



Universidad de Oviedo

Programa de Doctorado: ENERGÍA Y CONTROL DE PROCESOS

TESIS DOCTORAL

Planificación y desarrollo de funciones de seguridad para la prevención de colisiones en la mar

Autora: M<sup>a</sup> de los Reyes Poo Argüelles

Junio 2022



## RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DE FUNCIONES DE SEGURIDAD PARA LA PREVENCIÓN DE COLISIONES EN LA MAR	Inglés: DEVELOPMENT OF SAFETY FUNCTIONS FOR THE PREVENTION OF COLLISIONS AT SEA
2.- Autor	
Nombre: MARÍA de los REYES POO ARGÜELLES	DNI/Pasaporte/NIE:
Programa de Doctorado: ENERGÍA Y CONTROL DE PROCESOS	
Órgano responsable: CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO	

### RESUMEN (en español)

Los principales riesgos del transporte marítimo, responsable de más del 90% del total del transporte mundial, están vinculados a los accidentes. Las colisiones son uno de los tipos de siniestros más frecuentes, y que generan mayores daños a las personas, a los bienes y al medio ambiente. Entre los factores que más contribuyen a las colisiones entre buques se encuentran las acciones humanas erróneas: fallos en la supervisión (en la vigilancia o en la adopción de medidas evasivas tempranas), incorrecta interpretación del Reglamento Internacional para la Prevención de Abordajes (COLREGs) y falta de comunicación entre los buques afectados. Ello indica la conveniencia de desarrollar un sistema de prevención de colisiones orientado a los operadores encargados de la maniobra a bordo, los oficiales de guardia de navegación (OONWs, *Officers Of a Navigational Watch*).

Un buque moderno está equipado con dispositivos y sistemas avanzados que proporcionan información al operador respecto al buque propio y a los buques próximos. Por ejemplo, valores medidos mediante GPS (*Global Positioning System*) o INS (*Inertial Navigation System*), datos de obstáculos captados por el ARPA (*Automatic RADAR (RADio Detection And Ranging) Plotting Aid*) y valores estáticos y dinámicos recibidos vía AIS (*Automatic Identification System*).

Esta información puede ser tratada y presentada de forma que facilite a los OONWs la toma de decisiones. Se puede calcular y mostrar, con un adecuado HMI (*Human Machine Interface*), la distancia, demora, CPA (*Closest Point of Approach*) y TCPA (*Time to CPA*) de cada buque próximo (*target* o blanco), e indicar las posibles maniobras a realizar, ayudando así a reducir la probabilidad de accidentes por colisiones debidos al error humano.

El sistema que se desarrolla en esta tesis se plantea, precisamente, para reducir el riesgo de colisión entre dos buques, el buque propio y cada uno de N blancos (casos 1-1, 1-N).

Además de ayudar a los operadores en la toma de decisiones, la información mencionada puede utilizarse en sistemas autónomos (buques no tripulados): en lugar de informar al OONW, el sistema PE (Programable Electrónico) calcularía y enviaría las señales de consigna (rumbo y velocidad) correspondientes a las maniobras a realizar al nuevo sistema de control encargado de que dichas maniobras sean automáticas, sin intervención del operador. Esta tesis se centra en el primer caso: sistemas con operador humano. Posteriormente se podrá estudiar su ampliación y adaptación para el caso de buques no tripulados.

Se desarrolla un sistema E/E/PE (Eléctrico, Electrónico, Programable Electrónico) relacionado con la seguridad que proporciona a dos buques en riesgo de colisión las instrucciones correctas y coordinadas de las maniobras a realizar.

El desarrollo del sistema se apoya en normativas sobre seguridad funcional. Éstas proporcionan requisitos y planteamientos aplicables en la implementación de los sistemas (hardware + software) empleados para la reducción de la probabilidad de accidentes o fallos. Se han definido funciones de seguridad destinadas a reducir los riesgos del EUC (*Equipment Under Control*) con respecto a un evento peligroso específico. En este caso el EUC es el buque



o conjunto de buques, y el evento peligroso principal se dará cuando se detecte que el CPA entre el buque propio y otro buque es menor que una distancia de seguridad dada. Las funciones de seguridad que se desarrollan están orientadas a disminuir la probabilidad de errores de los OONWs en la detección de estas situaciones peligrosas y en las decisiones sobre las maniobras. El sistema E/E/PE no debe alterar el funcionamiento normal del EUC, ni otras medidas de seguridad implantadas.

El hardware propuesto y requerido en cada buque es:

- 1 PLC (*Programmable Logic Controller*) como sistema PE encargado de los cálculos y diálogos entre buques.
- 1 AIS, para adquisición de datos y como canal de comunicaciones.
- 1 ordenador, para la interfaz con el operador y el almacenamiento de la información en una base de datos.

En función de los datos estáticos y dinámicos recibidos desde el AIS, el PLC de cada buque calcula distancias, demoras, CPA y TCPA con relación al resto de buques próximos y las maniobras a realizar basándose en las reglas COLREGs. Los PLCs se comunican enviando y recibiendo los datos de las maniobras y las señales de los OONWs, comparan los resultados de los cálculos de cada uno y llegan a decisiones comunes o bien comunican los desacuerdos.

Las comunicaciones conllevan **diálogo** entre los buques (entre los sistemas PE) y **acuerdos** en 2 niveles:

**Nivel 1:** Acuerdos entre los sistemas PE con respecto a la información recibida y procesada. El sistema PE de un buque comunica, al sistema PE de cada uno de los buques que estén próximos, la información que tiene disponible relacionada con el mismo. Cada buque compara la información recibida con la propia. Si hay diferencias entre los datos que manejan, avisan a los OONWs. Este intercambio de información permite detectar posibles errores en la captación de datos, y verificar que todos disponen de la misma información.

**Nivel 2:** Acuerdos entre operadores. Si se cumplen los acuerdos del nivel 1, el sistema PE de cada buque se encarga de informar a su operador de las posibles maniobras a realizar (calculadas a partir de la información disponible), de solicitar al operador la decisión respecto a la maniobra a realizar, de comunicar esta decisión al sistema PE del otro buque implicado, de comunicar al operador propio la decisión del operador de dicho buque, y de que la decisión final sea correcta y esté consensuada.

Para determinar la propuesta de maniobra, se ha realizado un análisis de todos los posibles escenarios y situaciones según COLREGs, que es el marco legal actual que define las reglas de rumbo y gobierno que deben aplicarse para evitar situaciones críticas que puedan derivar en colisión.

Se han definido los mensajes para la información y acuerdos entre los OONWs que incluyen todos los escenarios y situaciones. Con mensajes estandarizados sin ambigüedades se pueden evitar algunos problemas, como los derivados de una comunicación errónea debida a la falta de un lenguaje común o a un limitado dominio del inglés.

Se han desarrollado dos versiones del modelo: un **Modelo Básico** para el chequeo del cálculo de situaciones y reglas a aplicar, y un **Modelo Completo**, en el que se añaden los diálogos, acuerdos y secuencias de estados en la comunicación entre buques. En el primero se utiliza un solo PLC (real o simulado), para el buque propio, y se definen una serie de buques próximos. En el segundo, fase previa del prototipo final, se utilizan varios PLCs, uno por buque. En cada PLC se lanza una copia del programa, con los datos de su buque. Como plataforma de desarrollo software de los modelos se ha utilizado en primer lugar CoDeSys, herramienta de programación de PLCs según la norma IEC 61131-3, que es independiente del hardware. También se ha realizado una implementación con la herramienta software PCWorX, que ha permitido chequear los programas en PLCs reales, en concreto de la serie ILC de Phoenix Contact.

Las comunicaciones de los mensajes AIS entre los buques se han simulado mediante comunicaciones OPC (*Open Platform Communications*). Se trata de una simulación simple,



pero suficiente para hacer las pruebas sin disponer de equipos AIS reales.

El desarrollo de los modelos de la simulación del movimiento y velocidad de una embarcación se ha hecho siguiendo la norma UNE-EN ISO 11674:2002, "Embarcaciones y tecnología marina. Sistemas de control de rumbo. Anexo A: Simulador de movimiento de la embarcación".

Se han realizado múltiples pruebas de verificación de la lógica del programa hasta su exhaustiva depuración.

La principal novedad aportada por esta tesis radica en que el sistema planteado permite que los OONWs conozcan de antemano si están de acuerdo o no en las maniobras a realizar y actúen en consecuencia. La posibilidad de compartir y contrastar esta información ayuda a tomar decisiones de forma coherente. Si hay discrepancia, se pueden aumentar los márgenes de seguridad y, en caso de litigio, se puede identificar la decisión errónea.

El sistema puede actuar como un medio disponible para que un buque mantenga una vigilancia adecuada, y proporciona una evaluación de la situación y del riesgo de colisión, en apoyo de la regla 5 del COLREG: "Todos los buques mantendrán en todo momento una eficaz vigilancia visual y auditiva, utilizando asimismo todos los medios disponibles que sean apropiados a las circunstancias y condiciones del momento, para evaluar plenamente la situación y el riesgo de abordaje".

Se han propuesto ampliaciones al trabajo desarrollado, a corto, medio y largo plazo:

- A corto plazo, incorporación de AIS clase A, mejoras en el HMI y pruebas en entornos reales para completar y validar el prototipo desarrollado.
- A medio plazo, realización de estudios sobre características dinámicas de los buques (curvas de evolución, parámetros de seguridad, etc), e incorporación de las correspondientes mejoras en el software.
- A largo plazo, análisis de la aplicabilidad y posibles soluciones para escenarios con riesgos de colisiones múltiples (casos N-N).

## RESUMEN (en Inglés)

Maritime casualties are a major threat to maritime transport, which is responsible for more than 90% of total world transport. Collisions are one of the most frequent and damaging types of accidents for people, property and the environment. Among the main contributing factors to ship collisions, according to the corresponding analyses, are erroneous human actions: failures in monitoring (in surveillance or in the adoption of early avoidance measures), incorrect interpretation of the International Regulations for the Prevention of Collisions (COLREGs) and lack of communication between the concerned ships. It therefore seems appropriate to develop a Decision Support System/Collision Avoidance System (DSS/CAS) from the perspective of the Officer Of a Navigational Watch (OONW).

A modern ship is equipped with advanced devices and systems that provide information to the OONW regarding the own ship and nearby ships. For example, values measured by GPS (Global Positioning System) or INS (Inertial Navigation System), obstacle data captured by ARPA (Automatic RADAR (RADAR Detection And Ranging) Plotting Aid) and static and dynamic values received via AIS (Automatic Identification System).

This information can be processed and presented in a way that facilitates decision making by OONWs. It is possible to calculate and display with an appropriate HMI (Human Machine Interface) the distance, bearing, CPA (Closest Point of Approach) and TCPA (Time to CPA) of each nearby vessel (target), and indicate the possible manoeuvres to be carried out, thus helping to reduce the probability of collisions due to human error.

The system developed in this thesis is designed to reduce the risk of collision between two ships, the own ship and each of N targets (1-1, 1-N).

In addition to assisting the OONW in their decision making, the mentioned information can be used in autonomous systems (MASS, Maritime Autonomous Surface Ships): instead of





informing the officer, the PE (Programmable Electronic) system would calculate and send the set point signals (course and speed) corresponding to the manoeuvres to be carried out to the control system responsible for automatizing these manoeuvres. This thesis focuses on the first case: systems with a human operator. Subsequently, its extension and adaptation to the case of unmanned ships might be studied.

An E/E/PE (Electric, Electronic, Programmable Electronic) system related to safety is developed to provide two ships at risk of collision with the correct and coordinated instructions for the manoeuvres to be carried out.

The development of the system is based on functional safety standards. These provide applicable requirements and approaches for the implementation of the systems (hardware + software) used to reduce the probability of accidents or failures.

Safety functions have been defined to reduce the risks of the EUC (Equipment Under Control) with respect to a specific hazardous event. In this case the EUC is the ship or group of ships, and the main hazardous event will occur when the CPA between the own ship and a target is detected to be less than a given safe distance. The safety functions that are developed are oriented to diminish the probability of errors of the OONWs in the detection of these dangerous situations and in the decisions on the manoeuvres.

The E/E/PE system must not alter the normal operation of the EUC, nor other implemented safety measures.

The hardware required on each vessel is:

- 1 PLC (Programmable Logic Controller) as the PE system in charge of the calculations and dialogues between ships.
- 1 AIS, for data acquisition and as a communication channel.
- 1 computer (PC), to interface with the operator and to store the information in a database.

Based on the static and dynamic data received from the AIS, the PLC of each ship calculates distances, bearings, CPA and TCPA related to the rest of the ships in the vicinity and the manoeuvres to be carried out based on the COLREGs. The PLCs communicate by sending and receiving the data of the manoeuvres and the signals of the OONWs, compare the results of their calculations and arrive at common decisions or communicate the disagreements.

Communications involve **dialogues** between ships (between PE systems) and **2-level agreements**:

**Level 1:** Agreements between the PE systems with regard to the information received and processed. The PE system of a ship communicates to the PE system of each of the ships with which there is a close-quarters encounter the information it has available related to that target. Each ship's PE system compares the information received with its own. If there are differences between the data they handle, they notify the OONWs. This exchange of information allows the detection of possible errors in data collection, and to verify that they all have the same information.

**Level 2:** Agreements between OONWs. If Level 1 agreements are fulfilled, the PE system of each ship is responsible for informing its operator about the possible manoeuvres to be carried out, calculated from the available information, for requesting the operator's decision regarding the suggested manoeuvre, for communicating this decision to the PE system of the other ship involved, for communicating to its own operator the decision of the operator of that target and for ensuring that the final decision is correct and consensual.

In order to determine a manoeuvre proposal, an analysis of all possible scenarios and situations has been carried out according to COLREGs, the current legal framework that must be applied to avoid critical situations that could lead to a collision.

Messages for information and agreements between OONWs have been defined for all scenarios and situations. With unambiguous standardized messages, some problems can be avoided, such as those resulting from miscommunication due to lack of a common language or limited command of English.



Two versions of the model have been developed: a **Basic Model** for checking the calculation of situations and rules to be applied, and a **Complete Model**, in which the dialogues, agreements and step sequences in the communication between ships are added. In the first one, only one PLC is used (real or simulated), for the own ship, and a series of targets are defined. In the second, previous phase of the final prototype, several PLCs are used, one per ship. In each PLC a copy of the program is launched, with the data of its ship.

CoDeSys, an IEC 61131-3-compliant PLC programming tool that is independent of the hardware, was used as the software development platform. The models have also been implemented with the software tool PCWorX, which has enabled the programs to be checked on real PLCs.

The communications of the AIS messages between the ships have been simulated by means of OPC (Open Platform Communications). This is a simple simulation, but enough to perform the tests without having real AIS equipment.

The development of the models for the simulation of the movement and speed of a ship has been done following ISO 11674:2000, "Ships and marine technology — Heading control systems. Annex A: Ship motion simulator".

Multiple tests have been fulfilled to verify the logic of the program.

The main novelty of this thesis is that the proposed system allows the OONWs to know in advance if they agree or not with the manoeuvres to be carried out and to act accordingly. The possibility of sharing and contrasting this information helps to take decisions in a coherent way. If there is a discrepancy, the safety margins can be increased and, in case of dispute, the wrong decision can be identified.

The system can act as an available means to maintain adequate surveillance, and provides an assessment of the situation and the risk of collision, in support of COLREG rule 5: "Every vessel shall at all times maintain a proper look-out by sight and hearing as well as by all available means appropriate in the prevailing circumstances and conditions so as to make a full appraisal of the situation and of the risk of collision".

Extensions to the developed work have been proposed for the short, medium and long term:

- In the short term, incorporation of Class A AIS, improvements in the HMI and tests in real environments to complete and validate the prototype.
- In the medium term, studies on the dynamic characteristics of ships (evolution curves, safety parameters, etc.) and incorporating the corresponding improvements in the software.

In the long term, analysis of the applicability and possible solutions for scenarios with risks of multiple collisions (N-N cases).



## Índice general

1	Introducción .....	1
1.1	Objetivos .....	1
1.2	Equipamiento .....	3
1.2.1	AIS.....	4
1.2.2	Sistema PE .....	6
1.2.3	Software .....	7
1.3	Estructura de la Memoria.....	8
2	Colisiones entre buques: normativas, análisis de accidentes y sistemas anticollisión .....	9
2.1	Normativa sobre seguridad de buques .....	9
2.1.1	Convenios y Reglamentos .....	9
2.1.2	Metodología FSA .....	10
2.2	Sistemas anticollisión .....	13
2.2.1	Estadísticas y análisis de colisiones.....	13
2.2.2	Sistemas anticollisión actuales.....	14
2.2.3	Tendencias de los futuros sistemas anticollisión .....	16
3	Normas de seguridad funcional .....	19
3.1	Norma IEC 61508.....	19
3.1.1	Estructura de la norma IEC 61508.....	19
3.1.2	Justificación del uso de esta norma .....	21
3.1.3	Software relacionado con la seguridad.....	22
3.2	Norma IEC 61511.....	25
3.2.1	Estructura .....	26
3.2.2	Análisis de las capas de protección (LOPA) .....	27
3.2.3	Alarmas y capas de protección.....	32
3.3	Normas de gestión de sistemas de alarmas. ISA-18.2 – IEC-62682 .....	34
4	Análisis de escenarios y situaciones según COLREGs.....	37
4.1	<i>Overtaking</i> (Buque que alcanza) .....	39
4.2	<i>Head-On</i> (Vuelta encontrada) .....	40
4.3	<i>Crossing</i> (Cruce).....	41
4.4	Buques no a la vista (sección III).....	42
4.5	Restricciones .....	43
5	Comunicaciones AIS entre buques.....	47
5.1	Mensajes 1,2,3. Informes de posición.....	47
5.2	Mensaje 5. Datos estáticos y relativos al viaje del barco.....	48
5.3	Mensaje 6. Mensaje binario direccionado .....	51
5.4	Mensaje 7. Acuse de recibo binario .....	51

5.5	Sentencias NMEA .....	52
5.5.1	Transmisión de datos NMEA 0183 .....	52
5.5.2	Transmisión de datos NMEA 2000 .....	53
6	Especificación del sistema relacionado con la seguridad.....	55
6.1	Función de seguridad FS_DETECT .....	56
6.2	Comunicación entre los sistemas PE .....	58
6.3	Análisis de encuentros y mensajes de comunicación .....	59
6.4	Función de seguridad FS_MANOEV.....	67
6.4.1	PLCs y lenguaje SFC .....	68
6.4.2	Secuencia de etapas del diálogo entre 2 buques .....	69
6.5	Maniobras del buque propio .....	75
7	Diseño y desarrollo del software.....	79
7.1	Reglas de codificación y diseño modular .....	79
7.2	Funciones y bloques funcionales para cálculos básicos .....	80
7.2.1	Funciones de cambio de coordenadas .....	81
7.2.2	Funciones para creación de vectores .....	81
7.2.3	Bloques funcionales para manejo de vectores y rectas .....	82
7.2.4	Cálculos de CPA, TCPA y posibles situaciones de aproximación .....	85
7.3	Cálculos de maniobras del buque propio para CPA seguro .....	86
7.4	Cálculos de velocidades sobre el agua, STW ( <i>Speed Through Water</i> ) .....	88
7.5	Tipos de datos definidos.....	89
7.6	Tratamiento de datos AIS.....	91
7.6.1	FBs de lectura y almacenamiento de datos AIS.....	92
7.6.2	FBs de tratamiento de información dinámica .....	94
7.7	Diálogo entre buques .....	96
7.8	Bases de datos.....	98
7.9	Simulación del proceso.....	99
7.9.1	Simulación del movimiento y velocidad de una embarcación .....	99
7.9.2	Mensajes AIS.....	101
7.9.3	Presentación en pantalla .....	101
8	Pruebas del modelo.....	103
8.1	Chequeo del modelo BÁSICO .....	103
8.1.1	Ejemplo 1 - versión Básica .....	103
8.1.2	Ejemplo 2 - versión Básica .....	109
8.2	Chequeo del modelo COMPLETO.....	114
8.2.1	Características de la arquitectura.....	114
8.2.2	Ejemplo1 - versión Completa .....	116

8.2.3	Ejemplo2 - versión Completa .....	122
8.2.4	Ejemplo 3.....	127
8.3	Discusión de resultados.....	134
9	Conclusiones y ampliaciones.....	139
	REFERENCIAS.....	143
	Anexo 1. Abreviaturas y definiciones.....	153
	Anexo 2. Simulación del movimiento y velocidad de una embarcación.....	157
	Anexo 3. Publicaciones relacionadas con la Tesis .....	161





## Índice de Figuras

Figura 1.1. Esquema general de adquisición y comunicación de información .....	1
Figura 1.2. Capas de protección como métodos de reducción del riesgo .....	3
Figura 1.3. Protocolo de transmisión de datos AIS (IALA, 2016).....	4
Figura 1.4. Comunicaciones AIS .....	5
Figura 1.5. Esquema versión actual.....	7
Figura 2.1. Metodología FSA - Diagrama de flujo.....	12
Figura 2.2. Imágenes típicas de ECDIS(izda.), ARPA(centro) y AIS (derecha).....	14
Figura 3.1. Partes de la norma IEC 61508 y diagrama de aplicación.....	20
Figura 3.2. Modelo V del ciclo de vida de desarrollo del software .....	22
Figura 3.3. IEC 61511-Fases del ciclo de vida de seguridad .....	27
Figura 3.4. Esquema FTA .....	30
Figura 3.5. ETA sin funciones de seguridad.....	31
Figura 3.6. ETA con funciones de seguridad .....	32
Figura 3.7. Línea de tiempos de respuesta .....	33
Figura 3.8. Modelo de la respuesta del operador a una alarma .....	34
Figura 3.9. Ciclo de vida de una alarma .....	35
Figura 3.10. Diagrama de transición de estados de una alarma .....	36
Figura 4.1. Distancia y marcación.....	37
Figura 4.2. Velocidad relativa, CPA y TCPA .....	38
Figura 4.3. Overtaking, representación gráfica .....	39
Figura 4.4. Buque propio alcanza otro buque .....	40
Figura 4.5. Buque propio siendo alcanzado .....	40
Figura 4.6. Head-On, representación gráfica .....	41
Figura 4.7. Situaciones, buques a la vista.....	42
Figura 4.8. Buques a proa y a popa del través .....	43
Figura 6.1. Formato de FS_DETECT .....	58
Figura 6.2. Secuencia de la comunicación PE-PE.....	59
Figura 6.3. Símbolos para la representación de las maniobras.....	60
Figura 6.4. Situaciones y maniobras para escenarios de buques a la vista (COLREGs - Sección II) .....	61
Figura 6.5. Situaciones y maniobras para escenarios con visibilidad reducida.....	62
Figura 6.6. Esquema SFC .....	69
Figura 6.7. Estructura básica de la secuencia de etapas .....	70
Figura 6.8. Rama1 de la secuencia .....	71
Figura 6.9. Rama2 de la secuencia .....	72
Figura 6.10. Diagrama del comportamiento del sistema PE para cada blanco detectado .....	74
Figura 6.11. Situación de cruce, buques a la vista.....	75
Figura 6.12. Rumbos relativos para CPA=1 milla.....	75
Figura 6.13. Maniobra mediante cambios de rumbo, velocidad constante .....	76
Figura 6.14. Maniobra mediante cambios de velocidad, rumbo constante .....	76
Figura 6.15. Área de valores excluidos para maniobras seguras en rumbo y/o velocidad .....	77
Figura 6.16. Cálculos de STW .....	78
Figura 7.1. FBs y FUs para cálculos básicos .....	80
Figura 7.2. Coordenadas cartesianas (X,Y) y polares (Mod,Angle) .....	81
Figura 7.3. Vector en coordenadas polares a partir de 2 puntos en cartesianas.....	82
Figura 7.4. Suma de vectores en coordenadas polares.....	82

Figura 7.5. Resta de vectores en coordenadas polares.....	83
Figura 7.6. Rumbo y velocidad relativos .....	83
Figura 7.7. Punto de corte de 2 rectas .....	84
Figura 7.8. Ajuste de 3 puntos (X,Y) por mínimos cuadrados .....	84
Figura 7.9. Ajuste de 6 puntos (X,Y) por mínimos cuadrados .....	84
Figura 7.10. CPA y TCPA a partir de distancia, demora, velocidad relativa y rumbo relativo.....	85
Figura 7.11. Cálculos de rumbos para maniobras del buque propio .....	87
Figura 7.12. Cálculos de rumbos para maniobras del buque propio, $S_T > S_O$ .....	87
Figura 7.13. Cálculos de velocidades para maniobras del buque propio.....	88
Figura 7.14. Tipos definidos.....	89
Figura 7.15. FBs y FUs para tratamiento de datos AIS .....	92
Figura 7.16. FBs para diálogo entre buques.....	96
Figura 7.17. Tablas de la base de datos y bloques funcionales de escritura (Phoenix Contact, 2021) .	99
Figura 7.18. FBs y FUs para simulación de los buques .....	99
Figura 8.1. Ejemplo1-vB, datos iniciales .....	104
Figura 8.2. Ejemplo1-vB, datos recibidos y calculados.....	105
Figura 8.3. Ejemplo1-vB, datos recibidos y calculados, con visibilidad reducida.....	106
Figura 8.4. Ejemplo1-vB, visualización de mensajes y ayudas a la maniobra, buques a la vista .....	106
Figura 8.5. Gráfico polar con la VO área para los vectores de velocidad del buque propio .....	107
Figura 8.6. Ejemplo1-vB, visualización de mensajes y ayudas a la maniobra, visibilidad reducida ....	107
Figura 8.7. Ejemplo1-vB, BLUE maniobrando.....	108
Figura 8.8. Ejemplo1-vB, ya sin prealerta.....	109
Figura 8.9. Ejemplo2-vB, datos iniciales .....	110
Figura 8.10. Ejemplo2-vB, datos recibidos y calculados, t1 .....	110
Figura 8.11. Ejemplo2-vB, datos recibidos y calculados, t2 .....	111
Figura 8.12. Ejemplo2-vB, con situación de prealerta, t3 .....	111
Figura 8.13. Ejemplo2-vB, con dos situaciones de prealerta, t4 .....	112
Figura 8.14. Ejemplo2-vB, visualización de los mensajes a enviar y valores para maniobras .....	113
Figura 8.15. Gráfico polar con la VO área para BLUE respecto a PINK y LIGHT BLUE .....	114
Figura 8.16. Arquitectura de prueba del modelo para 3 buques.....	115
Figura 8.17. Ejemplo1-vC, datos iniciales .....	117
Figura 8.18. Ejemplo1-vC, datos recibidos y calculados por cada PLC (0,1,2).....	119
Figura 8.19. Ejemplo1-vC, visualización de mensajes y ayudas a la maniobra, para SHIPBLUE .....	119
Figura 8.20. Ejemplo1-vC, mensajes de los PLCs a los operadores .....	120
Figura 8.21. Ejemplo1-vC, visualizaciones en los 3 buques mientras BLUE está maniobrando.....	122
Figura 8.22. Ejemplo2-vC, datos iniciales .....	123
Figura 8.23. Ejemplo2-vC, visualización de las situaciones .....	123
Figura 8.24. Ejemplo2-vC, datos recibidos y calculados por cada PLC (0,3,2,1), t1 .....	124
Figura 8.25. Ejemplo2-vC, datos recibidos y calculados por PLC0 y PLC1, t2.....	125
Figura 8.26. Ejemplo2-vC, datos recibidos y calculados por PLC1, con situación de prealerta .....	125
Figura 8.27. Ejemplo2-vC, mensajes del PLC1 (emisor) a su operador .....	126
Figura 8.28. Ejemplo2-vC, mensajes del PLC0 (receptor) a su operador .....	126
Figura 8.29. Ejemplo2-vC, mensajes de respuesta de PLC0 a PLC1 .....	126
Figura 8.30. Ejemplo2-vC, cálculo de maniobras e información para el operador de PINK .....	126
Figura 8.31. Ejemplo2-vC, mensajes de aviso de alerta .....	127
Figura 8.32. Ejemplo2-vC, mensajes del PLC1 a su operador.....	127

Figura 8.33. Ejemplo2-vC, mensajes a los operadores, indicando fin de acuerdo..... 127

Figura 8.34. Ejemplo3, situación inicial..... 128

Figura 8.35. Ejemplo3, datos iniciales..... 130

Figura 8.36. Ejemplo3, datos recibidos y calculados por cada PLC (0,1), t1 ..... 131

Figura 8.37. Ejemplo3, con situación de prealerta, t2 ..... 131

Figura 8.38. Ejemplo3, secuencia de mensajes de acuerdos ..... 132

Figura 8.39. Ejemplo3, mensajes de prealerta, visibilidad reducida..... 132

Figura 8.40. Ejemplo3, con situación de prealerta, t3. .... 133

Figura 8.41. Ejemplo3, secuencia de mensajes en caso de discrepancias entre PLCs..... 133

Figura 8.42. Ejemplo3, secuencia de mensajes, dPrealerta = 3 millas..... 134



## Índice de Tablas

Tabla 2.1. Algoritmos de prevención de colisiones.....	18
Tabla 3.1. Recomendaciones aplicables a los lenguajes de programación de PLCs .....	25
Tabla 3.2. SIL: probabilidad de fallo bajo demanda .....	26
Tabla 3.3. Informe LOPA.....	28
Tabla 3.4. Datos LOPA para riesgos de colisión.....	29
Tabla 4.1. Sectores de Head-On en la bibliografía .....	41
Tabla 4.2. Situaciones para los distintos escenarios, según visibilidad.....	43
Tabla 4.3. Estado de Navegación .....	44
Tabla 4.4. Restricciones geográficas y Reglas asociadas .....	45
Tabla 5.1. Mensajes 1,2,3.....	47
Tabla 5.2. Mensaje 5 .....	48
Tabla 5.3. Codificación ASCII de 6 bits.....	49
Tabla 5.4. Tipos de barco y tipos de carga .....	50
Tabla 5.5. Mensaje 6 .....	51
Tabla 5.6. Campo ID de aplicación del Mensaje 6.....	51
Tabla 5.7. Mensaje 7 .....	52
Tabla 5.8. Mensajes AIS y PGNs .....	54
Tabla 6.1. Datos a proporcionar por el OONW .....	57
Tabla 6.2. Información a mostrar.....	58
Tabla 6.3. Texto asociado a los mensajes definidos.....	63
Tabla 6.4. Mensajes de diálogo entre PLCs.....	66
Tabla 8.1. Distancia de reacción y maniobra a realizar .....	129





# 1 Introducción

## 1.1 Objetivos

El transporte marítimo es responsable de más del 90% del total del transporte mundial (UNCTAD, 2021). Se trata de una actividad estratégica para el desarrollo de las naciones, y cualquier hecho que perturbe su buen funcionamiento adquiere importancia desde el punto de vista de la seguridad.

Los accidentes marítimos, dentro de los hechos no deseados que alteran el normal acontecimiento de la actividad del transporte por mar, son analizados para evitar su posible repetición. Las colisiones entre buques son uno de los tipos de siniestros más frecuentes y que generan mayores daños a las personas, a los bienes y al medio ambiente. Entre los factores que más contribuyen a estas colisiones, según los análisis correspondientes, se encuentran las acciones humanas erróneas: fallos en la supervisión (en la vigilancia o en la adopción de medidas evasivas tempranas), incorrecta interpretación del Reglamento Internacional para la Prevención de Abordajes (COLREGs)<sup>1</sup> y falta de comunicación entre los buques afectados. Ello indica la conveniencia de desarrollar un sistema de prevención de colisiones orientado a los operadores encargados de las posibles maniobras anticollision a bordo, es decir, a los oficiales de guardia de navegación (OONWs, *Officers Of a Navigational Watch*).

Un buque moderno está equipado con dispositivos y sistemas avanzados que proporcionan información al OONW respecto al buque propio y a los buques próximos (*targets* o blancos). Por ejemplo, valores medidos mediante GPS (*Global Positioning System*) o INS (*Inertial Navigation System*), datos de obstáculos captados por el ARPA (*Automatic RADAR (RADio Detection And Ranging) Plotting Aid*) y valores estáticos y dinámicos recibidos vía AIS (*Automatic Identification System*).

Esta información puede ser tratada y presentada de forma que facilite al OONW la toma de decisiones. Se puede calcular y mostrar con un adecuado HMI (*Human Machine Interface*) la distancia, demora, CPA (*Closest Point of Approach*) y TCPA (*Time to CPA*) de cada buque próximo, e indicar las posibles maniobras a realizar, ayudando así a reducir la probabilidad de accidentes por colisiones debidos al error humano. La Figura 1.1 representa esta idea general.

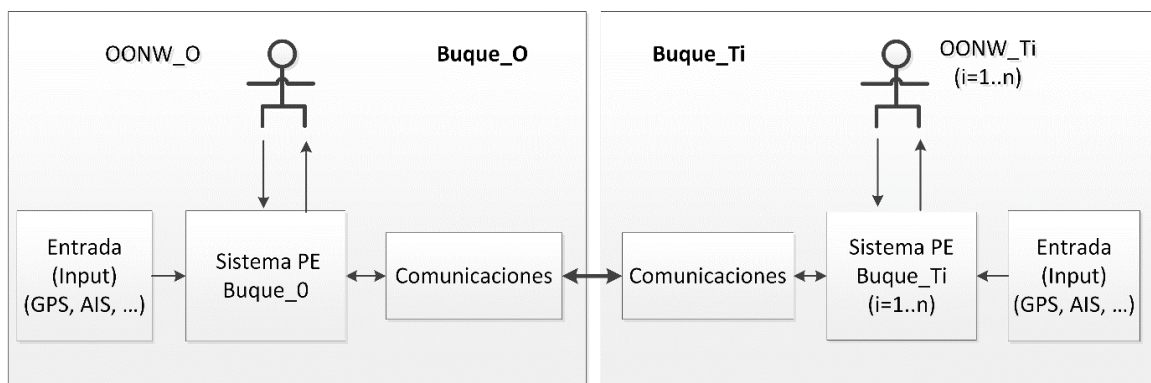


Figura 1.1. Esquema general de adquisición y comunicación de información

Además de ayudar al operador en la toma de decisiones, la información mencionada puede utilizarse en sistemas autónomos (buques no tripulados): en lugar de informar al OONW, el sistema PE (Programable Electrónico) calcularía y enviaría las señales de consigna (rumbo y velocidad) correspondientes a las maniobras a realizar al nuevo sistema de control encargado de que dichas maniobras sean automáticas, sin intervención del operador.

<sup>1</sup> Se utilizarán como sinónimos los términos *abordaje* y *colisión* (choque entre buques)

Este trabajo se centra en el primer caso: sistemas con operador humano. Posteriormente se podrá estudiar su ampliación y adaptación para el caso de buques no tripulados.

Se desarrollará un sistema E/E/PE (Eléctrico, Electrónico, Programable Electrónico) relacionado con la seguridad, con hardware/software redundante y distribuido, que proporcione a dos buques en riesgo de colisión las instrucciones correctas y coordinadas de las maniobras a realizar. En función de los datos estáticos y dinámicos recibidos desde el AIS, el sistema PE de cada buque calculará distancias, demoras, CPA y TCPA con relación al resto de buques próximos y las maniobras a realizar basándose en las Reglas COLREGs (BOE, 1977). Estos sistemas deben comunicarse de forma segura, enviando y recibiendo los datos de las maniobras y las señales de los OONWs (OK, NOT OK, ...), deben comparar los resultados de los cálculos de cada uno y llegar a decisiones comunes o bien comunicar los desacuerdos.

El sistema a desarrollar se plantea para reducir el riesgo de colisión entre dos buques, el buque propio y cada uno de N blancos (casos 1-1, 1-N). Este sistema servirá de base para posteriores estudios de escenarios con riesgos de colisiones múltiples (casos N-N).

Las comunicaciones conllevan **diálogo** entre los buques (entre los sistemas PE) y **acuerdos** en 2 niveles:

**Nivel 1:** Acuerdos entre los sistemas PE con respecto a la información recibida y procesada. El sistema PE de un buque ha de comunicar al sistema PE de cada uno de los buques con los que el CPA sea menor que una distancia de seguridad dada la información que tiene disponible relacionada con el mismo. Cada buque comparará la información recibida con la propia. Si hay diferencias entre los datos que manejan, avisarán a los OONWs. Este intercambio de información permite detectar posibles errores en la captación de datos y verificar que todos disponen de la misma información.

**Nivel 2:** Acuerdos entre operadores. Si se cumplen los acuerdos del nivel 1, el sistema PE de cada buque se encargará de informar a su operador de las posibles maniobras a realizar (calculadas a partir de la información disponible), de solicitar al operador la decisión respecto a la maniobra a realizar, de comunicar esta decisión al sistema PE del otro buque implicado, de comunicar al operador propio la decisión del operador de dicho buque, y de que la decisión final sea correcta y esté consensuada.

Es necesario implementar los algoritmos correspondientes y el protocolo de mensajes.

El desarrollo del sistema E/E/PE se apoyará en normativas sobre seguridad funcional. Éstas proporcionan requisitos y planteamientos aplicables en la implementación de los sistemas (hardware + software) empleados para la reducción de la probabilidad de accidentes o fallos. Se definirán funciones de seguridad destinadas a reducir los riesgos del EUC (*Equipment Under Control*) con respecto a un evento peligroso específico. En nuestro caso el EUC será el buque o conjunto de buques, y el evento peligroso principal se dará cuando se detecte que el CPA entre el buque propio y otro buque es menor que una distancia de seguridad dada. El sistema a desarrollar no debe alterar el funcionamiento normal del EUC, ni otras medidas de seguridad implantadas.

El capítulo 2 de esta memoria recoge un resumen del estado del arte en los sistemas de prevención de colisiones: los actualmente implantados y los algoritmos y proyectos de desarrollo de nuevos sistemas anticolidión. Respecto a estos métodos presentes y futuros, se puede decir que los objetivos planteados en esta tesis suponen dos innovaciones principales:

- El establecimiento del diálogo automático entre los buques para conocer y acordar las maniobras a realizar, teniendo como referencia el COLREGs.
- La programación del sistema basada en normas de seguridad funcional.

La seguridad funcional es un término introducido en la serie de normas IEC 61508 –“Seguridad funcional de los sistemas eléctricos/electrónicos/electrónicos programables relacionados con la seguridad”. Se refiere a la parte de la seguridad global de un sistema consistente en que sus componentes

o subsistemas E/E/PE, con implicaciones en materia de seguridad, respondan de forma adecuada ante cualquier estímulo externo (entrada), incluyendo errores humanos, fallos de hardware o cambios en su entorno. Esta norma es genérica, aplicable a cualquier sector. Trata los aspectos a tener en consideración cuando se utilicen E/E/PE para ejecutar funciones de seguridad. Uno de sus principales objetivos es el de facilitar el desarrollo de normas internacionales de producto y de aplicación sectorial basadas en ella.

De IEC 61508 deriva la norma IEC 61511-"Seguridad funcional – Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de proceso industrial". Esta norma es la implementación específica para el sector de procesos. Las actividades en las industrias de proceso comparten muchos de los riesgos que pueden encontrarse a bordo de los buques. La Figura 1.2 representa su modelo de capas de protección para reducir la probabilidad y las consecuencias de un evento peligroso.

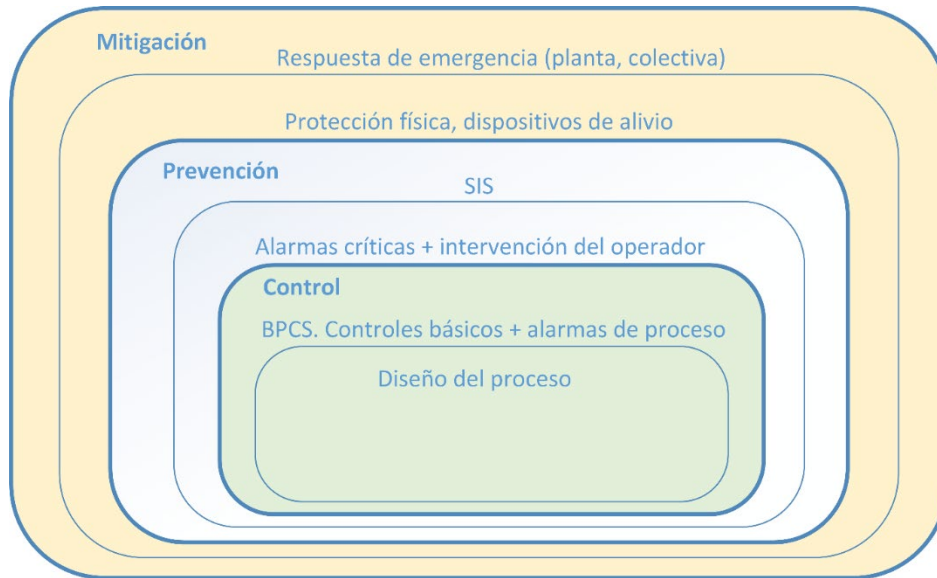


Figura 1.2. Capas de protección como métodos de reducción del riesgo

Cada capa de protección consiste en equipos o controles que funcionan en paralelo con las otras capas de protección para atenuar el riesgo del proceso. La capa más interna corresponde a la reducción de los riesgos considerados en la concepción y diseño del control del proceso. Las alarmas críticas son el siguiente nivel de protección activa y requieren la intervención del operador. Luego, si se requiere una mayor reducción en la probabilidad de eventos peligrosos, se agregan las capas llamadas Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS). Estas capas SIS, independientes del Sistema Básico de Control de Procesos (BPCS), implementan las funciones instrumentadas de seguridad. El resto de las capas corresponden a sistemas y medidas concebidas para mitigar los daños cuando el accidente ya se ha producido.

El sistema E/E/PE que se plantea en esta tesis se sitúa en la zona de Prevención, entre dos capas de protección, sin frontera definida: Alarmas de proceso con acción correctiva del operador, y Sistemas Instrumentados de Seguridad.

## 1.2 Equipamiento

Para desarrollar el sistema E/E/PE esquematizado en la Figura 1.1 se plantea el uso de equipos comunes en el entorno marino e industrial:

- Estaciones AIS para la adquisición de datos dinámicos del buque propio y de los buques próximos (posiciones, velocidades, rumbos, identificadores, etc.) y para las comunicaciones entre los mismos.

- PLCs (*Programmable Logic Controllers*, Autómatas Programables), dispositivos robustos y de uso generalizado en el control industrial, para ejecutar todos los cálculos y el intercambio de información programados.

Estos elementos hardware/software se describen someramente en los siguientes subapartados. Adicionalmente, se requerirá el uso de un ordenador, para la interfaz con el operador y el almacenamiento de la información en una base de datos.

### 1.2.1 AIS

AIS, o estación AIS, es un sistema de comunicaciones basado en protocolos TDMA (*Time-Division Multiple Access*) que utiliza canales VHF (*Very High Frequency*) para el intercambio de datos de navegación. El Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS, *Safety Of Life At Sea*), en su Regla 19.2.4 del Capítulo V (IMO, 2020), exige que se instalen AIS a bordo de todos los buques de arqueo bruto igual o superior a 300 que efectúen viajes internacionales, los buques de carga de arqueo bruto igual o superior a 500 que no efectúen viajes internacionales y todos los buques de pasajeros, independientemente de su tamaño.

Los canales utilizados se dividen en segmentos de tiempo que contienen una cantidad fija de datos (Figura 1.3). La comunicación se realiza mediante mensajes predefinidos que se intercambian entre los buques equipados con estaciones AIS a través de dos canales de frecuencias VHF: AIS1 (161.975 MHz) y AIS2 (162.025 MHz). Estos mensajes TDMA ocupan entre uno y cinco intervalos de tiempo consecutivos.

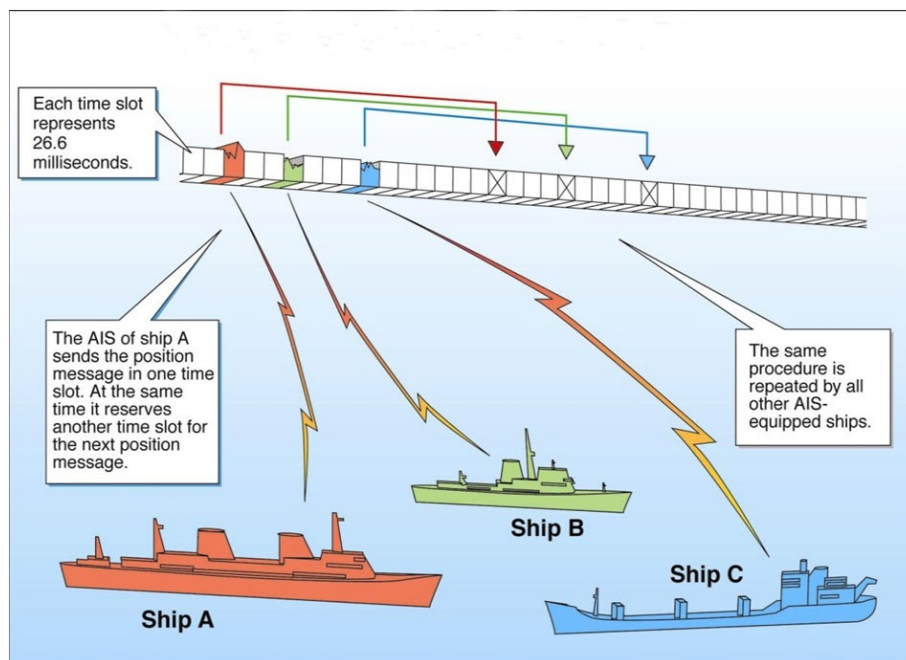


Figura 1.3. Protocolo de transmisión de datos AIS (IALA, 2016)

Hay 27 mensajes estándar aprobados por la UIT (UIT-R.M 1371-5, anexo 8) (ITU, 2014). La mayoría de ellos tienen que ver con la transferencia de información de navegación. Sin embargo, algunos mensajes son específicos de la aplicación o mensajes funcionales relacionados con el sistema.

A destacar los siguientes mensajes:

- Los mensajes tipo 1, 2, 3, 18 incluyen información dinámica de la posición del buque. Cada buque difunde esta información en intervalos variables entre 2 segundos y 3 minutos.

- Los mensajes tipo 5, 24 incluyen datos estáticos del buque. Cada buque difunde esta información en intervalos de 6 minutos.
- Los mensajes tipo 6, 12 incluyen mensajes binarios o de seguridad direccionados (no difundidos).
- Los mensajes tipo 7,13 son acuses de recibo (ACK, *ACKnowledgments*) asociados a los mensajes 6,12.
- Los mensajes tipo 8, 14 incluyen mensajes binarios o de seguridad difundidos.

La Recomendación UIT-R M.1371-5 describe dos tipos de AIS: Clase A que se emplea en buques grandes y Clase B, para barcos más pequeños. Los equipos móviles a bordo de barco de la Clase A deberán cumplir los requisitos pertinentes de transporte del AIS de la OMI. Estos AIS clase A pueden emitir y recibir mensajes binarios y de seguridad. Hay dos variantes de AIS clase B: clase B-CS (*Carrier-Sense*) y clase B-SO (*Self-Organizing*) tienen restricciones en la transmisión de estos mensajes. Los mensajes 1,2,3,5 son difundidos por AIS clase A. Los mensajes 18, 24 son difundidos por AIS clase B, y contienen menos información que los mensajes 1,2,3,5 de la clase A.

Para este trabajo son necesarias estaciones AIS clase A, dispositivos apropiados para la adquisición de datos y las comunicaciones a implementar (Felski *et al.*, 2015).

Además del protocolo TDMA utilizado para el intercambio de información a través de la radio VHF, las estaciones AIS utilizan interfaces digitales marítimas y estándares de comunicación de datos para el intercambio de datos con otros dispositivos, sistemas o redes (ver Figura 1.4). Esto facilita la visualización y el uso de la información AIS a bordo del buque.

A través de estas interfaces digitales, el AIS de un buque comunicará al sistema PE los datos de navegación (estáticos y dinámicos) propios y los recibidos de otros buques por los canales VHF, además de los mensajes binarios o de seguridad que se definan. Esta comunicación digital se realiza mediante sentencias o grupos de parámetros (PGN) codificados siguiendo estándares NMEA (*National Marine Electronics Association*) (NMEA 0183, 2020; NMEA 2000, 2020).

- NMEA 0183 (IEC 61162-1) – Comunicación serie. *Single Talker/Multiple Listener* (4.8 Kbps)
- NMEA 0183 HS (IEC 61162-2) – (38.4 Kbps)
- NMEA 2000 (IEC 61162-3) – Red basada en CAN (*Controller Area Network*). *Multiple Talker/Multiple Listener* (250 Kbps)

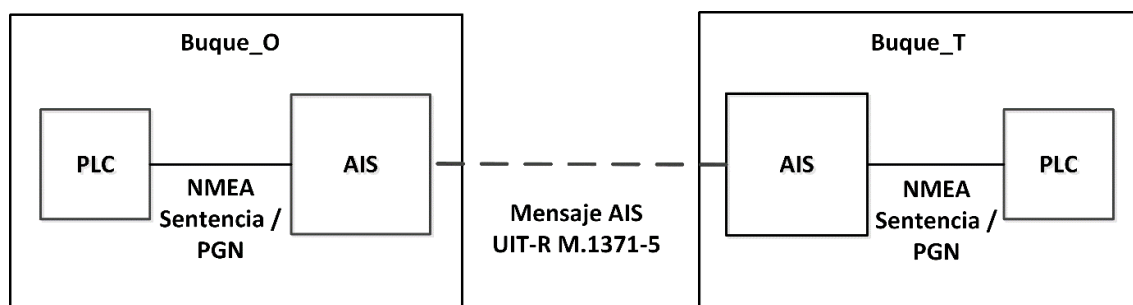


Figura 1.4. Comunicaciones AIS

La idea de usar el AIS como dispositivo para la comunicación entre OONWs no es nueva. Los mensajes tipo 6, 7, 8, y 12, 13, 14 tienen esta finalidad. Así, la Resolución A.1106(29) de la Organización Marítima Internacional (IMO, *International Maritime Organization*) (IMO, 2015), en su anexo *AIS Information sent by Ships, Short Safety Related Messages*, indica que estos son mensajes de texto fijos



o en formato libre dirigidos a un destino específico (mensaje tipo 12) o a todos los buques de la zona (mensaje tipo 14). Su contenido debe ser relevante para la seguridad de la navegación, por ejemplo, un iceberg a la vista o una boya que no esté en la situación. El sistema permite hasta 158 caracteres por mensaje, pero cuanto más corto sea el mensaje, más fácilmente encontrará espacio libre para su transmisión. En la actualidad, estos mensajes no están más regulados para mantener abiertas todas las posibilidades. El operador debe asegurarse de que muestra y considera los mensajes de seguridad entrantes y debe enviar los mensajes de seguridad necesarios.

La circular SN/Circ.236 de la IMO (IMO, 2004), en su anexo 1, indica que el AIS puede utilizar mensajes binarios como medio para ciertos tipos de comunicación limitada. Estos mensajes se dedicarán a aplicaciones específicas, que deberán ser aprobadas por la IMO. Los mensajes binarios pueden ser dirigidos (tipo 6) o de difusión (tipo 8). Los mensajes binarios pueden ser generados manual o automáticamente. Se pueden utilizar formularios predefinidos para cada tipo de mensaje binario para generar fácilmente el mensaje.

Tijardovic (2009) sugiere una serie de avisos que el OONW de un buque podría enviar al oficial de otro buque, mediante estos mensajes direccionados binarios o de seguridad, si supone que se encuentra en una situación con cierto riesgo de colisión, indicando sus intenciones de maniobra. Si el otro oficial no responde al mensaje o responde que no está de acuerdo con la propuesta, se le llama por el canal 16.

A nivel educativo, se han encontrado en la web 2 proyectos de grupos de Estudiantes del Departamento de Sistemas Electrónicos de la Universidad de Aalborg sobre el tema *Digital and Analog Systems Interacting with the Surroundings* (DASIS, 2011; DASIS, 2012). Estos trabajos se plantearon como ejemplos de programación de algoritmos simples de resolución de situaciones de colisión entre dos buques y de sockets para la simulación de la comunicación, tipo AIS, entre los dos buques.

### 1.2.2 Sistema PE

El sistema PE se encargará de adquisición, tratamiento y comunicación de datos. Recibirá del AIS (mediante interfaz digital y sentencias NMEA 0183 o PGNs NMEA 2000) la información estática y dinámica del buque propio y de los buques próximos y los mensajes binarios o de seguridad recibidos. Recabará información del operador. Realizará los cálculos oportunos. Comunicará los datos calculados al operador del buque propio. Utilizará el AIS como canal de comunicaciones para enviar mensajes a los operadores del resto de buques. Almacenará en una base de datos la información relevante para futuras consultas. Y se encargará también de la ejecución de los algoritmos a implementar para el diálogo y acuerdos entre buques.

En un principio, se asume utilizar la misma estación AIS (clase A) disponible en el buque. Para aumentar la fiabilidad del sistema se podría dotar al mismo de un equipo AIS redundante.

Se ha decidido utilizar un PLC (*Programmable Logic Controller*, Autómata Programable) como sistema PE. La norma IEC 61131-1 (*Programmable controllers - Part 1: General information*) define al autómata programable como “una máquina electrónica programable diseñada para ser utilizada en un entorno industrial (hostil), que utiliza una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones orientadas al usuario, para implantar soluciones específicas tales como funciones lógicas, secuencias, temporizaciones, recuentos y funciones aritméticas, con el fin de controlar mediante entradas y salidas, digitales y analógicas diversos tipos de máquinas o procesos”.

Los PLCs pueden disponer de interfaces de entrada y de salida para todas las señales del proceso, digitales o analógicas, y para las comunicaciones con otros dispositivos. Son máquinas muy robustas, y también existen PLCs diseñados específicamente para aplicaciones de seguridad.

La Figura 1.5 refleja la estructura de la versión planteada, derivada de la imagen general de la Figura 1.1.

