



Universidad de Oviedo

ESCUELA SUPERIOR DE LA MARINA CIVIL DE GIJÓN

Trabajo Fin de Máster

APLICACIONES DEL REGLAMENTO
INTERNACIONAL PARA PREVENIR ABORDAJES
EN LOS SISTEMAS ANTICOLISIÓN

Para acceder al Título de Máster Universitario en

NÁUTICA Y GESTIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO

Autora: Aitana Sánchez González

Tutores: Alberto Tablón Vega

Marlene Bartolomé Sáez

julio - 2021

Resumen

El interés hacia los buques autónomos está creciendo dentro del sector del transporte marítimo. Para prevenir posibles abordajes, estos buques se apoyarán en los sistemas anticolidión, los cuales ya se utilizan para la ayuda de toma de decisiones a bordo. Debido a la coexistencia de los buques autónomos con los buques tripulados, tanto máquinas como humanos deben guiarse por las mismas normas. Numerosos investigadores están estudiando los nuevos sistemas anticolidión, pero se hace necesario realizar un estudio pormenorizado de sus artículos que deje constancia del grado de cumplimiento que tienen hacia las vigentes reglas de navegación.

Palabras clave: COLREGs, MASS, sistema anticolidión, tráfico marítimo, seguridad marítima

Abstract

Interest in autonomous vessels is growing within the shipping industry. In order to prevent possible collisions, these vessels will rely on collision avoidance systems, which are already used for on-board decision support. Due to the coexistence of autonomous ships with manned ships, both machines and humans must be guided by the same rules. Numerous researchers are studying the new collision avoidance systems, but it is necessary to conduct a detailed study of their articles to determine the degree of compliance with the current navigation rules.

Key words: COLREGs, MASS, collision avoidance system, maritime traffic, ship safety

Índice

1	Introducción.....	1
2	Objetivos.....	4
3	Estado del conocimiento.....	5
3.1	Buques Autónomos (MASS).....	5
3.1.1	Estudio de los buques autónomos en las sesiones del Comité de Seguridad Marítima (MSC).....	8
3.1.2	Control de riesgos en los buques autónomos.....	9
3.2	Sistemas Anticolisión Marítimos (CAS).....	10
3.3	Convenio sobre el Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes (COLREGs).....	12
3.3.1	Evolución del Reglamento de Abordajes.....	12
3.3.2	Cumplimiento del Convenio para Prevenir Abordajes de 1972 por parte de los buques autónomos.....	16
3.3.2.1	Recomendaciones para el Reglamento de Abordajes en su aplicación a los buques autónomos.....	18
4	Metodología.....	23
4.1	Aplicación del Reglamento de Abordajes de 1972 a los CAS.....	23
4.1.1	Análisis de las reglas.....	24
4.2	Obtención de la lista de verificación del COLREGs para CAS.....	33
4.3	Aplicación de la lista de verificación.....	35
4.3.1	Revisión del cumplimiento de los requisitos.....	38
4.3.2	Análisis cinemático de las situaciones de riesgo de colisión.....	48
4.3.2.1	Primera situación:.....	48
4.3.2.2	Segunda situación:.....	66
4.3.2.3	Tercera situación:.....	73



5	Resultados y análisis.....	80
6	Conclusiones.....	84
6.1	Líneas futuras	85
	Bibliografía.....	86
	ANEXO I.....	I
	Guía rápida de maniobras según el 72 COLREGs.....	I
	ANEXO II.....	III
	A collision avoidance approach via negotiation protocol for a swarm of USVs.....	III
	ANEXO III.....	IV
	Cooperative path planning algorithm for marine surface vessels.....	IV

Índice de imágenes

Imagen 1 - Causas de pérdidas totales 2010-2019. Fuente: AGCS 2020.....	1
Imagen 2 - Causas de incidentes en 2019. Fuente: AGCS 2020	2
Imagen 3 - USV Maxlimer. Fuente: Kongsberg	6
Imagen 4 - Esquema del control de un buque autónomo. Fuente: (Det Norske Veritas, 2018).....	7
Imagen 5 - Esquema de un Sistema de Navegación Autónomo (ANS). Fuente: AAWA	11
Imagen 6 - Situación riesgo de abordaje. Fuente: aulanautica	26
Imagen 7 - Elementos de un TSS. Fuente: Prácticos de Puerto. Carlos Salinas	28
Imagen 8 - Situación de buque que alcanza. Fuente: aulanautica	30
Imagen 9 - Situación de vuelta encontrada. Fuente: aulanautica	30
Imagen 10 - Situación de buque que cruza. Fuente: aulanautica	31
Imagen 11 - Índice de impacto de la revista Ocean Engineering. Fuente: jcr.clarivate (WOS).....	36
Imagen 12 - Factor de impacto revista Ocean Engineering en la categoría “Ocean Engineering”. Fuente: jcr.clarivate (WOS)	36
Imagen 13 - Factor de impacto revista Ocean Engineering en la categoría “Marine Engineering”. Fuente: jcr.clarivate (WOS)	37
Imagen 14 - Primera página del artículo seleccionado. Fuente: (Ma et al., 2021)	37
Imagen 15 - Prioridades entre buques según los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)	42
Imagen 16 - Niveles de maniobrabilidad de buques según los autores. Fuente: (Ma et al., 2021).....	42
Imagen 17 - Buques USVs utilizados en el artículo. Fuente: (Ma et al., 2021)	42
Imagen 18 - Situaciones de riesgo según marcaciones diseñada por los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)	45
Imagen 19 - Acciones de los buques según una negociación propuesta por los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)	46

Imagen 20 - Datos recibidos inicialmente por un USV de otro según el artículo. Fuente: (Ma et al., 2021)	47
Imagen 21 - Situación inicial de los USVs y tabla de datos iniciales. Fuente: (Ma et al., 2021).....	48
Imagen 22 – Se muestran las escalas del eje X e Y. Fuente: propia	49
Imagen 23 - Error de posicionamiento del buque USV3. Fuente: propia	49
Imagen 24 - Error de posicionamiento de los USVs (datos en el artículo). Fuente: propia	50
Imagen 25 - Error de posicionamiento de los USVs (datos respetando la tabla). Fuente: propia.....	50
Imagen 26 - Primera página del artículo. Fuente: (Tam and Bucknall, 2013)	51
Imagen 27 - Situación inicial de los USVs y tabla de datos iniciales. Fuente: (Tam and Bucknall, 2013).....	52
Imagen 28 - Situación de salida de los USVs y tabla de datos del USV1. Fuente: propia.....	52
Imagen 29 - Encuentro del USV1 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD	53
Imagen 30 - Encuentro del USV1 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD	53
Imagen 31 - Encuentro del USV1 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD	54
Imagen 32 - Encuentro del USV1 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD	54
Imagen 33 - Situaciones de los buques según los autores. Fuente: (Tam and Bucknall, 2013).....	55
Imagen 34 - Interpretación de las reglas del COLREGs según los autores. Fuente: (Tam and Bucknall, 2013).....	55
Imagen 35 – Primera situación inicial de los USVs. Fuente: propia, AutoCAD	56
Imagen 36 - Configuración vectorial de los movimientos de los USV. Fuente: propia, AutoCAD.....	56
Imagen 37 - Encuentro del USV1 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD	57
Imagen 38 - Encuentro del USV1 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD	57
Imagen 39 - Encuentro del USV1 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD	58

Imagen 40 - Encuentro del USV1 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD	58
Imagen 41 - Maniobras para evitar colisión en la primera situación según los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)	60
Imagen 42 - Encuentro del USV2 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD	61
Imagen 43 - Encuentro del USV2 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD	61
Imagen 44 - Encuentro del USV2 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD	61
Imagen 45 - Encuentro del USV3 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD	62
Imagen 46 - Encuentro del USV3 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD	62
Imagen 47 - Encuentro del USV4 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD	63
Imagen 48 - Maniobrabilidad de los USVs según los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)	64
Imagen 49 - Maniobras aconsejadas para la primera situación de USVs. Fuente: propia.....	64
Imagen 50 - Posiciones exactas en el dibujo de los USVs. Fuente: propia.....	65
Imagen 51 - Situación inicial y tabla de datos iniciales. Fuente: (Ma et al., 2021)	66
Imagen 52 – Segunda situación inicial de los USVs. Fuente: propia, AutoCAD	66
Imagen 53 - Configuración vectorial de los movimientos de los USV. Fuente: propia, AutoCAD.....	67
Imagen 54 - Encuentro del USV0 con el USV1. Fuente: propia, AutoCAD	67
Imagen 55 - Encuentro del USV0 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD	68
Imagen 56 - Encuentro del USV0 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD	68
Imagen 57 - Maniobras realizadas para evitar colisión de la segunda situación. Fuente: (Ma et al., 2021)	70
Imagen 58 - Encuentro del USV1 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD	70
Imagen 59 - Encuentro del USV1 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD	71
Imagen 60 - Encuentro del USV2 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD	71
Imagen 61 - Maniobras aconsejadas para la segunda situación de USVs. Fuente: propia	72

Imagen 62 - Situación inicial (figura 15(a) del artículo) y tabla de datos iniciales. Fuente: (Ma et al., 2021)	73
Imagen 63 -Tercera situación inicial de los USVs. Fuente: propia, AutoCAD	73
Imagen 64 - Configuración vectorial de los movimientos de los USV. Fuente: propia, AutoCAD.....	74
Imagen 65 - Encuentro del USV1 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD	74
Imagen 66 - Encuentro del USV1 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD	75
Imagen 67 - Encuentro del USV1 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD	75
Imagen 68 - Maniobras realizadas para evitar colisión de la tercera situación. Fuente: (Ma et al., 2021)	77
Imagen 69 - Encuentro del USV2 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD.....	77
Imagen 70 - Encuentro del USV2 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD	78
Imagen 71 - Encuentro del USV3 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD	78
Imagen 72 - Maniobras aconsejadas para la tercera situación de USVs. Fuente: propia.....	79

Índice de tablas

Tabla 1 - Formas de abordar el COLREGs según el grado de autonomía del MASS. Fuente: MSC 103	16
Tabla 2 - Intenciones de estudio del COLREGs para los MASS. Fuente: MSC 103.....	16
Tabla 3 - Lista de verificación de COLREGs. Fuente: propia	33
Tabla 4 - Lista de verificación de COLREGs del primer artículo. Fuente: propia	38
Tabla 5 - Situación de salida de los USVs. Fuente: propia	53
Tabla 6 - Resumen de los encuentros del USV1. Fuente: propia	54
Tabla 7 - Resumen de los encuentros del USV1. Fuente: propia	59
Tabla 8 - Tipo de acción según regla 17. Fuente: propia	59
Tabla 9 - Comparación de las maniobras según el COLREGs y el artículo. Fuente: propia	60
Tabla 10 - Encuentros del USV2 con el resto de USVs. Fuente: propia	62
Tabla 11 - Encuentros del USV3 con el resto de USVs. Fuente: propia	62
Tabla 12 - Encuentros del USV4 con el resto de USVs. Fuente: propia	63
Tabla 13 - Resumen encuentro primera situación. Fuente: propia	63
Tabla 14 - Comparación de los valores de la posición de los USVs. Fuente: propia	65
Tabla 15 -Resumen de los encuentros del USV0. Fuente: propia.....	69
Tabla 16 - Tipo de acción según regla 17. Fuente: propia	69
Tabla 17 - Comparación de las maniobras según el COLREGs y el artículo. Fuente: propia.....	70
Tabla 18 - Encuentros del USV1 con el resto de USVs. Fuente: propia	71
Tabla 19 - Encuentros del USV2 con el resto de USVs. Fuente: propia	72
Tabla 20 - Resumen de los encuentros del USV1. Fuente: propia	76
Tabla 21 - Tipo de acción según regla 17. Fuente: propia	76



Tabla 22 - Comparación de las maniobras según el COLREGs y el artículo. Fuente: propia.....	77
Tabla 23 - Encuentros del USV2 con el resto de USVs. Fuente: propia	78
Tabla 24 - Encuentros del USV3 con el resto de USVs. Fuente: propia	79
Tabla 25 - Resumen encuentro tercera situación. Fuente: propia	79

Índice de acrónimos

- **60 COLREGs**
Regulations for Preventing Collisions at Sea 1960, 12
- **72 COLREGs**
International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972, 3
- **AAWA**
Advanced Autonomous Waterborne Applications, 11
- **AGCS**
Allianz Global Corporate & Specialty, 1
- **ANS**
Automatic Navigation System, 11
- **ARPA**
Ayuda de Punteo Radar Automática, 20
- **BOE**
Boletín Oficial del Estado, 29
- **CA**
Módulo Collision Avoidance, 11
- **CAS**
Collision Avoidance Systems, 2
- **COLREGs**
International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972, 3
- **CPA**
Closest Point of Approach, 19
- **DNV**
Det Norske Veritas, 6
- **EMSA**
European Maritime Safety Agency, 9
- **H**
Heading, 57



- **IMO**
International Maritime Organization, 4
- **ITZ**
Inshore Traffic Zone, 28
- **MASS**
Maritime Autonomous Surface Ships, 2
- **MSC**
Maritime Safety Committee, 9
- **OOW**
Officer Of the Watch, 10
- **Q1**
First Quarter, 4
- **RP**
Módulo de Route Planning, 11
- **RSE**
Regulatory Scoping Exercise, 9
- **S**
Speed, 57
- **SA**
Módulo de Situation Awareness, 11
- **SOLAS**
Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en la Mar, 12
- **SSD**
Módulo Ship State Definition, 11
- **TCPA**
Time to Closest Point at Approach, 19
- **TSS**
Traffic Separation Scheme, 14



- **USV**
Unmanned Surface Vehicle, 2
- **VC**
Módulo Virtual Captain, 11
- **WIG**
Wing in Ground, 13

1 Introducción.

Hoy en día, uno de los mayores riesgos en el transporte marítimo son las colisiones entre buques. Se puede comenzar definiendo la colisión como el acto por el que un buque golpea o es golpeado por otro buque, independientemente de que éstos estén navegando, fondeados o en puerto. (European Maritime Safety Agency, 2015)

En el informe anual (2020) sobre la seguridad en la navegación de Allianz Global Corporate & Specialty (AGCS) (Allianz Global Corporate & Specialty, 2020) se puede observar (**Imagen 1**) que entre los años 2010 y 2019 se han sufrido 35 pérdidas de buques debido a abordajes. Esto hace que la colisión sea la quinta mayor causa de pérdida total de un buque:

ALL CAUSES OF TOTAL LOSS: 2010 - 2019											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	TOTAL
Foundered (sunk)	65	46	55	70	50	66	48	57	31	31	519
Wrecked/stranded (grounded)	25	28	29	21	18	19	20	15	11	3	189
Fire/explosion	12	9	14	15	7	9	12	8	6	5	97
Machinery damage/failure	4	6	15	1	5	2	10	9	2		54
Collision (involving vessels)	10	3	5	2	2	7	2	1	2	1	35
Hull damage (holed, cracks etc.)	5	3	7	1	5	2	4	5	1	1	34
Miscellaneous	6	2	2	1	2		1				14
Contact (e.g harbor wall)			2		1						3
Piracy	2	1									3
Missing/overdue	1						2				3
Total	130	98	129	111	90	105	99	95	53	41	951

Vessels over 100GT only

Source: Lloyd's List Intelligence Casualty Statistics
Data Analysis & Graphic: Allianz Global Corporate & Specialty

Imagen 1 - Causas de pérdidas totales 2010-2019. Fuente: AGCS 2020

Observando los datos anteriores se puede analizar cómo desde 2010, exceptuando 2015, han ido decreciendo las pérdidas de buques. Esto se puede deber a “una disminución significativa en la actividad del tráfico y a la reducción a la mitad de las pérdidas relacionadas con el clima debido a temporadas de huracanes y tifones más tranquilas.” (Allianz Global Corporate & Specialty, 2019).

En el mismo informe también se hace un recuento de incidentes sólo del año 2019, destacando (**Imagen 2**) que 289 de ellos fueron por colisiones, siendo así la segunda mayor causa de todos los incidentes en ese año:



Imagen 2 - Causas de incidentes en 2019. Fuente: AGCS 2020

Debido a esto, los denominados sistemas para evitar colisiones, conocidos por su acrónimo en inglés: CAS, (Collision Avoidance Systems) están adquiriendo más importancia ya que proporcionan ayuda para poder prevenir los abordajes en los buques tradicionales. Pero, además, no sólo son útiles para los oficiales de navegación, sino también lo serán para los buques autónomos, los llamados en inglés MASS, Maritime Autonomous Surface Ships, o USVs, Unmanned Surface Vehicles, en los cuales la realización automatizada de sus maniobras estará totalmente ligada a la aplicación de los algoritmos de diseño de los CAS utilizados en cada caso.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que los buques autónomos van a coexistir con los buques tripulados mientras naveguen en la mar y tendrán distintos grados de automatización, por ello, el desarrollo de la tecnología de los CAS se ha convertido en un factor importante a estudiar para evitar colisiones entre ellos.

En el informe del AGCS se pone de relieve la importancia de lo comentado:

“Cuando se utiliza adecuadamente, la tecnología puede mejorar la seguridad del transporte marítimo y una mejor formación y utilización de los datos puede dar lugar a una integración más exitosa. En particular, el sector debe empezar a aprender de los viajes exitosos, no solo de los accidentes.” (Allianz Global Corporate & Specialty, 2020)

Para que la tecnología de estos CAS sea eficiente y efectiva para la convivencia de los buques autónomos con los buques tripulados debe ser imperativo que, a la hora de diseñar y analizar



su funcionamiento, se tengan en cuenta todos los requisitos del 72 COLREGs, International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972, a partir de ahora referido como COLREGs.

Es por ello por lo que es de vital importancia comprobar que todas las exigencias que el Convenio de 1972 exige a las personas encargadas de la guardia de navegación son satisfechas por los sistemas anticolidión, o por aquellos sistemas para evitar colisiones que se quieren implantar en los buques autónomos y que se analizan en artículos técnicos científicos publicados en revistas de alto impacto.

2 Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo es destacar la necesidad de una correcta aplicación del COLREGs en los CAS para poder evitar abordajes y así promover la mejora de la seguridad de los buques adelantándose a los posibles accidentes. Cumpliendo completamente con el COLREGs se evitan ambigüedades entre los propios buques y, por lo tanto, posibles situaciones de riesgo que pudieran derivar en colisiones. Se debe intentar que la Organización Marítima Internacional (IMO) se implique en buscar que los CAS de los MASS sigan este marco normativo, al igual que ya lo hacen los buques tradicionales.

Para el logro de este objetivo principal se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Explicar la importancia de que los buques autónomos deban seguir las reglas del COLREGs, especificando las razones por las cuales se deben acoger a éste y distinguiendo los estudios que se están realizando por las autoridades correspondientes para su correcta aplicación.
- Interpretar el 72 COLREGs correctamente identificando las particularidades de cada regla, desde la 1 hasta la 19 incluida, realizando un esquema resumen que facilite la interpretación de situaciones de riesgo de abordaje y las maniobras a seguir.
- Generar una lista de requisitos del COLREGs que deben cumplir los CAS de los MASS y así con ella realizar un análisis pormenorizado del artículo técnico escogido para dar una fiabilidad al artículo en base a la normativa vigente.
- Realizar un análisis crítico a un artículo científico de una revista del primer cuartil (Q1) del Journal Citation Reports que estudie los sistemas anticolidión de los MASS para así poder evaluar hasta qué punto se han tenido en cuenta las regulaciones del COLREGs en el diseño y estudio del funcionamiento del CAS, ya sea para buques autónomos o para la ayuda de la toma de decisiones a bordo de buques tradicionales.
- Analizar las situaciones de riesgo de abordaje que plantea este artículo desde el punto de vista cinemático aportando las soluciones de posibles maniobras fruto de cumplir plenamente el COLREGs.

Con todo ello se podría remarcar la importancia de generar unos sistemas que eviten cualquier tipo de riesgo de abordaje gracias a unos algoritmos diseñados correctamente según las normas vigentes.

3 Estado del conocimiento.

Durante años el control de los buques y su navegación se ha venido realizando por los oficiales de puente, pero el rápido desarrollo de la tecnología y la investigación ha abierto nuevas oportunidades en el sector marítimo “A largo plazo, los humanos diseñarán máquinas “inteligentes” de confianza para navegar por el mar abierto, aguas interiores y los puertos sin supervisión humana.” (Statheros et al., 2008).

Los buques autónomos ya son, o comienzan a ser, una realidad, pero antes de que naveguen con total libertad deben cerciorarse de que no van a generar ningún riesgo para la seguridad de otros buques.

En este apartado se realiza una introducción a los buques autónomos, una descripción de los sistemas de navegación que llevarán a bordo y una explicación del Convenio que deberá regir las posibles interacciones de los buques autónomos con el resto de los buques, así como las recomendaciones que están siendo valoradas para la incorporación de los MASS en los reglamentos.

Sería posible que los MASS siguieran sus propias normas de navegación, pero esto solamente se podría conseguir en un futuro cuando únicamente existan este tipo de buques, o se limiten las zonas de navegación. No obstante, no son los escenarios que se manejan hoy en día.

3.1 Buques Autónomos (MASS).

Un MASS o *Maritime Autonomous Surface Ship*, se define como un buque que, en mayor o menor grado, puede operar con independencia de la interacción humana. Se le podría denominar como “buque autónomo”.

Estos buques ya están siendo probados, por ejemplo, se puede señalar el primer viaje MASS en mayo de 2019 que fue realizado entre West Mersea (Inglaterra, Reino Unido) y Oostende (Flandes, Bélgica), con una carga de cinco kilos de ostras. Este buque es el USV Maxlimer (**Imagen 3**), de 11,75 metros de eslora y 2,2 metros de manga, con una velocidad máxima de 4 nudos y autonomía de casi 12.000 millas náuticas. (Jonathan Amos, 2019).



Imagen 3 - USV Maxlimer. Fuente: Kongsberg

Como otro ejemplo, en Noruega se está construyendo un buque de contenedores de 120 TEU, YARA Birkeland, que se espera que comience a navegar de forma autónoma en 2022. (Porathe, 2019)

Los MASS podrían incluir buques con diferentes niveles de automatización, desde sistemas parcialmente automatizados que asisten a la tripulación humana hasta sistemas totalmente autónomos capaces de llevar a cabo todos los aspectos de la operación de un buque sin necesidad de intervención humana.

En el informe de Det Norske Veritas (DNV) sobre los MASS (Det Norske Veritas, 2018) se realiza la siguiente clasificación de los conceptos operativos de las funciones de un buque autónomo y remoto:

- *Vigilancia de la navegación con apoyo de decisiones*

“Sistemas mejorados de apoyo a la toma de decisiones ayudan a un oficial de puente encargado de la guardia de navegación en la realización de tareas para la función de navegación.”

- *Vigilancia de la navegación a distancia*

“Las tareas, deberes y responsabilidades de un oficial a cargo de la guardia de navegación son cubiertas por personal en un centro de control remoto fuera del buque. No hay tripulación disponible a bordo para apoyar al personal a distancia.”

- *Vigilancia de máquinas a distancia asistida por personal a bordo*

“Las tareas, deberes y responsabilidades de un oficial a cargo de la guardia de máquinas son cubiertas por personal en un centro de control remoto fuera del buque. La tripulación está disponible a bordo para realizar ciertas tareas definidas y asistir al personal a distancia cuando sea necesario.”

- Vigilancia de máquinas a distancia

“Las tareas, deberes y responsabilidades de un oficial a cargo de la guardia de máquinas son cubiertas por personal en un centro de control remoto fuera del buque. No hay tripulación disponible a bordo para apoyar al personal remoto.”

Se puede observar en la **Imagen 4** un esquema de la operación de un buque autónomo en conjunción con el equipo remoto en tierra:

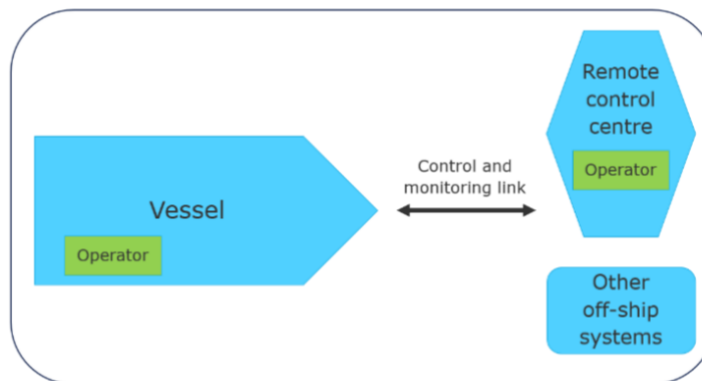


Imagen 4 - Esquema del control de un buque autónomo. Fuente: (Det Norske Veritas, 2018)

Los conceptos que acaban de ser definidos pueden relacionarse con los grados de autonomía establecidos por la IMO en su estudio exploratorio sobre los MASS en la sesión **MSC 103/J/5** de abril de 2021 (Maritime Safety Committee, 2021a):

- **Grado 1:** Buque con procesos automatizados y apoyo a la toma de decisiones: La gente de mar está a bordo para operar y controlar los sistemas y funciones. Algunas operaciones pueden estar automatizadas y, en ocasiones, sin supervisión, pero con marinos a bordo dispuestos a tomar el control.
- **Grado 2:** Buque teledirigido con gente de mar a bordo: El buque se controla y maneja desde otro lugar. La gente de mar está disponible a bordo para tomar el control y manejar los sistemas y funciones.
- **Grado 3:** Buque teledirigido sin gente de mar a bordo: El buque se controla y maneja desde otro lugar. No hay gente de mar a bordo.
- **Grado 4:** Buque totalmente autónomo: El sistema operativo del buque es capaz de tomar decisiones y determinar acciones por sí mismo.

Ésta no representa un orden jerárquico. Hay que tener en cuenta que el MASS podría estar operando en uno o más grados de autonomía durante la duración de un solo viaje.”

Además, algunos de los supuestos expuestos fueron los siguientes:

- *“Grado de autonomía 4 significa que no hay tripulación a bordo.*
- *No se pueden realizar transportes de pasajeros sin gente de mar a bordo.*
- *Para el grado 1 y 2, los marinos están a bordo y disponibles para tomar el control de los sistemas.*
- *Para los grados 3 y 4, las personas pueden permanecer a bordo durante el atraque, la manipulación de la carga y el fondeo.*
- *Para el grado 4, la supervisión por parte de una persona se realiza en un lugar remoto.”*

De todas formas, después de conocer la opinión de varios expertos en MASS, como la Universidad de Satakunta o la Administración finesa, que continuamente realizan reuniones en las que discuten las diferentes posibilidades ante la inminente llegada de estos buques, se puede acentuar una de sus conclusiones en la que se dice que *“los verdaderos buques autónomos-‘desconectados’ sólo existirán como excepción, en mar abierto”* concluyendo a su vez que en estos nuevos buques *“se deben priorizar los mensajes críticos de seguridad”* y que *“es fundamental mejorar la disponibilidad de los datos”*. También se detalló la necesidad de que los datos fueran distribuidos por una red de confianza gestionada por una administración pública.

3.1.1 Estudio de los buques autónomos en las sesiones del Comité de Seguridad Marítima (MSC).

Al mismo tiempo que se generan estudios sobre la construcción y diseño de los buques autónomos, se está llevando a cabo una importante labor de investigación y desarrollo, sobre todos los aspectos de los MASS, como los tipos de navegación autónoma, la supervisión de estos buques y los sistemas para evitar colisiones.

La Organización Marítima Internacional, ha comenzado a estudiar, en los instrumentos de la IMO, cómo abordar las operaciones de los buques marítimos autónomos intentando regular las nuevas características de la navegación más automatizada. La reunión **MSC 98** (junio de 2017) señaló que el sector marítimo estaba siendo testigo de un mayor despliegue de MASS para ofrecer resultados seguros, rentables y de alta calidad.

