países comenzaron a estudiar posibles medidas a adoptar para evitar abordajes (colisiones) y naufragios.

Los buques de entonces no llevaban luces de navegación, exceptuando los buques de guerra que navegaban en formación durante la noche. Para evitar un abordaje en esa época entre dos buques, lo que se hacía para avisar al otro navío, era izar una bandera o realizar un destello de luz. Los ingleses fueron los primeros en aplicar este tipo de normas de señalización, y estas debido a su efectividad y simplicidad fueron adoptadas por el resto de países. Se llegó hasta el punto de que países como Francia, firmaran un acuerdo con Gran Bretaña sobre las señales luminosas de los buques de vapor. Consistía en una aceptación mutua entre ambos países para tener unas normas generales e idénticas, que facilitarían la seguridad en la navegación.

Durante el siglo XX, una serie de factores provocó que las principales naciones marítimas redactaran una serie de normas de manera conjunta:

- *Problema de la alta mar*: se buscaba establecer una serie de condiciones para el ejercicio de la libertad de navegación en alta mar, para evitar colisiones entre barcos. Esta introducción de normas sobre el tráfico marítimo no presentaba ningún inconveniente en las aguas interiores o costeras de los países, ya que los gobiernos poseían total libertad para establecer cualquier norma. El problema aparecía en alta mar, donde estaba establecido el principio de libertad en la navegación. Por este motivo, se decidió redactar unas normas mínimas de señalización y tráfico, constituyendo el denominado “derecho común del mar”, que recogía normas de navegación, salvamento y colisiones.
- *Barcos extranjeros en puerto*: A principios de siglo, cada país establecía sus requisitos para el control de los barcos en sus propios puertos.
- *Regulación de la competencia*: Quedó claro que el dominio del comercio fue siempre objeto de disputa internacional. Sin embargo, debido a los repetidos accidentes en la mar, se apreció que las rivalidades económicas entre países ponían en riesgo la seguridad, por lo que se debían regular algunas actividades o servicios que realizaban los barcos.

Sucesos como el famoso hundimiento del transatlántico Titanic, el 14 de abril de 1912, aceleró el proceso de la puesta en vigor de las normas internacionales. Además, se empezó a obligar a llevar a bordo sistemas de comunicaciones y equipos radio para poder avisar en caso de necesidad. El primer Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS) fue firmado por únicamente cinco potencias en 1960. Ese mismo año, se firmó también el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes (RIPA). A continuación, los dos siguientes apartados, muestran dos ejemplos de abordaje en la mar para comprender mejor esta necesidad de establecer normas que faciliten tener una navegación más segura.

### 2.3.2 MV Doña Paz y MT Vector

El 20 de diciembre de 1987 el buque de pasaje MV Doña Paz y el buque MT Vector colisionaban en el Mar de Sibuyán, junto a la isla de Mindoro. En esta tragedia conocida también con el nombre del Titanic asiático, tuvo únicamente 26 supervivientes. El primer buque llevaba a bordo a 4000 personas que realizaban un viaje desde la isla de Leyte hacia la capital de Manila. El segundo buque, cargaba con 8800 barriles de gasolina, diésel y queroseno, los cuales ocasionaron un gran incendio al propagarse por el mar, causando innumerables muertes. [19]

La derrota que realizaba el Doña Paz el día de la colisión, se trataba de la misma que realizaba dos veces por semana, con una tripulación de 53 personas. Por otra parte, el MT Vector, con una dotación de 13 personas se dirigía a Masbate. Por la noche del 20 de diciembre, colisionaban entre Marinduque y Mindoro oriental. La colisión produjo un gran incendio sobre la cubierta del MV Doña Paz, sin dar tiempo a lanzar los botes salvavidas y generando graves heridas a los supervivientes. Los 26 supervivientes fueron rescatados por un ferry que visualizó las llamas a 13 km, después de tres horas y media (ver Figura 2-9).



Figura 2-9 Punto de colisión [20]

El MV Doña Paz se hundió un par de horas después, seguido, dos horas más tarde, por el MT Vector. Sin embargo, la ayuda gubernamental llegó muy tarde y solo pudieron rescatar 275 cadáveres. El Comité del Congreso en la investigación oficial declaró que los dos buques tenían la culpa del accidente (ver Figura 2-10), concluyendo que ambos poseían tripulaciones inexpertas. Además, no se realizó ninguna maniobra por parte de ambos buques para mantener el pasaje a salvo, debido a esa inexperiencia por parte de los integrantes de ambos barcos.

Se cometieron varios errores, por ambos buques: el Doña Paz navegaba sin radio incumpliendo artículos de la normativa establecida para los equipos y sistemas de navegación mínimos que se debían de llevar. Por la otra parte, el MT Vector, no poseía los permisos obligatorios para navegar. Se deben sumar las condiciones de la zona por donde se produjo el abordaje, la cual se caracterizaba siempre por

la falta de controles sanitarios, de seguridad en los buques y del incumplimiento de la normativa vigente en esa época casi en su totalidad.



Figura 2-10 Incendio tras colisión [19]

Existen unas normas, pertenecientes al RIPA, que puede que hubiesen evitado el abordaje si ambos buques las hubiesen cumplido:

- La regla nº 5:
  - “Todos los buques mantendrán en todo momento una eficaz vigilancia visual y auditiva, utilizando asimismo todos los medios disponibles que sean apropiados a las circunstancias y condiciones del momento, para evaluar plenamente la situación y el riesgo de abordaje”.
- La regla nº 7:
  - “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”.
  - “Si se dispone de equipo radar y funciona correctamente, se utilizará en forma adecuada, incluyendo la exploración a gran distancia para tener pronto conocimiento del riesgo de abordaje, así como el punteo radar u otra forma análoga de observación sistemática de los objetos detectados”.
  - “Se evitarán las suposiciones basadas en información insuficiente, especialmente la obtenida por radar”.
- La regla nº 8:
  - “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 maríneas”.
  - **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 del radar. Deberá evitarse una sucesión de pequeños cambios de rumbo y/o velocidad”.
  - “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**”.

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

Como vemos en la regla nº8 anteriormente definida, todas las medidas que dice que se deben tomar para prevenir un abordaje son en base a situaciones indefinidas (las destacadas en negrita), es decir, situaciones que se resolverán en base a los conocimientos marineros y experiencia de quién gobierna el barco. Por este motivo, surge el problema cuando un barco navega con una tripulación inexperta o con falta de experiencia en esas situaciones, lo cual puede provocar una colisión como el caso del MV Doña Paz y el MT Vector.

En consecuencia, se han iniciado proyectos, en los que se investiga una forma de automatizar las reacciones que un barco debe tomar al compartir su espacio con otros barcos. De esta forma, a partir de una serie de parámetros que definen el escenario que debe ser analizado, se estudian los datos de carácter cuantitativo generados por las simulaciones para establecer las condiciones óptimas en cuanto a cuándo reaccionar (detección de situaciones de riesgo) y cómo se debe maniobrar (generación y seguimiento de trayectorias óptimas) en situaciones de tráfico marítimo específicas.

### 2.3.3 SS Andrea Doria y Stockholm

El 25 de julio de 1956 el Andrea Doria se dirigía a Nueva York en una noche de niebla espesa y por otro lado el Stockholm viajaba de Nueva York a Gotemburgo. Ambos barcos se vieron en sus respectivos radares y aunque llevaron a cabo maniobras para evitar la colisión, acabaron chocando a las 23:00 de esa misma noche. Este abordaje causó la muerte de 51 personas y el hundimiento del Andrea Doria a la mañana siguiente. [19]

El Andrea Doria navegaba cerca de la costa de Nantucket, cuando un punto en el radar alertó a los responsables del barco. Decidieron caer a babor ya que el punto aparecía a estribor por su proa y así evitaban un posible abordaje. Sin embargo, el Stockholm que también había detectado al Andrea Doria en su radar, modificó el rumbo a estribor atendiendo al reglamento en ese momento. Había una espesa niebla que dificultaba la visión de ambos buques. A unas diez millas uno del otro, el radar del Stockholm detectó al Andrea Doria a babor (ver Figura 2-11).

Como la luz del Andrea Doria apareció por estribor, el comandante del Stockholm confundido, tomó la decisión de hacer una guiñada a estribor como se estipulaba en el RIPA. Sin embargo, esta maniobra no fue efectiva ya que cuando el Andrea Doria vio al Stockholm por estribor, hizo un cambio hacia babor. Ambos barcos estaban ubicados muy cerca para poder evitar la colisión.



Figura 2-11 Esquema del abordaje [19]

Tras el impacto, el Andrea Doria quedó con un ángulo de escora importante, lo que le imposibilitaba arriar los botes salvavidas que llevaban a bordo. El capitán del buque envió un mensaje de socorro (SOS) y pidió ayuda al propio Stockholm. Además de esa ayuda, acudieron al auxilio los barcos cercanos, que debido a que se encontraban cerca de la costa. [19]

En la investigación oficial, llegaron a varias conclusiones:

- El Andrea Doria no solo se hundió por la escora que le provocó el abordaje, ya que dicho ángulo de escora incrementó por la falta de lastrado. Según los investigadores si hubiesen realizado la maniobra de lastrado, el buque no se hubiese hundido.
- El Stockholm estaba un grado a estribor del Andrea Doria y no a cuatro grados como dijo este, por lo que no era una distancia suficiente para el cruce de buques en vuelta encontrada. Y por último el Stockholm cometió el error de dar atrás y separarse del Andrea Doria, provocando que entrase más rápido en agua en sus compartimentos y causando más muertes (ver Figura 2-12).



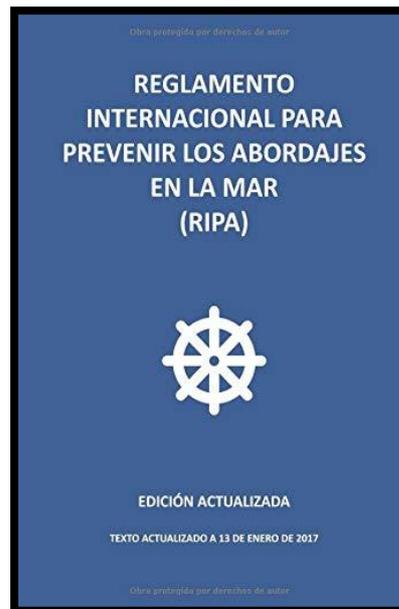
**Figura 2-12 Stockholm tras colisión [21]**

Al igual que el anterior caso de abordaje, la normativa vigente de ese año era el Convenio Solas y el RIPA en vigor de esa época. Sin embargo, esta normativa aún le faltaba solucionar ciertas controversias. Como repercusión en la normativa, este accidente provocó que las controversias o problemas que planteaba la normativa anterior, quedaron solucionadas con el RIPA (ver Figura 2-13) de 1977 por la Organización Marítima Internacional (OMI). En este caso, ambos capitanes cometieron errores que produjeron este abordaje. A parte de lo nombrado anteriormente, se debe destacar la falta de comunicación por radio, incluso con las malísimas condiciones meteorológicas que existían, ninguno tubo la iniciativa de facilitar la maniobra por radio. [19]

## **2.4 Normas COLREG**

Los ejemplos de abordajes mostrados en el apartado anterior, muestran una vez más la gran importancia de establecer normas para prevenir la colisión entre barcos y la importancia de su cumplimiento. A pesar de las innumerables mejoras en el ámbito marítimo, como por ejemplo en las comunicaciones, con la sustitución de la comunicación mediante banderas por avanzadas tecnologías como la radio o la transmisión de datos en forma de imagen, las colisiones entre buques continúan siendo una amenaza de la seguridad marítima.

Incluso un simple abordaje entre dos barcos puede conllevar daños importantes en cuanto a pérdida de vidas humanas y daños colaterales para el medioambiente. Por este motivo, para asegurar la seguridad en la navegación marítima en situaciones de encuentro de barcos en el mar, la OMI reformuló las normas de carácter internacional para prevenir los abordajes en la mar de 1972, o también llamado Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs). A lo largo de este trabajo se utilizará el término COLREG cuando nos refiramos a estas normas.



**Figura 2-13 RIPA [22]**

Este convenio tuvo por objeto actualizar y reemplazar el Reglamento para prevenir abordajes de 1960, COLREG define las reglas para los procedimientos evasivos dependiendo de la configuración geométrica y el movimiento relativo entre dos barcos que se encuentran. A pesar de estas normas, el abordaje entre buques sigue siendo una gran preocupación para la seguridad de la navegación marítima, y es sabido que la inmensa mayoría de accidentes que se producen están relacionados con errores humanos. De manera general, las distintas normas que se definen en dicho convenio son: [23]

- *Generalidades:* En este apartado hay una serie de reglas en las que primero se define el ámbito de aplicación del reglamento, unas normas sobre la responsabilidad del personal que se encuentra al mando de cualquier barco o vehículo que deba cumplir estas normas, y por último un conjunto de definiciones generales en las que se explican los distintos buques que existen que deben cumplir estas normas.
- *Reglas de rumbo y gobierno:* A lo largo de esta sección se desarrollan una serie de reglas que deben seguir en base a distintas situaciones que se pueden encontrar en la mar:
  - Conducta de los buques en cualquier condición de visibilidad: Se explican aspectos como la vigilancia, velocidad de seguridad, los riesgos de abordaje, entre otros aspectos.
  - Conducta de los buques que se encuentren a la vista uno del otro: Esta sección trata sobre las distintas situaciones que los barcos pueden encontrar y como deben actuar. Ejemplo de esas situaciones son un buque que alcanza a otro, situación de vuelta encontrada o también situación de cruce, entre otras. La aplicación que se ha diseñado se enfocará en la simulación de alguna de estas situaciones y su posterior análisis.
  - Conducta de los buques en condiciones de visibilidad reducida: Reglas de aplicación a los buques que se encuentren navegando dentro de una zona de visibilidad reducida.
- *Luces y marcas:* En este aspecto de gran relevancia se mencionan, definen y desarrollan todas las luces y marcas que los buques deben llevar instaladas y expuestas en función de las características del buque, maniobra que esté realizando o situación que se encuentre en ese momento. En la Figura 2-14 se puede ver un ejemplo de luces y marcas que deben llevar las embarcaciones según el tipo de actividad realice o situación se encuentre.



Figura 2-14 Luces y marcas [24]

- *Señales acústicas y luminosas*: Al igual que en el apartado se establecían unas directrices a seguir en cuanto a luces y marcas que se deben llevar instaladas y que son de obligado cumplimiento, también tiene gran importancia las distintas señales acústicas y luminosas. Estas señales tienen el objetivo que busca el presente Reglamento de mejorar la seguridad de la navegación marítima. Ejemplo de estas señales son las pitadas de los buques para las diferentes maniobras que vayan a realizar en función, como en otros casos, de la situación en la que se encuentra el buque.
- *Exenciones*: En este apartado se muestran algunas condiciones que permiten la exención de cumplir este Reglamento. Esto se dará para buques cuyas quillas hayan sido instaladas o se encuentren en una fase parecida de construcción antes del presente Reglamento. Sin embargo, deberán cumplir los requisitos del Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes en la Mar de 1960.
- *Verificación del cumplimiento de las disposiciones del convenio*: La presente sección explica una serie de definiciones, aplicación y una verificación del cumplimiento de las disposiciones establecidas del Convenio.
- *Anexos*: Por último, existen una serie de anexos donde se desarrollan diversos aspectos que añaden información de las secciones anteriores:
  - Anexo I: Posición y características técnicas de las luces y marcas.
  - Anexo II: Señales adicionales para buques de pesca que se encuentren pescando muy cerca unos de otros.
  - Anexo III: Detalles técnicos de los apartados de señales acústicas.
  - Anexo IV: Señales de peligro.

## 2.5 Algoritmo compatible con COLREG

Para reducir y mitigar el riesgo de colisión debido al error humano, se han desarrollado una serie de algoritmos dedicados a la detección de situaciones de colisión entre barcos. Sin embargo, la gran mayoría de estos algoritmos se han diseñado para estudiar situaciones de encuentro entre dos barcos, y es posible que no proporcionen un rendimiento de prevención de abordaje confiable y consistente en situaciones de encuentro de múltiples barcos.

Aunque se hayan creado un gran número de algoritmos en el campo de planificación de rutas y control de múltiples robots y sistemas automatizados, con posibilidad de aplicarse para evitar colisiones entre múltiples sistemas de vehículos, las normas de tráfico marítimo no han sido incorporadas de manera adecuada en estos algoritmos. Esto conlleva una limitación de su aplicabilidad práctica a situaciones reales de tráfico marítimo, ya que los distintos tipos de barcos, incluidos los buques controlados de manera automática (sin necesidad de personas a bordo), se rigen por las mismas normas de tráfico marítimo.

Para estudiar este problema se ha procedido a buscar artículos que establezcan el estado del arte en lo que respecta a este tipo de desarrollos. Entre la literatura existente se seleccionó el trabajo presentado en [25] para analizar el desarrollo de este tipo de soluciones.

El enfoque propuesto está diseñado para ser parte de un sistema de apoyo a la decisión para los operadores de puentes, con el fin de mejorar la navegación tradicional; como herramienta de formación, de cara al futuro o para formar parte del sistema autónomo de guiado de buques. Se basa álgebra vectorial para describir los diferentes escenarios previstos en los encuentros regulados por COLREG.

En los últimos años se ha dedicado una gran atención a la obtención del buque autónomo, siguiendo dos líneas de investigación separadas pero que se complementan: la gestión autónoma de la maquinaria instalada a bordo y la conducción automática del barco. Este último se puede dividir en dos capas: **la planificación** se ocupa de la generación de la ruta que se desea seguir y puede tener en cuenta la respuesta del barco a las condiciones climáticas y la replanificación de emergencia para evitar una posible colisión; **el control de movimiento** por otra parte, se encarga de calcular la actuación necesaria para conseguir que el barco siga la ruta planificada.

La Figura 2-15 muestra cómo fluye la información a través de las capas: la información recopilada por los sensores se procesa para identificar obstáculos potenciales (detección de obstáculos) y se proporciona a la capa de planificación de movimiento: la ruta se vuelve a planificar para evitar la colisión con los obstáculos y finalmente se alimenta en la capa de control de movimiento, que actúa sobre los dispositivos de propulsión y dirección para obtener la maniobra deseada.

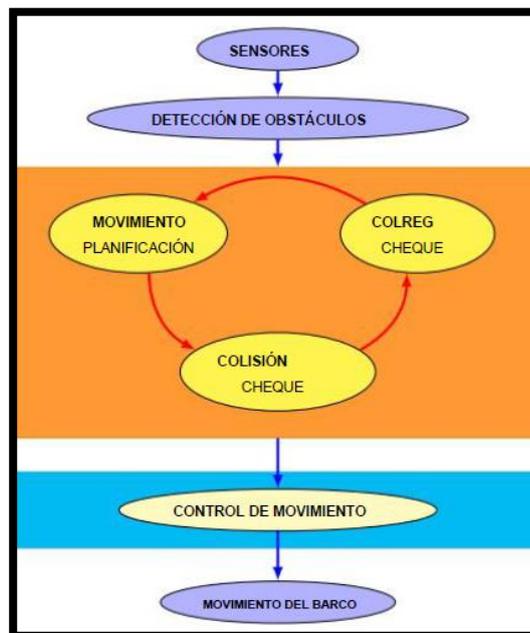


Figura 2-15 Esquema de las dos capas [25]

## 2.6 Escenarios

Aunque en el apartado anterior se definieron, de manera general, los distintos tipos de normas que existen en COLREG y en qué consisten, nos centraremos en las normas de gobierno y navegación. En

ese apartado, COLREG distingue tres maniobras distintas: **vuelta encontrada** (Head on), **alcance** (Overtaking) y **cruce** (Crossing). Hay que tener en cuenta que estas normas se aplican si se trata de embarcaciones propulsadas por motor, no de embarcaciones de vela o barcos especiales con capacidad de maniobra limitada.

### 2.6.1 Maniobra de vuelta encontrada (Head on)

La maniobra de vuelta encontrada se realizará cuando dos buques (A y B) de propulsión mecánica se encuentren navegando a rumbos opuestos o casi opuestos, con riesgo de abordaje. Para evitar la colisión, una medida COLREG establece que ambos buques deberán modificar su derrota (camino), **cayendo ambos a estribor, de forma que cada uno pase por la banda de babor del otro.**

Se podrá considerar dicha situación, según la regla 14 del Reglamento, cuando un buque vea a otro por su línea de proa o casi por su proa. Cuando existan dudas de si se está en dicha situación, se supondrá que existe y se llevará a cabo la maniobra, para garantizar la seguridad de la navegación marítima y la seguridad de ambos buques (ver Figura 2-16).

Como se menciona al inicio del estado del arte, gran parte de los errores que se producen navegando están relacionados directamente con el factor humano. Al final, es competencia de las personas que gobiernan el buque, el considerar si se está produciendo situación de vuelta encontrada y responsabilidad también decidir maniobrar como corresponde. [23]

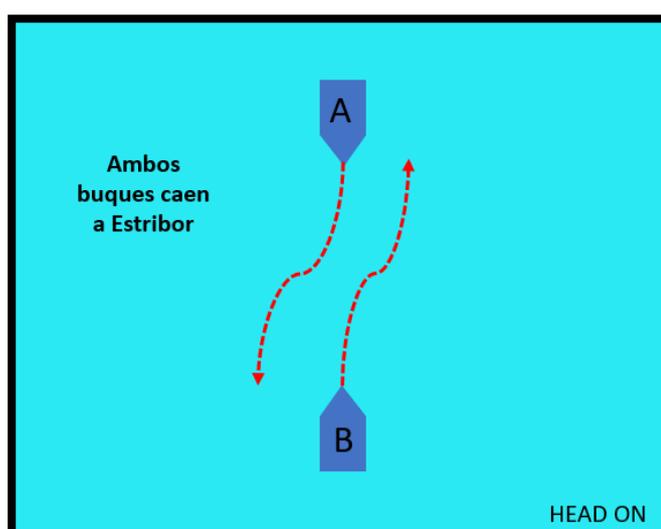


Figura 2-16 Maniobra de vuelta encontrada [Fuente propia]

### 2.6.2 Maniobra de alcance (Overtaking)

La situación de alcance entre dos barcos se produce cuando un buque (B) se aproxime a otro (A) desde una marcación o ángulo mayor de 22,5 grados a popa del través del barco A, como se puede ver en la Figura 2-17. El buque que alcanza debe gobernar al alcanzado. Podrá sobrepasar al primero por cualquier banda, siempre y cuando pueda realizar la maniobra de forma segura (que no venga nadie o que no haya obstáculos). Al igual que la maniobra de vuelta encontrada, si existe duda de si se está alcanzando o no a otro buque se deberá considerar que lo está haciendo y actuará acorde las normas COLREG. [23]

En esta situación se aplicarán dos reglas COLREG: la regla 13 “Buque que alcanza” y la regla 16 “Maniobra de buque que cede el paso”. De conformidad con la regla 13, el buque que alcanza se mantendrá alejado de la derrota del alcanzado. También se explica que ninguna variación posterior de la marcación entre los buques, hará del buque B un buque que cruza (en el sentido que da el Reglamento), y no le dispensará de su obligación de mantenerse alejado del buque A, hasta que lo haya adelantado

completamente y se encuentre a una distancia de seguridad respecto al otro buque. En lo referente de la regla 16, ya se mencionó, el buque que está alcanzando deberá estar apartado de la derrota del alcanzado, por lo que deberá maniobrar con el tiempo suficiente y de forma decidida para quedar bien franco del otro.