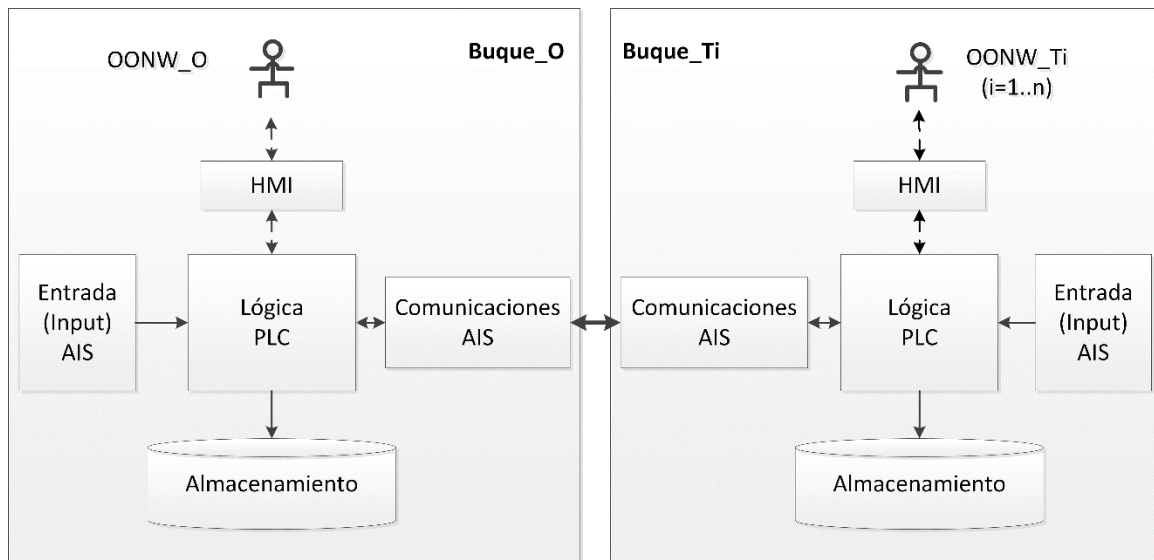


Figura 1.5. Esquema versión actual

### 1.2.3 Software

Los PLCs actuales se programan de forma estandarizada, en cumplimiento de la norma IEC 61131-3 (John & Tiegelkamp, 2010). Esta norma:

- Es un estándar aceptado internacionalmente.
- Define cinco lenguajes de programación de PLCs distintos: IL (*Instruction List*), FBD (*Function Block Diagram*), LD (*Ladder Diagram*), ST (*Structured Text*) y SFC (*Sequential Function Chart*).
- Define los distintos tipos de datos que se pueden utilizar.
- Estructura la programación utilizando tres tipos de unidades de organización (POU): Programas, Bloques Funcionales y Funciones.
- Permite independizar la lógica (programación) del hardware.
- Permite una realizar una programación segura y de calidad.

Se realizará la programación del sistema siguiendo los principios y reglas de codificación relacionadas con la seguridad (para cualquier lenguaje de programación) que aparecen en el Anexo C de la norma IEC 61508-7 (Seguridad funcional de los sistemas eléctricos/electrónicos/electrónicos programables relacionados con la seguridad. Parte 7: Presentación de técnicas y medidas).

En esta parte del trabajo se diseña el modelo software de la aplicación para el sistema PE. Este modelo incluye la estructura de datos y variables, el conjunto de módulos de organización del programa (POUs) y la configuración de tareas. Las POU desarrollarán algoritmos para tratamiento de datos AIS, para cálculos de valores dinámicos y de situaciones de colisión, y para la creación de los mensajes que indican a los OONWs las maniobras a realizar.

Es necesaria también la programación de un conjunto de POU para realizar la simulación de los procesos (movimiento de buques y comunicaciones) que permitan chequear el funcionamiento del software. Posteriormente se podrá realizar la integración de equipos de control (PLCs) comerciales y dispositivos AIS para poner en marcha un prototipo que permita el desarrollo de un conjunto de ensayos en un entorno real, extrayendo las conclusiones necesarias para la aplicación efectiva de la investigación desarrollada en esta tesis.

### 1.3 Estructura de la Memoria

El resto de la memoria se estructura de la siguiente forma:

- El capítulo 2 presenta el estado del arte relacionado con la prevención de colisiones entre buques.
- En el capítulo 3 se resumen las principales normativas sobre seguridad funcional en la industria de procesos, y la viabilidad de su aplicación a la prevención de colisiones de buques.
- El capítulo 4 se dedica al análisis e identificación de los posibles escenarios y situaciones según COLREGs. Cualquier sistema de prevención de colisiones (CAS, *Collision Avoidance System*) debe contar con el COLREGs, el marco legal actual, como fuente primaria para definir las situaciones que deben evitarse.
- En el capítulo 5 se describen en detalle los formatos de los mensajes AIS que se utilizarán en este proyecto.
- El capítulo 6 recoge la especificación de los requisitos de seguridad del sistema E/E/PE. Entre los principales factores que contribuyen a las colisiones de buques se encuentran los errores en la supervisión humana. El riesgo de colisión se reduciría si se corrigieran estos factores, mediante funciones de seguridad destinadas a:
  - Ayudar en la detección temprana de situaciones críticas en los encuentros entre buques.
  - Aumentar la probabilidad de realizar las maniobras adecuadas de acuerdo con COLREGs.
  - Mejorar la comunicación entre los OONWs.
- El capítulo 7 describe el diseño y desarrollo del modelo software de dichas funciones de seguridad.
- En el capítulo 8 se ilustran pruebas del modelo y se analizan los resultados obtenidos.
- El capítulo 9 presenta las conclusiones, las próximas labores de integración y validación y las futuras ampliaciones de esta investigación.

Como Anexos se incluye:

- Anexo 1: abreviaturas y definiciones utilizadas en la memoria.
- Anexo 2: desarrollo de los modelos de la simulación del movimiento y velocidad de los buques, siguiendo la norma UNE-EN ISO 11674:2002, “Embarcaciones y tecnología marina. Sistemas de control de rumbo. Anexo A: Simulador de movimiento de la embarcación”.
- Anexo 3: artículos publicados hasta la fecha, derivados de la investigación realizada.
  - El primero (Argüelles *et al.*, 2019) presenta el desarrollo de funciones de seguridad para la reducción del riesgo de colisión entre buques en alta mar ayudando al cumplimiento coordinado del COLREGs.
  - En el segundo (Argüelles *et al.*, 2021) se identifican todas las posibles situaciones, escenarios y estados de navegación en un encuentro entre dos buques y se define el formato de mensajes inequívocos para informar a los OONW de las maniobras a realizar. Se utiliza un ejemplo de encuentro entre dos buques que puede dar lugar a decisiones y maniobras dispares por parte de sus OONWs, y por tanto con alto riesgo de colisión.
  - El tercero (Argüelles *et al.*, 2022) se corresponde con el contenido de la presentación realizada en la 4th Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation (GMC, 2021).

## 2 Colisiones entre buques: normativas, análisis de accidentes y sistemas anticolidión

En este capítulo se hace una recopilación de información y publicaciones relacionadas con la seguridad en la navegación: normativas, análisis de accidentes, sistemas implantados de prevención de colisiones e investigaciones recientes sobre nuevos sistemas anticolidión.

### 2.1 Normativa sobre seguridad de buques

Se recogen en este apartado diversos Convenios, Reglamentos y Metodologías relacionados con la seguridad de buques, y se destacan los aspectos concernientes a la prevención de colisiones.

#### 2.1.1 Convenios y Reglamentos

La Organización Marítima Internacional (IMO) es un organismo especializado de las Naciones Unidas que promueve la cooperación entre Estados y la industria de transporte para mejorar la seguridad marítima y para prevenir la contaminación marina.

La organización fue creada por el Convenio de 6 de marzo de 1948. Actualmente está integrada por 171 Estados Miembros y tres Miembros Asociados.

Las disposiciones de los Convenios son de cumplimiento obligatorio para los Estados miembros.

Se pueden señalar como los Convenios de la IMO más reconocidos los siguientes:

- COLREGs, *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*, 1972.
- SOLAS, *Safety Of Life At Sea*, 1974.
- MARPOL, *Prevention of Pollution from Ships*, 1973. Modificado por los Protocolos de 1978 y 1997.
- STCW, *Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers*, 1978. Enmiendas de 1995 y de 2010 (Enmienda de Manila).

De los anteriores, se describirán someramente los dos primeros por cuanto son los que más influencia tienen en este trabajo.

El Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar, SOLAS (IMO, 2020) es el más relevante de todos los tratados internacionales sobre la seguridad de los buques. Este convenio incluye artículos que establecen las obligaciones generales, el procedimiento de enmienda y un anexo estructurado en 14 capítulos.

El Capítulo V – Seguridad de la Navegación, especifica las prescripciones de los servicios relacionados con la seguridad de la navegación tales como servicios y avisos meteorológicos, de vigilancia de hielos, de búsqueda y rescate, servicios hidrográficos, de notificación de buques y servicio de tráfico marítimo. Incluye además otras informaciones relativas al establecimiento y funcionamiento de las ayudas a la navegación, así como las prescripciones relativas a los sistemas y aparatos náuticos que se han de llevar a bordo (GPS, ARPA-RADAR, AIS, ...), empleo de los sistemas de control de rumbo o de la derrota, sobre el funcionamiento de los aparatos de gobierno, mensajes de socorro, señales de salvamento y código internacional de señales.

El Capítulo IX – Gestión de la seguridad operacional de los buques, contiene las prescripciones relativas a la gestión de la seguridad, obligando tanto a las compañías de explotación como a los propios buques al cumplimiento del Código Internacional de Gestión de la Seguridad IGS (*International Safety Management*, ISM Code) (IGS, 2019; ISM, 2020).

El Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes en vigor, denominado RIPA o COLREGs (COLLision REGulations), fue adoptado por la IMO en 1972 en sustitución de la versión de 1960. Consta de 6 Partes (A, B, C, D, E y F) que incluyen 41 Reglas y 4 Anexos:

- Parte A, Generalidades (Reglas 1 a 3).
- Parte B, Reglas de Rumbo y Gobierno (Reglas 4 a 19). Está dividida en 3 Secciones:
  - Sección I: Conducta de los buques en cualquier condición de visibilidad (Reglas 4 a 10),
  - Sección II: Conducta de los buques que se encuentren a la vista uno del otro (Reglas 11 a 18),
  - Sección III: Conducta de los buques en condiciones de visibilidad reducida (Regla 19).
- Parte C, Luces y Marcas (Reglas 20 a 31).
- Parte D, Señales Acústicas y Luminosas (Reglas 32 a 37).
- Parte E (Regla 38), Exenciones.
- Parte F (Reglas 39 a 41), de verificación del cumplimiento de las disposiciones del convenio.

Los anexos contienen requisitos técnicos relativos a:

- Anexo I. Luces y marcas y sus posiciones.
- Anexo II. Señales para buques pesqueros que faenan cerca unos de otros.
- Anexo III. Aparatos de señalización acústica.
- Anexo IV. Señales internacionales de peligro.

COLREGs es aplicable a: “todos los buques en alta mar y en todas las aguas que tengan comunicación con ella y sean navegables por los buques de navegación marítima” (BOE, 1977). Establece el comportamiento a seguir en situaciones conducentes a colisión o posible colisión. La Parte B, Reglas de Rumbo y Gobierno, es la que se sigue en este proyecto.

### 2.1.2 Metodología FSA

La metodología FSA (*Formal Safety Assessment*) surge como reacción al accidente de la plataforma petrolífera Piper Alpha, situada en el Mar del Norte, en 1988. Se produjo una explosión que supuso la muerte de 167 personas. La virulencia de la explosión y las trágicas consecuencias removieron las conciencias de los países implicados en las actividades marítimas y se decidió tomar medidas al respecto, para mejorar la seguridad de dichas actividades.

Se propuso la generación de una herramienta que permitiera evaluar nuevas normativas o comparar los cambios propuestos con las normas existentes. FSA, resultado de esta propuesta, permite un análisis de las cuestiones técnicas, operativas e incluso el elemento humano. También posibilita la evaluación del balance entre la seguridad y los costes, aspecto que ha sido muy discutido.

Mediante una circular del Comité de Seguridad Marítima, (MSC, *Maritime Safety Committee*) y del Comité de Protección del Medio Marino (MEPC), se aprobó la primera guía para su aplicación en el año 2002: MSC/Circ.1023/MEPC/Circ.392. Esta Guía ha sido enmendada posteriormente por dos circulares: MSC/Circ.1180-MEPC/Circ.474 y MSC-MEPC.2/Circ.5.

La circular que está actualmente en vigor es del año 2018, se identifica como MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2 ((IMO, 2018) y se titula “*Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process*”.

FSA se define como: “una metodología estructurada y sistemática, dirigida a mejorar la seguridad marítima, incluyendo la protección de la vida, la salud, el medio ambiente marino y los bienes, mediante el uso de análisis de riesgos y evaluación de costes y beneficios. FSA se puede utilizar como una herramienta para ayudar en la evaluación de nuevos reglamentos sobre seguridad y protección del medio marino o para hacer una revisión de regulaciones existentes.”

Varios son los autores que han utilizado esta herramienta en sus estudios de aspectos de la seguridad marítima (Rosqvist & Tuominen, 2004; Kontovas & Psaraftis, 2009; Psaraftis, 2012; Montewka *et al.*, 2014).

FSA consta de cinco pasos, más una etapa previa de definición del problema o asunto a considerar, resumidos en la Figura 2.1:

0. Definición del problema. El propósito es definir cuidadosamente el tema objeto de análisis en relación con el reglamento a revisar o desarrollar. La definición debe ser consistente con la experiencia operacional y las necesidades actuales, teniendo en cuenta todos los aspectos pertinentes, tales como:
  - especificación de las características del sistema, funciones y operaciones a realizar,
  - influencias y relación con el entorno,
  - historial de accidentes, incidentes y daños.
1. Identificación de peligros y de las situaciones o escenarios asociados, priorizados por nivel de riesgo específico para el problema que se examina. Para la clasificación de los riesgos se recomienda definir unos índices de frecuencia (o probabilidad) y de severidad (o consecuencias) en escala logarítmica.

$$\text{Riesgo} = \text{probabilidad} \times \text{consecuencias} \quad (2.1)$$

$$\log(\text{Riesgo}) = \log(\text{probabilidad}) + \log(\text{consecuencias}) \quad (2.2)$$

2. Análisis de riesgos. Investigación detallada de las causas y eventos iniciadores, y de las consecuencias de los peligros más importantes identificados en el paso 1. Se mencionan diversos métodos o herramientas que pueden utilizarse para llevar a cabo un análisis de riesgos:
  - FTA (*Fault Tree Analysis*), análisis de árbol de fallos.
  - ETA (*Event Tree Analysis*), análisis de árbol de eventos.
  - FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), análisis modal de fallos y efectos.
  - HAZOP (*HAZard and OPerability studies*), análisis funcional de operatividad.
  - WHAT IF *analysis technique*, análisis Qué ocurre si.
  - RCT (*Risk Contribution Tree*), árbol de contribución de riesgos.
  - Diagrama de influencia.
  - Red bayesiana.
  - Análisis de sensibilidad e incertidumbre.

La selección de uno u otro dependerá del ámbito de aplicación, de los peligros identificados, de los datos disponibles, etc. Las técnicas habituales son los árboles de fallos (FTA) y los árboles de eventos (ETA), combinados en un árbol de contribución de riesgos (RCT).

Un árbol de fallos es un diagrama lógico que muestra la relación causal entre los eventos (o sucesos) que, por separado o en combinación, provocan la aparición de un suceso de nivel superior, que puede



ser un tipo de accidente o un resultado peligroso no previsto. Los árboles de fallos pueden incluir causas relacionadas con factores humanos. Se utiliza para determinar la probabilidad del evento del nivel superior.

Un árbol de eventos es un diagrama lógico utilizado para analizar los efectos de un accidente, un fallo o un suceso imprevisto. El diagrama muestra el suceso iniciador y las posibles secuencias temporales de eventos adversos y acciones de salvaguardia para mitigar o prevenir sus efectos. Multiplicando la probabilidad del evento inicial por las probabilidades de éxito o de fracaso en cada trayectoria se obtiene la probabilidad de cada consecuencia.

El resultado del análisis permitirá centrar la atención en áreas de alto riesgo e identificar y evaluar los factores que influyen en el nivel de riesgo.

3. Opciones de control de riesgo. Elaboración de las medidas de regulación para controlar y reducir los riesgos identificados. Fundamentalmente, las medidas tratarán de reducir
  - la frecuencia de fallos o sucesos imprevistos mediante un mejor diseño, procedimientos, políticas de organización, formación, etc.;
  - el efecto de los fallos, con el fin de evitar accidentes;
  - las circunstancias en las que se pueden producir fallos; y
  - las consecuencias de los accidents.
4. Evaluación de costes y beneficios. Determinación de la rentabilidad de cada opción de control de riesgos.
5. Recomendaciones para la toma de decisiones. Información acerca de los peligros, los riesgos asociados y la rentabilidad de las opciones de control de riesgos.

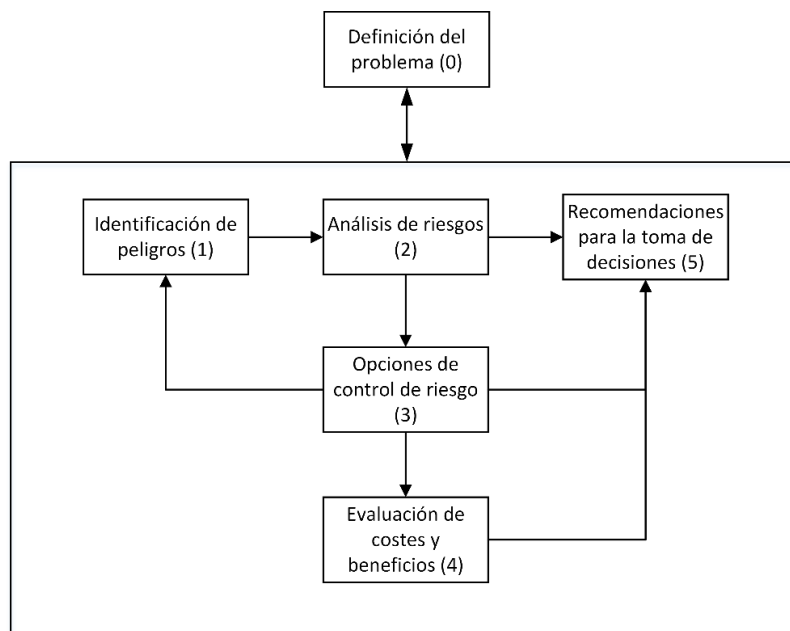


Figura 2.1. Metodología FSA - Diagrama de flujo

Una de las exigencias de esta metodología es la necesidad de evaluar la contribución del factor humano a un fallo del sistema. La forma más aceptada de incorporar el elemento humano en estudios de FSA es a través del uso del análisis de la fiabilidad humana HRA (*Human Reliability Analysis*) (Swain, 1990; IMO, 2018).

HRA encaja en el proceso global de la FSA de la siguiente manera:

0. Determinación de aspectos asociados al factor humano a considerar en el paso 0 de FSA. Estos pueden incluir factores personales (estrés, fatiga), de organización y liderazgo y de condiciones de trabajo y tareas a realizar,
1. Identificación de las formas y las áreas en que el error humano puede contribuir a accidentes durante las operaciones normales y de emergencia, en consonancia con el paso 1.
2. Evaluación de riesgos, incluyendo un análisis detallado de las tareas, de los errores humanos y una cuantificación de la fiabilidad humana, de acuerdo con la etapa 2.
3. Opciones de control del riesgo, de acuerdo con la etapa 3, para reducir las probabilidades y efectos de los fallos y las consecuencias de los accidentes asociados con la interacción del humano con el sistema.

Esta exigencia viene dada por el papel predominante que se le asigna al factor humano, en su vertiente de error humano, en la materialización de las consecuencias no deseadas dentro de la actividad marítima, en concreto en los accidentes e incidentes.

La IMO es muy consciente de papel protagonista que el factor humano o el elemento humano juega en la actividad marítima. Por ello es uno de sus ejes de su plan estratégico para los años 2018-2023. Tal como lo expresa la propia organización en la resolución adoptada en su Asamblea en el año 2017 (IMO, 2017):

*“The expansion of the global fleet and the acceleration in the development of new and advancing technologies increase the demands on the seafarers. IMO will take into account the human element in the review, development and implementation of new and existing requirements, including skills, education and training, and human capabilities, limitations and needs.”*

## 2.2 Sistemas anticolidión

Estos elementos surgen para dar respuesta a una de las necesidades que se evidencian en el análisis de los accidentes más habituales dentro de la actividad del transporte marítimo. Por ello, se estima necesario realizar una revisión de dichos accidentes.

### 2.2.1 Estadísticas y análisis de colisiones

Según el resumen anual de accidentes e incidentes marítimos publicado por la Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA, 2021), durante el período 2014-2020 se registraron un total de 12456 siniestros de buques, 2.3% de estos muy graves, 28.9% graves y el resto menos graves. Las colisiones suponen el 12.9% de estos accidentes y son los que presentan las consecuencias más graves. La misma fuente indica que el 60.6% de todos los sucesos accidentales investigados se atribuyeron a errores humanos.

Existen varios sitios web donde se pueden consultar informes de accidentes marítimos (JTSB, 2020; MAIB, 2020; MSIU, 2020; SHK, 2020; DMAIB, 2021). Los informes incluyen secciones de Sinopsis, Información Fáctica, Análisis, Conclusiones y Recomendaciones.

Numerosos trabajos, apoyados en análisis de accidentes marítimos, señalan al error humano como una de las principales causas (García Maza, 2000; Rothblum, 2000; Antão & Guedes Soares, 2008; Apostol-Mates & Barbu, 2016; Sánchez-Beaskoetxea *et al.*, 2021; Wróbel, 2021).

Se han publicado varias revisiones de datos estadísticos y análisis de accidentes marítimos (Goerlandt & Montewka, 2015; Eliopoulou *et al.*, 2016; Primorac & Parunov, 2016; Luo & Shin, 2019).

Focalizando la atención en las colisiones, existen trabajos que pretenden un análisis del origen de las mismas, como los que utilizan los enfoques de Análisis de Árboles de Fallos (FTA) (Uğurlu *et al.*, 2013),

Análisis de Factores Humanos y Sistema de Clasificación (Chauvin *et al.*, 2013), o Modelo de Red Bayesiana (Sotiralis *et al.*, 2016; Ung, 2019).

Los resultados que aportan estos análisis muestran que la mayoría de las colisiones se deben a la toma de decisiones equivocadas originadas principalmente por los errores de supervisión (no mantener una vigilancia adecuada, no tomar medidas tempranas), las violaciones del COLREGs y por la falta o fallos de comunicación entre barcos (Sotiralis *et al.*, 2016; Ung, 2019; Weng *et al.*, 2019; Yildirim *et al.*, 2019). Casos ilustrativos de estas causas se pueden encontrar en los informes de colisiones (como ejemplos, (Hibiscus-Hyundai, 2013; Hyundai-Sky, 2005; Katre-Statengracht, 2014; Kota Duta-Tanya Karpinskaya, 2014; Sinokor Incheon-Toshimaru, 2017; Spring-Josephine, 2013).

Los fallos de comunicación están relacionados principalmente con las ambigüedades, los malentendidos, los dispositivos inadecuados y la ausencia de una retroalimentación en la comunicación (Boström, 2020) que proporcione una respuesta a los mensajes emitidos. La radio VHF ha sido el único medio de comunicación durante años y su mal uso es un factor que ha contribuido a un importante número de accidentes (MCA, 2016).

### 2.2.2 Sistemas anticolidión actuales

Se han venido implantando sistemas a bordo con la finalidad de ayudar en la toma de decisiones a las personas responsables, para paliar los errores humanos mencionados en el apartado anterior. Se comenzó mediante la instalación de equipos individuales que se denominaron “ayudas electrónicas a la navegación”, orientadas a mejorar determinadas problemáticas que se pueden dar en una situación de colisión.

Más adelante, se vio la necesidad de coordinar esos equipos para poder facilitar la información de una forma ergonómica a las personas responsables. De esta manera se acuñó el término “sistemas de navegación” y en nuestros días se coordinan esos sistemas de la navegación con otros sistemas del buque para integrar los denominados “sistemas integrados del puente”.

En la actualidad la primera acepción de ayuda a la navegación se reserva para aquellos equipos ajenos al buque y que están diseñados para facilitar dicha navegación: boyas, señales luminosas, etc.

Dentro de los sistemas de navegación se identifican una serie de equipos que son básicamente sistemas de información al OONW. En el caso de la prevención de colisiones, se pueden destacar los siguientes:

- ECDIS - *Electronic Chart Display and Information System*. Muestra la información de las cartas electrónicas e integra información sobre posición, rumbo, velocidad, etc. recibida de otros equipos.
- ARPA - *Automatic RADAR Plotting Aid*. Equipo que muestra en pantalla los movimientos de los ecos detectados (blancos) y del buque propio, y calcula sus rumbos, velocidades y CPAs.
- AIS - *Automatic Identification System*. Sistema de comunicaciones (presentado en el apartado 1.2.1). La información AIS puede ser visualizada desde el propio equipo AIS, y también puede ser integrada en sistemas ECDIS o ARPA, o en aplicaciones gráficas para ordenador.



Figura 2.2. Imágenes típicas de ECDIS(izda.), ARPA(centro) y AIS (derecha).

Estos sistemas informan sobre la detección, el seguimiento y los datos de los buques en las proximidades (blancos o *targets*) necesarios para evaluar la situación. El OONW es responsable de supervisar estos sistemas para detectar situaciones peligrosas y decidir, a partir de su conocimiento del COLREGs y de una adecuada interpretación del mismo, las acciones o maniobras para evitar las colisiones.

A continuación, se identifican una serie de factores relacionados con el OONW que pueden aumentar el riesgo de colisión, aunque disponga de estos sistemas de ayuda:

- a) El OONW no interpreta o no aplica correctamente el COLREGs.
- b) Los cálculos en las maniobras no son adecuados, debido a:
  - Falta de datos o errores en los datos proporcionados por los aparatos (ARPA, AIS). Por ejemplo, el blanco no dispone de un AIS emisor, o perturbaciones y falsos ecos en un ARPA.
  - Los cálculos no se hacen con los parámetros adecuados. Por ejemplo, confusión entre rumbo efectivo o verdadero, entre velocidad sobre el fondo o sobre el agua.
  - Equivocaciones del OONW en los cálculos para cambio de rumbo o de velocidad.
  - En el caso de que haya más de un blanco en situación peligrosa con respecto al buque propio, lo habitual es realizar un análisis más complejo, calculando las posibles maniobras relativas a cada uno de los blancos cumpliendo con el COLREGs, y asumiendo que éstos mantendrán sus rumbos y velocidades. En función de ese análisis, el OONW decidirá la maniobra. Sin embargo, dado que el OONW de cada blanco también intentará lo mismo, las decisiones de cada uno afectarán a las decisiones futuras de los demás buques.
- c) El tiempo de reacción del OONW desde el instante en que se entra en una situación peligrosa. Múltiples causas pueden influir (EU-OSHA, 2009; Chauvin *et al.*, 2013).
- d) La aproximación entre dos buques se puede producir con unos ángulos límite entre las posibles situaciones de vuelta encontrada - cruce - alcance, lo que puede hacer que los OONW de los buques implicados apliquen Reglas COLREGs dispares.
- e) El tiempo de respuesta usualmente alto de los buques, que implica que haya que efectuar las maniobras a distancias grandes y que no haya tiempo suficiente para un cambio una vez iniciada la maniobra.
- f) Falta de comunicación entre los buques implicados en la maniobra, que puede conllevar por ejemplo que no se detecte la ocurrencia de los casos anteriores.

Como ejemplo se puede citar el equipo denominado NAVDEC, sistema en fase de prueba que facilita la visualización y el uso a bordo de la información AIS (Borkowski, P., 2014; Pietrzykowski *et al.*, 2017). Esta herramienta puede ayudar a la disminución del riesgo fundamentalmente de los factores b) y c) mencionados.

El sistema que se propone en esta tesis proporcionará a los OONWs información para reducir el riesgo de colisión entre buques en alta mar. Para ello, incluye:

- la detección de la situación de abordaje,
- la determinación automática de las maniobras a realizar en cumplimiento del COLREGs,
- la comunicación entre los buques en riesgo de colisión mediante mensajes estandarizados, y
- el registro de la conformidad o de los posibles desacuerdos entre los OONWs.

### 2.2.3 Tendencias de los futuros sistemas anticolidión

El desarrollo de algoritmos y la aplicación de nuevas tecnologías para la navegación de buques autónomos y buques con control remoto se encuentra en un estado embrionario a expensas de una legislación clara al respecto por parte de la IMO.

La IMO, a través de su Comité de Seguridad Marítima (MSC), está evaluando cómo podrán regularse los buques marítimos autónomos de superficie (MASS, *Maritime Autonomous Surface Ships*).

Por ahora, diversas organizaciones, fundamentalmente relacionadas con la certificación constructiva de los buques, han tomado la delantera en este aspecto, y van marcando una pauta que se espera que sea seguida a nivel internacional. Así, cabe señalar los trabajos de la empresa Det Norske Veritas y su clasificación de los distintos grados de autonomía (DNV, 2018):

- a) Buques con procesos automatizados y apoyo a la toma de decisiones. Incluyen sistemas para ayuda al OONW y de aumento de la seguridad en la navegación.
- b) Buques controlados remotamente con tripulación. Las tareas del OONW están a cargo del personal de un centro de control remoto fuera del buque, con tripulación para apoyar al personal a distancia.
- c) Buques controlados remotamente sin tripulación. Las tareas del OONW están a cargo del personal de un centro de control remoto fuera del buque, sin tripulación a bordo para apoyar al personal a distancia.
- d) Buques totalmente autónomos.

La incorporación de los nuevos sistemas evolucionará desde la automatización parcial a la operación remota completa y, finalmente, a los buques sin tripulación. No es previsible que las embarcaciones totalmente autónomas estén en funcionamiento a corto plazo (IMarEst, 2018; Kooji *et al.*, 2018). La implantación de estos sistemas requerirá de las normativas y directrices para la evaluación del riesgo de las nuevas tecnologías utilizadas en el transporte marítimo autónomo, y para garantizar un nivel adecuado de su funcionalidad y fiabilidad (Bureau Veritas, 2019).

El grupo MASWRG (*Maritime Autonomous Systems Regulatory Working Group*) de Reino Unido ha elaborado un Código de Conducta para los buques autónomos (MASWRG, 2019), que ya ha sido presentado al MSC. Este comité ha acordado examinar toda una serie de cuestiones relacionadas con el MASS, incluidos el elemento humano, seguridad, protección del medio marino, ciberseguridad, interacciones con los puertos, practicaje y aspectos jurídicos relacionados.

El resultado más reciente lo supone la Circular MSC.1/Circ.1638 (IMO, 2021), que propone la siguiente clasificación, similar a la antes referenciada del DNV:

**Grado 1.**

*Barco 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 de a bordo. Algunas operaciones pueden estar automatizadas y, en ocasiones, no estar supervisadas, pero con gente de mar a bordo dispuesta a tomar el control.

**Grado 2.**

*Buque controlado a distancia con gente de mar a bordo:* El buque se controla y opera desde otro lugar. La gente de mar está disponible a bordo para tomar el control y manejar los sistemas y funciones de a bordo.

**Grado 3.**

*Barco teledirigido sin gente de mar a bordo:* El buque es controlado y operado desde otro lugar. No hay marinos a bordo.

**Grado 4.**

*Buque totalmente autónomo:* El sistema operativo del buque es capaz de tomar decisiones y determinar acciones por sí mismo.

En los últimos años, universidades, administraciones y grandes compañías están desarrollando proyectos en este campo. Por ejemplo:

- El proyecto MUNIN (*Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks*) (Burmeister *et al.*, 2014) se planteó con el objetivo de desarrollar tecnología para buques no tripulados y autónomos. El consorcio MUNIN está formado por ocho socios de Alemania, Noruega, Suecia, Islandia e Irlanda. Abarcan aspectos técnicos, comerciales y legales.
- NFAS (*Norwegian Forum for Autonomous Ships*) (NFAS, 2021) es un foro creado por las Administraciones Marítima y Costera Noruega, la Federación de Industrias Noruegas y MARINTEK a principios de 2016. Su objetivo básico es reforzar la cooperación entre usuarios, investigadores, autoridades y otros interesados en los buques autónomos y su uso.
- Iniciativa AAWA (*Advanced Autonomous Waterborne Applications*) (AAWA, 2016). Es un proyecto de investigación conjunto entre la industria (Rolls-Royce, DNV-GL, NAPA, Deltamarin, Inmarsat) y varias universidades finlandesas (Turku, Aalto, Universidad Tecnológica de Tampere, Universidad Åbo Akademi y el Centro de Investigación Técnica VTT) sobre el desarrollo de operaciones de navegación autónomas y remotas, de maquinaria y de todos los sistemas operativos a bordo.
- Proyecto SIMAROS (*Safe Implementation of Autonomous and Remote Operation of Ships*), (SIMAROS, 2017) colaboración entre el Reino Unido y Noruega (Autoridad Marítima Noruega, DNV-GL, Kongsberg, Inmarsat, Automated Ships Ltd, Fjellstrand) en el desarrollo de tecnología y normativas para buques no tripulados.
- YARA BIRKELAND (YARA, 2021), el primer portacontenedores eléctrico y autónomo del mundo que está realizando pruebas. Fruto de la colaboración entre el fabricante de equipos y sistemas para la navegación Kongsberg y la empresa de fertilizantes YARA.
- MEGURI 2040 (MEGURI, 2022). Se ha realizado el 17 de enero de 2022 el primer ensayo de ferry autónomo. La tecnología utilizada en la demostración fue desarrollada por Mitsubishi Shipbuilding, una filial de Nippon Foundation, y se utilizó en el Soleil, transbordador de transporte de vehículos de 222 metros de eslora. El gran transbordador ha navegado de forma autónoma por un tramo de 149 millas (240 km) del mar de Iyonda, en Japón, a una velocidad de 26 nudos (48 km/h) y también ha realizado los procedimientos de atraque al final de su viaje.

Una parte muy importante para el desarrollo de estos sistemas de control remoto y autónomos corresponde a los algoritmos para evitar colisiones. De forma simplificada, se pueden dividir en dos grupos:

- algoritmos para evitar colisiones sin coordinación con los blancos (que denominaremos 1xN), y
- algoritmos que requieren de coordinación entre los buques implicados (N-N).

Este segundo grupo se puede dividir a su vez en algoritmos con computación centralizada (N-N-C), que han de utilizar un servicio de tráfico de buques (*Vessel Traffic Service*, VTS) para proporcionar a todos los buques las consignas con las variaciones de rumbo o velocidad a realizar por cada uno, y algoritmos con computación distribuida (N-N-D), en los que cada buque realizará sus cálculos, comunicará sus intenciones a los buques afectados y acordará con ellos la maniobra a realizar.

Entre la múltiple bibliografía al respecto, se destacan a modo de ejemplo las referencias presentadas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Algoritmos de prevención de colisiones

Referencia	Método	Situación
(Johansen <i>et al.</i> , 2016)	Control predictivo	1xN
(Kim <i>et al.</i> , 2017)	Algoritmo de búsqueda estocástica distribuida	N-N-D
(Lazarowska, 2015)	Optimización de colonias de hormigas (ACO)	1xN
(Li <i>et al.</i> , 2019)	Coordinación distribuida considerando la maniobrabilidad	N-N-D
(Perera <i>et al.</i> , 2012)	Toma de decisiones con lógica difusa	1xN
(Szlupczynski, 2013)	Conjuntos evolutivos de trayectorias seguras	N-N-C
(Zhang <i>et al.</i> , 2015)	IF/THEN decisiones a partir de la dinámica de los buques cercanos	1xN

Hasta donde se conoce, las pruebas de los algoritmos se están realizando en entornos de simulación computacional, sin plantear el modo de comunicaciones. Es decir, asumiendo que existe una comunicación implícita entre todos los buques en el caso de la computación distribuida, o de los buques con el VTS en la computación centralizada. También se supone que existe comunicación entre los elementos sensores (GPS, RADAR, etc) y el sistema CAS que implementará el algoritmo, y de las salidas de éste hacia el piloto automático y los sistemas de propulsión del buque. Un sistema de comunicaciones eficiente y seguro será un componente crítico en el desarrollo de los buques no tripulados y buques autónomos (Höyhty *et al.*, 2017).

### 3 Normas de seguridad funcional

Este capítulo consta de 3 apartados, dedicados a introducir 3 normas aplicables en la implementación de los sistemas relacionados con la seguridad:

- IEC 61508 –“Seguridad funcional de los sistemas eléctricos/electrónicos/electrónicos programables relacionados con la seguridad”.
- IEC 61511-"Seguridad funcional – Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de proceso industrial".
- ISA-18.2, IEC 62682– “Gestión de sistemas de alarmas para la industria de procesos”.

Se describe abreviadamente la estructura y componentes de cada una, la justificación de su uso en este proyecto y se señalan los aspectos fundamentales a utilizar.

#### 3.1 Norma IEC 61508

Seguridad funcional de los sistemas eléctricos/electrónicos/electrónicos programables relacionados con la seguridad (IEC 61508, 2010). En su parte 1, Requisitos generales, señala que esta norma establece una aproximación genérica para todas las actividades relacionadas con el ciclo de vida de seguridad de los sistemas que incluyan elementos eléctricos y/o electrónicos y/o electrónicos programables (E/E/PE) que se utilizan para realizar las funciones de seguridad. Es aplicable a cualquier sector. Determina los requisitos para asegurar que los sistemas E/E/PE sean diseñados, implementados, operados y mantenidos para proporcionar el nivel de integridad de la seguridad (SIL) requerido. Los principales objetivos de la misma son dos:

- Permitir el desarrollo de normas internacionales de producto y de aplicación sectorial por parte de los comités técnicos responsables del producto o sector correspondiente.
- Permitir el desarrollo de sistemas E/E/PE relacionados con la seguridad en ausencia de norma de producto o del sector de aplicación.

De ella derivan dos normas:

- IEC 62061- “Seguridad de las máquinas. Seguridad funcional de sistemas de mando eléctricos, electrónicos y programables”. Proporciona requisitos aplicables al diseño de los sistemas de control eléctricos relacionados con la seguridad de máquinas. Requiere que los subsistemas programables o complejos cumplan con la norma IEC 61508 (IEC 62061, 2021).
- IEC 61511- “Seguridad funcional – Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de proceso industrial” (IEC 61511, 2018).

##### 3.1.1 Estructura de la norma IEC 61508

La norma (serie de normas) IEC 61508 está compuesta de 7 partes:

- IEC 61508-1. Parte 1: Requisitos generales
- IEC61508-2. Parte 2: Requisitos para los sistemas eléctricos/electrónicos/electrónicos programables relacionados con la seguridad
- IEC61508-3. Parte 3: Requisitos del software
- IEC61508-4. Parte 4: Definiciones y abreviaturas
- IEC61508-5. Parte 5: Ejemplos de métodos de determinación de los niveles de integridad de seguridad
- IEC61508-6. Parte 6: Directrices para la aplicación de las Normas 61508-2 e IEC 61508-3



- IEC61508-7. Parte 7: Presentación de técnicas y medidas

La Figura 3.1 representa la estructura de la norma y las fases del ciclo de vida que trata cada parte.

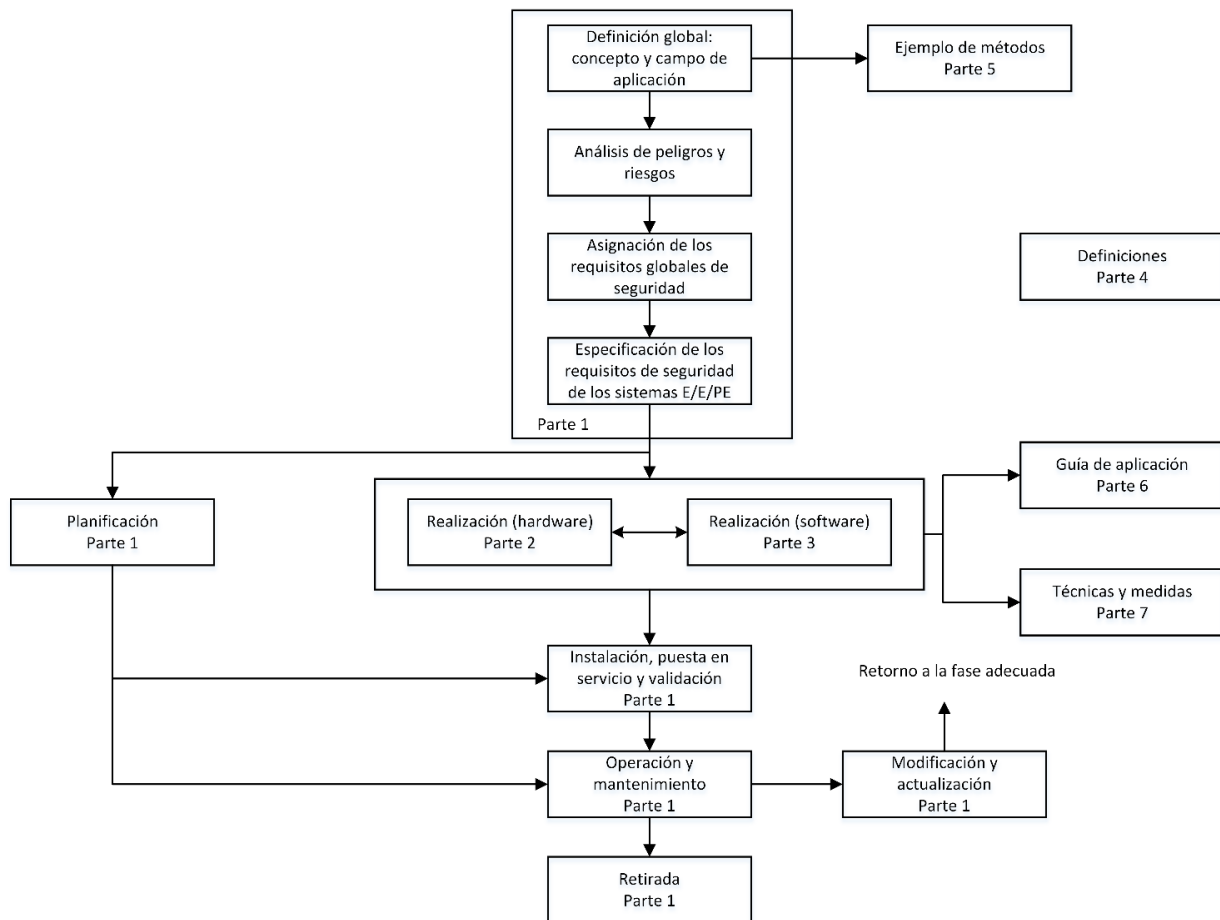


Figura 3.1. Partes de la norma IEC 61508 y diagrama de aplicación

La parte 4 recoge las definiciones y las explicaciones de los términos que se usan en las 7 partes de la norma. Se extraen aquí algunos términos relacionados con la seguridad que se utilizarán implícita o explícitamente en el resto de esta memoria.

- Daño: Herida física o acción contra la salud de las personas o deterioro causado en los bienes o en el medio ambiente.
- Peligro: Fuente potencial de daño. Este término incluye el peligro para las personas dentro de un intervalo corto de tiempo (por ejemplo, fuego o explosión), así como los peligros con efecto a largo plazo sobre la salud de una persona (por ejemplo, el desprendimiento de una sustancia tóxica).
- Situación peligrosa: Circunstancia en la cual una persona, propiedad o zona ambiental están expuestas a peligros.
- Evento peligroso: Evento que puede dar lugar a un daño.
- Riesgo: Combinación de la probabilidad de que se produzca un daño y de su severidad.
- Seguridad: Ausencia de riesgo inaceptable.
- Función de seguridad: Función a realizar por un sistema E/E/PE relacionado con la seguridad o por otras medidas de reducción del riesgo, que está destinada a lograr o mantener un estado seguro del EUC con respecto a un evento peligroso específico.

- Integridad de seguridad: Probabilidad de que un sistema E/E/PE relacionado con la seguridad ejecute de forma satisfactoria las funciones de seguridad requeridas en todas las condiciones especificadas en un periodo de tiempo especificado.
- Nivel de integridad de seguridad, SIL: nivel discreto (valores 1, 2, 3 o 4) correspondiente a la gama de valores de integridad de seguridad, donde el nivel 4 de integridad de seguridad tiene el grado más elevado de integridad de seguridad y el nivel 1 el más bajo.
- Sistema relacionado con la seguridad: sistema que implementa las funciones de seguridad requeridas necesarias para lograr o mantener un estado seguro del EUC y está previsto para alcanzar, por sí mismo o con otros sistemas E/E/PE y otras medidas de reducción del riesgo, la integridad de seguridad requerida por las funciones de seguridad. Puede estar diseñado para evitar el evento peligroso (reduciendo la probabilidad de ocurrencia a niveles admisibles), o para mitigar sus efectos. Un sistema relacionado con la seguridad incluye todo el *hardware*, *software* y dispositivos de soporte necesarios para realizar la función de seguridad especificada. Se puede basar en una amplia gama de tecnologías que incluye las tecnologías eléctrica, electrónica, electrónica programable, hidráulica y neumática. Una persona puede formar parte de un sistema relacionado con la seguridad. Por ejemplo, una persona podría recibir información de un dispositivo electrónico programable y realizar una acción de seguridad a partir de dicha información a través de un dispositivo electrónico programable.
- Lenguaje de variabilidad limitada (LVL): lenguaje de programación de software, textual o gráfico, para autómatas programables (PLCs) comerciales e industriales, con un rango de capacidades limitado a su aplicación. Los LVL que cumplen el estándar IEC 61131-3 de programación de PLCs son: IL, FBD, LD y SFC.

### 3.1.2 Justificación del uso de esta norma

En este proyecto la norma IEC 61508 se utiliza como guía de requisitos y buenas prácticas aplicables en la implementación del sistema (hardware + software) que se plantea para la reducción del riesgo de colisiones. Las razones para su uso:

- No se altera el funcionamiento normal de los sistemas, ni otras medidas de seguridad implantadas. Los componentes destinados a implementar la seguridad funcional son adicionales.
- Adopta una amplia gama de principios, técnicas y medidas para conseguir la seguridad funcional de los sistemas E/E/PE relacionados con la seguridad
- La norma IEC 61508 es genérica, aplicable a cualquier sector.
- Su aplicación es compatible y complementaria con la metodología FSA de la IMO.
  - Es más amplia en la especificación de los requisitos relativos al ciclo de vida de la seguridad global.
  - Permite proponer medidas efectivas para las opciones de control y reducción de riesgos del punto 3 de la FSA mediante la implantación de funciones de seguridad para la reducción de la probabilidad de accidentes o fallos.

En la arquitectura hardware que implementa las funciones de seguridad de este proyecto se emplean elementos (AIS, PLC) y canal de comunicación entre ellos de uso probado en sistemas y entornos con requisitos de fiabilidad altos. Un elemento debe considerarse como validado en uso cuando tiene una funcionalidad claramente restringida y especificada y cuando existe una evidencia documentada apropiada que demuestra que la probabilidad de fallos sistemáticos peligrosos es suficientemente baja

como para lograr los niveles de integridad de seguridad exigidos para las funciones de seguridad que utilizan el elemento.

Según la norma, para cada uno de los subsistemas se establecen y determinan diversos parámetros: tasas de disfunción, cobertura de diagnóstico, etc. Se calcula una predicción de fiabilidad para cada función de seguridad utilizando una técnica apropiada. Si la fiabilidad prevista no cumple los requisitos especificados, se evalúa el efecto de las posibles medidas de mejora sobre los elementos, subsistemas o parámetros críticos y se modifican, si es posible, uno o más parámetros del subsistema y/o la arquitectura del hardware. A continuación, se integra el software verificado y se valida el sistema E/E/PE, para una integración posterior en el sistema global.

### 3.1.3 Software relacionado con la seguridad

Según se ha planteado en el apartado 1.2 de esta memoria, la primera versión se desarrollará utilizando como sistema PE un PLC programado según el estándar IEC 61131-3 y siguiendo los principios y reglas de codificación señalados en la norma IEC 61508.

Hay 3 partes de la norma IEC 61508 referidas total o parcialmente al software:

- IEC 61508-3. Parte 3: Requisitos del software
- IEC 61508-6. Parte 6: Directrices para la aplicación de las normas IEC 61508-2 e IEC 61508-3
- IEC 61508-7. Parte 7: Presentación de técnicas y medidas

La Parte 3: Requisitos del software, establece los requisitos relativos a las fases y actividades del ciclo de vida de la seguridad que se deben aplicar durante el diseño y el desarrollo del software relacionado con la seguridad.

La Figura 3.2 muestra el ciclo de vida de la seguridad del software, adaptado al modelo V (Mathur & Malik, 2010; Deuter, 2013).

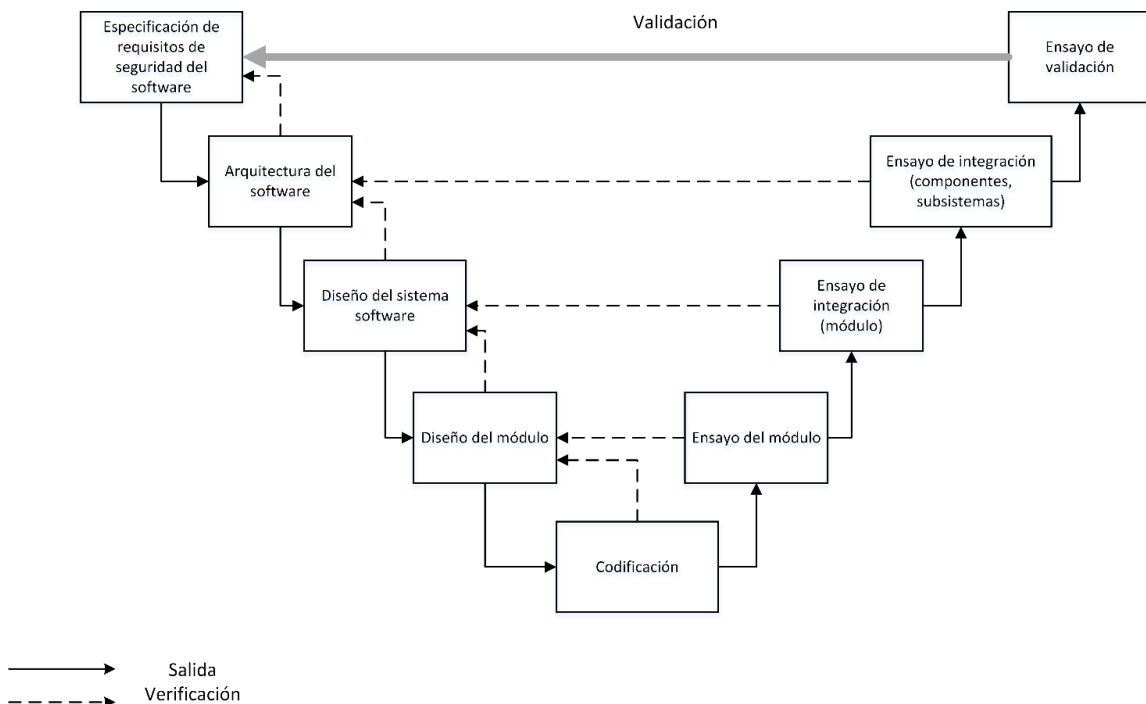


Figura 3.2. Modelo V del ciclo de vida de desarrollo del software

Algunos aspectos a considerar en la especificación de los requisitos, extraídos de IEC 61508-3, cap.7:

- La auto-supervisión del software (por ejemplo, mediante temporizadores para supervisión temporal y lógica de las secuencias del programa).
- La supervisión del hardware electrónico programable, de los sensores y de los accionadores.
- Los ensayos (periódicos o bajo demanda) de las funciones de seguridad.
- En cuanto a los datos recibidos de un sistema externo, deben considerarse:
  - los valores no válidos, fuera de rango o inoportunos;
  - los tiempos de respuesta y de ejecución y los posibles bloqueos;
  - el flujo y la capacidad de almacenamiento de datos.
- Los parámetros operacionales deben estar protegidos frente a los valores no válidos, fuera de rango o inoportunos y los cambios no autorizados.
- En relación con la interfaz con el operador, se deben utilizar esquemas y términos con los que los operadores estén familiarizados, entendibles y libres de aspectos innecesarios.

La Parte 7: Presentación de técnicas y medidas, en su ANEXO C (Informativo), presenta técnicas y medidas para la obtención de la integridad de seguridad del software. Se destacan a continuación algunas de estas técnicas.

- **Reglas de codificación**

Su objetivo es reducir la probabilidad de errores en el código relacionado con la seguridad y facilitar su verificación.

- Inteligibilidad del código: Convenciones de nombrado que promuevan los nombres con significado y no ambiguos; nombres simbólicos para valores numéricos; procedimientos y directrices para la documentación del código fuente.
- Subgrupo de lenguaje: Exclusión de características de lenguaje que conduzcan a diseños no estructurados; utilización limitada de construcciones de lenguaje que potencialmente puedan llevar a equívoco.

- **Programación estructurada**

Los principios siguientes se deberían aplicar para minimizar la complejidad estructural, con preferencia frente a otras características que puedan ser más eficaces, excepto cuando la eficacia sea una prioridad:

- Dividir el programa en módulos de software de tamaño pequeño y apropiado, desacoplados con interacciones explícitas.
- Minimizar el número de rutas a través de un módulo y la relación entre los parámetros de entrada y de salida.
- Evitar las ramificaciones complicadas y, en particular, los saltos incondicionales ("goto") en los lenguajes de alto nivel.
- Cuando sea posible, relacionar las condiciones de los bucles y de las ramificaciones con los parámetros de entrada y evitar las condiciones con cálculos complejos.

- **Ocultación/encapsulado de la información**

Su objetivo es prevenir cualquier acceso involuntario a los datos o procedimientos y así mantener una buena estructura del programa. Las estructuras de datos esenciales son "ocultadas" y no pueden ser manipulables más que con la ayuda de un conjunto determinado de procedimientos de acceso.

Esto permite modificar las estructuras internas y añadir procedimientos suplementarios sin afectar al comportamiento del resto del software.

- **Aproximación modular**

Un módulo del software (o equivalentemente, un subprograma) ha de cumplir una sola tarea o función bien definida. Los módulos del software se deberían comunicar con otros módulos a través de sus interfaces. Han de tener un tamaño limitado (por ejemplo, de dos a cuatro veces el tamaño de la pantalla), una sola entrada y una sola salida. Deberían generarse colecciones de subprogramas, y todas las interfaces deberían estar perfectamente documentadas;

- **Utilización de los elementos del software probados/verificados**

Su objetivo es evitar la necesidad de que los diseños y elementos de software tengan que ser revalidados o rediseñados para cada nueva aplicación. Para conocer de forma precisa el comportamiento de un elemento preexistente, son posibles dos puntos de vista:

- analizar la historia detallada de operación del elemento para demostrar que ha sido “probado en uso”;
- evaluar la verificación recopilada sobre el comportamiento del elemento, para determinar si el elemento cumple los requisitos. Este puede derivarse de la propia documentación del suministrador del elemento y de los registros del proceso de desarrollo del elemento, o puede crearse o suplementarse mediante actividades de cualificación adicional realizadas por el desarrollador del nuevo sistema relacionado con la seguridad, o por terceras partes.