“Aunque se están desarrollando y desplegando soluciones tecnológicas, las delegaciones opinan que falta claridad en la aplicación correcta de los instrumentos existentes de la IMO a los MASS. Las delegaciones creían que la IMO debía garantizar que los diseñadores, constructores, propietarios y

operadores de MASS tuvieran acceso a un marco normativo claro y coherente.” (Maritime Safety Committee, 2021a)

Este Comité decidió que era importante el estudiar la normativa relacionada con los MASS a partir del **MSC 99**: *“Desde el punto de vista normativo, el Comité de Seguridad Marítima de la IMO acordó incluir en su orden del día un nuevo punto sobre el MASS y el MSC 99 acordó emprender un estudio exploratorio de normativa (Regulatory Scoping Exercise: RSE) para evaluar el impacto del MASS en el actual marco normativo internacional de seguridad marítima.” (European Maritime Safety Agency, n.d.)*

“El Comité de Seguridad Marítima (MSC), órgano técnico superior de la IMO, ha aprobado un marco para un estudio exploratorio de normativa, como trabajo en curso, que incluye definiciones preliminares de MASS y grados de autonomía, así como una metodología para llevar a cabo el estudio y un plan de trabajo.” (International Maritime Organization, 2018)

Además, en la sesión **MSC 102/5/14** (Maritime Safety Committee, 2020) de febrero de 2020 se planteó el desarrollo de medidas reglamentarias provisionales en la Federación de Rusia para elaborar su legislación nacional aplicable a los ensayos y al funcionamiento sucesivo de los MASS, enfocándolo a su posible posterior inclusión en la legislación internacional.

Se realiza la siguiente definición del funcionamiento de los MASS: *“En función del grado de automatización, el funcionamiento de los buques autónomos, lo que incluye la navegación, seguridad y protección del medio marino, se gestionará automáticamente con la supervisión de la tripulación del buque (si hubiese) y de los especialistas designados. El propietario del buque podrá confiar a una compañía con competencias en la navegación de los buques autónomos el funcionamiento de ese buque, si bien la responsabilidad de la seguridad de la gestión del buque seguirá correspondiendo en cualquier caso al propietario.”* Destacando, por tanto, la necesidad del buen control sobre los buques autónomos y sus peligros.

3.1.2 Control de riesgos en los buques autónomos.

Los buques autónomos pueden llegar a generar riesgos para la seguridad entre ellos mismos y también con otros buques tripulados mientras están navegando bajo sus diferentes niveles de automatización. Por ello, se analiza el informe de la EMSA (European Maritime Safety Agency), como ejemplo de estudios relacionados con este tema a tratar, sobre los riesgos en

ciertos casos de los MASS (European Maritime Safety Agency, 2020) en el que se resaltan estas conclusiones:

- La comunicación entre los buques por sí sola no evitará una colisión, pero puede ayudar a evitar que los buques implicados terminen en una situación de riesgo.
- Se debe asegurar que los operadores del MASS sean capaces de reunirse en el puente cuando sea necesario estando equipados para ello con un dispositivo de alarma portátil.
- Se debe garantizar que los altos niveles de automatización no perjudiquen el rendimiento humano porque pueden hacer que los operadores confíen o desconfíen en exceso de las decisiones tomadas por el sistema.

Lo que más se recalca en el análisis es que se debe afianzar que los operadores puedan actuar como una capa adicional de defensa contra las colisiones en los casos en que un MASS realice fallos de navegación, mediante una supervisión activa.

En los siguientes apartados se apuntarán ciertos detalles para tener en cuenta cuando se estudien los buques autónomos y su operación sin riesgos, como los sistemas anticolidión que registrarán sus actuaciones o el cumplimiento del COLREGs para evitar accidentes.

3.2 Sistemas Anticolisión Marítimos (CAS).

El funcionamiento de todo CAS consiste en un sistema que, recoge los datos de varios sensores que detectan la presencia de otros buques a una distancia o área previamente definida, identificando las imágenes y estimando el riesgo, para después emitir en caso de peligro unas alarmas, (sonoras y/o visuales), que ayuden a la toma de decisiones del OOW (Officer Of the Watch), partiendo de realizar la operación con tiempo para reaccionar y así poder evitar una colisión con otros buques.

El sistema anticolidión es uno de los módulos que se pueden incluir dentro del sistema de navegación autónomo que lleve un buque autónomo para controlarlo o ayudarlo en sus maniobras. Los sistemas de navegación autónomos pueden hacer rutas, identificar sondas, peligros... pero, por la parte que le toca, un CAS es el sistema que identifica los peligros para evitar colisiones, independientemente de que pueda tener conexiones con el resto del sistema de navegación a la hora de materializar las maniobras.

En el informe del AAWA (del inglés: Advanced Autonomous Waterborne Applications) (Esa Jokioinen et al., 2016) se explica cómo sería un posible sistema de navegación de los buques autónomos, ver la **Imagen 5**:

“El sistema de navegación autónoma (ANS) constará de diferentes módulos, como un módulo de planificación de rutas (RP), un módulo de conciencia de la situación (SA), un módulo anticolidión (CA) y un módulo de detección del estado del buque (SSD). Cada módulo tendrá su propia tarea y, cuando se combine con el posicionamiento dinámico, el sistema de propulsión y un enlace de datos con el operador, formarán el sistema de navegación autónomo completo. El módulo SSD o de capitán virtual (VC) recoge la información de todos los demás sistemas y decide en qué estado se encuentra el barco en ese momento. En función de los demás sistemas, el VC decide si el buque debe funcionar en modo autónomo, remoto o de seguridad.”

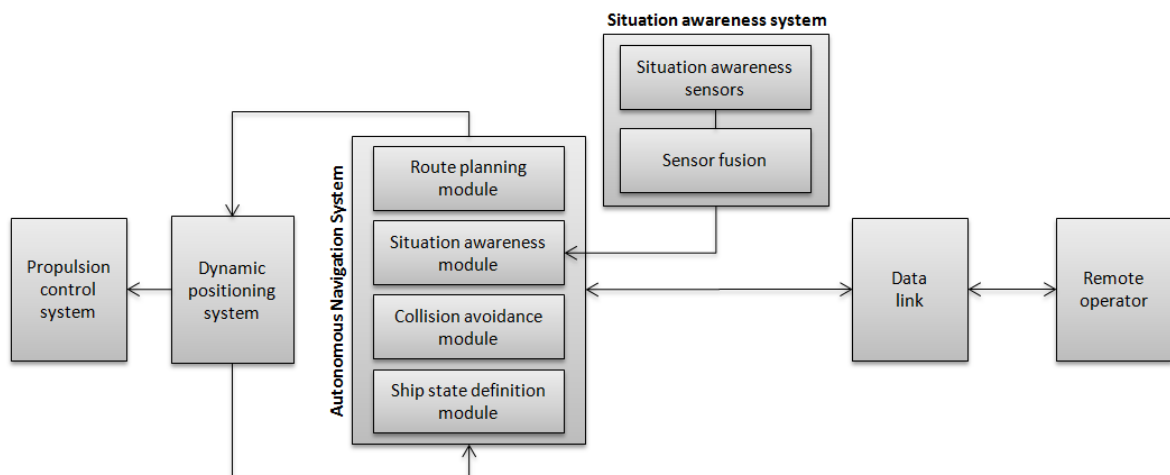


Imagen 5 - Esquema de un Sistema de Navegación Autónomo (ANS). Fuente: AAWA

Éste sería el sistema que podría llegar a controlar totalmente la actuación de un buque autónomo, pero no siempre va a ser un sistema que trabaje totalmente libre, sino que dependería del grado de automatización que se requiere en cada momento:

“El desarrollo de estos sistemas de control es de gran importancia para evitar las colisiones en los buques autónomos. No obstante, el éxito en la prevención de colisiones también puede depender de operadores humanos que trabajen en un centro de control en tierra.” (Abilio Ramos et al., 2019)

Sea como sea el grado de automatización, hay un concepto que es común a todos ellos:

- Los sistemas han de recoger, perfectamente, la normativa (COLREGs) que sigue el resto de los buques en la mar y que conocen los operadores para prevenir abordajes.

Hay muchos más aspectos que estos CAS deben tener en cuenta, por ejemplo, uno de los mayores problemas que generan situaciones de riesgo entre dos buques, ya sean tripulados o no, y que dan lugar a accidentes, es la falta de una buena comunicación entre ellos que ponga en común la información necesaria para una correcta toma de decisiones. En el trabajo de (Argüelles et al., 2019) se destaca la importancia de ese correcto intercambio de información para que el CAS evite confusiones de interpretación de las voluntades del otro.

3.3 Convenio sobre el Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes (COLREGs).

El ya mencionado Convenio sobre el Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes (COLREGs) fue adoptado el 20 de octubre de 1972; aunque su entrada en vigor efectiva fue el 15 de julio de 1977.

Tuvo su origen a raíz de la colisión en 1956 del transatlántico SS Andrea Doria con el MS Stockholm, en donde se puso de manifiesto el gran riesgo de confusión que se puede generar con determinadas maniobras para evitar una colisión. El resultado de este accidente fue el hundimiento de ambos buques en tan sólo 11 horas cerca de Nueva York, causando la pérdida de 51 vidas. (Halpern, 2008). Tras este suceso surge un primer reglamento, el Convenio de 1960, antecesor del actual COLREGs de 1972 y que se analiza en el siguiente apartado.

3.3.1 Evolución del Reglamento de Abordajes.

A principios del siglo XIX aparecieron los barcos de vapor y con ellos surgieron las primeras normas para evitar abordajes. En 1840, la Trinity House de Londres elaboró dos reglamentos para las maniobras en caso de riesgo de colisión entre estos buques. Éstos se combinaron en una sola norma y se incluyeron en la Ley de Navegación de Vapor de 1846 (Porathe, 2019)

El antecesor más próximo al Convenio actual para prevenir abordajes es el COLREGs de 1960 (en inglés: Regulations for Preventing Collisions at Sea 1960 (60 COLREGs)) (International Maritime Organization, 1960), el cual se había adoptado al mismo tiempo que el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en la Mar (SOLAS).

Con el paso de los años, las normas se fueron modificando y aceptando por los Estados miembro, a través de la Organización Marítima Internacional hasta llegar al 72 COLREGs. (International Maritime Organization, n.d.)

“En 1960 el COLREGs fue objeto de tres críticas principales: las reglas eran lentas en evolucionar para responder a las nuevas necesidades de los gobiernos; eran inadecuadas para hacer frente a los encuentros entre varios buques; y no daban instrucciones positivas a los marinos, los cuales tendían a ignorar la letra detallada de las normas y a considerar que la prevención de colisiones no era más que una cuestión de sentido común individual, que no requería necesariamente el cumplimiento de las normas de conducta acordadas para lograr la previsibilidad de las maniobras.” (Plant, 1996)

El COLREGs de 1972, trató de dar respuesta a estos problemas. Los reglamentos fueron completamente reorganizados y redactados de nuevo con un lenguaje más imperativo, además adoptó un procedimiento rápido de modificación para las reglas que tuvieran errores graves, pero sin introducir cambios fundamentales en ellas.

En la Guía de las Reglas del COLREGs (A.N. Cockcroft and J.N.F. Lameijer, 2004) se realiza una comparativa del 60 COLREGs con el 72 COLREGs, aquí se señalan algunos de los cambios más destacables que afectan a este estudio: *“Se hizo evidente la necesidad de una revisión más exhaustiva para tener en cuenta avances como la aceptación y el uso generalizado del radar, la introducción de los dispositivos de separación de tráfico y el aumento del tamaño y velocidad de muchos buques” (A.N. Cockcroft and J.N.F. Lameijer, 2004).*

Analizando y comparando regla por regla de la 1 a la 19 se pueden señalar estos puntos interesantes que se han cambiado y actualizado en el 72 COLREGs con respecto al de 1960:

Regla 1: Ámbito de aplicación: Se enfatiza la necesidad de que los Estados adopten el Reglamento para que no haya proliferación de reglas especiales y para que las autoridades eliminen cualquier diferencia importante con él.

Regla 2: Responsabilidad: La necesidad de una vigilancia adecuada ahora se cubre por separado, con mayor énfasis.

Regla 3. Definiciones generales: Se pasa a considerar los hidroaviones y las naves de vuelo rasante (WIG) como buques, con sus diferentes prioridades. Se aclaran términos como “sin gobierno” y se clasifican los buques de manera más concisa.

Regla 4. Ámbito de aplicación: Se dividen las reglas de navegación en tres secciones según la visibilidad y por primera vez se generan reglas específicas para la velocidad, el uso del

radar y la recomendación de evitar pequeños cambios de rumbo para buques en condiciones de buena visibilidad.

Regla 5. Vigilancia: Se genera una nueva regla específica que obliga a mantener una vigilancia adecuada en todo momento, en vez de dejarlo a la posterior interpretación de los tribunales judiciales.

Regla 6. Velocidad de seguridad: Es una regla nueva y separada, con más importancia, que antes no existía para situaciones de buena visibilidad y que ahora se debe dar en todo momento. Además, se reemplaza el término “velocidad moderada” por “velocidad segura”.

Regla 7. Riesgo de abordaje: La determinación de riesgo de colisión también se contempla en una nueva regla propia, especificando mejor cómo observar si hay riesgo de colisión y pudiendo también comprobarlo desde el radar.

Regla 8. Maniobras para evitar el abordaje: Ahora las acciones para evitar colisiones se deben usar en cualquier condición de visibilidad y tipos de buques. Se impone el requisito de pasar a una distancia segura por primera vez y la de evitar cambios pequeños de rumbo.

Regla 9. Canales angostos: Se aplica a todos los buques y no sólo a los de propulsión mecánica, imponiendo prioridades entre ellos.

Regla 10. Dispositivos de separación del tráfico: Es la regla nueva que se introdujo a través de la IMO sobre las zonas de separación de tráfico marítimo (TSS).

Regla 11. Ámbito de aplicación: Se realizaron cambios para dar mayor compatibilidad entre las reglas para buques a la vista y la regla de visibilidad restringida. El más importante de éstos es que un buque con prioridad ahora puede actuar con antelación cuando los barcos están a la vista.

Regla 12. Buques de vela: Se armoniza con las Reglas Internacionales de Regatas.

Regla 13. Buque que alcanza: Se realizaron enmiendas sobre las prioridades entre buques para definir las mejor.

Regla 14. Situación "de vuelta encontrada": Se simplifica la regla, evitando decisiones judiciales, siendo más concisa y menos limitada. El término “el encuentro se da o casi se da” se reemplaza por “encuentro en rumbos opuestos o casi opuestos”.

Regla 15. Situación "de cruce": Se añade una frase en la que se requiere que el buque que maniobra no le cruce la proa al otro, si las circunstancias lo permiten, para darle más importancia a este aspecto.

Regla 16. Maniobra del buque que "cede el paso": La segunda parte de la Regla 22, que requería que el que cede el paso debe evitar cruzar la proa si las circunstancias lo permiten no se ha mantenido. Esta disposición ahora se aplica solo a embarcaciones de motor ya que hoy en día no es realista realizar una maniobra evitando ese cruce en caso de que uno de motor se cruce con uno de vela.

Regla 17. Maniobra del buque que "sigue a rumbo": Es de los cambios más importantes: se permite actuar antes al buque que sigue rumbo sin que éste tenga que justificar posteriormente que su maniobra se realizó por peligro inmediato, para así evitar que se llegue a puntos extremos de riesgo evitando maniobrar.

Regla 18. Obligaciones entre categorías de buques: Las prioridades entre buques se recogen de manera más clara y en una regla específica.

Regla 19. Conducta de los buques en condiciones de visibilidad reducida: Se aplica ahora también si se está cerca de un lugar con baja visibilidad y se sustituye la palabra "velocidad moderada" por la de "velocidad segura".

Se puede observar que las reglas sobre la velocidad, la vigilancia y la determinación del riesgo de colisión se han enfatizado más en el Reglamento de 1972 al introducir unas reglas separadas que tratan exclusivamente sobre esos aspectos. Además, se le ha dado mucha importancia a la especificación de las prioridades entre buques.

Una gran ayuda para entender cuáles son los aspectos más significativos del Reglamento es conocer cuáles han sido los cambios más importantes que se han implementado en el 72 COLREGs y que se deben tener muy en cuenta a la hora de plasmar este Convenio en un sistema anticolidión.

Toda esta evolución en el tiempo se ha venido realizando debido a las necesidades que se iban generando, por ello ahora, con la nueva generación de buques que se está creando, los buques autónomos, este Convenio deberá actualizarse para acogerlos también en sus reglas.

3.3.2 Cumplimiento del Convenio para Prevenir Abordajes de 1972 por parte de los buques autónomos.

En la última sesión **MSC 103/J/5** de abril de 2021 se tuvo la intención de finalizar el estudio exploratorio reglamentario (RSE) para el uso del MASS. (Maritime Safety Committee, 2021a). En esta reunión se llegó a la conclusión de que ciertos instrumentos de la IMO, que son competencia del MSC, deberán clasificarse como “de alta prioridad”, que sería el grupo de instrumentos que deben abordarse con la máxima prioridad ya que contiene posibles lagunas, donde se incluyó aquí al COLREGs. Existen las cuatro opciones siguientes según la prioridad:

- I: equivalencias según lo previsto en los instrumentos o desarrollar interpretaciones; y/o
- II: modificar los instrumentos existentes; y/o
- III: desarrollar un nuevo instrumento; o
- IV: ninguna de las anteriores.

Se puede observar en la **Tabla 1** que la IMO considera que se deben realizar modificaciones o desarrollar interpretaciones del COLREGs para los MASS de la siguiente manera:

Tabla 1 - Formas de abordar el COLREGs según el grado de autonomía del MASS. Fuente: MSC 103

Instrumentos de la IMO	La forma o formas más adecuadas de abordar las operaciones del MASS			
	Uno	Dos	Tres	Cuatro
COLREGs	I	I - II	II	II

En la **Tabla 2** se definen cuáles serán los futuros estudios en las distintas modificaciones del COLREGs para que los MASS puedan navegar con seguridad según su grado de autonomía.

Tabla 2 - Intenciones de estudio del COLREGs para los MASS. Fuente: MSC 103

Grado de autonomía	La forma más adecuada de abordar las operaciones	Razón por la que se selecciona la forma o formas más adecuadas de abordar las operaciones del MASS	Posibles lagunas/temas que hay que abordar
Grado uno	I	Algunas de las formas en que se llevará a cabo la vigilancia del puente y otras operaciones a bordo del MASS provocarán distorsiones o falta de claridad en el COLREGs . Se espera que el grado uno sea el menos perturbador.	Terminología, luces, formas y señales sonoras, papel del capitán



Grado de autonomía	La forma más adecuada de abordar las operaciones	Razón por la que se selecciona la forma o formas más adecuadas de abordar las operaciones del MASS	Posibles lagunas/temas que hay que abordar
Grado dos	I y/o II	<i>Algunas de las formas en que se llevará a cabo la vigilancia del puente y otras operaciones a bordo del MASS provocarán una distorsión o una falta de claridad en el COLREGs. El grado dos servirá como punto intermedio y dará lugar a que el control se traslade a una ubicación remota, por lo que se considera que las equivalencias o interpretaciones, así como la modificación de los instrumentos existentes, permitirán abordar la necesaria distorsión causada por este nuevo enfoque.</i>	<i>Terminología, luces, formas y señales sonoras, papel del capitán, responsabilidad del operador a distancia</i>
Grado tres	I y/o II	<i>El tercer grado representa el mayor cambio en el transporte marítimo y requerirá las modificaciones necesarias en el COLREGs para adaptarse al futuro transporte marítimo autónomo sin gente de mar a bordo, lo que supondrá una reducción significativa del nivel de interacción humana. Se ha acordado que el COLREGs, en su forma actual, sigue siendo el punto de referencia y debe mantener la mayor parte posible de su contenido actual.</i>	<i>Terminología, luces, formas y señales sonoras, papel del capitán, responsabilidad del operador a distancia, señales de emergencia</i>
Grado cuatro	II	<i>El grado cuatro representa el concepto más futuro en el transporte marítimo y requerirá las modificaciones necesarias del COLREGs para alinearse con el futuro transporte marítimo autónomo como resultado directo de la falta de gente de mar a bordo en cualquier capacidad. Se acuerda que el COLREGs, en su forma actual, sigue siendo el punto de referencia y debe mantener la mayor parte posible de su contenido actual.</i>	<i>Terminología, luces, formas y señales sonoras, papel del capitán, responsabilidad del operador a distancia, señales de emergencia</i>

En estas sesiones se observa la importancia que la IMO le da al COLREGs para estos nuevos buques, en las que en ningún momento se indica que se deba generar un nuevo convenio o usar un nuevo compendio de reglas especiales para ellos.

Los buques autónomos llevarán a bordo sistemas anticolidión (CAS) los cuales deberían cumplir con el COLREGs para poder ser eficientes en caso de riesgo de colisión con otro buque sea cual sea su naturaleza. En la tesis de Sebastian Öhland y Axel Stenman se deduce:

“Nuestras conclusiones son que el cumplimiento del COLREGs no parece ser un gran problema para los buques no tripulados. La mayoría de los expertos coinciden en que el cumplimiento del COLREGs

no es un problema grave y que la responsabilidad en caso de que ocurra algo es un problema más serio. Los buques no tripulados ya han sido probados en algunos proyectos en los que han sido capaces de seguir el Reglamento y navegar con seguridad sin accidentes.” (Axel Stenman and Sebastian Öhland, 2017)

La obligación hacia los buques de cumplir con el Reglamento de Abordajes se encuentra en la primera regla de éste, que establece que todos los buques que naveguen en alta mar o en aguas conexas deben cumplir con el Reglamento.

Por lo tanto, todos los buques que naveguen en las zonas de aplicación que establece el Convenio deberán seguir las reglas de éste. Además, dentro de la jurisdicción nacional, puede haber normas locales además del COLREGs, pero los fundamentos serán los mismos. *“Es difícil argumentar en contra del hecho de que el cumplimiento del COLREGs es un requisito incluso para los buques sin tripulación a bordo”.* (Norris, 2013)

3.3.2.1 Recomendaciones para el Reglamento de Abordajes en su aplicación a los buques autónomos.

Los extractos que se redactan a continuación son recomendaciones o posibles modificaciones futuras de especial interés para la comprensión del COLREGs, pero aún no son reglas de obligado cumplimiento.

MSC 102

En la sesión MSC 102/5/14 (Maritime Safety Committee, 2020) de febrero de 2020, se encuentra el Anexo I de “Recomendaciones para la utilización del Reglamento de Abordajes 1972, en la prevención automática de abordajes entre los MASS” en la que además se exponen escenarios (algoritmos) para la prevención automática de abordajes según las situaciones de posible riesgo.

A continuación, se subrayan algunas recomendaciones destacables:

“2 - Se entenderá por riesgo para la navegación toda restricción en las maniobras del buque para evitar abordajes, como las profundidades, las zonas de separación del tráfico, las vías de circulación y la información recibida del sistema de control del buque a distancia.

*3 - Se entenderá por **“avistarse”** toda situación en la que el sistema de **búsqueda óptica** de los MASS detecte un buque en una distancia de **12 millas como mínimo**.*



4 - El control automático del buque será posible en las aguas exteriores a las zonas portuarias cuya superficie sea suficiente para las maniobras del buque dentro de los límites de todo desvío admisible con respecto a la derrota preestablecida.

5 - En la modalidad de control automático, el buque sigue una derrota preestablecida a menos que haya de evitar algún blanco (otros buques).

6 - Con la modalidad de control automático se admitirá la **prevención de abordajes** entre buques cuando el **número de buques** que sean blancos peligrosos **no sea superior a cinco dentro de un radio de 12 millas** desde la posición del buque.

7 - En la modalidad de control automático se estipularán las zonas siguientes circundantes al buque para prevenir abordajes:

.1 Zona de 12-7 millas de distancia – "zona de valoración de la cobertura y de la situación". En esta zona y en condiciones de visibilidad idóneas se distinguen claramente las luces y/o los ángulos de visión del buque. Ésta es la zona en que se determinan los blancos y los parámetros del movimiento: el rumbo verdadero y la velocidad de los demás buques y los criterios sobre el riesgo: el tiempo previsto para llegar al punto de aproximación máxima (TCPA) y el punto de aproximación máxima (CPA).

.2 Zona de 7-5 millas de distancia – "zona para las decisiones oportunas", en la que se adoptan las decisiones para evitar el abordaje con un buque peligroso a una distancia específica, por ejemplo, calculando un nuevo rumbo y/o velocidad.

.3 Zona de 5-2 millas de distancia – "zona decisoria y de supervisión". Esta zona sirve para realizar las maniobras que eviten el abordaje con el buque que constituye el peligro y vigilar los movimientos del otro buque. En esta zona existe la posibilidad de corregir las maniobras del buque propio, aun cuando el otro buque haya realizado una maniobra contraria peligrosa.

.4 Zona de un máximo de 2 millas de distancia – "zona de proximidad estrecha". Cuando el otro buque amenaza con una aproximación peligrosa en esta zona, el sistema de control automático del buque dirigirá las maniobras del propio buque para evitar abordajes a una distancia que no sea inferior al mínimo admisible.

10 - Cuando, según la evaluación, el blanco no represente ninguna amenaza, el ANS no adoptará ninguna medida de prevención de abordajes.

11 - La prevención automática de abordajes concluye cuando el blanco a evitar supera el recorrido del buque (el ángulo del rumbo excede los 90 grados a babor o estribor) y queda atrás (excepto en el caso en que haya adelantado a nuestro buque). Acto seguido, se produce una maniobra para volver a la derrota inicial.

12 - La prevención automática de abordajes tendrá lugar cuando se produzca una aproximación peligrosa de los **tres tipos de situaciones siguientes**, que se corresponden con el propio sector de encuentro:

- .1 Situación "de vuelta encontrada" – Regla 14 del Reglamento de abordajes;
- .2 Buque que "alcanza" – Regla 13 del Reglamento de abordajes; y
- .3 Situación "de cruce" – Regla 15 del Reglamento de abordajes. En esta situación hay dos opciones, el cruce desde la banda de estribor y el cruce desde la banda de babor.

Según la situación de aproximación, las responsabilidades y medidas de ambos buques serán las especificadas en las reglas 16 y 17 del Reglamento de abordajes.

13 - Por "**visibilidad reducida**" se entiende toda condición en que la visibilidad esté disminuida por niebla, bruma, nieve, fuertes aguaceros, tormentas de arena o cualesquiera otras causas análogas. Las condiciones que determinan la visibilidad reducida son aquellas en que el sistema de búsqueda óptica no detecta ningún blanco indicado con la ayuda de punteo radar automática (ARPA) dentro del alcance de la visibilidad establecido por la altura de la cámara por encima de la superficie del mar. Durante el día un signo más de las condiciones de visibilidad reducida es la ausencia de la línea del horizonte clara que detecta el sistema de búsqueda óptica.

14 - Cuando en la zona de un máximo de 12 millas de distancia se encuentren varios buques que constituyen un peligro, se aplicará el principio de selección del buque más peligroso para prevenir el abordaje.

15 - Se procederá a **supervisar** de manera continua las medidas que adopte cada buque dentro de la modalidad de localización multi-hilos:

- .1 el ANS no empezará a maniobrar cuando el otro buque esté maniobrando;
- .2 cuando se haya empezado a maniobrar y el ANS observe que el otro buque está maniobrando de un modo que impide maniobrar a nuestro buque, el ANS detendrá su maniobra y, si la situación empeora, reducirá la velocidad del buque hasta la mínima necesaria para mantener el rumbo; y
- .3 cuando se haya empezado a maniobrar y el ANS encuentre un buque que no se haya detectado previamente y que pueda impedir a nuestro buque efectuar sus maniobras, el ANS realizará las acciones descritas en el apartado .2.

16 - En las maniobras de prevención de abordajes se tendrán en cuenta los parámetros del buque: eslora, velocidad, elementos de la maniobra, el estado del sistema propulsor y del aparato de gobierno, la velocidad y la dirección del viento.

17 - Cada buque establecerá la **velocidad mínima** por debajo de la cual se pierde el control del buque, aunque el promedio de esta velocidad es de 3 nudos como mínimo. Cada buque determinará su **velocidad máxima** de manera que la distancia en que frena el buque hasta pararse completamente mediante una maniobra de popa rápida a plena carga no sobrepase 15 esloras totales del buque.

18 - El ANS indicará con una señal **la necesidad de cambiar al control manual** (a distancia) en los casos siguientes:

- .1 presencia de más de 5 blancos que constituyen un peligro con los que se pueda producir una aproximación peligrosa a una distancia máxima de 12 millas;
- .2 falta de una solución que permita evitar una aproximación peligrosa; o
- .3 ejecución incorrecta de una maniobra (la derrota real no se corresponde con la derrota preestablecida).

Si el buque no cambia al control manual en los tres minutos siguientes a la señal, el ANS reducirá la velocidad del buque hasta la mínima necesaria para mantener el rumbo y dará la señal "buque sin gobierno".

19 - La zona de seguridad adoptada para prevenir abordajes dependerá de las dimensiones del buque."

Éstas son unas disposiciones iniciales que podrán ser muy eficaces para la implementación del COLREGs en los buques autónomos. Se pueden tener como referencia para conocer cómo evolucionará el Reglamento y de nuevo afirmar que las operaciones de estos nuevos buques no se alejarán del actual Convenio de Abordajes de 1972 sino que seguirán adecuándose a éste.