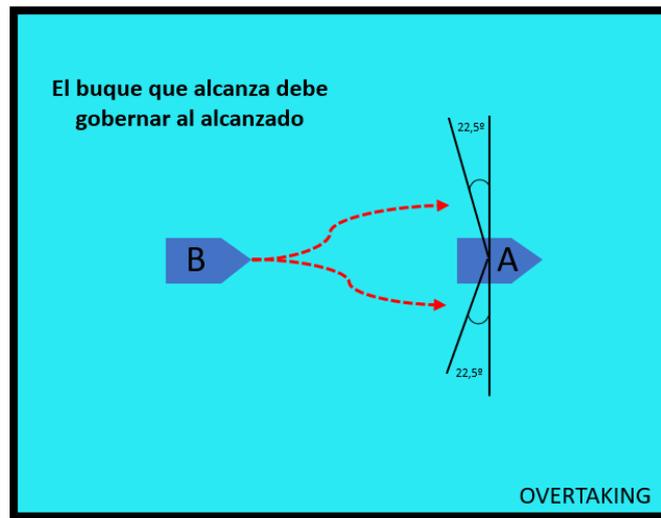


Figura 2-17 Maniobra de Alcance [Fuente propia]

### 2.6.3 Maniobra de cruce (Crossing)

La última maniobra se trata de la situación de cruce entre dos barcos. Cuando dos buques de propulsión mecánica se cruzan con riesgo de colisión, el buque (A) que tenga al otro **por su costado o banda de estribor**, se mantendrá alejado de la derrota de este otro (B), como se ve en la Figura 2-18. En esta situación, si las circunstancias lo permiten, **evitará cortar la proa** (pasar por delante de la proa). En el caso que no pueda cortar la proa debido a falta de seguridad marítima, se cortará la popa del buque. Dicha situación se puede dar por estribor o por babor. Esta situación se encuentra regulada en la regla 15 de COLREG. [23]

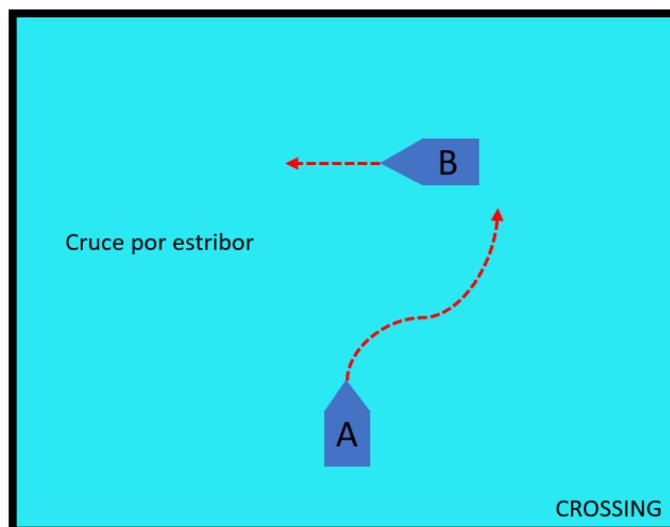


Figura 2-18 Maniobra de Cruce [Fuente propia]

## 2.7 Análisis de sistemas de índices de colisión

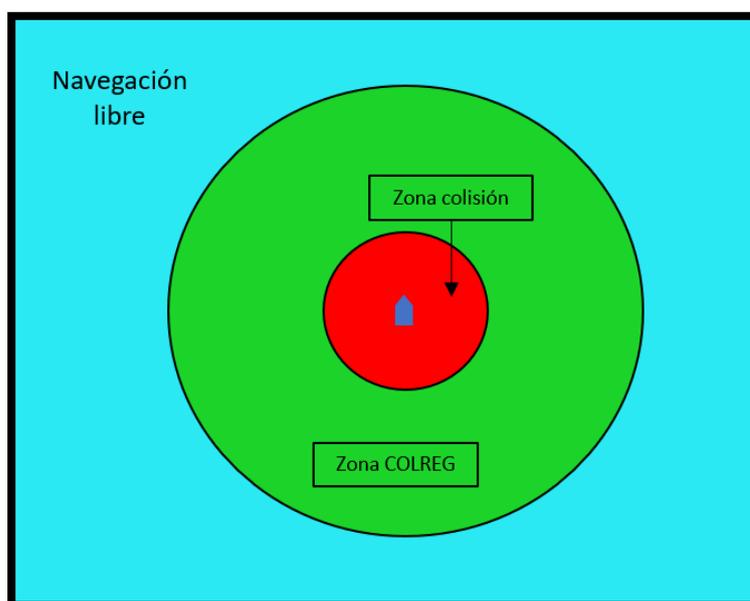
Tal y como se ha comentado previamente, durante el desarrollo del presente trabajo, se ha realizado una búsqueda de información relacionada con la obtención de un algoritmo que designe unos

coeficientes o índices de colisión para integrarlos en el simulador. De entre todos los trabajos, investigaciones y avances en este campo durante los últimos cinco años, se ha decidido estudiar y valorar, para el simulador a desarrollar, el siguiente sistema de índices de colisión, recogido en [25].

El algoritmo descrito en esta sección está diseñado para verificar si un escenario determinado cumple con COLREG o no, para poder integrarlo en un marco de planificación de movimiento. Antes de analizar los aspectos matemáticos del algoritmo, es necesario formular algunas hipótesis generales. Considerando la Figura 2-19, el objeto en el centro de la figura representa la posición del barco. La zona de colisión potencial (roja) está delimitada por un círculo de radio  $d_{collision}$ . Si un buque obstáculo entra en esta zona, la probabilidad de colisión se considera demasiado alta. El propósito del algoritmo anticolidión es guiar el barco para mantener esta zona de colisión siempre libre. El problema mencionado anteriormente sobre las medidas indefinidas presentes en el COLREG, se trata a lo largo de [25].

La zona de aplicación COLREG (verde), delimitada por un círculo de radio  $d_{safety}$  de seguridad, representa el área en la que el buque y el buque obstáculo pueden interactuar, es decir, donde la acción inesperada de un buque puede conducir a una situación peligrosa. En esta área, se requiere el respeto de los COLREG.

Eventualmente, si los dos barcos están lo suficientemente lejos, es decir, el barco obstáculo está en la zona libre de navegación (azul), no se requiere verificación COLREG, ya que la acción de un barco no debe interactuar con la del otro. Si bien la zona de colisión se gestiona mediante una verificación para evitar colisiones, se supone que el algoritmo de conformidad con COLREG descrito en esta sección funciona en la zona verde.



**Figura 2-19 Zonas COLREG [Fuente propia]**

### 2.7.1 Definiciones

Las siguientes definiciones se refieren al escenario representado en la Figura 2-20. En donde se consideran un sistema de coordenadas de la mano derecha ( $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$ ) como se muestra en la figura, con los dos primeros ejes apuntando en dirección norte (arriba) y este (derecha) respectivamente, y el tercero apuntando hacia abajo, y considere una embarcación en el punto " $x_0$ ", navegando con un vector de velocidad " $v$ ". Una embarcación obstáculo, es detectada en la posición " $h_0$ " y navega con un vector de velocidad " $s$ ". Como se señaló anteriormente, se supone que el escenario está libre de colisiones. En particular, se supone que la distancia entre el buque y el buque obstáculo es mayor que un valor umbral de distancia de seguridad de colisión para la duración de todas las maniobras. [25]

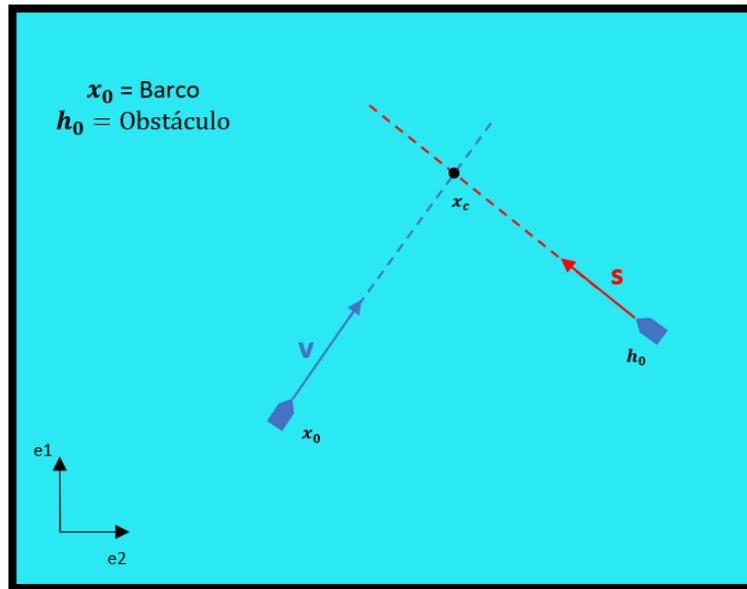


Figura 2-20 Definiciones [Fuente propia]

Si la distancia entre los barcos es inferior a este primer valor umbral, se supone que los barcos chocan, por lo que el escenario se descarta a priori. Además, la verificación de los COLREG se requiere solo si la distancia entre las embarcaciones cuando se inicia la maniobra es menor al umbral de  $d_{safety}$ , que es mayor que  $d_{collision}$ . Por el contrario, si los dos buques están lo suficientemente lejos el uno del otro, no se requiere verificación COLREG y el escenario se considera compatible con COLREG. Por lo tanto, se supone que se verifica lo siguiente en igualdades:

$$\begin{cases} d(h(t), x(t)) > d_{collision} \\ d(h_0, x_0) < d_{safety} \end{cases}$$

Ecuación 2-1

Donde  $d(-,-)$  representa la distancia entre dos puntos, y:

$$\begin{aligned} h(t) &= h_0 + st \\ x(t) &= x_0 + vt \end{aligned}$$

Ecuación 2-2

### 2.7.2 Condición de intersección

El punto de intersección entre las direcciones de “v” y “s” se denota por  $x_c$ . Los vectores  $u$  y  $r$  están definidos, respectivamente, perpendiculares a “v” y a “s”, es decir, tales que: [25]

$$\begin{aligned} v \cdot u &= 0 \\ s \cdot r &= 0 \end{aligned}$$

Ecuación 2-3

Hay una condición de cruce si el siguiente sistema lineal teniendo una solución:

$$\begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} u \cdot x_0 \\ r \cdot h_0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 2-4

Donde  $x = (x, y)$  indica un punto genérico. Por lo tanto, la condición se puede escribir de la siguiente manera:

$$\det \left( \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix} \right) \neq 0$$

**Ecuación 2-5**

La solución del sistema lineal de la Ecuación 2-4 es el punto de intersección  $x_c$  definido unas líneas más arriba y representado en la Figura 2-20. Hay una intersección real solo si  $x_c$  se encuentra tanto frente al barco como frente al obstáculo, es decir, si se verifican las siguientes condiciones:

$$\begin{cases} (x_c - x_0) \cdot v > 0 \\ (x_c - h_0) \cdot s > 0 \end{cases}$$

**Ecuación 2-6**

### 2.7.3 Maniobra de cruce

Si se cumplen las ecuaciones 5 y 6, y no hay adelantamiento, es decir, no se cumple la ecuación 10, se encuentra una condición de cruce. Según COLREG, en una condición de cruce el buque que puede ver el lado de babor del otro, debe ceder el paso girando a estribor. Considere el producto vectorial entre “v” y “s”: [25]

$$v \wedge s \cdot e_3 \begin{cases} > 0 \text{ barco ve un obstáculo a estribor} \\ = 0 \text{ rutas paralelas} \\ < 0 \text{ barco ve un obstáculo a babor} \end{cases}$$

**Ecuación 2-7**

Nótese que el caso de igualdad se indica sólo para completar, ya que está excluido por la condición expresada en la Ecuación 2-5. La Ecuación 2-7 permite así determinar qué buque debe ceder el paso, de acuerdo con COLREG. Para determinar quién pasa primero en el punto  $x_c$ , los tiempos de llegada deben determinarse y compararse. Por lo tanto, las siguientes condiciones pueden darse:

$$\frac{|x_c - x_0|}{|v|} - \frac{|x_c - x_0|}{|s|} \begin{cases} > 0 \text{ obstáculo primero en } x_c \\ = 0 \text{ colisión} \\ < 0 \text{ barco primero en } x_c \end{cases}$$

**Ecuación 2-8**

Hay que tener en cuenta que, en este caso, la igualdad significa que hay una colisión. Al combinar las ecuaciones 7 y 8, se obtiene la siguiente condición de cumplimiento de COLREG para una condición de cruce:

$$(v \wedge s \cdot e_3) \left( \frac{|x_c - x_0|}{|v|} - \frac{|x_c - x_0|}{|s|} \right) < 0$$

**Ecuación 2-9**

### 2.7.4 Maniobra de alcance

COLREG considera que existe una condición de alcance cuando el buque que adelanta se enfrenta al alcanzado desde un ángulo de adelantamiento  $\theta_0$  inferior a  $22,5^\circ$  desde la popa del buque. Esto se puede traducir en la siguiente ecuación: [25]

$$\frac{v \cdot s}{|v||s|} > \cos(\theta_0)$$

**Ecuación 2-10**

En caso de verificarse la desigualdad de la Ecuación 2-10, COLREG exige que la embarcación que alcanza no cruce la ruta del alcanzado. De forma más detallada, si las rutas de los barcos no se cruzan,

el obstáculo debe pasar primero, de acuerdo con la Ecuación 2-8. Por último, en el caso de que haya superposición perfecta de las rutas conlleva a una colisión y se gestiona mediante la verificación para evitar colisiones.

### 2.7.5 Maniobra de vuelta encontrada

En la condición de vuelta encontrada, COLREG prescribe un giro a estribor para ambos buques. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el método propuesto aquí se ocupa solo de las acciones relacionadas con un buque. En caso de que ocurra un escenario de casi vuelta encontrada, es decir, el ángulo entre las rutas del barco es mayor que un ángulo de umbral  $\theta_h$ , el obstáculo del barco debe ubicarse en el costado izquierdo del barco. Esto se cumple cuando: [25]

$$v \wedge (h_0 - x_0) \cdot e_3 < 0$$

**Ecuación 2-11**

Si se verifica la desigualdad 11, también se debe verificar la condición de cruce. Comprender que, a diferencia del caso del ángulo de adelantamiento  $\theta_0$ , COLREG no da un valor exacto del ángulo de frente  $\theta_h$ . De forma análoga al caso de alcance, se considera un escenario de vuelta encontrada si el obstáculo del buque proviene de un ángulo inferior a  $22,5^\circ$  desde la proa del buque.

## 2.8 Críticas al sistema de índices de colisión

Tras realizar un análisis sobre el sistema de índices para posibles colisiones entre barcos presentado en [25], se encontraron una serie de cuestiones no resueltas recogidas en las siguientes críticas:

- *Presencia de singularidades:* El algoritmo descrito anteriormente, presenta posiciones singulares que incumplen la normativa. De esta forma si dos barcos se encuentran en una ruta de encuentro perfecta entre sus proas, la solución al sistema lineal tiene infinitas soluciones, aunque ante una colisión segura debería generar una única solución con un elevado índice de probabilidad de choque. Es decir, para ciertos casos muy específicos, los índices de intersección son generados de manera errónea.
- *No continuidad:* El cálculo de índices de colisión, según este algoritmo, solo se ejecuta cuando dos barcos se encuentran en una cierta zona (zona COLREG de la Figura 2-19), por lo que cuando existe un barco que debido al rumbo que lleva está entrando y saliendo en dicha zona, ya que está navegando por sus límites, se podrían estar produciendo cálculos del índice de intersección de manera intermitente. Además, debido a que la distancia de seguridad establecida es fija, se genera una falta de continuidad del algoritmo con respecto a las dinámicas del movimiento de los barcos, lo cual presenta dificultades para un posible análisis o estudio de las maniobras realizadas.
- *No considera todas las dinámicas posibles:* Otro problema a tener en cuenta que presenta este algoritmo, es que no se tienen en cuenta todas las dinámicas presentes, ya que no considera el movimiento angular del barco o la posibilidad de que un barco se encuentre parado. Un ejemplo de ello puede ser cuando dos barcos ubicados como los de la Figura 2-20, separados por cierta distancia, llevan un rumbo de intersección, pero uno de los dos se encuentra parado, es decir, con  $v = 0$ . Para este caso, el algoritmo genera un índice de intersección, el cual no se corresponde con la situación real que existe, ya que al estar un barco de los dos estático, no hay riesgo de abordaje. En esa situación con el barco sin velocidad, el otro únicamente le cortarían la proa a cierta distancia sin riesgo de colisión.
- *No considera el tamaño de los barcos:* Hay que reseñar como problema a resolver, en este sistema de índices, el defecto de no tener en cuenta el tamaño de los barcos para calcular los índices de colisión. Este factor es muy relevante, ya que no se pueden evaluar de la misma manera dos barcos que se encuentran a 100 metros de distancia entre ellos,

cuando miden 20 metros de eslora, que cuando uno de los dos o ambos tienen una longitud mucho mayor, como por ejemplo 200 metros de eslora. Este se debe, a la diferencia existente en la capacidad de maniobrar, los tiempos de reacción y otros factores que se deben tener en cuenta cuando dos barcos no tienen la misma topología estructural.

- *Zona de influencia geométrica no adecuada:* Como crítica final, con el uso de este algoritmo se genera un problema en relación a su zona de influencia, en la que se realiza el cálculo de los índices de intersección. Cuando se presenta un barco de forma estática ( $v = 0$ ), la zona de influencia debe tener en cuenta la geometría del barco, pues si se utiliza una circunferencia alrededor del barco, el dato que se obtenga no es del todo correcto, ya que la distancia del límite de la circunferencia al barco no es la misma en todas las partes del barco, por ese motivo es importante tener en cuenta la geometría del buque para la zona de influencia.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Descripción del apartado

En este apartado se procede a explicar el desarrollo del presente proyecto en el que se ha creado un sistema de simulación para evaluar maniobras reguladas por COLREG en diversos escenarios. Para ello se ha utilizado la tecnología de MATLAB y Simulink. Se explicará a su vez, el diseño de los escenarios y la elección de los distintos parámetros de control y movimiento seleccionados para el simulador.

Para lograr con este objetivo, el punto de partida consistirá en conocer el entorno en el que se trabajará y donde se llevarán a cabo el diseño de los escenarios, para el posterior análisis de resultados. El análisis de datos se llevará a cabo a partir de distintas pruebas, realizadas por distintas personas, con el fin de la calibración del sistema y para la obtención de las conclusiones finales.

### 3.2 Entorno MATLAB /Simulink

#### 3.2.1 Introducción a MATLAB

MATLAB consiste en un entorno que es empleado para múltiples aspectos como la computación técnica, el análisis de datos, la simulación y el desarrollo de algoritmos. En el MATLAB (ver Figura 3-1) permite realizar un análisis iterativo y procesos de diseño mediante un lenguaje de programación, basado en matrices y arrays. Innumerables universidades, grupos científicos e ingenieros utilizan MATLAB para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear distintos sistemas que dan forma al mundo que nos rodea. [26]

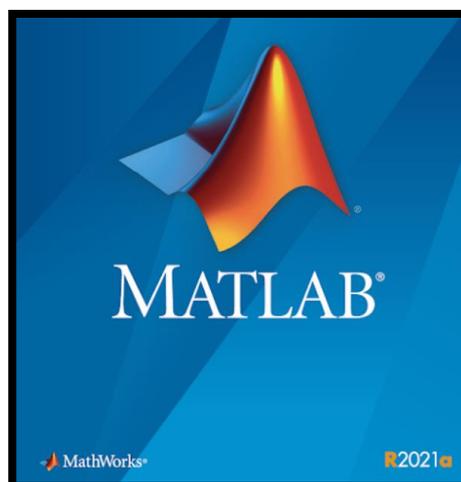


Figura 3-1 Logo MATLAB [26]

Cada lenguaje de programación tiene un propósito y una evolución particular, pero en el caso de MATLAB, cuyo lenguaje de programación es parecido a otros como Java o C, está cargada con su propio entorno y con un conjunto de bibliotecas distintas. El objetivo de crear este entorno era encontrar una forma alternativa de hacer álgebra lineal y computación numérica. Su creador Cleve Morgan, compartió en MathWorks algunos aspectos técnicos y personales en relación con el lenguaje de programación.

Algunas de las características más destacadas son:

- *Diseñado de manera profesional:* Los toolboxes de Matlab se desarrollan de manera profesional, pasando por pruebas rigurosas y están totalmente documentadas.
- *Aplicaciones interactivas:* Las aplicaciones de MATLAB permiten ver cómo funcionan los distintos algoritmos con sus datos, realizar iteraciones hasta obtener los resultados deseados y, después, generar automáticamente un programa de MATLAB para reproducir o automatizar el trabajo.
- *Capacidad de escalación:* Escala sus análisis para la ejecución de clusters (análisis de segmentación), GPUs (procesamiento de gráficos modernos) y nubes solamente con cambios mínimos en el código. Además, no es necesario volver a escribir el código ni aprender programación para Big Data y técnicas de manejo de datos fuera de memoria.

Por otra parte, debido a la evolución y desarrollo de esta plataforma, actualmente cuenta con una gran variedad de prestaciones, de las que se pueden destacar:

- *Análisis de datos:* Exploración, modelación y visualización de datos.
- *Gráficas:* Permite utilizar las gráficas integradas para visualizar sus datos, obtener información e identificar patrones. En caso de equipos de trabajo, se permite compartir las gráficas para adoptar los mismos estándares, en caso de no encontrar el tipo de gráfica adecuada, se pueden crear nuevas personalizadas y usarlas de la misma forma que una gráfica integrada de MATLAB.
- *Desarrollo de algoritmos:* Permite el desarrollo de algoritmos de una manera mucho más rápida que en lenguajes tradicionales como C o C++. Esos algoritmos se pueden transformar en aplicaciones independientes y componentes de software para la implementación web y de escritorio.
- *Creación de apps:* MATLAB cuenta con el App Designer, que permite crear apps profesionales, aunque no sea un desarrollador de software profesional. Está compuesta por dos partes principales: la distribución de componentes de forma visual en una interfaz gráfica de usuario (GUI) y la programación del comportamiento de la app, ajustando los parámetros de los distintos componentes.
- *Uso de MATLAB con otros lenguajes:* Permite ejecutar comandos de MATLAB desde otro lenguaje de programación sin necesidad de iniciar una nueva sesión de escritorio de MATLAB. Están disponibles los siguientes lenguajes: C/C++, Fortran, Java, Python y componentes y aplicaciones COM, como Visual Basic.
- *Hardware:* Permite conectar hardware a MATLAB y Simulink.
- *Cálculo paralelo:* Permite paralelizar algunas aplicaciones de MATLAB y ejecutar varias simulaciones de Simulink en paralelo.
- *Despliegue en escritorio y web:* Las aplicaciones de escritorio independientes se pueden desarrollar de manera completa dentro de MATLAB para proporcionar una completa solución con una interfaz de usuario personalizada, todo ejecutándose de manera local en la computadora del usuario final.

- *Cálculo en la nube:* Permite el acceso de almacenamiento, a bases de datos y otros servicios en la nube desde el código de MATLAB.

### 3.2.2 Introducción a Simulink

A diferencia de MATLAB, que consiste en un entorno de computación de datos y se trabaja mediante lenguaje de programación, Simulink se trata de un entorno de diagramas de bloque (ver Figura 3-2) que se utiliza para diseñar sistemas, simular antes de implementar en hardware y desplegar sin necesidad de escribir código, de ahí que sea más fácil de aprender que el anterior. Esta toolbox especial de MATLAB permite también simular el comportamiento de los sistemas dinámicos. En cualquier proceso de desarrollo científico o de la ingeniería resulta muy útil en dos etapas del proceso: Primero, ayuda a probar ideas y a visualizar como funcionarán; y después se pueden ejecutar diversas simulaciones, permitiendo perfeccionar el diseño. [26]

Para la transformación de sistemas complejos, las empresas que lideran el mercado adoptan el diseño basado en modelos haciendo un uso sistemático de modelos a lo largo de todo el proceso. Para ello:

- Utiliza un modelo virtual para la simulación y la comprobación del sistema de manera periódica desde las etapas iniciales de desarrollo.
- Valida el diseño con modelos físicos, pruebas de hardware y prototipado rápido.
- Mantiene un hilo digital determinado por los requisitos, la estructura del sistema, del diseño de los componentes, el código y las distintas pruebas.
- Extiende los modelos a los sistemas en funcionamiento para hacer mantenimiento predictivo y realizar análisis de fallos.