- **Detección y diagnóstico de fallos**

La detección de fallos se basa sobre los principios de redundancia (principalmente para la detección de los fallos del hardware) y de diversidad (fallos del software). La detección de fallos se puede obtener por los controles efectuados sobre los valores o los tiempos a diferentes niveles, en particular al nivel físico (temperatura, tensión, etc.), lógico (códigos detectores de error), funcional (aserción) o externo (controles de verosimilitud). Los resultados de estos controles se pueden memorizar y asociar a los datos correspondientes para facilitar la búsqueda de las disfunciones.

- **Lenguajes de programación adecuados**

El lenguaje de programación elegido debería conducir a un código fácilmente verificable con un mínimo de esfuerzo y facilitar el desarrollo, la verificación y el mantenimiento del programa.

El lenguaje debe favorecer:

- la utilización de módulos del software pequeños y manejables;
- el uso de datos fuertemente tipificados y la definición de rangos de datos;
- la restricción de acceso a los datos en módulos del software específicos; y
- cualquier otro tipo de construcción para limitar los errores.

Si el funcionamiento seguro del sistema depende de limitaciones de tiempo real, el lenguaje debería permitir también el procesamiento de las excepciones /interrupciones.

Es deseable que el lenguaje se soporte por un traductor apropiado, unas bibliotecas apropiadas de módulos del software preexistentes, y herramientas para el control y el desarrollo de las versiones.

La Tabla 3.1 hace referencia a los lenguajes de programación de PLCs según el estándar IEC 61131-3 y su grado de recomendación para los niveles de integridad de la seguridad 1..4.

Tabla 3.1. Recomendaciones aplicables a los lenguajes de programación de PLCs

Lenguaje	SIL1	SIL2	SIL3	SIL4
LD	R	R	R	R
LD con subconjunto definido	HR	HR	HR	HR
FBD	R	R	R	R
FBD con subconjunto definido	HR	HR	HR	HR
ST	R	R	R	R
ST con subconjunto definido	HR	HR	HR	HR
SFC	R	R	R	R
SFC con subconjunto definido	HR	HR	HR	HR
IL	R	-	NR	NR
IL con subconjunto definido	HR	R	R	R

(R: Recommended, HR: High Recommended, NR: No Recommended)

- **Métodos de verificación del software**

- Registro y análisis de datos. Documentar los ensayos realizados sobre cada módulo del software, las decisiones y sus justificaciones, los problemas y sus soluciones.
- Ensayos de interfaz de los subprogramas y de valores límite de parámetros.
- Suposición de errores. Ejemplo de caso de ensayo: ¿Qué pasa cuando pulso simultáneamente dos botones?
- Análisis de flujo de control y de datos.
- Verificación formal. Su objetivo es probar la corrección de un sistema en relación a algún modelo abstracto del programa, con la ayuda de las reglas y de los modelos teóricos y matemáticos.
- Simulación del proceso. Se trata de ensayar la función de un sistema de software y su interfaz con el mundo exterior, sin que se le permita modificar el mundo real. Creación de un sistema que permite únicamente la realización de ensayos y que simula el comportamiento del EUC.

### 3.2 Norma IEC 61511

Seguridad funcional. Sistemas instrumentados de seguridad para el sector de las industrias de procesos. Esta norma internacional establece los requisitos para la especificación, diseño, instalación, funcionamiento y mantenimiento de un sistema de seguridad, de manera que se le pueda encomendar el establecimiento y/o el mantenimiento del proceso en una condición segura. Ha sido realizada como una aplicación al sector de las industrias de procesos de la Norma IEC 61508. Es por tanto más concreta y manejable que ésta. Remite a la norma IEC 61508-3 para los casos de desarrollo y modificación del software programado con lenguajes de variabilidad plena (FVL). Recomienda que los equipos utilizados en los sistemas instrumentados de seguridad se seleccionen basándose en una certificación IEC 61508-2 para el SIL apropiado, o en una justificación basada en el criterio de “uso previo”.

La serie IEC 61511 es aplicable a una amplia variedad de industrias dentro del sector de procesos, que incluye las de productos químicos, refino de petróleo, producción de petróleo y gas, pasta y papel, generación eléctrica no nuclear, etc. Dentro de este sector se pueden incluir aplicaciones costeras o a bordo de buques, que tendrán que satisfacer requisitos adicionales. La aplicación a desarrollar en este proyecto podrá apoyarse en esta norma para la selección, definición e implementación de los sistemas instrumentados de seguridad, y de otras capas de protección para la reducción de riesgos.

### 3.2.1 Estructura

Tiene 3 partes:

- IEC 61511-1. Parte 1: Marco, definiciones, requisitos para el sistema, el hardware y el software.
- IEC 61511-2. Parte 2: Directrices de aplicación de IEC 61511-parte 1.
- IEC 61511-3. Parte 3: Guía para la determinación de los niveles requeridos de integridad de seguridad (SIL).

Algunos términos definidos en esta norma:

- **Sistema básico de control de proceso (BPCS):** Sistema que responde a señales de entrada del proceso, su equipo asociado, otros sistemas programables y/o un operador y genera señales de salida que hacen que el proceso y su equipo asociado funcionen de la manera deseada, pero que no realiza ninguna de las funciones instrumentadas de seguridad con una SIL reivindicada  $\geq 1$ .
- **Función instrumentada de seguridad (SIF):** Función de seguridad con un nivel de integridad de seguridad (SIL) especificado que es necesaria para alcanzar una condición de seguridad funcional y que puede ser una función instrumentada de protección de seguridad o una función instrumentada de control de seguridad.
- **Sistema instrumentado de seguridad (SIS):** Sistema instrumentado usado para realizar una o más funciones instrumentadas de seguridad. Un SIS se compone de cualquier combinación de sensor(es), unidad(es) lógica(s), y elemento(s) final(es).
- **Nivel de integridad de seguridad (SIL):** nivel discreto (uno de cuatro, ver Tabla 3.2) para especificar los requisitos de integridad de seguridad de las funciones instrumentadas de seguridad a asignar a los sistemas instrumentados de seguridad. Indica la reducción de riesgo objetivo a alcanzar con la función de seguridad para bajar el riesgo hasta un nivel tolerable. Cada nivel discreto se refiere a cierta probabilidad de que un sistema E/E/PE realice satisfactoriamente las funciones de seguridad requeridas bajo todas las condiciones establecidas en un período de tiempo determinado.

Tabla 3.2. SIL: probabilidad de fallo bajo demanda

Nivel de integridad de Seguridad (SIL)	Probabilidad media de disfunción peligrosa bajo demanda de la función de seguridad ( $PFD_{avg}$ )	Factor de reducción del riesgo (RRF)
4	$10^{-5} \leq PFD_{avg} < 10^{-4}$	$10000 \leq RRF < 100000$
3	$10^{-4} \leq PFD_{avg} < 10^{-3}$	$1000 \leq RRF < 10000$
2	$10^{-3} \leq PFD_{avg} < 10^{-2}$	$100 \leq RRF < 1000$
1	$10^{-2} \leq PFD_{avg} < 10^{-1}$	$10 \leq RRF < 100$

La Figura 3.3 muestra el ciclo de vida de seguridad según la norma IEC 61511.

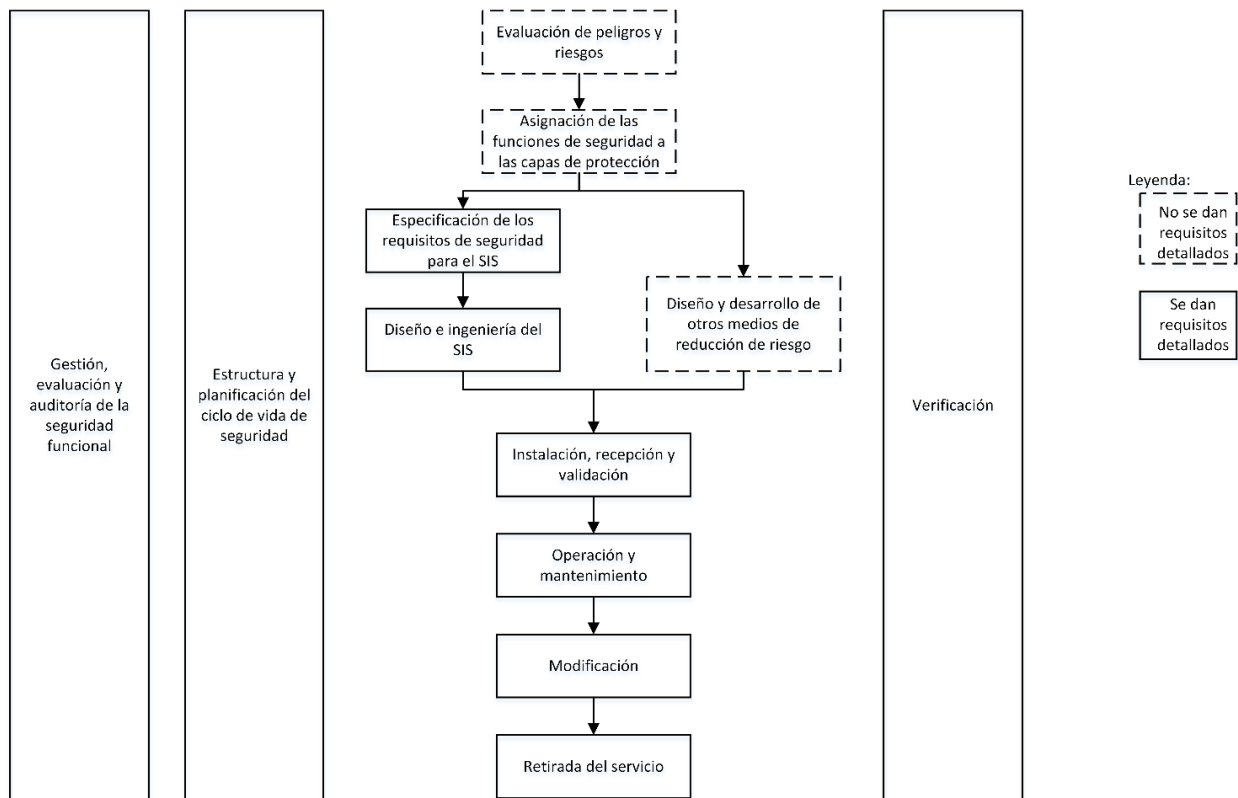


Figura 3.3. IEC 61511-Fases del ciclo de vida de seguridad

Otro concepto fundamental es el de capa de protección, ilustrado en la Figura 1.2. Se define como cualquier mecanismo independiente que reduce el riesgo por control, prevención o atenuación. Como se ve en la Figura 3.3, en la fase 2 del ciclo de vida de seguridad se asignan a las capas de protección las funciones de seguridad delimitadas en la fase 1.

### 3.2.2 Análisis de las capas de protección (LOPA)

Una capa de protección consiste en una agrupación de equipos o controles administrativos que funcionan en forma concertada con otras capas de protección para controlar o atenuar el riesgo del proceso (ver Figura 1.2).

Una capa de protección (PL) tiene las siguientes características importantes (extraídas de IEC 61511-3, anexo F):

- **Especificidad.** Una PL se diseña para evitar o atenuar las consecuencias de un evento potencialmente peligroso. Múltiples causas pueden conducir al mismo evento peligroso, y por tanto diferentes escenarios de evento pueden iniciar la acción de una PL.
- **Independencia.** Una PL es independiente de otras capas de protección si se puede demostrar que no existe potencial para fallos de causa común con cualquier otra capa de protección asociada con el mismo evento peligroso.
- **Fiabilidad.** Se puede contar con que la PL que haga lo que se ha diseñado para hacer. En el diseño se tienen en cuenta tanto los fallos aleatorios como los sistemáticos.
- **Susceptibilidad de auditoría.** Una PL está diseñada para facilitar la validación regular de sus funciones protectoras.

El método LOPA (Summers, 2003; Stauffer & Clarke, 2016) se describe y se ilustra con un ejemplo de uso en el anexo F de la norma IEC 61511-3. Su aplicación comienza, tras completarse el análisis de riesgos, con la elaboración de una lista que recoge cada evento de impacto (consecuencia indeseada de



un evento peligroso referido como una desviación del proceso), las causas iniciadoras y las capas de protección para prevenir o atenuar el daño. Se puede determinar así la cantidad total de reducción de riesgo y si se requiere una reducción de riesgo adicional. En este caso, si la reducción adicional se va a proporcionar con una SIF, la metodología LOPA permite la determinación del SIL apropiado para reducir los riesgos a niveles tolerables. La Tabla 3.3 muestra un formato LOPA típico.

Tabla 3.3. Informe LOPA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Evento de impacto	Nivel de gravedad	Causa (evento) iniciadora	Probabilidad de iniciación (eventos/año)	PFDs de Capas de protección (PLs)				Prob. evento	Nivel de integridad requerido SIF	Prob. evento atenuada
				Diseño gral.	BPCS	Alarmas, etc.	Mitigación			
a	S	<b>a1</b>	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	10 <sup>-5</sup>		
		<b>a2</b>								
		<b>a3</b>								
		<b>a4</b>								

La probabilidad intermedia de que se produzca el evento peligroso **a1** se calcula multiplicando la probabilidad de iniciación (columna 4) por las probabilidades de disfunción peligrosa (PFD) de las capas de protección y de atenuación (columnas 5 a 8). El número calculado está expresado en unidades de eventos por año y se introduce en la columna 9. Si la probabilidad de un evento es inferior al nivel exigido, no se requieren capas de protección adicionales. Sin embargo, se debería aplicar una reducción adicional de riesgo si esto fuera económicamente correcto.

Si la probabilidad de un evento es superior, se requiere una protección adicional. Se deberían considerar los métodos y las soluciones intrínsecamente seguros antes que aplicar capas adicionales de protección en forma de SIS.

Si se necesita una nueva SIF, se puede calcular el SIL requerido dividiendo el nivel exigido de riesgo tolerable por la probabilidad intermedia del evento. Se selecciona como máximo para el SIS una  $PFD_{avg}$  para la SIF por debajo de este número y se introduce en la columna 10. El riesgo tolerable se puede definir usando normas y reglamentos nacionales e internacionales, políticas de las empresas; y la aportación de las partes afectadas tales como la comunidad, jurisdicción local y empresas de seguros, apoyadas por buenas prácticas de ingeniería.

Se calcula a continuación la probabilidad de un evento atenuado multiplicando las columnas 9 y 10 e introduciendo el resultado en la columna 11. Se continúa así hasta que el equipo haya calculado una probabilidad de evento atenuado para cada evento de impacto que se pueda identificar.

La última etapa es sumar todas las probabilidades de evento atenuado para los eventos de impacto graves y muy graves que presenten el mismo peligro.

De forma ilustrativa, la Tabla 3.4 muestra un análisis de capas de protección muy simplificado para plantear las funciones de seguridad como una capa de protección adicional que disminuya el riesgo de colisión. Hay que ver cuáles son las causas que pueden originar la colisión, qué reducción de riesgos representan las capas existentes, y cuál sería el nivel de integridad requerido de las funciones de seguridad para que el nivel de riesgo esté por debajo de un umbral predefinido.

Se hace aquí sólo una estimación o justificación de los valores a reflejar en la tabla.

Tabla 3.4. Datos LOPA para riesgos de colisión

Evento de impacto (peligro)	Nivel de gravedad	Causa (evento) iniciadora	Prob.de iniciación (nº/año)	PFDs de Capas de protección (PLs)		Prob. evento	Nivel de integridad requerido SIF
				Diseño + Control + Supervisión	Sistemas de atenuación		
Colisión	Muy grave (pérdida de vidas, daños en el entorno)	Evento externo (meteorología adversa)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
		Fallo de un elemento hardware	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
		Error de cálculo de maniobra	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
		Fallo del operador	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)

Se consideran 4 causas iniciadoras muy generales, que podrían desdoblarse en múltiples filas (Uğurlu *et al.*, 2013).

(a): Se reflejarán los datos obtenidos a partir de registros históricos de accidentes, datos de fiabilidad humana y datos de componentes, evaluados por expertos. Los valores de probabilidad (eventos por año) pueden variar desde baja probabilidad (<0.001; por ejemplo, de un componente hardware) hasta muy alta (>1; por ejemplo, fallo de operador en condiciones de estrés). El mayor porcentaje de colisiones tiene como causa iniciadora factores humanos, como “mal posicionamiento”, o “mala interpretación de movimiento del buque propio” (Kujala *et al.*, 2009; Mazaheri *et al.*, 2015; Sotiralis *et al.*, 2016).

(b): Típicamente, estos valores estarán en el rango [0.1 .. 1]. Por ejemplo, si el elemento hardware que falla forma parte del control, el PFD correspondiente en esta capa será 1. Los buques modernos incluyen equipos redundantes de control y supervisión, que podrían considerarse como una capa SIS independiente, y que permitirían multiplicar por un índice entre [0.001 .. 0.1] el valor indicado para los casos de fallo de elemento hardware, y también disminuirán la probabilidad del riesgo causado por eventos externos. También pueden contribuir, en menor medida, a disminuir los riesgos por fallo humano (cálculo de maniobras, fallo de operador). En la opción menos optimista, sin sistemas redundantes, se valoraría con 1.

(c): Los sistemas de atenuación incluirán por ejemplo sistemas de evacuación. Pueden reducir la gravedad del evento de impacto, pero no evitar que ocurra. Como previsiblemente los daños serán graves, aunque haya medidas de atenuación, valoramos con 1 toda la columna.

(d): El valor en cada fila será el producto de los valores comentados en (a) \* (b) \* (c).

(e): En cada fila, el nivel de integridad de seguridad (SIL) requerido para la función de seguridad se calculará dividiendo el valor asignado de riesgo tolerable de colisión entre el valor de la columna (d). Si el cociente es < 0.1 (factor de reducción de riesgo > 10, SIL ≥ 1), la función de seguridad debería desarrollarse cumpliendo todos los requisitos dictados por la norma IEC 61511-1 si se quiere acreditar como SIS.

Si el riesgo tolerable es superior a la probabilidad del evento (columna d) no se requerirá reducción adicional, pero será aconsejable aplicar las funciones para conseguir una reducción de riesgo siempre que no supongan un coste excesivo y no se introduzcan otros riesgos en el sistema.

Las funciones de seguridad que se desarrollan en este proyecto están orientadas a disminuir los riesgos originados en errores de cálculo en las maniobras o en fallos del OONW.

La probabilidad del evento de impacto y la fiabilidad de los sistemas de seguridad existentes se pueden estimar de manera semicuantitativa por diversos modos: registros históricos de incidentes-accidentes, datos de fiabilidad de componentes, datos de fiabilidad humana, mediante técnicas de árbol de fallos (FTA) (Lee *et al.*, 1985), etc. La Figura 3.4 muestra una estructura simple FTA.

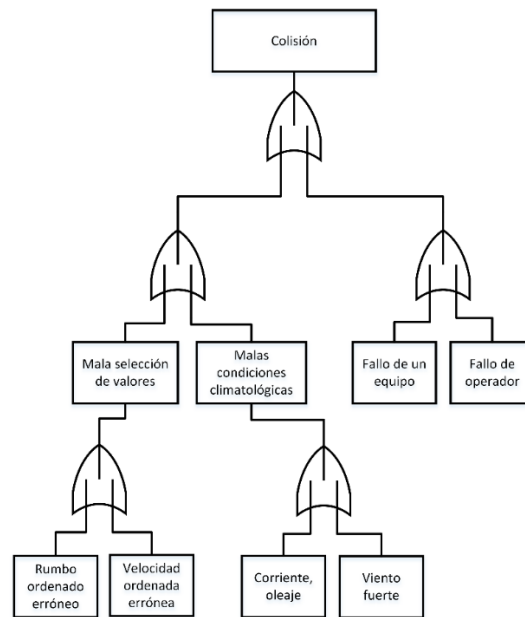


Figura 3.4. Esquema FTA

Una vez se ha establecido la frecuencia de producción de cada evento, resulta muy útil aplicar la técnica de árbol de eventos ETA (Andrews & Dunnett, 2000) para comprobar si las medidas preventivas existentes o previstas son suficientes para limitar o minimizar los efectos negativos y para determinar las funciones instrumentadas de seguridad requeridas. Esta técnica desarrolla un diagrama gráfico secuencial a partir de sucesos desencadenantes de incidencia significativa.

La Figura 3.5 muestra un diagrama ETA simple y cualitativo relacionado con la seguridad funcional que se plantea en este proyecto para la reducción del riesgo de colisión. El suceso iniciador del ETA corresponde a la presencia de un buque a una distancia inferior al radio de seguridad establecido para que el OONW pueda decidir las posibles maniobras en caso de que sea un encuentro peligroso ( $d_{Blanco} < d_{Seg}$ , peligro de colisión). El primer evento a considerar, que el OONW lo detecte. Su probabilidad se representa por  $P1$ . Por tanto, la probabilidad de que el OONW no lo detecte será  $1 - P1$ .

El siguiente evento, que los OONWs de ambos buques realicen las maniobras adecuadas, con probabilidad  $P2$ .

$P_{Fallo}$  representa la probabilidad de secuencias desfavorables.

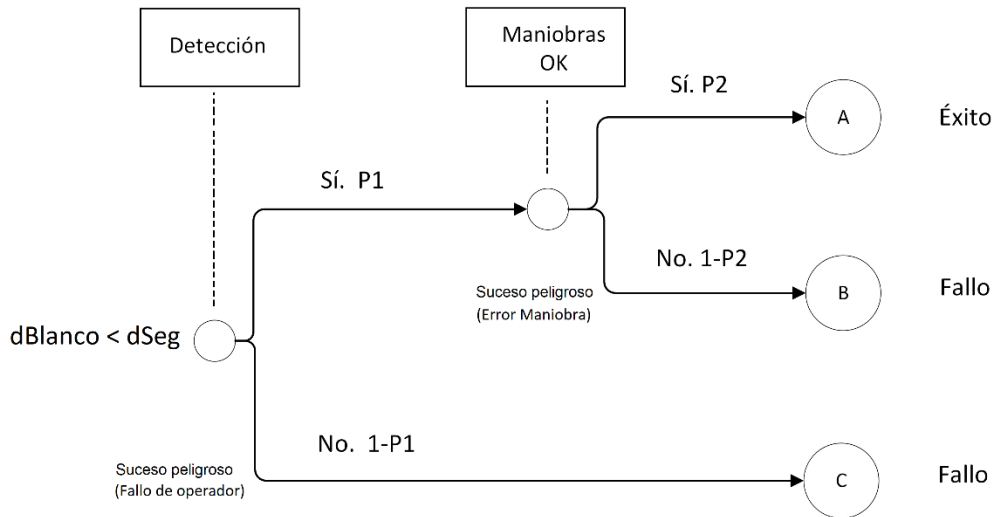


Figura 3.5. ETA sin funciones de seguridad

$$PFallo = PB + PC = P1 * (1 - P2) + (1 - P1) \quad (3.1)$$

Las funciones de seguridad que se van a añadir están orientadas fundamentalmente a dos objetivos:

- Mejorar la detección (análisis) temprana de buques en las proximidades del buque propio, lo que aumentará el tiempo de reacción disponible para calcular y realizar maniobras.
- Aumentar las probabilidades de realizar maniobras correctas, tanto del buque propio como del buque o buques para los que  $CPA < distancia$  de seguridad.

La Figura 3.6 representa el diagrama ETA con dos funciones de seguridad añadidas, Detect y Manoeuvre, una por cada objetivo.  $PFallo2$  indica la nueva probabilidad de secuencias desfavorables.

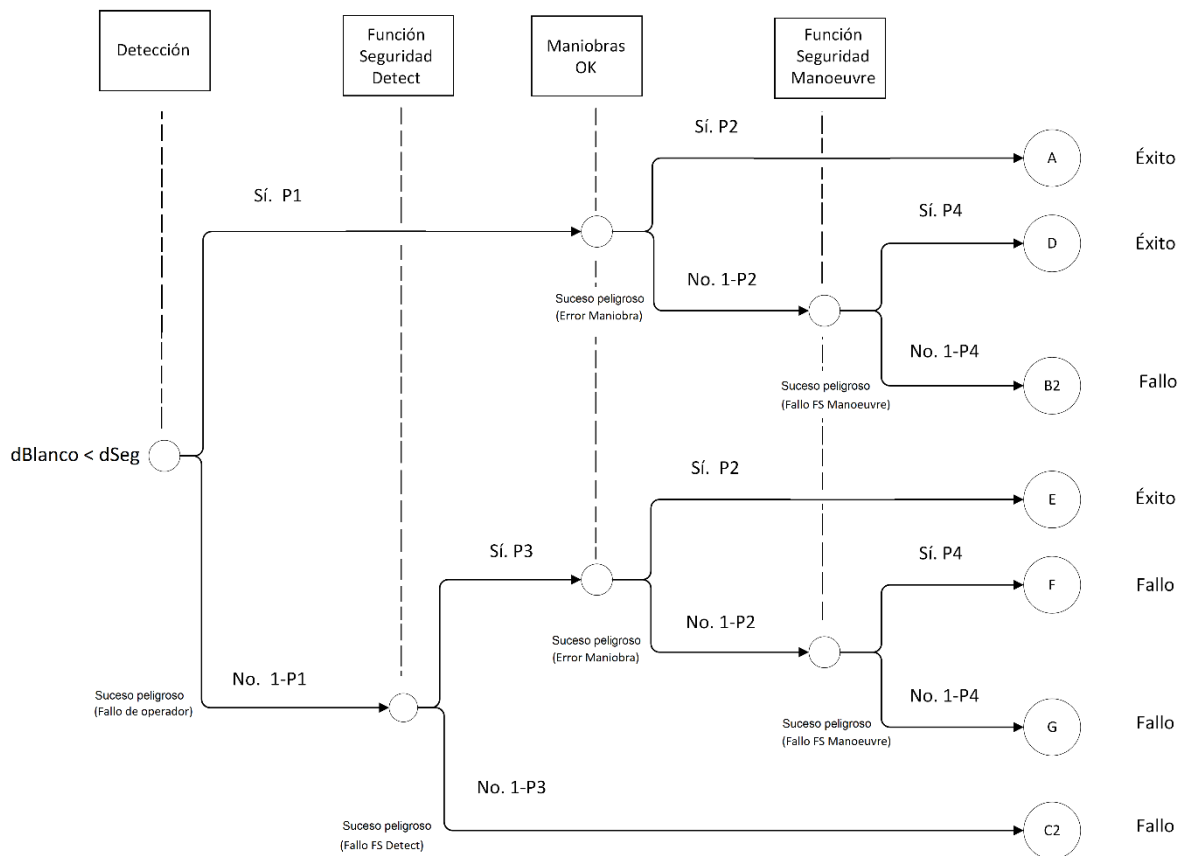


Figura 3.6. ETA con funciones de seguridad

$$\begin{aligned}
 PFallo2 &= PB2 + PC2 + PG \\
 &= P1 * (1 - P2) * (1 - P4) + (1 - P1) * (1 - P3) + (1 - P1) \\
 &\quad * P3 * (1 - P2) * (1 - P4)
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Límite inferior:  $P3=P4=0$ ,  $PFallo2 = PFallo$

Límite superior:  $P3=P4=1$ ,  $PFallo2 = 0$

Resto de casos:  $0 < P3, P4 < 1$ ,  $PFallo2 < PFallo$

Como se ha mencionado anteriormente, puede ser aconsejable aplicar las funciones de seguridad incluso si esta reducción de la probabilidad de fallo es pequeña.

La combinación de la técnica de árbol de eventos para comprobar la eficacia de las medidas preventivas ante un evento iniciador peligroso con el árbol de fallos para determinar las causas y las probabilidades de dicho evento da lugar al RCT (*Risk Contribution Tree*), modelo conceptual sugerido en las directrices de la FSA.

### 3.2.3 Alarmas y capas de protección

De forma genérica se puede decir que el propósito de una alarma es notificar al operador un mal funcionamiento del equipo, una desviación del proceso o una condición anormal que requiere una respuesta. En la Figura 1.2, que representa el proceso y las capas de protección, podemos ver que la capa Alarmas-Operadores aparece entre el BPCS y el SIS, y se refiere a Alarmas de proceso con acción correctiva del operador.

El sistema relacionado con la seguridad que se plantea en este proyecto tiene como misión auxiliar a los operadores en la toma de decisiones de las maniobras a realizar para disminuir el riesgo de colisión. Se podría situar entre dos capas de protección: Alarmas-Operadores y SIS. Por este motivo se resumen en

este apartado los puntos fundamentales a tener en cuenta respecto a las Alarmas de proceso con acción correctiva del operador como capas de protección.

Para incluir en el LOPA la respuesta del operador ante una alarma, deben cumplirse los criterios de especificidad, independencia, seguridad de funcionamiento y capacidad de ser auditada descritos en el apartado anterior. Hay que especificar además su nivel de reducción de riesgos, que se combinará con el del resto de capas independientes de protección. Esta reducción de riesgos depende fundamentalmente del factor humano. La capacidad del operador para ejecutar una respuesta exitosa/acertada se ve afectada por la carga de trabajo, la fatiga, la formación, la motivación, etc. Y tiene que darse dentro de un límite de tiempo máximo de respuesta, según muestra la Figura 3.7 (Stauffer & Clarke, 2016).

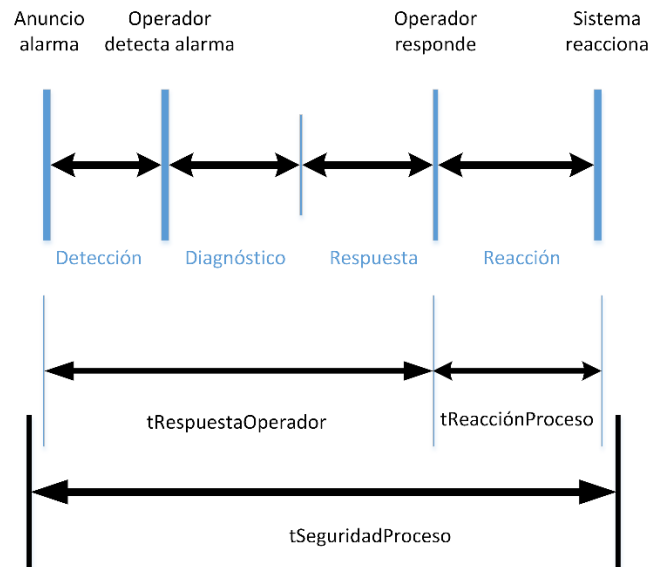


Figura 3.7. Línea de tiempos de respuesta

El tiempo de respuesta incluye el tiempo que el operador emplea en detectar, diagnosticar y responder. A este tiempo hay que añadir el tiempo que tarda el proceso en responder a la acción correctiva. Un requisito clave para que la capa de protección basada en alarmas sea válida es que la suma de tiempos de respuesta del operador y posterior reacción del proceso sea menor que un tiempo máximo considerado seguro.

$$tDetección + tDiagnóstico + tRespuesta + tReacción < tSeguridadProceso \quad (3.3)$$

Todas las declaraciones de reducción de riesgo por alarma deberían tener el soporte de una descripción documentada de la respuesta necesaria a la alarma, de que hay tiempo suficiente para que el operador tome la acción correctora y la garantía de que el operador estará formado para tomar acciones preventivas.

En el ámbito marítimo, la Resolución MSC.302(87) (IMO,2010) indica las normas de funcionamiento para la gestión de alertas en el puente de mando de un buque, adoptadas por el Comité de seguridad marítima de la IMO. Esta Resolución tiene como objetivo “armonizar la prioridad, la clasificación, el manejo, la distribución y la presentación de las alertas, para permitir que el equipo del puente de mando dedique toda su atención a la operación segura del buque e identifique inmediatamente cualquier situación de alerta que requiera una acción para mantener la operación segura del buque”.

En caso de que el nivel de reducción de riesgo asignado a la respuesta del operador ante una alarma sea mayor de 10, será necesario diseñar el sistema global según la Norma IEC 61511-1. Este sistema debería tener un formato similar al presentado en la Figura 3.8, que se corresponde con el formato típico de una SIF.

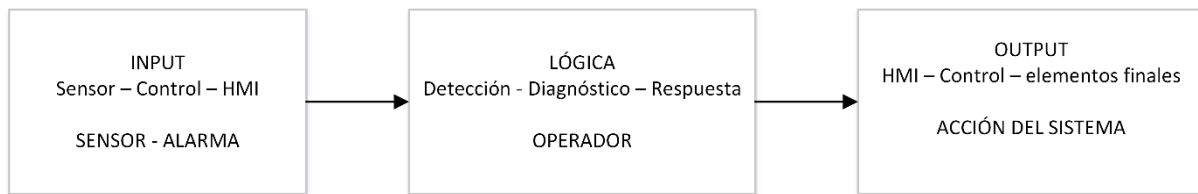


Figura 3.8. Modelo de la respuesta del operador a una alarma

El factor de reducción de riesgo se deduce de la PFD, según se mostró en la Tabla 3.2. El PFD para la respuesta del operador a una alarma se obtiene de la suma de:

- 1) La probabilidad de que falle el Anuncio de la alarma. Fallo en el sensor, el control o el interfaz de la parte “Sensor” de la Figura 3.8.
- 2) La probabilidad de que el Operador falle en la detección, diagnóstico o respuesta a la alarma de forma correcta y dentro del tiempo disponible
- 3) La probabilidad de que fallen los elementos finales.

$$PFDAlarma = PFDAnuncio + PFDOperador + PFDAccionSistema \quad (3.4)$$

- Si  $0.1 < PFDAlarma \leq 1$  ( $1 \leq RRF < 10$ ), se considera alarma estándar, el tratamiento puede estar integrado en el BPCS.
- Si  $0.01 < PFDAlarma \leq 0.1$ , ( $10 \leq RRF < 100$ ) se considera alarma de seguridad IPL (*Independent Protection Layer*), capa de protección independiente tratada como SIL 1 y que debe cumplir los requisitos de la norma IEC 61511 para los SIS.
- No se considera que  $PFDAlarma < 0.01$ .

Las recomendaciones dadas en las normativas de sistemas de alarmas (ISA-18.2, IEC-62682) ayudarán a mejorar la efectividad de los sistemas de alarmas.

### 3.3 Normas de gestión de sistemas de alarmas. ISA-18.2 – IEC-62682

El propósito básico de las normas ISA-18.2, *Management of Alarm Systems for the Process Industries* (Hollifield & Habibi, 2011) e IEC 62682, basada en la anterior (IEC 62682, 2014), es mejorar la seguridad. Están enfocadas hacia los sistemas de alarma (que requieren respuesta del operador) incluidos en los sistemas de control o de seguridad modernos, sistemas que habitualmente utilizan software SCADA y hardware tipo PLC. Las recomendaciones de la norma y el seguimiento de su ciclo de vida, mostrado en la Figura 3.9, pueden ayudar al desarrollo del proyecto a la hora de configurar y priorizar la información que hay que comunicar al operador, y para diseñar el HMI.

Los pasos del ciclo de vida son:

- Filosofía: Documentar los objetivos y requisitos del sistema de alarma.
- Identificación: Determinar qué alarmas son necesarias.
- Racionalización: El proceso de garantizar que una alarma cumple con los requisitos establecidos en la filosofía de alarma, incluyendo las tareas de priorización, la clasificación, la determinación de la configuración y documentación. La prioridad se establece en función de las consecuencias potenciales y del tiempo disponible para responder.
- Diseño detallado: Diseño de los aspectos de la alarma para que cumpla con los requisitos determinados en la racionalización y en la filosofía. Esto incluye algunas decisiones sobre el HMI.

- Implementación: Diseño de alarma operativo. Esto puede implicar la puesta en marcha, pruebas y actividades de formación.
- Operación: La alarma es funcional.
- Mantenimiento: La alarma no es funcional debido a cualquiera de las actividades de prueba o de reparación.
- Monitorización y Evaluación: El rendimiento del sistema de alarma se controla continuamente para verificar que se cumplen los objetivos marcados en la etapa 1.
- Gestión del Cambio: Proceso que hay que seguir para hacer cambios en el sistema de alarmas.
- Auditoría: Revisiones periódicas para garantizar la integridad de una alarma de seguridad IPL.

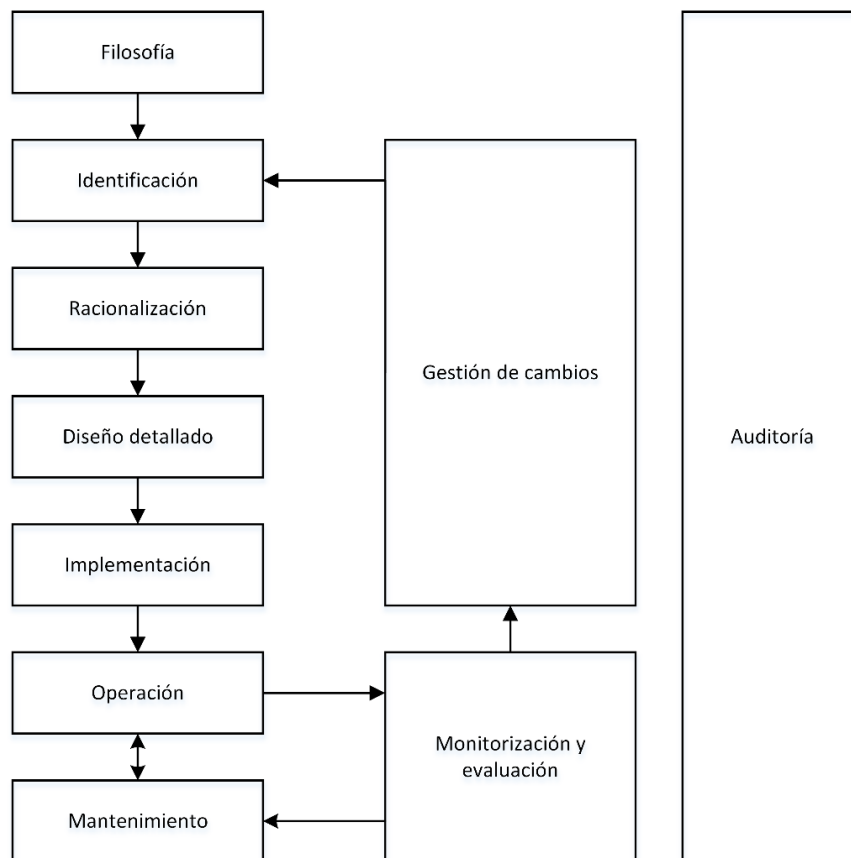


Figura 3.9. Ciclo de vida de una alarma

IEC 62682 incluye un diagrama de transición de estados de alarma mostrado en la Figura 3.10. Los estados posibles son: Normal, No acusada (NOACK), Acusada (ACK), Retorno a Normal (RTN NOAck), Archivada, Suprimida y Fuera de Servicio. Las variables internas Proceso, Alarma y Ack tienen unos valores específicos en cada estado. Este diagrama puede servir de base para diseñar la gestión de las comunicaciones entre el sistema PE de cada buque y el OONW.



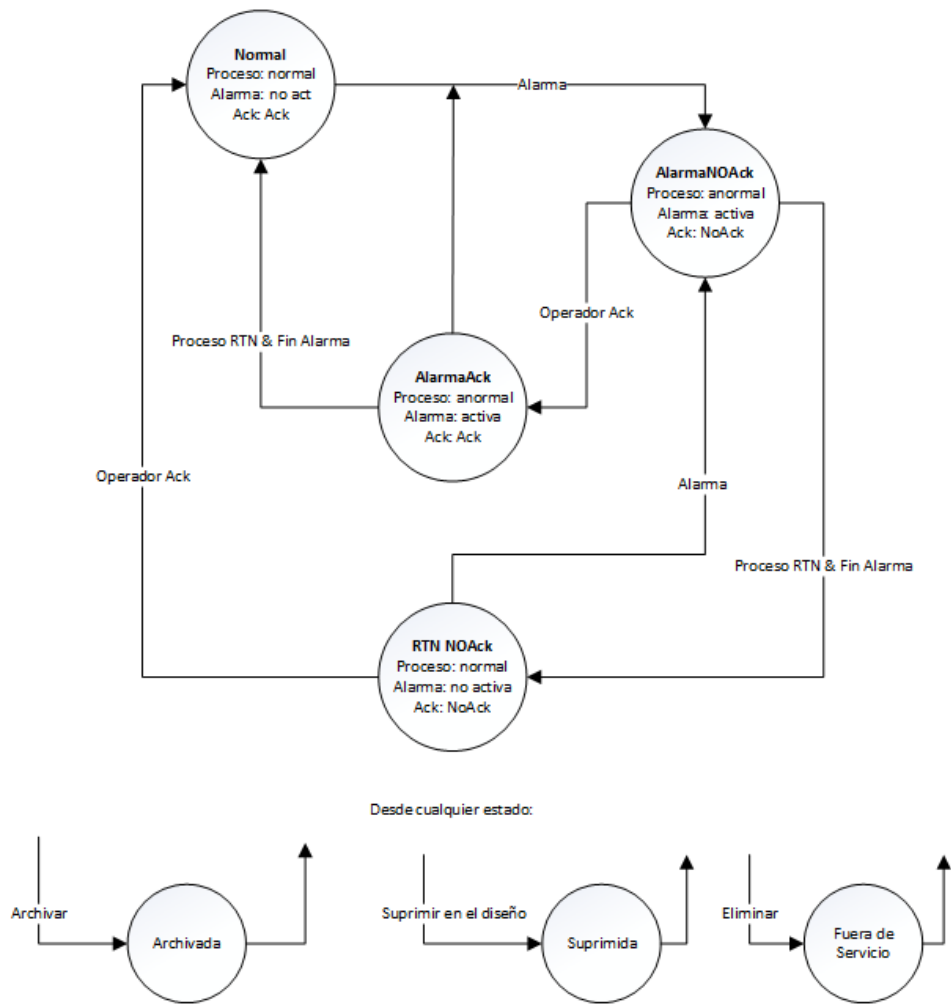


Figura 3.10. Diagrama de transición de estados de una alarma

## 4 Análisis de escenarios y situaciones según COLREGs

Todo sistema de ayuda para la prevención de colisiones ha de estar fundamentado en el COLREGs. En este capítulo se presenta el análisis e identificación de los posibles escenarios en un encuentro entre buques y de las situaciones que en ellos se den, necesario para dar respuestas correctas ante las posibles situaciones críticas.

Las situaciones críticas que COLREGs pretende evitar son aquellas que pueden generar una colisión. Además de la colisión propiamente dicha, la Regla 8 - Evitar abordajes en su apartado c) menciona la expresión “aproximación excesiva” (*close-quarters*) y en el apartado d) “distancia segura” (*safe distance*). Aproximación excesiva corresponde, pues, a una distancia comprendida entre la colisión y la distancia segura, cuya determinación genera intenso debate desde hace mucho tiempo (Hilgert, 1983; Tsai *et al.*, 2017).

Para una correcta valoración de la situación susceptible de ser crítica, es necesario conocer la distancia, la marcación (*relative bearing*,  $M^\circ$ ) y los rumbos verdaderos (*Headings*) del buque propio (*Own ship*-  $H_O$ ) y del blanco (*Target ship*-  $H_T$ ), según se ilustra en la Figura 4.1. El valor de  $M^\circ$  puede calcularse conocida la demora (*bearing*,  $B$ ) y el *heading*  $H_O$ .

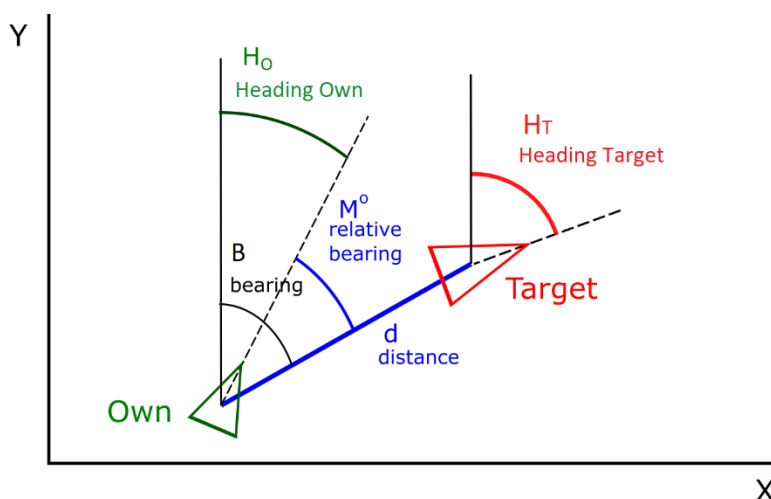


Figura 4.1. Distancia y marcación

A partir de las distancias y marcaciones del *Own* al *Target* en  $n$  tiempos dados (recomendándose  $n > 2$  para comprobar la uniformidad del movimiento), se puede conocer la velocidad relativa  $S_R$ , el CPA y el TCPA. En la Figura 4.2 se toman los instantes  $t_1$  y  $t_3$  para el cálculo de estos valores. La posición intermedia, en un tiempo  $t_2$ , es necesaria para analizar la coherencia del movimiento del *Target*.

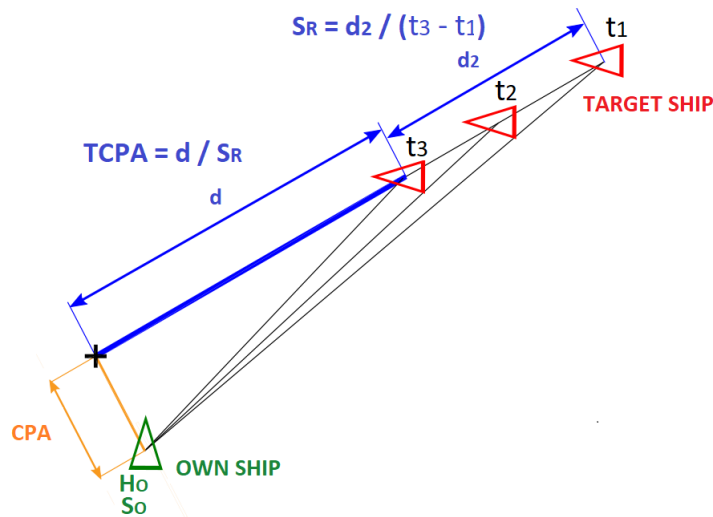


Figura 4.2. Velocidad relativa, CPA y TCPA

CPA permite identificar el tipo de encuentro (*collision*, *close-quarters* o *safe distance*). El TCPA se utiliza para priorizar las situaciones críticas (Bole *et al.*, 2014; Xu & Wang, 2014).

Atendiendo a la visibilidad en la zona del encuentro, COLREGs define tres escenarios:

- Buques a la vista uno del otro (sección II),
- Buques no a la vista con RADAR (sección III) y
- Buques no a la vista sin RADAR (sección III).

En el escenario de buques a la vista (sección II), se identifican tres situaciones críticas:

- Alcance (*Overtaking*), Regla 13,
- Vuelta encontrada (*Head-On*), Regla 14, y
- Cruce (*Crossing*), Regla 15.

Común a las tres situaciones es la necesidad de identificar el rumbo verdadero (*Heading*), de los buques. Es una de las referencias básicas, junto a la marcación, que se utilizan para distinguir:

- al buque que tiene preferencia de paso, *stand on*,
- del buque que ha de alterar el suyo, *give way*.

Estas preferencias de paso no son absolutas, y vienen acotadas por la Regla 16, Regla 17 a) ii) y Regla 17 b).

Regla 16 - Maniobra del buque que “cede el paso” (*give way*).

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

Regla 17 - Maniobra del buque que “sigue rumbo” (*stand on*).

*a) i) Cuando uno de los dos buques deba mantenerse apartado de la derrota del otro, este último mantendrá su rumbo y velocidad.*

*a) ii) No obstante, este otro buque puede actuar para evitar el abordaje con su propia maniobra, tan pronto como le resulte evidente que el buque que debería apartarse no está actuando en la forma preceptuada por este Reglamento.*

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

Como se puede comprobar, partiendo de una situación de asignación de preferencias, dicha asignación se va diluyendo con el fin último de evitar una posible colisión, por lo que lo que se puede afirmar que los buques “llegan a perder” su prioridad.

Eso no significa que los buques que no tienen prioridad puedan forzar la situación para hacer perder la prioridad a los buques que sí la tienen.

A continuación se desarrollan las situaciones que generan las prioridades.

#### 4.1 Overtaking (Buque que alcanza)

Regla 13 - Buque que “alcanza”.

- 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.
- Se considerará como buque que alcanza a todo buque que se aproxime a otro viniendo desde una marcación mayor de 22,5 grados a popa del través de este último, es decir, que se encuentre en una posición tal respecto del buque alcanzado que de noche solamente le sea posible ver la luz de alcance de dicho buque y ninguna de sus luces de costado.
- Cuando un buque abrigue dudas de si está alcanzando o no a otro, considerará que lo está haciendo y actuará como buque que alcanza.
- Ninguna variación posterior de la marcación entre los dos buques hará del buque que alcanza un buque que cruza, en el sentido que se da en este Reglamento, ni le dispensará de su obligación de mantenerse apartado del buque alcanzado, hasta que lo haya adelantado completamente y se encuentre en franquía.

La referencia para la identificación de esta situación es la proa o *Heading* del buque que está siendo alcanzado (Figura 4.3). El OONW del buque que alcanza, obligado a tomar la iniciativa, ha de conocer el *Heading* del otro buque y ha de calcular y analizar la velocidad relativa  $S_R$ .

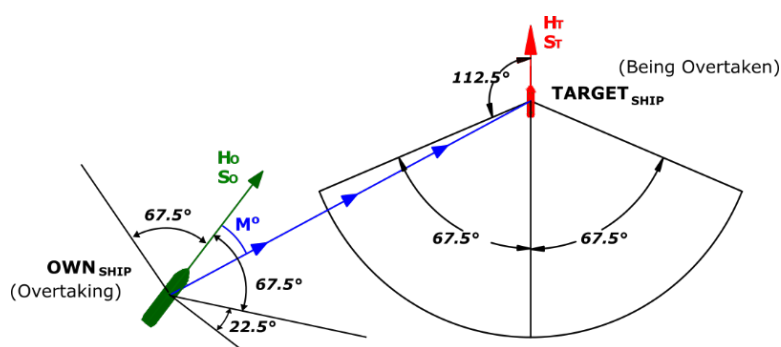


Figura 4.3. Overtaking, representación gráfica

Es la situación de mayor prioridad de este escenario. Genera, en realidad, dos posibles situaciones: un buque que alcanza (*Overtaking*) y un buque que está siendo alcanzado (*Being Overtaken*), según muestran la Figura 4.4 y la Figura 4.5.

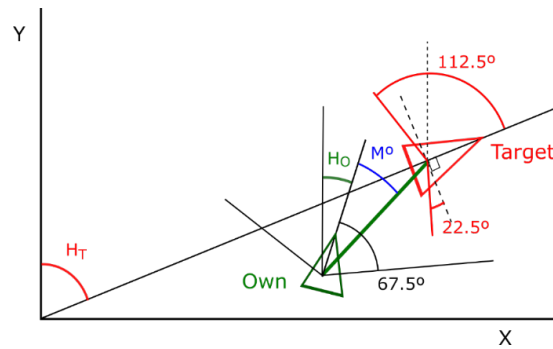


Figura 4.4. Buque propio alcanza otro buque

Cuando el buque propio está alcanzando, la marcación del otro buque sería:  $(0^\circ \leq M^\circ < 67.5^\circ)$  y  $(292.5^\circ < M^\circ \leq 360^\circ)^2$ . En términos marinos, una marcación de 67.5° a banda y banda.

En cuanto a la velocidad relativa se tendría que dar que  $S_R < S_O$ .

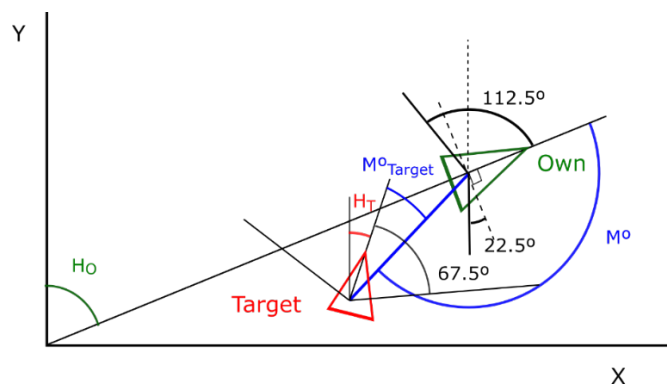


Figura 4.5. Buque propio siendo alcanzado

El buque que está siendo alcanzado, a priori, no está obligado a ninguna maniobra de alteración de su movimiento. Al contrario, tiene la indicación de la Regla 17 a) de mantener su rumbo y su velocidad para facilitar la maniobra del otro buque. Cuando tenga la certeza de que el otro buque no hace lo correcto y se genere una situación de peligro, sí estaría obligado a actuar.

Para considerar que el buque propio está siendo alcanzado la marcación del otro buque sería  $(112.5^\circ < M^\circ < 247.5^\circ)$  y la velocidad relativa  $S_R > 0$ .

## 4.2 Head-On (Vuelta encontrada)

Regla 14 - Situación de “vuelta encontrada”.

- Cuando dos buques de propulsión mecánica naveguen de vuelta encontrada a rumbos opuestos o casi opuestos, con riesgo de abordaje, cada uno de ellos caerá a estribor de forma que pase por la banda de babor del otro.
- Se considerará que tal situación existe cuando un buque vea a otro por su proa, o casi por su proa, de forma que de noche vería las luces de tope de ambos palos del otro enfiladas o casi enfiladas y/o las dos luces de costado, y de día observaría al otro buque bajo el ángulo de apariencia correspondiente.
- Cuando un buque abrigue dudas de si existe tal situación, supondrá que existe y actuará en consecuencia.

<sup>2</sup>  $M^\circ$  es un valor real en  $[0^\circ, 360^\circ[$  ( $0^\circ \leq M^\circ < 360^\circ$ ,  $M^\circ(360^\circ) = M^\circ(0^\circ)$ ). Se incluye el valor  $360^\circ$  en la expresión del rango para conservar la simetría de las bandas.

Para identificar este encuentro, siguiendo el criterio de  $M^\circ$  y  $S_R$ :

- Rango de  $M^\circ$ : como vemos en la Regla 14, no está definido en el actual COLREGs (*casi por su proa* es una expresión difícil de cuantificar), si bien en tiempos pretéritos tuvo una definición en grados (Cockcroft & Lameijer, 2011).
- En cuanto al criterio de la  $S_R$ , evidentemente sería siempre mayor que la velocidad propia  $S_O$ .

La discrecionalidad que se observa en los trabajos a la hora de determinar el sector de  $M^\circ$  en *Head On* (Tabla 4.1) es inaceptable para un CAS de carácter global.