MSC 103

En una de las últimas reuniones del MSC, la **MSC 103/5/5** (Maritime Safety Committee, 2021b) en marzo de 2021, se observa cómo China destacaba la anotación de España sobre la necesidad de una actualización del 72 COLREGs para los buques autónomos:

"China aprecia en particular los comentarios generales realizados por España durante el primer paso de la RSE, entre otras cosas que: "El COLREGs se adoptó hace casi 50 años (1972). La tecnología ha cambiado mucho desde entonces. Las generaciones actuales de marinos no tienen las mismas necesidades que los antiguos capitanes y oficiales. Las buenas prácticas marineras también han cambiado, porque los barcos no son los mismos."

De esta misma reunión se acentúan estas interpretaciones:



“En un futuro previsible, la mayoría de los buques que operan en el mar seguirán siendo gobernados por gente de mar; por lo tanto, cualquier problema identificado que afecte a las operaciones de los buques gobernados de forma convencional deberá abordarse lo antes posible.

Por otra parte, los problemas que afecten a las operaciones de los buques de gobierno convencional acabarán afectando a los MASS directa o indirectamente, ya que, en el futuro, los buques del MASS y los de gobierno convencional se encontrarán e interactuarán inevitablemente en las mismas aguas y tendrán que tomar medidas anticolidión.” (Maritime Safety Committee, 2021b)

En estos anteriores comentarios se recalca la necesidad de que todos los buques que se encuentren navegando en la mar sigan el mismo Convenio, para poder evitar los abordajes entre ellos.

También se resalta la importancia de que este compendio de regulaciones se actualice a las nuevas generaciones de buques para que así se pueda poner en uso y no resulte ambiguo al ponerlo en práctica debido a la naturaleza tan automatizada de los MASS.

4 Metodología.

Una vez puesta de manifiesto la importancia de que todos los buques que intervienen en una navegación sean capaces de cumplir las normas que procuran evitar colisiones, parece un buen camino el análisis de las posibles soluciones que al respecto ofrecen los diversos trabajos científicos que se están publicando.

Para ello se van a utilizar los resultados de un artículo científico publicado en una revista de alto impacto de primer cuartil del Journal Citation Reports, con la intención de revisar las soluciones propuestas.

En este tipo de artículos se proponen unos algoritmos para controlar unos CAS susceptibles de implantarse en buques MASS, por ello, es interesante analizarlos detalladamente. El COLREGs debería ser de obligado cumplimiento y éstos deberían acogerse a él para garantizar la seguridad de los buques, tanto autónomos como convencionales.

Para ello, primero se realiza una comprensión del Reglamento para después generar la lista de requisitos que se convertirá en la herramienta esencial de este estudio.

4.1 Aplicación del Reglamento de Abordajes de 1972 a los CAS.

En este apartado se identificarán los requerimientos que deben respetar los algoritmos de los CAS, que serán los establecidos en el 72 COLREGs (International Maritime Organization, 1972). Se analizarán las reglas de la 1 a la 19, que son aquellas que rigen las posibles maniobras evasivas para una colisión.

A su vez, las Reglas de Navegación de Estados Unidos (U.S. Department and Of Homeland Security, United States Coast Guard, 1999) señalan cómo otros países pueden tener unas reglas particulares para sus aguas interiores, lo cual también se debería considerar a la hora de realizar un algoritmo para un CAS.

Además de la interpretación de las reglas se generará una guía rápida de las respuestas más correctas a las situaciones que se pretenden analizar, que se materializará en una tabla que se mostrará en el [ANEXO I](#).

4.1.1 Análisis de las reglas.

El 72 COLREGs tiene 41 reglas divididas en cinco secciones:

- Parte A – Generalidades;
- Parte B – Rumbo y Gobierno;
- Parte C - Luces y Marcas;
- Parte D – Señales acústicas y luminosas;
- Parte E – Exenciones.

También consta de cuatro anexos que contienen prescripciones técnicas relativas a las luces y marcas, los aparatos de señales acústicas, las señales adicionales para buques de pesca y las señales internacionales de peligro. A continuación, se analizan las reglas de la 1 a la 19:

PARTE A—GENERALIDADES

REGLA 1 Ámbito de aplicación

En esta regla se identifican aguas en distintos escenarios de la mar:

- Alta mar y aguas navegables que tengan comunicación con ella.
- Posible aplicación de reglas especiales en aguas interiores (según autoridad competente).
- Cuando un Gobierno considera “buque especial” debe adaptarse lo mejor posible al reglamento.
- La IMO podrá adoptar zonas de separación de tráfico marítimo (TSS).

REGLA 2 Responsabilidad

- Se tiene la obligación hacia el capitán, el propietario y la dotación del buque de cumplir con el Reglamento.

En una circunstancia especial (evitar peligro) se puede incumplir el COLREGs, pero no eximir culpa por negligencia.

REGLA 3 Definiciones Generales

Se dan las definiciones y cierta tipología de buques según determinadas características como su capacidad de maniobra.

Se debe destacar para evitar confusiones que, si bien en castellano se utiliza la palabra buque, el término utilizado en inglés es “vessel”, y no “ship”.

En la definición de buque, se incluyen: embarcaciones sin desplazamiento, naves de vuelo rasante e hidroaviones (aeronave proyectada para maniobrar sobre las aguas).

Tipos de buques que recoge la regla:

- Por buque de propulsión mecánica se entiende que es movido por una máquina (velero o no), por otra parte, un buque de vela es el que está navegando exclusivamente a vela.
- Buque de pesca se considera cuando está pescando con "artes" que restringen su maniobrabilidad, pero no se incluye la pesca con curricán.
- Buque sin gobierno es el incapaz de maniobrar según el reglamento y que no puede apartarse de la derrota de otro buque.
- Un buque con capacidad de maniobra restringida es el que no puede apartarse de la derrota de otro por la naturaleza de su trabajo, ejemplos: hidrográfico, dragaminas, oceanográfico, remolcador, portaaviones, operaciones submarinas.
- Buque restringido por su calado: capacidad restringida de apartarse de la derrota de otro.
- Buque en navegación: no se considera en navegación cuando está fondeado, ni amarrado, ni varado.

PARTE B— REGLAS DE RUMBO y GOBIERNO

Sección I—Conducta de los buques en cualquier condición de visibilidad

REGLA 4 Ámbito de aplicación

En esta sección las reglas se aplican en cualquier situación de visibilidad.

REGLA 5 Vigilancia

La vigilancia debe ser visual, auditiva e instrumental.

REGLA 6 Velocidad de seguridad

La velocidad del buque es variable, teniendo que adecuarse a las condiciones reinantes y a las ayudas a la navegación disponibles.

Es la velocidad que permita ejecutar la maniobra adecuada y eficaz para evitar el abordaje y pararse a la distancia que sea apropiada a las circunstancias y condiciones.

Para definirla se tendrán en cuenta:

- Visibilidad
- Densidad del tráfico

- Maniobrabilidad del buque
- Resplandor de las luces de tierra
- Estado del viento, mar y corriente
- Proximidad de peligros para la navegación

Además, en buques con radar se tendrán en cuenta:

- Eficacia del equipo de radar
- Efecto de detección del estado de la mar
- Interferencias al radar
- Posibilidad de no detectar a la distancia adecuada buques pequeños u otros objetos flotantes

REGLA 7 Riesgo de abordaje

Se debe evaluar la situación con todos los medios disponibles. Se utilizarán las ayudas a la navegación, en particular el RADAR, con la precaución debida para evitar suposiciones, producto de una información insuficiente. (ver [Imagen 6](#))

Para determinar si hay riesgo se pueden seguir estas indicaciones:

Existe riesgo si la demora o la marcación del buque que se aproxima:

- No varía de forma apreciable.
- Varía de forma apreciable, pero es:
 - Un buque de gran tamaño
 - Un remolque
 - Se encuentra a distancia muy corta

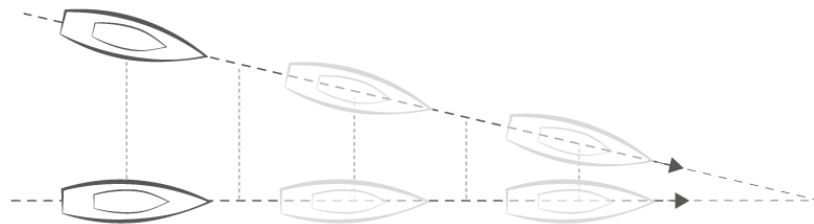


Imagen 6 - Situación riesgo de abordaje. Fuente: aulanautica

(Se puede resumir en que, si la demora no cambia y la distancia se hace menor, existe riesgo).

REGLA 8 Maniobras para evitar el abordaje

Se deben realizar maniobras claras tanto con variaciones amplias de rumbo como variaciones de velocidad. No obstante, se sugieren los cambios de rumbo.

Los buques que “no deben estorbar el tránsito” deben dejar espacio suficiente al otro.

Se debe maniobrar de las siguientes maneras:



- De forma clara: para que lo aprecie el otro buque.
- Con la debida antelación.
- Si es necesario, el buque reducirá o suprimirá toda su arrancada.
- Se debe pasar a una distancia segura.
 - Buques obligados a no estorbar: maniobrar con antelación.
 - Si están muy cerca: el que tiene prioridad debe maniobrar para evitar el abordaje.

REGLA 9 Canales angostos

No existe una definición de "Narrow Channel", lo que complica su aplicación.

En los canales angostos existen prioridades entre buques diferentes a las que se pueden encontrar en alta mar y, además, se hace uso de las siguientes señales fónicas para conocer las intenciones de los buques que naveguen por ellos:

Buque que adelanta:

- "Alcanzo por estribor" 
- "Alcanzo por babor" 

Buque adelantado:

- "Conforme" 
- "No conforme" 

Al acercarse a un recodo sin visibilidad: 

El buque debe mantenerse lo más cerca posible del exterior del canal por el lado de estribor y cuando únicamente sea posible adelantar, el buque que va a ser alcanzado tiene que maniobrar para permitir el adelantamiento con seguridad. También se debe evitar fondear.

Los buques no deben estorbar el tránsito (para así evitar futuras complicaciones y riesgos) según estas prioridades, de menor a mayor prioridad:

- Un pesquero no debe estorbar el tránsito a un velero y/o a un buque de menos de 20m eslora o si es un buque que cruza. Además, éstos no deben estorbar el tránsito a un buque que está navegando con seguridad (la intención es favorecer a los buques de mayor tamaño).

REGLA 10 Dispositivos de separación del tráfico

A diferencia de los “Narrow Channels”, sí existe una definición para TSS en el libro de *Ship Routeing Systems* (International Maritime Organization, 1986)

TSS: “esquema que separa el tráfico que circula en direcciones opuestas o casi opuestas, mediante el uso de una zona o línea de separación, carriles de tráfico, o por otros medios”.

Éstos necesitan estar aprobados por la IMO, y en ellos se debe:

- Navegar en la dirección de tráfico indicada.
- Entrar y salir por los extremos o con el menor ángulo por los límites laterales.
- Cruzar perpendicular.

También se identifican estas zonas: (ver [Imagen 7](#))

- Zona de navegación costera (ITZ): la pueden usar sólo los buques de eslora menor de 20 metros, vela y pesca; se puede usar en ruta a puerto o para evitar peligro.
- Zona de separación: se permite la pesca; se puede usar para evitar peligro y se debe evitar fondear.

Si no se usa el TSS el buque debe mantenerse apartado.

Se tienen las siguientes prioridades:

- Buques que **no deben estorbar el tránsito** (de menor a mayor prioridad): un pesquero no debe estorbar el tránsito a un velero y/o a un buque de menos de 20m eslora. Además, éstos no deben estorbar el tránsito a un buque que está navegando con seguridad.
- Los buques de capacidad restringida dedicados a seguridad o cables submarinos están exentos de las prioridades del TSS.

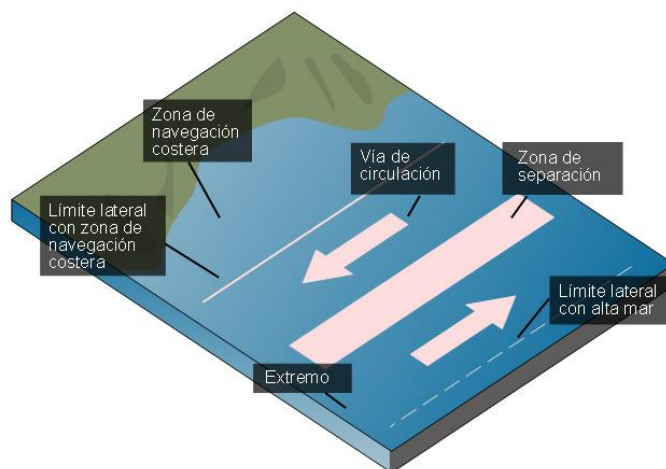


Imagen 7 - Elementos de un TSS. Fuente: *Prácticos de Puerto*. Carlos Salinas

Sección II—Conducta de los buques que se encuentran a la vista uno del otro

REGLA 11 Ámbito de aplicación

En esta sección las reglas se aplican en buques a la vista y se deben incluir también las reglas de la sección I.

- Se establecen unas preferencias de paso claras.
- El buque que cede el paso maniobrá con la antelación suficiente para evitar situaciones peligrosas.

REGLA 12 Buques de vela

Existen normas particulares sobre las prioridades de maniobra entre buques navegando a vela:

- Si reciben el viento por bandas contrarias → se aparta el que lo recibe por babor.
- Si reciben el viento por la misma banda → se aparta el que está a barlovento (más cercano al viento).
- Si un buque recibe el viento por la banda (o costado de babor), y observa un buque a barlovento, pero no está seguro de por qué banda recibe el viento dicho buque, éste debe mantenerse separado.

REGLA 13 Buque que "alcanza"

Tanto en el reglamento en inglés extraído del Coast Guard (U.S. Department and Of Homeland Security, United States Coast Guard, 1999) como en la versión en español, BOE-A-1977-15605 (BOE de las siglas Boletín Oficial del Estado) (Ministro de Asuntos Exteriores de España, 1977) se dice lo siguiente:

“REGLA 13 Buque que alcanza

a) No obstante lo dispuesto en las Reglas de la Parte B, secciones I y II, todo buque que alcance a otro se mantendrá apartado de la derrota del buque alcanzado.”

La parte B se define como *Parte B - Reglas De Rumbo Y Gobierno* y tiene 3 secciones:

Sección I-Conducta de los buques en cualquier condición de visibilidad.

Sección II-Conducta de los buques a la vista.

Sección III-Conducta de los buques en condiciones de visibilidad restringida.

Se puede ver que la regla 13 está implicada en la sección I y en el II.

Al aplicarse a cualquier tipo de visibilidad (sección I), podría entenderse que sí es aplicable en buques no a la vista.

La situación de alcance sirve para todo tipo de buques, no hay prioridades entre ellos, excepto la de que el que alcanza maniobra. (ver [Imagen 8](#))

El que alcanza debe **mantenerse apartado**. Se conoce que es alcance si:

- Se ve al otro buque desde marcación mayor a $22,5^\circ$ a popa del través, de banda a banda.
- El buque que alcanza sólo verá luz de alcance.
- Si hay dudas, se considera que hay alcance.
- Ninguna variación posterior de marcaciones cambiará la situación de alcance a cruce por lo que se debe considerar que hay alcance hasta que se haya terminado la situación de peligro.

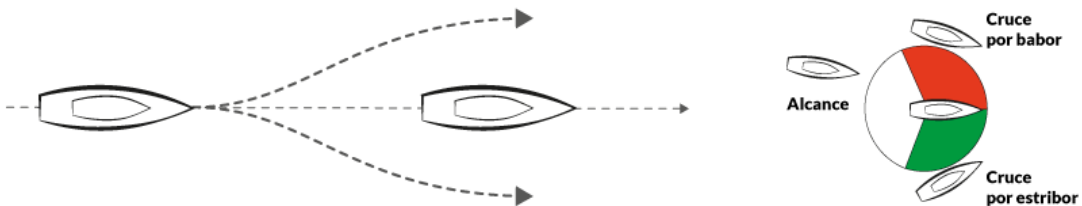


Imagen 8 - Situación de buque que alcanza. Fuente: aulanautica

REGLA 14 Situación de "vuelta encontrada"

En vuelta encontrada ambos caen a estribor. (ver [Imagen 9](#))

Se da esta situación cuando los buques llevan rumbos opuestos o casi (se observan las luces de tope y/o las dos de costado).

- Si hay dudas se considera que se encuentran en vuelta encontrada.
- Sólo se da en buques de propulsión mecánica.

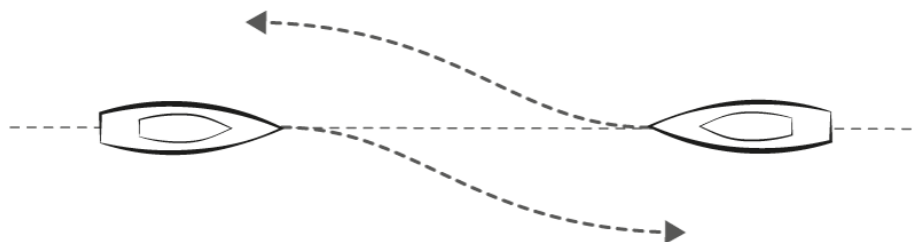


Imagen 9 - Situación de vuelta encontrada. Fuente: aulanautica

REGLA 15 Situación "de cruce"

Sólo se aplica a buques de propulsión mecánica y maniobrará el que esté a babor del otro sin cortar la proa, si es posible. (ver [Imagen 10](#))

El buque debe mantenerse apartado (el que tenga al otro por estribor, siempre que a estribor vea luces rojas ha de ceder el paso).

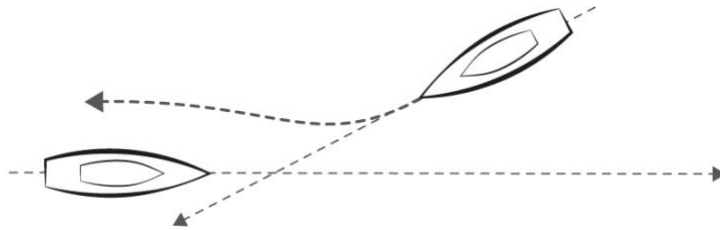


Imagen 10 - Situación de buque que cruza. Fuente: aulanautica

REGLA 16 Maniobra de buque que "cede el paso"

El buque que cede paso debe dar amplio resguardo en su maniobra.

El buque debe mantenerse apartado de la derrota del otro y maniobrar con anticipación y de forma decidida.

REGLA 17 Maniobra del buque que "sigue a rumbo"

Esta regla surge, en cierto modo, cuando no se cumple la anterior.

Si se llega a una situación de acercamiento excesivo, el buque definido como "buque que sigue a rumbo" deberá maniobrar para evitar colisión, aunque en principio tuviera prioridad.

El buque que sigue rumbo mantiene rumbo y velocidad, pero maniobra si el otro no lo hace, o la maniobra del otro no basta.

- El buque no cambiará su rumbo a babor, si las circunstancias lo permiten.

REGLA 18 Obligaciones entre categorías de buques

Excepto canales angostos, TSSs y situaciones de alcance, se tienen prioridades entre buques para tener en cuenta en el resto de las situaciones de alta mar.

- **Deben mantenerse apartados** (abordaje ya manifestado): un buque de propulsión mecánica se mantendrá apartado de un velero, y éstos se mantendrán apartados de un pesquero. En caso de encontrarse con un buque sin gobierno y/u otro con maniobra restringida todos ellos se mantendrán apartados de estos últimos.
- **No estorbar**: todos los buques, excepto los buques sin gobierno o con maniobra restringida, no estorbarán el tránsito de los buques restringidos por su calado.
- **Deben mantenerse alejados** del resto de buques: los hidroaviones, Wing in Ground (WIG), motos acuáticas.

Sección III—Conducta de los buques en condiciones de visibilidad reducida

REGLA 19 Conducta de los buques en condiciones de visibilidad reducida

Existen dos tipos de acciones según se hayan detectado por radar o por señales fónicas y se generan varios tipos de prioridades en caso de detectarse por radar y si es alcance.

Se considera visibilidad reducida: niebla, bruma, fuertes aguaceros, tormentas de arena o causas análogas.

- La noche NO es visibilidad reducida.
- No existen prioridades.

Procedimientos para seguir cuando se está en visibilidad reducida:

1. Tener las máquinas listas en todo momento para poder asegurar una velocidad de seguridad adecuada a la situación.
2. Cumplir con las reglas de la sección I.
3. En caso de riesgo de abordaje detectado sólo por radar:
 - Si se tiene un buque a proa del través → evitar cambio de rumbo a babor, a no ser que esté siendo alcanzado.
 - Si se tiene un buque a popa del través o través → evitar cambio de rumbo hacia él.
4. Al oír una señal acústica a proa del través y si hay riesgo de abordaje se debe:
 - Tener una velocidad mínima de gobierno.
 - Suprimir arrancada (si necesario).
 - Extremar precaución.

4.2 Obtención de la lista de verificación del COLREGs para CAS.

Después de la explicación de los puntos más relevantes del COLREGs y de generar una guía rápida de maniobras según el Convenio que se puede encontrar en el [ANEXO I](#), se genera una lista de requisitos del COLREGs.

La lista de verificación que se muestra a continuación ([Tabla 3](#)) pretende recoger las exigencias de las reglas 1 a 19 del COLREGs. Con ésta se puede realizar un análisis pormenorizado de los artículos científicos que deban ser examinados. Se marcará con un tick si cumple con el requisito y se detallarán las reglas que merezcan ser mencionadas por su cumplimiento o incumplimiento.

Esta lista podría ser necesaria para afirmar que un CAS es efectivo en caso de que cumpla con todos los requisitos de ella, porque si no, indicaría que éste tiene deficiencias en el cumplimiento del COLREGs y podría llegar a generar un incidente.

Tabla 3 - Lista de verificación de COLREGs. Fuente: propia

Regla	Exigencia	Verificación
PARTE A - GENERAL		
1	Se tienen en cuenta las aguas distintas a alta mar .	
2	Se contempla la posibilidad de incumplir el COLREGs para evitar peligro inmediato.	
3	Se diferencian distintas clases de buques .	
PARTE B – REGLAS DE RUMBO Y GOBIERNO		
Sección I – Cualquier condición de visibilidad (4)		
5	Se mantiene vigilancia visual, auditiva e instrumental.	
6	La velocidad de seguridad varía según las condiciones reinantes.	
7	Se determina el riesgo de colisión conociendo los límites del radar.	
8	a) Las maniobras para evitar la colisión son claras y con antelación.	



Regla	Exigencia	Verificación
8	b) Los buques que no deben estorbar el tránsito dan un amplio resguardo .	
9	a) Reconoce canales angostos .	
9	b) Se tienen en cuenta las diferentes prioridades en canales angostos .	
9	c) Uso de señales fónicas para conocer intenciones.	
10	a) Reconoce TSSs .	
10	b) Se tiene en cuenta que existen dispositivos de separación con normas particulares (no IMO) y diferentes a las de esta regla.	
10	c) Se usan los requerimientos de navegación en ITZ y zona de separación .	
10	d) Se tienen en cuenta las diferentes prioridades en los TSS .	
Sección II – Buques a la vista (11)		
12	Se diferencian las prioridades de los buques a vela .	
13	a) Se contempla la situación de ALCANCE según marcaciones.	
13	b) Se prescinde de las prioridades entre buques de la regla 18 en alcance.	
13	c) Se maniobra correctamente según la regla.	
14	a) Se contempla la situación de VUELTA ENCONTRADA .	
14	b) Se tienen en cuenta las prioridades entre buques.	
14	c) Se maniobra correctamente según la regla.	
15	a) Se contempla la situación de CRUCE según marcaciones.	
15	b) Se aplica sólo a los buques de propulsión mecánica .	
15	c) Se maniobra correctamente según la regla.	
16	Los buques que ceden paso dan amplio resguardo.	



Regla	Exigencia	Verificación
17	En caso de acercamiento excesivo , se contempla que el que sigue rumbo debe maniobrar correctamente. (Se aplica en buques a vela y situaciones de alcance y cruce).	
18	Se tienen en cuenta las prioridades entre buques , exceptuando las situaciones ya indicadas.	
Sección III – Buques en visibilidad reducida		
19	a) Se contemplan situaciones en visibilidad reducida .	
19	b) Se distingue entre situaciones reconocidas con o sin radar .	
19	c) Se maniobra según regla.	

4.3 Aplicación de la lista de verificación.

En este apartado se realizará el análisis de un artículo científico publicado en una revista del primer cuartil del Journal Citation Reports para analizar el grado de obediencia hacia las reglas del 72 COLREGs (International Maritime Organization, 1972).

Se aplicará la lista de requisitos que se ha generado para valorar el grado de cumplimiento hacia el COLREGs que tiene su sistema anticollisión y, además, se estudiarán las cinemáticas de las situaciones de riesgo de colisión propuestas por el artículo para conocer en mayor profundidad la correcta aplicación del COLREGs en sus maniobras.

El artículo seleccionado es *“A collision avoidance approach via negotiation protocol for a swarm of USVs”* (Ma et al., 2021), cuyos autores son: Yong Ma, Yujiao Zhao y Yulong Wang de la Escuela de Navegación en la Universidad Tecnológica de Wuhan (Wuhan, China), Atilla Incecik del Departamento de Arquitectura Naval e Ingeniería Marina en la Universidad de Strathclyde (Glasgow, UK), Xinping Yan del Centro Nacional de Investigación de Ingeniería para la Seguridad del Transporte Acuático en la Universidad Tecnológica de Wuhan (Wuhan, China) y Zhixiong Li de la Escuela de Ingeniería en la Universidad Oceánica de China, (Tsingtao, China).

Ha sido escogido por su publicación reciente en una revista de alto impacto y debido a que sus estudios están enfocados hacia la generación de unos sistemas anticolidión para los buques autónomos.

Se ha publicado por la revista Ocean Engineering (Elsevier BV, United Kingdom) de Primer Cuartil (Q1) del Journal Citation Reports, cuyo índice de impacto en el año 2020 es el mostrado en la **Imagen 11**:

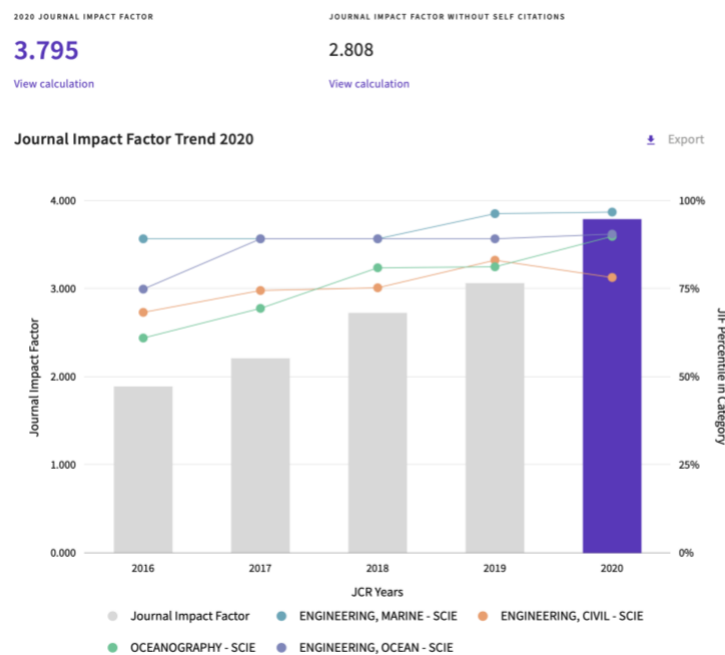


Imagen 11 - Índice de impacto de la revista Ocean Engineering. Fuente: jcr.clarivate (WOS)

Además, en la categoría de “Ocean Engineering” esta revista se encuentra en el segundo puesto del ranking según su factor de impacto, que es el observado en la **Imagen 12**:

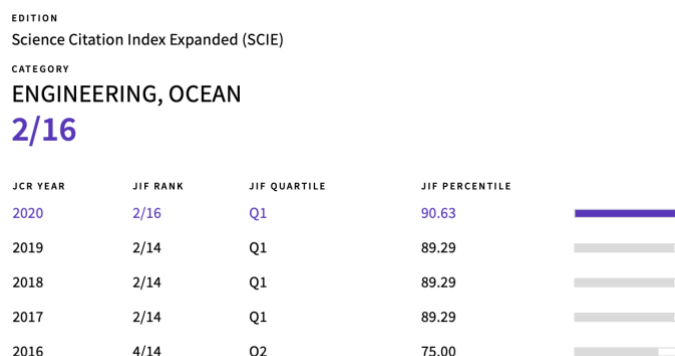


Imagen 12 - Factor de impacto revista Ocean Engineering en la categoría “Ocean Engineering”. Fuente: jcr.clarivate (WOS)



Y en la categoría de “Marine Engineering” se encuentra la primera en el ranking donde tiene el siguiente factor de impacto, **Imagen 13**:

EDITION
Science Citation Index Expanded (SCIE)

CATEGORY
ENGINEERING, MARINE
1/16

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUARTILE	JIF PERCENTILE
2020	1/16	Q1	96.88
2019	1/14	Q1	96.43
2018	2/14	Q1	89.29
2017	2/14	Q1	89.29
2016	2/14	Q1	89.29

Imagen 13 - Factor de impacto revista Ocean Engineering en la categoría “Marine Engineering”. Fuente: jcr.clarivate (WOS)

Como referencia, en la **Imagen 14** se observa la primera página del artículo en cuestión:



Imagen 14 - Primera página del artículo seleccionado. Fuente: (Ma et al., 2021)

Para más detalle se encuentra el enlace al artículo completo en el **ANEXO II**.