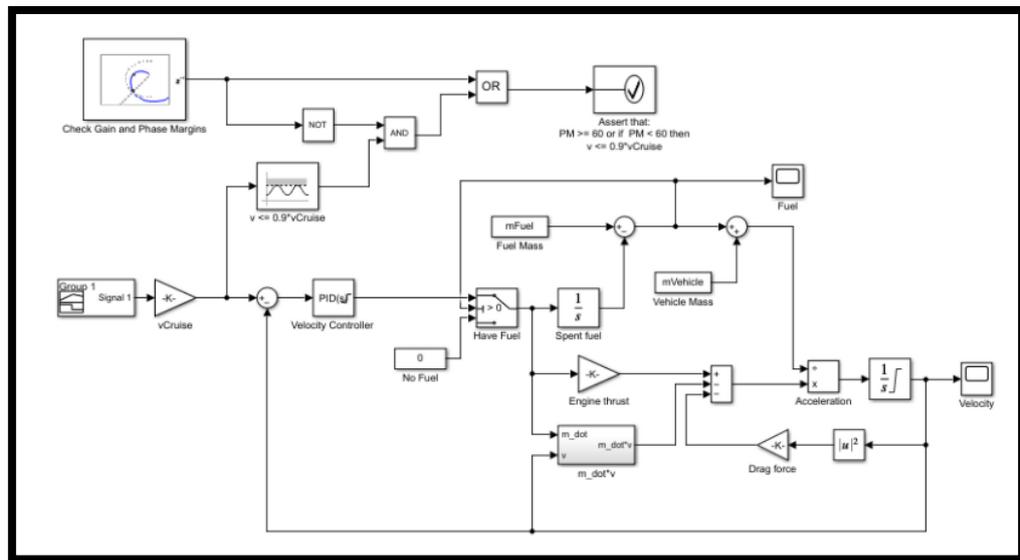


Figura 3-2 Ejemplo de diagrama de bloques en Simulink [26]

De cara al diseño y la simulación de un sistema, antes de aplicarlo al hardware:

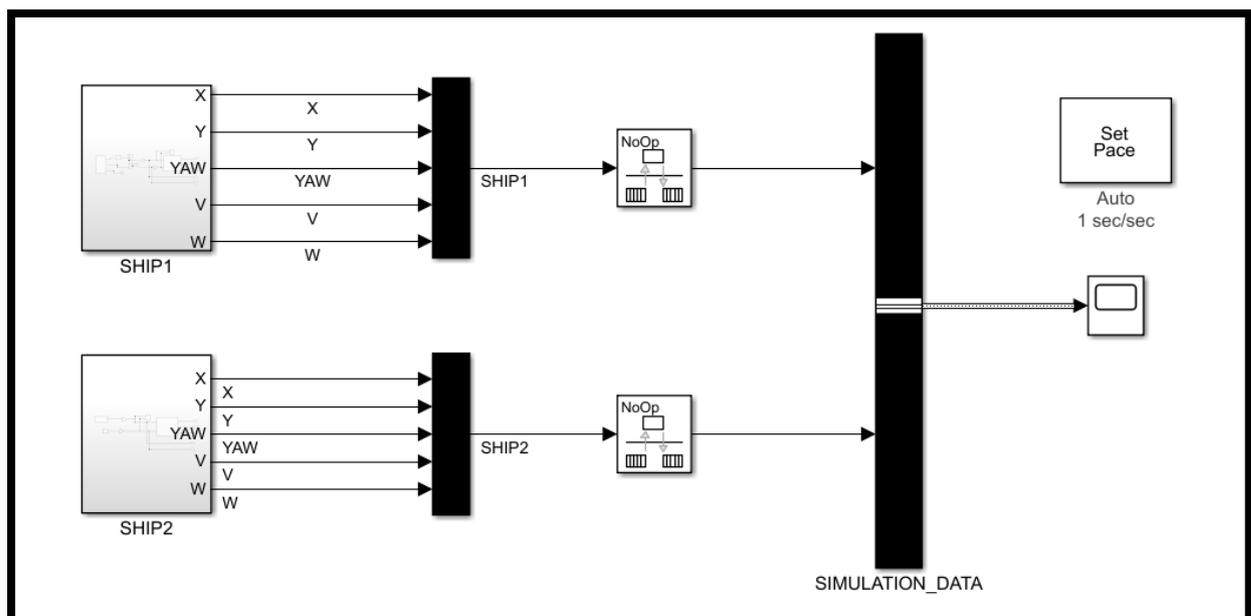
- Permite explorar de forma rápida varias ideas de diseño en un entorno de simulación de multidominio.
- Simula modelos de sistemas a gran escala con componentes y librerías reutilizables que incluyen herramientas de modelado especializadas de terceros.
- Despliegue de modelos de simulación para pruebas de escritorio y en tiempo real.
- Ejecuta simulaciones extensas en equipos de procesadores multinúcleo, clusters y en la nube.

A modo de resumen de las prestaciones y funcionalidades principales de Simulink, podemos destacar:

- *Desarrollo ágil de sistemas:* Creación de sistemas con software mediante un desarrollo rápido y continuo.
- *Integración continua:* Crea, prueba, empaqueta y despliega de forma automática código de MATLAB y modelos de Simulink.
- *Simulación de eventos discretos:* Simulación, prueba y optimización de procesos complejos y comunicaciones basadas en mensajes.
- *Generación de código integrado:* Generación y verificación de código para prototipado o para la producción.
- *Ingeniería basada en modelos:* Diseño, análisis y prueba de arquitecturas de sistemas y software.
- *Prototipaje rápido:* Realiza prototipos de algoritmos de sistemas de control o visión y verifica el comportamiento del sistema con la ejecución en tiempo real.
- *Modelado y simulación de sistemas:* Modelización y simulación de todas las partes de un sistema en un entorno multidominio.
- *Gestión de las variaciones de sistemas:* Diseño, configuración y análisis de variantes mediante el diseño basado en modelos.
- *Verificación, validación y prueba:* Verifica y valida sistemas utilizando el diseño basado en modelos.

### 3.3 Modelo cinemático de los barcos en Simulink

A lo largo de este apartado, se explicará la arquitectura de Simulink que conforma el simulador, además de describir, de forma genérica, las distintas estructuras de bloques que se han utilizado para conseguir dar a los barcos una cinemática. El diseño creado de la Figura 3-3, ha sido la base para la creación de los distintos escenarios (dos barcos, tres barcos y cuatro barcos).



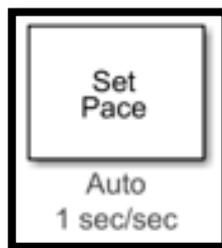
**Figura 3-3 Diseño general [Fuente propia]**

Esta interfaz inicial, la cual podemos denominar como interfaz principal, estará estructurada de la misma manera para los escenarios que tengan el mismo número de barcos, es decir, todos los escenarios

de dos barcos tendrán esa disposición de bloques: el bloque uno corresponderá, sea el escenario que sea, al barco propio que maneja el usuario mediante el uso del joystick; y el bloque dos en este caso corresponderá a la otra embarcación.

Para los escenarios de tres o cuatros unidades, esta interfaz se modifica ligeramente añadiendo un bloque o dos del tipo 2 (SHIP 2), los cuales corresponderán al tercer barco para los escenarios compuestos por tres barcos o al tercer y cuarto barco para los escenarios de cuatro unidades. El motivo por el que se escoge el bloque del tipo 2, para los barcos que no son el propio, se justifica con la distinta configuración en los parámetros de su cinemática y en su forma de controlar respecto al SHIP 1, que manejamos mediante el joystick, como se mencionó anteriormente.

Previa a la explicación de los bloques responsables del movimiento de los distintos barcos que participan en el simulador, se tiene que explicar la razón del uso de un bloque en la interfaz principal, debido al problema que surgió durante el desarrollo del simulador. Dicho problema consistía en que la simulación se llevaba a cabo de forma muy rápida, por lo que se tenía que reducir de alguna manera. El bloque Set Pace de la Figura 3-4, permite ejecutar la simulación del modelo a un ritmo más lento para que pueda ver cómodamente las animaciones conectadas, comprender, analizar y observar el comportamiento del sistema. La visualización de simulaciones a un ritmo más lento facilita a su vez la comprensión del diseño del sistema, la identificación de posibles problemas de diseño y la demostración del comportamiento casi en tiempo real. Además, permite poder visualizar e inspeccionar el sistema mientras la simulación está produciéndose. [26]



**Figura 3-4 Bloque Set Pace [Fuente propia]**

Cuando se utiliza este bloque en los distintos escenarios del simulador, se consigue que en un segundo de simulación se realiza en un segundo de tiempo real, lo cual no es el comportamiento por defecto en Simulink. De esta manera conseguimos corregir el problema de la velocidad de simulación.

Tras el análisis del problema de los tiempos de simulación pasamos a analizar cómo están configurados los dos tipos de barcos que el usuario va a tener durante la simulación. Comenzando con el bloque del SHIP 1, cuando inspeccionamos dicho bloque para ver la arquitectura Simulink, nos encontramos con la interfaz mostrada en la Figura 3-5. Esta interfaz se diferencia, de la interfaz del bloque del SHIP 2, principalmente en la forma de generar las señales que producirán el movimiento lineal y lateral de los barcos.

En este primer caso, el barco propio se moverá y adquirirá una velocidad en base a la señal que recoge del joystick que el usuario utilizará, de ahí la necesidad del bloque joystick. Únicamente se recoge la señal generada por el movimiento del joystick sin necesidad del uso del resto de botones, por lo que únicamente se utiliza la señal de Axes. Los distintos movimientos que el usuario realiza para controlar el barco propio generan dos señales, una de velocidad lineal o “v” y una velocidad angular o “w”, las cuales han sido configuradas para que el movimiento del barco propio sea lo más realista y parecido a la cinemática de una lancha de Instrucción AI.

La explicación a como se obtiene la configuración de “v” y “w” del joystick se describe en el primer escenario del simulador. Volviendo a las señales que el joystick genera, estas son introducidas en una serie de operaciones y relaciones matemáticas en el bloque SHIP DINAMICS, para conseguir los valores

de las variables “x”, “y” y “yaw”, cuya misión es la de establecer la posición y orientación del barco en todo momento.

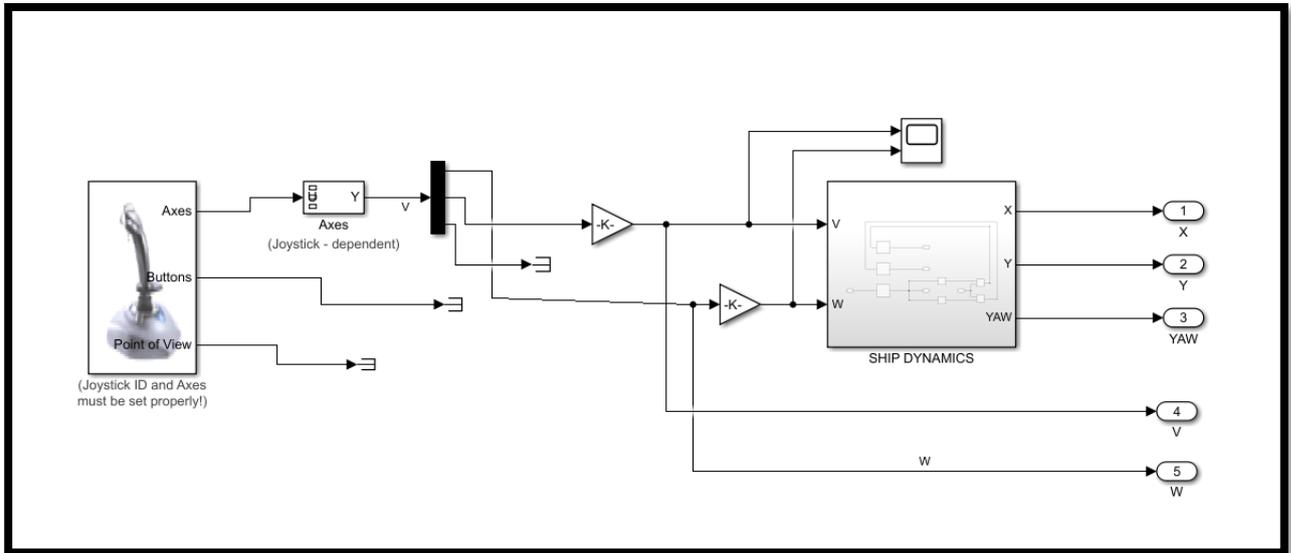


Figura 3-5 Bloque SHIP 1 [Fuente propia]

Para el caso del SHIP 2, no existe ningún joystick que genere las señales de “v” y “w”, en este caso se utiliza un bloque denominado Signal builder el cual permite generar grupos de fuentes de señales lineales por partes y utilizarlas en el modelo. De esta manera, utilizando un bloque de este tipo para la “v”, podemos conseguir dar al barco distintas velocidades en distintos momentos de la simulación, de la misma manera para el dato de “w”, utilizando el mismo bloque, podemos diseñar distintas trayectorias para el SHIP 2 en los distintos puntos del tiempo. Como se ve en la Figura 3-6, tras generar las distintas señales de velocidad lineal y angular, al igual que en el caso del SHIP 1, son recogidas para usarse también en el bloque de SHIP DINAMICS, para obtener los tres datos que nos marcarán en todo momento la posición, orientación y velocidades de los distintos buques.

Como también se realiza en el SHIP 1, las señales de velocidades “v” y “w” son recogidas en el bloque llamado SCOPE para durante el transcurso del simulador realizar un gráfico en tiempo real de dichos valores, para posterior análisis de la simulación o también para ayudar a diseñar los distintos escenarios creados.

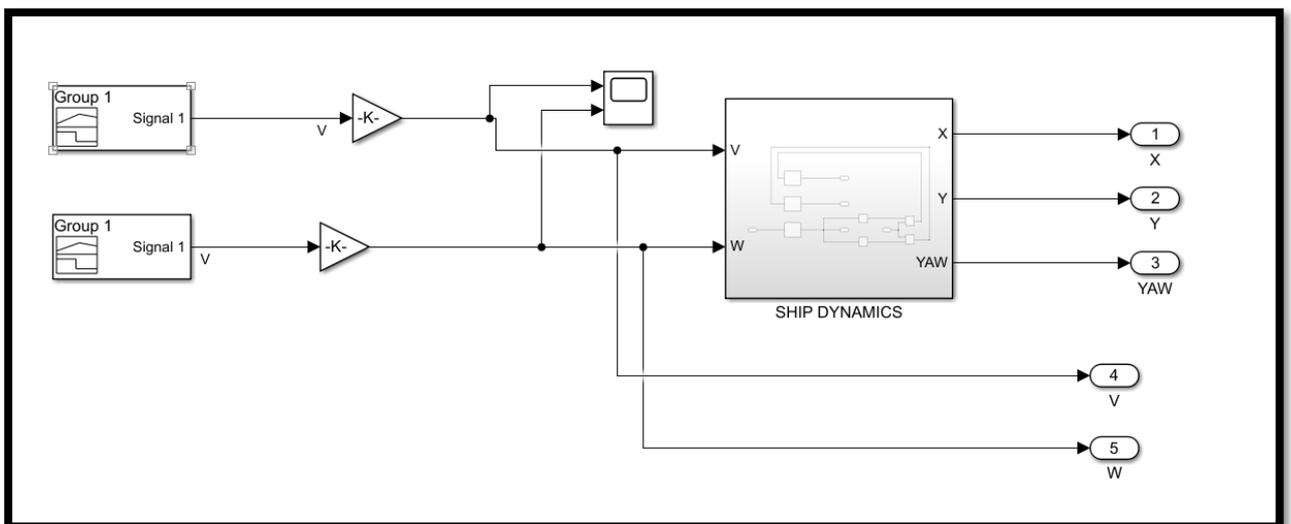


Figura 3-6 Bloque SHIP 2 [Fuente propia]

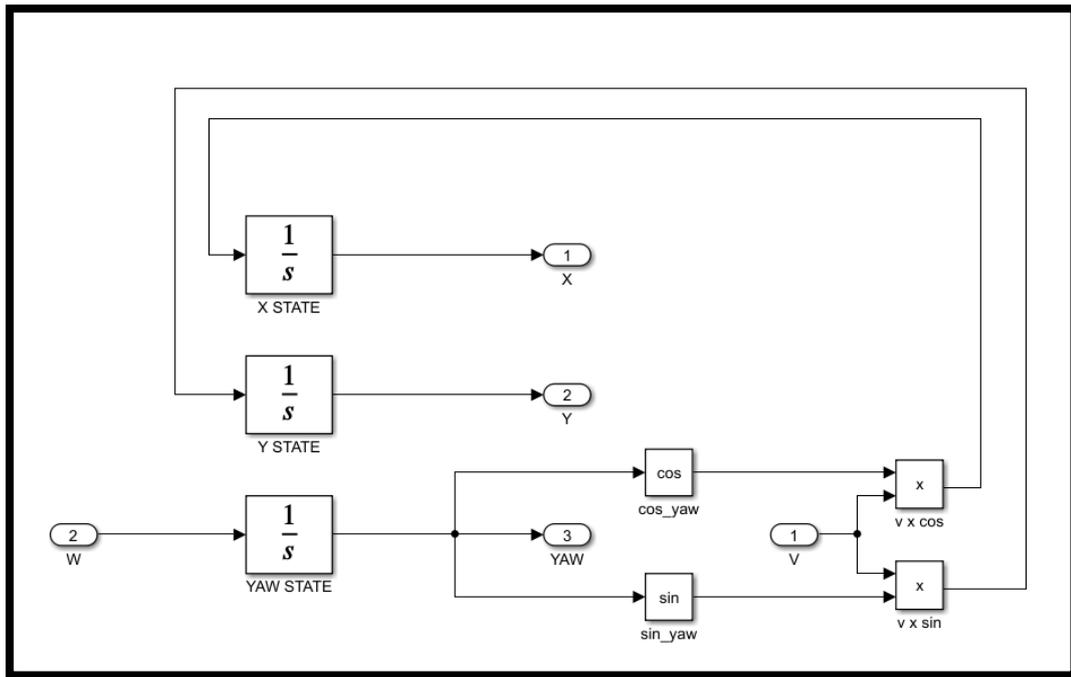


Figura 3-7 Bloque SHIP DINAMICS [Fuente propia]

Finalmente, en el último bloque (SHIP DINAMICS) mostrado en la Figura 3-7, vemos la arquitectura que se ha utilizado para simular el comportamiento cinemático que establece los valores actuales la evolución temporal de la posición y orientación de los barcos, es decir, obtener los valores de las variables “x”, “y” y “yaw” a partir de sus velocidades lineales y angulares. En primer lugar, debemos establecer las ecuaciones cinemáticas:

- El vector de velocidad lineal “v” está compuesto por dos componentes, la componente horizontal o  $v_x$  y una componente vertical o  $v_y$ , representado en la Figura 3-8.

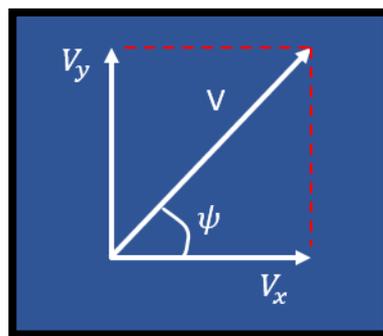


Figura 3-8 Representación de Velocidad lineal [Fuente propia]

- Podemos definir dichas componentes a partir de v y de  $\psi$  de la siguiente forma:

$$\begin{cases} v_x = v \cdot \cos \psi \\ v_y = v \cdot \sin \psi \end{cases}$$

Ecuación 3-1

- A partir de las igualdades de la Ecuación 3-1, obtendremos los valores posición de cada barco, recordando, que la v para el caso del SHIP 1 la recibimos mediante el movimiento del joystick y para el caso del SHIP 2 la obtenemos mediante el bloque Signal builder.

- Debemos tener en cuenta también, la igualdad que se genera al derivar la posición tanto en “x” como en “y”, es decir, el modelo dinámico no lineal de x e y se obtiene como:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cdot \cos \psi \\ \dot{y} = v \cdot \sin \psi \end{cases}$$

**Ecuación 3-2**

- Teniendo en cuenta las relaciones de la Ecuación 3-1 y de Ecuación 3-2, podemos llegar a la conclusión que integrando los valores de  $\dot{x}$  y  $\dot{y}$ , mediante la transformada de Laplace en Simulink, obtenemos los valores de posición “x” e “y”.
- La forma de operar sería: emplear el valor que recibimos de la v, multiplicar por el coseno o por el seno de  $\psi$  (dependiendo de si se quiere obtener “x” o “y”) e integrar mediante el bloque de integral.
- Para poder realizar las operaciones de seno y coseno, descritas anteriormente, debemos antes obtener el valor de yaw o  $\psi$ . Para ello se sigue la misma metodología que los casos anteriores, sabiendo que se cumple la siguiente ecuación dinámica lineal:

$$\dot{\psi} = w$$

**Ecuación 3-3**

- Al igual que para “x” e “y” la forma de proceder es: el valor que recibimos de w procedente del joystick o del Signal builder lo integramos y obtenemos así el yaw o  $\psi$ , el cual será usado para obtener la posición de los barcos, como se explica anteriormente.

Este modelo puede ser mejorado en futuras versiones en las que se incluya dinámica al modelo, añadiendo fuerzas de inercia y fuerzas ocasionadas por viento y corrientes marinas, fuerzas de propulsión o fuerzas ejercidas por el timón, teniendo que implementar aceleraciones y cambiando la arquitectura descrita.

### 3.4 Descripción de escenarios

Previa a la descripción detallada de los escenarios, se debe justificar los distintos parámetros a elegir para el propio barco y para el resto de los barcos participantes o los tiempos establecidos para cada escenario. El objetivo de este sistema de entrenamiento COLREG es, con el propio barco, partir de un punto establecido y llegar a un punto final determinado. Durante la simulación se deberán respetar las normas COLREG y la distancia de seguridad establecida, y deberá cumplirse en un tiempo determinado. El espacio, donde se desarrollan los escenarios, es una simulación de cualquier zona marítima por donde sea posible llevar a cabo una navegación.



**Figura 3-9 Lancha de Instrucción AI [27]**

El tipo de buque que se trata en la primera versión del simulador, es una lancha de instrucción AI de la Escuela Naval Militar (ver Figura 3-9), embarcación que los alumnos hemos utilizado en varias ocasiones para nuestro adiestramiento en la mar, durante nuestro paso por la escuela. Por este motivo, como se explicará más adelante, el ajuste de las velocidades, angular y lineal, del barco propio (controlado por el joystick) y del resto de barcos (mediante bloques en Simulink), se ha basado en los conocimientos y experiencia adquiridos por navegar en esa plataforma, buscando el parecido en la forma de maniobrar y en la velocidad de las lanchas de instrucción AI.

En el simulador, se considerarán todos los buques iguales, es decir, se tratarán de barcos con las mismas características como: velocidades máximas, capacidades de maniobra o distancias de seguridad. Con esto, excluimos el resto de tipo de barcos como pueden ser los barcos de vela, los de maniobra restringida o los barcos de pesca.

Por otra parte, también en la primera versión del simulador, trataremos escenarios donde no habrá existencia de ningún tipo de dinámica, es decir, no se modelarán ningún tipo de fuerzas ocasionadas por corrientes marinas o de viento que puedan modificar el movimiento de los buques. En versiones más avanzadas se pueden incorporar diferentes buques con distintas características, como se menciona en el punto anterior.