Tabla 4.1. Sectores de *Head-On* en la bibliografía

SITUACIÓN DE HEAD-ON	
$M^\circ$ (babor y estribor)	AUTORES
$5^\circ$	(Cockcroft, 1982; Tsou <i>et al.</i> , 2010; Du <i>et al.</i> , 2020)
$5.7^\circ$	(He <i>et al.</i> , 2017)
$10^\circ$	(Montewka <i>et al.</i> , 2011)
$15^\circ$	(Szlapczynski & Krata, 2018)
$22.5^\circ$	(Tam & Bucknall, 2010)
$30^\circ$	(IALA, 2018)

Supondremos situación de *Head-On* cuando la marcación  $M^\circ$  para ambos buques es menor o igual que un valor prefijado, por defecto  $5^\circ$  (el más restrictivo de los mencionados).

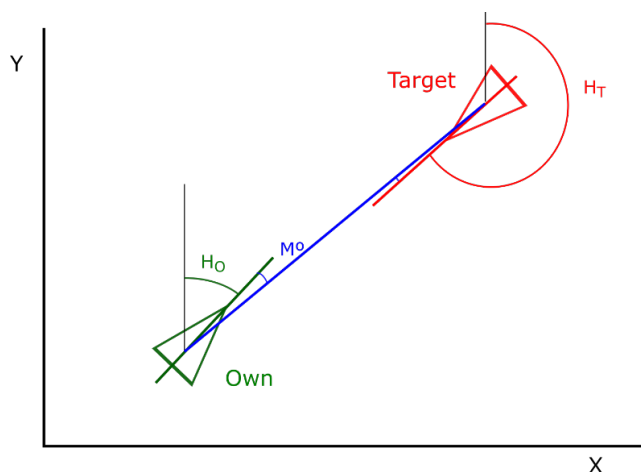


Figura 4.6. *Head-On*, representación gráfica

### 4.3 Crossing (Cruce)

Regla 15 - Situación “de cruce”.

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

Es la situación con menos jerarquía, ha de considerarse una situación residual de no estar en *Overtaking* ni en *Head-On*. En cuanto a los criterios para su identificación se tiene:

- Rango de  $M^\circ$ : ( $0^\circ \leq M^\circ \leq 112.5^\circ$ ) y ( $247.5^\circ \leq M^\circ \leq 360^\circ$ ), siempre que no se esté en las otras dos situaciones.
- $S_R > 0$ .

La Figura 4.7 resume gráficamente las situaciones de buques a la vista.

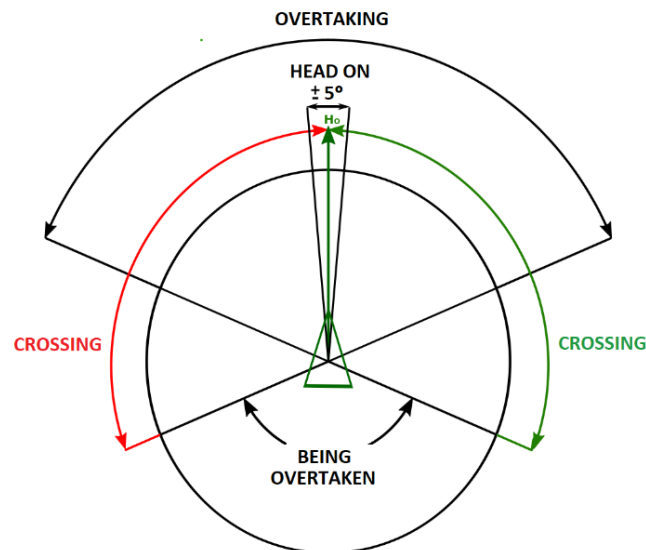


Figura 4.7. Situaciones, buques a la vista

#### 4.4 Buques no a la vista (sección III)

Regla 19 - Conducta de los buques en condiciones de visibilidad reducida.

...

d) *Todo buque que detecte únicamente por medio del RADAR la presencia de otro buque, determinará si se está creando una situación de aproximación excesiva y/o un riesgo de abordaje. En caso afirmativo maniobrará con suficiente antelación, teniendo en cuenta que si la maniobra consiste en un cambio de rumbo, en la medida de lo posible se evitará lo siguiente:*

- (i) *un cambio de rumbo a babor para un buque situado a proa del través, salvo que el otro buque esté siendo alcanzado;*
- (ii) *un cambio de rumbo dirigido hacia un buque situado por el través o a popa del través.*

En el escenario de buques no a la vista con ayuda de RADAR se distinguen tres situaciones:

- *Overtaking* (buque que alcanza),
- *Forward of the beam* (a proa del través),
- *Abeam or abaft the beam* (al través o a popa del través).

La situación de Overtaking está identificada en el apartado d)(i) de la Regla 19: ... *se evitará lo siguiente: un cambio de rumbo a babor para un buque situado a proa del través salvo que el otro buque esté siendo alcanzado.* Al no existir prioridades, el buque que está siendo alcanzado también tiene que maniobrar.

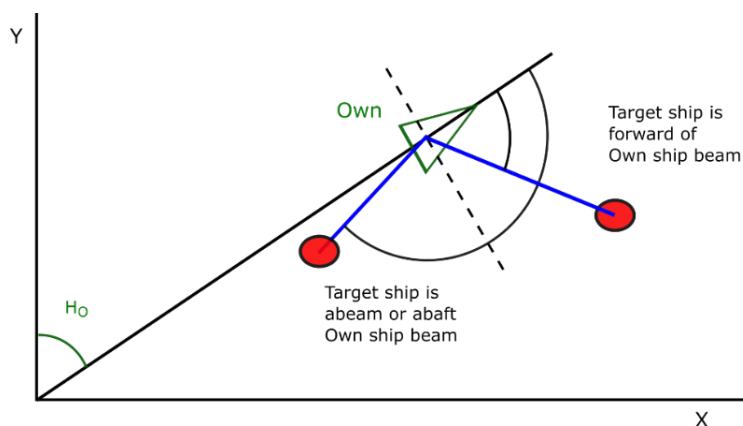


Figura 4.8. Buques a proa y a popa del través

- *Forward of the beam:* ( $0^\circ \leq M^\circ < 90^\circ$ ) y ( $270^\circ < M^\circ \leq 360^\circ$ ) y ( $S_R > 0$ ).
- *Abeam or abaft the beam:* ( $90^\circ \leq M^\circ \leq 270^\circ$ ) y ( $S_R > 0$ ).

En el escenario de buques no a la vista sin ayuda de RADAR tiene el protagonismo la detección acústica, señalada como forma de detección en cualquier circunstancia según la Regla 5 de COLREGs. Se describe en la Regla 19 e): *Salvo en los casos en que se haya comprobado que no existe riesgo de abordaje, todo buque que oiga, al parecer a proa de su través, la sirena de niebla de otro buque, o que no pueda evitar una situación de aproximación excesiva con otro buque situado a proa de su través, deberá reducir su velocidad hasta la mínima de gobierno. Si fuera necesario, suprimirá su arrancada y en todo caso navegará con extrema precaución hasta que desaparezca el peligro de abordaje.*

#### 4.5 Restricciones

Los encuentros entre buques que pueden generar una situación crítica deben tratarse de acuerdo con las normas del COLREGs. Por tanto, todo CAS debe considerar cuidadosamente los escenarios y situaciones bajo todos los criterios exigidos y muy particularmente el criterio de visibilidad, descritos en los apartados anteriores y resumidos en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Situaciones para los distintos escenarios, según visibilidad

<b>Vessels in sight (Buques a la vista)</b>	<b>Vessels not in sight with RADAR (Buques no a la vista con RADAR)</b>	<b>Vessels not in sight without RADAR (Buques no a la vista sin RADAR)</b>
<i>Overtaking</i> (Alcance)	<i>Overtaking</i> (Alcance)	<i>Forward of the beam</i> (A proa del través)
<i>Head-On</i> (Vuelta encontrada)	<i>Forward of the beam</i> (A proa del través)	
<i>Crossing</i> (Cruce)	<i>Abeam or abaft the beam</i> (Al través o a popa del través)	

Es común encontrar propuestas que reducen todos los encuentros a los dados en el escenario de buques a la vista (Montewka *et al.*, 2010; Perera *et al.*, 2015; Lopez-Santander & Lawry, 2017; Lyu & Yin, 2019; Ahmed *et al.*, 2021; Zaccone, 2021). Pocos estudios tienen en cuenta todos los escenarios y situaciones (Hilgert & Baldauf, 1997; Szlapczynski *et al.*, 2018).

Además del criterio de visibilidad, los CAS deberían tener en cuenta dos clases de limitaciones o restricciones al movimiento normal de los buques, identificadas en COLREGs. Las primeras tienen que ver con las características o la actividad del propio buque, y aparecen en la Regla 18 - Obligaciones entre categorías de buques:

*Sin perjuicio de lo dispuesto en las Reglas 9, 10 y 13*

- Los buques de propulsión mecánica, en navegación, se mantendrán apartados de la derrota de:*



- i) *Un buque sin gobierno.*
  - ii) *Un buque con capacidad de maniobra restringida*
  - iii) *Un buque dedicado a la pesca*
  - iv) *Un buque de vela*
- b) *Los buques de vela, en navegación, se mantendrán apartados de la derrota de:*
- i) *Un buque sin gobierno*
  - ii) *Un buque con capacidad de maniobra restringida*
  - iii) *Un buque dedicado a la pesca*
- c) *En la medida de lo posible, los buques dedicados a la pesca, en navegación, se mantendrán apartados de la derrota de:*
- i) *Un buque sin gobierno*
  - ii) *Un buque con capacidad de maniobra restringida*
- d) i) *todo buque que no sea un buque sin gobierno o un buque con capacidad de maniobra restringida evitará, si las circunstancias del caso lo permiten, estorbar el tránsito seguro de un buque restringido por su calado, que exhiba las señales de la Regla 28.*
- ii) *un buque restringido por su calado navegará con particular precaución teniendo muy en cuenta su condición especial.*

...

Estas categorías se corresponden con el Estado de Navegación, dato que el AIS transmite en los mensajes con información dinámica, mostrado en Tabla 4.3. El estado de navegación puede fijar una prioridad que determine quién debe maniobrar. Hay que recordar que se ha de combinar con otros criterios como el de la visibilidad (Reglas 13 a 17 y 19).

Tabla 4.3. Estado de Navegación

Código	Descripción
0	en camino con motor
1	anclado
2	fuera de control
3	maniobrabilidad restringida
4	limitado por el calado
5	amarrado
6	encallado
7	pescando
8	en camino con vela
9	reservado para futuras enmiendas de estado de navegación para barcos que transportan materias peligrosas, sustancias dañinas o contaminantes marítimos, o contaminantes o peligros de categoría C de la OMI (HSC)
10	reservado para futuras enmiendas de estado de navegación para barcos que transportan DG, HS o MP, o contaminantes o peligros de categoría A de la OMI (WIG)
11	barco de motor remolcado por popa (uso regional)
12	barco de motor en marcha o remolcado de costado (uso regional)
13	reservado para uso futuro
14	AIS-SART, MOB-AIS, RLS-AIS
15	no definido = defecto (también utilizado por el AIS-SART, MOB-AIS y RLS-AIS en prueba)

Las segundas restricciones a tener en cuenta en un CAS se basan en consideraciones geográficas, y se resumen en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Restricciones geográficas y Reglas asociadas

Restricciones geográficas	Regla COLREGs
Canales angostos	Regla 9
Vías de circulación	Regla 10
Zonas de separación del tráfico	Regla 10
Zonas de navegación costera	Regla 10

En estas zonas, generalmente de mucho tráfico marítimo, las acciones pueden diferir considerablemente de las disposiciones generales de las secciones II y III.

Regla 9 - Canales angostos.

- a) *Los buques que naveguen a lo largo de un paso o canal angosto se mantendrán lo más cerca posible del límite exterior del paso o canal que quede por su costado de estribor, siempre que puedan hacerlo sin que ello entrañe peligro.*
- b) *Los buques de eslora inferior a 20 metros o los buques de vela no estorbarán el tránsito de un buque que sólo pueda navegar con seguridad dentro de un paso o canal angosto.*
- c) *Los buques dedicados a la pesca no estorbarán el tránsito de ningún otro buque que navegue dentro de un paso o canal angosto.*

...

Regla 10 - Dispositivos de separación del tráfico.

- a) *La presente regla se aplica a los dispositivos de separación del tráfico aprobados por la Organización y no exime a ningún buque de las obligaciones contraídas en virtud de otras reglas.*
- b) *Los buques que utilicen un dispositivo de separación del tráfico deberán:*
  - i. *navegar en la vía de circulación apropiada, siguiendo la dirección general de la corriente del tráfico indicada para dicha vía;*
  - ii. *en lo posible, mantener su rumbo fuera de la línea de separación o de la zona de separación del tráfico;*
  - iii. *normalmente, al entrar en una vía de circulación o salir de ella, hacerlo por sus extremos, pero al entrar o salir de dicha vía por uno u otro de sus límites laterales, hacerlo con el menor ángulo posible en relación con la dirección general de la corriente del tráfico.*

...



## 5 Comunicaciones AIS entre buques

Se amplían en este capítulo las descripciones de las comunicaciones AIS introducidas en el apartado 1.2.1.

La comunicación se realiza mediante mensajes predefinidos que se intercambian entre los buques equipados con estaciones AIS. Para este proyecto es necesario disponer de estaciones AIS clase A, y se utilizan los siguientes mensajes (ITU, 2014):

- Los mensajes tipo 1, 2, 3, incluyen información dinámica de la posición del buque. Cada buque difunde esta información en intervalos variables entre 2s y 3m. Estos mensajes tienen el mismo formato; las diferencias entre ellos están en el acceso al medio de transferencia de datos (capa de enlace).
- Los mensajes tipo 5, que incluyen datos estáticos del buque. Cada buque difunde esta información en intervalos de 6m.
- Los mensajes tipo 6, que incluyen mensajes binarios direccionados (no difundidos).
- Los mensajes tipo 7, que son acuses de recibo (ACKs) asociados a los mensajes 6.

### 5.1 Mensajes 1,2,3. Informes de posición

Los mensajes 1,2,3 tienen el formato mostrado en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Mensajes 1,2,3

Campo	Bits	Descripción	Unidades
0-5	6	ID del mensaje	Unsigned integer: 1..3
6-7	2	Nº de repeticiones	0..3; 0 = defecto; 3 = no repetir más
8-37	30	Número de identificación del servicio móvil marítimo o MMSI ( <i>Maritime Mobile Service Identity</i> )	Unsigned integer: 9 dígitos. Identifica inequívocamente a cada estación del servicio móvil digital (estaciones costeras y estaciones de barco)
38-41	4	Estado de navegación	Ver Tabla 4.3
42-49	8	Velocidad de giro (ROT)	Signed integer. 0 a +126 = girando a la derecha, hasta 708° por min; 0 a -126 = girando a la izquierda, hasta 708° por min Los valores entre 0 y 708° por min vienen codificados mediante: $ROTAIS = 4,733 \text{ SQRT}(ROT_{sensor})$ , donde $ROT_{sensor}$ es la velocidad de giro introducida por un indicador de velocidad de giro externo (TI). $ROTAIS$ está redondeado al valor entero más próximo. +127 = girando a la derecha a más de 5° por 30 s (no hay TI disponible) -127 = girando a la izquierda a más de 5° por 30 s (no hay TI disponible) -128 (80 hex) indica que no se dispone de información de giro =defecto. Los datos ROT no deben derivarse de la información COG

Campo	Bits	Descripción	Unidades
50-59	10	Velocidad sobre el fondo - efectiva (SOG)	Unsigned integer. Velocidad en pasos de 1/10 de nudo (0-102.2 nudos) 1023 = no disponible, 1022 = 102.2 nudos o más
60-60	1	Exactitud	1 = alto (< 10 m) 0 = bajo (> 10m) =defecto
61-88	28	Longitud	Minutos/10000. Valores entre -180° y + 180°. Este: positivo, Oeste: negativo (complemento a 2). 181= no disponible=defecto
89-115	27	Latitud	Minutos/10000. Valores entre -90° y + 90°. Norte: positivo, Sur: negativo (complemento a 2). 91= no disponible=defecto
116-127	12	Rumbo sobre el fondo - efectivo (COG)	Relativo al norte verdadero, 0.1 grados de precisión
128-136	9	Rumbo verdadero (HDG)	0 to 359 grados, 511 = no disponible=defecto
137-142	6	Indicación de tiempo	Segundos (UTC)
143-144	2	Indicador de maniobra especial	0 = no disponible = defecto 1 = no hay maniobra especial 2 = maniobra especial
145-147	3	Reservado	No empleado. Debe ponerse en cero. Reservado para uso futuro
148-148	1	Bandera RAIM (supervisión de integridad autónoma de receptor) de dispositivo electrónico de determinación de posición	0 = RAIM no está en uso = defecto; 1 = RAIM en uso
149-167	19	Estado de comunicación	Ver más información en (Raymond, 2016)

## 5.2 Mensaje 5. Datos estáticos y relativos al viaje del barco

El mensaje 5 incluye los datos estáticos o relativos al viaje mostrados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Mensaje 5

Campo	Bits	Descripción	Unidades
0-5	6	ID del mensaje	Unsigned integer: 5
6-7	2	Nº de repeticiones	0..3; 0 = defecto; 3 = no repetir más
8-37	30	MMSI	Unsigned integer: 9 dígitos.
38-39	2	Indicador de versión AIS	0 = estación conforme a la Recomendación UIT-R M.1371-1 1 = estación conforme a la Recomendación UIT-R M.1371-3 (o posterior) 2 = estación conforme a la Recomendación UIT-R M.1371-5 (o posterior) 3 = estación conforme a ediciones futuras
40-69	30	Número OMI	Unsigned integer: 9 dígitos 0 = no disponible = defecto – No aplicable a aeronave SAR 000000001-000099999 no se utiliza

			0001000000-0009999999 = número OMI válido; 0010000000-1073741823 = número de estado de bandera oficial
70-111	42	Distintivo de llamada	6 caracteres ASCII de 6 bit (ver Tabla 5.3) @@@@@@ = no disponible = defecto
112-231	120	Nombre del buque	20 caracteres ASCII de 6 bits @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@ = no disponible = defecto
232-239	8	Tipo de buque y tipo de carga	0..255. Ver Tabla 5.4
240-248	9	Distancia ref-proa	Unsigned integer (metros)
249-257	9	Distancia ref-popa	Unsigned integer (metros)
258-263	6	Distancia ref-babor	Unsigned integer (metros)
264-269	6	Distancia ref-estribor	Unsigned integer (metros)
270-273	4	Tipo de dispositivo electrónico de determinación de posición	0 = indefinido (defecto) 1 = GPS 2 = GLONASS 3 = GPS/GLONASS combinados 4 = Loran-C 5 = Chayka 6 = sistema de navegación integrado 7 = vigilado 8 = Galileo 9-14 = no empleado 15 = GNSS interno
274-277	4	ETA (Hora estimada de llegada) - mes	1..12; 0 = no disponible = defecto
278-282	5	ETA - día	1..31; 0 = no disponible = defecto
283-287	5	ETA - hora	0..23; 24 = no disponible = defecto
288-293	6	ETA - minutos	0..59; 60 = no disponible = defecto
294-301	8	Calado estático actual máximo	En 1/10 m, 255 = calado 25.5 m o mayor, 0 = no disponible = defecto
302-421	120	Destino	Máximo 20 caracteres ASCII de 6-bits; @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@ = no disponible
422	1	DTE	Terminal de datos listo, 0 = disponible, 1 = no disponible = defecto
423	1	Reserva	No empleado. Debe ser cero. Reservado para uso futuro

Tabla 5.3. Codificación ASCII de 6 bits

Carácter	Dec	Hex	Binario	Carácter	Dec	Hex	Binario
@	0	0x00	00 0000	!	33	0x21	100001
A	1	0x01	00 0001	"	34	0x22	100010
B	2	0x02	00 0010	#	35	0x23	100011
C	3	0x03	00 0011	\$	36	0x24	100100
D	4	0x04	00 0100	%	37	0x25	100101
E	5	0x05	00 0101	@	38	0x26	100110
F	6	0x06	00 0110	`	39	0x27	100111
G	7	0x07	00 0111	(	40	0x28	101000
H	8	0x08	00 1000	)	41	0x29	101001
I	9	0x09	00 1001	*	42	0x2A	101010
J	10	0x0A	00 1010	+	43	0x2B	101011

K	11	0x0B	00 1011	,	44	0x2C	101100
L	12	0x0C	00 1100	-	45	0x2D	101101
M	13	0x0D	00 1101	.	46	0x2E	101110
N	14	0x0E	00 1110	/	47	0x2F	101111
O	15	0x0F	00 1111	0	48	0x30	110000
P	16	0x10	01 0000	1	49	0x31	110001
Q	17	0x11	01 0001	2	50	0x32	110010
R	18	0x12	01 0010	3	51	0x33	110011
S	19	0x13	01 0011	4	52	0x34	110100
T	20	0x14	01 0100	5	53	0x35	110101
U	21	0x15	01 0101	6	54	0x36	110110
V	22	0x16	01 0110	7	55	0x37	110111
W	23	0x17	01 0111	8	56	0x38	111000
X	24	0x18	01 1000	9	57	0x39	111001
Y	25	0x19	01 1001	:	58	0x3A	111010
Z	26	0x1A	01 1010	;	59	0x3B	111011
[	27	0x1B	01 1011	<	60	0x3C	111100
\	28	0x1C	01 1100	=	61	0x3D	111101
]	29	0x1D	01 1101	>	62	0x3E	111110
^	30	0x1E	01 1110	?	63	0x3F	111111
-	31	0x1F	01 1111				
Espacio	32	0x20	10 0000				

Tabla 5.4. Tipos de barco y tipos de carga

Valor	Descripción
0	No disponible o ningún barco = defecto
30	Pesca
31	Remolcando
32	Remolcando y la longitud del remolque > 200 m o la anchura > 25 m
33	Dragado u operaciones submarinas
34	Operaciones submarinas
35	Operaciones militares
36	Navegación a vela
37	Turismo
41	Barco de alta velocidad transportando mercancías peligrosas
50	Barco de práctico
51	Barcos de rescate
52	Remolcadores
53	Pilotos de puerto
54	Barcos con facilidades o equipos antipolución
55	Guardacostas
60..69	Barcos de pasaje
70..79	Barcos de carga
80..89	Buques tanque
90-99	Otros tipos
100-199	Reservado, para uso regional
200-255	Reservado, para uso futuro

### 5.3 Mensaje 6. Mensaje binario direccionado

El mensaje binario direccionado contiene los parámetros resumidos en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Mensaje 6

Campo	Bits	Descripción	Unidades												
0-5	6	ID del mensaje	Unsigned integer: 6												
6-7	2	Nº de repeticiones	0..3; 0 = defecto; 3 = no repetir más												
8-37	30	ID de origen	Unsigned integer. 9 dígitos. MMSI del buque origen												
38-39	2	Nº de secuencia	0..3												
40-69	30	ID de destino	Unsigned integer. 9 dígitos. MMSI del buque destino												
70	1	Bandera de retransmisión	0 = no hay retransmisión = defecto; 1 = retransmitido												
71	1	Reserva	No empleado. Debe ser 0												
72-87	16	ID de aplicación	16 bits												
88-	920	Datos de aplicación	Hasta 920 bits (115 bytes), divididos en intervalos: <table border="1" data-bbox="853 772 1157 985"> <thead> <tr> <th>intervalos</th> <th>bytes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>64</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>92</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>115</td> </tr> </tbody> </table>	intervalos	bytes	1	8	2	36	3	64	4	92	5	115
intervalos	bytes														
1	8														
2	36														
3	64														
4	92														
5	115														

El campo ID de aplicación se divide en dos zonas, según muestra la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Campo ID de aplicación del Mensaje 6

Bit	Descripción
15-6	Código de zona designada (DAC). Este código se basa en las cifras de identificación marítima (MID). Cero (prueba) y 1 (internacional) son excepciones.
5-0	0..63. Identificador de función. El significado debe ser determinado por la autoridad responsable de la zona dada en el código de zona designada

El ID de aplicación de prueba (DAC = 0) con cualquier identificador de función (0 a 63) debe emplearse para pruebas. El identificador de función es arbitrario. El ID de aplicación internacional (DAC = 1) debe emplearse para aplicaciones internacionales de importancia mundial.

Para la aplicación que se desarrolla en esta tesis se utilizará DAC = 0 y se utilizarán los 6 bits identificadores de función para codificar los mensajes que un PLC va a enviar a otro. Se podrán codificar hasta 64 mensajes distintos.

Los datos de aplicación ocuparán el mínimo número de bits posible. Se enviará 1 intervalo, 8 bytes, incluyendo ID de aplicación, lo que deja 48 bits para los datos de aplicación. Si es necesario, 2 intervalos, hasta 36 bytes (hasta 34 bytes de datos).

### 5.4 Mensaje 7. Acuse de recibo binario

El Mensaje 7 se emplea como acuse de recibo de hasta cuatro Mensajes 6 recibidos y se transmite a través del canal por el que se ha recibido el mensaje direccionado del que se acusa recibo. El formato se resume en la Tabla 5.7.



Tabla 5.7. Mensaje 7

Campo	Bits	Descripción	Unidades
0-5	6	ID del mensaje	Unsigned integer: 7
6-7	2	Nº de repeticiones	0..3; 0 = defecto; 3 = no repetir más
8-37	30	ID de origen	Unsigned integer. 9 dígitos. MMSI del buque origen
38-39	2	Reserva	0 – No se utiliza
40-69	30	ID1 de destino	Unsigned integer. 9 dígitos. MMSI del buque destino1
70-71	2	Reserva	0 – No se utiliza
72-101	30	ID2 de destino	Unsigned integer. 9 dígitos. MMSI del buque destino2
102-103	2	Reserva	0 – No se utiliza
104-133	30	ID3 de destino	Unsigned integer. 9 dígitos. MMSI del buque destino3
134-135	2	Reserva	0 – No se utiliza
136-165	30	ID4 de destino	Unsigned integer. 9 dígitos. MMSI del buque destino4
166-167	2	Reserva	0 – No se utiliza

## 5.5 Sentencias NMEA

Las estaciones AIS utilizan interfaces digitales marítimas y estándares de comunicación de datos para el intercambio de datos con otros dispositivos. Esta comunicación digital se realiza mediante sentencias o grupos de parámetros (PGN) codificados siguiendo estándares NMEA.

### 5.5.1 Transmisión de datos NMEA 0183

Los datos son transmitidos en serie en forma asíncrona, de acuerdo con el estándar 2.1 de IEC 61162-1/2. El primer bit es el de arranque y está seguido por los bits de datos y el bit de parada. Se utilizan los parámetros siguientes:

- Velocidad: 38.4 Kbps (IEC 61162-2) o 4.8 Kbps (IEC61162-1)
- Bits de datos: 8 (D7= 0); sin paridad
- Bit de parada: 1

#### Formato de las sentencias NMEA 0183 (NMEA 0183, 2020)

Una sentencia contiene, en el orden que se indica, los siguientes elementos:

- "\$" or "!" - Inicio de sentencia
- <address field> - Identificador de la sentencia y del emisor
- [","<data field>] - Cero o más campos de datos
- ...
- [","<data field>]
- "\*"<checksum field> - Checksum
- <CR><LF> – Fin de sentencia

Se describen a continuación las sentencias apropiadas para este proyecto: VDM, VDO, ABM, ABK.

#### 5.5.1.1 Sentencia VDM

Transfiere el mensaje AIS recibido por VHF, encapsulado y codificado según lo definido en UIT-R.M 1371-5 (codificación de 6 bits).

**Formato: !-VDM,x,x,x,a,s--s,x\*hh<CR><LF>**

!--VDM,x<sup>1</sup>,x<sup>2</sup>,x<sup>3</sup>,a<sup>4</sup>,s--<sup>5</sup>s,x<sup>6</sup>\*hh<sup>7</sup><CR><LF>

- 1: número total de fragmentos necesarias para transferir el mensaje (1 a 9)
- 2: número del fragmento actual (1 a 9)
- 3: ID de la sentencia para mensajes multisentencia
- 4: código del canal de radio. AIS utiliza la parte alta del dúplex de dos canales de radio VHF: Canal A es 161.975Mhz (87B); Canal B es 162.025Mhz (88B)
- 5: mensaje ITU-R M.1371 encapsulado
- 6: número de bits de relleno (0 a 5)
- 7: suma de verificación (Checksum)

Ejemplo: !AIVDM,1,1,,B,177KQJ5000G?tO`K>RA1wUbN0TKH,0\*5C

AI: Datos del AIS

28 caracteres con codificación 6bits= 168 bits

```
00000100011100011101101110000101101000010100000000000000000101110011111110001111110100
0011011001110100010010001000001111111100101101010011110000000100100011011011000
```

Todos los mensajes encapsulados comienzan igual:

- Bits, 0..5: ID del mensaje (de 1 a 27). En el ejemplo, **1**
- Bits, 6,7: nº de veces que se ha repetido el mensaje. En el ejemplo, **0**
- 30 Bits, 8..37: MMSI (ID del usuario). En el ejemplo, **01110001110110111000 0101101000**, tipo UIN = 477553000

El *Checksum* es el XOR de todos los bytes entre ! y \* (excluidos los delimitadores), y escrito en hexadecimal.

#### 5.5.1.2 Sentencia VDO

Transfiere la información del buque propio. Formato idéntico a VDM.

#### 5.5.1.3 Sentencia ABM

Mensaje binario o de seguridad direccionado. A la recepción de esta sentencia, el AIS enviará el mensaje (tipo 6 o tipo 12) al buque direccionado.

Ejemplo: !AIABM,x,x,x,xxxxxxxx,x,xx,s--s,x\*hh<CR><LF>

#### 5.5.1.4 Sentencia ABK

Esta sentencia se genera cuando un AIS recibe un mensaje de ACK tipo 7, 13 o el fallo del envío del mensaje 6,12

Ejemplo: \$AIABK,xxxxxxxx,a,x,x,x,x\*hh<CR><LF>

### 5.5.2 Transmisión de datos NMEA 2000

El objetivo de esta norma es facilitar la interconexión entre equipos de diferentes fabricantes (NMEA 2000, 2020). NMEA 2000 es una norma CAN similar a los estándares de red utilizados en la industria del automóvil desde hace algunos años. No hay procesador central en una red NMEA 2000. La administración de la red es una función que se comparte entre todos los dispositivos conectados. La red es auto-configurable en el sentido de que los dispositivos pueden ser añadidos o eliminados mientras la red está activa.

Las sentencias se denominan PGNs (*Parameter Group Number*). Incluyen información equivalente a los mensajes contenidos en las sentencias NMEA 0183. En la Tabla 5.8 se incluyen los más relevantes para este proyecto.

*Tabla 5.8. Mensajes AIS y PGNs*

<b>Mensajes AIS</b>	<b>NMEA 2000 PGN</b>
1,2,3 (info dinámica)	129038
5 (info estática)	129794
6 (msg binario direccionado)	129795
7 (ACK 6)	129796
12 (msg de seguridad direccionado)	129801

## 6 Especificación del sistema relacionado con la seguridad

Según indica la norma IEC 61508, el objetivo de la especificación de los requisitos de seguridad del sistema E/E/PE es describir, en términos no dependientes del equipo, las funciones de seguridad y su modo de operación para lograr la seguridad funcional requerida. El diseño y la validación del sistema se basarán en esta especificación. Debe por tanto ser clara, precisa, verificable y viable. Se debe expresar en un lenguaje natural, formal o lógico, secuencial o en diagramas causa y efecto.

Debe contener, al menos:

- una descripción de todas las funciones de seguridad necesarias para alcanzar la seguridad funcional requerida, con los requisitos detallados para el diseño y desarrollo de los sistemas E/E/PE relacionados con la seguridad;
- descripción del comportamiento en función del tiempo de respuesta;
- descripción de las interfaces entre el sistema E/E/PE relacionado con la seguridad y el operador;
- descripción de las interfaces necesarias entre los sistemas E/E/PE relacionados con la seguridad y cualesquiera otros sistemas;
- todos los modos requeridos de comportamiento de los sistemas E/E/PE relacionados con la seguridad. En particular el comportamiento en disfunción y la respuesta exigida en el caso de disfunción.

Las funciones de seguridad a desarrollar tienen dos objetivos principales (ver Figura 3.6):

- Ayudar a la detección/identificación temprana de buques en las proximidades del buque propio con los que haya riesgo de colisión, lo que aumentará el tiempo de reacción disponible para calcular y realizar maniobras. La función de seguridad a la que llamaremos FS\_DETECT se encargará de este objetivo.
- Aumentar las probabilidades de realizar maniobras correctas, tanto del buque propio como del buque o buques para los que  $CPA < \text{distancia de seguridad}$ . Llamaremos FS\_MANOEV a la segunda función de seguridad.

Para este segundo objetivo es necesario establecer una comunicación entre los sistemas PE (PLCs) del buque propio y del otro buque involucrado (*target*) en cada maniobra. Esta comunicación se empleará en FS\_MANOEV en dos niveles de acuerdos:

- Para chequear si la información que manejan ambos PLCs es concordante. El PLC de cada buque ha de comunicar al otro la información que tiene disponible. Éste la comparará con la propia y responderá si es o no es compatible. Si hay diferencias entre los datos que manejan, cada PLC avisará a su operador.
- Para llegar a acuerdos entre los dos operadores. Si se cumplen los acuerdos del primer nivel, el PLC de cada buque informará a su operador de la posible maniobra a realizar, deducida a partir de la información disponible; esperará su decisión, la transmitirá al PLC del otro buque y esperará a que dicho PLC le comunique la respuesta del otro operador.

Este capítulo se estructura de la siguiente forma:

- En el primer apartado, se especifican los requisitos de FS\_DETECT.
- Los dos siguientes apartados describen el modo de comunicación entre los sistemas PE y los mensajes de comunicación que se han definido para todas las posibles situaciones y escenarios.
- El resto de apartados guardan relación con los objetivos asignados a la función FS\_MANOEV:

- descripción de la función,
- etapas definidas para el diálogo entre dos buques cuando uno de ellos detecta situación de prealerta, y
- ayuda al operador respecto a los cambios de rumbo o velocidad para alcanzar un CPA seguro.

## 6.1 Función de seguridad FS\_DETECT

A partir de la información estática y dinámica del buque propio y de los buques situados en sus proximidades (blancos), calculará la demora, distancia, velocidad y rumbo relativos, CPA y TCPA que relacionan al buque propio con cada uno de los blancos. Mostrará al operador (OONW) el “**universo visible**”: información de aquellos blancos que se encuentren en un área centrada en el buque propio y de radio preestablecido y variable por el OONW que vayan a pasar a una distancia mínima peligrosa ( $CPA < CPASafe$ ). Avisará cuando la distancia o el tiempo sean menores que unos valores de seguridad preestablecidos (dPrealerta, dAlerta, TCPASafe) y también ajustables por el OONW.

Estos parámetros de seguridad se definen de la siguiente forma:

- LRS: Distancia a la que se comienza el análisis de encuentros, radio del “universo visible”.
- CPASafe: Mínima distancia de paso considerada segura.
- TCPASafe: Tiempo mínimo considerado seguro para CPA.
- dPrealerta: Distancia para decidir e iniciar maniobras si el buque propio ha de ceder el paso.
- dAlerta: Distancia para decidir e iniciar maniobras si el buque propio es el que sigue a rumbo (*Stand-on*).

dPrealerta y dAlerta cuantifican las expresiones dadas en el COLREGs para iniciar las maniobras:

- En la Regla 16 (Maniobra del buque que “cede el paso”) y en la Regla 19 del COLREGs indica que en caso de riesgo de abordaje ... el buque ha de maniobrar **con anticipación suficiente...**
- La Regla 17, maniobra del buque que “sigue rumbo”, indica que éste ha de maniobrar para evitar el abordaje **tan pronto como le resulte evidente..., tan próximo al otro...**

Los valores de los parámetros de seguridad dependerán de las dimensiones y de las características de maniobrabilidad de los buques. La Resolución MSC.137(76) (IMO, 2002) indica que la maniobrabilidad del buque se considera satisfactoria si se cumplen, entre otros, los siguientes criterios:

- Capacidad de giro. El avance no debe exceder de 4.5 esloras (avance: distancia recorrida en la dirección del rumbo original desde la posición en la que se da la orden de 35° de timón hasta la posición en la que el rumbo ha cambiado 90° con respecto al rumbo original).
- Capacidad de giro inicial. Con la aplicación de un ángulo de timón de 10° a babor/estribor, el buque no debe haber recorrido más de 2.5 esloras de barco en el momento en que el rumbo haya cambiado en 10° con respecto al rumbo original.
- Capacidad de parada. El recorrido en la prueba de “todo atrás” en ningún caso debe superar las 20 esloras.

Por ejemplo, un buque de 300m de eslora que tenga que maniobrar 10° a babor o a estribor podría recorrer 750m hasta que la maniobra sea efectiva. O podría avanzar 6000m desde que se da una orden de parada hasta que se detenga. Los valores de sus parámetros de seguridad serán muy probablemente mayores que los de un buque de 100m de eslora.

La función de seguridad utilizará como dispositivo de entrada de datos un sistema AIS instalado a bordo, que proporcionará la información estática y dinámica, tanto del buque propio como de los buques en las proximidades. Esta información se recibe mediante los mensajes estándar descritos en el capítulo anterior. Los mensajes tipo 1, 2, 3, 18 incluyen los datos dinámicos. Los mensajes tipo 5, 24 incluyen datos estáticos. La salida de la función de seguridad corresponde a la información a mostrar en la interfaz con el operador. La Figura 6.1 representa el formato de esta función.

### Requisitos

- La comunicación entre el sistema AIS del buque y el sistema programable electrónico (PLC) se realizará mediante una interfaz digital y estándares de comunicación NMEA, descritos en el apartado 5.5.
- La interfaz con el operador (HMI) mostrará la información acerca de los buques que, dentro del radio dado, presentan unos valores de CPA y TCPA relativos al buque propio menores que los valores de seguridad establecidos. Estos valores se actualizarán con un periodo también establecido. No interesa mostrar la información del resto de buques detectados, para no sobrecargar al operador con información no relevante para la seguridad. Hay que tener en cuenta que el operador ha de atender a todas las pantallas de navegación: AIS, RADAR, etc. habituales en los puentes de mando. Desde este HMI el operador podrá modificar los valores establecidos para el radio de visualización, periodo de refresco de información, distancias y tiempos mínimos. Los datos que deberá suministrar el operador se resumen en la Tabla 6.1. La información a mostrar respecto a cada blanco, en la Tabla 6.2.
- Se decidirá el formato más adecuado del HMI de acuerdo con las opiniones de operadores (pilotos, capitanes) y expertos en temas de navegación marítima. Este formato se refiere fundamentalmente a tamaño, color y tipo de letra, representación gráfica, posición de la información en pantalla, señales acústicas. Hay que decidir también si se incluye algún campo de acuse (ACK) del operador, para asegurar que el operador está enterado de la información que se está mostrando.
- Para realizar los cálculos de demora, distancia, etc., respecto a cada blanco, es necesario que la función de seguridad tenga a disposición los datos dinámicos recibidos del buque propio y del blanco con un intervalo de tiempo entre ambos muy pequeño (valor prefijado). Es necesario además disponer de al menos las 3 últimas parejas de valores (datos del buque propio y datos del blanco) recogidos con el periodo establecido.
- La función de seguridad informará al operador de posibles errores en la adquisición de datos: falta de datos, datos no válidos, etc.
- El PLC almacenará toda la información recibida y la calculada en una base de datos externa.

Tabla 6.1. Datos a proporcionar por el OONW

Parámetro	Descripción
LRS ( <i>Long Range Scanning</i> )	Distancia a la que se comienza el análisis de encuentros
CPA de seguridad (CPASafe)	Acercamiento mínimo considerado seguro
TCPA de seguridad (TCPASafe)	Tiempo mínimo considerado seguro para CPA
Distancia de prealerta (dPrealerta)	Distancia para iniciar maniobras si el buque ha de ceder el paso
Distancia de alerta (dAlerta)	Distancia para iniciar maniobras el buque que sigue a rumbo
Periodo de refresco	Segundos del intervalo entre cálculos

Tabla 6.2. Información a mostrar

Parámetro	Descripción
Nombre	Nombre e identificador del blanco, extraídos del último mensaje estático correspondiente al blanco
MMSI	
Latitud	Datos extraídos del mensaje AIS con la última información dinámica del blanco: posición (latitud y longitud), rumbo de proa, velocidad sobre el fondo, velocidad de giro
Longitud	
Heading	
SOG	
ROT	
Estado de navegación	
Maniobrando	Texto indicando si el blanco está girando a babor o estribor o variando la velocidad
Situación	Texto indicativo de la posible situación crítica: <i>head-on, overtaking, being overtaken, crossing, forward of the beam, abeam or abaft the beam</i> . Y también indicación de la banda ( <i>starboard, port side</i> )
Distancia	Valores calculados en la función de seguridad
Demora	
Velocidad relativa	
Rumbo relativo	
CPA	
TCPA	

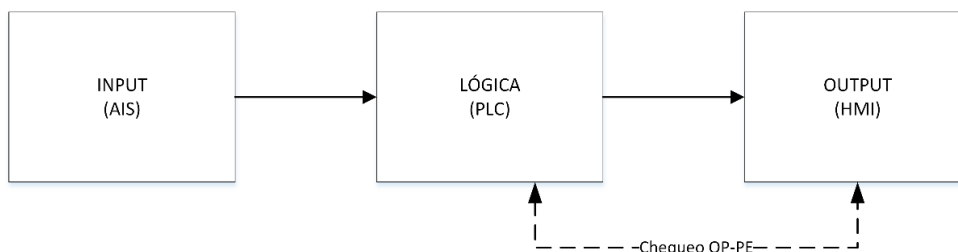


Figura 6.1. Formato de FS\_DETECT

## 6.2 Comunicación entre los sistemas PE

La comunicación entre el PLC del buque propio y cada uno de los buques próximos se llevará a cabo a través de las estaciones AIS, utilizando los mensajes estándar 6 y 7 descritos en el capítulo anterior. De forma simplificada, la comunicación procederá según los pasos siguientes, representados en la Figura 6.2:

- El PLC del buque origen escribirá la información a comunicar al buque destino en un mensaje binario direccionado, Mensaje 6, descrito en el apartado 0.
- El AIS del buque origen (conectado al PLC origen) transmitirá el mensaje al AIS del buque destino.
- Cuando éste reciba el mensaje, enviará un acuse de recibo (ACK) al AIS de origen, indicando que el mensaje se transmitió. El acuse de recibo se envía mediante el Mensaje 7 descrito en el apartado 5.4.
- Luego, el PLC conectado al AIS del buque destino (PLC destino) recibirá (leerá) el mensaje recibido. Y el PLC origen recibirá (leerá) el aviso del ACK. Si el mensaje no llega al destino, el PLC origen no recibirá el ACK. El tiempo de espera entre que un PLC envía un mensaje y recibe el ACK dependerá del número de reintentos y de intervalos de transmisión (Anexo 2.5.3, y Anexos 5 y 6 de UIT-R.M 1371-5). Se establecerá un tiempo de espera máximo, ajustable por el operador.

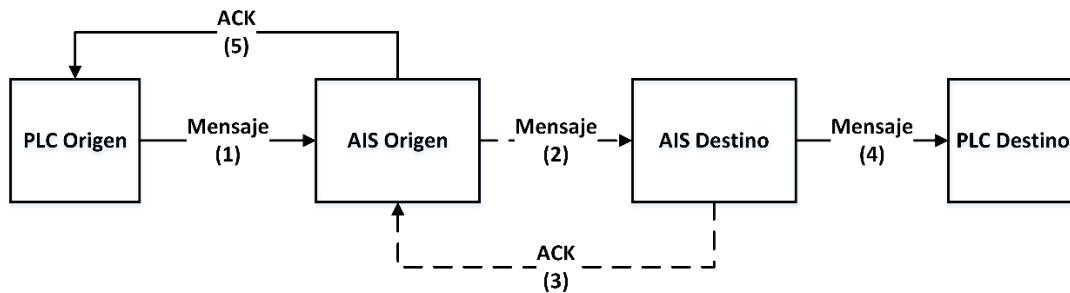


Figura 6.2. Secuencia de la comunicación PE-PE

Los mensajes binarios que el PLC de un buque va a transmitir al PLC de otro buque tendrán como finalidad:

- Iniciar la comunicación, o aceptar la petición de comunicación.
- Chequear si la información que manejan ambos PLCs es concordante. Esta información incluirá la recibida del rumbo y velocidad efectivos, rumbo verdadero, y la calculada de demora, distancia, CPA y TCPA. Uno enviará la información y el otro la comparará con la propia y responderá si es equivalente o si no lo es.
- Acordar la posible maniobra a realizar, deducida a partir de la información disponible.

### 6.3 Análisis de encuentros y mensajes de comunicación

En esta sección se describen los mensajes de comunicación definidos, para todos los escenarios y situaciones posibles. Cabe señalar que no existen expresiones estandarizadas para evitar colisiones en las Frases de Comunicación Marítima Estándar (SMCP) de la OMI (IMO, 2001).

La Figura 6.3 muestra los símbolos para la representación de las maniobras. Se recogen en Figura 6.4 y Figura 6.5 los posibles encuentros entre dos buques (A, B) y las maniobras a realizar siguiendo las reglas COLREGs. Se han identificado cuarenta y seis encuentros diferentes: diecinueve para los escenarios de buques a la vista (sección II del COLREGs) y veintisiete para escenarios de visibilidad reducida y detección con RADAR (sección III). Cada uno de estos encuentros tendrá un mensaje asociado para informar a los OONW de ambos buques.

Los buques con puente totalmente cerrado (incluidos alerones) deben estar equipados con un sistema de recepción de sonido. Aunque podría considerarse la inclusión y utilización de la información proporcionada por dicho equipo, su simplicidad redundaría en una falta de precisión (los propios fabricantes reconocen errores de  $\pm 10^\circ$  en la determinación de la marcación del origen del sonido), y el hecho de que no sea obligatorio para todos los buques, hacen que no se desarrolle este escenario de detección sólo por señales sonoras (Regla 19 e).



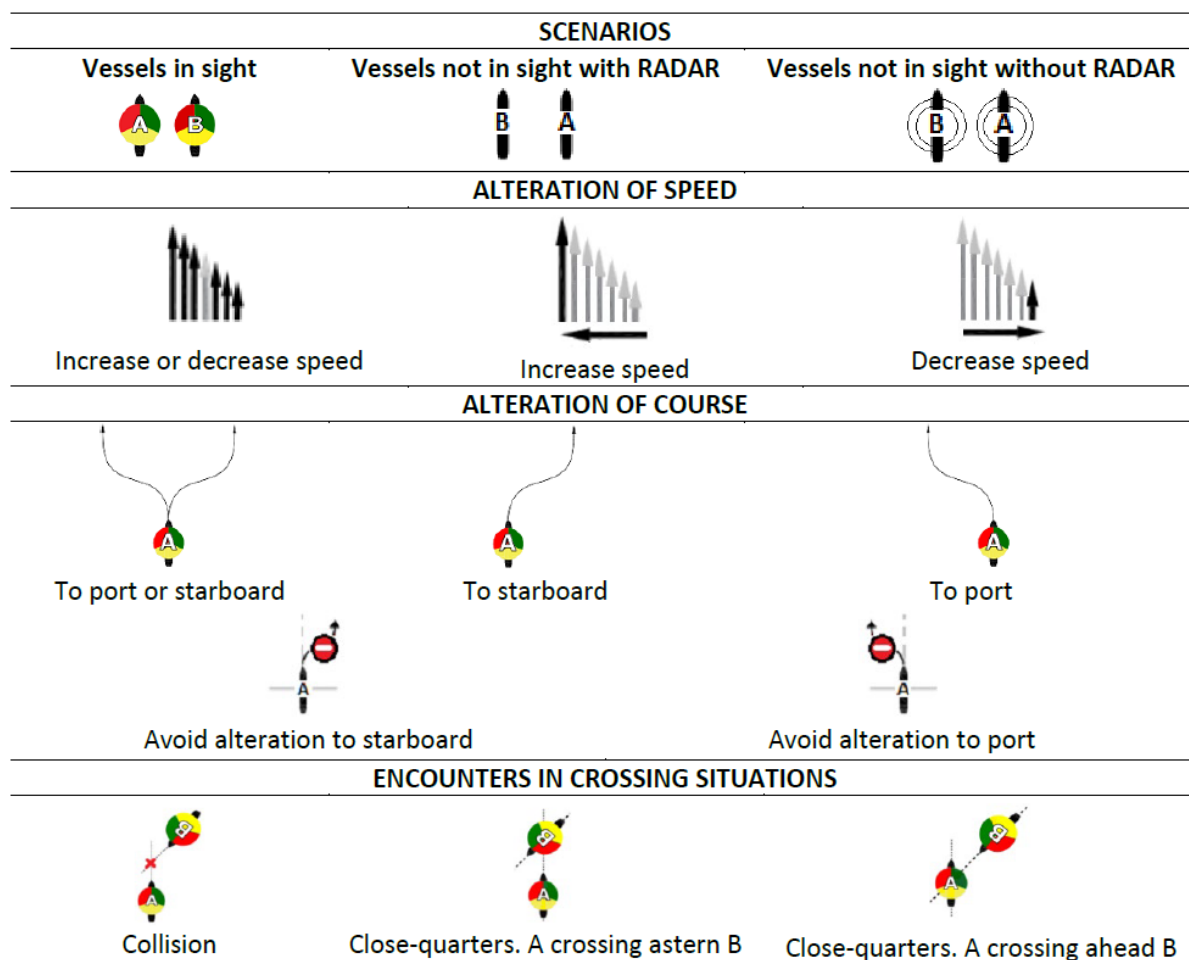


Figura 6.3. Símbolos para la representación de las maniobras

SITUATION	Manoeuvres with Priorities (MSG-IDs)		
A Overtaking B			
A Being Overtaken By B			
Head-On			
Crossing. B On the Starboard Side of A			
Crossing. B On the Port Side of A			
Crossing. B On the Port Side of A			
Crossing. B On the Port Side of A			

Figura 6.4. Situaciones y maniobras para escenarios de buques a la vista (COLREGs - Sección II)


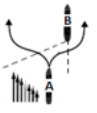
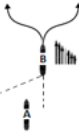
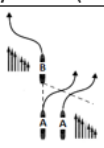
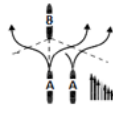

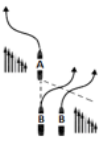

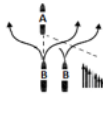

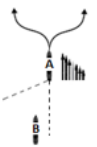
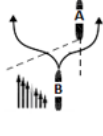
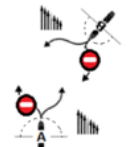


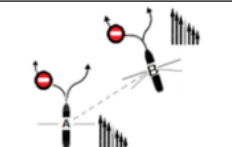
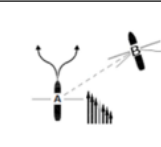
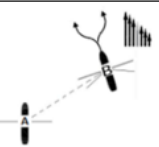
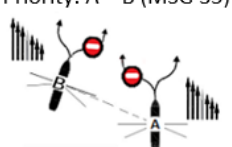
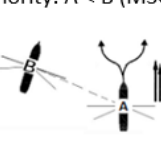
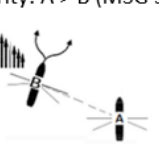
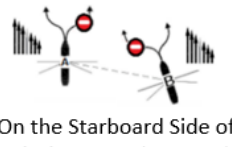

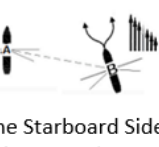
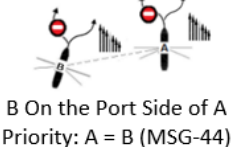
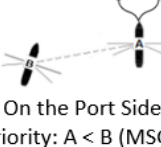
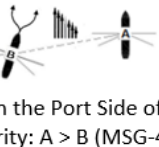
SITUATION	Manoeuvres with Priorities (MSG-IDs)		
A Overtaking B. A On the Port Side of B.	 Priority: A = B (MSG-20)	 Priority: A < B (MSG-21)	 Priority: A > B (MSG-22)
A Overtaking B. A Dead Astern OR On the Starboard Side of B.	 Priority: A = B (MSG-23)	 Priority: A < B (MSG-24)	 Priority: A > B (MSG-25)
A Being Overtaken by B. B Dead Astern OR On the Starboard Side of A.	 Priority: A = B (MSG-26)	 Priority: A < B (MSG-27)	 Priority: A > B (MSG-28)
A Being Overtaken by B. B On the Port Side of A.	 Priority: A = B (MSG-29)	 Priority: A < B (MSG-30)	 Priority: A > B (MSG-31)
A Forward of the Beam of B. B Forward of the Beam of A.	 Priority: A = B (MSG-32)	 Priority: A < B (MSG-33)	 Priority: A > B (MSG-34)
B Forward of the Beam of A. A Abeam OR Aft the Beam of B.	 B On the Starboard Side of A Priority: A = B (MSG 35)	 B On the Starboard Side of A Priority: A < B (MSG 36)	 B On the Starboard Side of A Priority: A > B (MSG 37)
	 B On the Port Side of A Priority: A = B (MSG 38)	 B On the Port Side of A Priority: A < B (MSG 39)	 B On the Port Side of A Priority: A > B (MSG 40)
A Forward of the Beam of B. B Abeam OR Aft the Beam of A.	 B On the Starboard Side of A Priority: A = B (MSG-41)	 B On the Starboard Side of A Priority: A < B (MSG-42)	 B On the Starboard Side of A Priority: A > B (MSG-43)
	 B On the Port Side of A Priority: A = B (MSG-44)	 B On the Port Side of A Priority: A < B (MSG-45)	 B On the Port Side of A Priority: A > B (MSG-46)

Figura 6.5. Situaciones y maniobras para escenarios con visibilidad reducida

Los mensajes propuestos para informar a los OONW, recogidos en la Tabla 6.3, incluyen la siguiente información:

- a) Identificación de la situación + escenario.

- b) Regla(s) COLREGs a aplicar, incluida la Regla 18, que, en función del estado de navegación de los buques, podría alterar las prioridades de maniobra por defecto.
- c) Información sobre la situación, y cuando sea apropiado sobre la aproximación (port, starboard, forward-ahead, abeam, abaft-astern) del blanco en el CPA.
- d) Conducta recomendada para los buques (mediante texto y/o imágenes).