En este artículo los autores estudian una comunicación entre buques casi automática para que entre ellos se envíen información y decidan cómo será la maniobra futura. Los investigadores enfatizan que se ha realizado un gran progreso en los CAS para un solo buque autónomo, pero no para la situación de cuando hay más de uno, por ello generan un CAS que funciona cuando se da el encuentro entre varios buques autónomos.

Para demostrar la validez de su sistema anticolidión los autores proponen unas situaciones de riesgo de colisión entre un grupo de buques autónomos, para las que posteriormente aportan ciertas maniobras a seguir con la intención de evitar los abordajes entre ellos. Estas acciones serían generadas por el CAS desarrollado que se encuentra instalado en cada buque autónomo expuesto.

En los apartados siguientes se analizará este sistema y sus decisiones, para comprobar si será seguro para todos los buques que naveguen por la mar, viendo si cumple o no con el COLREGs.

4.3.1 Revisión del cumplimiento de los requisitos.

Con la intención de evitar posibles accidentes, es de gran importancia revisar hasta qué punto el CAS propuesto por este artículo llegaría a ser un peligro para la navegación en caso de que se implementase en futuros MASS. Este nivel nos lo proporciona el conocer su adecuación a las normas del 72 COLREGs.

Se comienza, por lo tanto, con una revisión de los requisitos del COLREGs cumplidos en este artículo siguiendo la lista de verificación creada en este trabajo ([Tabla 4](#)). Se marcará con un tick si en este caso se cumplen.

Tabla 4 - Lista de verificación de COLREGs del primer artículo. Fuente: propia

Regla	Exigencia	Verificación
PARTE A - GENERAL		
1	Se tienen en cuenta las aguas distintas a alta mar.	-
2	Se contempla la posibilidad de incumplir el COLREGs para evitar peligro inmediato.	-
3	Se diferencian distintas clases de buques.	-



Regla	Exigencia	Verificación
PARTE B – REGLAS DE RUMBO Y GOBIERNO		
Sección I – Cualquier condición de visibilidad (4)		
5	Se mantiene vigilancia visual, auditiva e instrumental.	-
6	La velocidad de seguridad varía según las condiciones reinantes.	-
7	Se determina el riesgo de colisión conociendo los límites del radar.	-
8	a) Las maniobras para evitar la colisión son claras y con antelación.	-
8	b) Los buques que no deben estorbar el tránsito dan un amplio resguardo .	-
9	a) Reconoce canales angostos .	-
9	b) Se tienen en cuenta las diferentes prioridades en canales angostos .	-
9	c) Uso de señales fónicas para conocer intenciones.	-
10	a) Reconoce TSSs .	-
10	b) Se tiene en cuenta que existen dispositivos de separación con normas particulares (no IMO) y diferentes a las de esta regla.	-
10	c) Se usan los requerimientos de navegación en ITZ y zona de separación .	-
10	d) Se tienen en cuenta las diferentes prioridades en los TSS .	-
Sección II – Buques a la vista (11)		
12	Se diferencian las prioridades de los buques a vela .	-
13	a) Se contempla la situación de ALCANCE según marcaciones.	<input checked="" type="checkbox"/>



Regla	Exigencia	Verificación
13	b) Se prescinde de las prioridades entre buques de la regla 18 en alcance.	-
13	c) Se maniobra correctamente según la regla.	-
14	a) Se contempla la situación de VUELTA ENCONTRADA .	✓
14	b) Se tienen en cuenta las prioridades entre buques.	-
14	c) Se maniobra correctamente según la regla.	-
15	a) Se contempla la situación de CRUCE según marcaciones.	✓
15	b) Se aplica sólo a los buques de propulsión mecánica.	-
15	c) Se maniobra correctamente según la regla.	-
16	Los buques que ceden paso dan amplio resguardo.	-
17	En caso de acercamiento excesivo , se contempla que el que sigue rumbo debe maniobrar correctamente. (Se aplica en buques a vela y situaciones de alcance y cruce).	-
18	Se tienen en cuenta las prioridades entre buques , exceptuando las situaciones ya indicadas.	-
Sección III – Buques en visibilidad reducida		
19	a) Se contemplan situaciones en visibilidad reducida .	-
19	b) Se distingue entre situaciones reconocidas con o sin radar .	-
19	c) Se maniobra según regla.	-

A continuación, se realiza una explicación más detallada de los hallazgos sobre el cumplimiento o incumplimiento de las reglas del COLREGs en el artículo analizado, una vez aplicada la lista de comprobación creada.

REGLA 1 Ámbito de aplicación

El artículo sólo tiene en cuenta la navegación en “alta mar”, en ningún momento menciona otras aguas distintas, por lo que no cumple con esta regla. En el segundo párrafo de la primera página especifica que usarán “*elementary scenarios*”.

REGLA 2 Responsabilidad

El artículo deja constancia de la no aplicación del COLREGs en el segundo párrafo de la página 2:

“Consequently, we mainly aim at resolving a swarm of USVs’ collision avoidance problem wherein USV maneuverability, navigation rules, obstacles motion characteristics, and cooperation among a swarm of USVs would be followed with interest. Following that, a collision avoidance approach using a negotiation protocol is proposed. To remedy the defects of traditional collision avoidance methods, an on-board negotiation protocol is presented to process collision avoidance under complicated collision situations.”

Con este párrafo los autores dejan especificado que no van a seguir el COLREGs en ciertos momentos debido a que consideran que tiene defectos y que, por lo tanto, van a generar un protocolo de comunicación entre los buques que puedan salirse de esas reglas.

Aseguran que están dando solución a problemas que no recoge el COLREGs:

“It can be observed that, Ref (Benjamin et al., 2006) focused on the collision avoidance between USVs under the framework of COLREGs. Whereas, in this paper, in order to take into account the unspecified collision avoidance in the COLREGs, we tend to design the suitable negotiation protocol for collision avoidance problem of a swarm of USVs.” Y que la comunicación es fundamental para evitar las colisiones.

En esta regla el COLREGs da la posibilidad de apartarse de él sólo en caso de tener que evitar de un peligro inminente y no como norma general como está haciendo este artículo.

REGLA 3 Definiciones Generales

La referencia del incumplimiento de esta regla se encuentra en la [Imagen 15](#) y en la [Imagen 16](#) que son las siguientes imágenes que se encuentran en el artículo:

Type of vessel	Priority of mission
Transport vessel	1
Mapping/surveying vessel	2
Surveillance vessel	3

Imagen 15 - Prioridades entre buques según los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)

Type of vessel	Level of maneuverability
People in kayaks	4
Fishing boats	3
Leisure boats	2
Sailboats	1

Imagen 16 - Niveles de maniobrabilidad de buques según los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)

En ellas se diferencian algunos tipos de “vessels”, (se podrían denominar embarcaciones), pero no como los define el COLREGs, y, además, éstos no se usan para la posterior exposición de situaciones de posible riesgo de colisión entre varios y distintos buques, si no que usarán el mismo único buque en ellas, sin variar sus prioridades o misiones.

Lo que se conoce de los barcos usados en el artículo es que “USVs are equipped with GPS devices, and radio modem communication equipment and power plants, including rear electric propellers and rudder blades.” Y que tendrían la forma de la **Imagen 17**:



Imagen 17 - Buques USVs utilizados en el artículo. Fuente: (Ma et al., 2021)

Podría decirse que son lanchas rápidas o barcos de carreras del estilo de los “Outerlimits Powerboats” y que: “The parameters of the USVs are $L=5m$, $W=2m$. Following that, D_m can be $10m$.”

Por lo que son unas lanchas de 5 metros de eslora y 2 metros de manga, con una distancia mínima de seguridad de 10 metros ya que se afirma lo siguiente: “Similar to Ref. (Zhou et al., 2015), minimum safe distance can be $2L$.” o lo que es lo mismo, 2×5 metros= 10 metros.

REGLA 5 Vigilancia

La referencia al incumplimiento de esta regla se encuentra en el apartado 2.1 en la página 2 ya comentado en la regla anterior: *“Suppose USVs are equipped with GPS devices, and radio modem communication equipment and power plants, including rear electric propellers and rudder blades. All those equipments contribute to autonomous navigation capability of the swarm of USVs in essence. With the aid of equipped devices, each USV gains its longitude and latitude positions (λ , φ) during the navigation period.”* Por lo que estos buques no pueden tener vigilancia visual.

De todas maneras, los buques autónomos solamente podrían mantener una vigilancia instrumental por lo que no podrán mantener otros tipos de vigilancia.

REGLA 6 Velocidad de seguridad

En el artículo no se define una velocidad de seguridad para que los buques puedan ejecutar una maniobra con seguridad o evitar un abordaje, ni se hace mención de que éstos deban determinarla según factores propios y externos. Sólo se determina que esta velocidad puede ser usada para evitar colisiones (página 7) *“The action is divided into the go ahead, turn to starboard, turn to port and speed change.”*

Lo que sí se considera es una distancia de seguridad (página 3): *“Consequently, $S=2A_d$ can be selected as the minimum collision avoidance distance, according to which at least one USV starts to perform collision avoidance activities.”*. Una distancia de seguridad que en la página 9 consideran que es de 0,2 millas náuticas, lo que equivale a unos 370,4 metros: *“And then, corresponding targeted trajectories are demonstrated in Fig. 12(b), and the steering distance A_d maintains around 0.2 nm.”*, pero esta no queda clara ya que en la página 3 se dice *“Similar to Ref. (Zhou et al., 2015), minimum safe distance D_m can be $2L$.”* por lo que la distancia de seguridad sería de 2 veces la eslora, que como es de 5 metros, serán 10 metros, muy diferentes a los 370 metros anteriores, que serían 74 esloras de esas lanchas.

REGLA 7 Riesgo de abordaje

En ningún momento se consideran las posibles limitaciones del radar o de los sistemas electrónicos a la hora de fiarse de si un buque está acercándose con riesgo de colisión. Además, se maniobra a buques que son seguros como se verá en el siguiente apartado

(**Análisis cinemático de las situaciones de riesgo de colisión.**), por lo tanto, no están determinando correctamente el riesgo de abordaje.

REGLA 8 Maniobras para evitar el abordaje

La referencia del incumplimiento de la primera parte de esta regla, acerca de si se maniobra de forma clara y con antelación, se encuentra en las figuras 13, 14 y 15 del artículo (**ANEXO II.**) En algunas de estas situaciones se considera que se llega a situaciones de acercamiento extremo ya que sus CPA y TCPA son demasiado pequeños como se observará en el siguiente apartado (**Análisis cinemático de las situaciones de riesgo de colisión.**) y debido a la distancia de alcance de la lancha es casi imposible poder maniobrarlos.

Si el artículo quisiera considerar estas situaciones tan extremas para dar visibilidad de la calidad y eficiencia de la actuación de su CAS debería apuntarlo en su trabajo.

La otra parte de la regla, en la que se definen los buques que no deben estorbar el tránsito, tampoco se contempla ya que el artículo no considera que existan buques que “no deban estorbar el tránsito”, sino sólo que se debe ceder el paso a buques grandes o en emergencia. (ver regla 18).

REGLA 9 Canales angostos

No se consideran los canales angostos.

REGLA 10 Dispositivos de separación del tráfico

No se reconocen los dispositivos de separación de tráfico.

REGLA 12 Buques de vela

En el artículo sólo se les aporta un nivel de maniobrabilidad 1 a los buques de vela (ver **Imagen 16**), lo que les daría preferencia con otros buques, pero no se tiene en cuenta cómo maniobrar entre ellos, por lo tanto, no cumple con esta regla del COLREGs.

REGLA 13 Buque que "alcanza"

El artículo cumple con una sola parte de la regla en la que se especifican las marcaciones hasta las que se considera “alcance” y que se pueden observar en la **Imagen 18**.

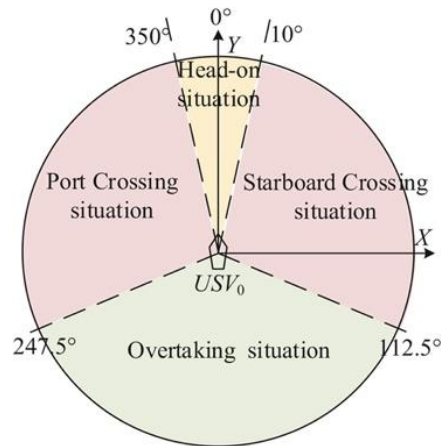


Imagen 18 - Situaciones de riesgo según marcaciones diseñada por los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)

Para destacar el incumplimiento de la otra parte de la regla 13 se debe comentar que en la única situación del artículo en la que se encuentra una situación de alcance, que se comentará con más detalle en el [Análisis cinemático de las situaciones de riesgo de colisión.](#), el buque alcanzado (USV1), en vez de seguir rumbo, o caer a estribor al tener una vuelta encontrada en la proa y otro buque (USV5) por su estribor, éste cae a babor, incumpliendo por tanto la regla.

REGLA 14 Situación de "vuelta encontrada"

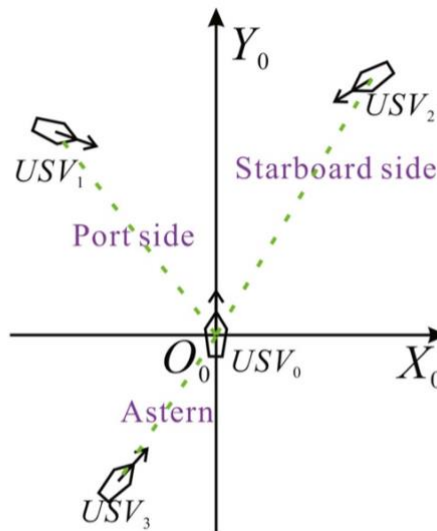
Se determina el incumplimiento de esta regla en varias ocasiones como se observará en el [Análisis cinemático de las situaciones de riesgo de colisión.](#) en la en la que los USVs maniobran cayendo a babor cortándole la proa al USV al que deben maniobrar, en vez de caer a estribor como indica el COLREGs.

REGLA 15 Situación "de cruce"

El artículo tampoco considera correctamente la situación de cruce, como ejemplo se puede ver que en el segundo párrafo del apartado 3.3 se dice que el buque USV0 de la figura 10 ([Imagen 19](#)) debe maniobrar al USV1, el cual está en su babor, cayendo el USV0 a babor, lo cual es un error ya que con un buque a babor se debe seguir a rumbo, aún así los autores reflejan que el COLREGs obliga a caer a estribor, lo cual tampoco es cierto:

"Referring to the navigation state in Fig. 10(b), there are four USVs including USV0, USV1, USV2 and USV3. After that, USV0 initiates a negotiation request to the surrounding USVs and construct a star

topology network. According to the COLREGs, USV₀ should turn to starboard to avoid collision with USV₁, whereas it should turn to port to avoid USV₁ based on the grouping strategy.”



(b) Negotiation initiator builds a negotiation network.

Imagen 19 - Acciones de los buques según una negociación propuesta por los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)

Además, se observará en el **Análisis cinemático de las situaciones de riesgo de colisión**, en ciertas ocasiones los USV maniobran cortándole la proa al buque del que deben mantenerse apartados.

REGLA 16 Maniobra de buque que "cede el paso"

Los buques que deberían ceder el paso en las situaciones propuestas por el artículo no lo hacen con la anticipación suficiente como se podrá comprobar en el apartado siguiente. Hay USVs que comienzan las maniobras en situaciones de peligro inmediato y se considera que no habrían llegado ahí si hubieran maniobrado con anticipación suficiente.

REGLA 17 Maniobra del buque que "sigue a rumbo"

No se cumple con esta regla ya que en los momentos en los que un buque ha tenido que seguir a rumbo no lo ha hecho, como se comprobará en el análisis de las situaciones siguiente. Además, no se contempla que un USV maniobre si es el de preferencia, en caso de que el otro no realice su maniobra.

REGLA 18 Obligaciones entre categorías de buques

Esta regla se incumple por el artículo ya que no se generan las prioridades entre buques tal y como lo especifica el COLREGs. Aunque se tenga en cuenta la prioridad de misión, que lo que quiere decir es que prioriza el destino, es decir, el próximo “way point” para cumplir el trayecto que tiene que hacer, o el nivel de maniobrabilidad, como se observa en la **Imagen 20**, no se generan unas prioridades iguales a las del COLREGs:

ID	Value
Ask-one	Header
: sender	Sender MMSI
: receiver	Receiver MMSI
: message-id	Message id
: state	Negotiation status
: mission	Priority of mission
: maneuverability	Level of Maneuverability
: timestamp	Timestamp of message
: schedule	{ P_t } Plan collection sequence

Imagen 20 - Datos recibidos inicialmente por un USV de otro según el artículo. Fuente: (Ma et al., 2021)

Las únicas prioridades que menciona el artículo son que se debe ceder el paso a buques en emergencia, a buques tradicionales y a buques grandes: “In general, USVs and small-scale vessels have better maneuverability than manned ships and large-scale vessels. Following that, when it comes to the encounter situation, the ordinary vessels should yield to the vessels with emergency missions, the USVs should yield to the manned ships, and small-scale vessels should yield to large-scale vessels.” Ver **Imagen 15** e **Imagen 16** para observar los niveles de prioridad y misión que se proponen.

Esta manera de discernir la prioridad de otro buque es sólo para reconocer si se debe maniobrar a ese buque antes que a otro o no, y por ello no se consigue del todo llegar a la precisión de distintos tipos de prioridades entre buques que requiere el COLREGs.

De todas formas, no se contemplan estas prioridades en los estudios de situaciones de posible riesgo de colisión del artículo, si no que se usan los mismos tipos de USVs para esos cálculos.

REGLA 19 Conducta de los buques en condiciones de visibilidad reducida

No se tiene en cuenta la posibilidad de que, en caso de visibilidad reducida, se modifique el comportamiento de los buques.

4.3.2 Análisis cinemático de las situaciones de riesgo de colisión.

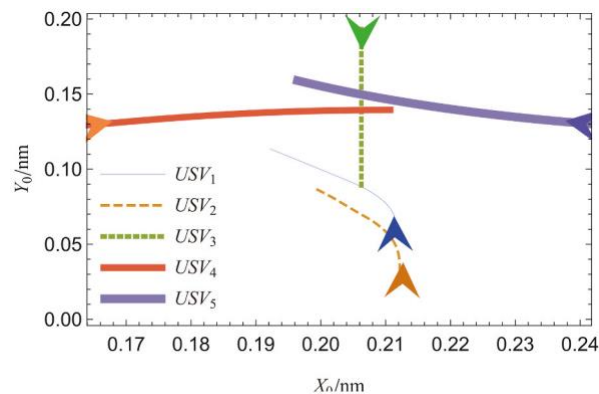
A continuación, se realiza un análisis de las situaciones que plantea el artículo sobre movimientos en enjambre de USVs. La metodología consistirá en:

- Analizar la situación de salida, para identificar la peligrosidad de los encuentros entre USVs,
- Sopesar, según COLREGs, las maniobras aconsejadas,
- Identificar las maniobras propuestas en el trabajo, y
- Discutir dichas maniobras para obtener unas conclusiones.

Para ello se utilizará el programa de dibujo AUTOCAD, que permite una buena visualización de todos los pasos anteriores.

4.3.2.1 *Primera situación:*

Datos iniciales propuestos por el artículo ([Imagen 21](#)):

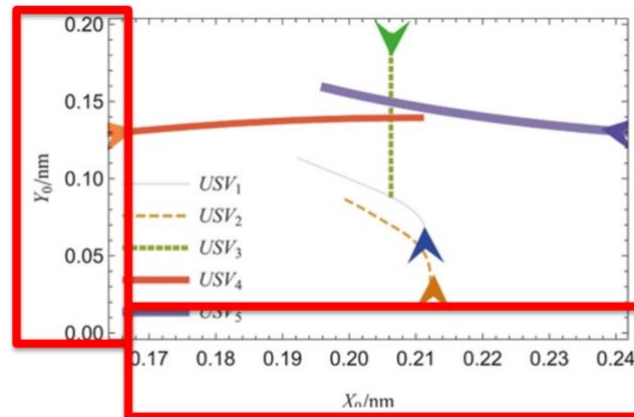


Initial parameters of 5 USVs in ([Tam and Bucknall, 2013](#)).

USV_i	$(P_{xi}, P_{yi})/nm$	C_i °	V_i/kn
USV_1	(0.21,0.05)	0	10
USV_2	(0.21,0.02)	0	30
USV_3	(0.20,0.19)	180	20
USV_4	(0.10,0.12)	90	20
USV_5	(0.29,0.12)	270	20

Imagen 21 - Situación inicial de los USVs y tabla de datos iniciales. Fuente: (Ma et al., 2021)

Se debe tener en cuenta que la escala mostrada en el trabajo evidencia una incoherencia entre la escala para el eje Y_0 y la que se presenta en el eje X_0 , [Imagen 22](#):



(a) Avoidance trajectories of a swarm of USVs for Period (1-55s).

Imagen 22 – Se muestran las escalas del eje X e Y. Fuente: propia

Además, existe otra incongruencia entre los datos de la tabla y los que se pueden observar en el esquema de la izquierda (Imagen 23).

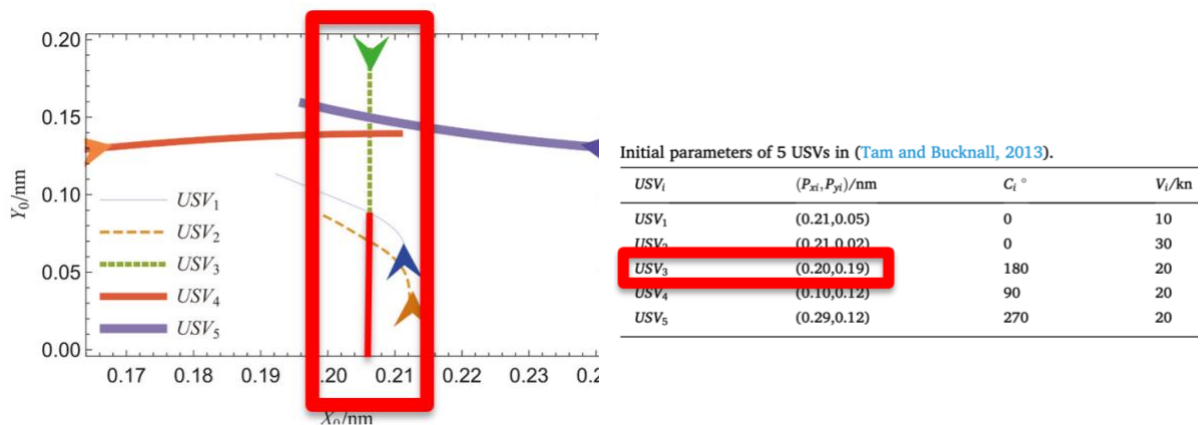


Imagen 23 - Error de posicionamiento del buque USV3. Fuente: propia

Por ejemplo, para el USV3, a la posición de salida se le otorga un valor de ordenada “X_o” de 0,20. En el esquema del dibujo se le adjudica un valor de 0,206.

Pero no es el único fallo, casi todos los ecos están desplazados de los datos que deberían de tener en su posición de salida. A continuación, se muestra una comparativa entre los datos reales (Imagen 24) y los que respetarían los propuestos en la tabla (Imagen 25).

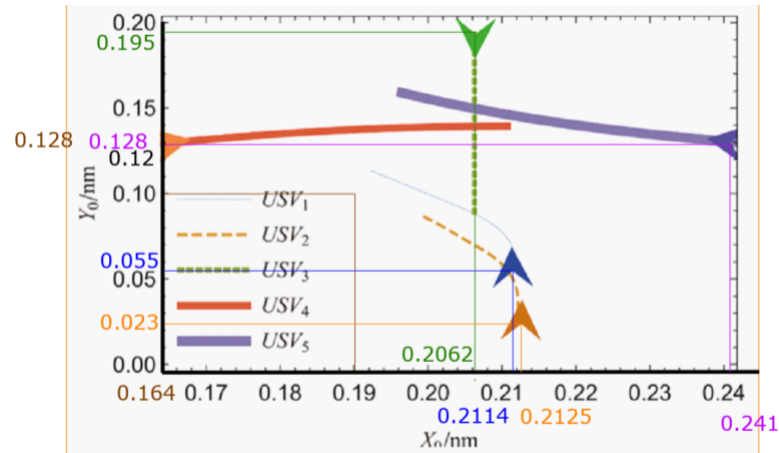


Imagen 24 - Error de posicionamiento de los USVs (datos en el artículo). Fuente: propia

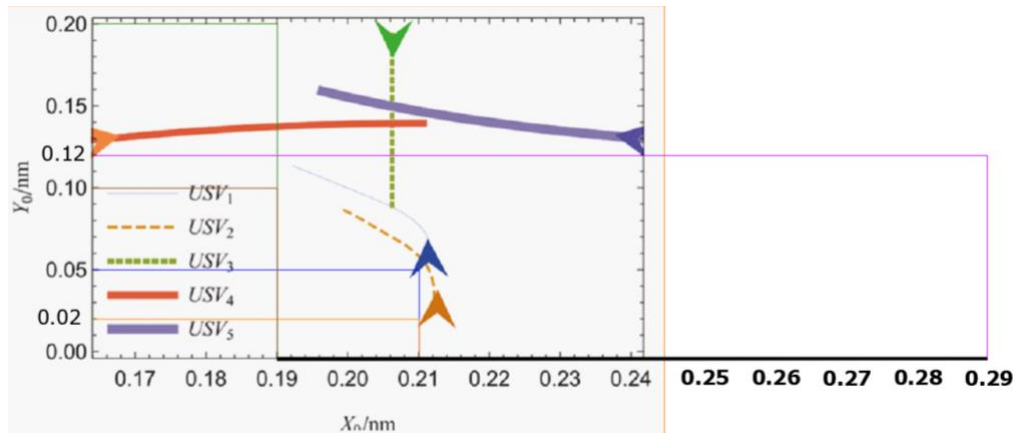


Imagen 25 - Error de posicionamiento de los USVs (datos respetando la tabla). Fuente: propia

El más evidente es el error de la posición del **USV3**.

Este hecho es difícil de entender en publicaciones de este nivel, ya que se exigiría un exacto posicionamiento del buque para un correcto análisis de los resultados y las discusiones.

Ante la duda, se ha optado por tener en cuenta los valores del esquema del dibujo, que es donde se desarrollan las maniobras. Se supone que, en teoría, sería la fuente más fiable. También se ha decidido utilizar una escala coherente en ambas coordenadas.

Llegados a este punto del análisis se hace necesario revisar los datos originales a los que hacen referencia Young Ma, Yujiao Zhao y Yulong Wang. Para ello se realiza un breve estudio de la situación propuesta en el artículo “Cooperative path planning algorithm for marine



Surface vessels”, de los autores C. K, Tam and R. Bucknall ambos pertenecientes al Departamento de Ingeniería Mecánica del University College of London (Tam and Bucknall, 2013). Se adjunta la **Imagen 26** que muestra la primera página del trabajo cuyo enlace al artículo completo se encuentra en el **ANEXO III**.