Para establecer el cálculo del tiempo total de simulación en cada escenario se han considerado los siguientes factores de diseño:

- Como en el caso de las velocidades del joystick, se ha tenido en cuenta una regla que usamos mucho en la Armada para estimar tiempos en función de la velocidad que se lleva: la **regla de los tres minutos**. Esta regla consiste básicamente en que, poniendo una velocidad, en nudos (millas náuticas por hora), en tres minutos se recorrerá una distancia, en yardas, igual a cien veces la cifra de la velocidad, es decir, si por ejemplo el barco en cuestión está navegando a una velocidad de 6 nudos, en tres minutos recorrerá 600 yardas.
- Por lo mencionado en el punto anterior, la velocidad lineal o  $v$  que se ha fijado para el joystick es de  $v = 6$ , lo cual correspondería a ir navegando a 12 nudos. Respecto a la velocidad angular o  $w$  se ha ido probando con distintos valores entre 0 y 1 para ver cual se asemejaba más al movimiento de la lancha de instrucción, fijando un valor de  $w = 0,4$ .
- Una vez ajustada la velocidad del joystick que controla el SHIP 1, otro factor a tener en cuenta para el cálculo del tiempo de simulación es que, debido a que no existe ningún tipo de dinámica en esta primera versión del simulador, simplemente se ha utilizado la ecuación de movimiento rectilíneo uniforme (MRU):

$$v = \frac{e}{t}$$

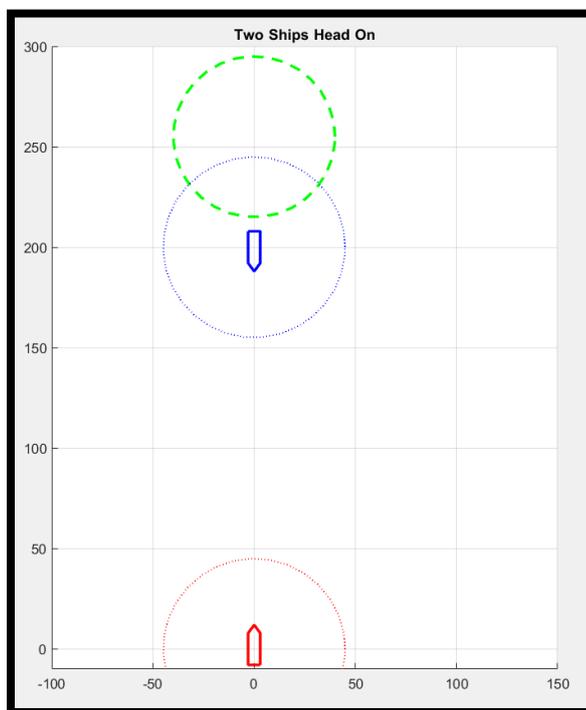
**Ecuación 3-4**

- Por último, debido a que en los distintos escenarios no se tratará de una línea recta ya que se tendrá que gobernar a otros barcos, se le añaden 5 segundos de seguridad para permitir que el barco propio llegue a tiempo. Estos 5 segundos, también fueron decididos como coeficiente de seguridad ya que los usuarios que realicen las pruebas no habrán adquirido un gran manejo de los controles del joystick.

### *3.4.1 Maniobra vuelta encontrada (dos barcos)*

Este escenario, basado en el encuentro de dos barcos de frente o vuelta encontrada, es uno de los escenarios básicos que se han utilizado para el ajuste de los parámetros del simulador y para asentar la base del resto de escenarios que se han desarrollado. En este caso, vemos como el escenario que se

visualiza en el simulador, en la Figura 3-10, se desarrolla en un espacio definido por los ejes “x” e “y” de tamaño de 250 y 300 metros respectivamente. El barco propio (rojo), de forma genérica, siempre partirá como punto inicial el punto (0,0), y en este escenario se ha localizado al barco contrario (azul) en la posición (0,200) metros.



**Figura 3-10 Escenario Head On dos barcos [Fuente propia]**

La maniobra de vuelta encontrada se realizará cuando ambos buques de propulsión mecánica se encuentren navegando a rumbos opuestos o casi opuestos, con riesgo de abordaje, como se establece en la regla 14 del RIPA, explicado anteriormente en el estado del arte. El alumno o la persona que esté utilizando el simulador para adiestramiento, tendrá el objetivo de navegar desde el punto inicial (0,0) hasta conseguir entrar en la zona objetivo (circulo verde), cuyo centro está en la posición (0,260) con un radio de 40 metros, y deberá hacerlo en el tiempo establecido en el simulador.

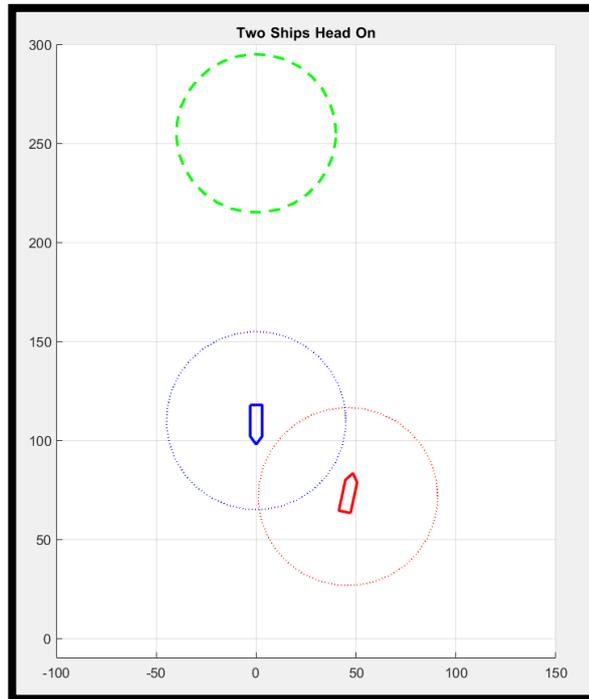
El objetivo a cumplir por el usuario, además de entrar en la zona objetivo en tiempo, es de realizar una navegación segura en la que se:

- Respete en todo momento las reglas COLREG, con la excepción de que su cumplimiento conlleve a una situación de peligro o de abordaje, debido al encuentro con más barcos que impida realizar la maniobra COLREG con seguridad.
- Mantenga en todo momento cualquier barco u obstáculo fuera de la distancia de seguridad establecida de 35 metros alrededor del barco propio. Como se menciona en el estado del arte, si existe cualquier objeto dentro de la zona de colisión, existen muchas posibilidades que se produzca dicho accidente.

El tiempo estudiado para este escenario es de  $t = 45$  segundos. A continuación, se pueden apreciar una serie de imágenes donde se puede ver como se llevaría a cabo la maniobra de forma segura y cumpliendo las normas COLREG, en este caso la regla 14 mencionada anteriormente.

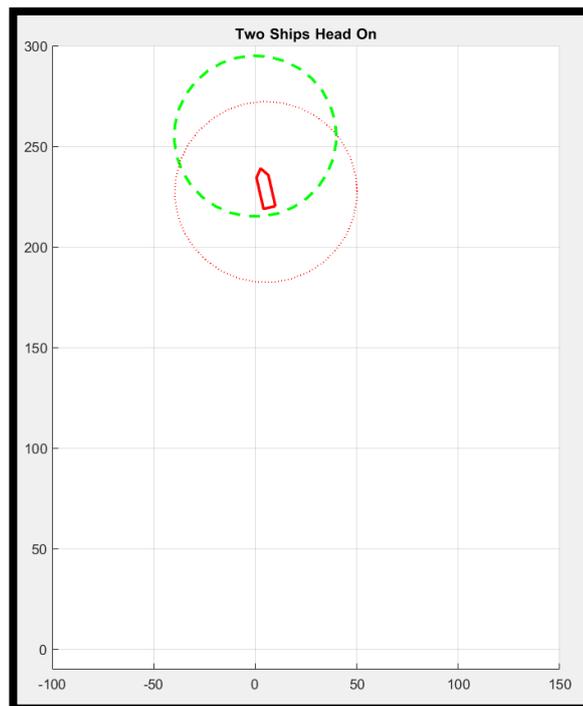
Empieza la simulación y el barco azul comienza su navegación con un rumbo directo al nuestro, al observar que nos encontramos en una situación de vuelta encontrada o head on, debemos cumplir con la regla 14 de COLREG y caer a estribor para evitar así la posible colisión. El usuario al inicio de la

simulación, debe analizar la situación y con tiempo suficiente reaccionar de forma correcta, ya que, si espera más tiempo del necesario para gobernar el contacto, puede conllevar a una colisión.



**Figura 3-11 Escenario Head On dos barcos [Fuente propia]**

En la Figura 3-11 se puede apreciar como el usuario está maniobrando de forma correcta, respetando COLREG y la distancia de seguridad, y una vez sorteado el peligro, el usuario se dirige hacia la zona objetivo final. Es durante la maniobra anterior de la Figura 3-11 y durante la navegación donde el alumno o usuario debe ajustar bien sus movimientos, como parte de adiestramiento, para conseguir cumplir con la misión de alcanzar el punto final a tiempo (ver Figura 3-12).



**Figura 3-12 Zona final del escenario [Fuente propia]**

Tras ver la forma de realizar y cumplir este escenario, podemos ver en las siguientes imágenes cómo se puede aumentar las probabilidades de producirse un abordaje en el caso de no respetar la distancia de seguridad establecida (ver Figura 3-13), y también podemos ver un ejemplo de maniobra en la que no se respeta el COLREG, es decir, realizar la caída por la banda de babor en lugar de por la banda de estribor, lo cual estaría realizada de manera incorrecta (ver Figura 3-14 )

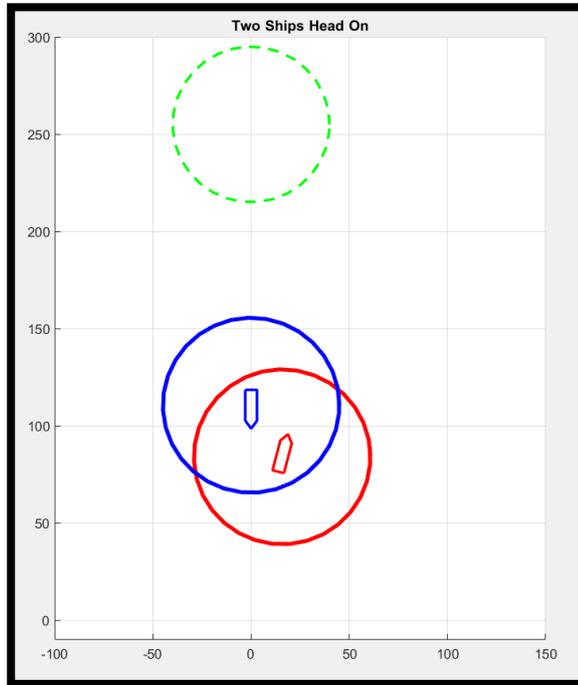


Figura 3-13 Posible abordaje [Fuente propia]

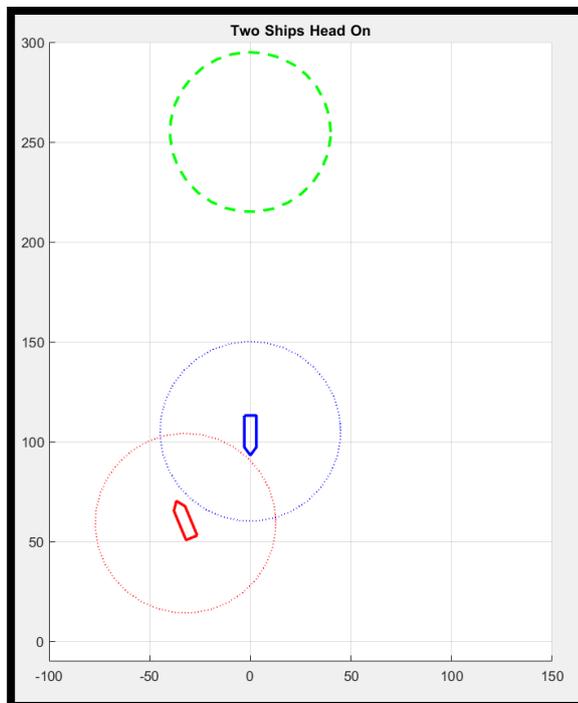


Figura 3-14 Vuelta encontrada por babor [Fuente propia]

### 3.4.2 Maniobra de cruce (dos barcos)

La maniobra de cruce, como ya se explicó en el estado del arte, se dará cuando dos barcos vayan a cruzar sus derrotas, teniendo que maniobrar el barco que vea al otro por estribor, y realizándose de dos formas: cediendo el paso parando máquinas o cayendo a estribor, mostrando el lado de babor al otro buque.

En este escenario, como en el caso del escenario anterior, el barco del usuario parte en la misma posición (0,0), y el barco azul, sin embargo, se encuentra ahora en la posición (100,150). El escenario también se define por los ejes “x” e “y” con un tamaño de 250 y 300 metros respectivamente. Al igual que el Head On en el escenario anterior, el objetivo a seguir por el usuario será el de llegar a la zona verde, en el tiempo establecido para la simulación y respetando las normas COLREG. En este caso, se pondrá de nuevo a prueba al usuario en sus conocimientos de las normas de navegación, teniendo que aplicar esta vez la norma 15 del Reglamento, relacionada con las situaciones de cruce (ver Figura 3-15).

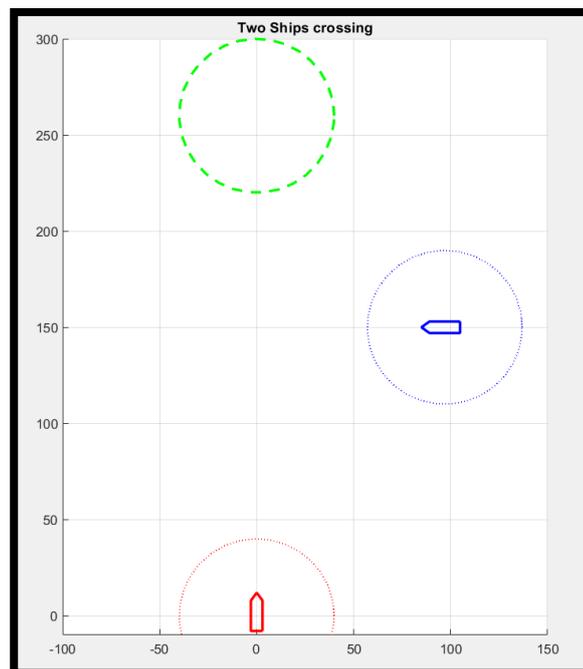


Figura 3-15 Escenario Crossing dos barcos [Fuente propia]

Iniciada la simulación, el barco azul se puede apreciar como inicia su navegación desde su posición hacia el 270°, sin variar su rumbo ni velocidad, por lo que el alumno o usuario deberá anticiparse y realizar dos posibles maniobras, para gobernar al barco, puesto que tiene la responsabilidad de gobernarlo según las normas COLREG mencionada anteriormente:

- El usuario podrá ir a rumbo de la zona objetivo, pero a medida que vaya cerrando distancia con el contacto que se aproxima por su estribor, deberá parar máquinas (dejar de mover el joystick hacia delante) a una distancia segura de colisión con el barco azul (ver Figura 3-16).
- El usuario si no desea parar máquinas deberá, con tiempo suficiente, caer a estribor para pasar por la popa del barco azul, cumpliendo de esta manera la norma n°15 de COLREG (ver Figura 3-17).

Para esta simulación, se ha estimado que el tiempo que el usuario tendrá para cumplir con la misión de introducir el barco en la zona objetivo es de  $t = 45$  segundos. A continuación, se muestran unas imágenes de las dos formas posibles de llevar a cabo este escenario por el usuario, cumpliendo todos los requisitos necesarios:

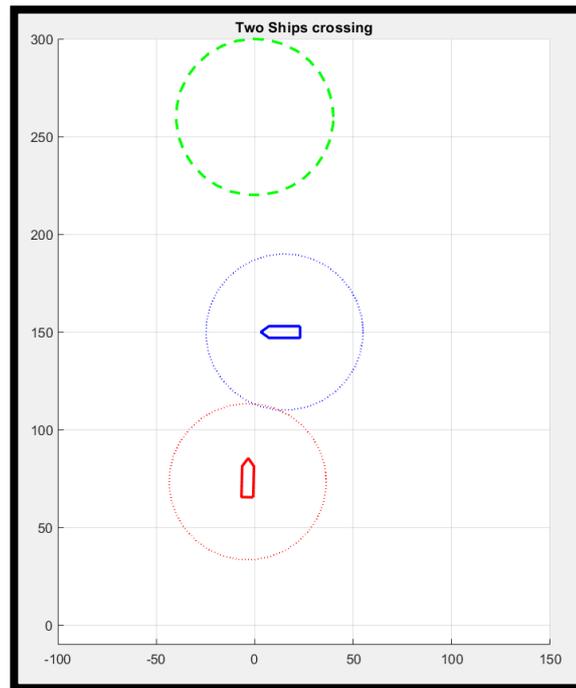


Figura 3-16 Maniobra cruce parando máquinas [Fuente propia]

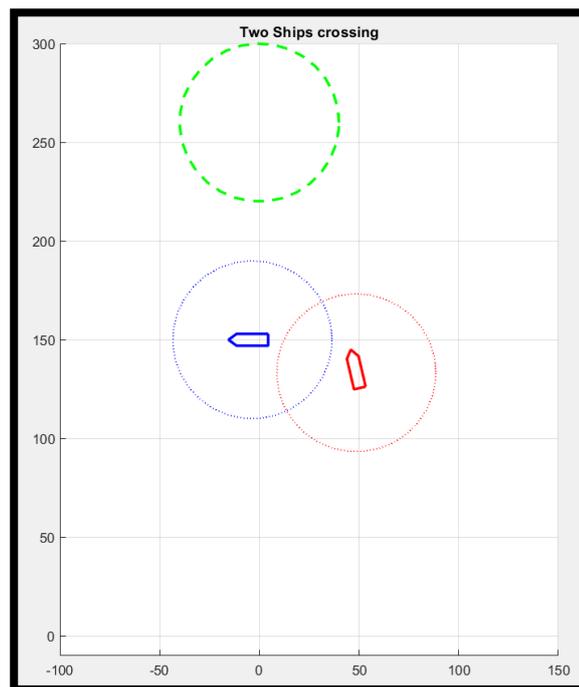


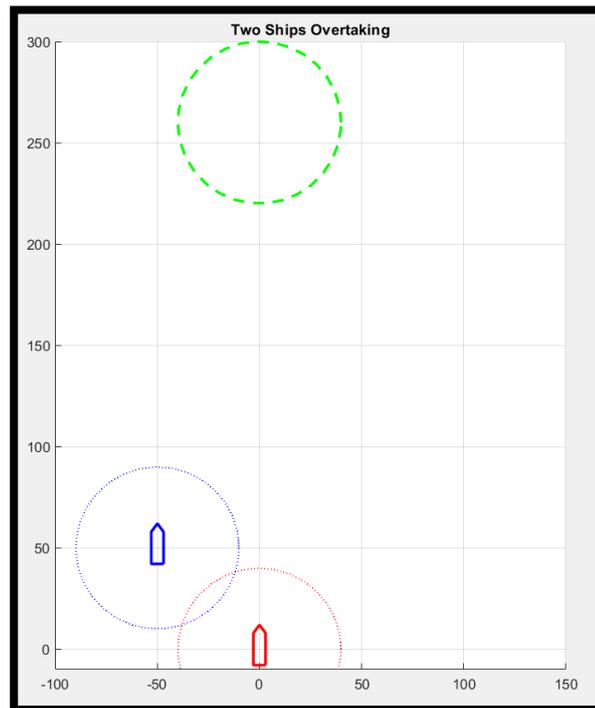
Figura 3-17 Maniobra cruce cortando la popa [Fuente propia]

### 3.4.3 Maniobra de alcance (dos barcos)

La maniobra de alcance, sabemos que se dará cuando hay dos barcos que navegan hacia el mismo rumbo, pero el que está atrasado, con intención de adelantar, se encuentra en una marcación o ángulo mayor de 22,5 grados a popa del través del barco más adelantado. En esta situación, como ya sabemos se debe aplicar la regla 13 sobre buque que alcanza y la regla 16 sobre la maniobra de un buque que cede el paso, mencionadas y explicadas también en el estado del arte.

Sobre este escenario, partimos inicialmente con el barco propio en la posición (0,0) y el barco azul en la posición (-50,50). En este caso la simulación es del mismo tamaño que los dos casos anteriores, 250 metros en el eje “x” y 300 metros en el eje “y”. En el presente escenario se busca como objetivo, además de todos los requisitos de los escenarios anteriores, poner a prueba la capacidad del alumno para adaptarse a los cambios que se producen en el entorno marítimo que le rodea (ver Figura 3-18).

Este escenario tiene la peculiaridad respecto de los anteriores, que en este caso el barco azul realiza cambios de rumbo, es decir, no mantiene un rumbo constante como en los casos de Head On o el Crossing. Por este motivo, el usuario debe prestar mucha atención al barco que pretende adelantar, debido a los posibles cambios a su derrota, extremando las precauciones en todo momento.



**Figura 3-18 Escenario Overtaking dos barcos [Fuente propia]**

Una vez que se inicia el simulador, vemos como el barco azul comienza con una velocidad inferior a la máxima que se puede alcanzar con el barco propio. La acción más lógica que se tomaría sería adelantar al barco por la banda de estribor, de forma segura, es decir, respetando las distancias de seguridad. Sin embargo, cuando se está realizando el alcance, el barco azul llegará a un punto de la simulación en el que hará una pequeña variación hacia estribor, antes de haber podido adelantar por la banda de estribor.

El diseño del escenario se realizó de esta manera, para mejorar el adiestramiento del alumno en su capacidad de reacción, debido a que cuanto más rápido sea en percibir esta variación en el rumbo del otro barco, antes se dará cuenta que tiene que bajar la velocidad de la unidad, obligándose a ceder el paso al contrario (como indica el reglamento) y teniendo que ir a la zona final por la banda contraria a la inicial (ver la Figura 3-19). Para este escenario, se ha establecido un tiempo algo superior a los dos escenarios previos, siendo un  $t = 50$  segundos.

En el caso que no se realice la maniobra del escenario como se indica anteriormente, el usuario puede llegar a cometer estos dos errores:

- No reaccionar con la suficiente velocidad, provocando romper la distancia de seguridad entre los barcos o provocando la colisión de los mismos.
- Seguir intentando realizar el adelantamiento por la banda de estribor, con lo que conllevaría a no cumplir el tiempo establecido para la simulación, ya que como se puede

comprobar cuando empieza a variar de rumbo el barco azul, también empieza a aumentar su velocidad, impidiendo de esta manera su adelantamiento por su banda de estribor.

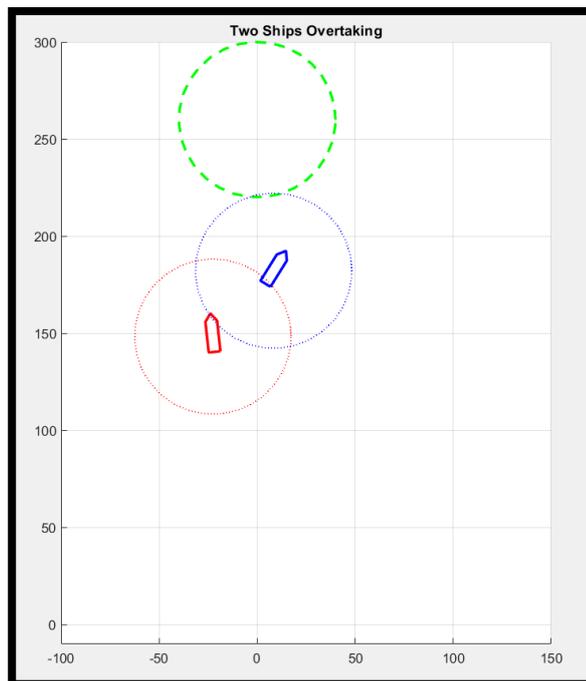


Figura 3-19 Maniobra de Overtaking [Fuente propia]

### 3.4.4 Maniobra de vuelta encontrada y cruce (tres barcos)

Una vez descritos los escenarios más básicos de dos barcos, con el objetivo de enseñar las tres maniobras principales a estudiar y analizar en el presente trabajo, se describirán nuevos escenarios más complejos en los que se mezclan las distintas maniobras aprendidas anteriormente. En este primer caso, se trata un escenario compuesto por tres barcos, del que tendremos como siempre el control de uno de ellos, en el que aparecen las maniobras de vuelta encontrada y cruce durante la simulación.