Tabla 6.3. Texto asociado a los mensajes definidos

MSG-ID	MESSAGE
MSG-1	a) Overtaking. Vessels In Sight. b) Rule 13. c) A Overtaking B. d) A SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF B.
MSG-2	a) Overtaking. Vessels In Sight. b) Rules 13+18. Priorities. c) A Overtaking B. d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF A.
MSG-3	a) Overtaking. Vessels In Sight. b) Rule 13. c) B Overtaking A. d) B SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF A.
MSG-4	a) Overtaking. Vessels In Sight. b) Rules 13+18. Priorities. c) B Overtaking A. d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF B.
MSG-5	a) Head-On. Vessels In Sight. b) Rule 14. c) A In Head-On Situation With B. d) BOTH SHOULD MANOEUVRE TO STARBOARD.
MSG-6	a) Head-On. Vessels In Sight. b) Rules 14 + 18. Priorities. c) A In Head-On Situation With B. d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF B.
MSG-7	a) Head-On. Vessels In Sight. b) Rules 14 + 18. Priorities. c) A In Head-On Situation With B. d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF A.
MSG-8	a) Crossing. Vessels In Sight. b) Rule 15. c) Collision Course. B On The Starboard Side Of A. d) A SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF B.
MSG-9	a) Crossing. Vessels In Sight. b) Rules 15+18. Priorities. c) Collision Course. B On The Starboard Side Of A. d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF A.
MSG-10	a) Crossing. Vessels In Sight. b) Rule 15. c) A Crossing Astern Of B. B On The Starboard Side Of A. d) A SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF B.
MSG-11	a) Crossing. Vessels In Sight. b) Rules 15+18. Priorities. c) A Crossing Astern Of B. B On The Starboard Side Of A. d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF A.
MSG-12	a) Crossing. Vessels In Sight. b) Rule 15. c) A Crossing Ahead Of B. B On The Starboard Side Of A. d) A SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF B.
MSG-13	a) Crossing. Vessels In Sight. b) Rules 15+18. Priorities. c) A Crossing Ahead Of B. B On The Starboard Side Of A. d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF A.

Especificación del sistema relacionado con la seguridad

MSG-14	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Crossing. Vessels In Sight.</li> <li>b) Rule 15.</li> <li>c) Collision Course. B On The Port Side Of A.</li> <li>d) B SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF A.</li> </ul>
MSG-15	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Crossing. Vessels In Sight.</li> <li>b) Rules 15+18. Priorities.</li> <li>c) Collision Course. B On The Port Side Of A.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF B.</li> </ul>
MSG-16	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Crossing. Vessels In Sight.</li> <li>b) Rule 15.</li> <li>c) A Crossing Astern Of B. B On The Port Side Of A.</li> <li>d) B SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF A.</li> </ul>
MSG-17	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Crossing. Vessels In Sight.</li> <li>b) Rules 15+18. Priorities.</li> <li>c) A Crossing Astern Of B. B On The Port Side Of A.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF B.</li> </ul>
MSG-18	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Crossing. Vessels In Sight.</li> <li>b) Rule 15.</li> <li>c) A Crossing Ahead Of B. B On The Port Side Of A.</li> <li>d) B SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF A.</li> </ul>
MSG-19	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Crossing. Vessels In Sight.</li> <li>b) Rules 15+18. Priorities.</li> <li>c) A Crossing Ahead Of B. B On The Port Side Of A.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF B.</li> </ul>
MSG-20	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rule 19.</li> <li>c) A Overtaking B. B On The Starboard Side Of A.</li> <li>d) B SHALL CHANGE COURSE TO STARBOARD SIDE. A SHALL CHANGE COURSE TO PORT SIDE.</li> </ul>
MSG-21	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) A Overtaking B. B On The Starboard Side Of A.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF B.</li> </ul>
MSG-22	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) A Overtaking B. B On The Starboard Side Of A.</li> <li>d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF A.</li> </ul>
MSG-23	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rule 19.</li> <li>c) A Overtaking B.</li> <li>d) B SHALL CHANGE COURSE TO PORT SIDE. A SHALL CHANGE COURSE TO STARBOARD SIDE.</li> </ul>
MSG-24	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) A Overtaking B.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF B.</li> </ul>
MSG-25	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) A Overtaking B.</li> <li>d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF A.</li> </ul>
MSG-26	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rule 19.</li> <li>c) B Overtaking A.</li> <li>d) B SHALL CHANGE COURSE TO STARBOARD SIDE. A SHALL CHANGE COURSE TO PORT SIDE.</li> </ul>
MSG-27	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) B Overtaking A.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF B.</li> </ul>
MSG-28	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) B Overtaking A.</li> <li>d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF A.</li> </ul>
MSG-29	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rule 19.</li> <li>c) B Overtaking A. B On The Port Side Of A.</li> <li>d) B SHALL CHANGE COURSE TO PORT SIDE. A SHALL CHANGE COURSE TO STARBOARD SIDE.</li> </ul>

MSG-30	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) B Overtaking A. B On The Port Side Of A.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF B.</li> </ul>
MSG-31	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) B Overtaking A. B On The Port Side Of A.</li> <li>d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF A.</li> </ul>
MSG-32	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rule 19.</li> <li>c) B Is Forward Of The Beam Of A. A Is Forward Of The Beam Of B.</li> <li>d) BOTH SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO PORT.</li> </ul>
MSG-33	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) B Is Forward Of The Beam Of A. A Is Forward Of The Beam Of B.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF B.</li> </ul>
MSG-34	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+18. Priorities.</li> <li>c) B Is Forward Of The Beam Of A. A Is Forward Of The Beam Of B.</li> <li>d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF A.</li> </ul>
MSG-35	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rule 19.</li> <li>c) B Is Forward Of The Beam On The Starboard Side Of A. A Is Abeam Or Abaft The Beam Of B.</li> <li>d) BOTH SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO PORT.</li> </ul>
MSG-36	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+ 18. Priorities.</li> <li>c) B Is Forward Of The Beam On The Starboard Side Of A. A Is Abeam Or Abaft The Beam Of B.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF B.</li> </ul>
MSG-37	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+ 18. Priorities.</li> <li>c) B Is Forward Of The Beam On The Starboard Side Of A. A Is Abeam Or Abaft The Beam Of B.</li> <li>d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF A.</li> </ul>
MSG-38	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rule 19.</li> <li>c) B Is Forward Of The Beam On The Port Side Of A. A Is Abeam Or Abaft The Beam Of B.</li> <li>d) A SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO PORT SIDE. B SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO STARBOARD SIDE.</li> </ul>
MSG-39	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+ 18. Priorities.</li> <li>c) B Is Forward Of The Beam On The Port Side Of A. A Is Abeam Or Abaft The Beam Of B.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF B.</li> </ul>
MSG-40	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+ 18. Priorities.</li> <li>c) B Is Forward Of The Beam On The Port Side Of A. A Is Abeam Or Abaft The Beam Of B.</li> <li>d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF A.</li> </ul>
MSG-41	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rule 19.</li> <li>c) B Is Abeam Or Abaft The Beam On The Starboard Side Of A. A Is Forward Of The Beam Of B.</li> <li>d) A SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO STARBOARD SIDE. B SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO PORT SIDE.</li> </ul>
MSG-42	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+ 18. Priorities.</li> <li>c) B Is Abeam Or Abaft The Beam On The Starboard Side Of A. A Is Forward Of The Beam Of B.</li> <li>d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF B.</li> </ul>
MSG-43	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rules 19+ 18. Priorities.</li> <li>c) B Is Abeam Or Abaft The Beam On The Starboard Side Of A. A Is Forward Of The Beam Of B.</li> <li>d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF A.</li> </ul>
MSG-44	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection.</li> <li>b) Rule 19.</li> <li>c) B Is Abeam Or Abaft The Beam On The Port Side Of A. A Is Forward Of The Beam Of B.</li> <li>d) BOTH SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO PORT.</li> </ul>

MSG-45	a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection. b) Rules 19+ 18. Priorities. c) B Is Abeam Or Aft The Beam On The Port Side Of A. A Is Forward Of The Beam Of B. d) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF B.
MSG-46	a) Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection. b) Rules 19+ 18. Priorities. c) B Is Abeam Or Aft The Beam On The Port Side Of A. A Is Forward Of The Beam Of B. d) B, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT THE WAY OF A.
MSG-49	a) Vessels In Restricted Visibility. Hearing Detection.

Como se muestra en los pictogramas y en los mensajes, tanto en escenario de buques a la vista como en visibilidad reducida, en las situaciones en que los buques implicados en el encuentro tienen distinto estado de navegación (y por tanto distinta prioridad) no se indica la banda a la que el buque de menor prioridad debe maniobrar o debe evitar maniobrar. Se indica que el buque sin prioridad debe mantenerse apartado del trayecto (derrota) del buque de mayor prioridad. Ver por ejemplo los mensajes 5, 6 y 7 en la Tabla 6.3 y las imágenes correspondientes en la Figura 6.4.

La Tabla 6.4 muestra los mensajes para iniciar/confirmar comunicación entre el PLC del buque propio (PLC\_Own) y el PLC del blanco (PLC\_Target) y para chequear la concordancia de la información que manejan.

Tabla 6.4. Mensajes de diálogo entre PLCs

MSG-ID	Mensaje de PLC_Own a PLC_Target
MSG-50	PLC_Own detecta Prealerta de Own Ship. Inicia y chequea comunicación con PLC_Target
MSG-51	Recepción de MSG 50, enviado por PLC_Target
MSG-52	OONW_Own está de acuerdo con el mensaje enviado por el Target
MSG-53	OONW_Own NO está de acuerdo con el mensaje enviado por el Target
MSG-54	PLC_Own tiene los datos adjuntos respecto al Target
MSG-55	OONW_Own Resetea el acuerdo con OONW_Target
MSG-56	PLC_Own está de acuerdo con los datos enviados por PLC_Target – Respuesta a MSG 54
MSG-57	PLC_Own NO está de acuerdo con los datos enviados por PLC_Target – Respuesta a MSG 54
MSG-58	OONW_Own no responde al MSG recibido
MSG-59	Chequeo periódico de la comunicación entre PLCs
MSG-60	Recepción de MSG 55 enviado por PLC_Target
MSG-61	Own Ship sale de Prealerta

La evolución de las ayudas a la navegación desde la publicación del COLREGs vigente proporciona al OONW más información de la que se esperaba en ese momento. Por ejemplo, en caso de visibilidad reducida, COLREGs sólo considera explícitamente la información proporcionada por el RADAR o por las señales acústicas para la detección de otro buque, como dicta la Sección III, Regla 19.

Sin embargo, la Regla 5, aplicable en cualquier condición de visibilidad, establece que:

*Todos los buques mantendrán en todo momento una eficaz vigilancia visual y auditiva, utilizando asimismo todos los medios disponibles que sean apropiados a las circunstancias y condiciones del momento, para evaluar plenamente la situación y el riesgo de abordaje.*

Y la Regla 7b):

*Si se dispone de equipo RADAR y funciona correctamente, se utilizará en forma adecuada, incluyendo la exploración a gran distancia para tener pronto conocimiento del riesgo de abordaje, así como el punteo radar u otra forma análoga de observación sistemática de los objetos detectados.*

En el mismo sentido, la Resolución A.1106 (29) de la IMO (IMO, 2015) acepta el uso del AIS a bordo como una herramienta útil para este fin.

Los datos dinámicos transmitidos a través del AIS incluyen las posibles limitaciones o excepciones mencionadas en la Regla 18. Se plantea entonces un dilema: una vez conocida esta información sobre

las responsabilidades entre los buques, que altera su conducta prevalente, ¿qué hacer en caso de visibilidad reducida?. En este trabajo hemos optado (conscientes de que puede considerarse una decisión controvertida) por tener en cuenta esta información y generar un sistema de prioridades similar al establecido en la Regla 18 para los buques en escenarios de buques a la vista. Se considera que, una vez conocida la posible prioridad de un buque, debe tenerse siempre en cuenta (la Regla 18 se aplicaría en cualquier escenario).

Es necesario por tanto añadir a la interfaz con el operador mencionada en los requisitos de la función de seguridad FS\_DETECT (tabla 6.1) un campo en el que el OONW establecerá si hay buena visibilidad o visibilidad reducida con o sin ayuda de RADAR.

Existe un problema de indeterminación y, por tanto, un mayor riesgo de colisión en la aplicación de la Regla 19 d) del COLREGs cuando un buque está siendo alcanzado:

- El buque que está siendo alcanzado maniobrará, en aplicación de la Regla 19 d) ii), evitando un cambio de rumbo dirigido hacia un buque situado por el través o a popa del través.
- No está tan claro cómo debe maniobrar el buque que alcanza, puesto que la Regla 19 d) i) lo excluye:

*... si la maniobra consiste en un cambio de rumbo, en la medida de lo posible se evitará lo siguiente:*

- (i) *un cambio de rumbo a babor para un buque situado a proa del través, salvo que el otro buque esté siendo alcanzado;*

En esta tesis se propone y se aplica lo siguiente:

- Si ambos buques se encuentran en el mismo estado de navegación (ver Tabla 4.3), ambos deben maniobrar. El buque que alcanza debe maniobrar hacia la banda opuesta por la que está alcanzando. Por lo tanto, el otro buque maniobrará a la banda opuesta por la que está siendo adelantado. Si el estado de navegación es diferente, se aplicará la Regla 18 sobre el criterio anterior.
- Para el resto de encuentros con visibilidad reducida y detección por RADAR, el mensaje indica qué alteración de rumbo deben evitar los buques, si ambos buques se encuentran en el mismo estado de navegación. Si el estado de navegación es diferente, se aplicará la Regla 18 sobre el criterio anterior.

Se asume la navegación en alta mar. Criterios referidos a las restricciones geográficas: Canales Estrechos (NC), Esquemas de Separación de Tráfico (TSS), Zona de Tráfico Costero (ITZ) y Carril de Tráfico (TL), no han sido incluidos en este trabajo, por cuanto vienen referidas a necesidades de geolocalización tanto de posiciones como de ayudas a la navegación que definan dichas zonas, siendo tema para otros trabajos por su extensión y complejidad.

#### 6.4 Función de seguridad FS\_MANOEV

Esta función tiene como objetivo aumentar las probabilidades de realizar maniobras correctas. Dependiendo de la distancia, del CPA y del TCPA entre el buque propio y un blanco, se definen tres situaciones: Segura, de Prealerta o de Alerta.

- Segura:  $CPA \geq CPA$  de seguridad
- Prealerta:  $(CPA < CPA$  de seguridad) Y  $((Distancia \leq Distancia$  de prealerta) O  $(TCPA < TCPA$  de seguridad))
- Alerta: Prealerta y  $(Distancia \leq Distancia$  de alerta)



Con los datos dinámicos recibidos del buque propio y de un blanco, y los calculados de demora, distancia, CPA, TCPA, y en función de las Reglas COLREGs, el sistema PE de cada buque debe determinar la situación de aproximación entre los dos buques, quién tiene prioridad y qué posible maniobra se ha de realizar. En caso de prealerta, se ha de establecer un diálogo entre ellos. Para definir y posteriormente implementar este diálogo se utiliza el lenguaje SFC, cuyas características básicas se resumen en el siguiente apartado.

#### 6.4.1 PLCs y lenguaje SFC

Como ya se ha mencionado en el apartado 1.2.2, un PLC es un dispositivo electrónico programable robusto y fiable de uso probado en el control de procesos industriales. Su arquitectura y programación se definen en la norma IEC 61131. Los PLCs ejecutan sus tareas en modo cíclico (ciclo de *scan*). Básicamente, consta de cuatro pasos:

- (1) Lectura de las entradas, de la periferia a las variables en memoria.
- (2) Ejecución del programa, que lee y modifica el contenido de la memoria.
- (3) Escritura de los valores de las variables en la periferia de salida.
- (4) Ejecución de tareas internas, como la comprobación de errores y el almacenamiento de la duración del ciclo.

SFC (*Sequential Function Chart*), es uno de los cinco lenguajes definidos por la norma IEC 61131-3 para la programación de PLCs. Es un lenguaje de programación gráfico que permite especificar la lógica de control secuencial de un sistema de eventos discretos (Silva, 2018) de forma intuitiva.

Desde mediados del siglo pasado se han propuesto muchos enfoques de modelización de los sistemas de eventos discretos, como las máquinas de estado finito y las redes de Petri, formalismos basados en secuencias de estados (o etapas) y transiciones. Estos modelos de transición de estados permiten representar gráficamente el comportamiento de los sistemas secuenciales, facilitando el desarrollo de la lógica de control y las operaciones de verificación mediante pruebas exhaustivas de las especificaciones de requisitos. Son también la base de las técnicas de verificación formal para garantizar la corrección del software de seguridad crítica (Bauer *et al.*, 2004; Adiego *et al.*, 2015).

GRAFCET (GRAPhe Fonctionnel de Commande Etape Transition) (David, 1995) es un lenguaje de especificación relacionado con las redes de Petri, independiente de cualquier tecnología específica de implementación. Fue definido en 1977 y posteriormente estandarizado como IEC 60848, para la descripción funcional del comportamiento de la parte secuencial de un sistema de control. El lenguaje SFC se basa en esta norma.

En la norma IEC 61131-3, el término POU (*Program Organizational Unit*) se utiliza para todos los objetos de programación: PRoGramas (PRG), Bloques de Función (FB) y Funciones (FU), que se utilizan para crear una aplicación de control. Una POU escrita en SFC consta de etapas (o estados) y transiciones. Cada transición tiene asociada una condición, y cada etapa puede tener asociadas 0, 1 o más acciones. La Figura 6.6 muestra un ejemplo de la estructura de un SFC.

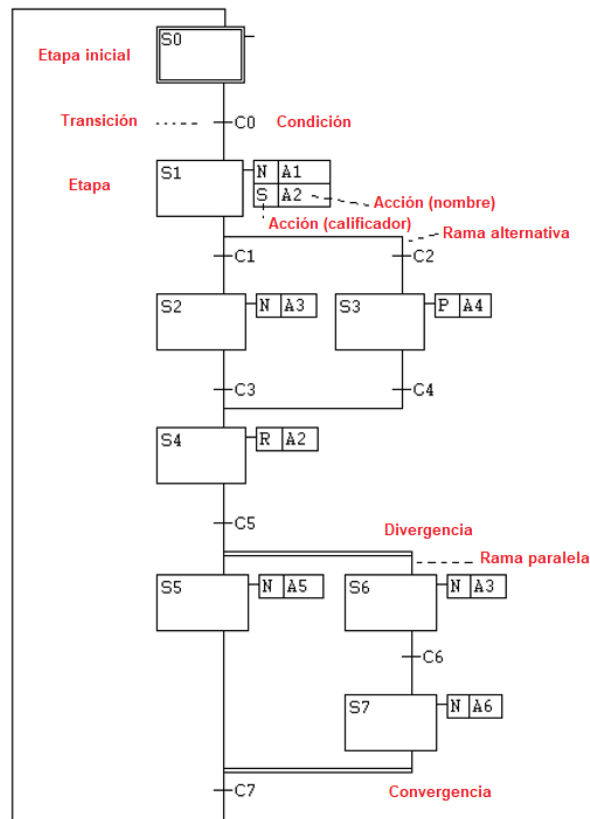


Figura 6.6. Esquema SFC

Existen diferentes tipos de transiciones

- transición simple entre dos etapas;
- bifurcación alternativa, es decir, selección de una entre varias transiciones;
- ramificación paralela, con la divergencia de una etapa en un conjunto de etapas paralelas y posterior convergencia en una única etapa.

Las acciones llevan un calificador, que especifica la duración de la acción, y un nombre, que identifica las instrucciones programadas. Calificadores típicos:

- N (No almacenado): La acción está activa mientras dure el paso.
- P (Pulso): La acción se ejecuta sólo una vez si el paso está activo.
- S (Set): La acción se activa y permanece activa hasta un Reset.
- R (Reset): La acción se desactiva.

En el primer ciclo de *scan* de una POU se activa la etapa inicial y se ejecutan las acciones asociadas (si las hay). Luego, en cada ciclo, se evalúan todas las condiciones de las transiciones que comienzan en las etapas que estén activas y, si son verdaderas, se habilita la transición correspondiente, cambiando el conjunto de etapas activas.

#### 6.4.2 Secuencia de etapas del diálogo entre 2 buques

La Figura 6.7 refleja la estructura básica de la secuencia de etapas definida para el diálogo entre el buque propio y uno de los blancos cuando se entra en situación de prealerta, con la finalidad de llegar a acuerdos y reducir el riesgo de colisión entre ambos. Se utiliza el lenguaje SFC para modelar y programar el conjunto de etapas (estados) y transiciones que intervienen en el diálogo entre ambos buques.

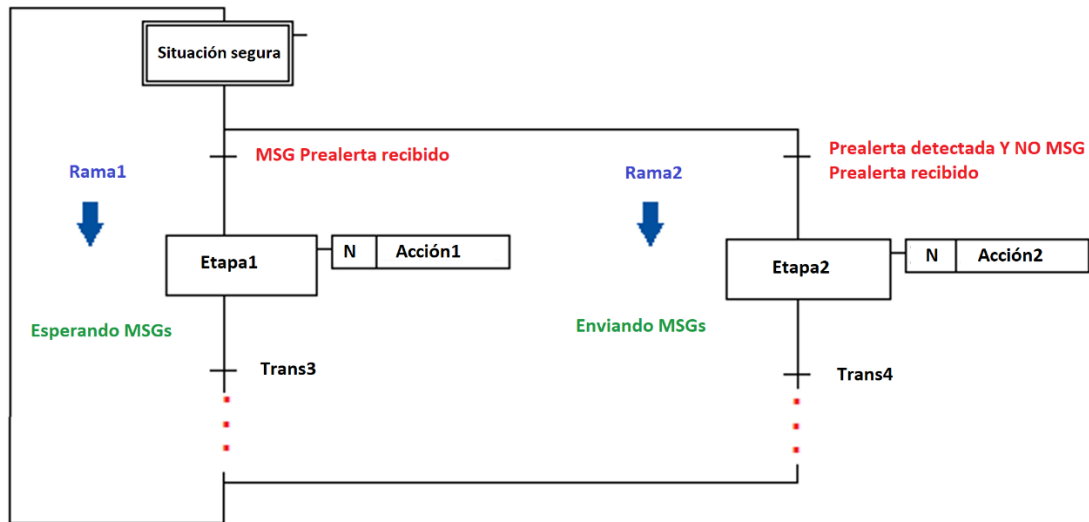


Figura 6.7. Estructura básica de la secuencia de etapas

Se parte de un estado seguro (Situación segura). De este estado se sale por uno de dos motivos:

- Se recibe un MSG de Inicio de Prealerta enviado por el blanco (Rama1, Figura 6.8). En la evolución por esta rama, el blanco tiene la iniciativa de la comunicación. El PLC del buque propio espera los mensajes y responde.
- Se detecta Situación de Prealerta (Rama2, Figura 6.9). En esta rama, el PLC propio lleva la iniciativa. Envía los mensajes y espera las respuestas del blanco.

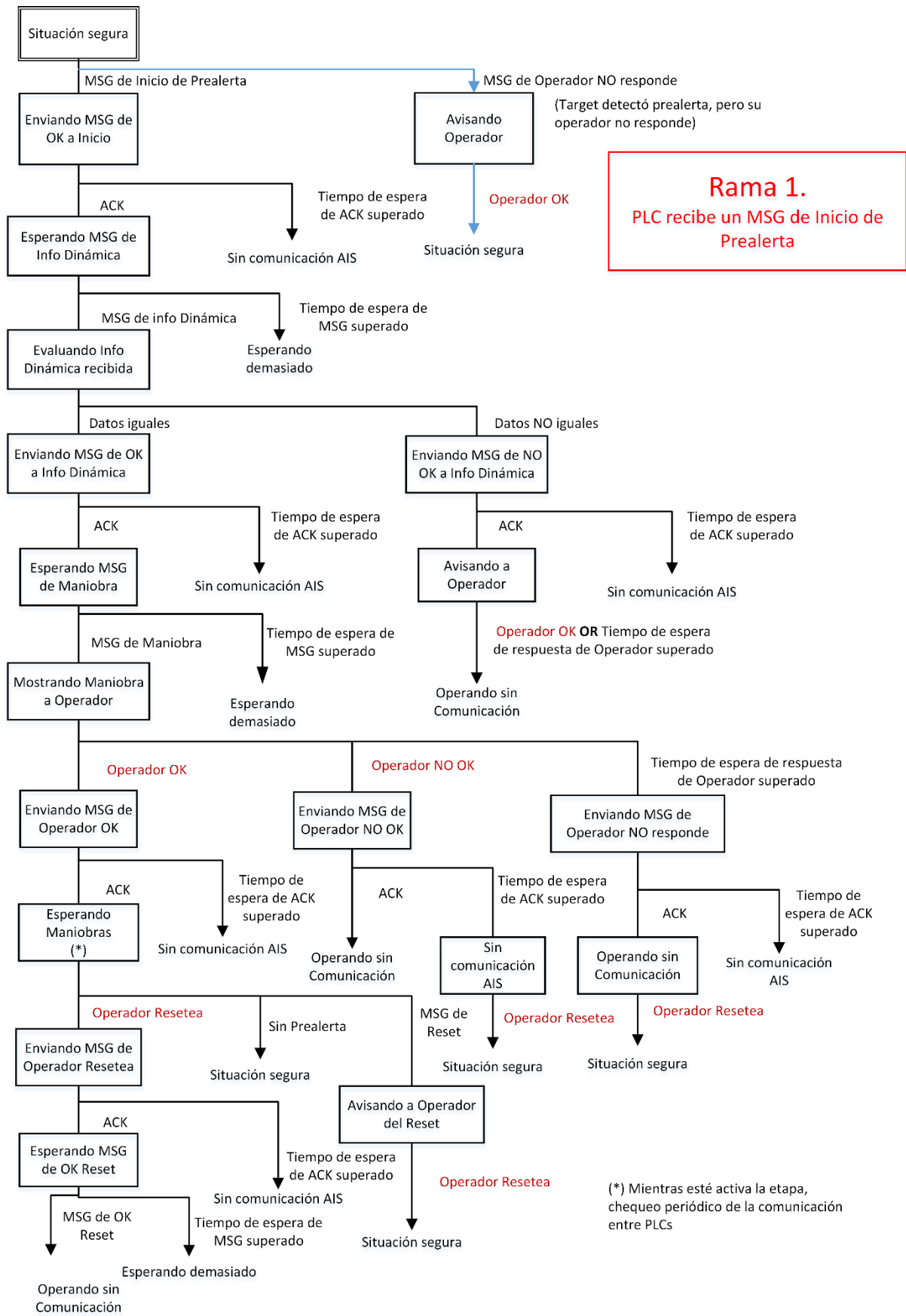


Figura 6.8. Rama1 de la secuencia

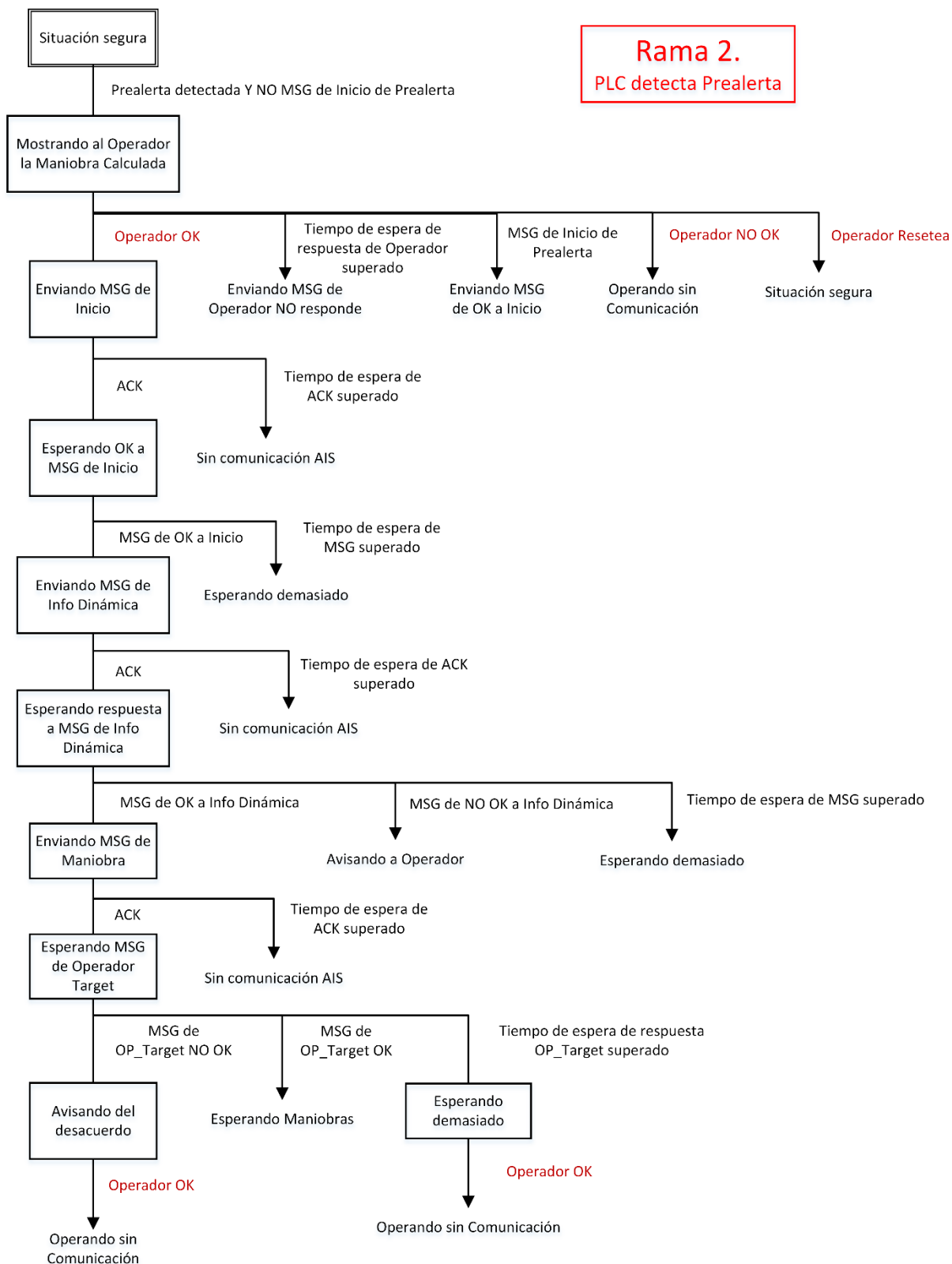


Figura 6.9. Rama2 de la secuencia

La secuencia será replicada tantas veces como blancos detectados en el universo visible del buque propio: blancos que se encuentren en un área centrada en el buque propio y de radio establecido, y con CPA y TCPA menores que unos valores de seguridad dados.

Tras el envío de un mensaje hay que esperar la recepción del ACK emitido por el AIS, que indica que el mensaje se ha transmitido al AIS del blanco. Si pasa más tiempo del previsto sin recibir el ACK, se

entiende que ha habido un fallo de comunicación entre las estaciones AIS. Si se supera el tiempo máximo de espera del ACK, la secuencia se deriva hacia la etapa Sin Comunicación AIS, donde se informa al operador sobre el fallo de comunicación.

Se deben establecer otros tiempos máximos de espera por comunicaciones:

- Tiempo máximo de espera de un mensaje de comunicación entre PLCs que no involucre a los operadores. Aplicable en:
  - la espera por el mensaje MSG de OK a Inicio para aceptar el diálogo solicitado por el MSG de Inicio en la etapa Esperando OK a MSG Inicio;
  - la espera por el mensaje MSG de Info Dinámica (información sobre distancia, rumbos, velocidad, CPA, TCPA, disponible en el PLC del buque blanco (etapa Esperando MSG de Info Dinámica);
  - la espera por las respuestas a este último mensaje (etapa Esperando respuesta a MSG de Info Dinámica);
  - la espera por el mensaje que indica la maniobra a realizar (etapa Esperando MSG de Maniobra).

Si el tiempo de espera supera el máximo definido, la secuencia se deriva hacia la etapa Esperando demasiado, donde se informa al operador.

- Tiempo máximo para que el operador responda a un aviso mostrado en el HMI. Aplicable en:
  - la espera para que el operador responda ante un aviso de que la información disponible en los buques no es concordante (etapa Avisando a Operador);
  - la espera por la respuesta a la propuesta de maniobra proveniente del blanco (etapa Mostrando Maniobra a Operador);
  - la espera por la respuesta a la propuesta de maniobra (etapa Mostrando al Operador la Maniobra Calculada).

Si el tiempo de espera supera el máximo definido, la secuencia se deriva hacia la etapa Enviando MSG de Operador NO responde. En esta etapa se envía un aviso al operador del blanco.

- Tiempo máximo para que el operador del blanco responda a la propuesta de maniobra enviada por el buque propio (etapa Esperando MSG de Operador Target). Si el tiempo de espera supera el máximo definido, la secuencia se deriva hacia la etapa Esperando demasiado.

Hay que definir la información a aportar y a almacenar en las mencionadas etapas (Sin Comunicación AIS, Esperando demasiado) a las que se accede cuando se superan los tiempos de espera. Hay que definir también qué ha de hacer el sistema en los siguientes casos:

- La información disponible en los dos buques no es concordante (etapa Avisando a Operador).
- No hay acuerdo entre los operadores respecto a la maniobra a realizar: el operador no está de acuerdo con la maniobra sugerida por el PLC del blanco (etapas Enviando MSG de Operador NO OK), o el operador del target no está de acuerdo con la maniobra propuesta por el PLC del buque propio (etapa Avisando del desacuerdo).
- El operador no está de acuerdo con la maniobra sugerida por el PLC (etapa Mostrando al Operador la Maniobra Calculada). Por ejemplo, en el caso de que tenga que maniobrar a otro barco con el que tenga mayor riesgo.

En los tres casos la secuencia se deriva hacia la etapa Operando sin Comunicación.

La Figura 6.10 resume el comportamiento global del sistema PE con respecto a cada uno de los blancos detectados.

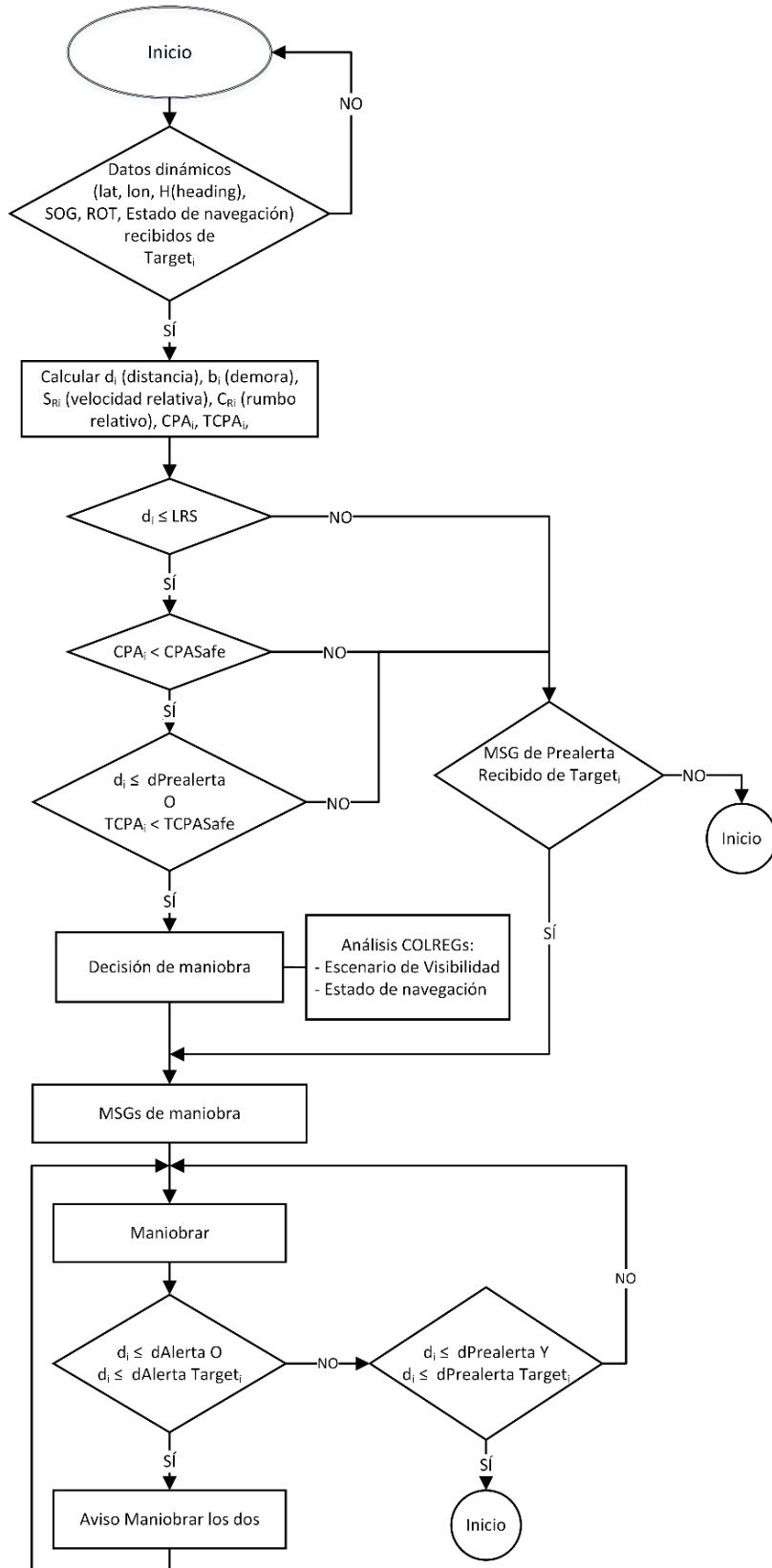


Figura 6.10. Diagrama del comportamiento del sistema PE para cada blanco detectado

## 6.5 Maniobras del buque propio

Además de mostrar al OONW del buque propio la información sobre la situación de aproximación y los mensajes según las Reglas COLREGs para cada blanco con el que se encuentre en prealerta, se le informará de los posibles cambios en rumbo o velocidad para que, si tiene que realizar la maniobra, alcance un CPA seguro respecto a dicho blanco. Estos valores para la maniobra (cambios en rumbo o velocidad) deberán ser coherentes con la Regla COLREG a aplicar y con los mensajes generados.

La Figura 6.11 es un ejemplo ilustrativo, y muestra una situación de cruce, con  $CPA < 0.25$  millas. El blanco está a estribor del buque propio. Según la Regla 15 de COLREGs, el buque propio ha de ceder el paso, evitando cruzar la proa del blanco, si no hay otros impedimentos o prioridades.  $H_O$  y  $S_O$  representan el rumbo verdadero (*heading*) y la velocidad del buque propio (*Own*).  $H_T$  y  $S_T$ , *heading* y velocidad del blanco (*Target*).  $B$  y  $d$  son la demora y distancia, respectivamente.

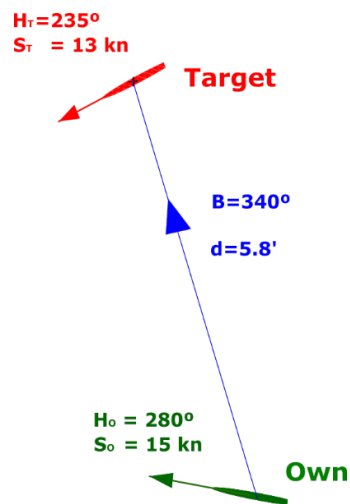


Figura 6.11. Situación de cruce, buques a la vista

Se fija un CPA de seguridad ( $CPASafe$ ). Los rumbos relativos (derrotas relativas,  $rC1$  y  $rC2$ ) correspondientes para conseguir esa distancia de paso se representan en la Figura 6.12.

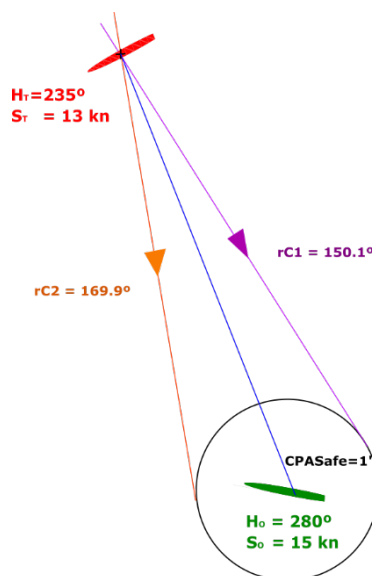


Figura 6.12. Rumbos relativos para  $CPA=1$  milla

Asumiendo que el blanco mantiene rumbo y velocidad constantes, el buque propio puede maniobrar para conseguir  $CPASafe$  de diversos modos:



- Modificando su rumbo  $H_O$  y manteniendo la velocidad  $S_O$ , según se muestra en la Figura 6.13.
  - A estribor, hasta que  $H_O \geq H_{O2}$ . En este caso el buque propio cruza la popa del blanco.
  - A babor, hasta que  $H_O \leq H_{O1}$ . El buque propio cruza la proa del blanco.
- Modificando su velocidad  $S_O$  y manteniendo el rumbo  $H_O$ , según se muestra en la Figura 6.14.
  - Disminuyendo la velocidad, hasta que  $S_O \leq S_{O2}$ . En este caso, el buque propio cruza la popa del blanco. Hay un límite inferior para la velocidad,  $S_{O\text{Min}}$ , por debajo de la cual el barco no puede maniobrar.
  - Aumentando la velocidad, hasta que  $S_O \geq S_{O1}$ . El buque propio cruza la proa del blanco.
- Una combinación de cambio de rumbo y velocidad. La Figura 6.15 representa el área con los valores no permitidos de rumbo (zona rellena) para velocidades menores de una velocidad máxima dada. Para esa velocidad  $S_{O\text{Max}}$ , el rango de rumbos no válidos corresponde con el arco delimitado por  $H_{O1}$  y  $H_{O2}$ . El área sombreada es la llamada *Velocity Obstacle* (VO) área (Fiorini & Shiller, 1998) y representa los valores del vector de velocidad ( $S_O$ ,  $H_O$ ) para los que  $\text{CPA} < \text{CPASafe}$ .

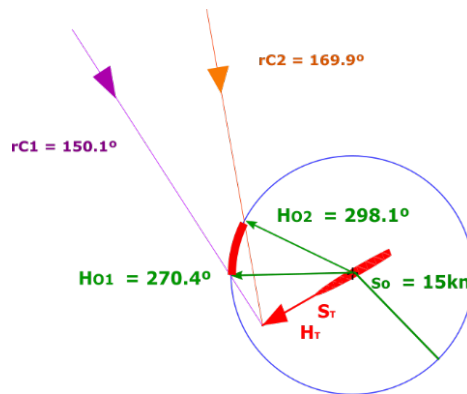


Figura 6.13. Maniobra mediante cambios de rumbo, velocidad constante

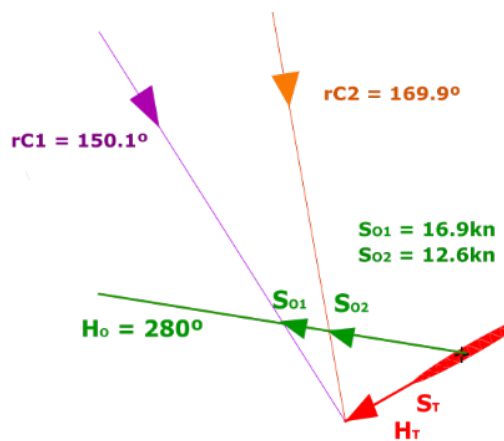


Figura 6.14. Maniobra mediante cambios de velocidad, rumbo constante

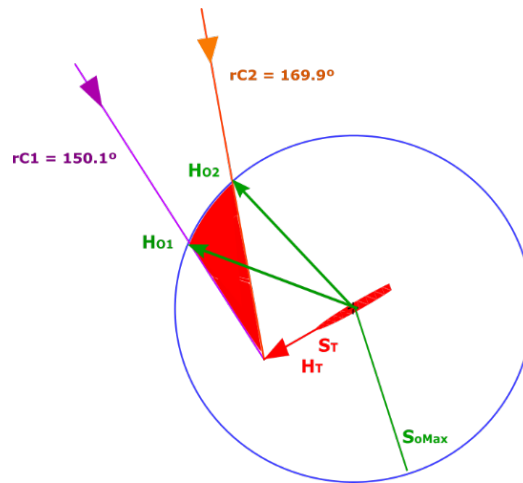


Figura 6.15. Área de valores excluidos para maniobras seguras en rumbo y/o velocidad

La velocidad del buque proporcionada por el AIS en el mensaje con información dinámica es la velocidad efectiva o velocidad sobre el fondo, SOG (*Speed Over Ground*), y es función directa de las posiciones (longitud, latitud) y del tiempo en que se obtienen. Por otro lado, se define la velocidad sobre el agua, STW (*Speed Through the Water*), que es la velocidad del buque en relación con el agua. Si no hubiera vientos ni corrientes que afectaran al movimiento del buque, SOG y STW tendrían el mismo valor. Pero, por ejemplo, un buque a la deriva (con  $STW = 0$ ) podría verse afectado por una corriente de  $N$  nudos, con lo que  $SOG = N$ .

Los cálculos de maniobras para evitar colisiones deben llevarse a cabo en estricto cumplimiento de COLREGs, y para ello es necesario trabajar con rumbos verdaderos y velocidades sobre el agua, es decir, que la velocidad a la que se refiere este apartado sea la denominada STW.

La STW del buque propio puede ser medida mediante una corredera (sensor de velocidad). Para poder utilizar en los cálculos la STW del blanco será necesario que hagamos que éste la transmita (ya que no está dentro de los parámetros dinámicos proporcionados por el AIS). Se podría añadir al mensaje de comunicación nº 4 definido en el capítulo anterior un parámetro con el valor de STW.

En este trabajo se ha realizado una alternativa a la medición de los valores de STW. Consiste en el cálculo de los mismos, a partir de los datos de 2 medidas de distancia, demora y rumbos verdaderos del buque propio y del blanco, según muestra la Figura 6.16. Puede utilizarse como alternativa a las medidas de las STW o también para analizar la precisión de las mismas.

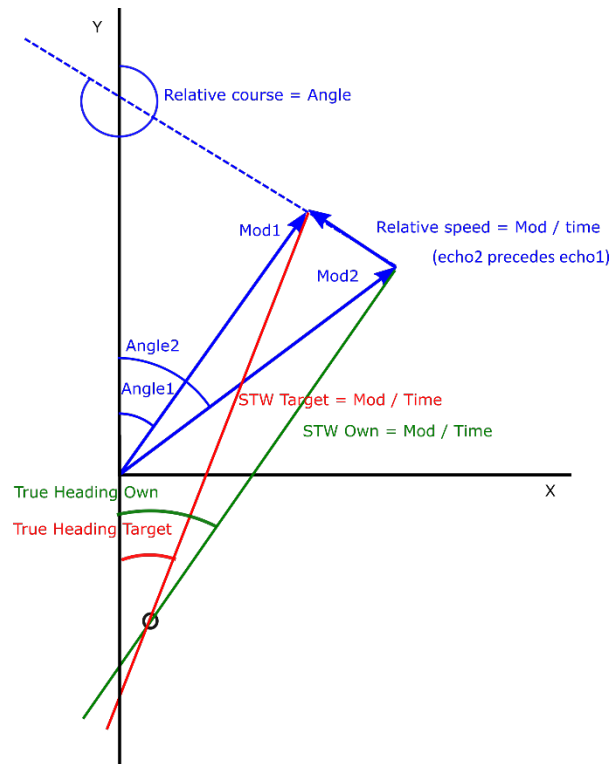


Figura 6.16. Cálculos de STW

En la representación gráfica observan dos triángulos, con un lado común. El primero se forma a partir de las distancias y demoras de dos ecos del blanco. Los lados de este triángulo corresponden a las distancias a los dos ecos y a la distancia entre ellos. La velocidad relativa será esta última distancia dividida por el intervalo de tiempo entre ecos. Esta velocidad relativa será también igual a la resta de STW del blanco menos STW del buque propio. Los módulos de estas velocidades corresponden a los otros dos lados del segundo triángulo. Determinando el punto de corte de las rectas correspondientes se obtienen trigonométricamente las dos STWs. El método de cálculo funcionará cuando las pendientes de las rectas sean distintas, sobre todo en situaciones de *crossing*. Cuando los *headings* de los buques son iguales u opuestos o próximos a éstos no se obtienen resultados, o se obtienen resultados imprecisos.

## 7 Diseño y desarrollo del software

El desarrollo del software se hace siguiendo las técnicas incluidas en IEC 61508-7 Parte 7, Anexo C, recogidas en el apartado 3.1.3 de esta memoria.

Se utilizan dos lenguajes de programación de PLCs que cumplen el estándar IEC 61131-3: ST y SFC. El lenguaje SFC es idóneo para programar las secuencias de estados por los que pasa un sistema (Figura 6.7), con las acciones asociadas y las transiciones entre ellos. El resto de módulos se ha programado en lenguaje ST por ser más amigable que los lenguajes gráficos (FBD, LD) si se tiene experiencia en lenguajes de programación de los denominados de “alto nivel”, para programar algoritmos de cierta complejidad. Los cuatro lenguajes figuran en la lista de lenguajes recomendados (R) o muy recomendados (HR) por la norma IEC 61508 (ver Tabla 3.1).

Tal como se ha comentado en el capítulo 3, la norma IEC 61511 es la adaptación de IEC 61508 para la industria de procesos. La mayoría de las funciones instrumentadas de seguridad (SIF) que cumplen con esta norma están programadas con lenguajes de variabilidad limitada (LVL), lenguajes gráficos acompañados de librerías de componentes funcionales certificados. Estos lenguajes, entre los que estarían FBD y LD, permiten al programador combinar los módulos de las librerías para construir la lógica requerida de las funciones de seguridad. Habitualmente esta variabilidad limitada es suficiente, puesto que la mayoría de las SIF tienen una lógica simple: en función de los valores dados por unos sensores, las funciones activan o desactivan acciones peligrosas de los dispositivos de salida. Si se requiere el uso de lenguajes de variabilidad completa (FVL), la norma IEC 61511 remite a la norma IEC 61508 para su documentación, revisión y verificación, de modo que se pueda certificar su nivel de integridad de la seguridad (SIL).

### 7.1 Reglas de codificación y diseño modular

- Se ha decidido utilizar el inglés para los identificadores y los comentarios, puesto que es lengua obligatoria para los oficiales a bordo de los buques.
- Se utilizan identificadores (de variables, de unidades de programación, de tipos de datos definidos) con significado, procurando que no sean ambiguos. Por ejemplo, el identificador de las variables locales es de la forma letraNombre, donde

letra indica el tipo de valor que almacena. Puede ser una o varias letras:

- i: integer, di: double integer, ui: unsigned integer, udi: unsigned double integer, usi: unsigned short integer
- r: real
- b: byte, w: word
- x: boolean, s: string

Nombre indica el contenido. Puede ser una palabra, una abreviatura o varias, con la inicial en mayúsculas, y si el Nombre es largo, separado por \_

Ejemplos:

```
rSpeed, rLat, rLon: REAL;
xOvertaking: BOOL;
```

El nombre de las variables globales es de la forma letra\_Nombre, para diferenciarlas de las variables locales.

Ejemplos:

```
x_DynDataOwnStored: BOOL := FALSE;
```

r\_TSampling: REAL:=0.4;

Los parámetros formales de funciones o de bloques funcionales comienzan por IN\_, OUT\_ o IN\_OUT\_.

Ejemplos:

IN\_xActivate: BOOL;

OUT\_rCourse: REAL;

Los indicadores de las unidades de programación comienzan por FU\_, FB\_ o PRG\_

Ejemplos:

FUNCTION FU\_rPolarToCartesian\_Y : REAL

FUNCTION\_BLOCK FB\_Calculate\_True\_Speeds

PROGRAM PRG\_CalculateData

- Se incluyen en la codificación comentarios entre “(\*)” y “(\*)”, donde se describe el cometido de las unidades de programación y de las variables que lo requieran.
- Se hace uso mínimo y controlado de bucles. Bucles con pocas iteraciones, y sin salidas (EXIT, RETURN) independientes de la condición de iteración.
- El código se estructura en módulos de programación (POUs) de pequeño tamaño (FU, FB, PRG), con una misión definida, que se comunican a través de los parámetros de sus interfaces. El uso de variables globales ha de estar limitado y justificado, y sólo se permite en PRGs.
- Cada módulo debe ser chequeado para verificar que el comportamiento es correcto, incluyendo los ensayos de valores límite de los parámetros.

## 7.2 Funciones y bloques funcionales para cálculos básicos

La Figura 7.1 muestra las interfaces de las FU y FB desarrolladas para realizar los cálculos básicos de posiciones y velocidades y se describen a continuación, con imágenes ilustrativas. Se trata de unidades “encapsuladas”: en el cuerpo de las mismas se utilizan únicamente los parámetros de las interfaces y variables locales.

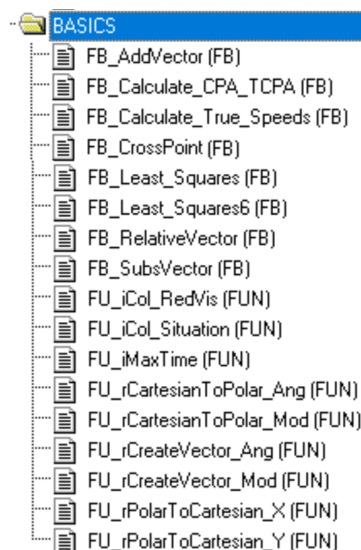
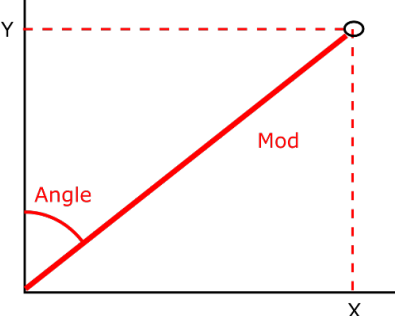


Figura 7.1. FBs y FUs para cálculos básicos

### 7.2.1 Funciones de cambio de coordenadas

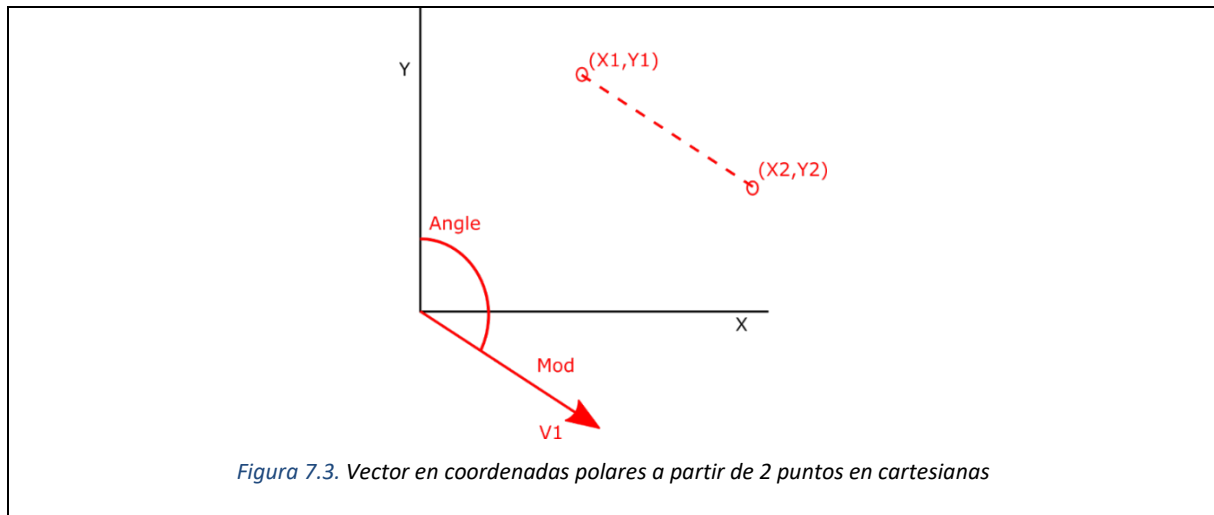
Las funciones se utilizarán para pasar de cartesianas (longitud, latitud) a polares (distancia, rumbo o demora) y viceversa. El ángulo de las coordenadas polares está medido respecto al norte, en el sentido de las agujas del reloj.