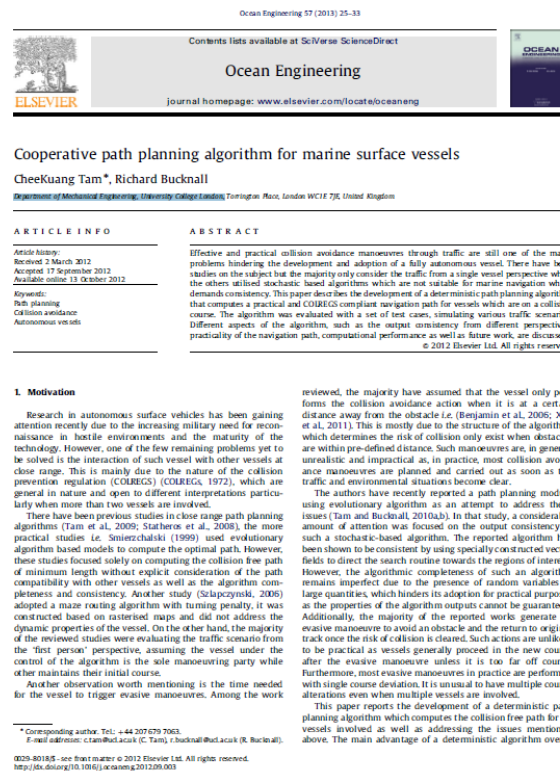


Imagen 26 - Primera página del artículo. Fuente: (Tam and Bucknall, 2013)

Se puede observar que es un trabajo que ha sido publicado en la misma revista que el analizado, por lo que también tiene un nivel de impacto Q1.

De la lectura de este se puede comprobar como la situación que se referencia sí que tiene algo que ver en la filosofía, pero es muy distinta en cuanto a su materialización.

La idea original, que describen Tam and Bucknall es la siguiente: “*The next traffic scenario for discussion is a complex configuration that involves multiple vessels. The initial conditions of the traffic are shown in Fig. 8a, it involves all types of encounters listed in COLREGS i.e. all vessels are involved in a head on and crossing encounter with at least one vessel, while vessel 2 is also overtaking vessel 1. Table 4 shows the parameters adopted for the traffic including the different manoeuvrability characteristics of each vessel; these values are arbitrarily chosen in order to highlight the algorithm’s ability to process the traffic appropriately.*”

En este caso se tendrá la siguiente configuración, **Imagen 27**:

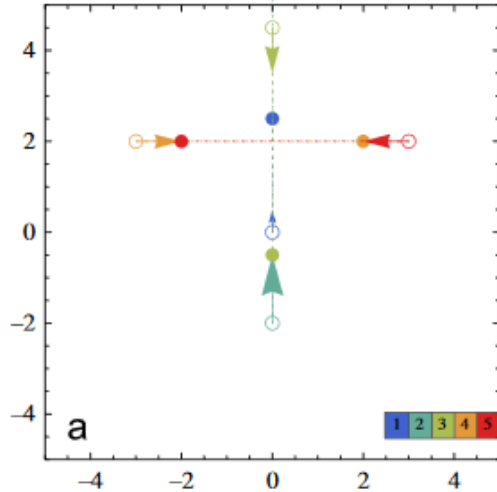


Table 4
Initial velocity (from vessel 1's perspective) and manoeuvrability characteristics of each vessel.

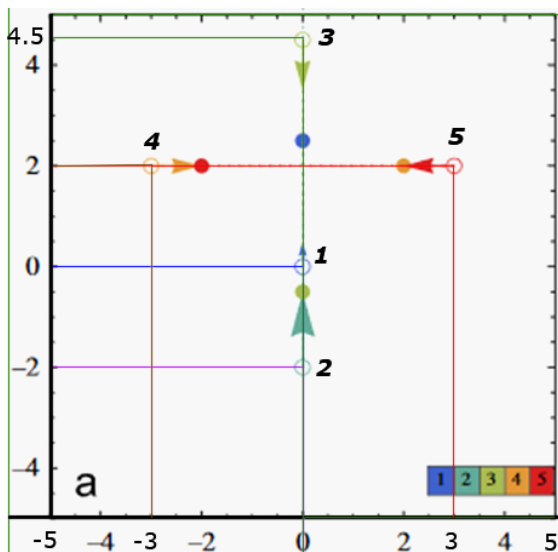
Vessel	Initial velocity (kt)	Turning radius (m)	Stopping distance (m)
1	{0,10}	150	410
2	{0,30}	130	390
3	{0,-20}	120	380
4	{20,0}	90	300
5	{-20,0}	180	330

Imagen 27 - Situación inicial de los USVs y tabla de datos iniciales. Fuente: (Tam and Bucknall, 2013)

Para analizar la situación de salida, se ha de tener en cuenta lo afirmado por los autores:

“Note that the scales on all figures in this manuscript are in nautical miles unless otherwise stated” (apartado 3.1).

A continuación, se muestra el esquema de la situación de salida propuesta con las coordenadas obtenidas del esquema, así como la situación, en demoras y distancias, que visualiza el USV1, **Imagen 28**:



USV	COORDENADAS DE SALIDA (X,Y)
1	(0,0)
2	(0,-2)
3	(0,4.5)
4	(-3,2)
5	(3,2)

SITUACIÓN INICIAL DESDE USV1		
	Demora (en grados)	Distancia (en millas)
USV2	180°	2'
USV3	000°	4.5'
USV4	304°	3,6'
USV5	056°	3,6'

Imagen 28 - Situación de salida de los USVs y tabla de datos del USV1. Fuente: propia

Haciendo inventario de la situación se tiene lo siguiente, **Tabla 5**:

Tabla 5 - Situación de salida de los USVs. Fuente: propia

	Posición de salida	Rumbo	Velocidad
USV1	(0,0)	000°	10 n
USV2	(0, -2)	000°	30 n
USV3	(0, 4.5)	180°	20 n
USV4	(-3,2)	090°	20 n
USV5	(3,2)	270°	20 n

Analizando la situación desde el **USV1** se tienen los siguientes encuentros:

- Con el **USV2**, **Imagen 29**:

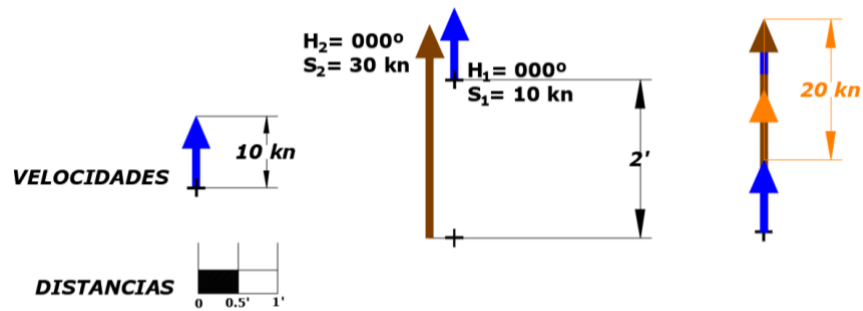


Imagen 29 - Encuentro del USV1 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD

- Con el **USV3**, **Imagen 30**:

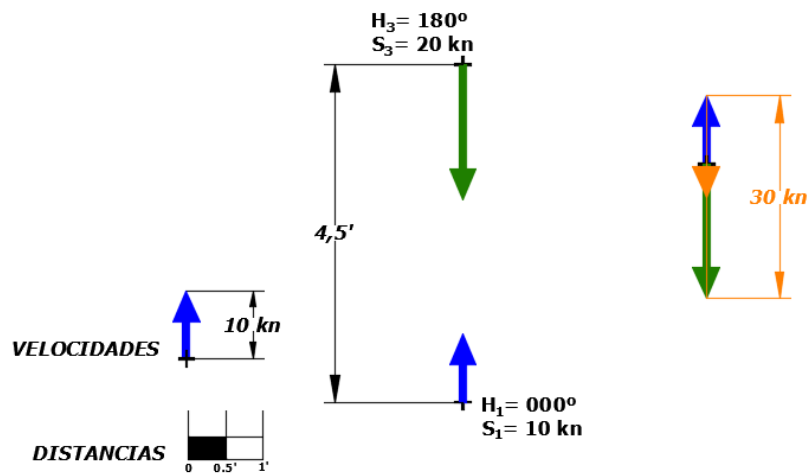


Imagen 30 - Encuentro del USV1 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD

- Con el **USV4**, **Imagen 31**:

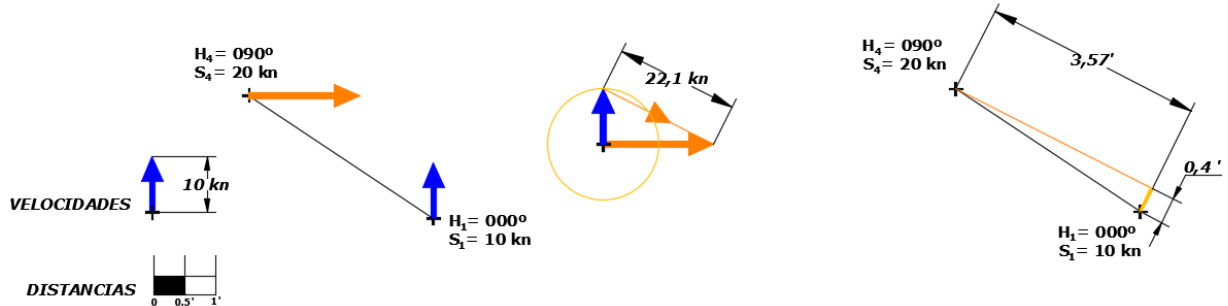


Imagen 31 - Encuentro del USV1 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD

- Con el **USV5**, **Imagen 32**:

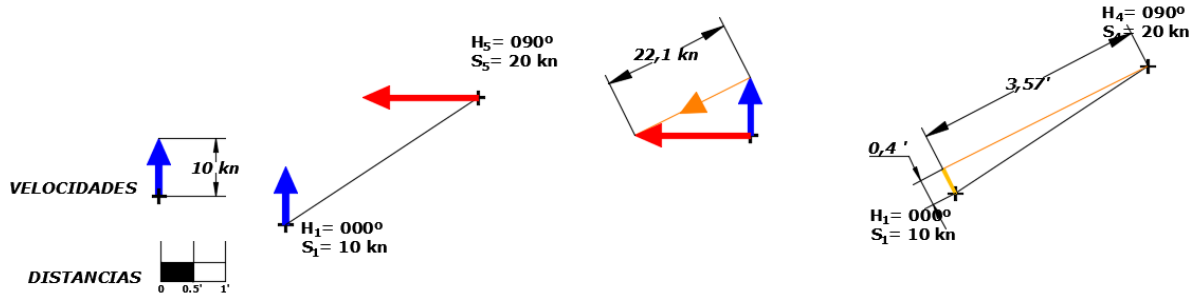


Imagen 32 - Encuentro del USV1 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD

El resumen de los encuentros es el siguiente, **Tabla 6**:

Tabla 6 - Resumen de los encuentros del USV1. Fuente: propia

VESSEL (USV1)	CPA millas/(metros)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV1	2ª ACCIÓN DEL USV1
USV2	0' / 0 m	6 s	COLISIÓN	SIGUE RUMBO	MANIOBRA
USV3	0' / 0 m	9 s	COLISIÓN	CAER A ER	MANIOBRA
USV4	0,4' (741 m)	10 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV5	0,4' (741 m)	10 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

Respecto a la distancia de seguridad, se fija en función de unos coeficientes que no están muy definidos en el trabajo. En el apartado 2.2.1 "Risk of collision", se dice:

*"The variable **min_safe_distance** is aglobal predefined value, which specified a **mínimum allowable distance between vessels**. The variables **dwi** and **dwj** are **corrective weighting coefficients computed using the characteristics from vessel i and j** (i.e. manoeuvrability and ship length), which reconfigures the magnitude of safety distance to suits the vessel types. The computation of collision avoidance manoeuvre is explained in the next section"*

Parece que se concreta algo más en el apartado 3.1, cuando se dice:

*“It is worth pointing out that the gaps between vessel sin Fig. 9 may seen small in appearance, but the scale of the plot is in nautical miles, such that the distance between the path of vessels 1 and 2 is **around 100 m**. This is similar to the magnitude of the variable **min_safe_distance** used in the simulations, which is deemed to have sufficient spatial clearance between the vessels after allowing the discrepancies in the ship bound positioning system. The simulations were conducted with the variables **dw1 =dw2=1**, therefore the out put satisfied the safety constraints assigned during the initialization of the algorithm.”*

Los autores definen la situación tal como muestran en su tabla 5, **Imagen 33**:

Table 5
Priority of each vessel and characteristics of the avoidance manoeuvres for the complex traffic configuration.

Vessel	1	2	3	4	5	Vessel	Give way to	Turning angle (°)	Extension (m)
1	NA	SO	SO	SO	GW	5	{}	0	0
2	GW	NA	SO	SO	GW	1	{5}	30	150
3	GW	GW	NA	SO	GW	2	{1,5}	30	0
4	GW	GW	GW	NA	GW	3	{1,2,5}	30	450
5	SO	SO	SO	SO	NA	4	{1,2,3,5}	30	150

Imagen 33 - Situaciones de los buques según los autores. Fuente: (Tam and Bucknall, 2013)

Los acrónimos aplicados son: No es Aplicable (NA), Buque que cede el paso (Give Way-GW) y buque con prioridad o que mantiene el movimiento (Stand On-SO). Lamentablemente no se entiende el porqué se utiliza la expresión “Stay On” en el trabajo, por ejemplo, en el apartado 2.2.1 o en la tabla 1, que se muestra en la **Imagen 34**.

Table 1
Interpretation of COLREGS rules adopted in algorithm for a traffic configuration with two vessels, using vessel 1 as the reference datum.

Encounter type	Vessel 1 (Datum)	Vessel 2
Head on	Give way	Give way
Crossing (give way)	Give way	Stay on
Crossing (stay on)	Stay on	Give way
Overtaking	Give way (if faster)	Stay on
Overtaking	Stay on (if slower)	Give way

Imagen 34 - Interpretación de las reglas del COLREGs según los autores. Fuente: (Tam and Bucknall, 2013)

Como se puede comprobar, los encuentros entre el USV1 y los otros buques aparecen como peligrosos, y por tanto se necesitaría gobernar, incluso en el caso del USV4 y el USV5, cuando, y según los datos facilitados en el trabajo, se pasaría a una distancia muy superior a la que se entiende como mínima de seguridad. Por lo tanto, se podría decir que la fuente de los datos del artículo a analizar tampoco es fiable.

Continuando con la **primera situación del artículo** de (Ma et al., 2021). Se comienza dando la situación inicial de los USVs (**Imagen 35**):

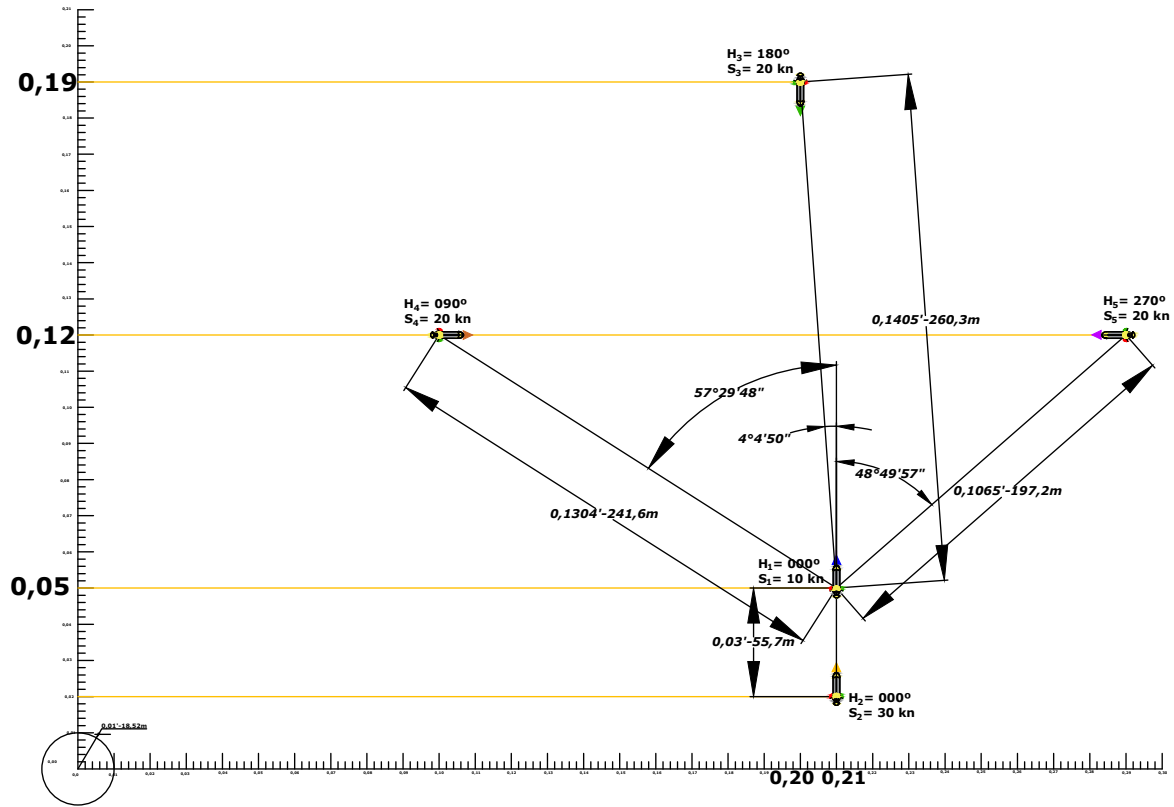


Imagen 35 – Primera situación inicial de los USVs. Fuente: propia, AutoCAD

Partiendo de estos datos, se tendría la siguiente configuración vectorial de los movimientos de todos los USV, **Imagen 36**:

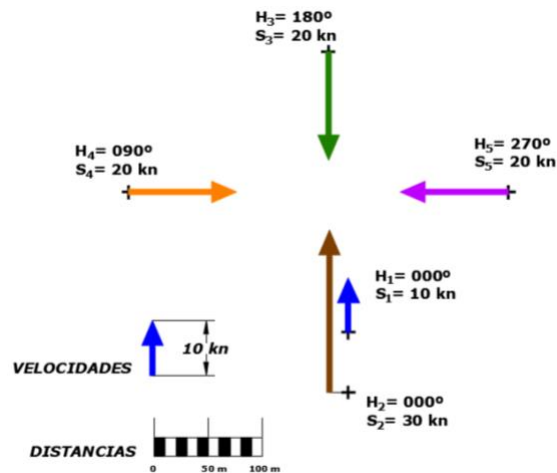


Imagen 36 - Configuración vectorial de los movimientos de los USV. Fuente: propia, AutoCAD

Teniendo lo anterior en cuenta, los movimientos de los USV quedan caracterizados por su rumbo (*heading* - H) y su velocidad (*speed* - S) y el indicativo numeral de cada USV. En el caso del USV2, cuyo vector de movimiento pasa por la situación de salida del USV1, se muestra su movimiento un poco desplazado a la izquierda. Además, las escalas utilizadas son las mostradas en la figura. Tal como dicen los autores, se considera que las fuerzas perturbadoras serían nulas: viento, corriente, olas, etc.

A continuación, se analizarán los tipos de encuentros, comenzando por los del **USV1**. El primero considerado es con el **USV2**, **Imagen 37**:

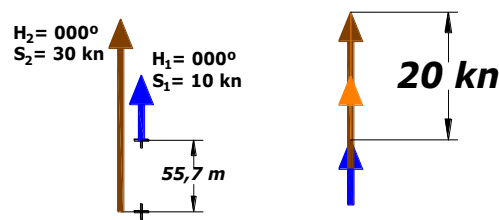


Imagen 37 - Encuentro del USV1 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD

- El resultado es un movimiento relativo de colisión, es decir, la mínima distancia de paso, (CPA) es 0, **CPA=0**.
- Ese movimiento relativo de colisión tiene un Rumbo Relativo Norte y una velocidad de 20 nudos, o lo que es lo mismo unos 10,3 metros por segundo.
- Con esa velocidad, la colisión tendría **un tiempo de colisión, (en este caso), de 5,4 segundos (TCPA=5,4')** Lo que no parece mucho tiempo para evitarla.

La situación siguiente es la que se genera con el **USV3**, se tienen estos datos, **Imagen 38**:

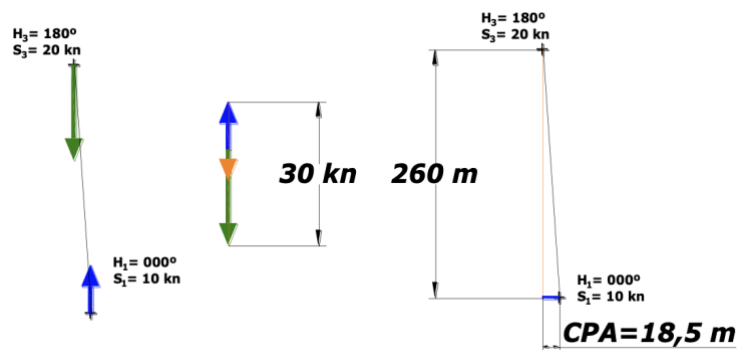


Imagen 38 - Encuentro del USV1 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD

- Se obtiene un movimiento relativo de aproximación con Rumbo Relativo 180° y velocidad relativa de 30 nudos, o de 15,4 m/s.
- No se tiene una situación de colisión, ya que el **CPA= 18,5** metros y un **TCPA = 18,9 s**. Como se puede comprobar, la distancia de paso es superior a la distancia de seguridad propuesta de dos esloras = 10 metros.

En el caso del **USV4**, se tienen los siguientes datos, **Imagen 39**:

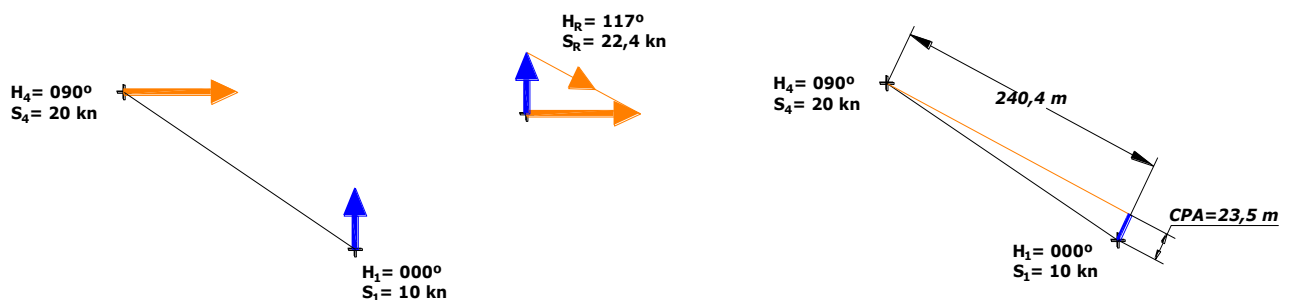


Imagen 39 - Encuentro del USV1 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD

- Como se puede comprobar, el **CPA = 23,5** metros, superior a la distancia de seguridad, y el **TCPA= 20,9** segundos, al tener una velocidad relativa de 11,5 m/s.

Para terminar, se estudia la situación con el **USV5**, **Imagen 40**:

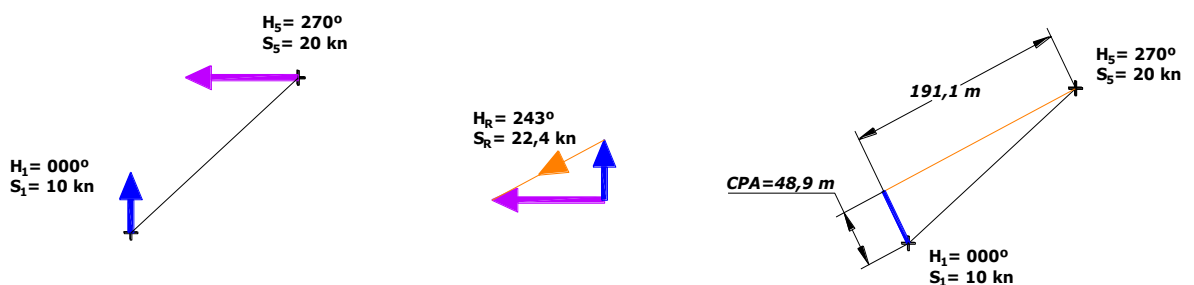


Imagen 40 - Encuentro del USV1 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD

- Tiene un **CPA= 48,9** metros, muy superior a la distancia de seguridad establecida, tendría un **TCPA=16,6 segundos**, teniendo en cuenta que la velocidad relativa es de 11,5 m/s.

Como resumen de los encuentros de USV1, se obtiene la **Tabla 7**:

Tabla 7 - Resumen de los encuentros del USV1. Fuente: propia

VESSEL (USV1)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV1	2ª ACCIÓN DEL USV1
USV2	0 m	5,4 s	COLISIÓN	SIGUE RUMBO	MANIOBRA
USV3	18,5 m	18,9 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV4	23,5 m	20,9 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV5	48,9 m	16,6 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

Tres de los cuatro encuentros pueden ser clasificados como seguros debido a que la distancia de seguridad se consideró de 10 metros. En el encuentro no seguro, tendría que maniobrar el otro buque, el USV2.

A pesar de que se estudia que hay encuentros seguros, se observa que en el artículo sí que se proponen unas maniobras para ellos, por lo tanto, para valorar con mayor profundidad las decisiones de los autores, se van a analizar esos encuentros en la situación hipotética de que sí fueran peligrosos, bajo los criterios COLREGs y se indicarán las maniobras aconsejadas por dicho reglamento para así compararlas con las maniobras propuestas por el artículo:

- En el caso del buque USV2, sería un alcance, estando el buque USV1 obligado a mantener rumbo y velocidad mientras está siendo alcanzado.
- En el caso del USV3 se puede considerar como vuelta encontrada, por lo deberían de caer a estribor ambos buques.
- En el caso de USV4, sería un cruce en el que, el buque referente, USV1, debería de mantener rumbo y velocidad y el USV4 evitar cortar la proa.
- Con el USV5 se estaría en situación de cruce donde el USV5 está por estribor del USV1. Estaría obligado a maniobrar el USV1, y el USV5 a mantener rumbo y velocidad.

Además, para no dejar ninguna posibilidad de maniobra sin estudiar, se tiene también en cuenta la regla 17 del COLREGs, que refleja que el sistema de prioridades se pierde una vez que se observa el incumplimiento de las normas por parte del otro buque, obligando al que tiene preferencia a tomar todas las medidas oportunas para evitar una colisión, **Tabla 8**:

Tabla 8 - Tipo de acción según regla 17. Fuente: propia

VESSEL (USV1)	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	TIPO SEGÚN COLREGs	ACCIÓN INICIAL DE USV1	USO 2ª ACCIÓN REGLA 17
USV2	COLISIÓN	ALCANCE	SEGUIR RUMBO	MANIOBRA
USV3	SEGURO	VUELTA ENCONTRADA	CAER A ESTRIBOR	-
USV4	SEGURO	CRUCE	SEGUIR RUMBO	MANIOBRA
USV5	SEGURO	CRUCE	NO CORTAR PROA	-

Sorprende que en el artículo se planteen las siguientes maniobras para evitar las posibles colisiones (**Imagen 41**) ya que no estaría cumpliendo con las maniobras propuestas por el COLREGs:

- USV1, USV2 y USV4 caen a babor.
- El USV3 y USV5 caen a estribor.

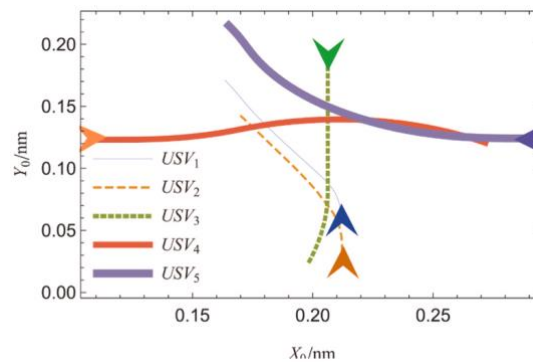


Imagen 41 - Maniobras para evitar colisión en la primera situación según los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)

Se puede comprobar cómo las soluciones adoptadas no siguen lo aconsejado por el COLREGs si fuesen encuentros no seguros, **Tabla 9**:

Tabla 9 - Comparación de las maniobras según el COLREGs y el artículo. Fuente: propia

VESSEL	ENCUENTRO SEGÚN COLREGs	MANIOBRA COLREGs	MANIOBRA ARTÍCULO
(USV1)	-	MANTENER RUMBO Y VELOCIDAD	CAER A BABOR
USV2	ALCANCE	CEDER PASO (BABOR/ESTRIBOR)	CAER A BABOR
USV3	VUELTA ENCONTRADA	CAER A ESTRIBOR	CAER A ESTRIBOR
USV4	CRUCE	NO CRUZAR LA PROA	CAER A BABOR
USV5	CRUCE	SEGUIR RUMBO	CAER A ESTRIBOR

A pesar de estudiar todas las posibilidades de maniobra en situaciones hipotéticas, como el caso de que sí fueran encuentros peligrosos o de que el otro buque no maniobrara haciendo uso de la Regla 17 del COLREGs, ninguna parece ser la solución a la que se están acogiendo los autores del artículo. Sea como sea la situación, están maniobrando sin seguir el COLREGs.