La disposición inicial de los barcos es la siguiente: el barco del usuario, como siempre, en la posición (0,0), el barco negro en la posición (-10,130) y el barco azul en la posición (-125,75). Este último barco se ha colocado en una posición inicialmente oculta para el usuario con el objetivo de hacer más realista la simulación a la vida real, ya que existen casos navegando de barcos imperceptibles para el ojo humano hasta que no los tiene uno cerca. Además, este factor de ocultar el barco inicialmente, desarrolla su capacidad de reacción a distintas situaciones en la mar (ver Figura 3-20).

Un factor que se debe tener en cuenta del simulador, que no daba problemas en los escenarios anteriores, es que los barcos que no controla el usuario o alumno van a tener la diferencia con este de que nunca van a seguir COLREG, es decir, en el caso que se encuentren en una situación en la que tengan que ceder el paso o gobernar a otro barco no lo harán, ya que no fueron diseñados para cumplir esas normas. Esto se debe también por buscar cierto realismo al simulador, ya que existen ocasiones en la vida real que un barco por circunstancia como un fallo de propulsión o falta de atención, no cumple las normas de navegación, obligando al resto actuar contrario a las normas COLREG para evitar así el abordaje. Por este factor que se da en la mar hoy en día, se ha decidido diseñar este escenario, para que el alumno sepa reconocer esa situación de incumplimiento del COLREG en el encuentro y sepa que debe tomar acción.

Pasando a la simulación, cuando se inicia, se puede apreciar primero como el barco negro que está ubicado por la proa del usuario comienza a navegar hacia este último, provocando una situación de vuelta encontrada. Sin embargo, la forma de actuar del barco negro no es como se indica en COLREG,

ya que en lugar de hacer una caída hacia estribor la realiza hacia babor, obligando al usuario a anticiparse y maniobrar para evitar la colisión.

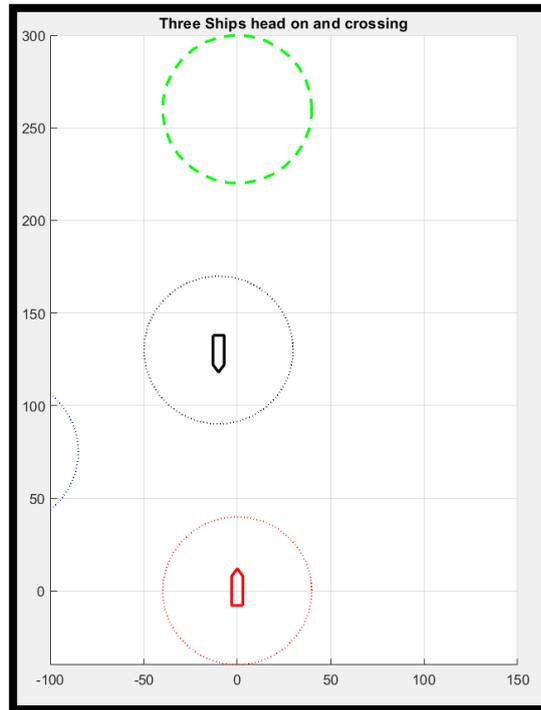


Figura 3-20 Maniobra Head On y Crossing tres barcos [Fuente propia]

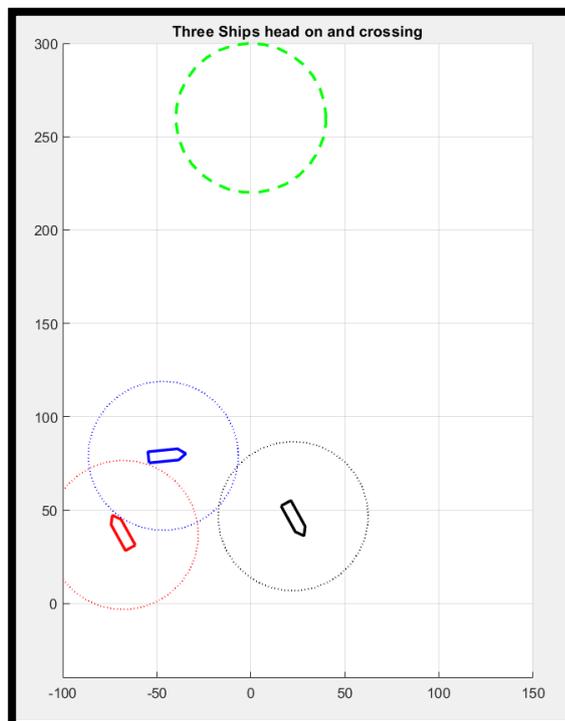


Figura 3-21 Maniobra eficiente entre tres barcos [Fuente propia]

Una vez se sortea el barco negro de forma segura, es cuando hace su aparición el barco azul navegando hacia nosotros, en una situación de cruce. Al igual que con el barco negro, es el barco azul el responsable de gobernar al usuario según el reglamento, al tener a este por su estribor. Pero en lugar de caer a estribor como se estipula en la regla 15, realiza una variación de su rumbo hacia babor,

obligando al alumno a pasar por la popa del azul, haciendo de la situación segura (ver Figura 3-21). El tiempo que se ha estipulado para la simulación es de  $t = 50$  segundos.

En el caso que el usuario realice la maniobra de la otra manera, aunque esté intentando cumplir COLREG, estaría provocando una posibilidad de abordaje, ya que como hemos explicado, si hay un barco que no está cumpliendo las normas COLREG, la misión principal del resto de buques es garantizar la seguridad de igual forma, aunque eso conlleve realizar algo contrario al reglamento.

### 3.4.5 Maniobra de alcance y cruce (tres barcos)

Como en el caso anterior, nos encontramos ahora también a un escenario compuesto por tres barcos, pero esta vez las maniobras que aparecen son las de alcance y la de cruce. La disposición inicial de las unidades es la siguiente: el barco del usuario en la posición (0,0), el barco negro en la posición (20,70) y finalmente el barco azul en la posición (130,100).

Nuevamente, el barco azul inicialmente se encuentra oculto para el usuario, para asemejarlo más a la vida real y para mejorar la capacidad de reacción y acción del alumno, como forma de su adiestramiento. El tamaño del escenario continúa siendo igual que los anteriores, 250 metros en el eje "x" y 300 metros en el "y" (ver Figura 3-23).

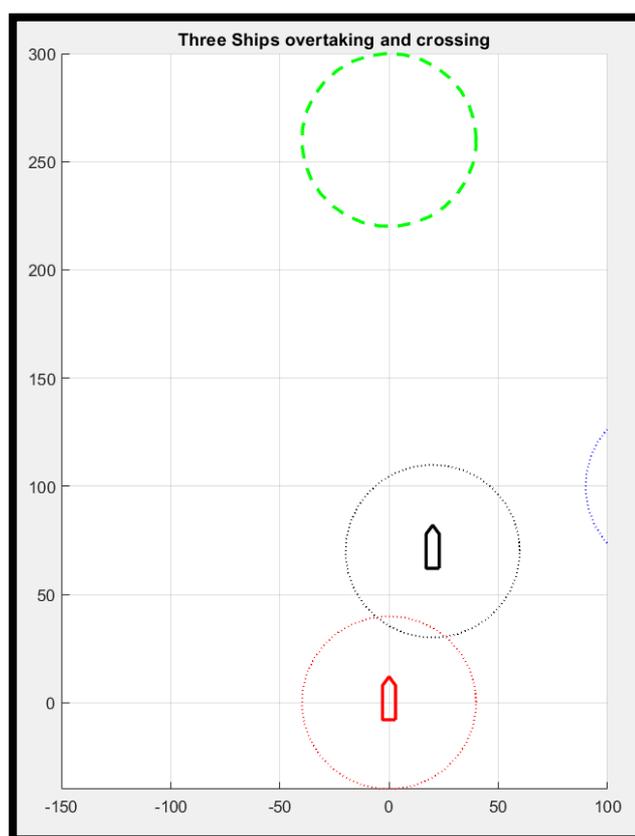
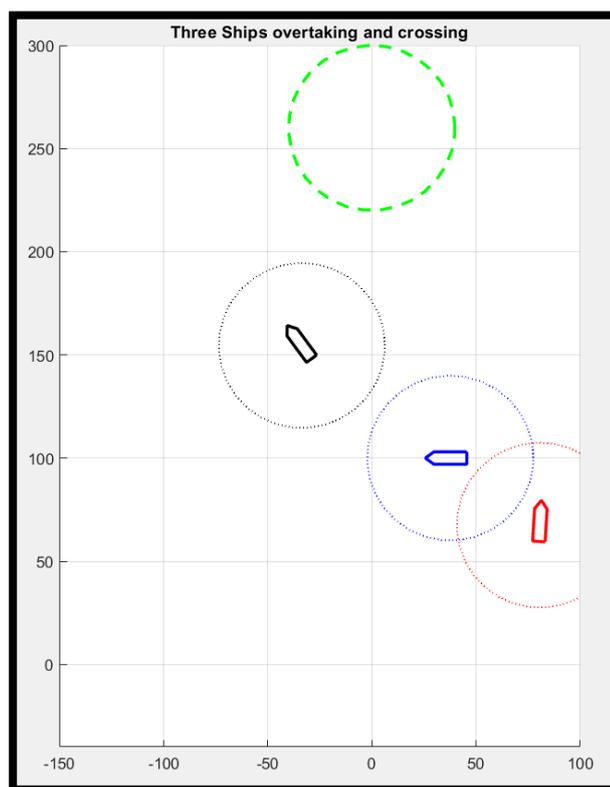


Figura 3-22 Maniobra Overtaking y Crossing tres barcos [Fuente propia]

Tras iniciar la simulación, vemos como el barco negro comienza la navegación con poca velocidad de máquinas (la cual irá aumentando durante el transcurso de la simulación) y realizando una rápida variación de rumbo hacia babor, pasando de navegar a rumbo Norte o  $000^\circ$  a ir un rumbo  $340^\circ$  aproximadamente. Cierta periodo después del inicio de la simulación, el barco azul hará su aparición navegando con un rumbo  $270^\circ$ , manteniéndola constante durante toda su navegación y con una velocidad inicial inferior a la mitad de la máxima posible, aumentándola a los pocos segundos de iniciarse el temporizador.

En esta situación el usuario no tiene una única forma de actuar para realizar el escenario, pero si existe una forma que cumple con todos los requisitos sobre las normas COLREG, seguridad marítima y tiempo de simulación:

- Primero, el usuario al ver que el barco que tiene por su proa avanza a velocidad reducida, pero con una dirección de cortarle la proa, la acción más eficiente es decidir ir por estribor del mismo, es decir, dejar al barco negro por babor, evitando así cualquier peligro.
- Por otra parte, al tomar la decisión anterior, cuando el usuario sigue con la derrota elegida, se encontrará una situación de cruce por su estribor, teniendo la obligación de maniobrar de acuerdo indica COLREG en esta situación, evitando así una posible colisión entre ambos buques.
- Por este motivo, la forma de maniobrar al barco azul que se aproxima por estribor consiste en cortando la popa del mismo, es decir, pasar por detrás del barco.
- Tras maniobrar con seguridad ambos contactos lo último que falta por cumplir al usuario es introducir el barco en la zona objetivo final, cumpliendo el tiempo de simulación establecido para el escenario.



**Figura 3-23 Solución eficiente al escenario [Fuente propia]**

El tiempo para la simulación que se estableció es de  $t = 50$  segundos. Hay que analizar lo que puede pasar si el usuario decide ir por babor del barco negro o decida esperar, parando máquinas, a que pase el barco azul como en otros escenarios anteriores, por lo que provocaría:

- Decidiendo ir por babor del barco negro, puede cumplir el objetivo de llegar a tiempo a la zona objetivo, sin embargo, daría lugar a una situación de peligro ya que el usuario deberá tener un dominio más avanzado del joystick para maniobrar entre los dos barcos (ver Figura 3-24).

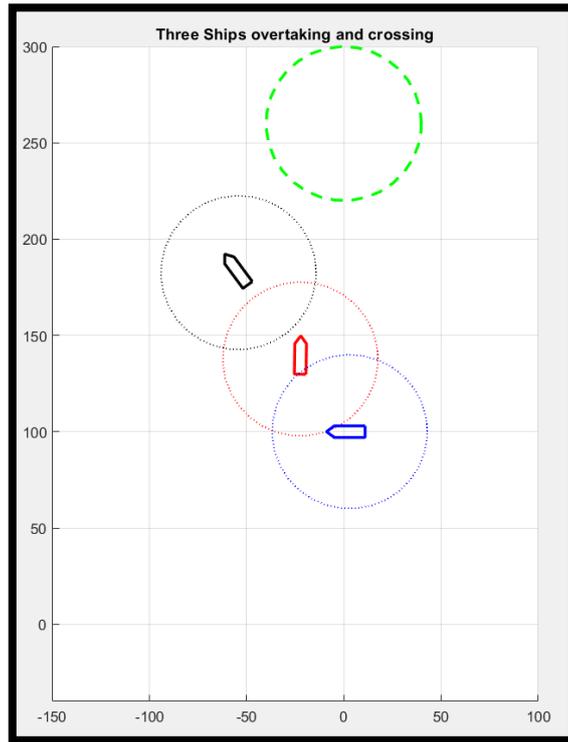


Figura 3-24 Maniobra peligrosa [Fuente propia]

- En lo referente a parar máquinas, para ceder el paso al barco azul, es cierto que el alumno estaría respetando las normas COLREG y garantizando la seguridad marítima, pero en cambio no cumpliría con el tiempo establecido para llevar el barco al objetivo final (ver Figura 3-25).

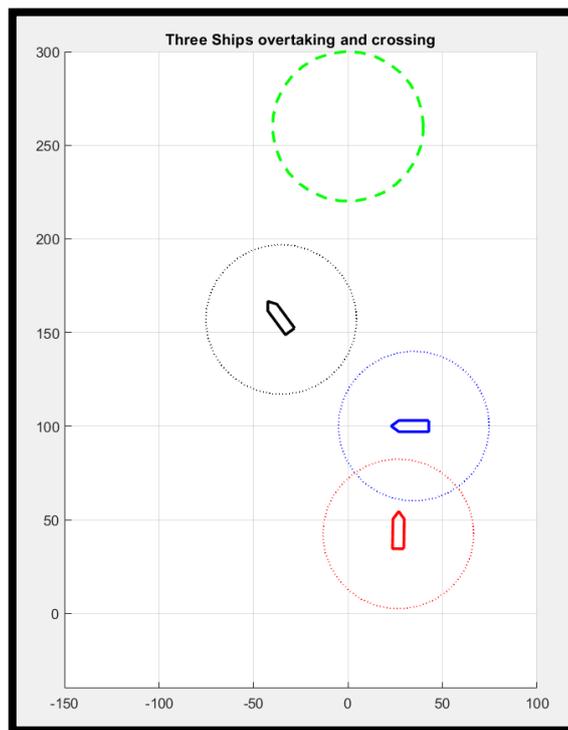


Figura 3-25 Maniobra incorrecta [Fuente propia]

### 3.4.6 Escenario con cuatro barcos

Finalmente, en el último escenario se trata de un escenario en el que se disponen las tres maniobras en uno solo, aumentando la dificultad al usuario de completar la misión. La disposición de los barcos inicialmente: el barco propio misma posición de siempre (0,0), el segundo barco (azul) ubicado en la posición (-50, 50), el tercero (negro) en la posición (-80, 205) y el último barco (verde), inicialmente oculto, en la posición (150, 180). El tamaño del escenario comprende como siempre 250 metros en el eje "x" y 300 metros en el eje "y" (ver Figura 3-26).

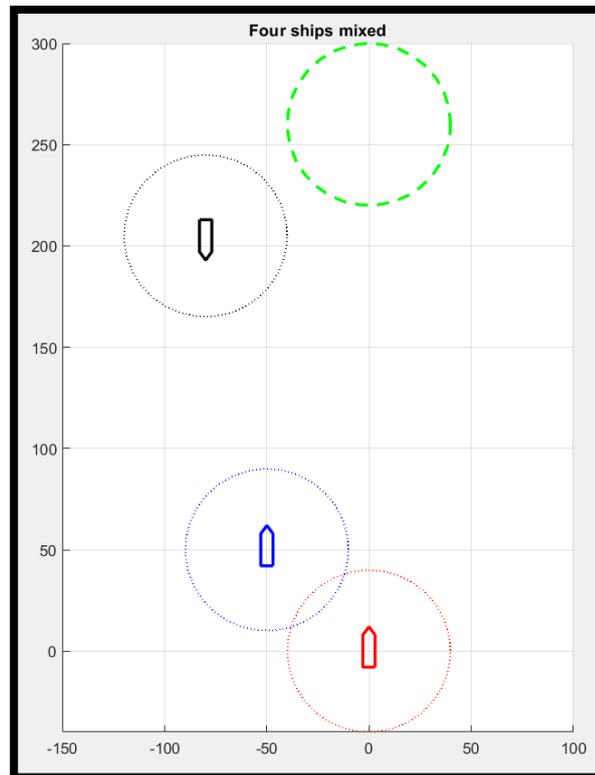


Figura 3-26 Maniobra de cuatro barcos [Fuente propia]

Comienza la simulación, y podemos observar como el barco azul que el usuario tiene por su amura de babor (por su proa, lado de babor), comienza una navegación rumbo Norte o  $000^\circ$  a una velocidad menor que la máxima que el usuario puede poner. Lo lógico que todo alumno o usuario que pruebe este escenario, es realizar un adelantamiento por estribor del azul, el cual es un rumbo que va directo a la zona objetivo; sin embargo, cuando se está alcanzando al azul hay un momento que este comienza a caer a estribor provocando al usuario a adelantar por la banda contraria.

Tras librar con seguridad dicha situación, el usuario se encontrará con el barco negro, que lleva toda la simulación navegando rumbo Sur o  $180^\circ$ , dando lugar una situación de vuelta encontrada. En este punto, el usuario únicamente tendrá que aplicar sus conocimientos de la regla 14 de COLREG y maniobrar acorde a la regla, es decir, caer a estribor para evitar el peligro del posible abordaje.

Una vez que se supera la vuelta encontrada con el barco negro, solo queda maniobrar con precaución la situación de cruce con el último barco (el verde) el cual ha tardado más tiempo en aparecer, simulando así un barco que tardamos en ver debido a por ejemplo problemas de visibilidad. Se reitera la precaución de dicha maniobra debido a que cuando el barco del usuario se aproxima, el verde varía algo su rumbo hacia babor provocando que el usuario tenga que maniobrar de manera rápida (ver Figura 3-27).

La secuencia mencionada anteriormente, es la más eficaz para cumplir con la misión de llegar a la zona objetivo, cumpliendo las normas COLREG, respetando las distancias de seguridad y cumpliendo el tiempo establecido para el escenario, el cual es  $t = 50$  segundos.

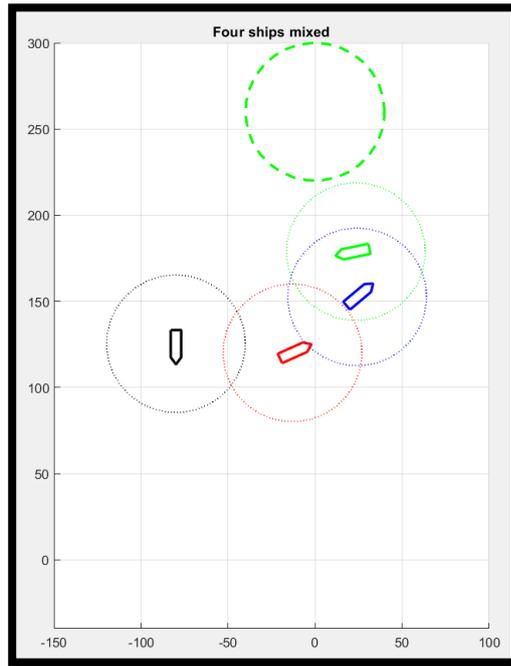


Figura 3-27 Maniobra eficaz entre cuatro barcos [Fuente propia]

### 3.5 Algoritmo generador de índices de colisión

En este apartado se explicará el algoritmo que se ha diseñado para el cálculo de los índices de las maniobras a realizar, permitiendo de esta manera poder evaluar la forma de ejecución, por parte del alumno, de los escenarios. Antes del diseño de dicho algoritmo, para identificar la maniobra que se debía de cumplir, en función de la ubicación de las unidades en los encuentros en la mar, se planteó seguir el esquema de la Figura 3-28.

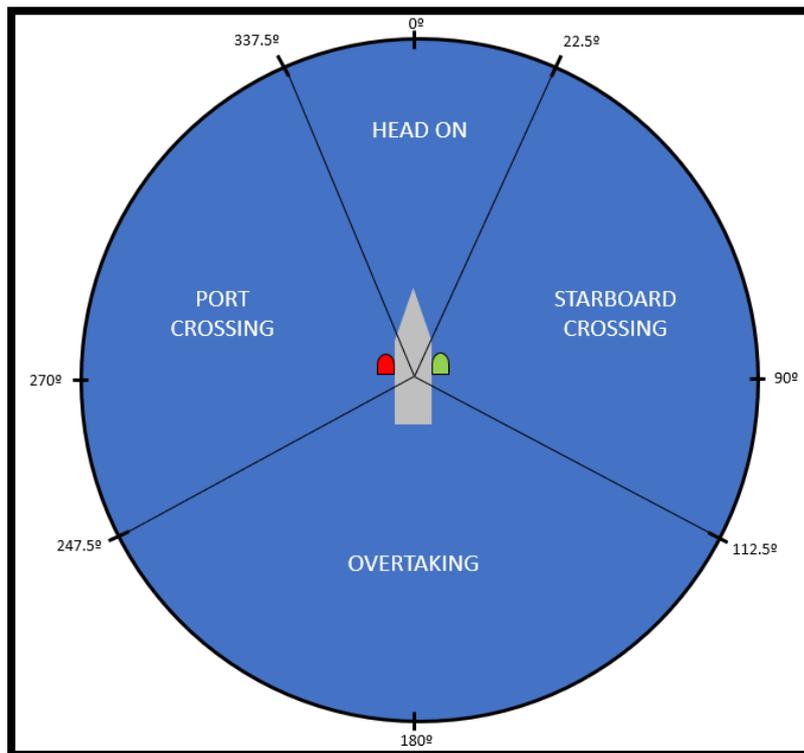


Figura 3-28 Esquema de las maniobras [Fuente propia]

Para todo buque que tuviera un encuentro con otro barco, y este se encontrara por su proa en la zona comprendida entre las demoras  $337.5^\circ - 22.5^\circ$ , estaría en una situación de vuelta encontrada. Por el contrario, cuando se tenga una embarcación con una marcación mayor o igual a  $22.5^\circ$  desde el través hacia la popa, se tendrá que maniobrar según las normas de alcance. Cualquier otra situación distinta a las dos mencionadas, se trata de una situación de cruce, la cual no tiene la misma importancia cuando se tiene una situación de cruce por estribor que por babor, como se explicaron en puntos anteriores de la memoria.