<pre> <b>FUNCTION FU_rCartesianToPolar_Ang : REAL</b> (* Angle, (0.0 .. 359.9) clockwise, from the north *) VAR_INPUT     IN_rX: REAL;     IN_rY: REAL; END_VAR         </pre>	<pre> <b>FUNCTION FU_rCartesianToPolar_Mod : REAL</b> VAR_INPUT     IN_rX: REAL;     IN_rY: REAL; END_VAR         </pre>
<pre> <b>FUNCTION FU_rPolarToCartesian_X : REAL</b> VAR_INPUT     IN_rMod: REAL;     IN_rAng: REAL; (* Angles, (0.0 .. 359.9) clockwise, from the north *) END_VAR         </pre>	<pre> <b>FUNCTION FU_rPolarToCartesian_Y : REAL</b> VAR_INPUT     IN_rMod: REAL;     IN_rAng: REAL; (* Angles, (0.0 .. 359.9) clockwise, from the north *) END_VAR         </pre>
<div style="text-align: center;">  <p><i>Figura 7.2. Coordenadas cartesianas (X,Y) y polares (Mod,Angle)</i></p> </div>	

### 7.2.2 Funciones para creación de vectores

A partir de dos posiciones en coordenadas cartesianas, estas funciones retornan las componentes del vector correspondiente, en polares (módulo, ángulo). Si ambas posiciones corresponden a ecos de un mismo buque, en dos instantes  $t_1$  y  $t_2$ , se determina la velocidad (módulo/( $t_2-t_1$ )) y rumbo (ángulo) efectivos del buque. Si corresponden a posiciones del buque propio ( $X_1, Y_1$ ) y de un blanco ( $X_2, Y_2$ ) en el mismo instante, se determina la distancia (módulo) y la demora (ángulo) de éste.

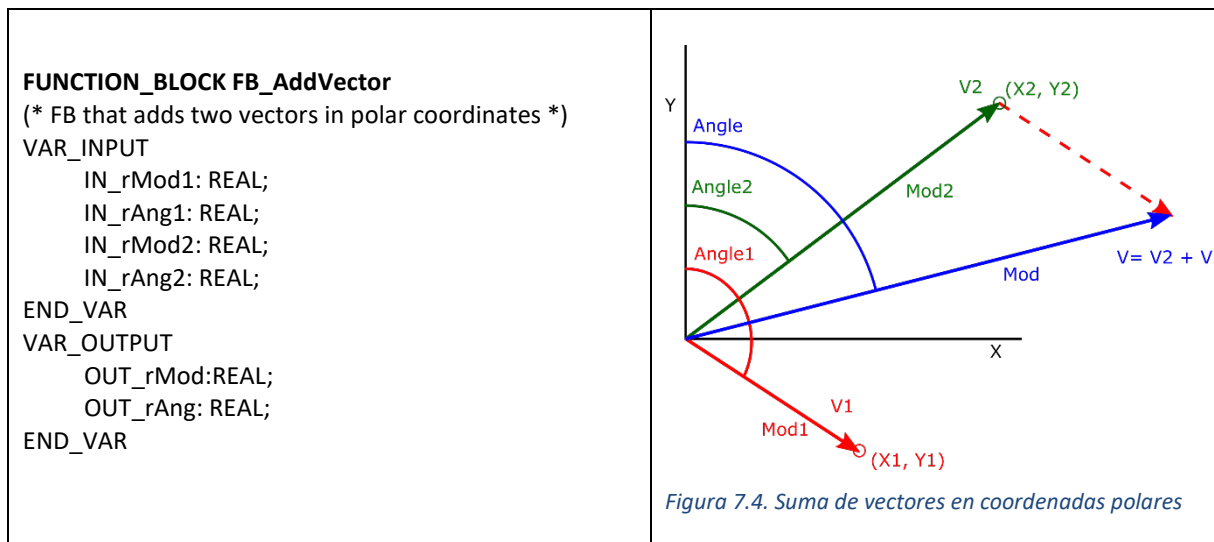
<pre> <b>FUNCTION FU_rCreateVector_Ang : REAL</b> (* FU that outputs the angle of a vector in polar coordinates (module, angle) from two cartesian points (x1,y1), (x2,y2) *) (* Angles, (0.0 .. 359.9) clockwise, from the north *) VAR_INPUT     IN_rX1: REAL;     IN_rY1: REAL;     IN_rX2: REAL;     IN_rY2: REAL; END_VAR         </pre>	<pre> <b>FUNCTION FU_rCreateVector_Mod : REAL</b> (* FU that outputs the module of a vector in polar coordinates (module, angle) from two cartesian points (x1,y1), (x2,y2) *) VAR_INPUT     IN_rX1: REAL;     IN_rY1: REAL;     IN_rX2: REAL;     IN_rY2: REAL; END_VAR         </pre>
---	---

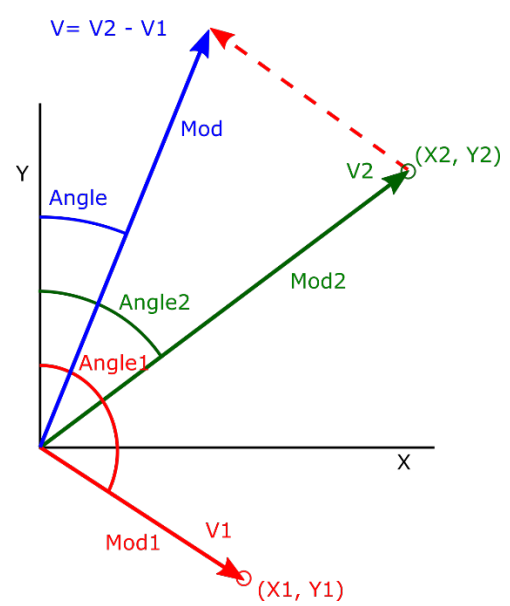
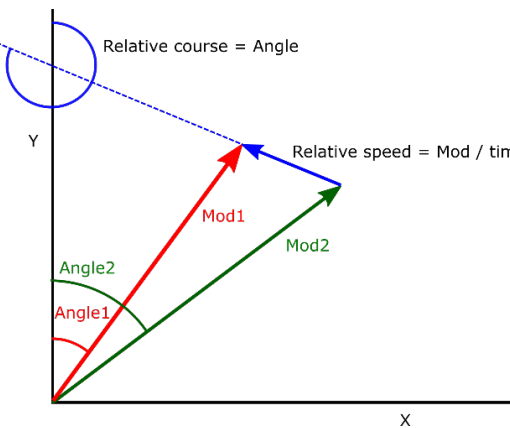


### 7.2.3 Bloques funcionales para manejo de vectores y rectas

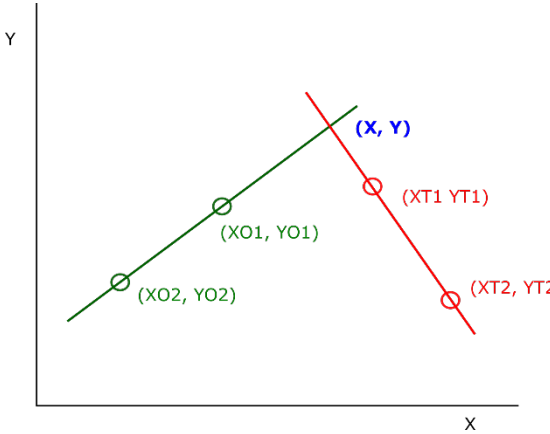
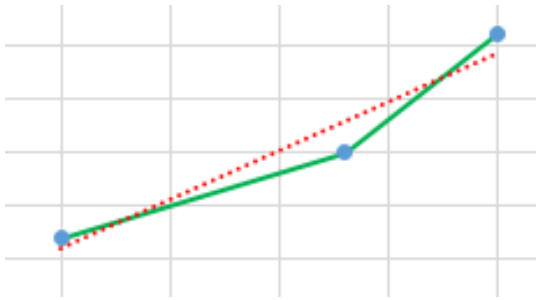
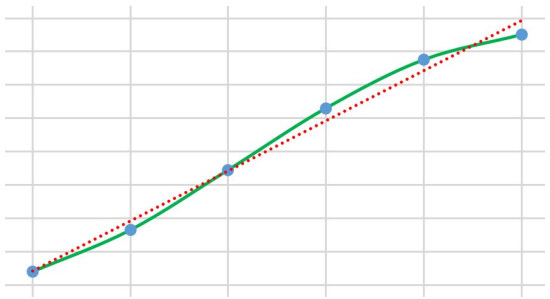
Los dos primeros FBs (FB\_AddVector y FB\_SubsVector) retornan el vector resultado de sumar y restar los dos vectores de entrada, en coordenadas polares. El tercero (FB\_RelativeVector) devuelve el vector de velocidad y rumbo relativos. Los parámetros de entrada de éste son la demora y distancia de dos ecos del mismo blanco y el tiempo (en segundos) transcurrido entre los mismos.

El cuarto FB incluido en este apartado (FB\_CrossPoint) determina el punto de corte de dos rectas, definida cada una por dos puntos. Servirá para determinar el punto de cruce de dos trayectorias (del buque propio y de un blanco). El quinto FB (FB\_Least\_Squares) es para ajuste de 3 puntos a una recta por mínimos cuadrados. Se puede utilizar para mejorar el cálculo del rumbo relativo. A partir de 3 datos (distancia, demora), y haciendo cambio a coordenadas cartesianas, el primer parámetro de salida corresponde a la pendiente de la recta de ajuste, y de ella se obtiene el valor del rumbo relativo. Los 3 parámetros de salida últimos dan la distancia de cada punto a la recta ajustada. El sexto FB (FB\_Least\_Squares6) es equivalente al anterior, pero para un ajuste con 6 puntos.



<pre> <b>FUNCTION_BLOCK FB_Subsvector</b> (* FB that subtracts two vectors in polar coordinates *) VAR_INPUT     IN_rMod1: REAL;     IN_rAng1: REAL;     IN_rMod2: REAL;     IN_rAng2: REAL; END_VAR VAR_OUTPUT     OUT_rMod: REAL;     OUT_rAng: REAL; END_VAR         </pre>	 <p><i>Figura 7.5. Resta de vectores en coordenadas polares</i></p>
<pre> <b>FUNCTION_BLOCK FB_RelativeVector</b> (* FB that calculates relative course (angle) and speed (mod/time) from the distance and bearing of two echoes of the target. Echo2 precedes echo1 *) (* Angles, (0.0 .. 359.9) clockwise, from the north *) VAR_INPUT     IN_rMod1: REAL; (* distance1 *)     IN_rAng1: REAL; (* bearing1 *)     IN_rMod2: REAL; (* distance2 *)     IN_rAng2: REAL; (* bearing2 *)     IN_rSec: REAL; (* time (s) between echoes *) END_VAR VAR_OUTPUT     OUT_rRelSpeed: REAL;     (* if IN_rSec &lt; 0 then OUT_rRelSpeed := -1.0 *)     OUT_rRelCourse: REAL; END_VAR         </pre>	 <p><i>Figura 7.6. Rumbo y velocidad relativos</i></p>



<p><b>FUNCTION_BLOCK FB_CrossPoint</b>          (* returns the (X,Y) coordinates of the cross point of two straight lines, defined by two points:          line O: (XO2,YO2), (XO1, YO1). Trajectory of own ship          line T: (XT2,YT2), (XT1, YT1). Trajectory of target ship *)</p> <p>VAR_INPUT          IN_rXO2: REAL;          IN_rYO2: REAL;          IN_rXO1: REAL;          IN_rYO1: REAL;          IN_rXT2: REAL;          IN_rYT2: REAL;          IN_rXT1: REAL;          IN_rYT1: REAL;</p> <p>END_VAR</p> <p>VAR_OUTPUT          OUT_rX: REAL;          OUT_rY: REAL;          OUT_xWarning: BOOL; (* true if straight lines dont' cross *)</p> <p>END_VAR</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 7.7. Punto de corte de 2 rectas</i></p>
<p><b>FUNCTION_BLOCK FB_Least_Squares</b>          (* Adjust 3 points to a straight line (y = Ax+B) by the least squares method *)          (* Returns values of A, B and distances of 3 points to the straight line *)</p> <p>VAR_INPUT          IN_rX1, IN_rY1, IN_rX2, IN_rY2, IN_rX3, IN_rY3:          REAL; (* (X1,Y1), (X2,Y2), (X3,Y3) *)</p> <p>END_VAR</p> <p>VAR_OUTPUT          OUT_rA, OUT_rB: REAL; (* y = Ax+B *)          OUT_rD1, OUT_rD2, OUT_rD3: REAL; (* distance of each point to the straight line*)          OUT_xWarning: BOOL;          (* if points are aligned in vertical, it returns the following values: OUT_rA:=10000.0;          OUT_rB:=10000.0; OUT_rD1:=-1.0; OUT_rD2:=-1.0;          OUT_rD3:=-1.0; OUT_xWarning:=TRUE;*)</p> <p>END_VAR</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 7.8. Ajuste de 3 puntos (X,Y) por mínimos cuadrados</i></p>
<p><b>FUNCTION_BLOCK FB_Least_Squares6</b>          (* Adjust 6 points to a straight line (y = Ax+B) by the least squares method *)          (* Returns values of A, B *)</p> <p>VAR_INPUT          IN_rX1, IN_rY1, IN_rX2, IN_rY2, IN_rX3, IN_rY3,          IN_rX4, IN_rY4, IN_rX5, IN_rY5, IN_rX6, IN_rY6:          REAL;          (* (X1,Y1) .. (X6,Y6) *)</p> <p>END_VAR</p> <p>VAR_OUTPUT          OUT_rA, OUT_rB: REAL; (* y = Ax+B *)          OUT_xWarning: BOOL;          (* if points are aligned in vertical, it returns the following values: OUT_rA:=10000.0;          OUT_rB:=10000.0; OUT_xWarning:=TRUE;*)</p> <p>END_VAR</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 7.9. Ajuste de 6 puntos (X,Y) por mínimos cuadrados</i></p>

### 7.2.4 Cálculos de CPA, TCPA y posibles situaciones de aproximación

El primer FB devuelve CPA y TCPA (en segundos) de un blanco, dando distancia, demora, velocidad relativa y rumbo relativo. Un valor de -1.0 de TCPA indica que el blanco se está alejando.

#### FUNCTION\_BLOCK FB\_Calculate\_CPA\_TCPA

(\* calculates and returns Closest Point of Approach and time to CPA in minutes \*)

VAR\_INPUT

IN\_rDist: REAL; (\* distance of target \*)  
 IN\_rBear: REAL; (\* bearing of target \*)  
 IN\_rRelSpeed: REAL; (\* relative speed of target \*)  
 IN\_rRelCourse: REAL; (\* relative course of target \*)

END\_VAR

VAR\_OUTPUT

OUT\_rCPA: REAL;  
 OUT\_rTCPA: REAL; (\* -1.0 if ships are moving away \*)

END\_VAR

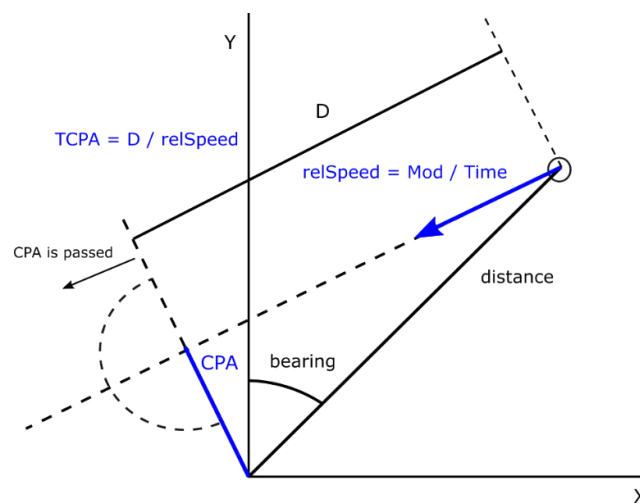


Figura 7.10. CPA y TCPA a partir de distancia, demora, velocidad relativa y rumbo relativo

### Situaciones posibles de aproximación entre el buque propio (Own) y un blanco (Target)

Se calculan a partir del análisis mostrado en el capítulo 4.

#### FUNCTION FU\_iCol\_Situation : INT

(\*  
 0: They don't come close  
 1: Overtaking. Rule 13 - Own ship shall be deemed to be overtaking when coming up with another vessel from a direction more than 22.5 degrees abaft her beam  
 2: Being overtaken. Rule 13 - Own ship is being overtaken  
 3: Head-on situation. Rule 14 - Two power-driven vessels are meeting on reciprocal or nearly reciprocal courses so as to involve risk of collision  
 4: Crossing starboard. Rule 15 - crossing situation. Own vessel has the other on her starboard  
 5: Crossing port side. Rule 15 - crossing situation. Own vessel has the other on her port side  
 -1: true heading target not available \*)

VAR\_INPUT

IN\_rHDGT:REAL; (\* true heading target \*)  
 IN\_rHDGO:REAL; (\* true heading own ship \*)  
 IN\_rBearing: REAL; (\* bearing of target \*)  
 IN\_rDistNow: REAL;  
 IN\_rDistPrev1: REAL;  
 IN\_rDistPrev2:REAL;  
 IN\_rBearingT: REAL; (\* bearing of ownship from target view \*)

END\_VAR

**FUNCTION FU\_iCol\_RedVis : INT**

(\* Reduced visibility.Rule 19 - Conduct of vessels in restricted visibility

1: Target ship is forward of the beam on the starboard of own ship. Own ship is forward of the beam of target ship.

2: Target ship is forward of the beam on the starboard of own ship. Own ship is abeam or abaft the beam of target ship.

3: Target ship is abeam or abaft the beam on the starboard of own ship. Own ship is forward of the beam of target ship.

4: Target ship is abeam or abaft the beam on the starboard of own ship. Own ship is abeam or abaft the beam of target ship. (Going away)

5: Target ship is forward of the beam on the portside of own ship. Own ship is forward of the beam of target ship.

6: Target ship is forward of the beam on the portside of own ship. Own ship is abeam or abaft the beam of target ship.

7: Target ship is abeam or abaft the beam on the portside of own ship. Own ship is forward of the beam of target ship.

8: Target ship is abeam or abaft the beam on the portside of own ship. Own ship is abeam or abaft the beam of target ship. (Going away) \*)

VAR\_INPUT

IN\_rHDGT:REAL; (\* true heading target \*)

IN\_rHDGO:REAL; (\* true heading own ship \*)

IN\_rBearing: REAL;

END\_VAR

---

### 7.3 Cálculos de maniobras del buque propio para CPA seguro

Se ha implementado un FB que retorna los valores para cambios en rumbo (*heading*) o velocidad del buque propio de modo que se alcance un CPA seguro. Se asume que el blanco mantiene sus valores constantes.

**FUNCTION\_BLOCK FB\_CalcHeadSpeedManoe**

VAR\_INPUT

IN\_rd: REAL; (\* distance Own-Target\*)

IN\_rSafe: REAL; (\* safe CPA \*)

IN\_rB: REAL; (\* bearing Own-Target \*)

IN\_rST: REAL; (\* speed Target \*)

IN\_rHT: REAL; (\* heading Target \*)

IN\_rSO: REAL; (\* speed Own \*)

IN\_rHO: REAL; (\* heading Own\*)

END\_VAR

VAR\_OUTPUT

OUT\_rHO11: REAL; (\* limit11 for heading Own, <0 if impossible. Speed Own = IN\_rSO (constant) \*)

OUT\_rHO12: REAL; (\* limit12 for heading Own, <0 if impossible. Speed Own = IN\_rSO (constant) \*)

OUT\_rHO21: REAL; (\* limit21 for heading Own, <0 if impossible. Speed Own = IN\_rSO (constant) \*)

OUT\_rHO22: REAL; (\* limit22 for heading Own, <0 if impossible. Speed Own = IN\_rSO (constant) \*)

OUT\_rSO1: REAL; (\* limit1 for speed Own, <0 if impossible. Heading Own = IN\_rHO (constant) \*)

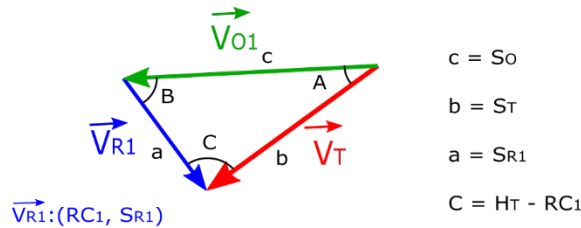
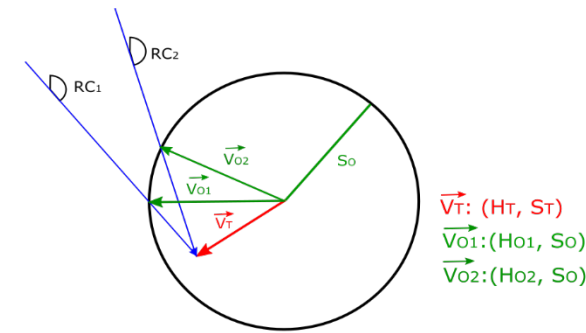
OUT\_rSO2: REAL; (\* limit2 for speed Own, <0 if impossible. Heading Own = IN\_rHO (constant) \*)

OUT\_rRC1: REAL; (\* limit1 for relative course \*)

OUT\_rRC2: REAL; (\* limit2 for relative course \*)

END\_VAR

Figura 7.11 y Figura 7.12 representan las geometrías y expresiones para los cálculos de rumbos, manteniendo constante la velocidad.



$$\vec{V}_T = \vec{V}_{O1} + \vec{V}_{R1}$$

Teorema del coseno:  $c^2 = a^2 + b^2 - 2a \cdot b \cdot \cos(C)$  }  $SR1, HO1$

Figura 7.11. Cálculos de rumbos para maniobras del buque propio

Si la velocidad del blanco es mayor que la del buque propio, se pueden obtener 4 valores para los límites de los rumbos. Los rumbos no adecuados están en dos sectores, el sector comprendido entre  $H_{O11}$  y  $H_{O21}$  y el comprendido entre  $H_{O22}$  y  $H_{O12}$

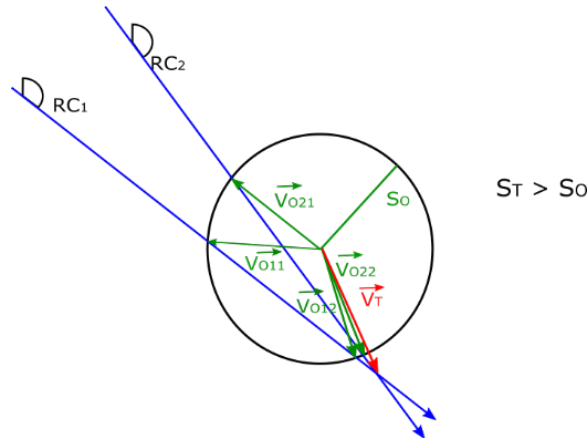
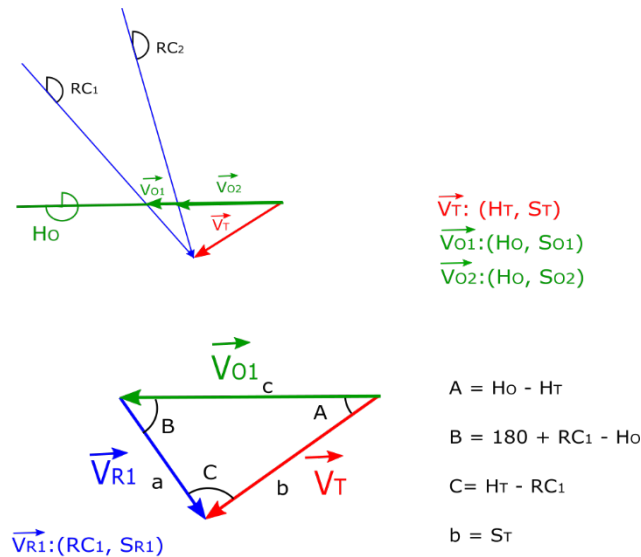


Figura 7.12. Cálculos de rumbos para maniobras del buque propio,  $S_T > S_o$

Cuando no se obtienen 4 valores para los límites de rumbos, los no adecuados serán

- el sector comprendido entre  $H_{O11}$  y  $H_{O21}$  si ambos son  $\geq 0.0$ , o
- el sector comprendido entre  $H_{O11}$  y  $H_{O12}$  si ambos son  $\geq 0.0$ , o
- el sector comprendido entre  $H_{O22}$  y  $H_{O21}$  si ambos son  $\geq 0.0$ .

La Figura 7.13 representa la geometría y expresiones para los cálculos de velocidades, manteniendo constante el rumbo.



Teorema del seno:  $b / \sin(B) = c / \sin(C) \rightarrow S_{O1}$

Figura 7.13. Cálculos de velocidades para maniobras del buque propio

El rango de velocidades no adecuadas será

- velocidades entre  $S_{O2}$  y  $S_{O1}$  si  $(S_{O2} > 0.0)$  y  $(S_{O1} > S_{O2})$ , o
- velocidades entre  $S_{O1}$  y  $S_{O2}$  si  $(S_{O1} > 0.0)$  y  $(S_{O2} > S_{O1})$ , o
- velocidades mayores de  $S_{O1}$  si  $(S_{O1} > 0.0)$  y  $((S_{O1} \cong S_{O2})$  o  $(S_{O2} < 0.0))$ , o
- velocidades mayores de  $S_{O2}$  si  $(S_{O2} > 0.0)$  y  $(S_{O1} < 0.0)$ .

#### 7.4 Cálculos de velocidades sobre el agua, STW (*Speed Through Water*)

Se ha implementado un FB que proporciona los valores de STW del buque propio y del blanco (ver Figura 6.16).

```

FUNCTION_BLOCK FB_Calculate_True_Speeds
VAR_INPUT
    IN_rModT1: REAL; (* distance1 target *)
    IN_rAngT1: REAL; (* bearing1 target *)
    IN_rModT2: REAL; (* distance2 target *)
    IN_rAngT2: REAL; (* bearing2 target *)
    IN_rAngO: REAL; (* true heading own *)
    IN_rAngT: REAL; (* true heading target *)
    IN_rSec: REAL; (* seconds between both measures *)
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_rSpeedO: REAL; (* STW own *)
    OUT_rSpeedT: REAL; (* STW target *)
    OUT_xWarning: BOOL; (* true if parallel (+0.1) directions (equal or opposite headings) *)
    OUT_iDiagCode: INT;
    (* OUT_iDiagCode = 0 -> '          ',
    OUT_iDiagCode = 1 -> 'own ship is aligned with target, catching its stern',
    OUT_iDiagCode = 2 -> 'own ship is aligned, but is slower than target',
    OUT_iDiagCode = 3 -> 'target is behind own ship, and catching us',
    OUT_iDiagCode = 4 -> 'target is behind own ship, but slower than us',
    OUT_iDiagCode = 5 -> 'ships in parallel, but moving away',
    OUT_iDiagCode = 6 -> 'ships in parallel',
    OUT_iDiagCode = 7 -> 'head-on situation',
    OUT_iDiagCode = 8 -> 'ships in parallel, opposite direction',

```

```

OUT_iDiagCode = 9 -> 'is the same echo',
OUT_iDiagCode = 10-> 'time must be >0' *)
END_VAR

```

## 7.5 Tipos de datos definidos

Se definen nombres simbólicos para valores numéricos estándar. Por ejemplo,

```

i_MaxTargets:INT:=25; (* max number of targets *)
i_MaxTargetsSim: INT := 4; (* max number of targets for simulation. This value can be incremented *)

```

pero gran parte de los valores se corresponden con tipos de datos definidos para esta aplicación, mostrados en la Figura 7.14.

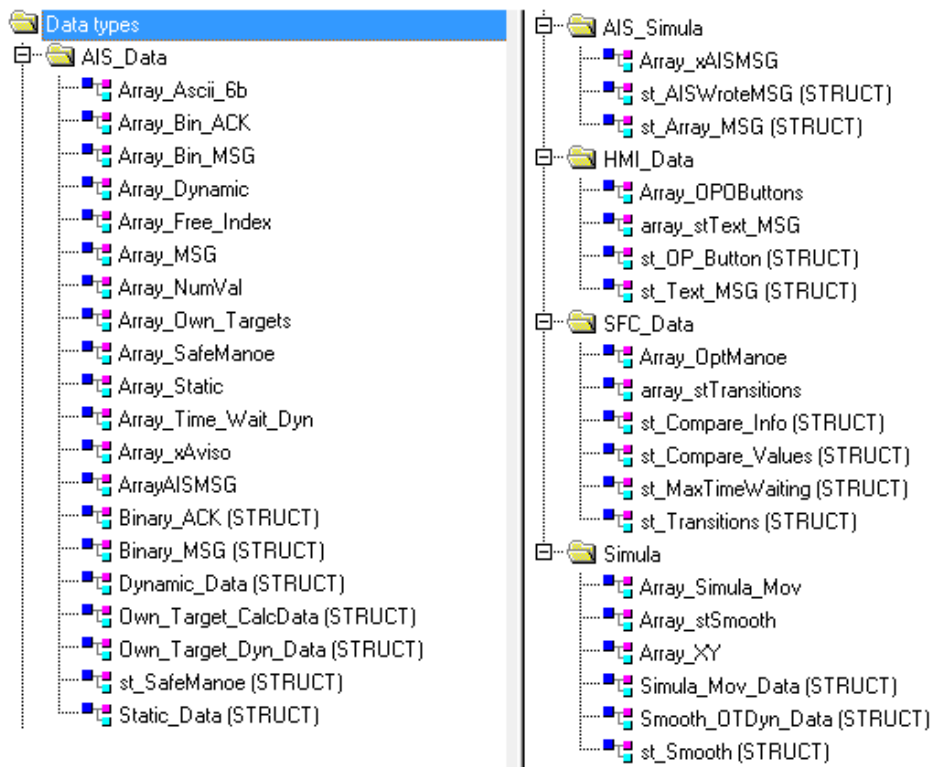


Figura 7.14. Tipos definidos

### Tipos de datos para almacenar la información necesaria captada o transmitida del AIS:

- **Static\_Data:** estructura que contiene información estática proporcionada por los mensajes AIS 5 o 24 (ver Tabla 5.2). Cada buque difunde esta información en intervalos de 6m.
- **Dynamic\_Data:** estructura que contiene información dinámica proporcionada por los mensajes AIS 1, 2, 3 o 18 (ver Tabla 5.1). La información dinámica se transmite con una frecuencia dependiente de las modificaciones de velocidad y derrotero. Intervalo variable entre 2s y 3m.
- **Binary\_MSG:** estructura que contiene la información proporcionada por medio del mensaje AIS 6: mensaje binario direccionado (ver Tabla 5.5).
- **Binary\_ACK:** estructura que contiene la información proporcionada por el mensaje AIS 7: acuse de recibo de mensaje binario direccionado (ver Tabla 5.7).
- **Array\_MSG:** ARRAY[1..32] OF BYTE; contiene la información de los mensajes, encapsulada transmitida por el AIS y extraída de las sentencias VDM, VDO o ABK (NMEA 0183) o de los PGNs correspondientes (NMEA 2000).

- **ArrayAISMSG:** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF Array\_MSG; contiene los últimos mensajes AIS a enviar a los blancos.
- **Array\_Static:** ARRAY[0..i\_MaxTargets] OF Static\_Data;
- **Array\_Dynamic:** ARRAY[0..i\_MaxTargets] OF Dynamic\_Data; la posición 0 almacena los datos del buque propio. El resto, datos de los blancos detectados (*targets*). Las posiciones de blancos de los que no se reciba información dinámica pasado un tiempo máximo establecido quedarán libres para nuevos blancos.
- **Array\_Bin\_MSG:** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF Binary\_MSG;
- **Array\_Bin\_ACK:** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF Binary\_ACK;
- **Array\_Free\_Index :** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF BOOL; Si una posición en este array tiene el valor TRUE, las posiciones correspondientes en los arrays anteriores estarán disponibles para nuevos blancos.
- **Array\_Time\_Wait\_Dyn:** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF TIME; tiempo transcurrido esperando por información de los blancos.
- **Array\_Ascii\_6b:** ARRAY[0..63] OF STRING(1); Cada posición del array es el número de la codificación ascii de 6 bits del carácter correspondiente.

#### **Tipos de datos con información calculada:**

- **Own\_Target\_CalcData :** estructura que almacena la información calculada a partir de los datos dinámicos del buque propio y de un blanco: distancia, demora, rumbo y velocidad relativos, CPA, TCPA, posibles situaciones de colisión y de maniobra.
- **Own\_Target\_Dynamic\_Data :** estructura que almacena la información que relaciona el buque propio y un blanco. Cada vez que se recibe información dinámica de ese blanco, se comprobará si se ha recibido información del buque propio casi simultáneamente. Mantendremos en esta estructura los 3 últimos datos del buque propio y del blanco tomados con un intervalo de tiempo definido y la estructura con la información calculada.
- **Array\_Own\_Targets :** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF Own\_Target\_Dynamic\_Data;
- **st\_SafeManoe:** estructura con los valores calculados de rumbos y velocidades para posibles maniobras del buque propio respecto a un blanco.
- **Array\_SafeManoe :** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF st\_SafeManoe;

#### **Tipos de datos para las comunicaciones entre los buques:**

- **st\_Transitions:** estructura con datos para las condiciones de transición entre la secuencia de etapas definida para la comunicación entre el buque propio y cada uno de los blancos.
- **Array\_stTransitions:** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF st\_Transitions;
- **st\_MaxTimeWaiting:** estructura con los tiempos máximos de espera por comunicaciones.
- **st\_Compare\_Info, st\_Compare\_Values:** estructuras con los parámetros para chequear la concordancia de la información disponible respecto a cada blanco.
- **Array\_OptManoe:** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF INT; número que indica la maniobra identificada con respecto a cada blanco.

**Tipos de datos para la interfaz con el operador:**

- **st\_Text\_MSG:** estructura con el texto a mostrar en la interfaz del operador, para cada uno de los blancos.
- **Array\_stText\_MSG:** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF st\_text\_MSG;
- **st\_OP\_Button:** estructura con los botones del operador
- **Array\_OPOButtons:** ARRAY[1..i\_MaxTargets] OF st\_OP\_Button;

**Tipos de datos para simulación de los buques:**

- **Simula\_Mov\_Data:** estructura con información para simulación de un buque.
- **Array\_Simula\_Mov :** ARRAY[0.. i\_MaxTargetsSim] OF Simula\_Mov\_Data;
- **Array\_XY :** ARRAY[0..4, 0..4] OF REAL; (\* (x,y) pos of ships in screen \*)

En la posición 0, información del buque propio. El resto, para información de blancos.

**Tipos de datos para la simulación de la comunicación AIS:**

Se ha realizado una simulación del AIS para hacer pruebas. Para ello, cada PLC hace de servidor OPC (*Open Platform Communications*) (OPC, 2021) y comunica a un cliente externo las variables con los mensajes AIS a enviar al resto de PLCs. El cliente se encarga de leer los valores compartidos por cada PLC y enviarlos a los PLCs implicados en la comunicación. La simulación se ha realizado para un máximo de 4 buques (buque propio y 3 blancos). Se han definido para ellos los siguientes tipos de datos:

- **Array\_xAISMSG:** ARRAY[1..3] OF BOOL; cada posición es True si se desea enviar un mensaje al blanco correspondiente.
- **st\_AISWroteMSG:** estructura de valores bool, para conocer si el AIS escribió un mensaje, con el tipo, origen y destino indicados.
- **st\_Array\_MSG:** estructura con los últimos mensajes a intercambiar, con orígenes y destinos indicados.
- **Smooth\_OTDyn\_Data, st\_Smooth, Array\_stSmooth:** estructuras y arrays para ajustes del rumbo relativo por mínimos cuadrados.

## 7.6 Tratamiento de datos AIS

Se recogen en la Figura 7.15 los bloques funcionales (FBs) y funciones (FUs) que se encargan de leer la información recibida por el AIS del buque propio y de calcular la información que relaciona a éste con los blancos captados.

Hacen uso de los FBs y FUs básicos detallados en el apartado anterior.



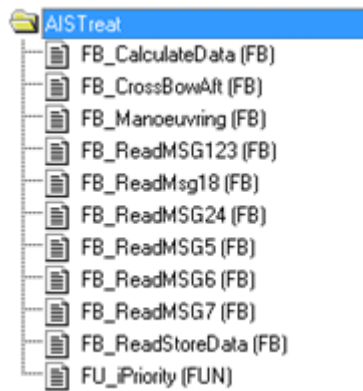


Figura 7.15. FBs y FUs para tratamiento de datos AIS

### 7.6.1 FBs de lectura y almacenamiento de datos AIS

Se recibe información de los buques a partir de comunicaciones NMEA 0183 o NMEA 2000 que incluyen los mensajes con el formato indicado en UIT-R.M 1371-5:

- Los mensajes tipo 1, 2, 3, 18 incluyen información dinámica de la posición del buque. Cada buque difunde esta información en intervalos variables entre 2 segundos y 3 minutos.
- Los mensajes tipo 5, 24 incluyen datos estáticos del buque. Cada buque difunde esta información en intervalos de 6 minutos.
- El mensaje tipo 6 incluye un mensaje binario direccionado, que un buque (origen) desea enviar a otro (destino).
- El mensaje tipo 7 incluye el acuse de recibo de un mensaje binario direccionado, que el buque destino debe enviar al origen.

#### FUNCTION\_BLOCK FB\_ReadMSG123

(\* Extracts from IN\_aMSG the dynamic data received (msg 1, 2 or 3), and writes the selected info in OUT\_Ship\_Dynamic \*)

```
VAR_INPUT
    IN_aMSG: Array_MSG;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_Ship_Dynamic: Dynamic_Data;
    OUT_xError: BOOL; (* true if there is an error in dynamic data. For example, lat, lon not available *)
    OUT_wDiagCode: WORD; (* description of error *)
END_VAR
```

#### FUNCTION\_BLOCK FB\_ReadMsg18

(\* Extracts from IN\_aMSG the dynamic data received (msg 18), and writes the selected info in OUT\_Ship\_Dynamic \*)

```
VAR_INPUT
    IN_aMSG: Array_MSG;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_Ship_Dynamic: Dynamic_Data;
    OUT_xError: BOOL; (* true if there is an error in dynamic data. For example, lat, lon not available *)
    OUT_wDiagCode: WORD; (* description of error *)
END_VAR
```

#### FUNCTION\_BLOCK FB\_ReadMSG5

(\* Extracts from IN\_aMSG the static data received (msg 5), and writes the selected info in OUT\_Ship\_Static \*)

```
VAR_INPUT
    IN_aMSG: Array_MSG;
END_VAR
```

---

```

VAR_OUTPUT
    OUT_Ship_Static: Static_Data;
    OUT_xError: BOOL; (* true if there is an error in static data *)
    OUT_wDiagCode: WORD; (* description of error *)
END_VAR

```

---

**FUNCTION\_BLOCK FB\_ReadMSG24**

(\* Extracts from IN\_aMSG the static data received (msg 24), and writes the selected info in OUT\_Ship\_Static \*)

```

VAR_INPUT
    IN_aMSG: Array_MSG;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_Ship_Static: Static_Data;
    OUT_xError: BOOL; (* true if there is an error in static data *)
    OUT_wDiagCode: WORD; (* description of error *)
END_VAR

```

---

**FUNCTION\_BLOCK FB\_ReadMSG6**

(\* Extracts from IN\_aMSG the binary msg received (msg 6), and writes the selected info in OUT\_MSGRead \*)

```

VAR_INPUT
    IN_aMSG: Array_MSG;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_MSGRead : Binary_MSG;
    OUT_xWarning: BOOL; (* true if it's not a msg of the application *)
END_VAR

```

---

**FUNCTION\_BLOCK FB\_ReadMSG7**

(\* Extracts from IN\_aMSG the ACK msg received (msg 7), and writes the selected info in OUT\_ACKRead \*)

```

VAR_INPUT
    IN_aMSG: Array_MSG;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_ACKRead : Binary_ACK;
END_VAR

```

---

Es necesaria una POU (FB o PRG) que se encargue de chequear el canal de comunicaciones con el AIS y de recibir los mensajes que procedan del mismo. En función del ID del mensaje, llamará a uno de los FBs anteriores para que extraiga la información del mismo y la devuelva en la estructura de información estática, dinámica, de mensaje binario o de acuse de recibo del mismo. Esta estructura ha de ser luego almacenada en el array correspondiente.

Esta POU dependerá del tipo de comunicación (serie: NMEA 0183 o CAN: NMEA 2000), y de las librerías que el PLC suministre para comunicaciones.

De momento, se ha implementado un bloque funcional, FB\_ReadStoreData, que lee los datos del AIS utilizando los FBs anteriores, y almacena la información en los arrays de tipo Array\_Static, Array\_Dynamic, Array\_Bin\_MSG o Array\_Bin\_ACK. Si ya existía información almacenada del mismo buque, se sobrescribe, de forma que la información que queda almacenada es la última recibida, para cada buque *target*.

**FUNCTION\_BLOCK FB\_ReadStoreData**

(\* Read data from AIS MSGs and store info in arrays IN\_OUT\_aLastDynData, IN\_OUT\_aStaticData, IN\_OUT\_aBinMSG or IN\_OUT\_aBinACK \*)

```

VAR_INPUT
    IN_xMSGWritten: BOOL; (* true if AIS sends a MSG to the PLC *)
    IN_aMSGSim: Array_MSG; (* AIS message *)
    IN_iMaxTargets: INT; (* max number of targets *)

```

```

    IN_dtAux: DT;          (* date and time *)
    IN_udiMMSIO: UDINT;   (* own ship MMSI *)
    IN_rDistVisible: REAL; (* radius of "visible universe" (max distance to ownship) *)
    IN_aAscii6b: Array_Ascii_6b;
    IN_rSpeed_Min: REAL;
    IN_rROT_Min: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_xAlarm_TooMany_Targets: BOOL;
    OUT_xAlarm_TooMany_StaTargets: BOOL;
    OUT_xWarning_SourceMsg: BOOL; (* There is no information about ship that sent the binary or ACK
message *)
    OUT_udiMMSIWarn: UDINT;
    OUT_xDynDataOwnStored: BOOL;
    OUT_xDynDataTargetStored: BOOL;
    OUT_xBinMSGReceived: BOOL;
    OUT_xBinACKReceived: BOOL;
    OUT_iLastIndex: INT;      (* position in arrays of the target that sent the latest dynamic data *)
    OUT_iLastIndexMSG : INT;  (* position in arrays of the target that sent the latest binary msg *)
    OUT_iLastIndexACK : INT; (* position in arrays of the target that sent the latest ACK *)
END_VAR
VAR_IN_OUT
    IN_OUT_iNumTargetsNow: INT; (* number of targets that have sent dynamic information *)
    IN_OUT_iNumTargetsStaNow: INT; (* number of targets that have sent static information *)
    IN_OUT_aLastDynData: Array_Dynamic; (* array with the last dynamic data read from the AIS related
to own and target ships *)
    IN_OUT_aStaticData: Array_Static; (* array with the last static data read from the AIS related to own
and target ships *)
    IN_OUT_alIndex: Array_Free_Index; (* if true, a target can be stored in the corresponding position in
the array a_LastDynData *)
    IN_OUT_alIndexSta: Array_Free_Index; (* if true, a target can be stored in the corresponding position
in the array a_StaticData *)
    IN_OUT_aBinMSG: Array_Bin_MSG; (* array with the last binary messages received from targets *)
    IN_OUT_aBinACK: Array_Bin_ACK; (* array with the last ACK messages received from targets *)
END_VAR

```

---

Este FB produce un flanco en la salida `OUT_xDynDataOwnStored`, `OUT_xDynDataTargetStored`, `OUT_xBinMSGReceived` o en `OUT_xBinACKReceived` cuando se ha recibido un dato dinámico propio o de un target, un mensaje binario o un acuse de recibo, respectivamente. Y devuelve en `OUT_iLastIndex`, `OUT_iLastIndexMSG` o en `OUT_iLastIndexACK` la posición del dato recibido en el array correspondiente.

## 7.6.2 FBs de tratamiento de información dinámica

`FB_CalculateData` recibe los datos dinámicos últimos del buque propio y de un blanco, y devuelve la estructura de tipo `Own_Target_Dynamic_Data` con la información calculada correspondiente (CPA, TCPA, tipo de aproximación, etc). Los cálculos se realizan teniendo en cuenta unos intervalos de tiempo dados para la adquisición de datos.

### FUNCTION\_BLOCK FB\_CalculateData

```

VAR_INPUT
    IN_LastDynDataOwn: Dynamic_Data; (* last own ship dynamic data read *)
    IN_LastDynDataT: Dynamic_Data; (* last dynamic data read from a target ship *)
    IN_iSecSimult: INT; (* Max interval in seconds between own and target readings *)
    IN_iSecInterval: INT; (*Seconds between 2 consecutive calculations of CPA and TCPA *)
    IN_rCPA_Min: REAL; (*Minimum value for safe CPA*)
    IN_rTCPA_Min: REAL; (*Minimum value for safe TCPA*)
    IN_rTScale: REAL; (* for faster simulation (1.0.. 4.0) *)

```

```

        IN_rSpeed_Min: REAL;
        IN_rRot_Min: REAL;
    END_VAR
    VAR_IN_OUT
        IN_OUT_OTDyn: Own_Target_Dyn_Data; (* array with dynamic and calculated data *)
    END_VAR
    VAR_OUTPUT
        OUT_stSafeM:st_SafeManoe;      (* values for Ownship safe manoeuvring the target *)
        OUT_xCalc_Data: BOOL;          (* true when calculations have been performed *)
        OUT_xWarning_Not_Simult: BOOL; (* true when the interval of readings between own and
target dynamic data is too big *)
    END_VAR

```

---

Si el cálculo del tipo de aproximación detecta que hay una situación de cruce entre el buque propio y un blanco, se determina si el cruce va a ser por la proa (*Ahead*) o por la popa (*Astern*) del blanco. Se encarga de ello el bloque funcional FB\_CrossBowAft.

#### **FUNCTION\_BLOCK FB\_CrossBowAft**

(\* called in case of crossing situation, it returns information about Ahead or Astern crossing \*)

```

    VAR_INPUT
        IN_OTDyn: Own_Target_Dyn_Data;
    END_VAR

    VAR_OUTPUT
        OUT_xCrossBow:BOOL; (* if true, own ship will cross AHEAD of target ship *)
        OUT_xCrossAft: BOOL; (* if true, own ship will cross ASTERN target ship *)
    END_VAR

```

---

Hay que determinar quien debe realizar la maniobra, en caso de riesgo de colisión entre el buque propio y un blanco, aplicando la Regla 18 de COLREGs - Obligaciones entre categorías de buques.

La información dinámica difundida por el AIS de un buque en el mensaje estándar 1, 2 o 3 incluye el estado de navegación, valor numérico en el rango 0..15: 0 = en camino con motor, 1 = anclado, 2 = fuera de control, 3 = maniobrabilidad restringida, 4 = limitado por el calado, 5 = amarrado, 6 = encallado, 7 = pescando, 8 = en camino con vela, ...

La función implementada recibe la información dinámica del buque propio (*Own*) y de un blanco (*Target*) y devuelve un valor entero: 0= igual prioridad, 1= debe maniobrar *Own*, 2= debe maniobrar *Target*.

#### **FUNCTION FU\_iPriority: INT**

(\* COLREG rule 18: Responsibilities between Vessels.

0: No priority

1: Own ship shall keep out of the way of Target ship

2: Target ship shall keep out of the way of Own ship \*)

```

    VAR_INPUT
        IN_OwnDynData: Dynamic_Data; (* dynamic data read from own ship *)
        IN_TargetDynData: Dynamic_Data; (* dynamic data read from target ship *)
    END_VAR

```

---

También se puede determinar si se está maniobrando. Para ello se ha implementado FB\_Manoeuvring:

#### **FUNCTION\_BLOCK FB\_Manoeuvring**

(\* Output parameters show if ownship or targetship are increasing or decreasing speed, or manoeuvring portside or starboard. It analyzes the 3 last stored data for speeds and headings \*)

```

    VAR_INPUT

```

```

    IN_OTDyn: Own_Target_Dyn_Data;
    IN_rRotMin: REAL;
    IN_rSpeedMin: REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_xManSTBO: BOOL;
    OUT_xManPSDO: BOOL;
    OUT_xIncSpeedO: BOOL;
    OUT_xDecSpeedO: BOOL;
    OUT_xManSTBT: BOOL;
    OUT_xManPSDT: BOOL;
    OUT_xIncSpeedT: BOOL;
    OUT_xDecSpeedT: BOOL;
END_VAR

```

## 7.7 Diálogo entre buques

El grupo de FBs y FUs reflejados en la Figura 7.16 se encargan de la implementación de las operaciones principales relacionadas con la comunicación entre los sistemas PE de los buques.

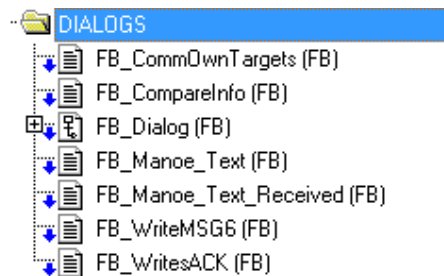


Figura 7.16. FBs para diálogo entre buques

FB\_CommOwnTargets establece las comunicaciones entre el buque propio y cada uno de los blancos que se encuentran en su “universo visible”.

### FUNCTION\_BLOCK FB\_CommOwnTargets

```

VAR_INPUT
    IN_xBinMSGReceived: BOOL; (* true if a bin msg has been received *)
    IN_xBinACKReceived: BOOL; (* true if an ACK msg has been received *)
    IN_iLastIndexMSG : INT;   (* position in arrays of the target that sent the latest binary msg *)
    IN_iLastIndexACK : INT;   (* position in arrays of the target that sent the latest ACK *)
    IN_stTWaits: st_MaxTimeWaiting;
    IN_aOPButtons: Array_OPOButtons; (* buttons for OK / not OK / Reset *)
    IN_iNumTargetsNow: INT;          (* number of targets that have sent dynamic information *)
    IN_aIndex: Array_Free_Index;    (* if true, empty position in the arrays *)
    IN_aBinMSG: Array_Bin_MSG;     (* array with the last binary messages received from targets *)
    IN_stCompValues: st_Compare_Values;
END_VAR
VAR_IN_OUT
    IN_OUT_aOT: Array_Own_Targets; (* array with the last own and target read and calculated data *)
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_aManoeNum: Array_OptManoe;
    OUT_a_aMSG: ArrayAISMSG;      (* last AIS (ITU-R M.1371-5) messages from targets *)
    OUT_astTextMSG : array_stText_MSG; (* text to be shown on ownship display *)
    OUT_a_xMSGBinWritten: Array_xAISMSG;
END_VAR

```

Para cada uno de los blancos, FB\_CompareInfo compara la información dinámica transmitida con la información disponible sobre el mismo, para ver si es o no concordante.

**FUNCTION\_BLOCK FB\_CompareInfo**

```

VAR_INPUT
    IN_MSGBin : Binary_MSG;
    IN_OTDyn: Own_Target_Dyn_Data;
    IN_stDiFVal: st_Compare_Values;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_stCompInfo: st_Compare_Info;
    OUT_xCompareInfo: BOOL;
END_VAR

```

Para cada uno de los blancos, FB\_Dialog calcula las maniobras e implementa las secuencias de etapas mostradas en Figura 6.8 y Figura 6.9 y las acciones asociadas a cada etapa. Se debe crear una instancia de este bloque funcional para cada uno de los blancos con los que pueda haber diálogo. Lógicamente, este número de blancos es variable, pero la instanciación no puede ser dinámica. Por lo tanto, se crea un número fijo de instancias, que se corresponderá con el número máximo de blancos.

**FUNCTION\_BLOCK FB\_Dialog**

```

VAR_INPUT
    IN_stTransitions: st_Transitions;
    IN_stTWaits: st_MaxTimeWaiting;
    IN_MSGBin : Binary_MSG; (* Last received binary msg *)
    IN_OTDyn : Own_Target_Dyn_Data;
    IN_stCompValues: st_Compare_Values;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_xMSGWritten: BOOL; (* True if ownship has sent a binary msg *)
    OUT_aMSGBin: ARRAY_MSG;
    OUT_iManoe: INT;
    OUT_Text_MSG: st_Text_MSG;
    OUT_xPreAlert: BOOL; (* True if prealert is detected first by the target ship *)
END_VAR

```

Se han escrito unos bloques funcionales que generan un mensaje con la información binaria direccionada enviada por el AIS (mensaje 6) y la simulación del mensaje de acuse de recepción (ACK):

**FUNCTION\_BLOCK FB\_WriteMSG6**

(\* AIS format for a binary message. Each TIME this FB is executed it generates the encapsulated information (ITU-R M.1371.5) for a ship \*)

```

VAR_INPUT
    IN_MSGRead : Binary_MSG;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_aMSG: Array_MSG;
END_VAR

```

**FUNCTION\_BLOCK FB\_WritesACK**

(\* Simulate AIS output of an ACK for a received binary msg

Each time this FB is executed it generates the encapsulated information (ITU-R M.1371.5) for msg #7 \*)

```

VAR_INPUT
    IN_udiShipO: UDINT;
    IN_udiShipT: UDINT;
END_VAR

VAR_OUTPUT
    OUT_aMSG: Array_MSG;
END_VAR

```

FB\_Manoe\_Text y FB\_Manoe\_Text\_Received se encargan de mostrar al operador del buque la información calculada o la recibida, respectivamente, respecto a cada uno de los blancos.