A continuación, se analizarán los encuentros desde la perspectiva del **resto de USVs**.

- En el caso del **USV2**, se obtendrían estos encuentros:

Con **USV3**, el **CPA= 18,5** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 12,3** segundos (**Imagen 42**)

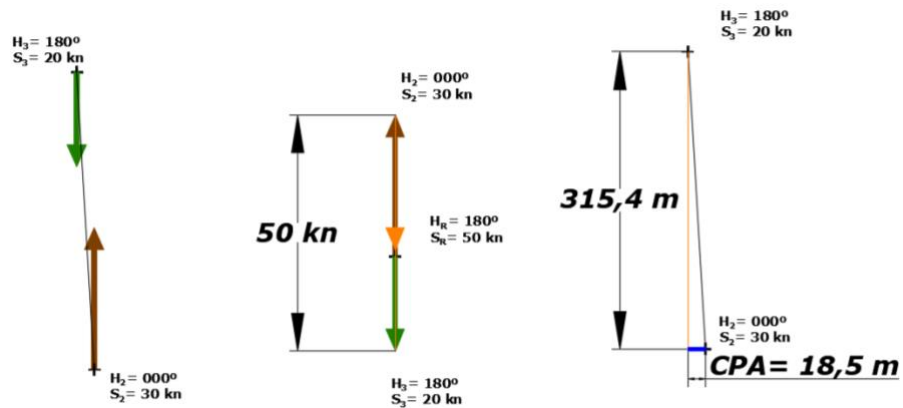


Imagen 42 - Encuentro del USV2 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD

Con **USV4**, el **CPA= 66,6** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 7,4** segundos (**Imagen 43**)

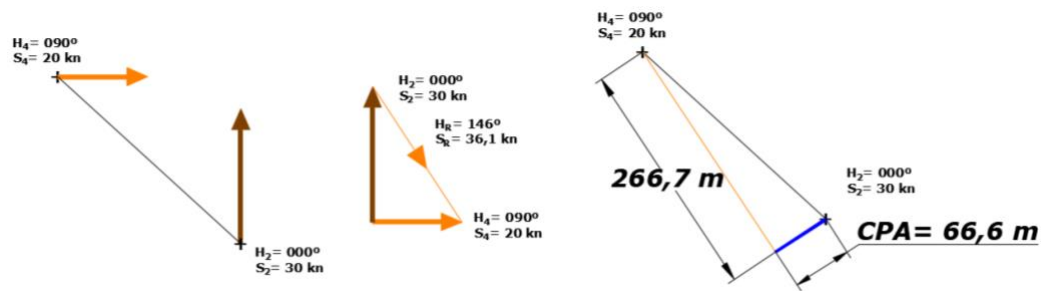


Imagen 43 - Encuentro del USV2 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD

Con **USV5**, el **CPA= 20,4** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 6,5** segundos (**Imagen 44**).

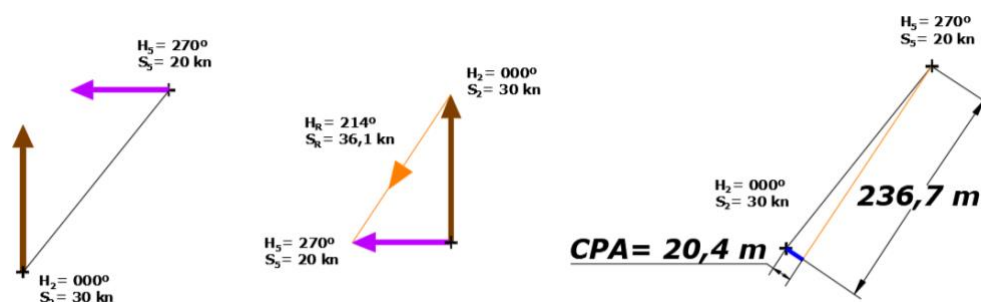


Imagen 44 - Encuentro del USV2 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD

El resumen de los encuentros de **USV2** sería el observado en la **Tabla 10**, (la situación sombreada es la estudiada con el USV anterior):

Tabla 10 - Encuentros del USV2 con el resto de USVs. Fuente: propia

VESSEL (USV2)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV2	2ª ACCIÓN DEL USV2
USV1	0 m	5,4 s	COLISIÓN	CEDER EL PASO	MANIOBRA
USV3	18,4 m	12,3 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV4	66,6 m	7,4 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV5	20,4 m	6,5 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

- En el caso del **USV3**, la velocidad del movimiento relativo, en ambos casos, de 14,6 m/s.
 Con **USV4**, el **CPA= 39,2** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 15,3** segundos (**Imagen 45**)

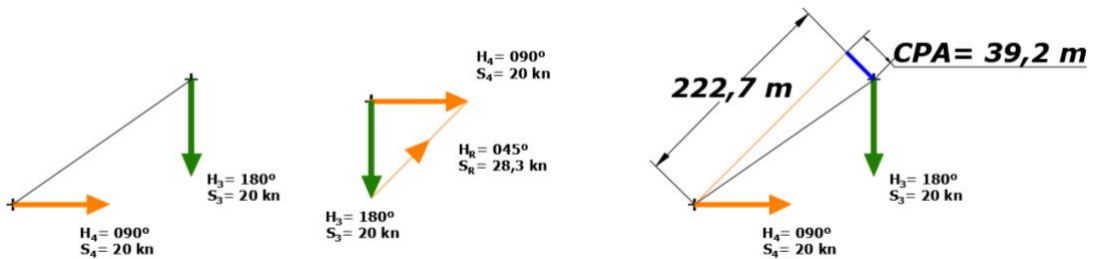


Imagen 45 - Encuentro del USV3 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD

- Con **USV5**, el **CPA= 26,9** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 14,4** segundos. (**Imagen 46**)

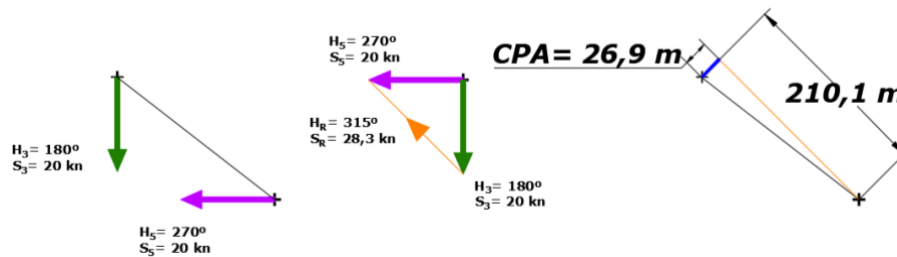


Imagen 46 - Encuentro del USV3 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD

El resumen de encuentros de USV3 sería el observado en la **Tabla 11**, (las situaciones sombreadas son las estudiadas con los USVs anteriores):

Tabla 11 - Encuentros del USV3 con el resto de USVs. Fuente: propia

VESSEL (USV3)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV3	2ª ACCIÓN DEL USV3
USV1	18,5 m	18,9 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV2	18,4 m	12,3 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV4	39,2 m	15,3 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV5	26,9 m	14,4 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

- El caso del **USV4**, siguiendo la metodología anterior, de poner sólo los casos nuevos, se tiene:

Con **USV5**, el **CPA= 0** metros, por lo que sería menor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 14,4** segundos. (**Imagen 47**) con lo que se tendría riesgo de colisión.

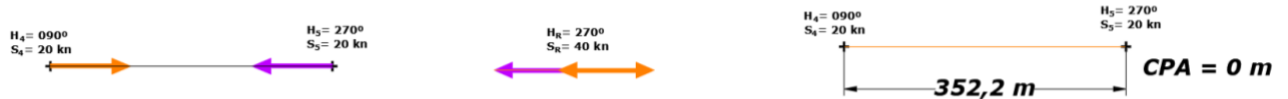


Imagen 47 - Encuentro del USV4 con el USV5. Fuente: propia, AutoCAD

La velocidad relativa del USV4 20,6 m/s. El resumen de encuentros de USV4 sería el observado en la **Tabla 12**, (las situaciones sombreadas son las estudiadas con los USVs anteriores):

Tabla 12 - Encuentros del USV4 con el resto de USVs. Fuente: propia

VESSEL (USV4)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV4	2ª ACCIÓN DEL USV4
USV1	23,5 m	20,9 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV2	66,6 m	7,4 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV3	39,2 m	15,3 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV5	0 m	17,1 s	COLISIÓN	CAER A ER	ANÁLISIS

Una vez analizados todos los encuentros, se observa que los únicos encuentros problemáticos implican a 4 embarcaciones, en la **Tabla 13** se observan cuáles serían las maniobras a realizar siguiendo el COLREGs y teniendo en cuenta cuáles son peligrosos:

Tabla 13 - Resumen encuentro primera situación. Fuente: propia

VESSELS	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	ACCIÓN
USV1 - USV2	0 m	5,4 s	COLISIÓN	USV1: SEGUIR RUMBO USV2: CEDER EL PASO
USV4 - USV5	0 m	17,1 s	COLISIÓN	USV4: CAER A ER USV5: CAER A ER

Se puede volver a comprobar, como las soluciones aportadas por el artículo no se atienen al COLREGs.

Respecto a las maniobras, los autores dan los datos de la **Imagen 48**:

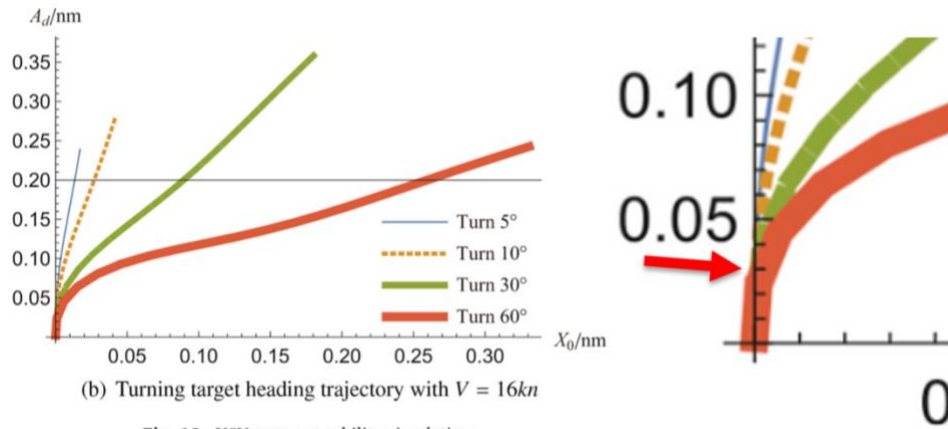


Fig. 12. USV maneuverability simulation.

Imagen 48 - Maniobrabilidad de los USVs según los autores. Fuente: (Ma et al., 2021)

Como se puede observar, el avance, incluso para un giro de 60° es de 0,03 millas, o lo que es lo mismo 55,56 metros, que es exactamente la distancia inicial que separa al USV2 del USV1. Por lo que la colisión parece inevitable. No obstante, en el trabajo se afirma que:

“And then, corresponding targeted trajectories are demonstrated in Fig. 12(b), and the steering distance A_d maintains around 0.2 nm.”

Obviando esta nueva incongruencia, las maniobras aconsejables para cada buque serían las de la **Imagen 49**:

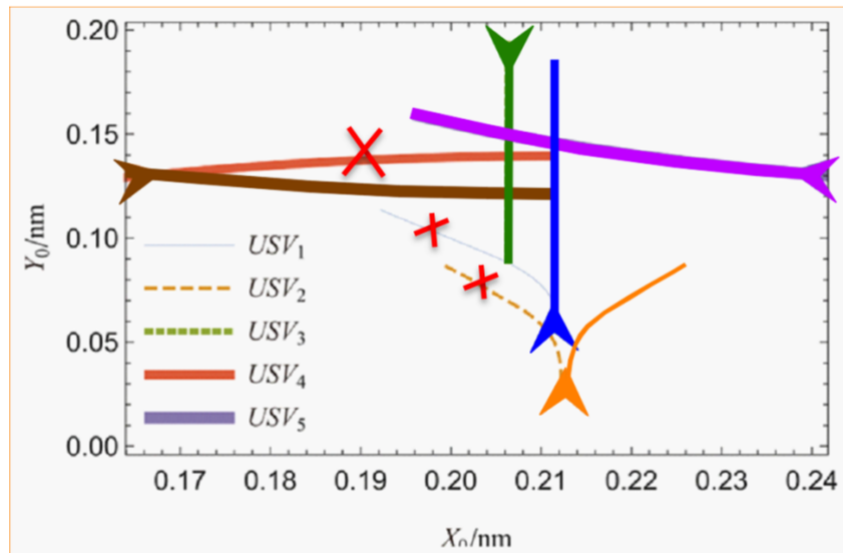


Imagen 49 - Maniobras aconsejadas para la primera situación de USVs. Fuente: propia

Para terminar la enumeración de incorrecciones del trabajo, se puede observar cómo los datos dados para las posiciones de los buques, a los 55 segundos, no coinciden con lo representado en el esquema (ver **Imagen 50**). Estos errores son evidentes en el caso del USV3.

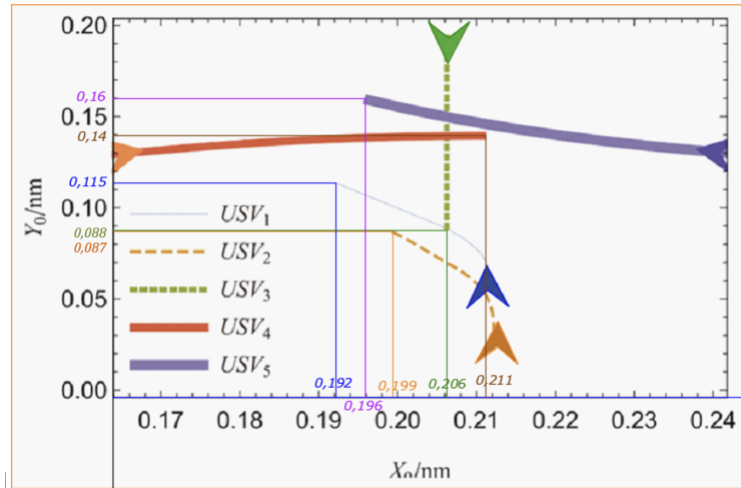


Imagen 50 - Posiciones exactas en el dibujo de los USVs. Fuente: propia

En el trabajo se dan estos valores: “The distance between USVs decreases from 1s to 55s as shown in Fig. 13(a). In 55s, the coordinates of USV1, USV2, USV3, USV4, and USV5 are (0.192, 0.110), (0.200, 0.090), (0.260, 0.085), (0.210, 0.140), (0.196, 0.160) respectively.”

Comparando los valores obtenidos con los indicados se ve que son erróneos, **Tabla 14**:

Tabla 14 - Comparación de los valores de la posición de los USVs. Fuente: propia

Valores obtenidos en el dibujo		Valores indicados en el artículo	
USV1			
X_o	Y_o	X_o	Y_o
0,192	0,115	0,192	0,110
USV2			
X_o	Y_o	X_o	Y_o
0,199	0,087	0,200	0,090
USV3			
X_o	Y_o	X_o	Y_o
0,206	0,088	0,260	0,085
USV4			
X_o	Y_o	X_o	Y_o
0,211	0,14	0,210	0,14
USV5			
X_o	Y_o	X_o	Y_o
0,196	0,16	0,196	0,16

4.3.2.2 Segunda situación:

Datos iniciales propuestos por el artículo (Imagen 51), se debe tener en cuenta que en esta situación la denominación de los buques cambia, se comienza por el USV0 hasta el USV3.

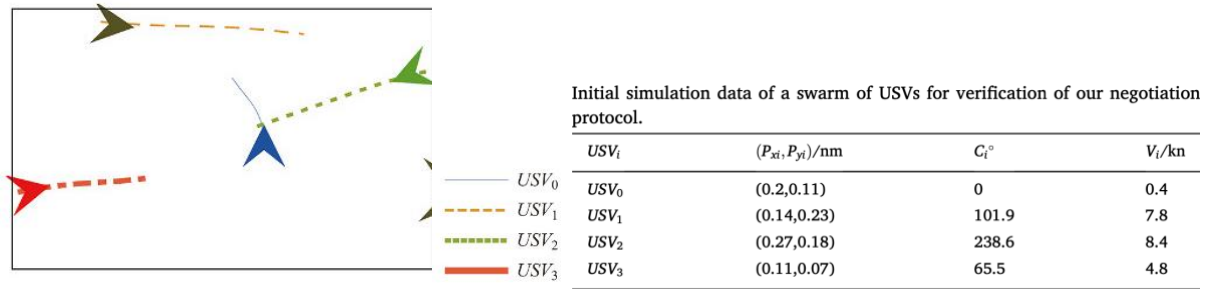


Imagen 51 - Situación inicial y tabla de datos iniciales. Fuente: (Ma et al., 2021)

Se comienza dando la situación inicial de los USVs (Imagen 52):

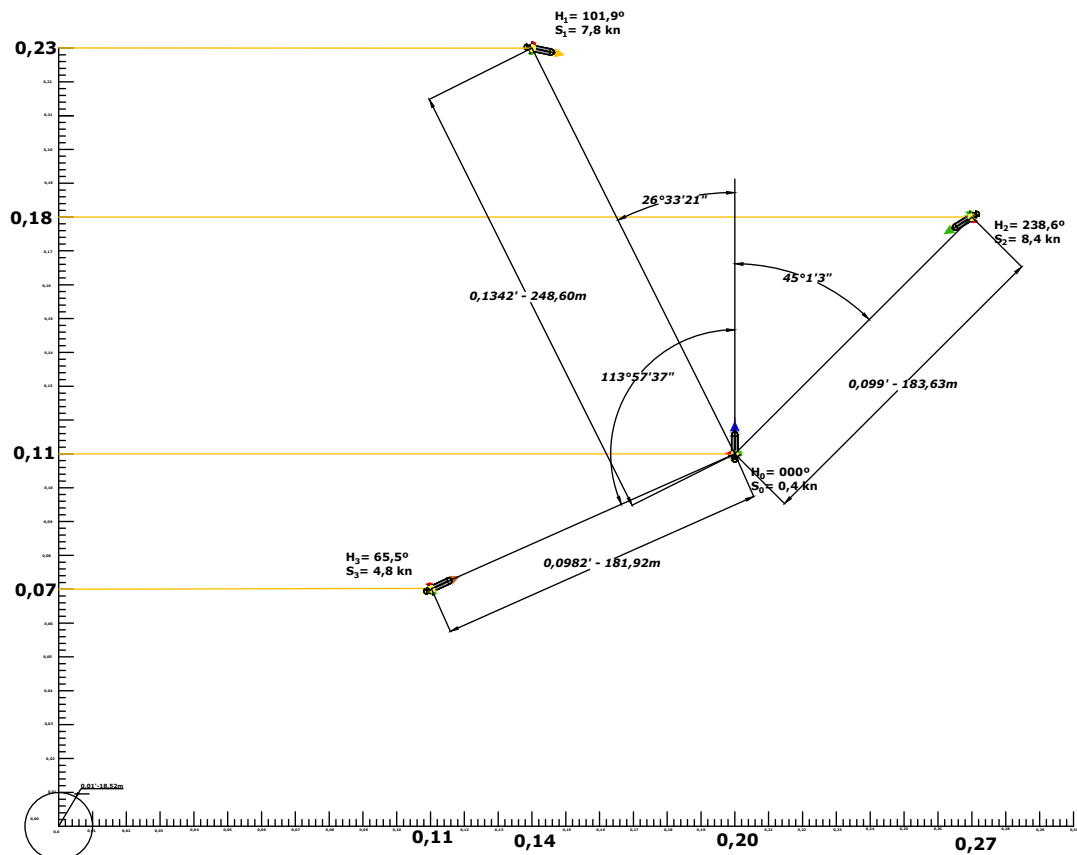


Imagen 52 – Segunda situación inicial de los USVs. Fuente: propia, AutoCAD

Partiendo de estos datos, se tendría la siguiente configuración vectorial de los movimientos de todos los USV, **Imagen 53**:

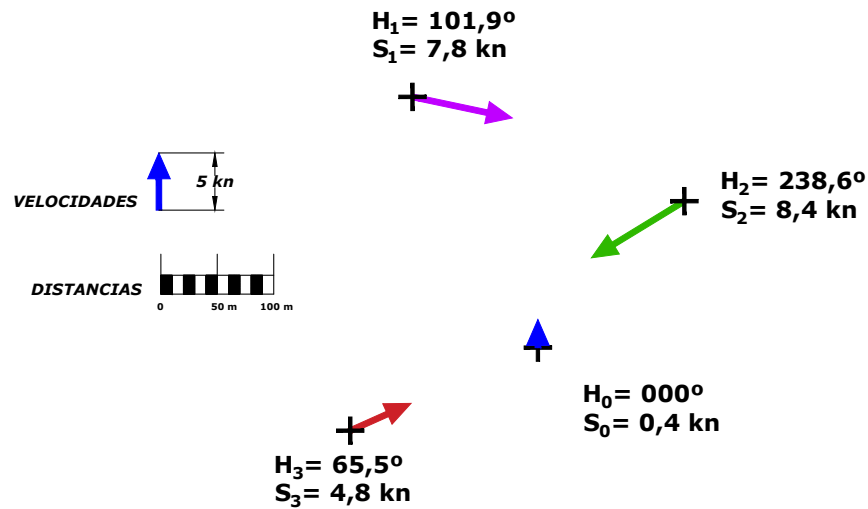


Imagen 53 - Configuración vectorial de los movimientos de los USV. Fuente: propia, AutoCAD

Se sigue con la misma metodología anterior: movimiento (H, S) y fuerzas perturbadoras nulas.

A continuación, se analizarán los tipos de encuentros, comenzando por los del **USV0**. El primero considerado es con el **USV1**, **Imagen 54**:

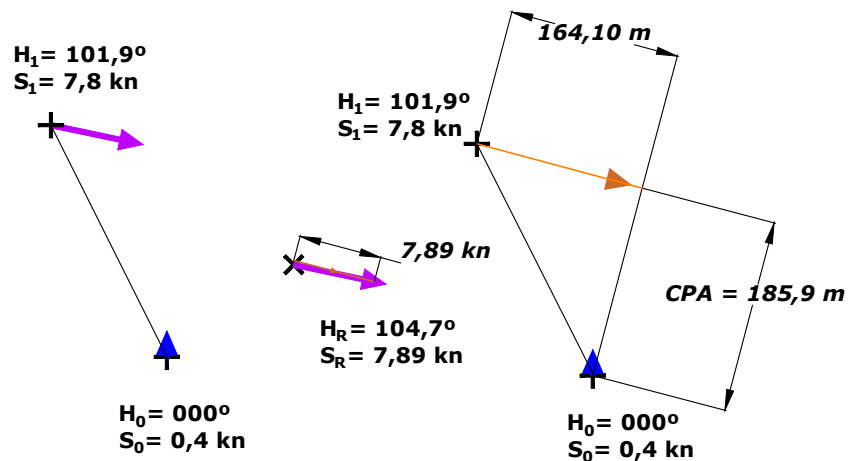


Imagen 54 - Encuentro del USV0 con el USV1. Fuente: propia, AutoCAD

- El movimiento relativo de colisión tiene un rumbo relativo de $104,7^\circ$ y una velocidad de 7,9 nudos, o lo que es lo mismo unos 4,01 metros por segundo.

- No se tiene una situación de colisión, ya que el **CPA= 185,9** metros y un **TCPA = 40,36 s**. Como se puede comprobar, la distancia de paso es superior a la distancia de seguridad propuesta de dos esloras = 10 metros.

Seguidamente se analiza el encuentro entre el **USV0** y el **USV2**, **Imagen 55**:

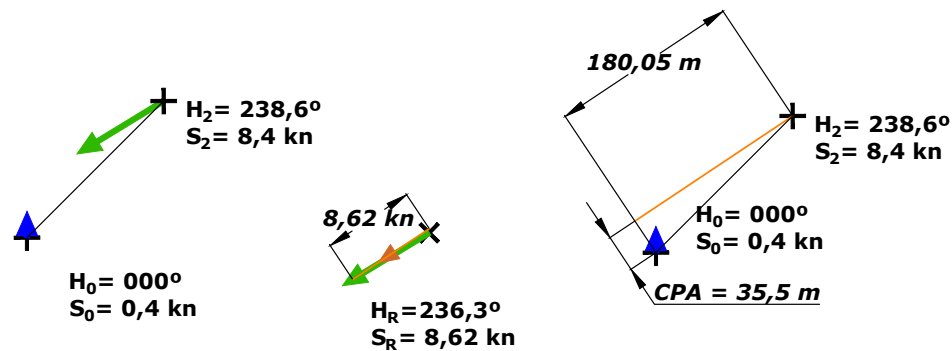


Imagen 55 - Encuentro del USV0 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD

- El movimiento relativo de colisión tiene un rumbo relativo de $236,3^\circ$ y una velocidad de 8,6 nudos (4,4 metros por segundo).
- No se tiene una situación de colisión, ya que el **CPA= 35,5** metros y un **TCPA = 40,55 s**.

Analizando el encuentro entre el **USV0** y el **USV3**, **Imagen 56**:

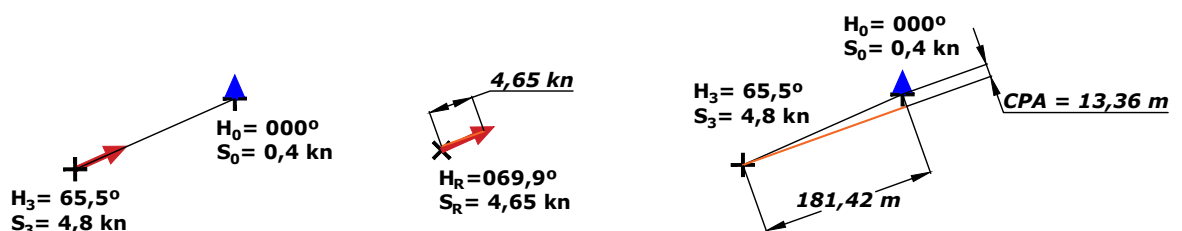


Imagen 56 - Encuentro del USV0 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD

- Se tiene un rumbo relativo de $69,9^\circ$ y una velocidad de 4,7 nudos (2,4 metros por segundo).
- No se tiene una situación de colisión, ya que el **CPA= 13,4** metros mayor que la distancia de seguridad acordada y un **TCPA = 1 minuto y 16 s**.

Como resumen de los encuentros de USV0, se obtiene la **Tabla 15**:

Tabla 15 -Resumen de los encuentros del USV0. Fuente: propia

VESSEL (USV0)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV0	2ª ACCIÓN DEL USV0
USV1	185,9 m	40,4 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV2	35,5 m	40,6 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV3	13,4 m	1' 16 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

Los tres encuentros pueden ser clasificados como seguros debido a que la distancia de seguridad se consideró de 10 metros y todos ellos lo superan.

Aunque todos ellos son seguros y no se debería realizar ninguna maniobra, el artículo si que propone realizarlas, por lo tanto, para poder estudiar si esas maniobras fueran correctas en un caso hipotético, se van a estudiar estos encuentros como si fueran no seguros, bajo los criterios COLREGs y se indicarán las maniobras aconsejadas por dicho reglamento:

- Se tiene un cruce con el USV1 que está por babor, por lo que USV1 tendrá que maniobrar.
- Se tiene un cruce donde el USV2 está por estribor, por tanto, USV0 debe evitar cortar la proa.
- El USV3 está alcanzando ($114^{\circ} > 112.5^{\circ}$), por lo que éste tendrá que mantenerse apartado y USV0 seguir rumbo.