Sin embargo, esta forma de esquematizar las situaciones, de cara al diseño y creación del algoritmo es difícil de llevar a cabo, por lo que se opta por otra opción. Para el presente algoritmo, se han tenido en cuenta una serie de factores o suposiciones iniciales:

- La primera suposición a tener en cuenta, es que cada barco tiene un vector velocidad lineal o “v” y una velocidad angular o “w”, que para el momento del cálculo del algoritmo serán constantes, es decir, se asume un modelo con aceleraciones nulas.
- Además de valores de velocidad, los barcos tendrán unos valores de posición (x e y) y un valor de yaw o “ $\psi$ ”. Relacionado con la posición de los barcos, cada uno tendrá su propio eje de coordenadas, y para el movimiento de las unidades está determinado que siempre se realice hacia el lado positivo de los ejes, es decir, el movimiento horizontal hacia el “x” positivo y el movimiento vertical hacia el “y” positivo. Para una futura versión del simulador, en la que se tenga en cuenta velocidades negativas (marcha atrás), podremos tener en cuenta el movimiento de los barcos por esos ejes.

Tras dejar definidas las primeras suposiciones, se puede explicar la forma de evaluar del algoritmo las maniobras realizadas por los barcos. Durante el proceso de evaluación se generan dos coeficientes o índices: **un coeficiente de intersección y uno de cruce**. Previa a la explicación del proceso que realiza el algoritmo para el cálculo de los coeficientes, se debe explicar el concepto de **dominio de influencia o zonas de influencia de los barcos** que se han empleado en el diseño del algoritmo, las cuales condicionarán los siguientes pasos del proceso. Existen tres tipos de zonas de influencia:

- La primera zona de influencia, constituye la región que rodea a la embarcación, respetando la geometría del mismo para resolver el problema que tenía el algoritmo descrito en el estado del arte al no tener en cuenta la forma del barco. Esto permite integrar en el algoritmo barcos con velocidades nulas, estableciendo, en este caso, una zona de influencia que amplía la geometría estática de cada barco, es decir, tiene en cuenta el tamaño del barco.
- La segunda zona, consiste en un sector o ángulo base de intersección, cuya amplitud partirá de un valor definido. Dicho ángulo de intersección, cuya ubicación estará en la parte frontal del barco, se verá modificado en función de la velocidad angular que tenga, es decir, en el caso que el barco lleve una  $w = 0$ , el ángulo base se mantendrá sin modificar, en cambio, si existe cierto valor de velocidad angular, se sumará hacia la derecha (w negativas) o izquierda (w positivas). La longitud de esta segunda zona de influencia, dependerá en la distancia que pueda recorrer el barco en un intervalo establecido o tiempo de evaluación ( $T = 30$  segundos, por ejemplo), asumiendo unas velocidades (lineales y angulares) constantes durante ese tiempo de evaluación.
- Por último, la tercera zona de influencia está destinada para el análisis de la situación de cruce. Esta área es una aproximación a la zona de crossing mostrada en la Figura 3-28, la cual varía debido a la relación de las zonas de influencia con las variaciones de velocidades angulares, ya que empieza cuando termina la zona de influencia frontal. A diferencia de la zona de influencia anterior, esta solo se aplica para el barco propio, ya que solo nos interesa evaluar como realiza el alumno la maniobra, siendo indiferente si

el resto de barcos respeta o no la norma COLREG relativa al cruce de barcos. Además, solo se dibuja dicha área por la banda de estribor, que es la que interesa que evalúe el simulador, ya que se trata de las situaciones en las que el alumno debe gobernar al resto de barcos según COLREG, cuando se aproxima un barco por estribor.

Tras realizar las suposiciones iniciales y establecer las distintas zonas de influencia que condicionaran el cálculo de los índices de intersección y cruce, se describe a continuación el proceso que realiza los coeficientes para obtener su valor. Para abarcar las distintas situaciones posibles, en el algoritmo se han diseñado cinco situaciones para su aplicación: **intersección frontal, intersección lateral por estribor y por babor, trayectoria en paralelo y una de alcance.**

El proceso del cálculo de los índices, empieza con la intersección de la zona de influencia frontal entre dos barcos, creando un área de intersección. En el caso de que no se produzca dicha intersección, se asumirá el coeficiente de intersección es cero, es decir, se estima que no habrá colisión entre los buques. Cuando exista un área, causada por la intersección de la mencionada zona de influencia, se lleva a cabo una estimación de la trayectoria futura que llevarán los buques durante el tiempo de evaluación, asumiendo las velocidades (lineal y angular) constantes, como indicamos en las suposiciones iniciales. De esas trayectorias seleccionamos las tres posiciones más próximas entre los barcos y calculamos los valores medios de esas distancias, de forma que ese valor represente un coeficiente de distancia mínima, el cual denominaremos  $c_d$ .

Por otra parte, se emplea también el tiempo en el que se produce el acercamiento máximo entre los barcos con respecto al instante inicial, obteniendo otro coeficiente temporal, el cual designaremos como  $c_t$ . De esta forma, la fórmula matemática empleada para calcular el índice indicado es la siguiente:

$$c_d = 1.0 - \frac{E[\min \text{ distaces}]}{SECURE\_DISTANCE}$$

Ecuación 3-5

$$c_t = 1.0 - \frac{E[\min \text{ times}]}{TIME\_INTERVAL}$$

Ecuación 3-6

$$c_i = E[c_d, c_t]$$

Ecuación 3-7

Donde  $E[\min \text{ distaces}]$  y  $E[\min \text{ times}]$  son los valores medios de las distancias y tiempos de los instantes con más acercamiento estimado. SECURE\_DISTANCE y TIME\_INTERVAL son los parámetros geométrico y temporal, respectivamente, relativos al escenario analizado.  $E[c_d, c_t]$  establece el valor medio de los dos índices previamente calculados.

El coeficiente de impacto o índice de intersección será el resultado de calcular el valor medio de los coeficientes de distancia y del temporal, obteniendo el de intersección o  $c_i$ . De esta forma la evaluación de índice de impacto tiene en cuenta la probabilidad de que ocurra un acercamiento peligroso en la trayectoria futura que ha sido estimada, así como el tiempo de reacción disponible antes de que se alcance dicha situación. Este método predictivo de los barcos que se realiza, mediante las constantes velocidades lineal y angular, también se aplica para el cálculo del índice de cruce. En este caso, se realizan estimaciones durante las trayectorias de los barcos durante todo el tiempo de evaluación, debiéndose cumplir unos requisitos para el cálculo de este índice.

En primer lugar, el barco contrario debe estar en la segunda área de influencia, la destinada al cruce, las cual también variará según la velocidad angular del barco propio. Una vez se tenga a una unidad en dicha zona, antes de comparar las distancias de las tres posiciones más próximas entre los barcos, se

tiene en cuenta la posición del barco contrario respecto al barco propio. Además de estar en la zona de cruce, el barco contrario debe poder ver al del usuario en cualquier ubicación de la zona positiva del eje “x”, es decir, lo ve por su proa, de forma que en esta situación se estaría violando la regla COLREG relativa al cruce de barcos. Cuando se dan esas condiciones, se realizará el cálculo del coeficiente de cruce o también denominado  $c_c$  de manera similar al coeficiente anterior, es decir, teniendo en cuenta posiciones y tiempo que transcurre desde el instante inicial hasta alcanzar esas posiciones.

Calculados los coeficientes de intersección y de cruce, se realiza el cálculo del COLREG SCORE, el cual es el responsable de la puntuación del escenario:

$$\text{SCORE} = \sum_{k=0}^N (0.8 * c_i + 0.2 * c_c) \Delta T$$

**Ecuación 3-8**

Cuyo significado es el valor k-ésimo de cada índice que se obtiene en cada paso de simulación o  $\Delta T$  (cuyo valor es 0.1), siendo  $N$  el número de pasos de simulación, sumándose todos y multiplicándose por el tiempo que tarda cada paso de simulación. Es similar a realizar una integración respecto al tiempo.

Finalmente, en el caso en que se produzca una situación de alcance, se ha decidido evaluarlo como cruce o intersección, ya que el fin de este sistema es intentar evitar o reducir las colisiones entre barcos, por lo que, para este caso, la maniobra de alcance se trata como una forma de evitar una colisión en un futuro cruce. De esta forma, se propone una solución que, debido al tipo de algoritmo que se ha creado, se basa en el modelado predictivo de los barcos que integra el concepto mostrado en la Figura 3-28 con un análisis que tiene en cuenta las dinámicas de los barcos a analizar.

Previa a la implementación del algoritmo para simular escenarios en movimiento, se ha realizado una herramienta que permita evaluar el comportamiento del algoritmo en distintas situaciones, para comprobar que los valores de los coeficientes de colisión resultantes sean coherentes con la realidad. Se han elegido cinco tipos de situaciones para analizar la calidad del algoritmo: situación de intersección frontal, una de cruce por estribor y por babor, otra situación de dos barcos con trayectorias paralelas y por último una situación de alcance. Para comprobar y validar el funcionamiento del algoritmo, se analizarán tres casos:

- Al ser el objetivo principal del simulador, buscar parecido con las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar, se analizarán los cinco casos para la situación de encuentro entre dos barcos con las características de las lanchas.
- Otro caso a evaluar será cuando los barcos sean de proporciones mayores a las lanchas de instrucción, por ejemplo, barcos con una eslora de 60 metros. Con esta comprobación del algoritmo para este tipo de situaciones, suplimos una de las deficiencias que tenía el algoritmo descrito en el estado del arte.
- Comprobado para barcos de mayor tamaño que las lanchas, también se comprueba la aplicación del algoritmo para el caso opuesto, barcos más pequeños que las lanchas de instrucción.
- Como último caso a estudiar, es cuando nos encontramos uno de los dos barcos involucrados en el encuentro con velocidad nula, es decir, un barco parado.

### 3.5.1 Lanchas de instrucción

Para todos los casos mostrados en este apartado, se tratarán las cinco situaciones en las que siempre los barcos estarán a una distancia de 200 metros entre ellos y con las características de una lancha de instrucción. En los ejemplos mostrados a continuación, se puede apreciar, como se predicen las posiciones de los barcos cada 0,5 segundos, es decir, se obtienen 15 posiciones distintas de ambos buques durante su trayectoria. De esas 15 posiciones, son resaltadas las tres posiciones cuyo acercamiento de

los barcos es máximo, para obtener los coeficientes de intersección y de cruce. También se puede apreciar bien como varían los dominios de influencia, debido a la variación de velocidad angular de ambos buques. Al existir intersección de áreas de influencia, representada con una zona roja, se cumple el requisito para calcular el índice de intersección. La zona de influencia del cruce, se representará de color amarillo, a partir de la zona de influencia frontal.

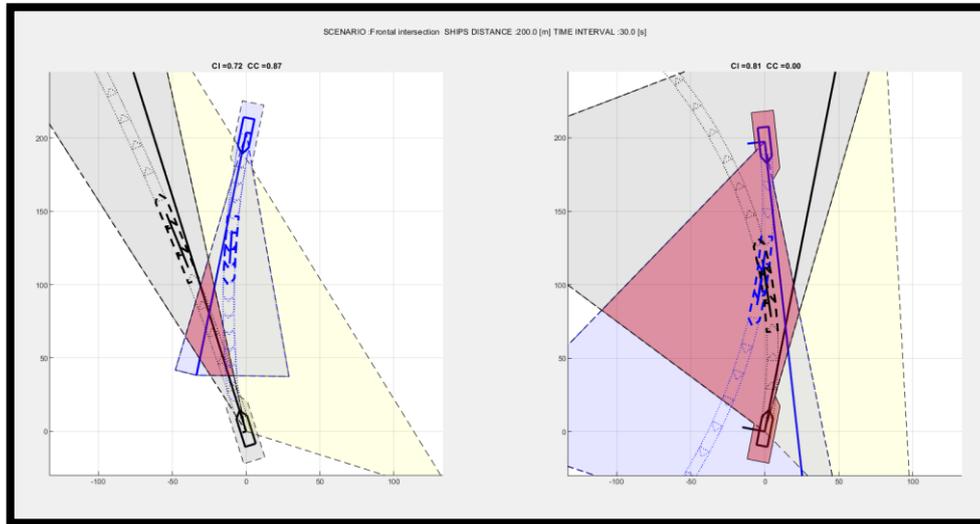


Figura 3-29 Intersección frontal de dos lanchas [Fuente propia]

En el ejemplo de la izquierda el coeficiente de cruce, sale un valor mayor debido a que según la posición de los barcos, es más probable que la colisión sea por cruce que por vuelta encontrada. El alto valor en el coeficiente de cruce nos sirve además para ver que la regulación COLREG sobre como maniobrar en esta situación no se ha cumplido, ya que su cumplimiento habría garantizado una maniobra segura. Con el caso de la derecha de la Figura 3-29, se puede hacer una observación sobre la independencia que existe entre los índices del algoritmo y el tamaño de la intersección de las áreas de influencia, es decir, por más grande o pequeña que sea esa región no significa que se incremente o decrezca el valor de los índices. Por otra parte, se comprueba en este caso como no hay riesgo de que se produzca un cruce inadecuado entre los barcos, es decir,  $c_c = 0$  ya que no se cumplen con las condiciones para tener que realizar su cálculo. Sin embargo, el valor del  $c_i$  es tan elevado debido a que en este caso el barco propio o alumno, no cumple con la norma COLREG en la vuelta encontrada, provocando altas probabilidades de choque.

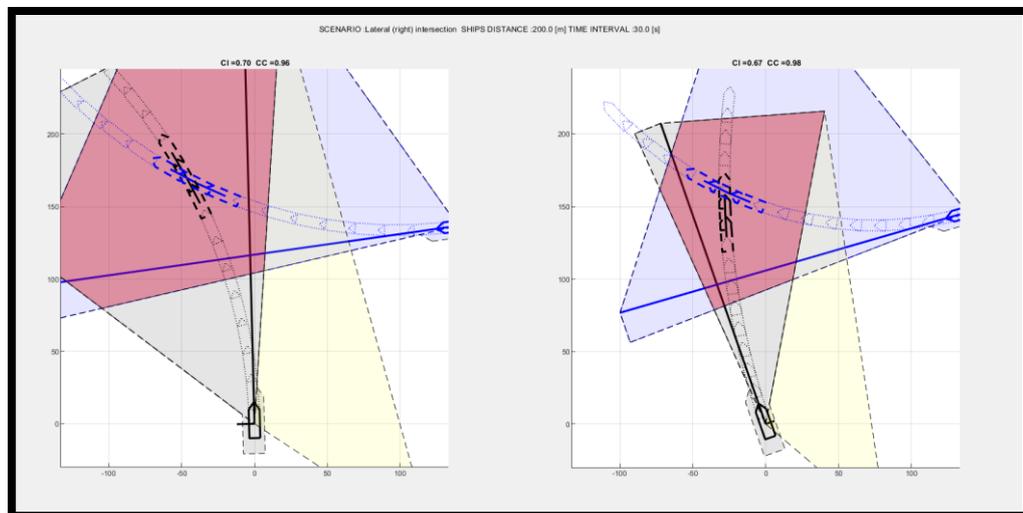
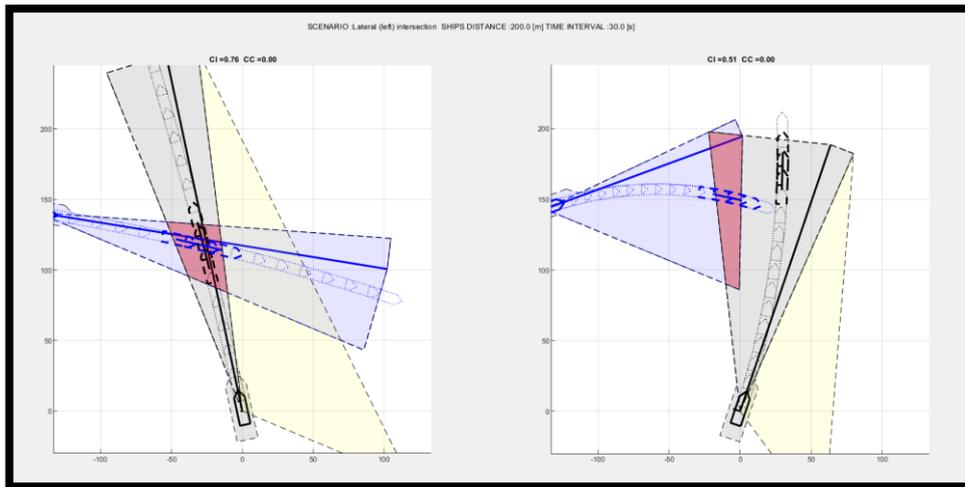


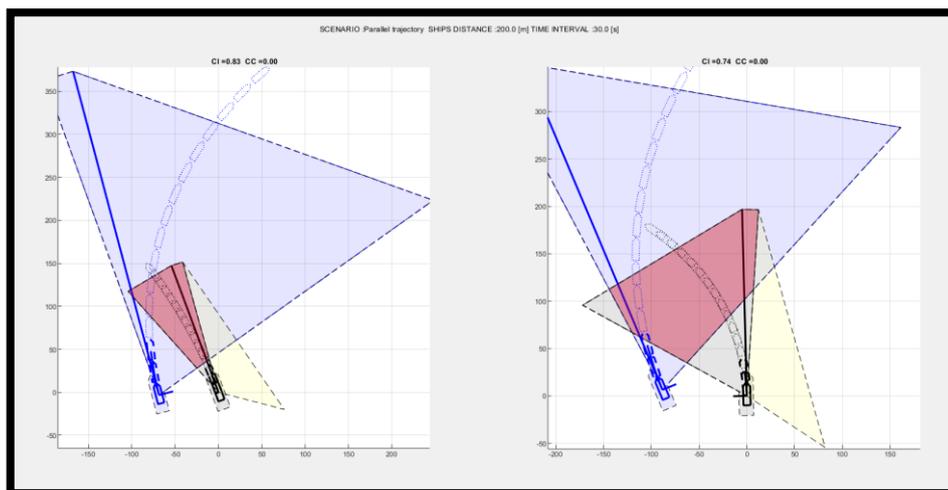
Figura 3-30 Cruce por estribor [Fuente propia]

Para el siguiente caso, mostrado en la Figura 3-30, en ambos casos, los valores del coeficiente de cruce son mucho mayor que el de intersección debido a que, tal y como se puede observar, en la predicción de la situación de los barcos en el momento de más acercamiento las probabilidades para que se produzca colisión son casi del 100%, debido a la mala actuación en el cruce, al no cumplir COLREG en esa situación. El hecho de que el instante de tiempo en que se va a producir crezca, es decir, esta situación aún tarde cierto tiempo en ocurrir, reduce el valor del índice obtenido clasificando el cruce como menos peligroso.



**Figura 3-31 Cruce por babor [Fuente propia]**

En este caso de la Figura 3-31, está claro que el  $c_c$  será nulo, debido a que no se cumple la condición de que el barco contrario se encuentre en el dominio de influencia (banda de estribor) destinado al cruce, en ninguna de las previsiones de su situación durante el tiempo de evaluación. Además, aunque en el ejemplo de la izquierda, en el momento de mayor acercamiento, se produzca colisión por mala ejecución cruce, hay que recordar que el simulador evalúa la forma en la que el alumno realiza la maniobra de cruce, añadiendo que en este simulador el resto de buques no cumplen con las normas de navegación cuando deben hacerlo, como en este caso. Básicamente, en esta situación siempre tendremos valor  $c_c = 0$  y la peligrosidad de las maniobras se reflejará mediante el índice de intersección.



**Figura 3-32 Barcos con trayectoria paralela [Fuente propia]**

A diferencia del algoritmo mencionado en el estado del arte, en el algoritmo propuesto en este trabajo, sí se tiene en cuenta cuando hay dos barcos navegando con trayectorias paralelas, para evaluar las maniobras realizadas. En ambos ejemplos de la Figura 3-32, el cálculo realizado de los coeficientes

tiene sentido, corroborando el funcionamiento de este algoritmo para estas situaciones. Este caso, se ha añadido únicamente para mostrar el funcionamiento del algoritmo en el instante que se produzca esta situación, ya que es probable que esto se durante el transcurso de un barco alcanzando a otro buque.

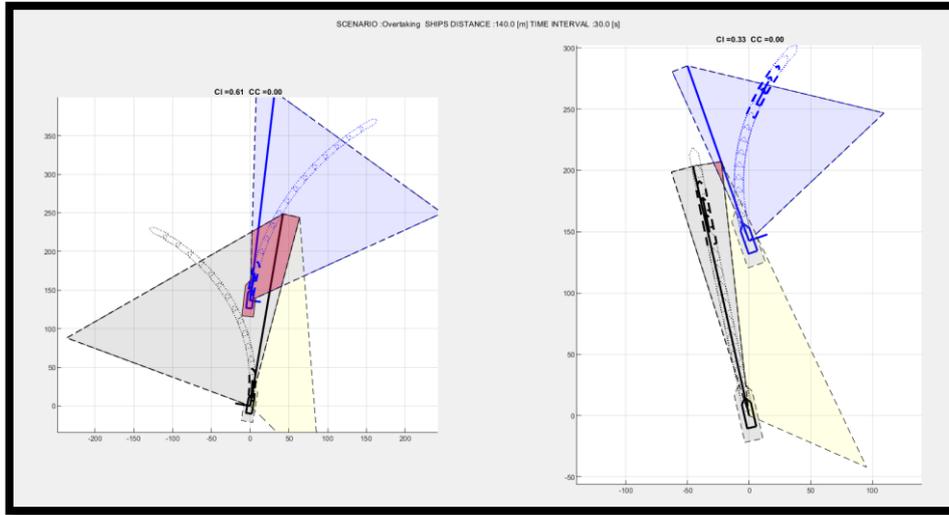


Figura 3-33 Overtaking entre dos barcos [Fuente propia]

Finalmente, el último caso de la Figura 3-33 muestra dos ejemplos de alcance, y como se explicó en el punto anterior, no se ha creado ningún coeficiente exclusivo para esta situación. Sin embargo, se utiliza los otros dos coeficientes para indicar las probabilidades de impacto o cruce inadecuado, siendo el objetivo en esta situación obtener valores de los índices bajos, cuyo significado será que se está evitando la posible colisión por cruce o por realizar la maniobra de forma incorrecta. En general, el  $c_c$  dará un valor nulo ya que es muy difícil que una situación que empiece en alcance acabe en la condición de cruce. Es decir, es muy improbable que el algoritmo cree una situación en la que el barco contrario acabe cumpliendo los requisitos (zona de influencia y la posición del barco contrario con la proa al del usuario) que generen la necesidad de realizar el cálculo del  $c_c$ .

### 3.5.2 Barcos de grandes proporciones

Para este caso de barcos con mayores proporciones, manteniendo las distancias de 200 metros entre barcos, el algoritmo trabaja de la misma manera que lo explicado anteriormente, pero esta vez tiene en cuenta el tamaño de los barcos participantes.

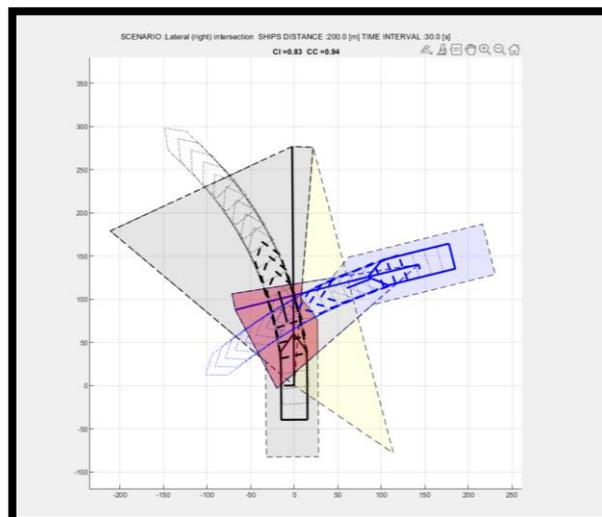


Figura 3-34 Cruce por estribor de barcos de 60 metros [Fuente propia]

En el ejemplo de la Figura 3-34, se refleja como el algoritmo trata de distinta forma el cálculo de los índices de cruce e intersección cuando se existe variación de tamaño, ya que esta misma situación, pero usando las lanchas de instrucción, los coeficientes eran menores a los mostrados en este caso. La consideración de la geometría de los barcos para establecer su dominio de influencia permite integrar su tamaño en las especificaciones que generan los índices COLREG, creando de esta forma una solución con aplicaciones en escenarios más genéricos y realistas.