#### **FUNCTION\_BLOCK FB\_Manoe\_Text**

(\* it shows the manoeuvre selected by ownship (sNameO) plc to ownship operator, related to target ship (sNameT) \*)

```
VAR_INPUT
    IN_iManoeID : INT;
    IN_OTDyn : Own_Target_Dyn_Data;
END_VAR
```

```
VAR_OUTPUT
    OUT_sBinText: st_Text_MSG;
END_VAR
```

#### **FUNCTION\_BLOCK FB\_Manoe\_Text\_Received**

(\* it shows the received msg from the target (source, sNameS) with the manoeuvre to ownship operator (sNameD) \*)

```
VAR_INPUT
    IN_iManoeID : INT;
    IN_OTDyn : Own_Target_Dyn_Data;
END_VAR
```

```
VAR_OUTPUT
    OUT_sBinText: st_Text_MSG;
END_VAR
```

---

## 7.8 Bases de datos

Los intercambios de mensajes, además de los datos dinámicos, son almacenados por el sistema de cada buque, de forma que posteriormente puedan ser consultados. El almacenamiento se hace en una base de datos externa al PLC. Las operaciones que ha de hacer el PLC en la base de datos son

- Escritura periódica de los datos dinámicos recibidos y calculados.
- Escritura de los valores, situaciones y escenarios cuando el sistema entra en prealerta.
- Escritura de los mensajes intercambiados con el operador propio y con los demás buques.
- Escritura de los mensajes al operador en caso de desacuerdos, en caso de que uno de los implicados en el diálogo no responda en un tiempo dado, o que falle la comunicación AIS.

En todos los casos la información almacenada va acompañada de un campo que indica el instante (fecha y hora) en que se generó la información, y de los códigos identificadores de los buques. Toda esta información está disponible en las variables globales del PLC en el momento en que haya que efectuar la escritura. Las consultas y tratamiento de la información almacenada serán realizadas desde otro sistema, de forma local o remota. Existen múltiples sistemas de gestión de bases de datos. Uno de los más utilizados es MySQL (Oracle, 2021). Se trata de un sistema de gestión de base de datos relacional, multihilo y multiusuario. Organiza la información mediante tablas, que están relacionadas por elementos comunes que hacen posible la combinación de datos de varias tablas en una consulta. Es accesible para múltiples usuarios de forma simultánea, y presenta la ventaja de ser de código abierto.

El PLC no necesita hacer operaciones de lectura en la base de datos. Dependiendo del modelo de PLC que se utilice, la conexión con la base de datos y el código a añadir para la escritura de datos en la misma puede variar, aunque en todos los casos será una operación con poca complejidad. Tampoco es compleja la estructura de las tablas de datos, que incluyen los campos con la información mencionada. En este trabajo se han definido unas tablas a modo de prueba, y unos bloques funcionales que se encargan de la

escritura en las tablas (ver Figura 7.17). Las estructuras definitivas quedan de momento a expensas de decidir el tipo de consultas a realizar.

Se almacena:

- Tabla Targets. Información de cada blanco (*target*): identificador, nombre, fecha y hora de entrada o de salida del “universo visible” (distancia < LRS).
- Tabla DynamicInfo. Datos dinámicos recibidos y calculados, con el identificador y nombre del blanco, fecha y hora.
- Tabla MSG\_Comm. Textos de los mensajes, con los identificadores de origen y destino, fecha y hora.

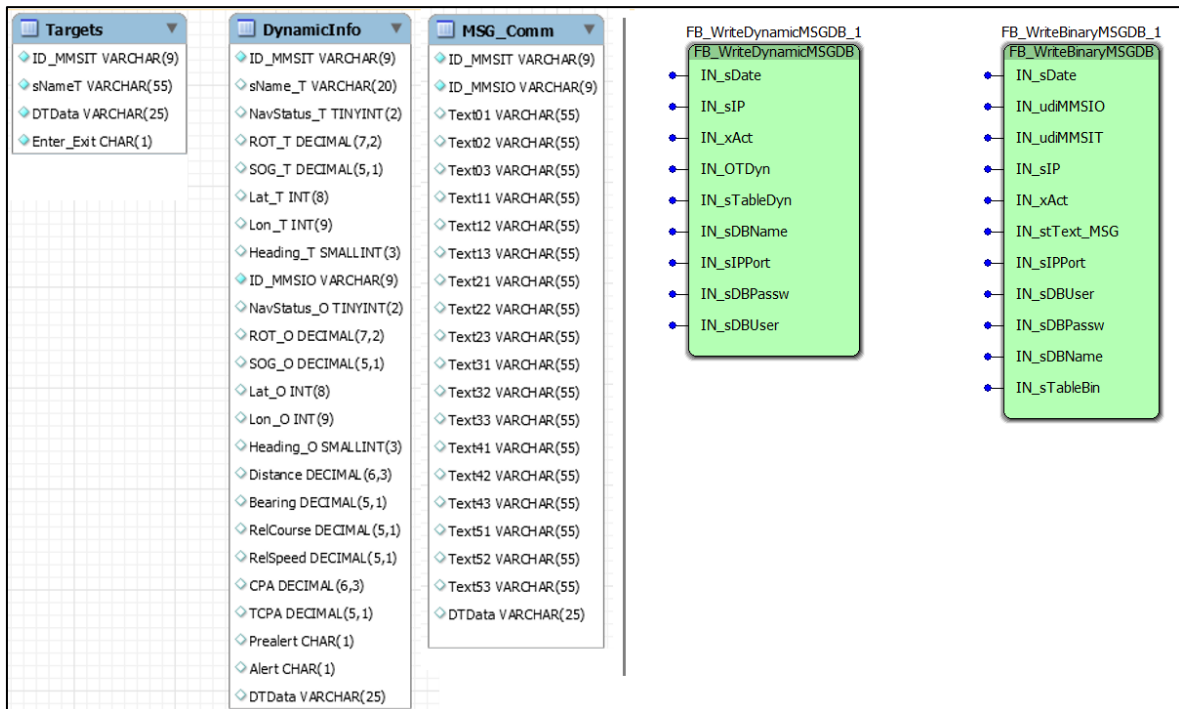


Figura 7.17. Tablas de la base de datos y bloques funcionales de escritura (Phoenix Contact, 2021)

## 7.9 Simulación del proceso

Para chequear el funcionamiento de las POU's desarrolladas es necesario simular el proceso. En este caso, simular el funcionamiento del AIS: recogida de información de los buques y envío de los datos al PLC. Y esto conlleva la simulación del movimiento de los buques y las visualizaciones en pantalla.

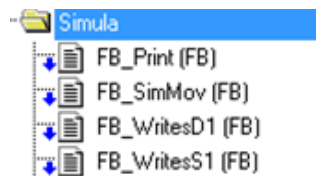


Figura 7.18. FBs y FUs para simulación de los buques

### 7.9.1 Simulación del movimiento y velocidad de una embarcación

El desarrollo de los modelos de la simulación del movimiento y velocidad de una embarcación se ha hecho siguiendo la norma UNE-EN ISO 11674:2002, “Embarcaciones y tecnología marina. Sistemas de control de rumbo”.



El modelo de maniobrabilidad de la embarcación debe venir representado por la siguiente función de transferencia:

$$\frac{\dot{\Psi}}{\delta} = \frac{K}{1+Ts} \quad (7.1)$$

donde:

- $\dot{\Psi}$  es el índice de giro de la embarcación, en grados/segundo
- $\delta$  es el ángulo real del timón, en grados
- K es la constante de capacidad de giro de la embarcación en segundos<sup>-1</sup>
- T es la constante de tiempo de la embarcación, en segundos
- s es el operador de Laplace, en segundos<sup>-1</sup>

El modelo de motor de gobierno debe basarse en la expresión siguiente:

$$\frac{\delta}{\delta^*} = \frac{1}{1+T_E s} \quad (7.2)$$

donde:

- $\delta$  es el ángulo del timón real, en grados
- $\delta^*$  es el ángulo del timón ordenado, en grados
- $T_E$  es la constante de tiempo del motor de gobierno, en segundos.  $T_E = 2,5$  segundos
- $\delta^*$  estará comprendido entre  $-30^\circ$  y  $30^\circ$

Para simular los cambios de la velocidad del buque en función de la velocidad ordenada, tomamos como modelo del buque la función de transferencia siguiente:

$$G(s) = \frac{V_{real}(s)}{V_{ord}(s)} = \frac{B}{B+s} \quad (7.3)$$

donde:

- $B = K/L$
- K = constante
- L = eslora del buque

El Anexo 2 incluye el desarrollo completo del modelo y los detalles de la programación.

Se ha implementado un bloque funcional, **FB\_SimMov**, que permite simular el movimiento de un buque. Recibe la estructura con los datos previos, calcula y devuelve la misma estructura, que incluye velocidad, rumbo y posición nueva del buque.

Se pueden simular 2 modos de maniobra: Auto y Servo.

- Auto: el ángulo ordenado corresponde con el rumbo a seguir. Implementación con un controlador PID programado.
- Servo: se ordena el ángulo de pala (entre -30.0 y 30.0).

#### **FUNCTION\_BLOCK FB\_SimMov**

(\* simulation of the movement of a ship. ISO 11674:2000, Annex A \*)

VAR\_INPUT

IN\_rTSampling: REAL; (\* sampling period \*)

IN\_rTScale: REAL;

IN\_xInitAll: BOOL;

---

```

END_VAR
VAR_IN_OUT
    IN_OUT_DataShip: Simula_Mov_Data;
END_VAR

```

---

### 7.9.2 Mensajes AIS

Se han escrito unos bloques funcionales que generan un mensaje con la información dinámica y estática enviada por el AIS:

#### **FUNCTION\_BLOCK FB\_WritesD1**

(\* Simulate AIS output of dynamic data, for checking AIS treatment POU's

Each time this FB is executed it generates the encapsulated information (ITU-R M.1371.5) for a ship \*)

```

VAR_INPUT
    IN_udiShip: UDINT;
END_VAR
VAR_IN_OUT
    IN_OUT_DataShip: Simula_Mov_Data;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_aMSG: Array_MSG;
END_VAR

```

---

#### **FUNCTION\_BLOCK FB\_WritesS1**

(\* Simulate AIS output of static data, for checking AIS treatment POU's

Each time this FB is executed it generates the encapsulated information (ITU-R M.1371.5) for a ship \*)

```

VAR_INPUT
    IN_udiShip: UDINT;
    IN_sName: STRING(20);
END_VAR

VAR_OUTPUT
    OUT_aMSG: Array_MSG;
END_VAR

```

---

### 7.9.3 Presentación en pantalla

A partir de las posiciones almacenadas en el array que contiene la información de los buques y de las coordenadas de un punto inicial, genera un array con las posiciones en pantalla de los buques simulados.

#### **FUNCTION\_BLOCK FB\_Print**

(\* generates (X,Y) positions for the active ships. Screen visualization will use OUT\_aXY data to print the simulated ships \*)

```

VAR_INPUT
    IN_xInit: BOOL;
    IN_iNumS: INT;
    IN_iGLatP1M: INT;
    IN_iMLatP1M: INT;
    IN_jSLatP1M: INT;
    IN_cNSP1M: STRING[1];
    IN_jGLonP1M: INT;
    IN_iMLonP1M: INT;
    IN_jSLonP1M: INT;
    IN_cEWP1m: STRING[1];
END_VAR

```

---

```
VAR_IN_OUT
    IN_OUT_DataShips: Array_Simula_Mov; (* IN_OUT parameter because of its size. It could be IN
parameter, it's not modified in tthis FB *)
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT_aXY: Array_XY;
END_VAR
```

---

Se han desarrollado diversos programas de prueba de los módulos descritos: pruebas individuales de los módulos, prueba de la función FS\_DETECT (sin la introducción del diálogo entre buques), etc. Para la prueba global se utilizan dos programas, que se encargan fundamentalmente de lo siguiente:

- **PRG\_Simula.** Se encarga de las llamadas a los FBs de simulación del movimiento del buque propio, del envío de los mensajes con información dinámica y estática y de la visualización en pantalla de los buques (propio y blancos).
- **PRG\_TreatData.** Llama a los FBs de lectura y almacenamiento de datos recibidos via AIS, tratamiento de la información y diálogo entre buques.

En el siguiente capítulo se presenta una serie de pruebas del modelo desarrollado.

## 8 Pruebas del modelo

Se presentan en este capítulo diversos ejemplos ilustrativos de las funcionalidades del modelo y se discuten los resultados.

Como plataforma de desarrollo del software se ha utilizado en primer lugar CoDeSys v2.3, de la compañía 3S-Smart Software Solutions GmbH (CoDeSys, 2021), herramienta de programación de PLCs según la norma IEC 61131-3, que es independiente del hardware. CoDeSys puede ser descargado y utilizado de forma gratuita, sólo requiere que el usuario acepte un acuerdo de licencia. Tiene un modo de ejecución en Simulación. En este modo, el programa de control no se procesa en un PLC real, sino en el ordenador en el que está instalado CoDeSys. Se puede así probar la lógica del programa sin disponer de unos PLCs concretos, y permite evitar inicialmente las complicaciones derivadas de las configuraciones del hardware. El HMI, interfaz entre el operador y el sistema PE, también ha sido creado con CoDeSys.

También se ha realizado una implementación del modelo con la herramienta software PCWorX v6.30 de la Compañía Phoenix Contact (2021). Se trata de un entorno de programación IEC 61131 unificado para todos sus sistemas de control (incluido el modo de simulación), y que ha permitido chequear los programas en PLCs reales. En este caso, el HMI ha sido desarrollado con el editor WebVisit v6.21, software suministrado también por Phoenix Contact.

Se han desarrollado dos versiones del modelo: un modelo BÁSICO para el chequeo del cálculo de situaciones y reglas a aplicar, y un modelo COMPLETO, en el que se añaden los diálogos, acuerdos y secuencias de estados en la comunicación entre buques. En el primero se utiliza un solo PLC, para el buque propio, y se definen una serie de blancos. En el segundo se utilizan varios PLCs, uno por buque.

### 8.1 Chequeo del modelo BÁSICO

El programa permite visualizar y comprobar los datos que relacionan al buque propio con cada uno de los blancos, según los requisitos de la función de seguridad FS\_DETECT, especificados en el capítulo 6. Se ha utilizado un número máximo de 4 blancos, para no sobrecargar la visualización. Cada blanco se moverá con los valores de rumbo y velocidad que se fijen al inicio de la ejecución del programa. En el buque propio se pueden hacer cambios de estos valores, para efectuar maniobras. El programa realiza el cálculo y visualización del tipo de encuentro y de los mensajes que se transmitirían a cada blanco, en caso de prealerta, con las Reglas COLREGs a aplicar en las maniobras. También muestra los avisos al OONW sobre los valores para maniobrar en rumbo o en velocidad de modo que se consiga un CPA seguro respecto a los blancos con los que se está en prealerta.

Se detallan a continuación dos ejemplos de prueba. Entre ambos abarcan múltiples tipos de escenarios y situaciones.

#### 8.1.1 Ejemplo 1 - versión Básica

Se definen 3 buques: el propio (BLUE, MMSI=0) y 2 blancos (PINK, MMSI=1 y ORANGE, MMSI=2). La Figura 8.1 recoge los datos de partida. Se ha aumentado el tamaño de los buques para poder apreciar mejor los encuentros.

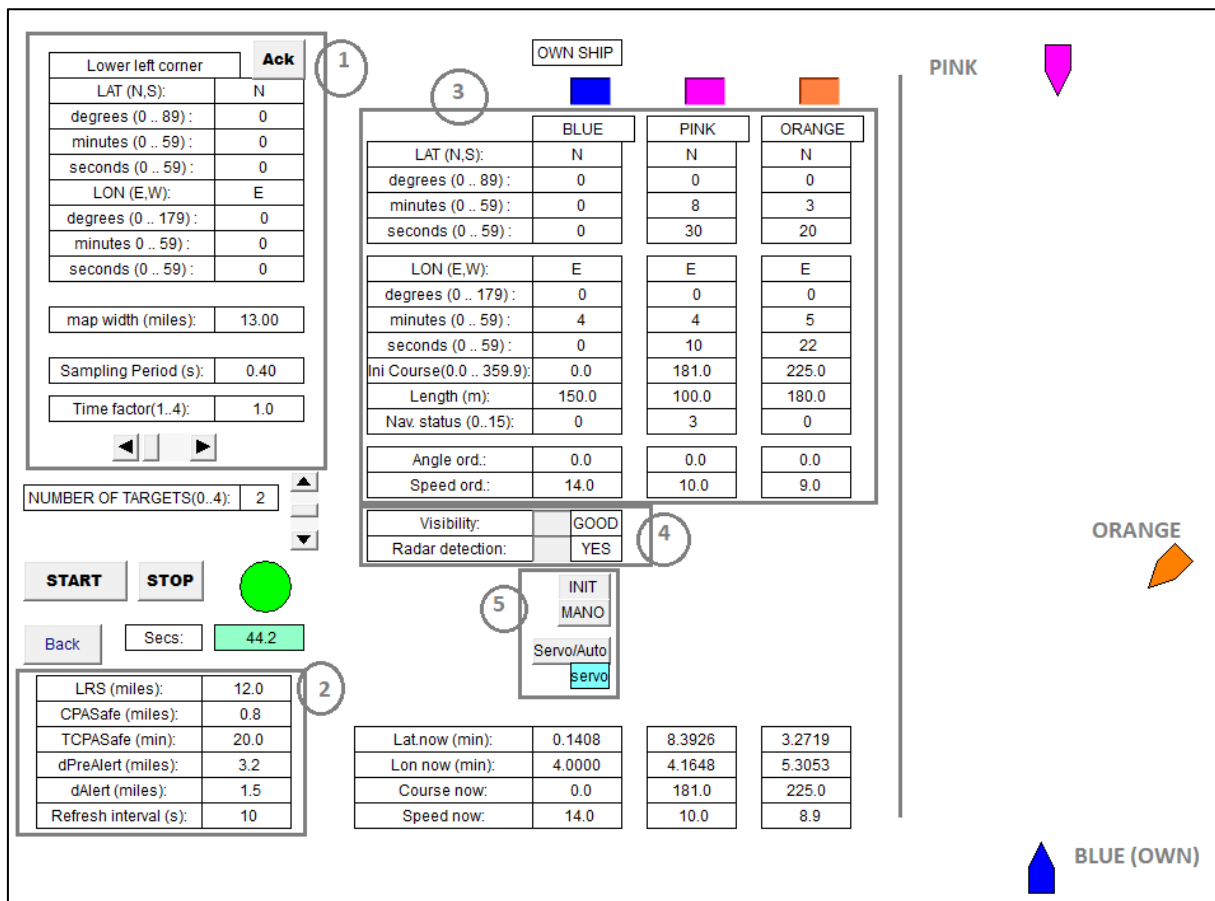


Figura 8.1. Ejemplo1-vB, datos iniciales

Datos de entrada:

1. Medidas para la visualización del movimiento, periodo de muestreo y escala de tiempo.
2. Parámetros para la activación de avisos e intervalo entre cálculos:
  - LRS (miles): *Long Range Scanning*. Radio del universo visible, distancia de comienzo de análisis del encuentro.
  - CPASafe (miles): mínimo CPA, límite entre distancia segura y aproximación excesiva (*close-quarters*).
  - TCPASafe (min): mínimo valor de TCPA (minutos), si  $CPA < CPASafe$ , para comenzar la maniobra.
  - dPrealert: distancia para iniciar las maniobras (incluyendo la distancia estimada a recorrer mientras se decide y fija la maniobra) si el buque propio es un buque que debe no impedir el paso del otro buque. Depende de las características de maniobrabilidad del buque.
  - dAlert (miles): distancia para iniciar las maniobras (incluyendo la distancia estimada a recorrer mientras se decide y fija la maniobra) si el buque propio es un buque cuyo paso no debe ser obstaculizado, en caso de que el otro buque no actúe, o su única actuación no sea suficiente para evitar el peligro de abordaje. dAlert dependerá de las características de maniobrabilidad del buque.
  - Refresh interval (s): tiempo (segundos) entre dos cálculos consecutivos de CPA y TCPA para cada blanco.

3. Datos de los buques: latitud, longitud, rumbo, eslora del barco, estado de navegación (ver Tabla 4.3), ángulo y velocidad ordenados.
4. Visibilidad (buena, reducida) y detección por RADAR (sí, no).
5. El operador puede maniobrar el buque propio variando el rumbo (*heading*) en modo servo (ángulo ordenado = ángulo de pala) o auto (ángulo ordenado = rumbo ordenado). En futuros prototipos, el valor ordenado podría ser enviado al sistema de control automático del movimiento del buque, para que se efectúe la maniobra sin intervención del operador.

En la parte inferior derecha se muestran los valores actuales de posición, rumbo y velocidad de cada buque.

La Figura 8.2 muestra en la parte superior los datos AIS que están siendo recibidos: MMSI, nombre del buque, latitud, longitud, rumbo verdadero, SOG, ROT y el estado de navegación. En la parte media, los valores calculados de las distancias, demoras, rumbos y velocidades relativos, CPAs y TCPAs para cada blanco. En la parte inferior, el tipo de encuentro calculado, según COLREGs. Estos cálculos se realizan con el intervalo fijado (Refresh interval).

El sistema informa al OONW de BLUE de que PINK tiene maniobrabilidad restringida (estado de navegación 3), y que están en situación de HEAD-ON. También, que BLUE está en CROSSING con ORANGE, que éste está a su estribor y que si no maniobran le va a cruzar la proa (O Pass Ahead T).

Aparecen también unos avisos indicando situación de Prealerta con respecto a los dos blancos. En ambos casos  $CPA < CPASafe$ . Se da la situación de Prealerta respecto a PINK porque, aunque la distancia sea mayor que la fijada de prealerta ( $Distance > dPrealert$ ), el tiempo para aproximación máxima es menor que el tiempo fijado seguro para maniobrar ( $TCPA < TCPASafe$ ). En la situación con ORANGE se dan ambas condiciones para la situación de prealerta: ( $Distance \leq dPrealert$ ) y ( $TCPA < TCPASafe$ ).

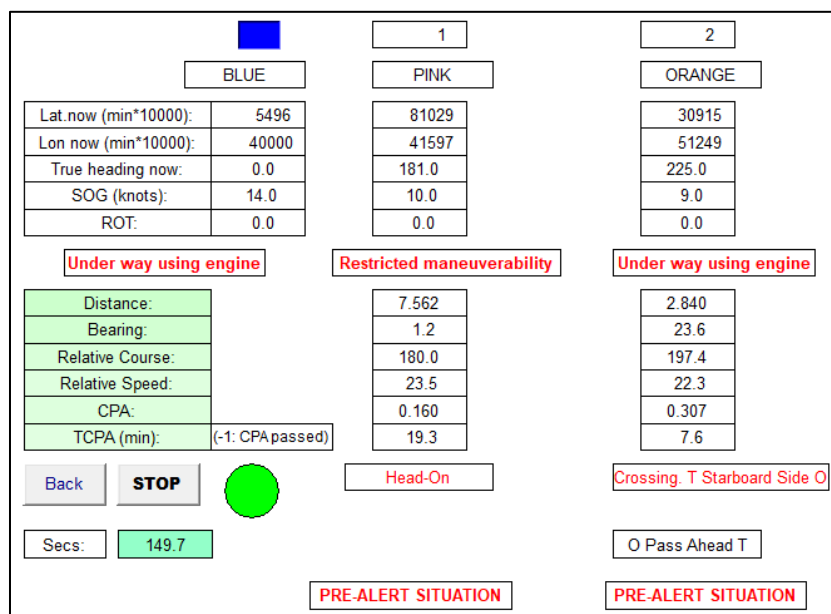


Figura 8.2. Ejemplo1-vB, datos recibidos y calculados

La Figura 8.3 incluye la información equivalente, pero en un escenario de visibilidad reducida. El sistema informa de que *Target* (T) está *forward on the starboard side of Own* (O, BLUE) y *O forward T* (T FWD ON STB O. O FWD T). La misma situación para ambos targets (PINK, ORANGE).

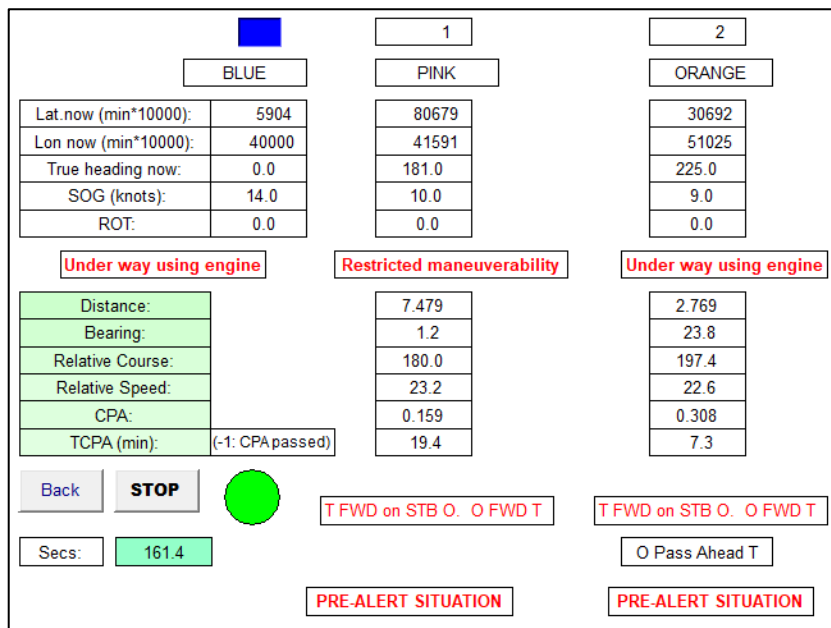


Figura 8.3. Ejemplo1-vB, datos recibidos y calculados, con visibilidad reducida

Los mensajes de aviso que BLUE enviaría a PINK y a ORANGE en caso de buques a la vista, junto con la información para el OONW de BLUE respecto a las posibles maniobras para que  $CPA \geq CPASafe$  aparecen en la Figura 8.4, parte izquierda. En la derecha, los valores calculados para las maniobras (ver apartados 6.5 y 7.3). En el encuentro entre BLUE y PINK, situación de vuelta encontrada (Head-On), PINK tiene maniobrabilidad restringida, por lo que debe maniobrar BLUE. El mensaje indica que BLUE, sin prioridad, debe apartarse de la derrota de PINK (BLUE shall keep out of the way of PINK), como se comentó en el apartado 6.3. En caso de que no hubiera diferencia de prioridad, indicaría que ambos deben maniobrar a estribor.

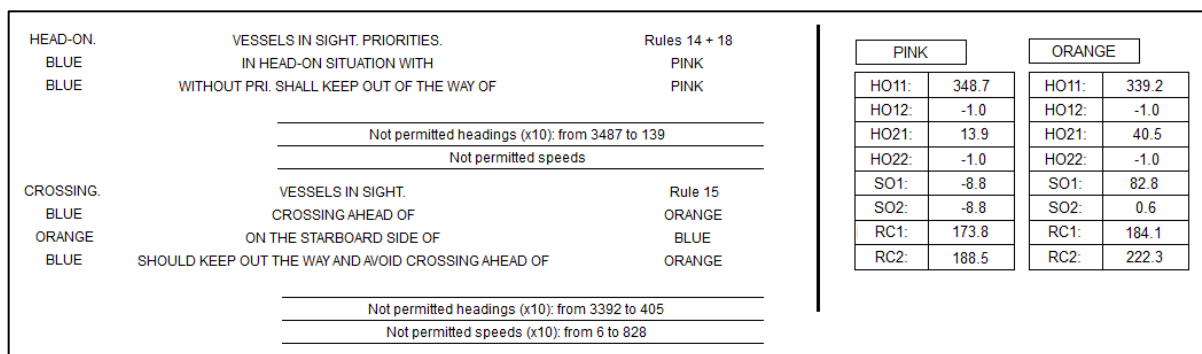


Figura 8.4. Ejemplo1-vB, visualización de mensajes y ayudas a la maniobra, buques a la vista

Con esta información, el OONW de BLUE observa que, para salir de prealerta respecto a PINK, el rumbo ordenado no puede estar entre  $348.7^\circ$  y  $013.9^\circ$ . Y para salir de prealerta respecto a ORANGE, el rumbo ordenado no puede estar entre  $339.2^\circ$  y  $040.5^\circ$ . El rango real de rumbos no permitidos puede diferir ligeramente del estimado, y dependerá de la dinámica del buque. Los cambios en velocidad sin alterar el rumbo no permiten a BLUE salir de prealerta respecto a los blancos.

En la Figura 8.2 se muestran los valores de latitud y longitud en minutos divididos por 10000. En la Figura 8.4, rumbo y velocidad mutiplicados por 10, sin decimales. Se utilizan estos formatos para poder comunicar estos valores como números enteros, de manera similar a la transmisión de datos en los mensajes dinámicos del AIS, que ocupan menor número de bits que los números reales. Para la visualización definitiva en el HMI se puede modificar esta representación.

Se ha creado un programa en MatLab (MatLab, 2021) que se comunica con el PLC de BLUE (buque propio) como cliente OPC y muestra en tiempo real un gráfico en coordenadas polares similar al de la Figura 8.5.

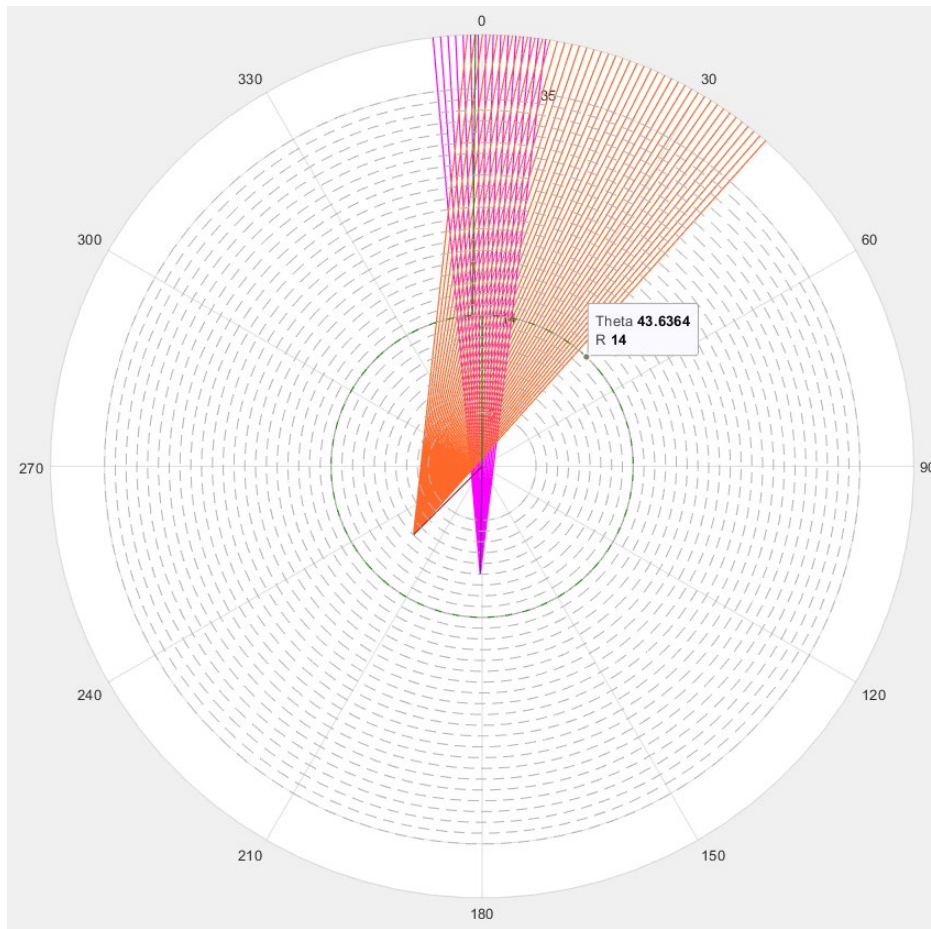


Figura 8.5. Gráfico polar con la VO área para los vectores de velocidad del buque propio

Las áreas sombreadas, *Velocity Obstacle (VO)* áreas, corresponden a los valores del vector de velocidad ( $S_o, H_o$ ) para los que  $CPA < CPASafe$ , suponiendo que los blancos son buques con preferencia de paso. El OONW de BLUE puede mover el cursor sobre el gráfico, para seleccionar los valores del radio R (velocidad  $S_o$ ) y ángulo Theta (rumbo  $H_o$ ) fuera de las áreas sombreadas para una maniobra segura.

La Figura 8.6 muestra los mensajes de aviso, en caso de visibilidad reducida, tomados un instante después.

	VESSELS IN RESTRICTED VISIB. RADAR DET.	Rules 19+18
PINK	IS FORWARD OF THE BEAM OF	BLUE
BLUE	IS FORWARD OF THE BEAM OF	PINK
BLUE	WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF	PINK
<hr/> Not permitted headings (x10): from 3486 to 141 <hr/> Not permitted speeds <hr/>		
	VESSELS IN RESTRICTED VISIB. RADAR DET.	Rule 19
ORANGE	IS FORWARD OF THE BEAM OF	BLUE
BLUE	IS FORWARD OF THE BEAM OF	ORANGE
	BOTH SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO PORT	
<hr/> Not permitted headings (x10): from 3381 to 426 <hr/> Not permitted speeds (x10): from 3 to 1012 <hr/>		

Figura 8.6. Ejemplo1-vB, visualización de mensajes y ayudas a la maniobra, visibilidad reducida



Si el OONW de BLUE maniobra fijando un rumbo de 45°, el parámetro ROT transmitido irá ajustándose hasta que el *heading* llegue a ese valor. En la pantalla aparecerá el aviso de que BLUE está virando a estribor (*O Manoeuvring STB*), según ilustra la Figura 8.7. Las situaciones van cambiando respecto a las de la Figura 8.2.

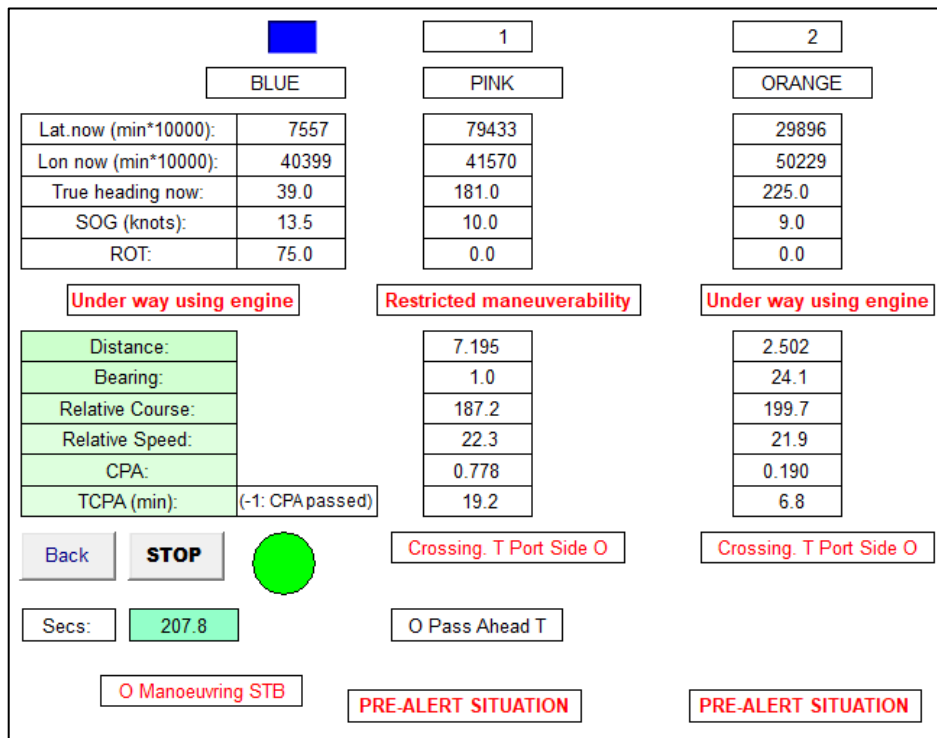


Figura 8.7. Ejemplo1-vB, BLUE maniobrando

Los avisos de prealerta desaparecerán cuando  $CPA \geq CPASafe$  (Figura 8.8). A partir de aquí, una vez pasado el TCPA respecto a ORANGE, el OONW de BLUE podría maniobrar a babor para recuperar su trayectoria original.

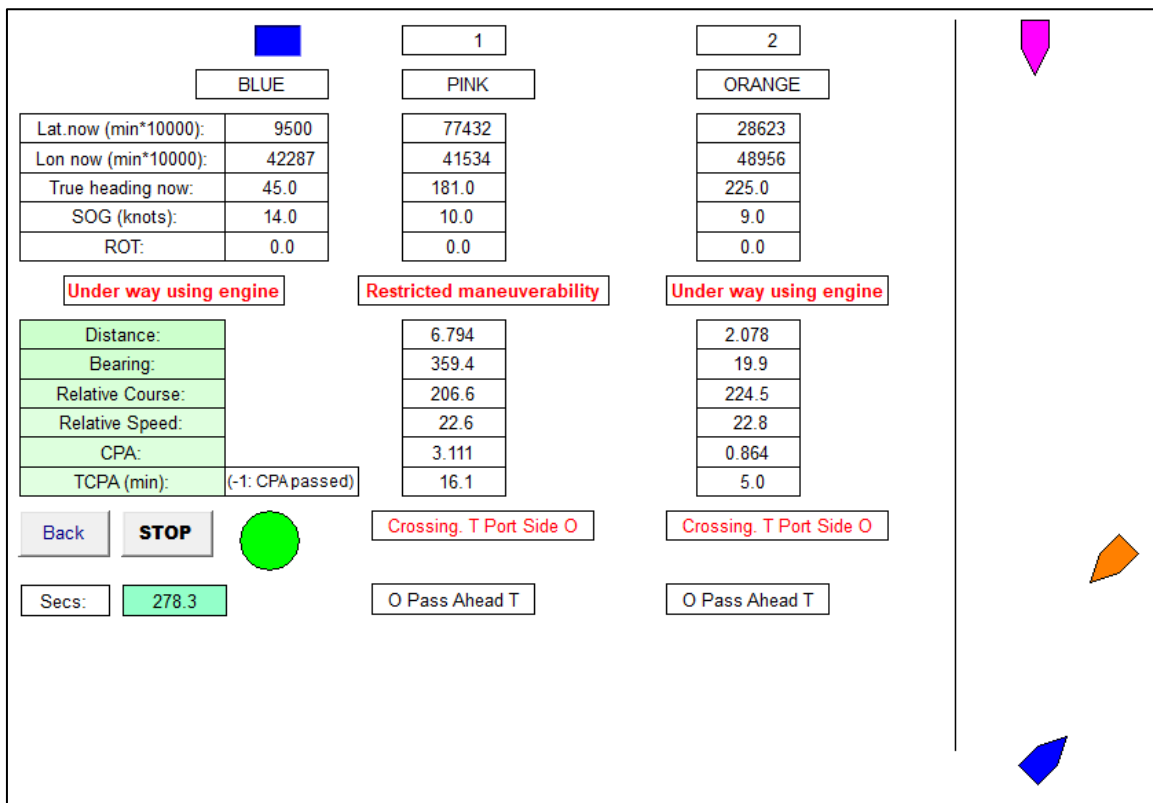
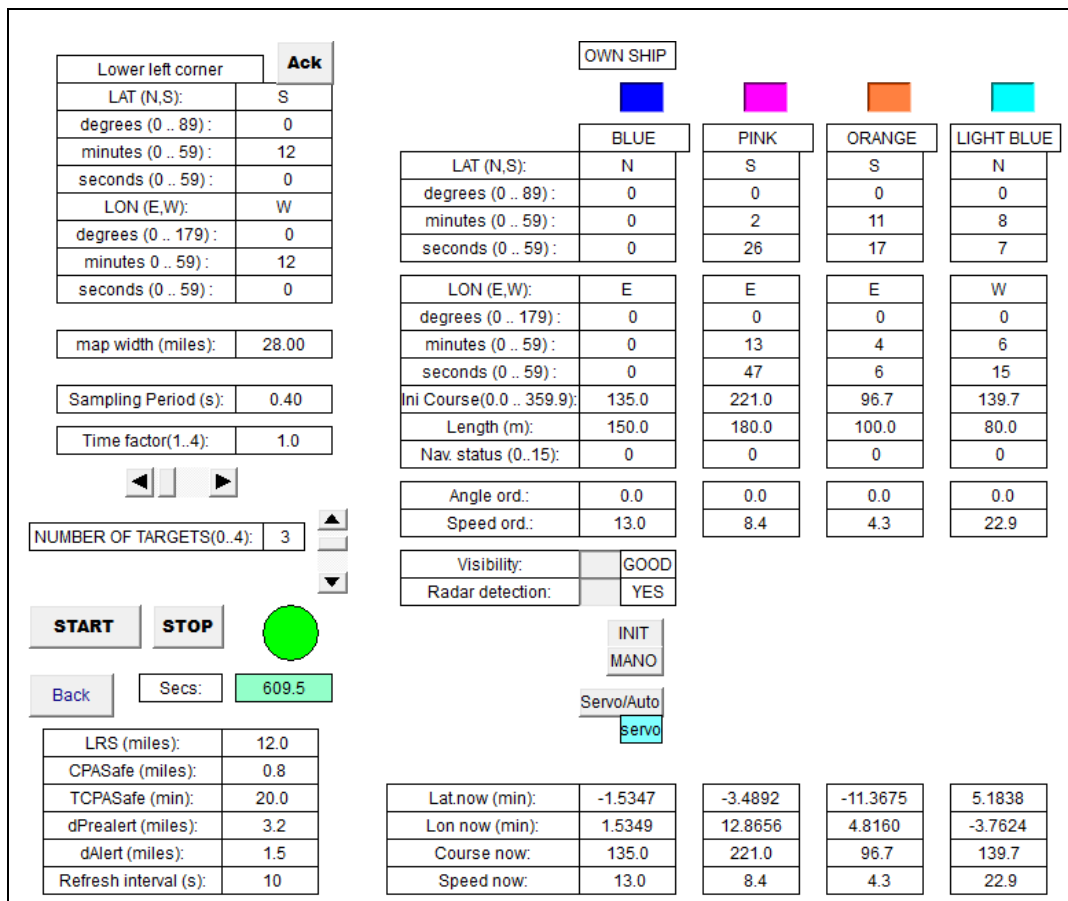


Figura 8.8. Ejemplo1-vB, ya sin prealerta

### 8.1.2 Ejemplo 2 - versión Básica

Se definen 4 buques, el propio y 3 blancos, con los datos de partida que aparecen en la Figura 8.9.



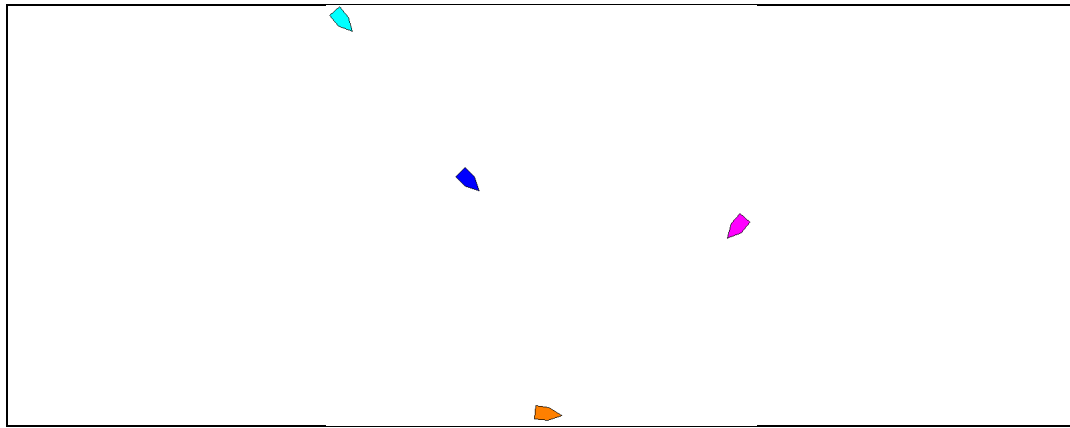


Figura 8.9. Ejemplo2-vB, datos iniciales

El sistema sólo considera los datos AIS recibidos y los valores calculados para los blancos que están dentro del “universo visible”, en este caso de radio 12 millas. Al principio, sólo ORANGE y LIGHT BLUE (ver Figura 8.10).

	3	2	
	BLUE	LIGHT BLUE	ORANGE
Lat. now (min*10000):	-4279	72802	-113069
Lon now (min*10000):	4279	-55407	43007
True heading now:	135.0	140.0	97.0
SOG (knots):	13.0	22.9	4.3
ROT:	0.0	0.0	0.0
	Under way using engine	Under way using engine	Under way using engine
Distance:	9.769	11.555	
Bearing:	322.3	160.4	
Relative Course:	145.7	330.5	
Relative Speed:	10.1	10.0	
CPA:	0.594	1.992	
TCPA (min):	58.2	68.0	
	O Being Overtaken by T	O Overtaking T	
Back	STOP		
Secs:	127.0		

Figura 8.10. Ejemplo2-vB, datos recibidos y calculados, t1

Posteriormente aparece PINK (Figura 8.11).

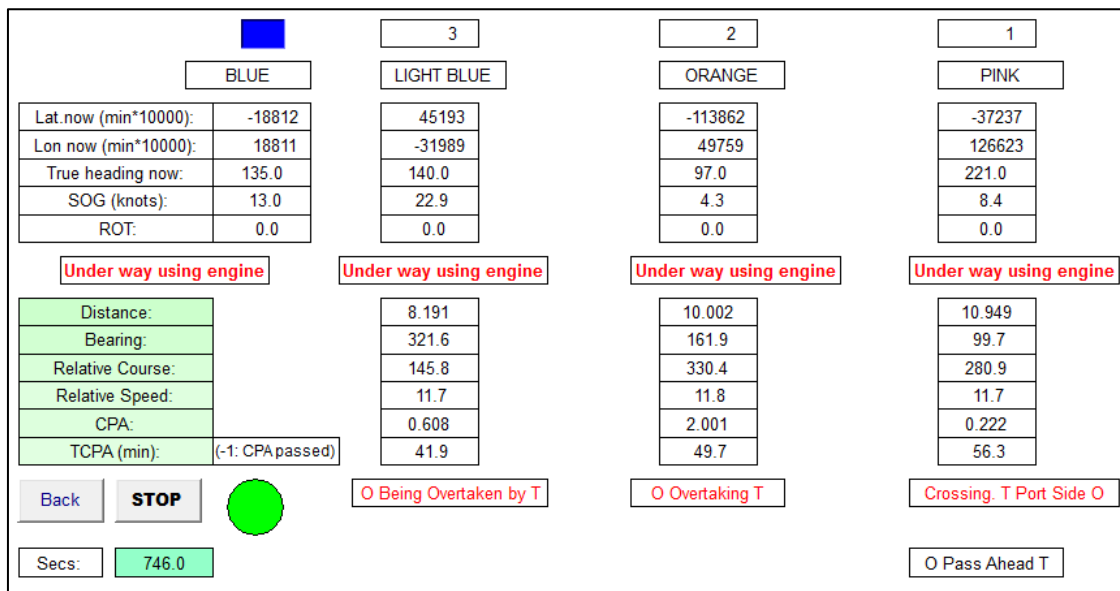


Figura 8.11. Ejemplo2-vB, datos recibidos y calculados, t2

Luego, la situación con ORANGE pasa de ser posible OVERTAKING (demasiado lejos para conceptuarlo como situación peligrosa) a ser CROSSING. Con esa distancia no se activa la prealerta, por lo que no sería de aplicación la Regla 13.d de COLREGS: “Ninguna variación posterior de la marcación entre los dos buques hará del buque que alcanza un buque que cruza, en el sentido que se da en este Reglamento, ni le dispensará de su obligación de mantenerse apartado del buque alcanzado, hasta que lo haya adelantado completamente y se encuentre en franquía”.

En la Figura 8.12 aparece la primera situación de prealerta: TCPA < TCPASafe respecto a LIGHT BLUE.

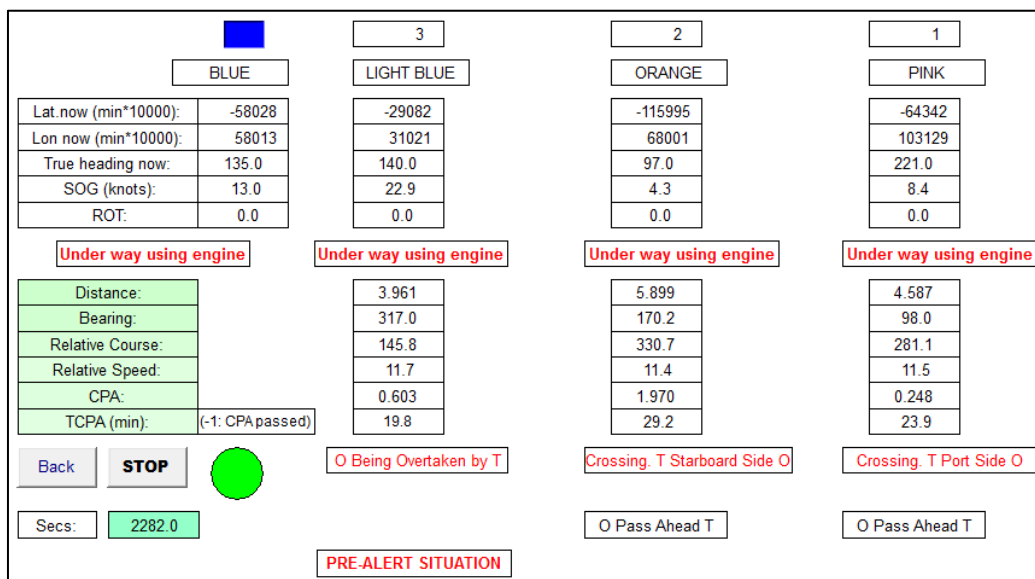


Figura 8.12. Ejemplo2-vB, con situación de prealerta, t3

La información de la Figura 8.13 presenta las dos situaciones de prealerta detectadas por BLUE, respecto a LIGHT BLUE y a PINK, en cumplimiento de las condiciones fijadas. En la parte superior, la información dada para buques a la vista. En la parte inferior, con visibilidad reducida.

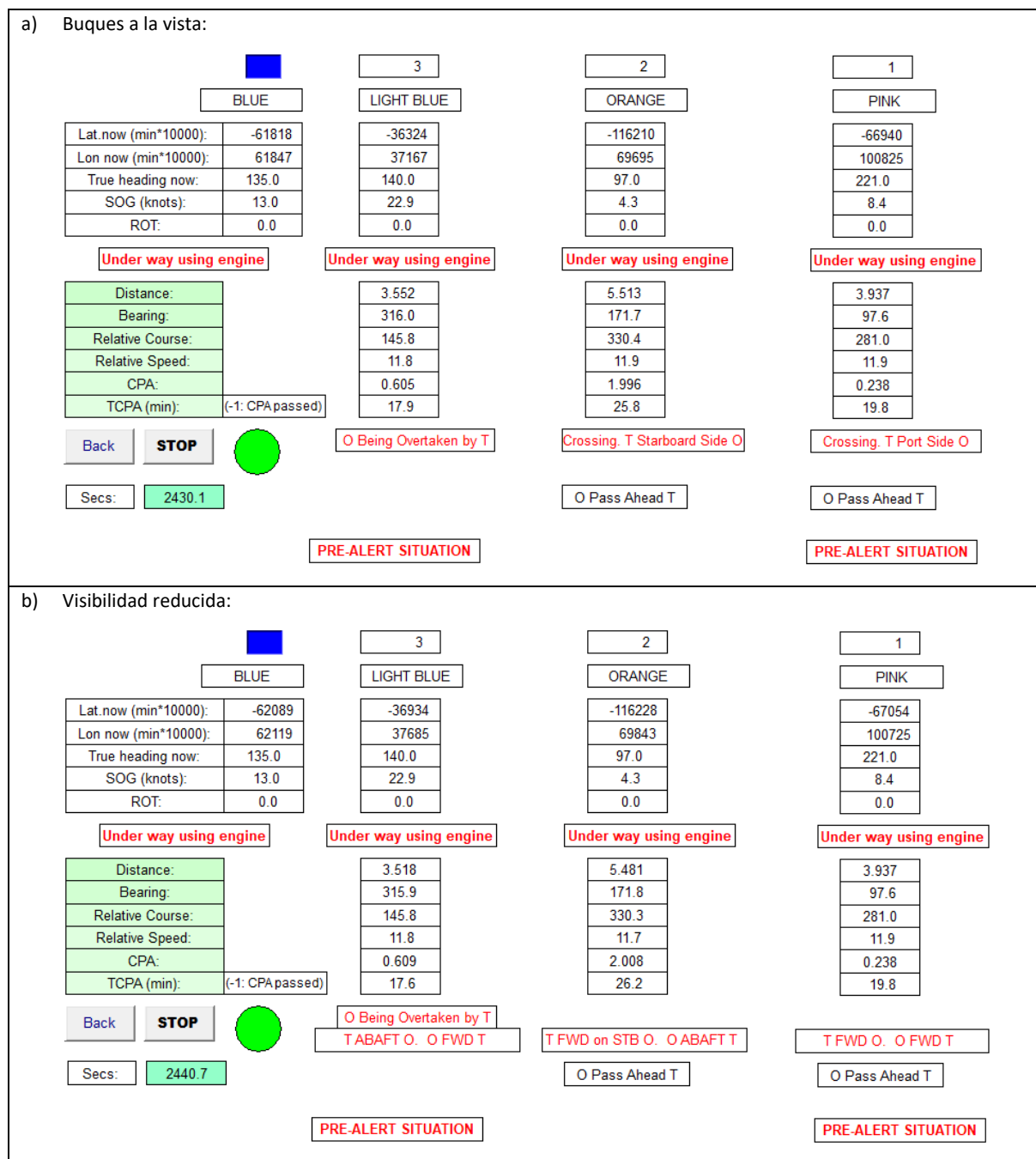


Figura 8.13. Ejemplo2-vB, con dos situaciones de prealerta, t4

Los mensajes a transmitir y la información para el OONW de BLUE respecto a las posibles maniobras para que  $CPA \geq CPASafe$  son los que aparecen en la Figura 8.14. En la parte superior, para buques a la vista. En la inferior, para visibilidad reducida.

La situación de LIGHT BLUE respecto a BLUE es de Overtaking con visibilidad reducida y detección por RADAR, y COLREGs no define cuál debe ser el comportamiento de los buques en este caso.

Como se ve en la figura, este sistema PE propone que LIGHT BLUE vire a babor y BLUE a estribor. Esta propuesta se analizará en el apartado 8.3.