Además, para no dejar ninguna posibilidad de maniobra sin estudiar, se tiene también en cuenta la regla 17 del COLREGs, que dice que el sistema de prioridades se pierde una vez que se observa el incumplimiento de las normas por parte del otro buque, obligando al que tiene preferencia a tomar todas las medidas oportunas para evitar una colisión **Tabla 16**:

Tabla 16 - Tipo de acción según regla 17. Fuente: propia

VESSEL (USV0)	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	TIPO SEGÚN COLREGs	ACCIÓN INICIAL DEL USV0	USO 2ª ACCIÓN REGLA 17
USV1	SEGURO	CRUCE	SEGUIR RUMBO	MANIOBRA
USV2	SEGURO	CRUCE	NO CRUZAR PROA	-
USV3	SEGURO	ALCANCE	SEGUIR RUMBO	MANIOBRA

En el artículo se plantean las siguientes maniobras para evitar las posibles colisiones (**Imagen 57**):

- USV0 cae a babor.
- El resto de USVs no maniobran.

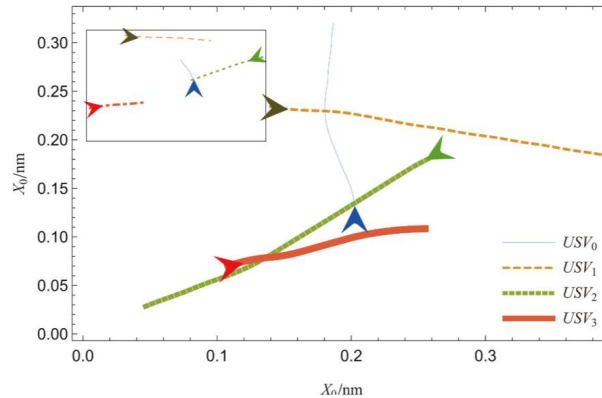


Imagen 57 - Maniobras realizadas para evitar colisión de la segunda situación. Fuente: (Ma et al., 2021)

Se puede comprobar cómo las soluciones adoptadas no siguen lo aconsejado por el COLREGs, en caso de que fueran encuentros no seguros, **Tabla 17**:

Tabla 17 - Comparación de las maniobras según el COLREGs y el artículo. Fuente: propia

VESSEL	ENCUENTRO SEGÚN COLREGs	MANIOBRA COLREGs	MANIOBRA ARTÍCULO
(USV0)	-	NO CRUZAR PROA	CAER A BABOR
USV1	CRUCE	NO CRUZAR PROA	SIGUE RUMBO
USV2	CRUCE	SIGUE RUMBO	SIGUE RUMBO
USV3	ALCANCE	CEDER PASO	SIGUE RUMBO

A pesar de estudiar todas las posibilidades de maniobra en situaciones hipotéticas, ninguna parece ser la solución a la que se están acogiendo los autores del artículo.

A continuación, se analizarán los encuentros desde la perspectiva del **resto de USVs**.

- En el caso del **USV1**, se obtendrían estos encuentros:

Con **USV2**, el **CPA= 135,22** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 28** segundos, **Imagen 58**:

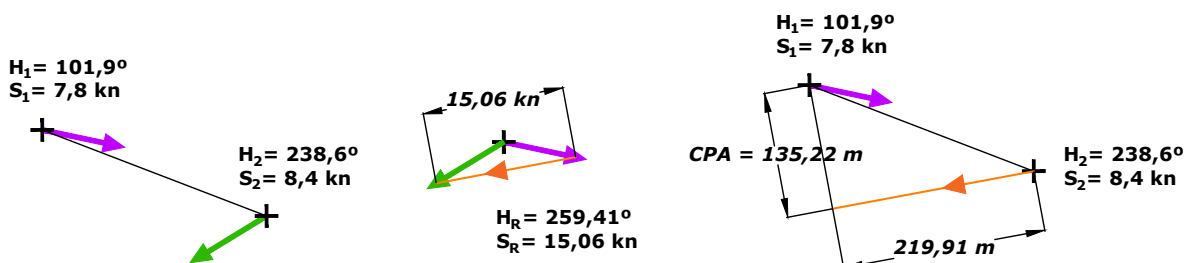


Imagen 58 - Encuentro del USV1 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD

Con **USV3**, el **CPA= 240,69** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 1 minuto y 13 segundos**, **Imagen 59**:

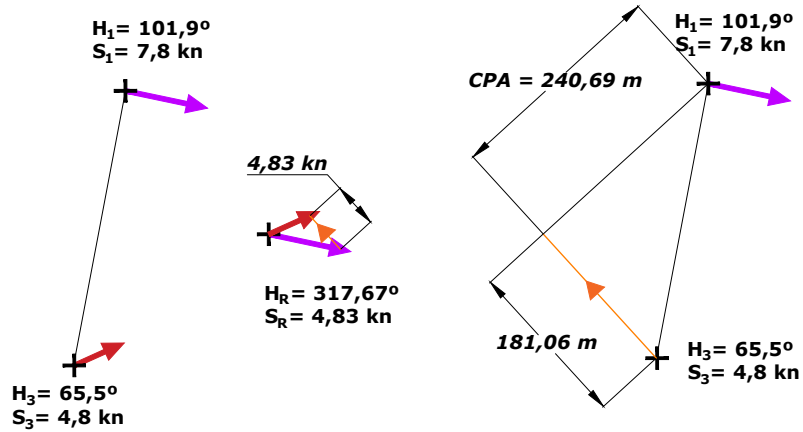


Imagen 59 - Encuentro del USV1 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD

El resumen de los encuentros de **USV1** sería el observado en la **Tabla 18**, (la situación sombreada es la estudiada con el USV anterior):

Tabla 18 - Encuentros del USV1 con el resto de USVs. Fuente: propia

VESSEL (USV1)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV1	2ª ACCIÓN DEL USV1
USV0	185,9 m	40,4 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV2	135,22 m	28 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV3	240,69 m	1' 13 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

- En el caso del **USV2**, se obtendrían estos encuentros:

Con **USV3**, el **CPA= 35,74** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 53 segundos**, **Imagen 60**:

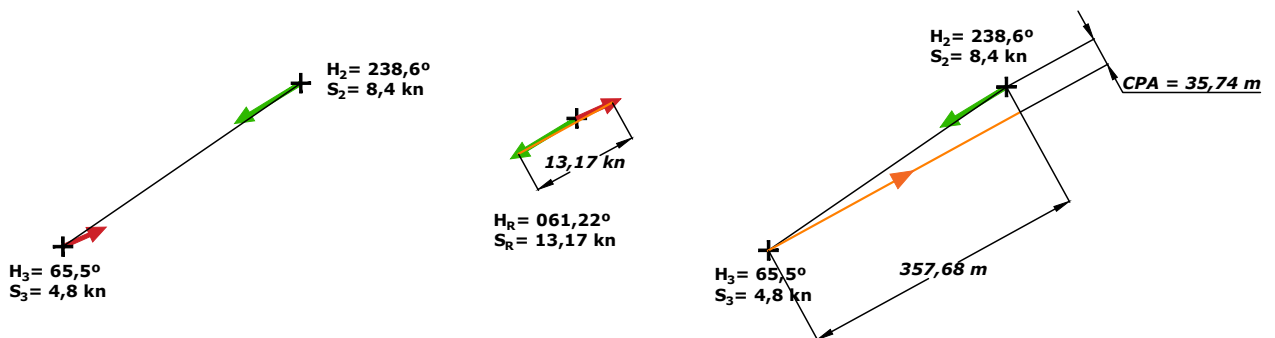


Imagen 60 - Encuentro del USV2 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD

El resumen de los encuentros de **USV2** sería el observado en la **Tabla 19**, (las situaciones sombreadas son las estudiadas con los USVs anteriores):

Tabla 19 - Encuentros del USV2 con el resto de USVs. Fuente: propia

VESSEL (USV2)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV2	2ª ACCIÓN DEL USV2
USV0	35,5 m	40,6 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV1	135,22 m	28 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV3	35,74 m	53 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

Una vez analizados los encuentros, se observa que no existe ningún encuentro problemático, por lo tanto, no sería necesario realizar ninguna maniobra.

Aun así, se observa en la **Tabla 17** que en caso de maniobrar el artículo lo ha hecho de forma incorrecta no siguiendo las reglas del COLREGs.

Las maniobras correctas serían que todos los buques siguieran su rumbo como se puede ver en la **Imagen 61**:

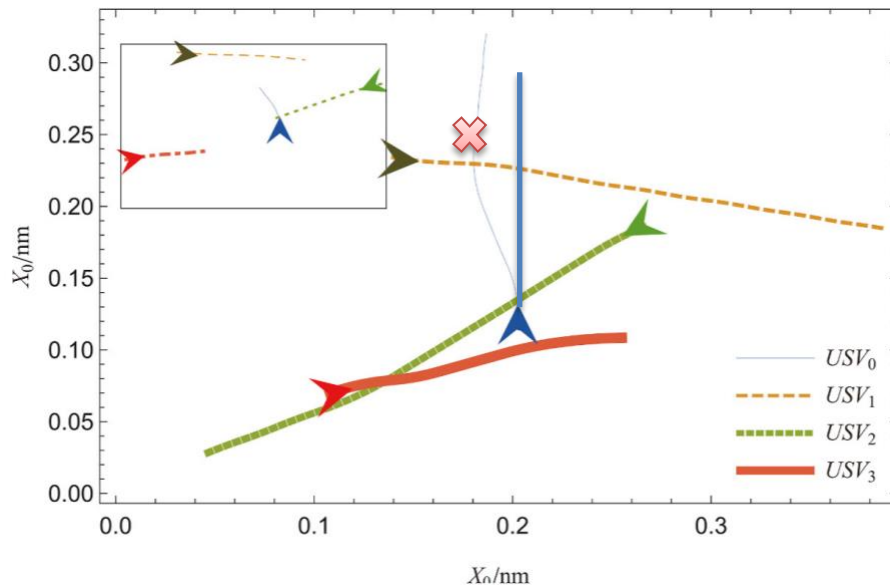
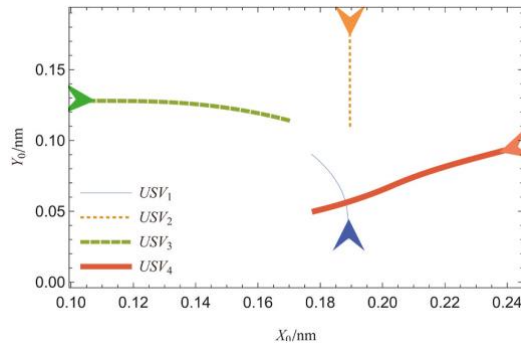


Imagen 61 - Maniobras aconsejadas para la segunda situación de USVs. Fuente: propia

4.3.2.3 Tercera situación:

Datos iniciales propuestos por el artículo (Imagen 62):



Initialized situations of 4 USVs.

USV_i	$(P_{xi}, P_{yi})/nm$	C_i°	V_i/kn
USV_1	(0.19,0.03)	0	16
USV_2	(0.19,0.18)	180	20
USV_3	(0.10,0.13)	90	18
USV_4	(0.24,0.09)	240	20

Imagen 62 - Situación inicial (figura 15(a) del artículo) y tabla de datos iniciales. Fuente: (Ma et al., 2021)

Se comienza dando la situación inicial de los USVs (Imagen 63):

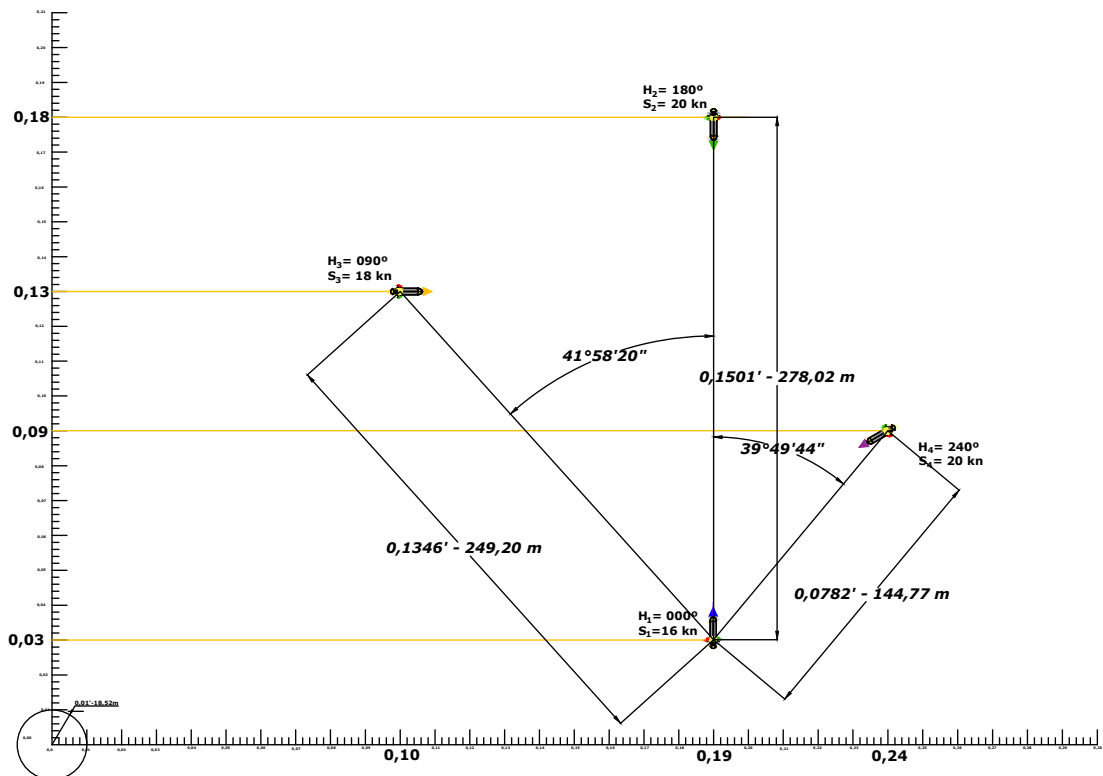


Imagen 63 -Tercera situación inicial de los USVs. Fuente: propia, AutoCAD

Partiendo de estos datos, se tendría la siguiente configuración vectorial de los movimientos de todos los USV, **Imagen 64**

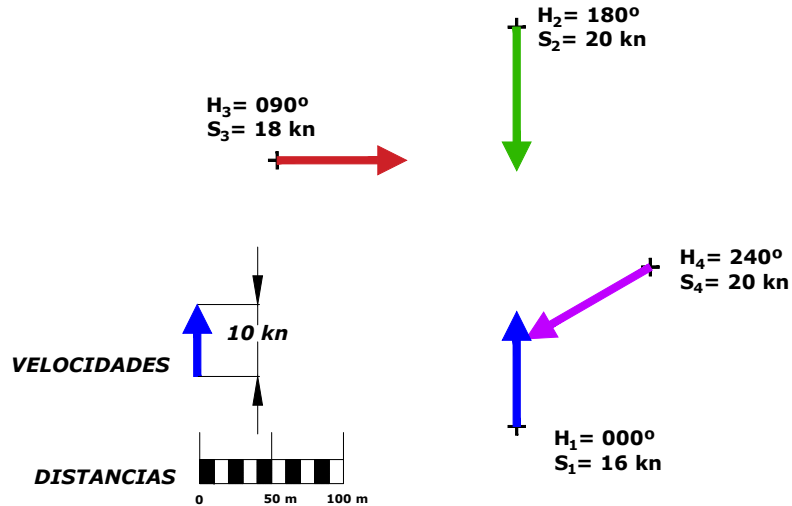


Imagen 64 - Configuración vectorial de los movimientos de los USV. Fuente: propia, AutoCAD

Se sigue con la misma metodología anterior: movimiento (H, S) y fuerzas perturbadoras nulas. A continuación, se analizarán los tipos de encuentros, comenzando por los del **USV1**. El primero considerado es con el **USV2**, **Imagen 65**:

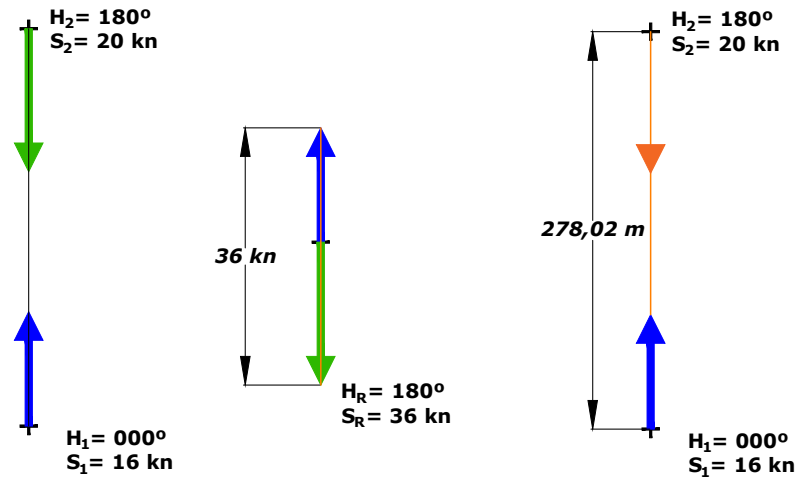


Imagen 65 - Encuentro del USV1 con el USV2. Fuente: propia, AutoCAD

- El resultado es un movimiento relativo de colisión, es decir, **CPA=0**.

- Ese movimiento relativo de colisión tiene un Rumbo Relativo Sur y una velocidad de 36 nudos, o lo que es lo mismo unos 18,52 metros por segundo.
- Con esa velocidad, la colisión tendría **un tiempo de colisión de 15 segundos**, que no parece mucho tiempo para evitarla.

Seguidamente se analiza el encuentro entre el **USV1** y el **USV3**, **Imagen 66**:

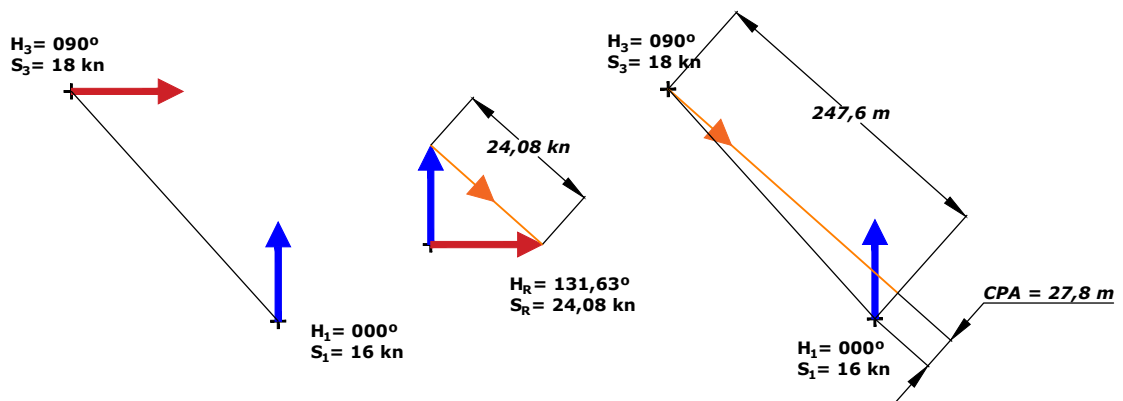


Imagen 66 - Encuentro del USV1 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD

- El movimiento relativo de colisión tiene un rumbo relativo de $131,6^\circ$ y una velocidad de 24 nudos (12,3 metros por segundo).
- No se tiene una situación de colisión, ya que el **CPA= 27,8** metros y un **TCPA = 20 s**.

Y por último con el **USV4**, **Imagen 67**:

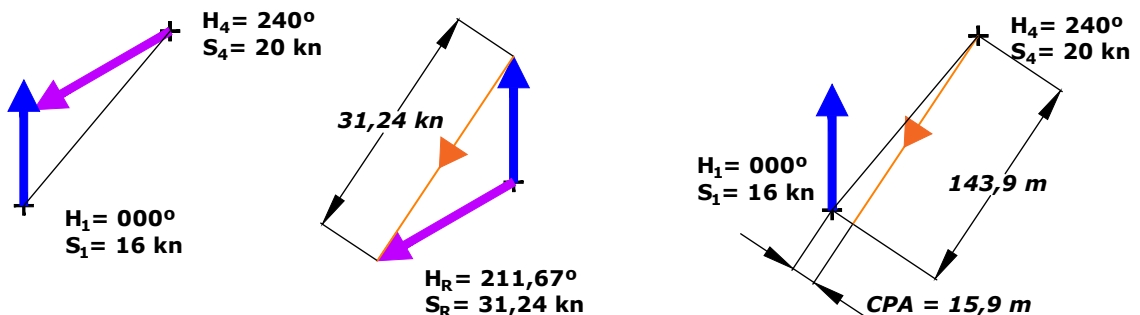


Imagen 67 - Encuentro del USV1 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD

- El movimiento relativo de colisión tiene un rumbo relativo de $211,7^{\circ}$ y una velocidad de 31,2 nudos (16,1 metros por segundo).
- No se tiene una situación de colisión, ya que el **CPA= 15,9** metros y un **TCPA = 9 s**.

Como resumen de los encuentros de USV0, se obtiene la **Tabla 20**:

Tabla 20 - Resumen de los encuentros del USV1. Fuente: propia

VESSEL (USV1)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV1	2ª ACCIÓN DEL USV1
USV2	0 m	15 s	COLISIÓN	CAER A ER	MANIOBRA
USV3	27,8 m	20 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV4	15,9 m	9 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

Dos de los tres encuentros pueden ser clasificados como seguros debido a que la distancia de seguridad se consideró de 10 metros. En el encuentro no seguro, tendrían que maniobrar ambos buques, el USV1 y el USV2 al ser una vuelta encontrada.

A pesar de que se estudia que hay encuentros seguros, se observa que en el artículo sí que se proponen unas maniobras para ellos, por ello, se van a analizar esos encuentros en la situación hipotética de que sí fueran peligrosos, bajo los criterios COLREGs y se indicarán las maniobras aconsejadas por dicho reglamento:

- Vuelta encontrada con el USV2 en el que ambos deben caer a estribor.
- Se tiene un cruce donde el USV3 está por babor, por lo que USV3 tendrá que maniobrar.
- Se tiene un cruce donde el USV4 está por estribor, por tanto, el buque USV1 debe evitar cortar la proa.

Además, para no dejar ninguna posibilidad de maniobra sin estudiar, se tiene también en cuenta la regla 17 del COLREGs, que explica que el sistema de prioridades se pierde una vez que se observa el incumplimiento de las normas por parte del otro buque, obligando al que tiene preferencia a tomar todas las medidas oportunas para evitar una colisión, **Tabla 21**:

Tabla 21 - Tipo de acción según regla 17. Fuente: propia

VESSEL (USV1)	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	TIPO SEGÚN COLREGs	ACCIÓN INICIAL DE USV1	2ª ACCIÓN REGLA 17
USV2	COLISIÓN	VUELTA ENCONTRADA	CAER A ER	-
USV3	SEGURO	CRUCE	SIGUE RUMBO	MANIOBRA
USV4	SEGURO	CRUCE	NO CORTAR PROA	-

En el artículo se plantean las siguientes maniobras para evitar las posibles colisiones (**Imagen 68**):

- USV1 cae a babor.

- USV2, USV3 y USV4 caen a estribor.

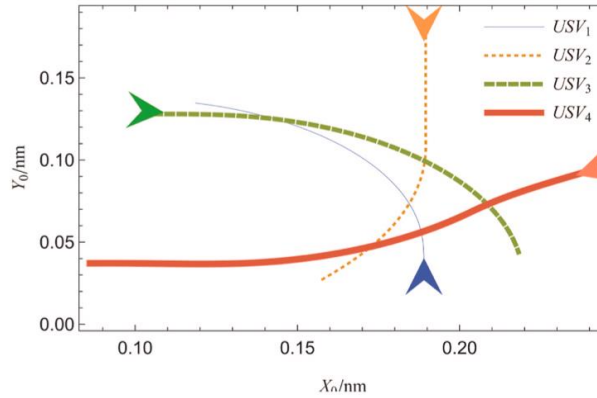


Imagen 68 - Maniobras realizadas para evitar colisión de la tercera situación. Fuente: (Ma et al., 2021)

Se puede comprobar cómo las soluciones adoptadas no siguen lo aconsejado por el COLREGs, [Tabla 22](#):

Tabla 22 - Comparación de las maniobras según el COLREGs y el artículo. Fuente: propia

VESSEL	ENCUENTRO SEGÚN COLREGs	MANIOBRA COLREGs	MANIOBRA ARTÍCULO
(USV1)	-	CAER A ER	CAER A BABOR
USV2	VUELTA ENCONTRADA	CAER A ER	CAER A ER
USV3	CRUCE	NO CORTAR LA PROA	CAER A ER
USV4	CRUCE	SEGUIR RUMBO	CAER A ER

A continuación, se analizarán los encuentros desde la perspectiva del **resto de USVs**.

- En el caso del **USV2**, se obtendrían estos encuentros:

Con **USV3**, el **CPA= 61,8** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 13** segundos, [Imagen 69](#):

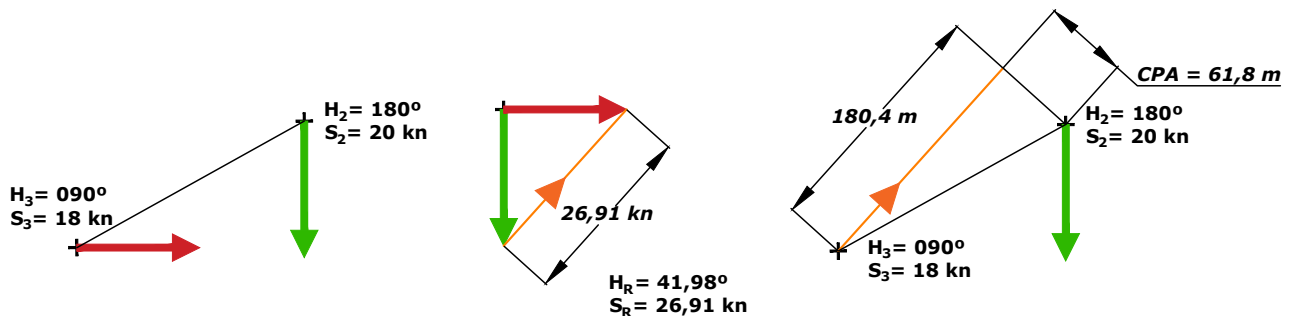


Imagen 69 - Encuentro del USV2 con el USV3. Fuente: propia, AutoCAD

Con **USV4**, el **CPA= 98,02** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 16** segundos, **Imagen 70**:

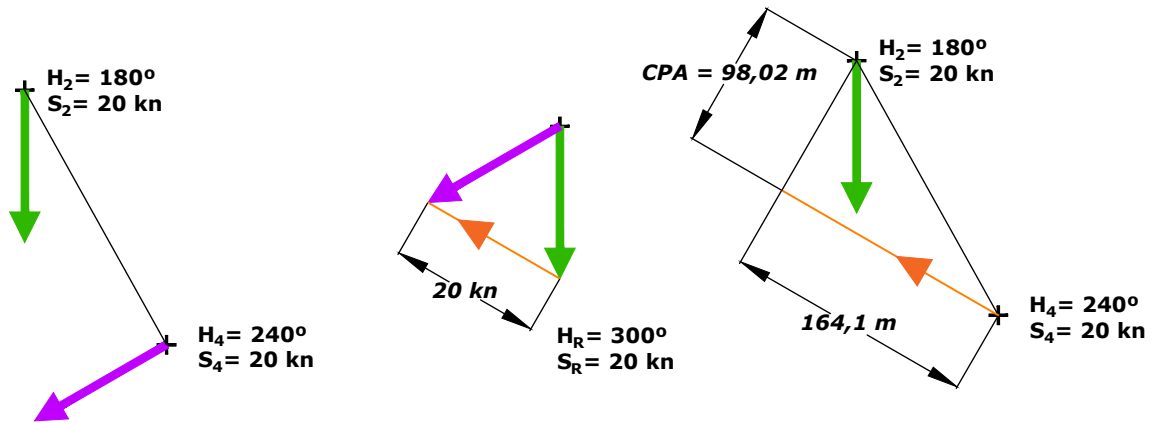


Imagen 70 - Encuentro del USV2 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD

El resumen de los encuentros de **USV2** sería el observado en la **Tabla 23**, (la situación sombreada es la estudiada con el USV anterior):

Tabla 23 - Encuentros del USV2 con el resto de USVs. Fuente: propia

VESSEL (USV2)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV2	2ª ACCIÓN DEL USV2
USV1	0 m	15 s	COLISIÓN	CAER A ER	MANIOBRA
USV3	61,8 m	13 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV4	98,02 m	16 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

- En el caso del **USV3**, se obtendrían estos encuentros:

Con **USV4**, el **CPA= 142,3** metros, por lo que sería mayor que la distancia de seguridad, y el **TCPA= 12** segundos, **Imagen 71**:

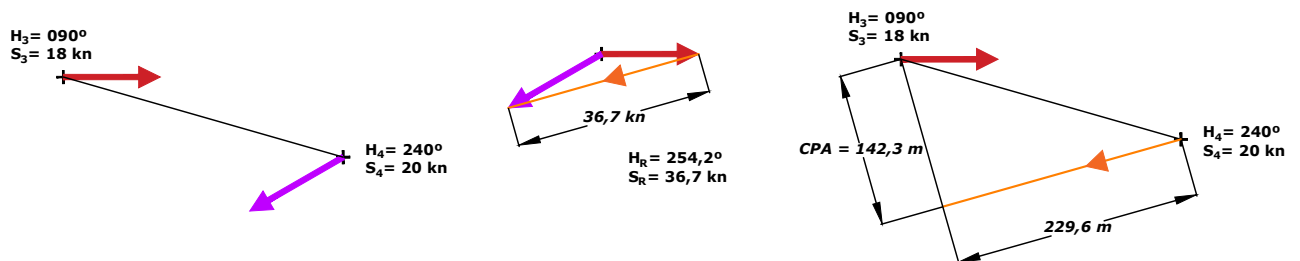


Imagen 71 - Encuentro del USV3 con el USV4. Fuente: propia, AutoCAD

El resumen de los encuentros de **USV3** sería el observado en la **Tabla 24**, (las situaciones sombreadas son las estudiadas con los USVs anteriores):

Tabla 24 - Encuentros del USV3 con el resto de USVs. Fuente: propia

VESSEL (USV3)	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	1ª ACCIÓN DEL USV3	2ª ACCIÓN DEL USV3
USV1	27,8 m	20 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV2	61,8 m	13 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS
USV4	142,3 m	12 s	SEGURO	NADA	ANÁLISIS

Una vez analizados los encuentros, se observa que los problemáticos implican a 2 embarcaciones en la **Tabla 25**:

Tabla 25 - Resumen encuentro tercera situación. Fuente: propia

VESSELS	CPA (d.s.=10 m)	TCPA	CLASIFICACIÓN ENCUENTRO	ACCIÓN
USV1 - USV2	0 m	15 s	COLISIÓN	AMBOS: CAER A ER

Se puede volver a comprobar, como las soluciones aportadas no se atienen al COLREGs.