### 3.5.3 Barcos menores proporciones

Al igual que comprobamos la validez del algoritmo para barcos de mayor tamaño que las lanchas de instrucción, se debe comprobar con los barcos que son más pequeños que las lanchas de la escuela. El ejemplo que se muestra a continuación, se realiza con barcos de eslora igual a 10 metros y situados también a 200 metros entre ellos. Mientras en el caso anterior, con los barcos de mayor tamaño, los valores de los índices eran mayores comparado con las lanchas, en Figura 3-35 vemos que para los barcos con la mitad de eslora el riesgo de ejecutar esta situación es menor que en las lanchas de instrucción, reflejado en sus valores de evaluación.

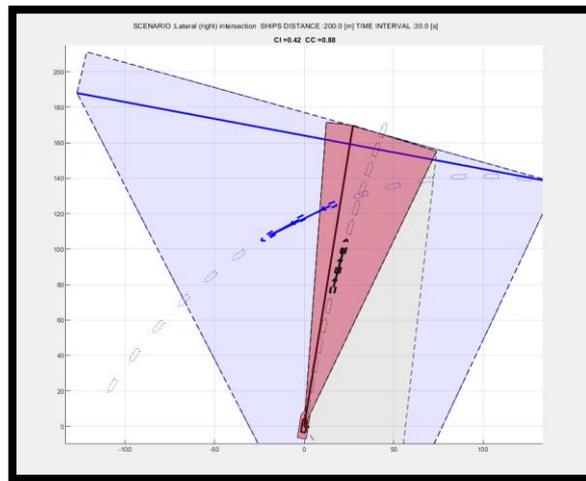


Figura 3-35 Cruce por estribor con barcos de 10 metros [Fuente propia]

### 3.5.4 Barcos parados y en movimiento

En el último caso de la Figura 3-36, se comprueba la validez del algoritmo en las situaciones en las que uno de los dos barcos se encuentra con velocidad lineal nula, es decir, se encuentra parado. Se usará para el ejemplo, las lanchas de instrucción a 200 metros de distancia.

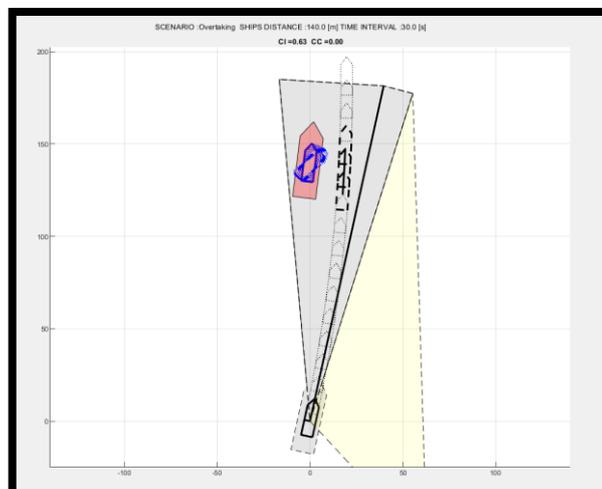


Figura 3-36 Alcance a un barco parado [Fuente propia]

En este último ejemplo, cuando los dominios de influencia intersecan, al estar uno de los barcos parado, se aprecia que los valores de los coeficientes de evaluación dependen únicamente de la distancia y del tiempo en el que el barco móvil pase más próximo al barco inmóvil, permitiendo integrar escenarios en donde se tiene barcos parados que pueden ser considerados como obstáculos estacionarios que en cualquier instante podrían iniciar su movimiento.

Una vez que se ha desarrollado y validado en diferentes escenarios el algoritmo de generación de índices de cumplimiento de normativas COLREG, queda pendiente el desarrollo de pruebas del simulador en donde el manejo del barco propio lo realiza un usuario mediante el uso del *joystick*, de forma que su comportamiento general durante cada prueba preparada pueda ser evaluada.

## 4 PRUEBA DEL SIMULADOR COLREG

### 4.1 Descripción del apartado

Tras el desarrollo de la herramienta principal relativa al presente proyecto, se presentarán en este apartado un ejemplo de la aplicación del simulador. El objetivo principal es mostrar las pruebas realizadas durante las fases de ajustes y creación de escenarios, así como los resultados obtenidos con alumnos de quinto curso de la Escuela Naval Militar, elegidos al azar y sin conocimiento previo del funcionamiento del simulador. Sin embargo, debido a problemas en el interfaz de la simulación no fue posible realizar esta prueba a tiempo para la entrega de este trabajo. Los resultados que se obtengan durante esta prueba serán, por tanto, mostrados durante la presentación de este TFG.

### 4.2 Explicación de la prueba

Con el fin de comprobar el funcionamiento del simulador y del algoritmo creado para maniobras en escenarios de encuentros con múltiples barcos, se han realizado una serie de pruebas de todos los escenarios diseñados. Para llevarlo a cabo, han sido seleccionadas cinco personas elegidas de manera aleatoria y sin que tuvieran información alguna sobre el funcionamiento del simulador y tampoco práctica alguna del manejo del joystick.

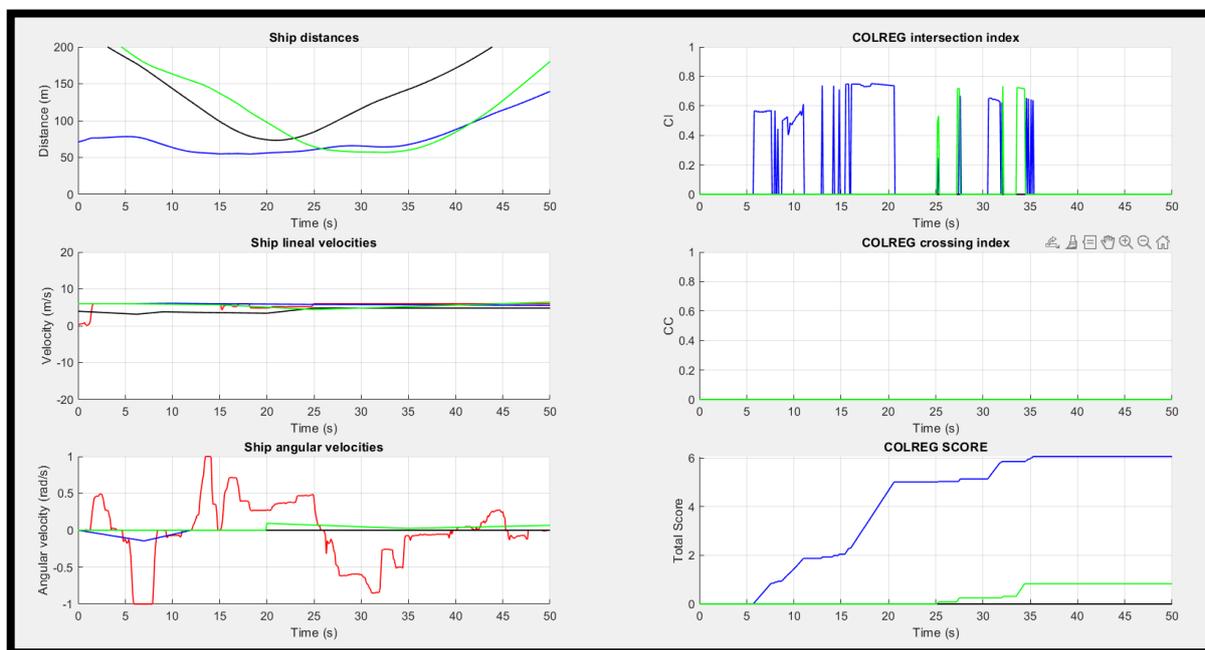
La forma de realizar las pruebas será:

- A cada usuario se le dejará realizar los tres primeros escenarios de dos barcos (Head on, Crossing y Overtaking) dos veces, de cara a que se adapte al control del barco y a su velocidad, es decir, se adapte a la sensibilidad en el movimiento del joystick.
- Una vez realizados los tres primeros escenarios, se pondrán al usuario el resto de escenarios y un cronómetro al lado, para que puede visualizar en todo momento el tiempo que le queda antes de que termine la simulación.
- Una vez realizada las pruebas al primer usuario, se hará el cambio de alumno, y deberá hacerse de tal manera que el usuario que lo hizo previamente, no le comunique ninguna información de interés sobre la prueba.
- Esta secuencia se realizará de la misma forma para cada cambio de alumno.

### 4.3 Análisis de datos

Durante el desarrollo de las pruebas mencionadas en el punto anterior, se hará una recopilación, en forma de gráficas, de los siguientes datos de interés: **velocidad lineal y angular** de cada barco, **distancias** al resto de barcos respecto el barco que maneja el usuario, **índice de intersección y de cruce** de cada buque y, por último, una **puntuación global** de las maniobras realizadas con cada barco, que

tiene como base de cálculo los dos primeros índices. A su vez, estas gráficas (ver ejemplo en la Figura 4-1) no estarán a disposición del usuario durante la simulación, ya que no se desea condicionar las acciones a tomar por el alumno debido a que aumente o disminuya el índice COLREG o la puntuación global.



**Figura 4-1 Interfaz para el análisis [Fuente propia]**

Desgraciadamente, por la escasez de tiempo y debido un problema con el interfaz en el software de MATLAB, no se pudieron hacer las pruebas con los cinco alumnos a tiempo para la entrega de este TFG. Durante el tiempo previo a la defensa, se llevará a cabo una investigación para arreglar dicho problema y poder realizar dicha prueba. El problema consistía que el programa MATLAB aparentaba estar saturado, ralentizando el tiempo de simulación, es decir, no se correspondía el tiempo de simulación con la realidad, imposibilitando hacer una prueba real.

Tras realizar varias pruebas, pudo comprobarse que el problema se originaba al intentar actualizar dos figuras diferentes mientras transcurría la simulación del modelo de Simulink creado para cada escenario. Los cambios necesarios para poder corregir este problema no pudieron realizarse a tiempo, de forma que se finalizarán para poder mostrar los resultados de esta prueba durante la presentación del TFG. Por este motivo, se muestran a continuación unas pruebas realizadas por el autor del TFG, anteriores al problema producido en el sistema (recomendable revisar el apartado *Descripción de escenarios* en el caso de no entender algunos valores de coeficientes), de forma que se entienda el concepto asociado al simulador como alternativa en la formación de los alumnos.

La Figura 4-2 muestra el resultado del primer escenario del simulador, en donde se puede ver como la puntuación total del escenario (0.6) es baja, es decir, es una buena puntuación asociada a una maniobra realizada con seguridad. El valor acumulado se debe, principalmente, a la aportación realizada por el coeficiente de intersección, ya que la situación inicialmente se presenta peligrosa al estar los barcos enfrentados directamente. Los picos de valores durante la simulación establecen las situaciones en donde la maniobra tiende a convertirse en peligrosa si no es corregida.

Por otra parte, en la simulación mostrada, el coeficiente de cruce permanece con valor nulo, ya que la maniobra se realizó cumpliendo la norma relativa COLREG. De otra forma, si visualizamos la maniobra realizada incorrectamente de la Figura 4-3, vemos como la puntuación es algo más alta debido

a la aportación generada por el coeficiente de cruce, es decir, se clasifica como una maniobra un poco más peligrosa, aunque debido a que se evita la colisión sigue teniendo un valor bajo.

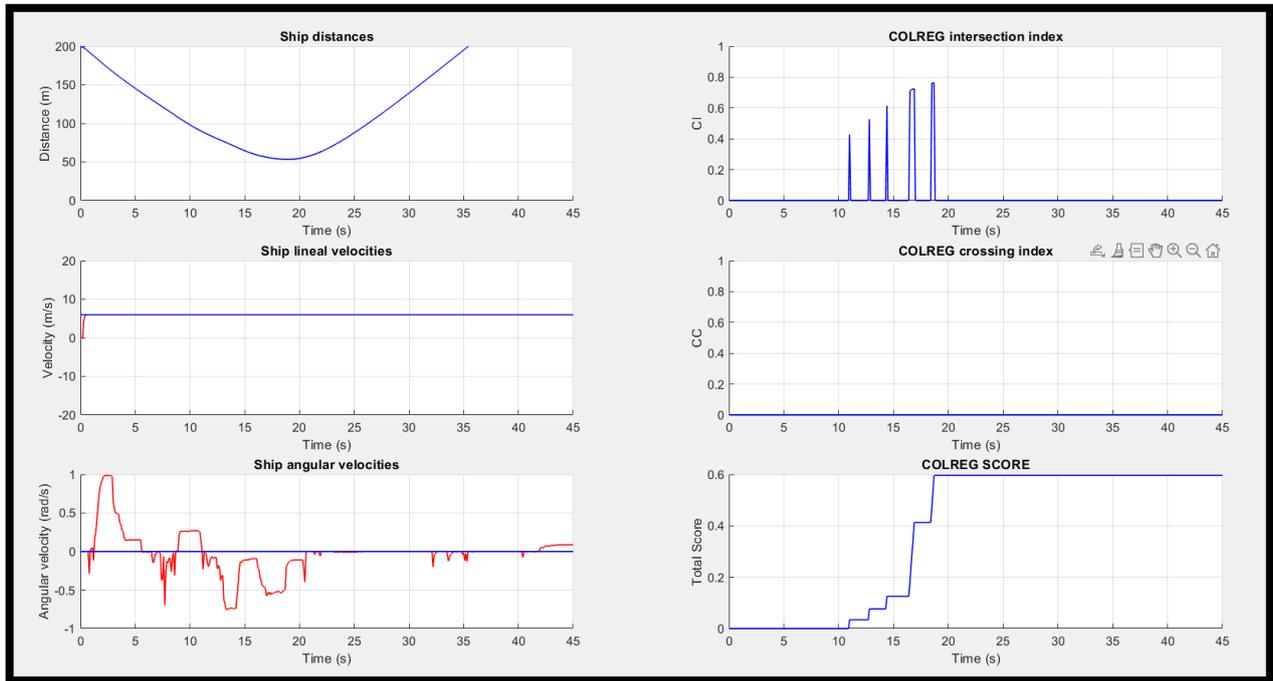


Figura 4-2 Escenario Head On (Dos barcos) [Fuente propia]

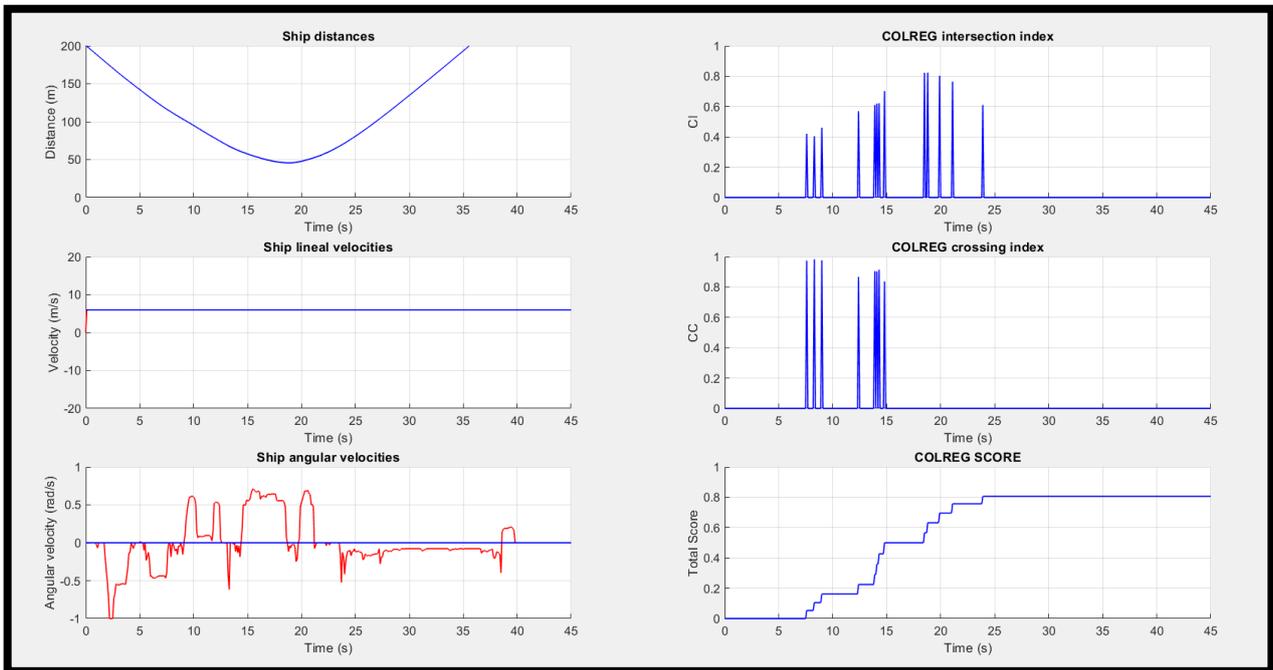


Figura 4-3 Escenario Head On incorrecto [Fuente propia]

El segundo escenario con una maniobra de cruce, como el mostrado en la Figura 4-4, se aprecia como al realizar de forma correcta desde el principio la maniobra de cruce, la puntuación global se basa en el coeficiente de intersección, es decir, en como de rápido se reacciona realizando correctamente la maniobra según COLREG. Si se realizara de manera incorrecta, como no caer a estribor o no ceder el paso, daría un valor final mucho más alto o se produciría una colisión, tal y como se muestra en la Figura 4-5.

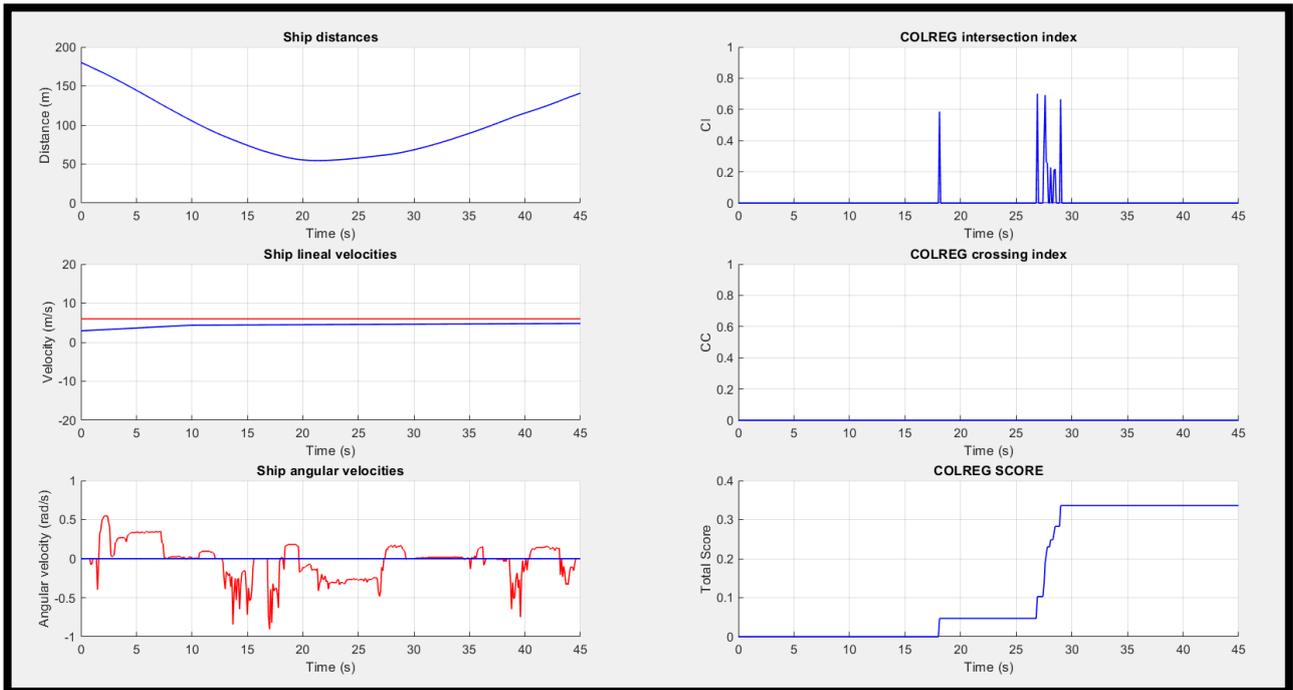


Figura 4-4 Escenario Crossing (Dos barcos) [Fuente propia]

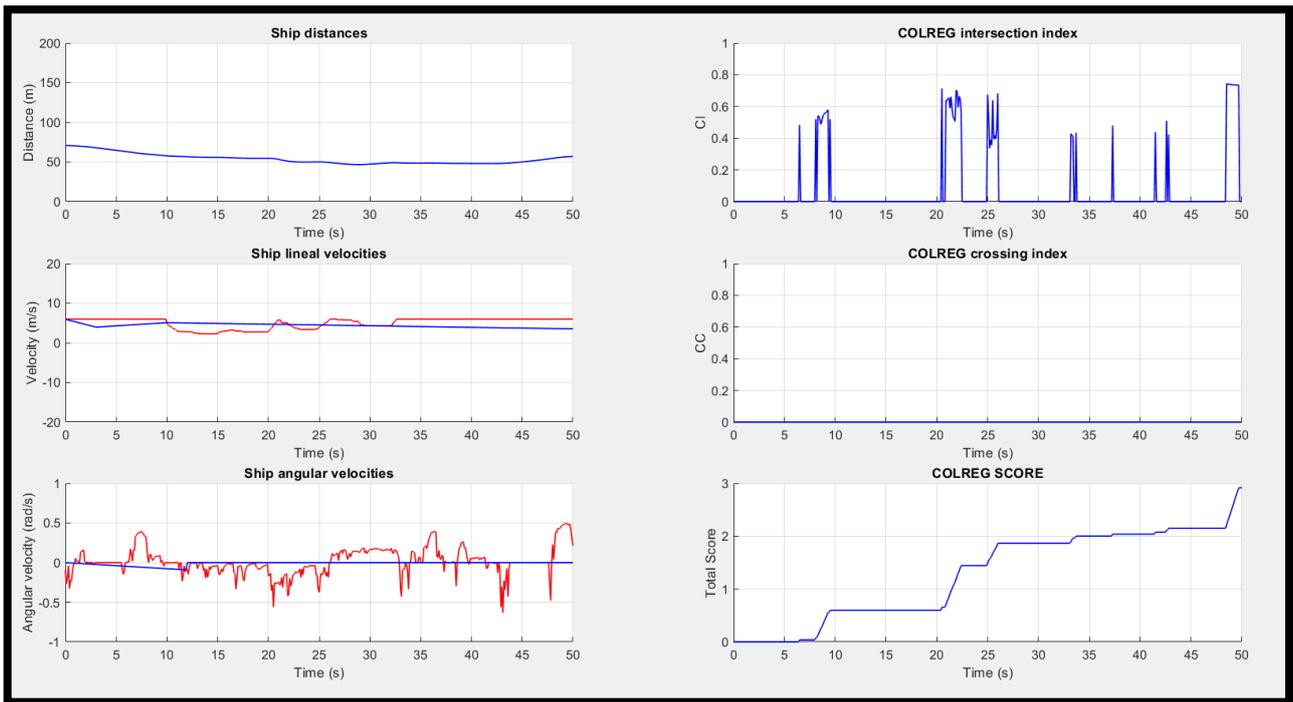
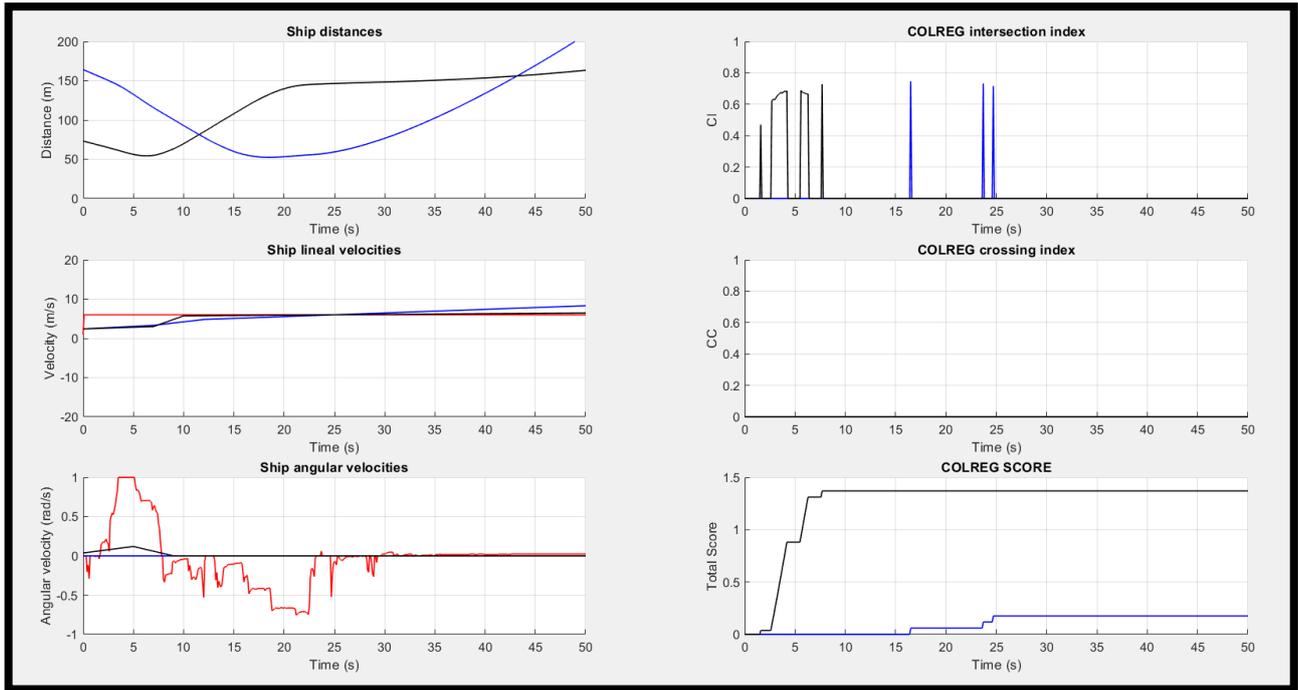