Las maniobras aconsejadas para cada buque serían las de la **Imagen 72**:

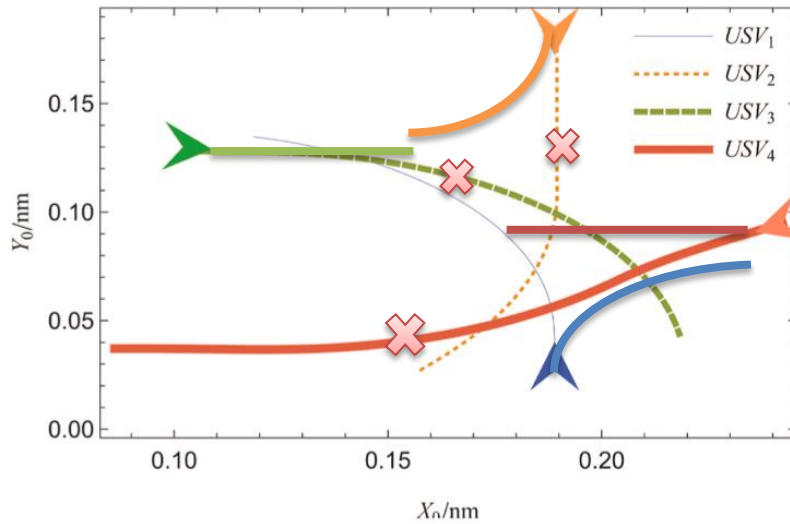


Imagen 72 - Maniobras aconsejadas para la tercera situación de USVs. Fuente: propia

5 Resultados y análisis.

Una vez analizado y aplicándole la lista de requisitos al artículo estudiado se observa que sólo obedece parcialmente a 3 reglas, ya que sólo se acoge a ciertos aspectos de éstas, de las 19 que se analizan.

Para que el planteamiento del estudio fuera correcto debería seguir al 100% la lista de requisitos creada, por lo que a pesar de que se pueda discutir si su estilo para evitar riesgos de colisión es bueno o no, el hecho de que no acate el COLREGs ya hace que este CAS sea inefectivo hoy en día y no sea seguro para su utilización.

Los buques autónomos que se contemplan en el artículo pueden comunicarse entre sí y pactarán entre ellos las maniobras a realizar en caso de riesgo de colisión. En el momento en el que otro tipo de buque, convencional con tripulación, se incluyera a la situación este planteamiento no serviría.

No se tienen en cuenta de forma general las condiciones de la mar, la navegación por dispositivos de separación de tráfico o en canales angostos, ni las condiciones de visibilidad. Además, se aleja de lo dispuesto en el Convenio en las maniobras para evitar las posibles colisiones, lo que podría generar situaciones muy peligrosas para los otros buques que estuvieran en las inmediaciones y que sí respetaran el COLREGs.

Parece ser también que en el artículo sólo se analizan situaciones de abordaje muy simples, que podrían dar a entender que se guiaron por las normas simplificadas del 60 COLREGs. Se podría decir que este artículo estaría aplicando un COLREGs incorrecto y obsoleto o que no aplica ninguno de los dos.

Además, el análisis cinemático resalta que las situaciones propuestas no son las que mejor enseñen las actuaciones de un CAS debido a que muchas de ellas no implican un riesgo de abordaje inmediato o no son un riesgo para buques de tan pequeña eslora.

Por otra parte, en ciertas ocasiones plantean situaciones de riesgo de colisión inmediato con CPAs de 0 metros en 5 segundos, lo cual no es realista si se hubiera seguido el COLREGs mucho antes, ya que se hubiera maniobrado con anterioridad evitando así tener que llegar a ese punto extremo de peligro.

Este artículo no está creando un CAS que se acoja al reglamento actual. Podría usarse como un método de comunicación entre MASS que sería útil para cerciorarse de la maniobra que van a realizar, pero nunca alejándose del COLREGs. Este CAS sólo sería posible en un hipotético futuro en el que sólo existan buques autónomos en la mar y fuesen todos del mismo tipo y forma.

Es inútil crear unas nuevas normas o un nuevo método de navegación, como en este caso sería el de generar una conversación para acordar la maniobra, cuando el COLREGs va a seguir siendo obligatorio para los buques en la mar como se indica en la primera regla del Reglamento y en las nuevas recomendaciones de la IMO.

Además, los principios básicos del COLREGs llevan siendo interiorizados por los marinos durante casi más de un siglo y, por ello, unos cambios importantes en las reglas para evitar un abordaje podrían generar situaciones ambiguas, confusas y peligrosas, en las que no se sabría cómo actuar, sobre todo cuando confluyen en la mar buques autónomos y buques tripulados.

Por otra parte, mientras se estudiaba este artículo se observó que un inconveniente que se puede encontrar a la hora de aplicar el Reglamento de Abordajes en los CAS podría ser que está redactado de forma general para que sea aplicable en el mayor número de situaciones posible y pudiera llegar a ser ambiguo.

“La interpretación precisa debe hacerse en el contexto de la situación real, basándose no sólo en el conocimiento de las normas, sino también en la experiencia y la cultura, lo que las normas denominan ‘práctica normal del marino’. La naturaleza cualitativa de COLREGs será un problema para el programador que deba escribir el código de los algoritmos de evitación de colisiones de los módulos de navegación autónomos.” (Porathe, 2019)

Se puede llegar a la idea, por tanto, de que para facilitar la implantación del COLREGs en los MASS se podrían mejorar estas ambigüedades en el Reglamento:

- No se especifica el exacto sector hasta el que se puede considerar que existe la situación de vuelta encontrada. La regla considera que en caso de ver las luces de tope de ambos palos del otro enfiladas serían “rumbos opuestos” pero después indica que esta situación se considera también cuando están “casi opuestos”: varios artículos lo contemplan de manera dispar entre 5º y 30º ya que el COLREGs no lo regula específicamente.



- Existe ambigüedad en la regla 13 al deber ser aplicada en las secciones I y II del reglamento, ya que al aplicarse a cualquier tipo de visibilidad (sección I), podría entenderse que si es aplicable en buques no a la vista.
- No se deja claro en la regla 19 si se considera la situación de alcance en visibilidad reducida.
- En el COLREGs sólo se contempla la situación de la detección del otro buque mediante RADAR, pero se desconoce qué sucede con la posibilidad de obtener datos mediante AIS, que probablemente sea uno de los medios de comunicación usados para los CAS y hasta qué punto utilizarlas para realizar las maniobras para evitar abordajes.
- En la regla 17 se desconoce la distancia a la que se debe maniobrar o el momento exacto en caso de que el otro no maniobre, por ello se debería terminar con el amplio espectro de posibilidades de maniobra que se da.
- No se contemplan las restricciones geográficas específicas de ciertas zonas.
- Se debería especificar cómo ajustar las distancias de seguridad para cada buque.

Además, debido a las características de los MASS se generan algunas preguntas para su aplicación:

- ¿Cómo se considera la “buena práctica marinera” mencionada en la regla 8 del COLREGs en un buque autónomo?
- ¿Son las cámaras de alta tecnología de los MASS un sustituto para la observación visual?
- Si los buques deben poder observarse visualmente para poder así acogerse a las normas de buques a la vista o a las de no a la vista, ¿los MASS deben ser tratados como un buque con visibilidad restringida?

Exceptuando estos nuevos interrogantes, que ya están siendo estudiados por el Maritime Safety Committee, se ha venido observando desde la implantación de este Convenio que haciendo un uso correcto de él se pueden evitar todo tipo de abordajes, por lo que con los MASS sucederá lo mismo.

Lo que se debe tener en cuenta es que en caso de actualizar el COLREGs se debe conocer si estas actualizaciones serán para cualquier buque que se encuentre en la mar, desde pesqueros hasta buques mercantes, pasando por barcos de recreo, o si, por el contrario, sólo serán de uso en unas zonas concretas y delimitadas en las que sólo naveguen los MASS.



Además, si el COLREGs se simplifica demasiado en los CAS, éstos no estarían correctamente ligados a la realidad donde la cantidad de situaciones diferentes es enorme. Es por ello por lo que se necesita comprender correctamente el Convenio y usarlo en su totalidad para generar un CAS efectivo.

6 Conclusiones.

El 72 COLREGs es una norma de obligado cumplimiento para todos los buques y por lo tanto los MASS deberían cumplirlo en todos sus aspectos. Los buques autónomos coexistirán con los buques tripulados, los cuales pueden discernir entre situaciones de peligro e interpretar los posibles encuentros de forma muy superior a la de las máquinas, y navegarán con normalidad por la mar. Por ello, deberán seguir el COLREGs y así evitar situaciones que no puedan comprender o que se salgan de la normativa que cumplirían sus algoritmos. Si no se hace esto se tendrán ambigüedades entre humanos y máquinas y podría ser peligroso para la seguridad de éstos.

Una buena interpretación del 72 COLREGs como la realizada es de gran importancia antes de crear un sistema anticolidión para buques autónomos, ya que el amplio espectro de posibilidades de este convenio podría dar lugar a que queden situaciones de posible riesgo de colisión sin ser contempladas en el CAS.

La lista de verificación generada en este estudio puede ser muy útil, por tanto, para poder comprobar que cualquier CAS que se quiera analizar cumple con el COLREGs y garantizar así un mínimo de fiabilidad para que éste pueda implementarse en los futuros MASS.

Con este análisis crítico realizado también se ha podido comprobar lo necesaria que es esta verificación hacia los nuevos CAS para los buques autónomos, ya que no se están contemplando estas regulaciones a la hora de programar los sistemas. Poder asegurar una navegación segura y sin accidentes es primordial en la mar.



6.1 Líneas futuras

Se proseguirá con este análisis crítico de artículos científicos sobre los sistemas anticolidión para los buques autónomos en los estudios de Doctorado en Ingeniería Náutica, Marina y Radioelectrónica Naval.

Se usará la lista de verificación generada en este trabajo para aplicársela a una mayor cantidad de artículos y así conseguir un porcentaje del número de artículos científicos y de sistemas anticolidión que se acogen al 72 COLREGs.

Con los recientes trabajos publicados en el área (Argüelles et al., 2021), basado en los algoritmos “*velocity obstacle*”, se diseñarán maniobras respetuosas con el COLREGs en los momentos adecuados.

Bibliografía.

- Abilio Ramos, M., Utne, I.B., Mosleh, A., 2019. Collision avoidance on maritime autonomous surface ships: Operators' tasks and human failure events. *Saf. Sci.* 116, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.038>
- Allianz Global Corporate & Specialty, 2020. AGCS Safety and Shipping Review.
- Allianz Global Corporate & Specialty, 2019. Allianz: Shipping losses lowest this century, but incident numbers remain high [WWW Document]. *Saf. Shipp. Rev.* 2019. URL <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/news/safety-shipping-review-2019.html> (accessed 9.30.20).
- A.N. Cockcroft, J.N.F. Lameijer, 2004. *A Guide to the Collision Avoidance Rules*, 6th Edition. ed. Elsevier Ltd.
- Argüelles, R.P., García Maza, J.A., Martín, F.M., Bartolomé, M., 2021. Ship-to-ship dialogues and agreements for collision risk reduction. *J. Navig.* 1–18. <https://doi.org/10.1017/S0373463321000448>
- Argüelles, R.P., Maza, J.A.G., Martín, F.M., 2019. Specification and Design of Safety Functions for the Prevention of Ship-to-Ship Collisions on the High Seas. *J. Navig.* 72, 53–68. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000553>
- Axel Stenman, Sebastian Öhland, 2017. Interaction between unmanned vessels and COLREGs.
- Det Norske Veritas, 2018. Autonomous and remotely operated ships (No. DNVGL-CG-0264). DNV.
- Esa Jokioinen, Jonne Poikonen, Mika Hyvönen, Antti Kolu, Tero Jokela, 2016. Remote and Autonomous Ship – The next steps. *Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA)*.
- European Maritime Safety Agency, 2020. Study of the risks and regulatory issues of specific cases of MASS – Summary. EMSA, Lisboa.
- European Maritime Safety Agency, 2015. Summary Overview of Marine Casualties and Incidents 2011-2015.

- European Maritime Safety Agency, n.d. Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) [WWW Document]. URL <http://emsa.europa.eu/mass.html> (accessed 5.14.21).
- Halpern, S., 2008. An Objective Forensic Analysis of the Collision Between Stockholm and Andrea Doria 47.
- International Maritime Organization, 2018. IMO takes first steps to address autonomous ships [WWW Document]. URL <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MSC-99-MASS-scoping.aspx> (accessed 5.14.21).
- International Maritime Organization, 1986. Ships' Routing.
- International Maritime Organization, 1972. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea.
- International Maritime Organization, 1960. International Regulations for Preventing Collisions at Sea.
- International Maritime Organization, n.d. Convenio sobre el Reglamento internacional para prevenir los abordajes, 1972 (Reglamento de abordajes) [WWW Document]. URL <https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/COLREG.aspx> (accessed 5.14.20).
- Jonathan Amos, 2019. Autonomous boat makes oyster run.
- Ma, Y., Zhao, Y., Incecik, A., Yan, X., Wang, Y., Li, Z., 2021. A collision avoidance approach via negotiation protocol for a swarm of USVs. Ocean Eng. 224, 108713. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108713>
- Maritime Safety Committee, 2021a. MSC 103/J/5 Regulatory Scoping Exercise For The Use Of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) (No. 103rd session). MSC.
- Maritime Safety Committee, 2021b. MSC 103/5/5 Regulatory Scoping Exercise For The Use Of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) (No. 103rd session). MSC.
- Maritime Safety Committee, 2020. MSC 102/5/14 Estudio Exploratorio Sobre La Reglamentación Para El Uso De Buques Marítimos Autónomos De Superficie (MASS) (No. 102º periodo de sesiones). MSC.

- Ministro de Asuntos Exteriores de España, 1977. Instrumento de Adhesión de España al Convenio sobre el Reglamento Internacional para prevenir los abordajes, hecho en Londres el 20 de octubre de 1972. (No. BOE-A-1977-15605). Boletín Oficial del Estado, España.
- Norris, C.A., 2013. Legal Issues Relating to Unmanned Maritime Systems Monograph 87.
- Plant, G., 1996. The Collision Avoidance Regulations as a Regulator of International Navigation Rights: Underlying Principles and their Adequacy for the Twenty-first Century. *J. Navig.* 49, 377–393. <https://doi.org/10.1017/S0373463300013606>
- Porathe, T., 2019. Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) and the COLREGS: Do We Need Quantified Rules Or Is “the Ordinary Practice of Seamen” Specific Enough? *TransNav Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.* 13, 511–518. <https://doi.org/10.12716/1001.13.03.04>
- Statheros, T., Howells, G., Maier, K.M., 2008. Autonomous Ship Collision Avoidance Navigation Concepts, Technologies and Techniques. *J. Navig.* 61, 129–142. <https://doi.org/10.1017/S037346330700447X>
- Tam, C., Bucknall, R., 2013. Cooperative path planning algorithm for marine surface vessels. *Ocean Eng.* 57, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.09.003>
- U.S. Department, Of Homeland Security, United States Coast Guard, 1999. Navigation Rules (International-Inland).



ANEXO I.

Guía rápida de maniobras según el 72 COLREGs.

SITUACIÓN	BUQUE	ACCIÓN	PRIORIDADES POR TIPO DE BARCO (R18)	¿CUMPLE?
BUQUES A LA VISTA (R11)				
Alcance (R13) (>112.5°)	Alcanzando	Mantenerse apartado	<div style="position: absolute; top: 0; left: 0; width: 100%; height: 100%; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px); background-size: 100% 100%; background-position: 0 0, 0 0, 0 0, 0 0; background-repeat: repeat-x, repeat-x, repeat-x, repeat-x; background-attachment: fixed; background-color: transparent; border: none;"></div>	
	Siendo alcanzado	Sigue rumbo*		
Vuelta encontrada (R14)	Ambos	Caer a estribor	<ul style="list-style-type: none"> • MANTENERSE APARTADO (abordaje ya manifestado): Propulsión mecánica < velero < pesquero < sin gobierno y maniobra restringida. • NO ESTORBAR: todos, menos sin gobierno o con maniobra restringida a restringido calado • MANTENERSE ALEJADO: hidroaviones, WIG, motos acuáticas 	
Cruce (R15)	Tiene al otro por estribor	Evitar cortar proa		
	Tiene al otro por babor	Sigue rumbo*		
BUQUES NO A LA VISTA CON RADAR (R19)				
Alcance	Alcanzando	Mantenerse apartado	<div style="position: absolute; top: 0; left: 0; width: 100%; height: 100%; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px); background-size: 100% 100%; background-position: 0 0, 0 0, 0 0, 0 0; background-repeat: repeat-x, repeat-x, repeat-x, repeat-x; background-attachment: fixed; background-color: transparent; border: none;"></div>	
	Siendo alcanzado	Evitar un cambio de rumbo hacia el buque		
A proa del través		Evitar caer a babor		
A popa del través o al través		Evitar un cambio de rumbo hacia el buque		
BUQUES NO A LA VISTA SIN RADAR (R19)				
Sirena a proa del través		Reducir velocidad		



RESTRICCIONES ESPECIALES		ACCIÓN	PRIORIDADES POR TIPO DE BARCO (diferente a R18)	¿CUMPLE?
Canales angostos (R9)		Como buques a la vista, según situación y buque	NO ESTORBAR EL TRÁNSITO: Pesquero < velero y menos 20m eslora/buque que cruza < buque navegando con seguridad	
TSS (R10)		Como buques a la vista, según situación y buque	NO ESTORBAR EL TRÁNSITO: Pesquero < velero y menos 20m eslora < buque navegando con seguridad	
	ITZ		SÓLO PUEDEN NAVEGAR: buques E<20m, vela y pesca; en ruta a puerto; para evitar peligro	
	Zona de separación		SÓLO PUEDEN NAVEGAR: pesca o para evitar peligro	

- * R17-Actuar para evitar abordaje con propia maniobra si el otro buque no está actuando.



ANEXO II.

A collision avoidance approach via negotiation protocol for a swarm of USVs.

Enlace Scopus:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85101174239&doi=10.1016%2fj.oceaneng.2021.108713&partnerID=40&md5=085ebbb65a6b9ed0a34d31005fc8b18c>

Ocean Engineering 224 (2021) 108713



Contents lists available at ScienceDirect

Ocean Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/oceaneng



A collision avoidance approach via negotiation protocol for a swarm of USVs

Yong Ma^{a,b}, Yujiao Zhao^a, Atilla Incecik^c, Xinping Yan^{d,**}, Yulong Wang^a, Zhixiong Li^{e,f,*}

^a School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei, 430063, China

^b Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan, Hubei, 430063, China

^c Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, G11XQ, UK

^d National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei, 430063, China

^e School of Engineering, Ocean University of China, Tsingtao, 266110, China

^f Yonsei Frontier Lab, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 03722, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Keywords:

Unmanned surface vehicles
Negotiation protocol
Encounter situation division
Collision avoidance ad-hoc network
Complex collision avoidance

ABSTRACT

For solving collision avoidance issue of a swarm of unmanned surface vehicles (USVs) under complex situations, a collision avoidance approach using a negotiation protocol for USVs is proposed. To fulfill the collision avoidance, we first discuss the maneuverability, encounter situation division. Then, a collision avoidance ad-hoc network is constructed for the negotiation communication between USVs. Moreover, to cope with complex collision avoidance situations, an USV negotiation protocol is designed. Simulations under generous complex scenarios are carried out to validate the effectiveness of our approach. Results verify that our approach is effective and reliable for resolving the problem of a swarm of USVs collision avoidance.

1. Introduction

Along with continuous development of emerging intelligent control and motion planning technologies (Zhao et al., 2020), unmanned surface vehicle (USV) is featured by flexible maneuverability and excellent autonomy, and then is capable of autonomous navigation. Due to its huge potential applications, USV plays an ever-increasing important role in both military and civil fields, including maritime management, search and rescue, marine science survey, reconnaissance and attack mission, etc. (Ma et al., 2018; Zhao et al., 2019). During executing the above tasks at sea, it is significant that the safety of USV should be guaranteed. Consequently, automatic collision avoidance issues of the USV should be effectively stressed.

Many techniques have been generated for the collision avoidance problem of a single USV (Shi et al., 2019). Ref (Zhao et al., 2016) conducted an optimal collision avoidance method on the basis of vector obstacles for USV under the guidance of COLREGS rules, and validated its effectiveness by numerical simulation under elementary scenarios. From the perspective of unsymmetrical ship domain, encounter situations of USV were analyzed in (Johansen et al., 2016), which supplied an aid to the quantification of motion model and collision avoidance rules.

Ref (Ma et al., 2019) introduced a trajectory tracking control method for surface ship, and provided a reference for the motion control of USV. When it comes to collision avoidance problem of a swarm of USVs, lots of factors including maneuverability of the USV, motion state of the obstacle, navigation rules at sea should be addressed. With the increasing of the number of USVs, it is imperative to center the problem of distributed control (Peng et al., 2017). Under the guidance of navigation rules, a series of analyses on collision avoidance simulation for vessels was conducted in (Lušić and Čorić, 2015). Referring to collision avoidance strategy for USV, a decomposition-coordination method was put forward for simulating optimal steering angle while 4 vessels were approaching together (Zou, 2010). With the aid of fuzzy semantic knowledge method, environmental information was converted for analysis to generate a collision avoidance strategy eventually (Ali et al., 2015). Ref (Naeem et al., 2012) employed a PID system for USV motion control, and presented a collision avoidance strategy while subordinated to COLREGS rules. General ant colony optimization was adopted for planning collision avoidance paths for vessels at sea (Lazarowska, 2015), whereas the computation time was long and reached paths were unstable. Classical A* algorithm was utilized for collision avoidance in (Lee et al., 2004), wherein motion characteristics of obstacles were

* Corresponding author. School of Engineering, Ocean University of China, Tsingtao, 266110, China.

** Corresponding author.

E-mail addresses: xpyan@whut.edu.cn (X. Yan), zhixiong.li@yonsei.ac.kr, zhixiong.li.cumt@gmail.com (Z. Li).

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108713>

Received 7 May 2020; Received in revised form 11 November 2020; Accepted 5 January 2021

Available online 19 February 2021

0029-8018/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.



ANEXO III.

Cooperative path planning algorithm for marine surface vessels.

Enlace Scopus:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867414970&doi=10.1016%2fj.oceaneng.2012.09.003&partnerID=40&md5=08c9ea7af010fcdde5e3eabdf55da08f>

Ocean Engineering 57 (2013) 25–33



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Ocean Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/oceaneng

Cooperative path planning algorithm for marine surface vessels

CheeKuang Tam*, Richard Bucknall

Department of Mechanical Engineering, University College London, Torrington Place, London WC1E 7JE, United Kingdom

ARTICLE INFO

Article history:
Received 2 March 2012
Accepted 17 September 2012
Available online 13 October 2012

Keywords:
Path planning
Collision avoidance
Autonomous vessels

ABSTRACT

Effective and practical collision avoidance manoeuvres through traffic are still one of the major problems hindering the development and adoption of a fully autonomous vessel. There have been studies on the subject but the majority only consider the traffic from a single vessel perspective while the others utilised stochastic based algorithms which are not suitable for marine navigation which demands consistency. This paper describes the development of a deterministic path planning algorithm that computes a practical and COLREGS compliant navigation path for vessels which are on a collision course. The algorithm was evaluated with a set of test cases, simulating various traffic scenarios. Different aspects of the algorithm, such as the output consistency from different perspectives, practicality of the navigation path, computational performance as well as future work, are discussed.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Motivation

Research in autonomous surface vehicles has been gaining attention recently due to the increasing military need for reconnaissance in hostile environments and the maturity of the technology. However, one of the few remaining problems yet to be solved is the interaction of such vessel with other vessels at close range. This is mainly due to the nature of the collision prevention regulation (COLREGS) (COLREGS, 1972), which are general in nature and open to different interpretations particularly when more than two vessels are involved.

There have been previous studies in close range path planning algorithms (Tam et al., 2009; Statheros et al., 2008), the more practical studies *i.e.* Smierzchalski (1999) used evolutionary algorithm based models to compute the optimal path. However, these studies focused solely on computing the collision free path of minimum length without explicit consideration of the path compatibility with other vessels as well as the algorithm completeness and consistency. Another study (Szlapczynski, 2006) adopted a maze routing algorithm with turning penalty, it was constructed based on rasterised maps and did not address the dynamic properties of the vessel. On the other hand, the majority of the reviewed studies were evaluating the traffic scenario from the 'first person' perspective, assuming the vessel under the control of the algorithm is the sole manoeuvring party while other maintains their initial course.

Another observation worth mentioning is the time needed for the vessel to trigger evasive manoeuvres. Among the work

reviewed, the majority have assumed that the vessel only performs the collision avoidance action when it is at a certain distance away from the obstacle *i.e.* (Benjamin et al., 2006; Xue et al., 2011). This is mostly due to the structure of the algorithm, which determines the risk of collision only exist when obstacles are within pre-defined distance. Such manoeuvres are, in general, unrealistic and impractical as, in practice, most collision avoidance manoeuvres are planned and carried out as soon as the traffic and environmental situations become clear.

The authors have recently reported a path planning module using evolutionary algorithm as an attempt to address these issues (Tam and Bucknall, 2010a,b). In that study, a considerable amount of attention was focused on the output consistency of such a stochastic-based algorithm. The reported algorithm has been shown to be consistent by using specially constructed vector fields to direct the search routine towards the regions of interest. However, the algorithmic completeness of such an algorithm remains imperfect due to the presence of random variables in large quantities, which hinders its adoption for practical purposes as the properties of the algorithm outputs cannot be guaranteed. Additionally, the majority of the reported works generate an evasive manoeuvre to avoid an obstacle and the return to original track once the risk of collision is cleared. Such actions are unlikely to be practical as vessels generally proceed in the new course after the evasive manoeuvre unless it is too far off course. Furthermore, most evasive manoeuvres in practice are performed with single course deviation. It is unusual to have multiple course alterations even when multiple vessels are involved.

This paper reports the development of a deterministic path planning algorithm which computes the collision free path for all vessels involved as well as addressing the issues mentioned above. The main advantage of a deterministic algorithm over a

* Corresponding author. Tel.: +44 207 679 7063.
E-mail addresses: c.tam@ucl.ac.uk (C. Tam), r.bucknall@ucl.ac.uk (R. Bucknall).