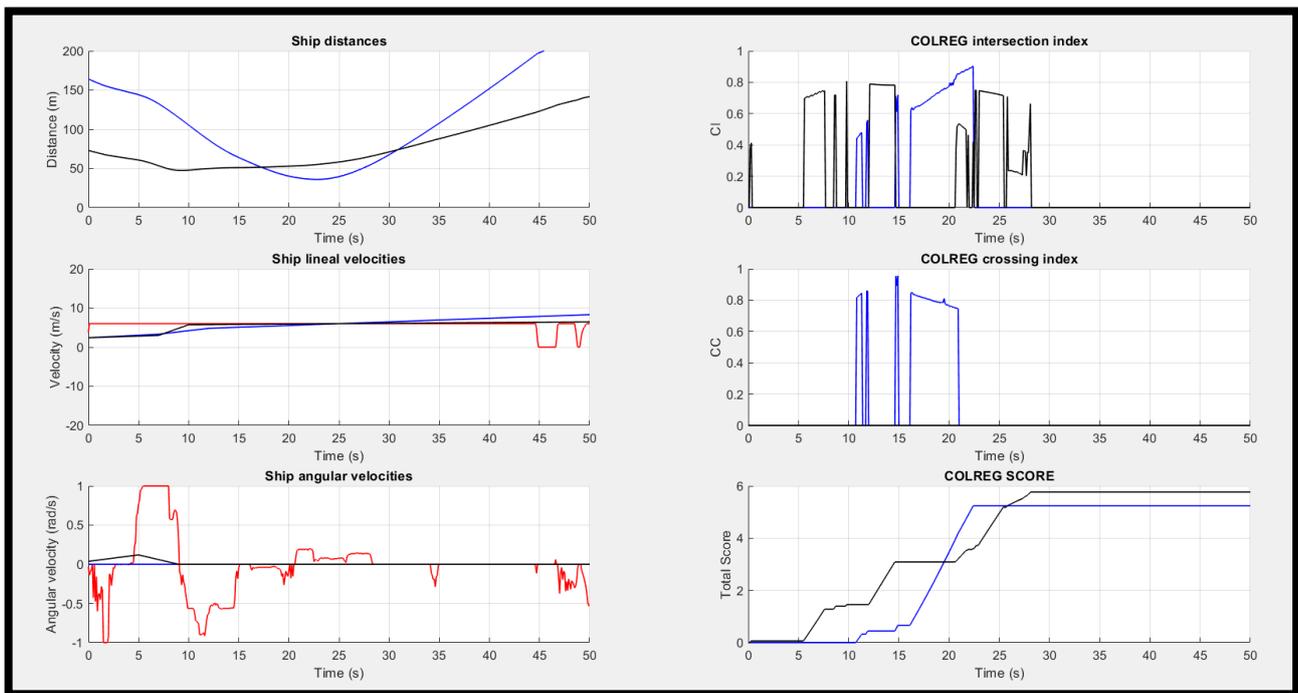
Figura 4-5 Escenario Overtaking (Dos barcos) [Fuente propia]

Para este escenario de dos barcos, en la situación de alcance de la Figura 4-5, el valor final de COLREG da mayor a los dos primeros debido a factores como la dificultad de reaccionar a los movimientos del barco contrario, ya que en este caso varía la velocidad angular del barco a diferencia de los dos primeros escenarios, que mantenían los rumbos constantes. Otro factor es la velocidad similar de los buques, lo cual no permite adelantar al barco contrario, obligando al usuario a ajustar su velocidad lineal (como se muestra en la gráfica del medio de la izquierda), produciendo constantes cambios en los valores de coeficiente de intersección.



**Figura 4-6 Escenario Overtaking y Crossing (Tres barcos) [Fuente propia]**

Pasando a los escenarios de tres barcos, vemos como aparecen dos valores finales de COLREG, ya que el algoritmo realiza un cálculo de puntuación final para cada barco. A partir de estos valores el sistema genera una puntuación global que será empleada para clasificar el resultado de las pruebas realizadas. Analizando el escenario de la Figura 4-6, vemos como la maniobra que conlleva más peligro es la de alcance, ya que, si no se actúa de forma correcta, al iniciar el barco que se pretende alcanzar con poca velocidad y disponerse a su vez delante del usuario, resulta el más peligroso a maniobrar. Por otra parte, para el caso del barco que se cruza vemos como el valor es más pequeño, ya que se ha maniobrado de acuerdo a la normativa COLREG, reduciendo la peligrosidad de la maniobra.



**Figura 4-7 Escenario Overtaking y Crossing incorrecto (Tres barcos) [Fuente propia]**

Si el escenario anterior no se realizara de manera correcta, como acercarse demasiado al barco que se alcanza o no caer estribor para cumplir con COLREG con el barco que aparece por estribor, nos da unos valores mucho mayores y peligrosos que los obtenidos en el caso anterior (ver Figura 4-7).

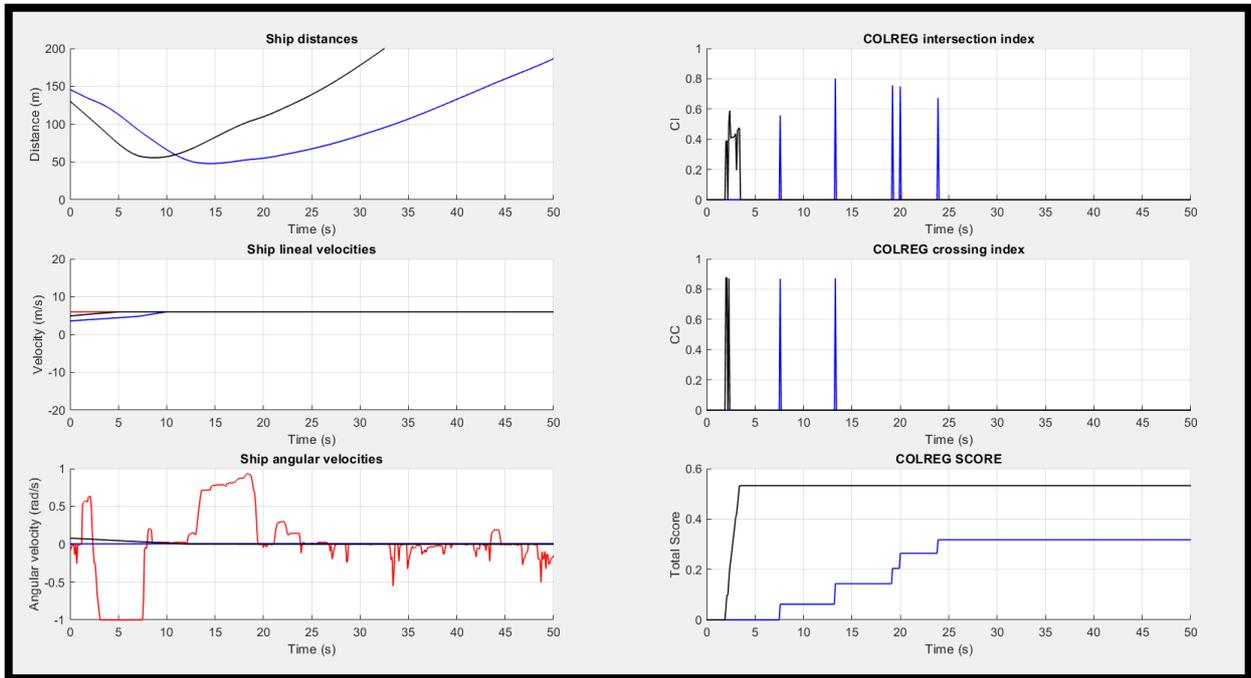


Figura 4-8 Escenario Head On y Crossing incorrecto (Tres barcos) [Fuente propia]

El caso último de escenarios con tres barcos es mostrado en la Figura 4-8, donde se muestran de nuevo dos puntuaciones finales, siendo menor la del escenario de cruce, al ser más fácil de maniobrar que la del barco negro, cuya maniobra requiere mayor anticipación, viéndose reflejado en su puntuación final. Aunque se diga que el barco negro es más difícil de maniobrar, se puede ver que al tener una puntuación de 0.53 se ha realizado de forma más segura que por ejemplo el Overtaking del escenario anterior.

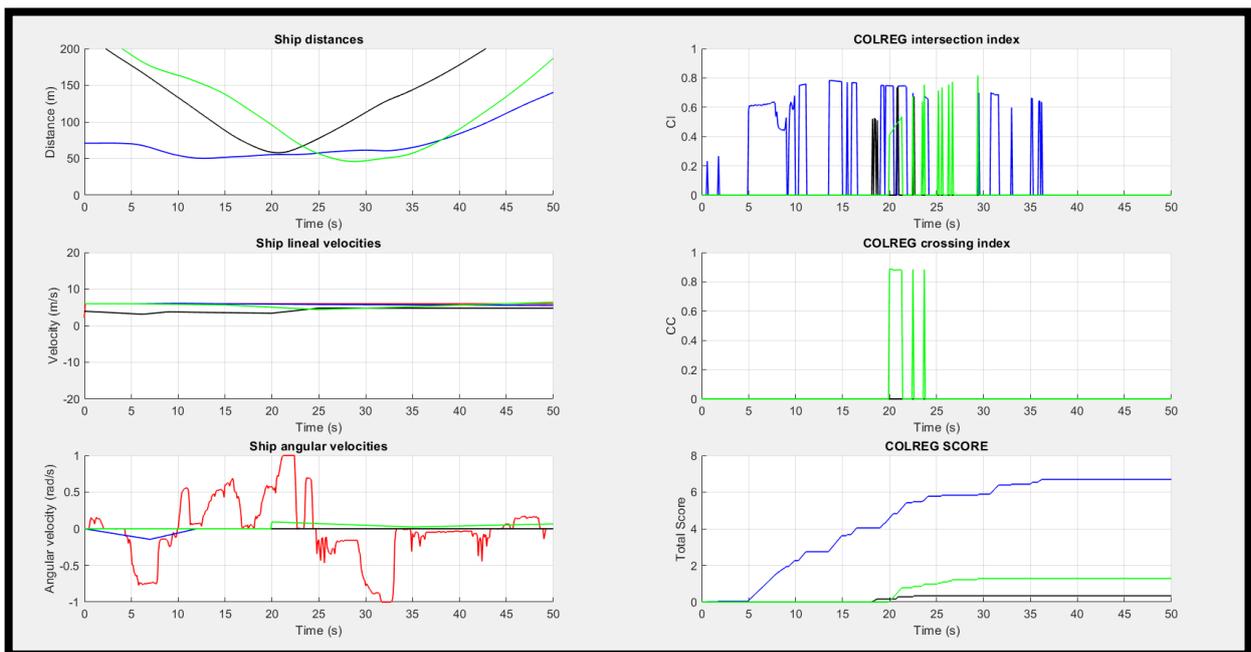


Figura 4-9 Escenario de cuatro barcos [Fuente propia]

Finalmente, en el último escenario mostrado en la Figura 4-9 vemos como la maniobra más peligrosa que se hace es la del barco azul, ya que da un valor final de 6.69, frente a 1.2 del barco verde y 0.33 del barco negro. Se puede ver también, en la gráfica de las velocidades angulares como hay que maniobrar bastante, ya que se trata del escenario más complejo al disponer de más barcos que los escenarios previamente explicados.

Durante la presentación del TFG se mostrará un vídeo en donde se muestre la evolución de los escenarios durante las simulaciones presentadas.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Descripción del apartado

En este apartado se exponen las conclusiones obtenidas de las diferentes etapas del desarrollo del presente proyecto. Finalmente se hace una breve reseña de las posibles aplicaciones futuras del proyecto, así como algunas posibilidades de desarrollo que permitirían ampliar el alcance y capacidades del simulador desarrollado.

### 5.2 Conclusiones

Finalizado el proyecto, se puede concluir que el objetivo principal de crear una herramienta en donde poder simular y evaluar las condiciones, en diferentes escenarios, asociadas a las regulaciones de tráfico marítimo y en particular respecto a la posibilidad de evitar una posible colisión, se ha cumplido satisfactoriamente. También se ha realizado con éxito el diseño de un algoritmo que realiza el cálculo de los índices de las maniobras, permitiendo de esta manera poder evaluar la forma de ejecución del alumno en los distintos escenarios.

Adicionalmente, se ha realizado una revisión detallada de las maniobras más importantes (Head on, Crossing y Overtaking), de las normas COLREG, que podían ser de utilidad en este TFG. El entorno seleccionado fue MATLAB/Simulink, ya que tiene una gran variedad de funciones y capacidades que permite el diseño de sistemas de simulación de este tipo.

La principal conclusión extraída, por tanto, es que la creación de este simulador es un primer avance para la obtención de una herramienta generadora de rutas (*path planning*) compatible con la normativa COLREG, lo cual se circunscribe dentro del ámbito del estudio de las dinámicas y la maniobrabilidad de barcos en el proyecto TraBoDiT realizado en el CUD-ENM. Hay que tener en cuenta que el presente trabajo únicamente ha incluido dinámicas sin aceleraciones presentes, es decir, es importante poner en perspectiva la gran cantidad de opciones que puede ofrecer un sistema de simulación en la que se tenga en cuenta dinámicas como la propulsión, el guiado por timón, las fuerzas del viento o las corrientes marinas.

Además, se llega a la conclusión de que, con el presente TFG, se ha conseguido una forma de aprendizaje de las normas de navegación básicas, siguiendo una metodología más práctica y visual que la que se enseña a los alumnos en un aula de clase. De este modo, el alumno ante una duda que le surja sobre la forma de actuar en cierta situación, puede recurrir a esta herramienta para solventar dicha situación, utilizando el simulador y viendo dicho escenario.

Debido al problema en el intento de prueba con alumnos, se llegó a la conclusión que el entorno MATLAB/Simulink puede que no sea el más adecuado para este tipo de simulaciones, cabe la posibilidad que entornos de desarrollo de juegos en 2D sea más cómodo trabajar en este simulador.

A título personal, el desarrollo de este trabajo me ha sido de gran utilidad para familiarizarme con las herramientas de MATLAB/Simulink para la creación y diseño de los distintos escenarios del simulador. También me ha servido para aumentar mis conocimientos sobre el concepto de gemelo digital, específicamente en el ámbito naval, generando en mí un cierto interés por ver como se desarrolla en el futuro este tipo de tecnología. Además, durante el desarrollo del TFG, me he dado cuenta de lo que puede llegar a contribuir a la Armada Española el impulso y la difusión de este tipo de herramientas.

### **5.3 Líneas futuras**

Como líneas futuras sobre este sistema de simulación, para su mejora y desarrollo, se propone lo siguiente:

- Como se ha mencionado en varias ocasiones durante el desarrollo del trabajo, implementar en el simulador, todas las dinámicas que no se han tenido en cuenta y que en la vida real son de gran importancia en el comportamiento de un barco en el mar. Un paso a ese avance puede ser implementar, en el simulador, el TFG realizado por el Alférez de fragata De Gandarillas Carrara titulado “*Desarrollo de una herramienta para el análisis y diseño de sistemas de control de balanceo de barcos mediante aletas móviles*”.
- Otra línea futura sería el desarrollo de un algoritmo que haga un cálculo de los coeficientes más complejo teniendo en cuenta nuevos aspectos tales como las condiciones medioambientales, de forma que se mejore sus capacidades predictivas.
- Crear escenarios en los que existan objetos fijos que obstaculicen la trayectoria de los barcos, dificultando el nivel del simulador.
- Relacionado con la mejora del adiestramiento de los alumnos, implementar escenarios que sean recreación de lugares reales, por ejemplo, recrear la entrada al puerto de Marín o la entrada a la Escuela Naval Militar.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

En esta sección figuran todas las referencias, sean recursos web, libros, artículos, etc., incluyendo la información de autores, título de la obra, nombre de la publicación, año, edición y enlace más fecha de último acceso en el caso de referencias a recursos online.

- [1] F. d. I. d. Barcelona, «Retro informática,» [En línea]. Available: <https://www.fib.upc.edu/retro-informatica/avui/simulacio.html>. [Último acceso: 02 03 2022].
- [2] Anónimo, «SelfBank,» [En línea]. Available: <https://blog.selfbank.es/que-evolucion-tecnologica-hemos-vivido-en-los-ultimos-15-anos/>. [Último acceso: 02 03 2022].
- [3] Anónimo, «Telvent hace entrega de simuladores tácticos y de navegación a la Escuela Naval Militar de Marín,» *Abengoa*, 2006.
- [4] Anónimo, «BBVA,» 30 01 2019. [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/que-es-un-gemelo-digital-y-para-que-sirve/>. [Último acceso: 05 03 2022].
- [5] J. C. Palau, «Los buques autónomos estarán sujetos a las normas generales de navegación en España,» *El Mercantil*, 01 03 2022.
- [6] Anónimo, «Digi-Key,» 25 06 2015. [En línea]. Available: <https://www.digikey.es/en/articles/closing-your-control-loop-efficiently-in-mcu-based-designs>. [Último acceso: 05 03 2022].
- [7] P. Barrios, «La historia de la navegación,» *Sucesos*, n° 20, p. 213.
- [8] Anónimo, «Barcelona world race,» [En línea]. Available: <https://www.barcelonaworldrace.org/es/educacion/programa-educativo/explora/ser-humano/historia-de-la-navegacion/navegacion-antigua/los-egipcios-y-las-primeras-barcas-de-vela>. [Último acceso: 27 01 2022].
- [9] Anónimo, «Mozaik education,» [En línea]. Available: [https://www.mozaweb.com/es/Extra-Escenas\\_3D-Birreme\\_antigua\\_nave\\_de\\_guerra-9976](https://www.mozaweb.com/es/Extra-Escenas_3D-Birreme_antigua_nave_de_guerra-9976). [Último acceso: 27 01 2022].
- [10] Anónimo, «Rutas con historia,» [En línea]. Available: <https://www.rutasconhistoria.es/articulos/vikingos-en-sevilla>. [Último acceso: 12 03 2022].

- [11] Anónimo, «El arma que cambió la historia de Roma y la convirtió en la primera potencia naval,» *El español*, 21 11 2020.
- [12] Anónimo, «La Pinta, la Niña y la Santa María: Las tres carabelas de Cristóbal Colón,» *OKDIARIO*, 06 08 2018.
- [13] J. R. Ortiz, «Terránea,» [En línea]. Available: <https://blog.terranea.es/primer-barco-de-vapor-historia/>. [Último acceso: 27 01 2022].
- [14] Anónimo, «Cómo era viajar en el Titanic,» *El Universal*, 14 04 2020.
- [15] G. Vitrotti, «Swissinfo.ch,» [En línea]. Available: [https://www.swissinfo.ch/spa/desde-hace-60-a%C3%B1os-\\_jacques-piccard--el--hombre-m%C3%A1s-profundo-del-mundo-/45509922](https://www.swissinfo.ch/spa/desde-hace-60-a%C3%B1os-_jacques-piccard--el--hombre-m%C3%A1s-profundo-del-mundo-/45509922). [Último acceso: 28 01 2022].
- [16] C. C. A. / E. Collection, «Alamy,» [En línea]. Available: <https://www.alamy.es/fotocientifico-suizo-jacques-piccard-y-el-teniente-de-navio-don-walsh-a-bordo-del-batiscafo-trieste-san-diego-ca-23-01-1960-32373112.html>. [Último acceso: 28 01 2022].
- [17] Anónimo, «EEUU reemplazó dos buques de su Séptima Flota en Japón por unos más potentes,» *Primicias 24.com*, 2019.
- [18] P. Boisson, «Historia de la seguridad marítima,» *Anave*, 2012.
- [19] K. C. Fumero, «Estudio de accidentes marítimos debido a abordajes,» Universidad de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, 2016.
- [20] Anónimo, «Grijalvo,» [En línea]. Available: [https://www.grijalvo.com/Bay/Desastre\\_Donna\\_Paz.htm](https://www.grijalvo.com/Bay/Desastre_Donna_Paz.htm). [Último acceso: 29 01 2022].
- [21] Anónimo, «Maritime Cyprus,» [En línea]. Available: <https://maritimecyprus.com/2017/07/29/flashback-in-history-andrea-doriastockholm-collision-25-july-1956-2/>. [Último acceso: 29 01 2022].
- [22] Anónimo, «Amazon,» [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/Reglamento-Internacional-para-Prevenir-Abordajes/dp/1711744026>. [Último acceso: 30 01 2022].
- [23] OMI, Regkamento Internacional para prevenir los abordajes en la mar (1972), Publicación del Ministerio de Defensa, 2016.
- [24] Anónimo, «Enseñanzas Náuticas,» [En línea]. Available: <https://nauticajonkepa.wordpress.com/2007/11/12/luces/>. [Último acceso: 30 01 2022].
- [25] M. M. y. M. F. Raphael Zaccone, «A COLREG - Compliant Ship Collision Avoidance Algorithm,» Italia, 2019.
- [26] Anónimo, «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/videos/getting-started-with-matlab-68985.html>. [Último acceso: 07 02 2022].
- [27] E. N. Militar, Manual de las Lanchas de Instrucción A-121, Ministerio de Defensa, 2016.