<b>a) Buques a la vista:</b>		
OVERTAKING.	VESSELS IN SIGHT.	Rule 13
LIGHT BLUE	OVERTAKING	BLUE
LIGHT BLUE	SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF	BLUE
<hr/> Not permitted headings (x10): from 2712 to 3451 and from 1330 to 1542 <hr/> Limit for speed (x10): 148 <hr/>		
CROSSING.	VESSELS IN SIGHT.	Rule 15
BLUE	CROSSING AHEAD OF	PINK
PINK	ON THE PORT SIDE OF	BLUE
PINK	SHOULD KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF	BLUE
<hr/> Not permitted headings (x10): from 1129 to 1462 <hr/> Not permitted speeds (x10): from 78 to 180 <hr/>		
<b>b) Visibilidad reducida:</b>		
OVERTAKING.	VESSELS IN RESTRICTED VISIB. RADAR DET.	Rule 19
LIGHT BLUE	OVERTAKING	BLUE
LIGHT BLUE	ON THE PORT SIDE OF	BLUE
LIGHT BLUE	SHALL CHANGE COURSE TO PORT SIDE	
BLUE	SHALL CHANGE COURSE TO STARBOARD SIDE	
<hr/> Not permitted headings (x10): from 2705 to 3452 and from 1330 to 1545 <hr/> Limit for speed (x10): 148 <hr/>		
PINK	VESSELS IN RESTRICTED VISIB. RADAR DET.	Rule 19
BLUE	IS FORWARD OF THE BEAM OF	BLUE
	IS FORWARD OF THE BEAM OF	PINK
	BOTH SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO PORT	
<hr/> Not permitted headings (x10): from 1126 to 1463 <hr/> Not permitted speeds (x10): from 78 to 181 <hr/>		

Figura 8.14. Ejemplo2-vB, visualización de los mensajes a enviar y valores para maniobras

La Figura 8.15 muestra en tiempo real un gráfico en coordenadas polares con la información respecto a las maniobras dada en la Figura 8.14, y donde el operador puede seleccionar nuevos valores de rumbo o velocidad para una maniobra segura.

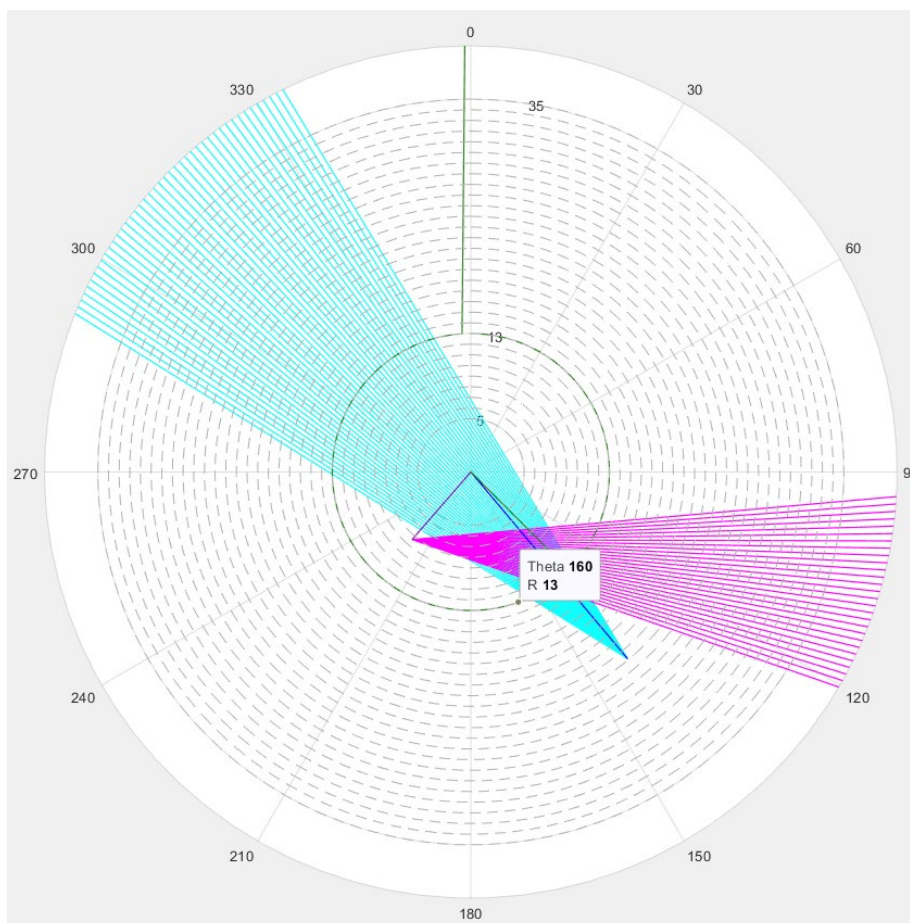


Figura 8.15. Gráfico polar con la VO área para BLUE respecto a PINK y LIGHT BLUE

## 8.2 Chequeo del modelo COMPLETO

En este apartado se describen las pruebas realizadas al modelo completo, fundamentalmente las correspondientes a las comunicaciones y los acuerdos entre cada pareja de buques.

En los siguientes subapartados se presenta la arquitectura del modelo y tres ejemplos de prueba. Los dos primeros ejemplos se corresponden con los descritos para el modelo BÁSICO, pero con la perspectiva de cada uno de los OONWs de los distintos buques. Permiten analizar el comportamiento del modelo en las distintas situaciones recogidas en el COLREGs.

El tercer ejemplo ilustra una situación que puede ocasionar interpretaciones discordantes por los OONWs de los buques implicados, y la ayuda que el uso del modelo proporcionaría para la reducción del riesgo de colisión.

### 8.2.1 Características de la arquitectura

En este modelo, fase previa del prototipo final, se utiliza un PLC por buque. En cada PLC se lanza una copia del programa, con los datos de su buque.

Las comunicaciones de los mensajes AIS entre los buques se han simulado mediante comunicaciones OPC. Se trata de una simulación simple, pero suficiente para hacer las pruebas sin disponer de equipos AIS reales. Una explicación resumida de la programación de esta simulación es la siguiente:

- Todos los valores a transmitir se transforman en cadenas de bits según el estándar aprobado por la UIT y detallado en el capítulo 5. Cada mensaje ocupará un array de 32 bytes.

- En cada PLC se reserva una zona de memoria con capacidad para almacenar 1 mensaje de cada tipo por cada uno de los buques simulados, el buque propio y hasta 3 blancos.
- Cuando un buque A envía un mensaje direccionado a un buque B, el PLC de A escribe el mensaje codificado en la zona de su memoria que tiene reservada para el blanco B. Si A difunde un mensaje con su información dinámica, escribe el mensaje codificado en las zonas reservadas para todos los blancos.
- Cada PLC actúa como servidor OPC, para compartir la zona de memoria que tiene reservada para los mensajes. Una aplicación que actúa como cliente OPC se encarga de leer la cadena con el mensaje del PLC origen y escribirla en el PLC destino. Se ha utilizado MatLab con su funcionalidad como cliente OPC para programar la aplicación que lee y escribe los mensajes en los PLCs.
- Se han utilizado las versiones del modelo implementadas para CoDeSys y para PCWorX. Ambas plataformas vienen acompañadas de aplicaciones de servidor de OPC. Para cada una se ha particularizado el cliente OPC de MatLab.

La Figura 8.16 muestra la arquitectura del modelo para PCWorX realizada con PLCs ILC1xx de Phoenix Contact, para 3 buques.

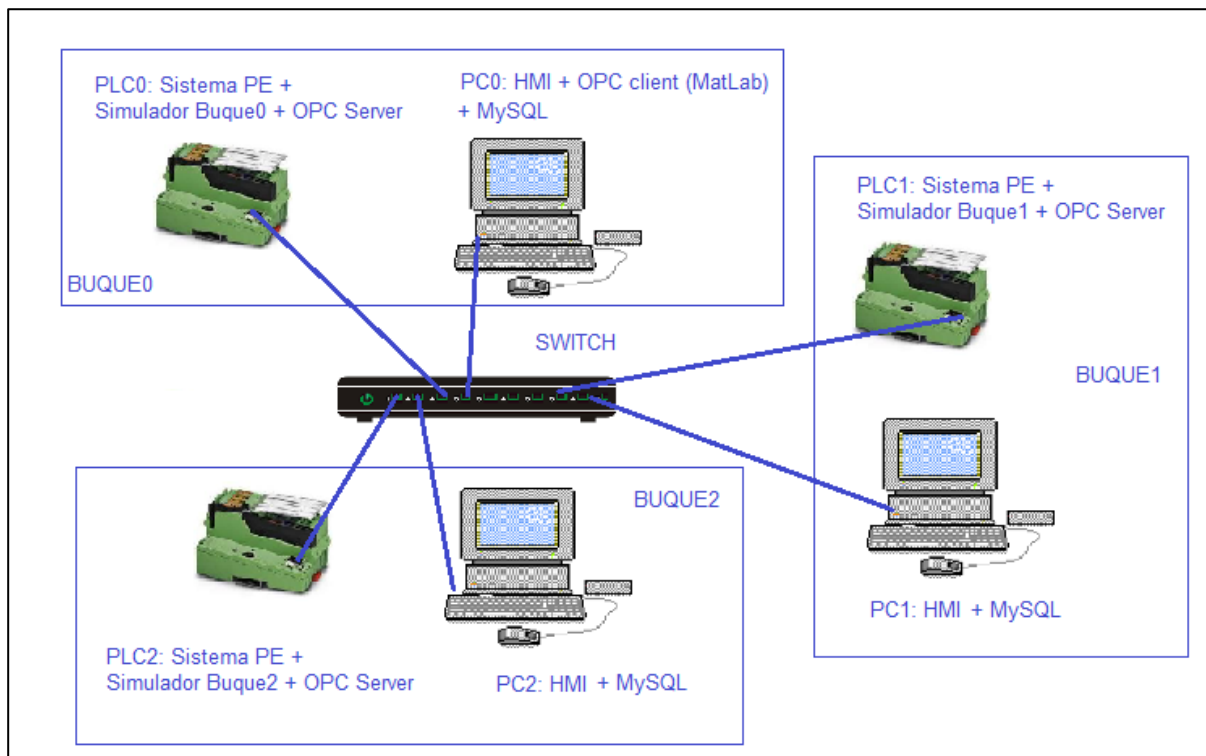


Figura 8.16. Arquitectura de prueba del modelo para 3 buques

En el modelo se simulan y utilizan 4 tipos de mensajes AIS:

- Mensaje tipo 1, con información dinámica. En el capítulo 5 se describen detalladamente los formatos de los mensajes. En la simulación se incluyen valores para los siguientes parámetros: número de mensaje (1), número de identificación del buque (MMSI), latitud, longitud, rumbo verdadero, velocidad sobre el fondo (SOG), segundos UTC, estado de navegación y velocidad de giro (ROTAIS). Cada buque difunde el mensaje 1 con un periodo predefinido, por defecto 1 segundo.



- Mensaje tipo 5, con datos estáticos. En la simulación se incluyen los valores de: número de mensaje (5), MMSI y nombre del buque. Cada buque difunde un mensaje tipo 5 con un periodo 6 veces mayor que el de difusión del mensaje tipo 1.
- Mensaje tipo 6, mensaje binario direccionado, con el formato definido en el apartado 0. Es la base para el diálogo que se establece entre dos buques. La definición de los valores que se transmiten y la creación del protocolo es una de las partes fundamentales en este trabajo.
- Mensaje tipo 7, direccionado, de acuse de recibo del mensaje binario. La secuencia de envíos de los mensajes 6 y 7 para la comunicación entre 2 buques procede según se detalló en el apartado 6.2. En la simulación se incluye el número del mensaje (7) y los MMSI de los dos buques implicados en la comunicación.

### 8.2.2 Ejemplo1 - versión Completa

Se ejecutan 3 implementaciones del modelo y se definen 3 buques (1 en cada PLC) con los datos iniciales de la Figura 8.17. Las posiciones de los buques coinciden con las utilizadas en el apartado 8.1.1, Figura 8.1.

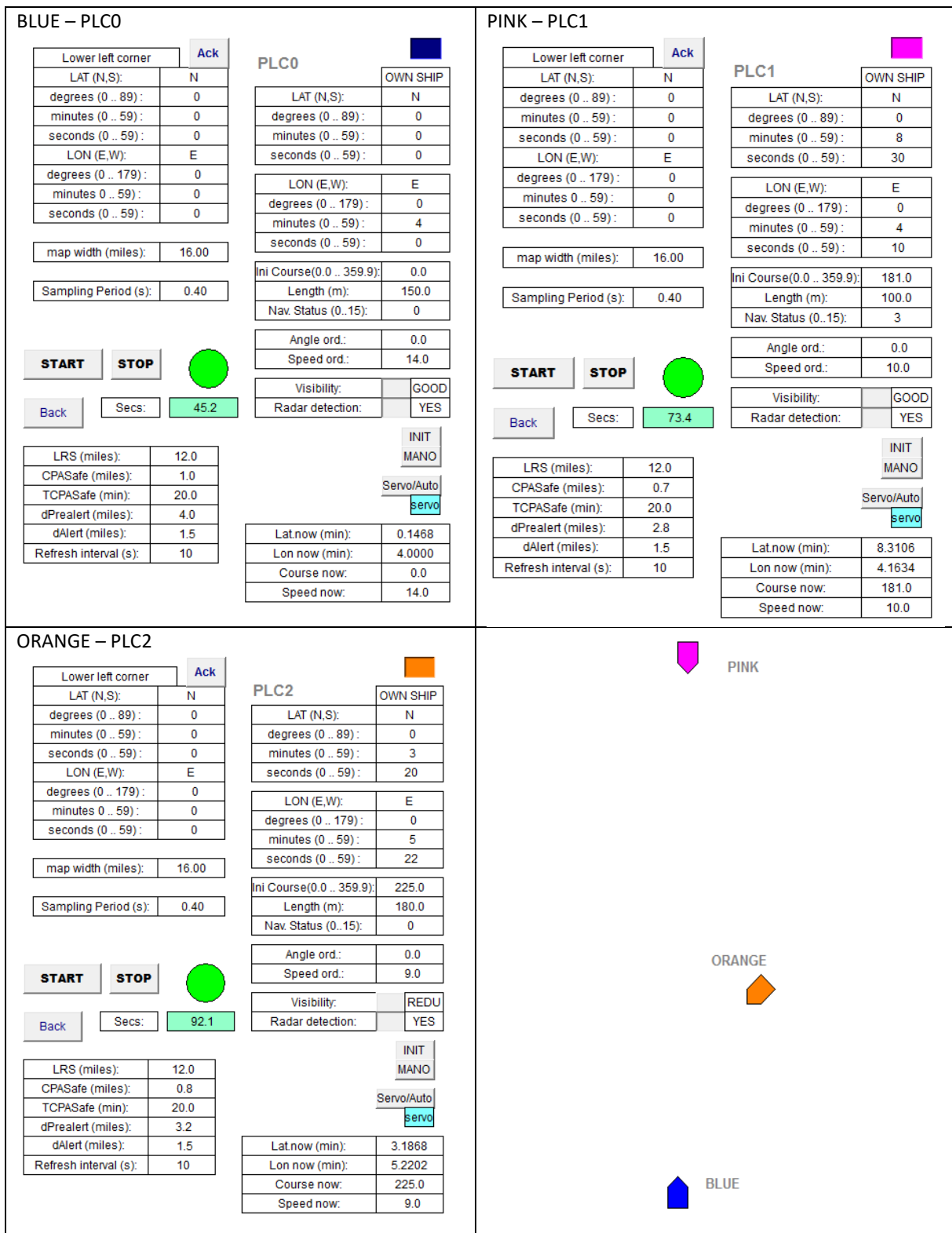


Figura 8.17. Ejemplo1-vC, datos iniciales

Las distancias de prealerta definidas son: 4 millas para BLUE, 2.8 millas para PINK y 3.2 millas para ORANGE. TCPASafe = 20 minutos para los tres. El OONW de ORANGE selecciona visibilidad reducida, detección por RADAR. Los OONWs de BLUE y de PINK, buques a la vista. PINK tiene maniobra restringida (Nav. Status = 3).

La Figura 8.18 muestra los datos recibidos y los calculados por cada PLC tras un tiempo de ejecución, y la posición de los buques. Se comprueba la coherencia de los datos dinámicos y de las situaciones deducidas.

OWN-PLC0	PLC1	PLC2
BLUE	PINK	ORANGE
Lat.now (min*10000): 4038	82239	31768
Lon now (min*10000): 40000	41619	52101
True heading now: 0.0	181.0	225.0
SOG now (knots): 14.0	10.0	9.0
ROT now: 0.0	0.0	0.0
<b>Under way using engine</b>	<b>Restricted maneuverability</b>	<b>Under way using engine</b>
Distance:	7.872	3.033
Bearing:	1.2	23.5
Relative Course:	180.0	197.4
Relative Speed:	24.0	21.3
CPA:	0.162	0.326
TCPA (min): (-1: passed)	19.7	8.5
Back <b>STOP</b>	Head-On	Crossing. T on Starbd Side O
Secs: 112.1		O Pass Ahead T
	<b>PRE-ALERT SITUATION</b>	<b>PRE-ALERT SITUATION</b>

OWN-PLC1	PLC0	PLC2
PINK	BLUE	ORANGE
Lat.now (min*10000): 81755	4748	31431
Lon now (min*10000): 41610	40000	51764
True heading now: 181.0	0.0	225.0
SOG now (knots): 10.0	14.0	9.0
ROT now: 0.0	0.0	0.0
<b>Restricted maneuverability</b>	<b>Under way using engine</b>	<b>Under way using engine</b>
Distance:	7.707	5.147
Bearing:	181.2	168.4
Relative Course:	0.0	300.8
Relative Speed:	24.0	7.2
CPA:	0.161	3.805
TCPA (min): (-1: passed)	19.3	29.0
Back <b>STOP</b>	Head-On	O Overtaking T
Secs: 123.0		
	<b>PRE-ALERT SITUATION</b>	

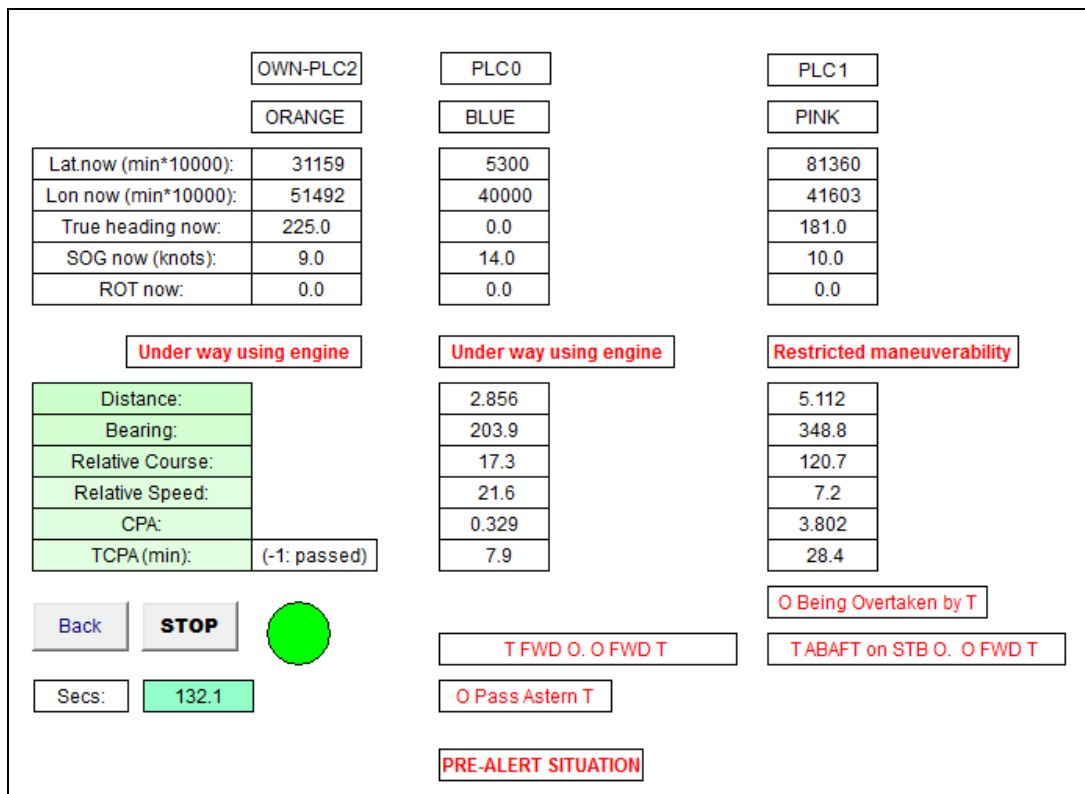


Figura 8.18. Ejemplo1-vC, datos recibidos y calculados por cada PLC (0,1,2)

El PLC de BLUE detecta situación de prealerta con PINK (Head-On) y con ORANGE (Crossing, ORANGE on the starboard of BLUE).

A su vez, los PLCs de PINK y de ORANGE detectan la prealerta con BLUE. El PLC de PINK coincide con el de BLUE en la situación detectada.

El PLC de ORANGE no coincide porque tiene seleccionado un escenario distinto, de visibilidad reducida.

La información que visualiza el OONW de BLUE una vez detectadas las prealertas aparece en la Figura 8.19. Incluye la información sobre la situación y la Regla COLREGs a aplicar, y se acompaña de los valores para las maniobras en rumbo o velocidad. Estos valores no se incluyen en los mensajes que se enviará a los otros buques.

HEAD-ON.	VESSELS IN SIGHT. PRIORITIES.	Rules 14 + 18
BLUE	IN HEAD-ON SITUATION WITH	PINK
BLUE	WITHOUT PRI. SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF	PINK
	Not permitted headings (x10): from 3485 to 142	
	Not permitted speeds	
CROSSING.	VESSELS IN SIGHT.	Rule 15
BLUE	CROSSING AHEAD OF	ORANGE
ORANGE	ON THE STARBOARD SIDE OF	BLUE
BLUE	SHOULD KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF	ORANGE
	Not permitted headings (x10): from 3381 to 427	
	Not permitted speeds (x10): from 3 to 1014	

Figura 8.19. Ejemplo1-vC, visualización de mensajes y ayudas a la maniobra, para SHIPBLUE

A partir de aquí se sucede el intercambio de mensajes entre los PLCs para acuerdos entre los OOWNs. Si el operador de BLUE está de acuerdo con ambas maniobras, el PLC0 inicia las etapas de comunicación descritas en el apartado 6.4.2 (Figura 6.9) con cada uno de los blancos. La Figura 8.20 resume los mensajes intercambiados.

PLC1 chequea la información recibida, comprueba que concuerda con la suya y muestra a su operador el mensaje de la fila 1. PLC0 recibe de PLC1 el OK y muestra a su operador el mensaje de la fila 2.

El mismo proceso se sigue con PLC2. Pero en este caso PLC2 comprueba que la información recibida no concuerda con la suya (diferente escenario). Muestra a su operador el mensaje de la fila 3, envía a PLC0 un NO OK y éste muestra a su operador el mensaje de la fila 4.

1	RECEIVED SITUATION: HEAD-ON. BLUE BLUE	VESSELS IN SIGHT. PRIORITIES. IN HEAD-ON SITUATION WITH WITHOUT PRI. SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF	Rules 14 + 18 PINK PINK
2	BLUE	IS WAITING ANSWER FROM OPERATOR OF SHIP	PINK
3	ORANGE BUT PLCs Differ in the available info Distance: 2.34 TCPA: 6.5 Crossing starboard side	IN PREALERT SITUATION WITH Target info: Bearing: 24.9 HDG: 0.0 T FWD STBD O, O FWD T	BLUE CPA: 0.31 Vessels IN SIGHT PUSH OK BUTTON TO CONTINUE
4	BLUE BUT PLCs Differ in the available info. Distance: 2.35 TCPA: 6.5 Crossing port side	IN PREALERT SITUATION WITH Target info: Bearing: 204.9 HDG: 225.0 T FWD PSD O, O FWD T	ORANGE CPA: 0.31 Vessels NOT IN SIGHT WITH RADAR PUSH OK BUTTON TO CONTINUE
5	AGREEMENT OF MANOEUVRES WITH	PINK	WAITING EVOLUTION OF SHIPS
6	BLUE	IS OPERATING WITHOUT DIALOG WITH	ORANGE
7	AGREEMENT OF MANOEUVRES WITH	BLUE	WAITING EVOLUTION OF SHIPS
8	ORANGE	IS OPERATING WITHOUT DIALOG WITH	BLUE

Figura 8.20. Ejemplo1-vC, mensajes de los PLCs a los operadores

Si los operadores de PINK y de ORANGE están de acuerdo con la información recibida, el operador de BLUE visualizará los mensajes de las filas 5 y 6, el operador de PINK el mensaje de la fila 7 y el de ORANGE el de la fila 8.

El operador de BLUE maniobra 45° a estribor, para salir de la situación de prealerta respecto a los dos blancos. Mientras se está efectuando la maniobra, los operadores de los buques que tienen a BLUE dentro de su radio LRS son avisados de que BLUE está virando a estribor (Figura 8.21). Los PLCs de estos buques lo deducen de la detección de cambios apreciables en los últimos valores de ROT transmitidos en el mensaje dinámico enviado por el AIS de BLUE. Este valor de ROT (ver Tabla 5.1) varía entre -708 y 708 (126°/min a babor y estribor).

OWN-PLC1	PLC0	PLC2
PINK	BLUE	ORANGE
Lat.now (min*10000): 80944	5573	30893
Lon now (min*10000): 41596	40321	51227
True heading now: 181.0	36.0	225.0
SOG now (knots): 10.0	13.2	9.0
ROT now: 0.0	218.7	0.0
<b>Restricted maneuverability</b>	<b>Under way using engine</b>	<b>Under way using engine</b>
Distance:	7.588	5.109
Bearing:	181.1	169.0
Relative Course:	4.3	300.4
Relative Speed:	23.5	7.1
CPA:	0.421	3.832
TCPA (min): (-1: passed)	19.3	28.4
Back <b>STOP</b>	<b>Crossing. T on Starbd Side O</b>	<b>O Overtaking T</b>
Secs: 151.4	<b>O Pass Astern T</b>	
	<b>T Manoeuvring STB</b>	
	<b>PRE-ALERT SITUATION</b>	

OWN-PLC2	PLC0	PLC1
ORANGE	BLUE	PINK
Lat.now (min*10000): 30728	5830	80719
Lon now (min*10000): 51062	40535	41592
True heading now: 225.0	42.0	181.0
SOG now (knots): 9.0	13.7	10.0
ROT now: 0.0	12.9	0.0
<b>Under way using engine</b>	<b>Under way using engine</b>	<b>Restricted maneuverability</b>
Distance:	2.742	5.090
Bearing:	203.2	349.2
Relative Course:	25.4	120.4
Relative Speed:	21.2	7.2
CPA:	0.104	3.829
TCPA (min): (-1: passed)	7.8	27.8
Back <b>STOP</b>	<b>T FWD O. O FWD T</b>	<b>O Being Overtaken by T</b>
Secs: 156.8	<b>O Pass Ahead T</b>	<b>TABAFT on STB O. O FWD T</b>
	<b>T Manoeuvring STB</b>	
	<b>PRE-ALERT SITUATION</b>	

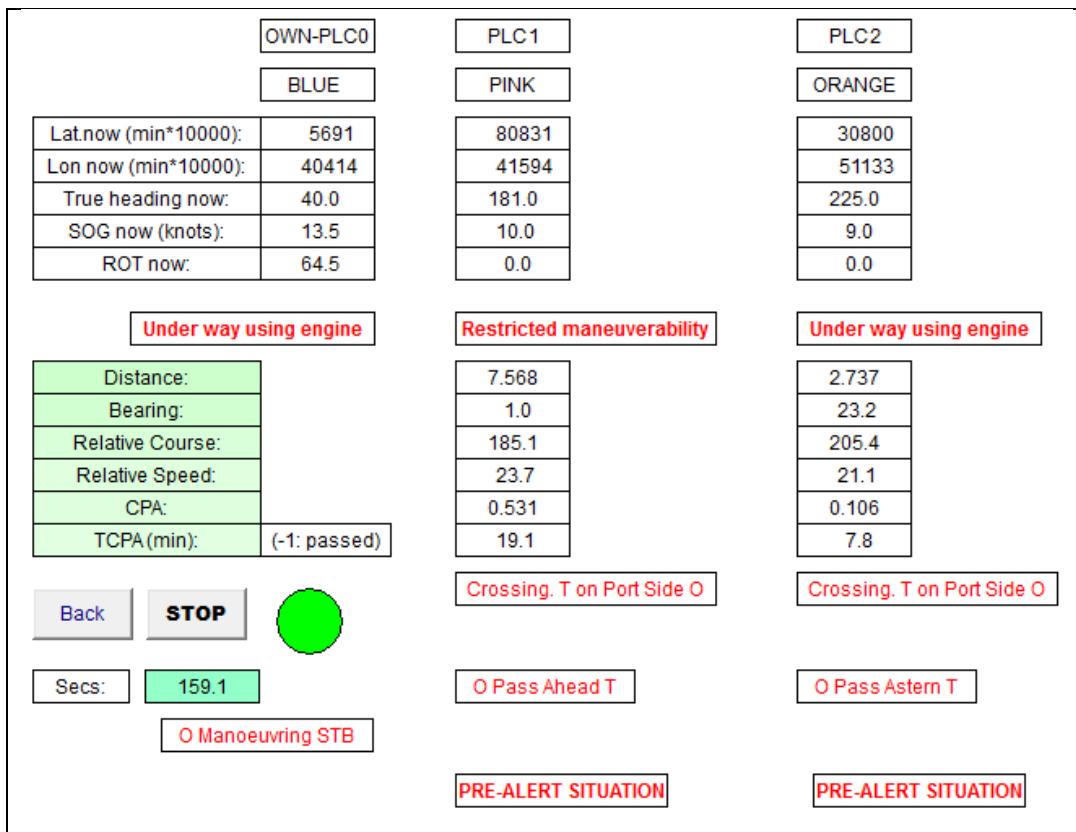


Figura 8.21. Ejemplo1-vC, visualizaciones en los 3 buques mientras BLUE está maniobrando

### 8.2.3 Ejemplo2 - versión Completa

Se ejecutan 4 implementaciones del modelo y se definen 4 buques (1 en cada PLC) con los datos iniciales de la Figura 8.22. Las posiciones, velocidades y rumbos de los buques coinciden con los utilizados en el apartado 8.1.2, Figura 8.9.

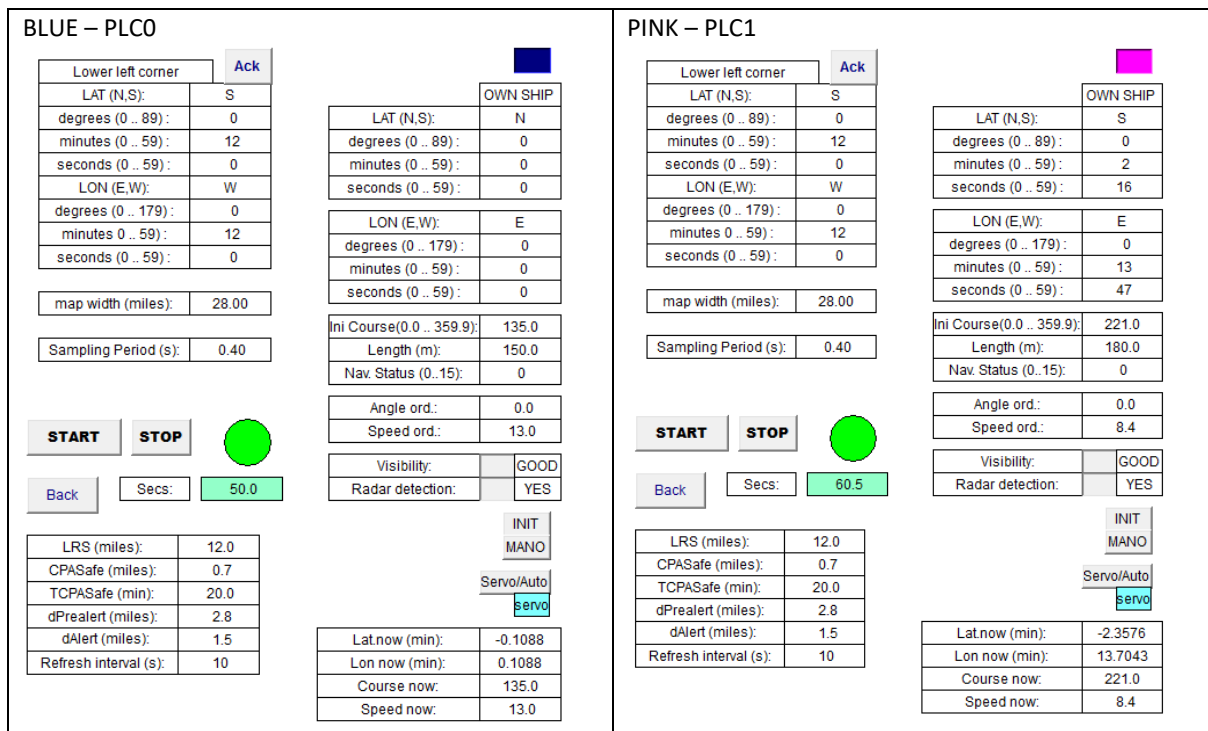




Figura 8.22. Ejemplo2-vC, datos iniciales

La Figura 8.23 muestra las situaciones iniciales, a partir de la información dinámica recibida por cada PLC. Las visualizaciones en los 4 sistemas coinciden.

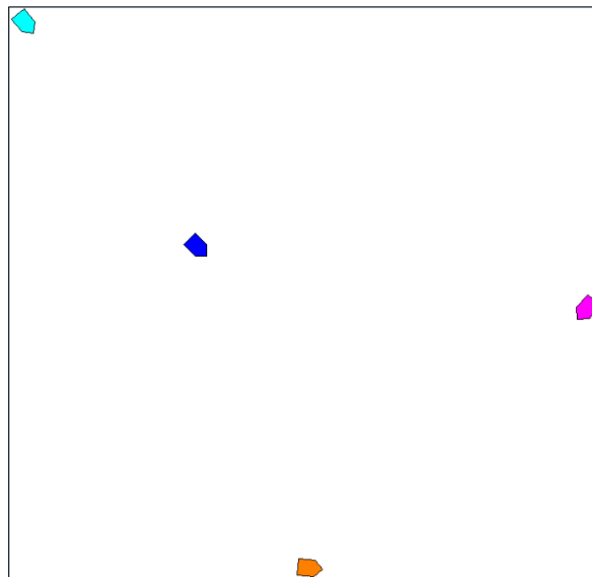


Figura 8.23. Ejemplo2-vC, visualización de las situaciones

La Figura 8.24 agrupa los datos recibidos y calculados por cada PLC en el instante  $t1$ . Inicialmente, el buque BLUE (PLC0) visualiza información de LIGHT BLUE y de ORANGE.

LIGHT BLUE (PLC3) sólo tiene dentro de su radio LRS (12 millas) al buque BLUE. A su vez, ORANGE (PLC2), tiene a PINK y a BLUE dentro de su radio, y PINK (PLC1) sólo a ORANGE.



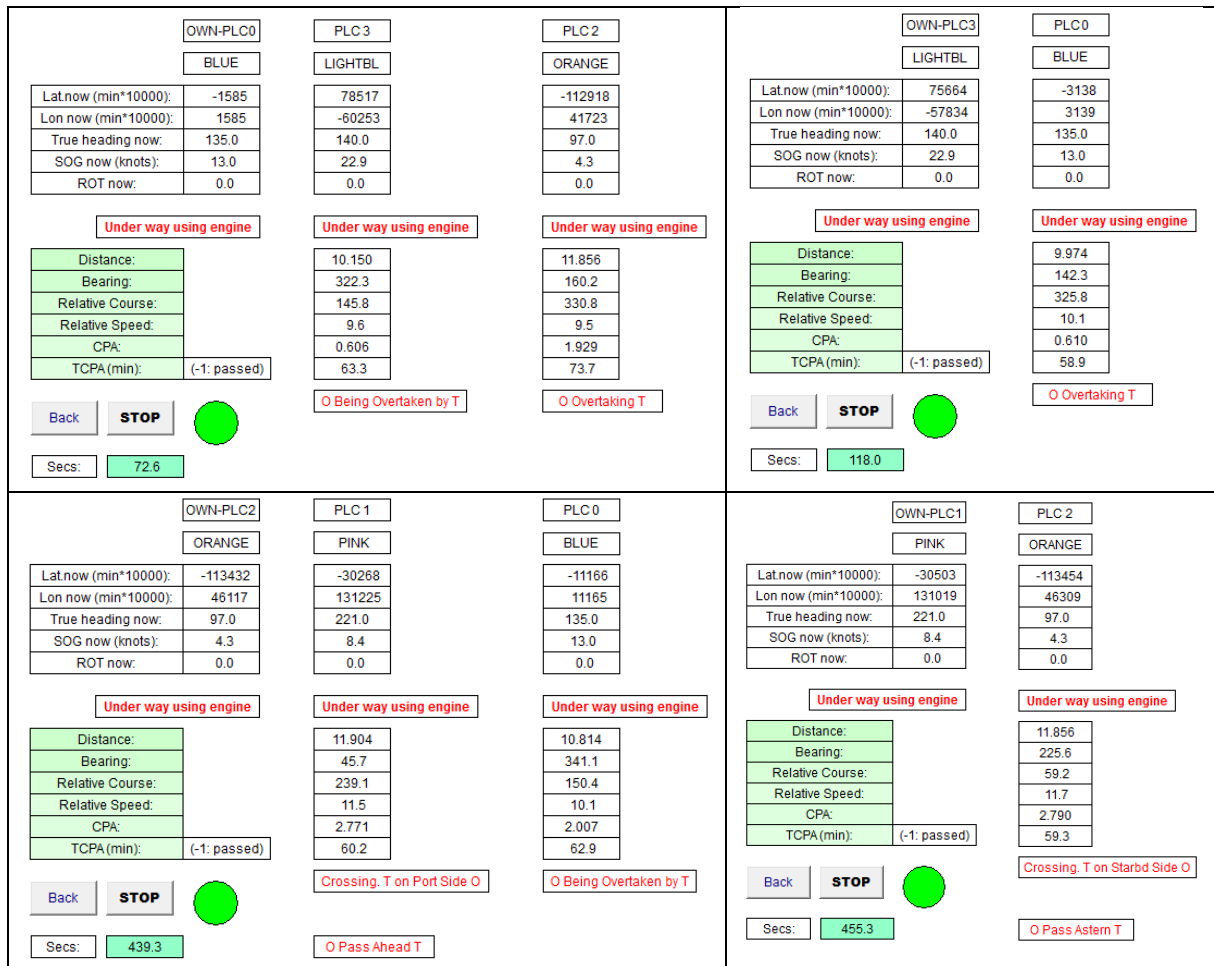
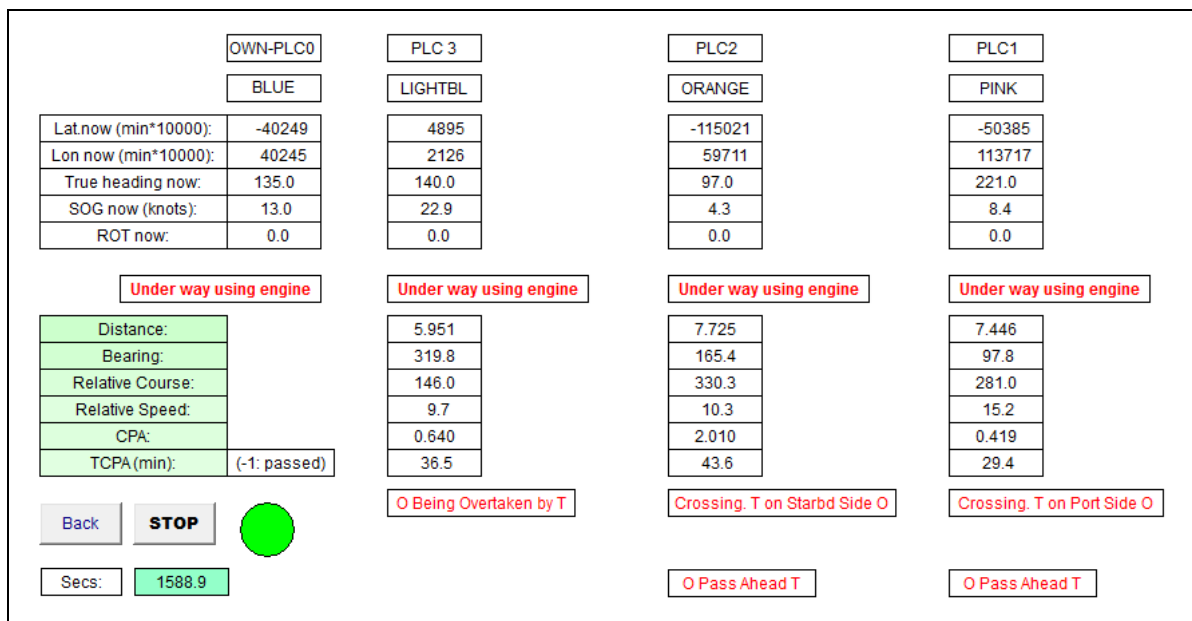


Figura 8.24. Ejemplo2-vC, datos recibidos y calculados por cada PLC (0,3,2,1),  $t_1$

A medida que se van acercando, a distancias menores de LRS, cada PLC muestra la información recibida y la calculada, de forma similar a la dada en la Figura 8.24.

A modo de ejemplo, la Figura 8.25 muestra la información en PLC0 y PLC1 para un tiempo  $t_2$  posterior a  $t_1$ .



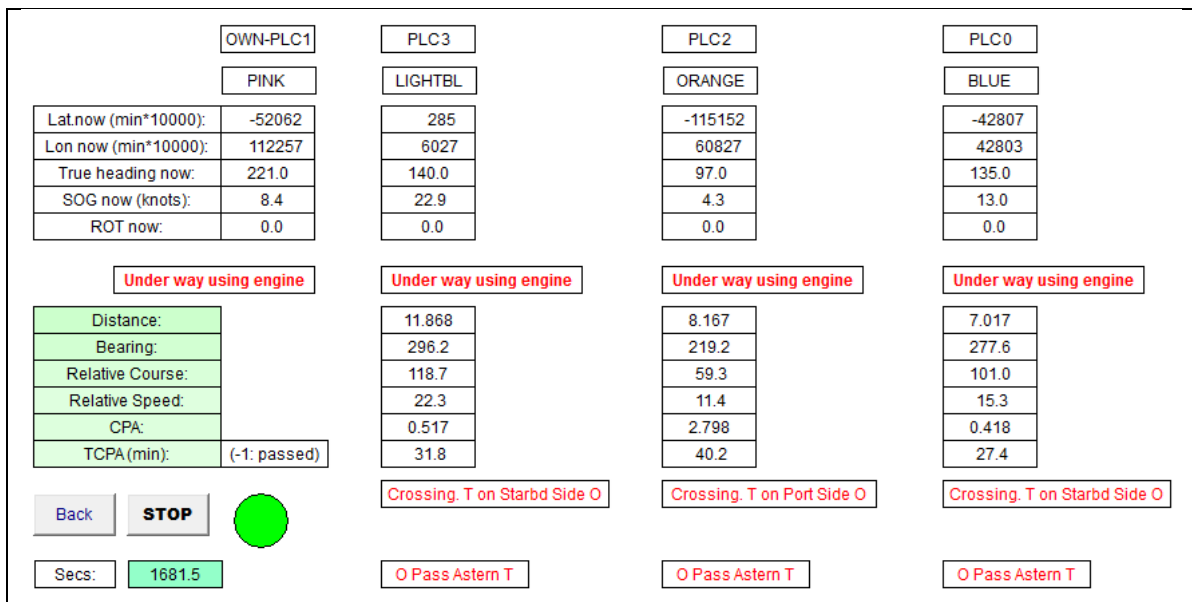


Figura 8.25. Ejemplo2-vC, datos recibidos y calculados por PLC0 y PLC1, t2

Tal como se mencionó en el apartado 8.1.2, la situación de ORANGE con respecto a BLUE, que era de alcance, pasa a ser de cruce, permitido porque no están en situación de prealerta.

En la Figura 8.26 se ve que PINK (PLC1) detecta en primer lugar situación de prealerta con respecto a BLUE (PLC0).

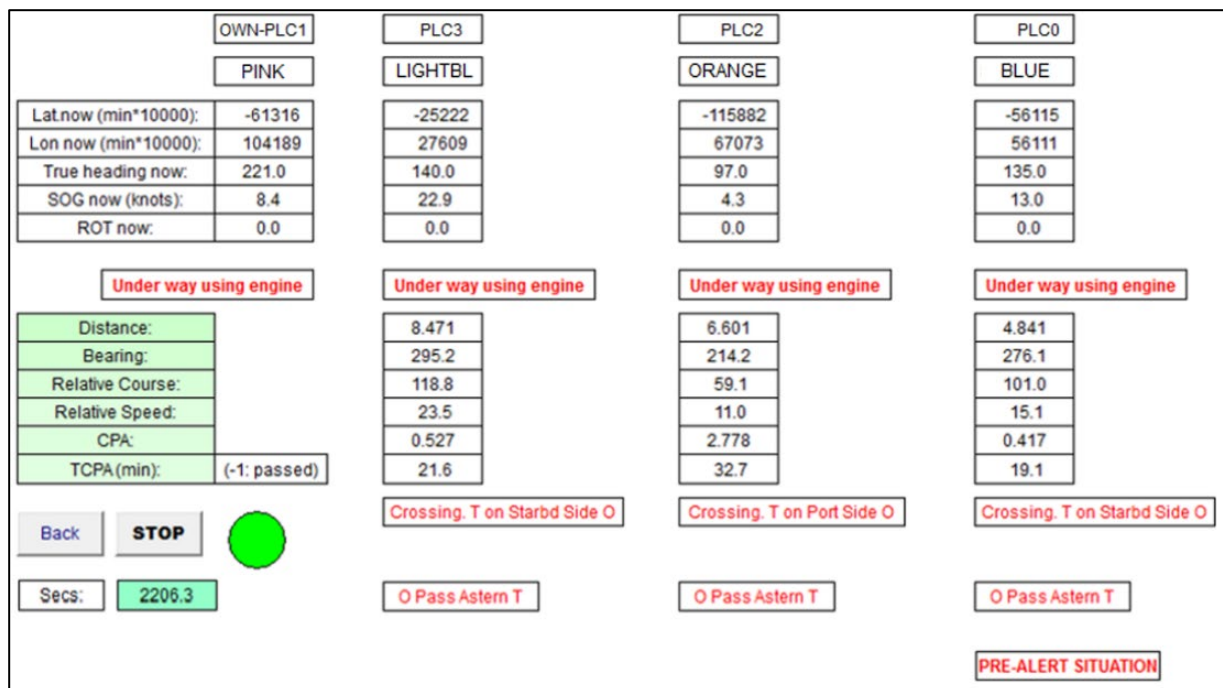


Figura 8.26. Ejemplo2-vC, datos recibidos y calculados por PLC1, con situación de prealerta

A partir de esta situación de prealerta se suceden los mensajes para comunicación y acuerdos entre los operadores de PINK y de BLUE.

Los mensajes que visualiza el operador de PINK aparecen en la Figura 8.27.

En primer lugar, la información sobre la situación y la Regla a aplicar que propone el PLC1 al operador.

En la segunda fila, el mensaje si el operador pulsa OK. En este caso, se envía el correspondiente mensaje binario al PLC0, y se envía otro mensaje binario con la información dinámica asociada.

En la tercera fila de la figura, el mensaje si el operador pulsa NOT OK.

1	CROSSING.	VESSELS IN SIGHT.	Rule 15	<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="NOT OK"/> <input type="button" value="Reset"/>
	PINK	CROSSING ASTERN OF	BLUE	
	BLUE	ON THE STARBOARD SIDE OF	PINK	
	PINK	SHOULD KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF	BLUE	
2	PINK IS WAITING ANSWER FROM OPERATOR OF SHIP			BLUE
3	OPERATOR DOESNT AGREE WITH MANOEUVRE PROPOSED BY OWN PLC PUSH OK BUTTON TO CONTINUE			

Figura 8.27. Ejemplo2-vC, mensajes del PLC1 (emisor) a su operador

En la Figura 8.28 se muestran los mensajes en BLUE: mensaje recibido, mensaje si el operador de BLUE pulsa OK y mensaje si pulsa NOT OK. En ambos casos, PLC0 enviará el mensaje binario correspondiente (operador de BLUE OK o NOT OK) a PLC1.

1	RECEIVED SITUATION: CROSSING.	VESSELS IN SIGHT.	Rule 15
	PINK	CROSSING ASTERN OF	BLUE
	BLUE	ON THE STARBOARD SIDE OF	PINK
	PINK	SHOULD KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF	BLUE
2	AGREEMENT OF MAN.WITH PINK		WAITING EVOLUTION OF SHIPS
3	BLUE IS OPERATING WITHOUT DIALOG WITH		PINK
	PUSH RESET BUTTON TO START COMM		

Figura 8.28. Ejemplo2-vC, mensajes del PLC0 (receptor) a su operador

La Figura 8.29 incluye los mensajes que aparecen en PINK si el operador de BLUE pulsó OK (fila 1) o NOT OK (fila 2).

1	AGREEMENT OF MAN.WITH BLUE		WAITING EVOLUTION OF SHIPS
2	BLUE OPDOESNT AGREE WITH MAN.PROPOSED BY OUR PLC PUSH OK BUTTON TO CONTINUE		

Figura 8.29. Ejemplo2-vC, mensajes de respuesta de PLC0 a PLC1

La Figura 8.30 muestra los avisos visualizados por el operador de PINK y los datos calculados para ayuda en la maniobra.

CROSSING.	VESSELS IN SIGHT.	Rule 15	<table border="1"> <tr><td>HO11:</td><td>-1.0</td></tr> <tr><td>HO12:</td><td>-1.0</td></tr> <tr><td>HO21:</td><td>232.4</td></tr> <tr><td>HO22:</td><td>156.4</td></tr> <tr><td>S01:</td><td>13.7</td></tr> <tr><td>S02:</td><td>7.4</td></tr> <tr><td>RC1:</td><td>86.7</td></tr> <tr><td>RC2:</td><td>104.3</td></tr> </table>	HO11:	-1.0	HO12:	-1.0	HO21:	232.4	HO22:	156.4	S01:	13.7	S02:	7.4	RC1:	86.7	RC2:	104.3
HO11:	-1.0																		
HO12:	-1.0																		
HO21:	232.4																		
HO22:	156.4																		
S01:	13.7																		
S02:	7.4																		
RC1:	86.7																		
RC2:	104.3																		
PINK	CROSSING ASTERN OF	BLUE																	
BLUE	ON THE STARBOARD SIDE OF	PINK																	
PINK	SHOULD KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF	BLUE																	
<hr/> Not permitted headings (*10): from 1564 to 2324 <hr/> Not permitted speeds (*10): from 74 to 137																			

Figura 8.30. Ejemplo2-vC, cálculo de maniobras e información para el operador de PINK

Si, una vez alcanzado el acuerdo, la distancia entre PINK y BLUE sigue disminuyendo y es menor que las distancias de alerta fijadas por los PLCs implicados, los operadores visualizarán los mensajes de la Figura 8.31, en los que se les indica que ambos deben maniobrar.

CROSSING.	VESSELS IN SIGHT.	Rule 15
PINK	CROSSING ASTERN OF	BLUE
BLUE	ON THE STARBOARD SIDE OF	PINK
PINK	SHOULD KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF	BLUE
AGREEMENT OF MAN.WITH	BLUE	ALERT SITUATION WITH: BLUE BOTH MUST MANOEUVRE.

RECEIVED SITUATION: CROSSING.	VESSELS IN SIGHT.	Rule 15
PINK	CROSSING ASTERN OF	BLUE
BLUE	ON THE STARBOARD SIDE OF	PINK
PINK	SHOULD KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF	BLUE
AGREEMENT OF MAN.WITH	PINK	ALERT SITUATION WITH PINK
		BOTH MUST MANOEUVRE.

Figura 8.31. Ejemplo2-vC, mensajes de aviso de alerta

Posteriormente, el PLC de PINK detecta prealerta también respecto a LIGHT BLUE. Los mensajes son los de la Figura 8.32: mensaje que indica el acuerdo con BLUE, y mensaje indicando la prealerta con LIGHT BLUE.

AGREEMENT OF MAN.WITH	BLUE	WAITING EVOLUTION OF SHIPS
CROSSING.	VESSELS IN SIGHT.	Rule 15
PINK	CROSSING ASTERN OF	LIGHTBL
LIGHTBL	ON THE STARBOARD SIDE OF	PINK
PINK	SHOULD KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF	LIGHTBL

Figura 8.32. Ejemplo2-vC, mensajes del PLC1 a su operador

Una vez establecido el acuerdo entre dos buques, el proceso de comunicación entre los PLCs de ambos queda en un estado de espera de evolución (Esperando Maniobras, ver Figura 6.8). De este estado, el proceso sale por uno de los siguientes motivos:

- Finaliza la situación de prealerta. En este caso, desaparecen los mensajes de información de prealerta y los mensajes entre buques.
- Uno de los dos OONWs resetea el acuerdo. El PLC del operador que pulsa Reset envía un mensaje al otro PLC, y éste informa a su operador de que el primero rompió el acuerdo. La Figura 8.33 fila 1 muestra la información que visualizan los operadores, en caso de que PINK rompa el acuerdo con BLUE.
- Se pierde la comunicación entre los buques. Mientras están en este estado, los PLCs periódicamente chequean que se mantiene la comunicación, enviando y recibiendo mensajes de test. Si detectan pérdida de comunicación, avisan a los operadores, mediante un mensaje similar al de la fila 2 de la Figura 8.33.

1	PINK	HAS BROKEN THE AGREEMENT WITH	BLUE
		PUSH OK BUTTON TO CONTINUE	
2	BLUE	IS WAITING TOO LONG AN ACK TO THE MSG SENT TO	PINK
		THERE IS NOT COMMUNICATION BETWEEN BOTH AIS	
		PUSH RESET BUTTON TO START TRYING COMM	

Figura 8.33. Ejemplo2-vC, mensajes a los operadores, indicando fin de acuerdo

### 8.2.4 Ejemplo 3

El límite entre las situaciones de alcance (*overtaking, being overtaken*) y de cruce (*crossing*) puede crear errores de apreciación y de aplicación incorrecta de los COLREGs, como en la colisión entre los buques Hyundai Dominion y Sky Hope (Hyundai-Sky, 2005). Si el buque que se aproxima está a estribor del blanco, las diferencias en la evaluación de la situación conducen también a un error con respecto a las responsabilidades de los buques. Esta situación especial se utiliza como uno de los casos de prueba para

el sistema PE. A continuación, se describe cómo operaría el modelo en esta situación, lo que da una idea de la ayuda que su uso representa para la disminución del riesgo de colisión.

Supongamos dos buques, BLUE y PINK, con los datos de partida de la Figura 8.34.

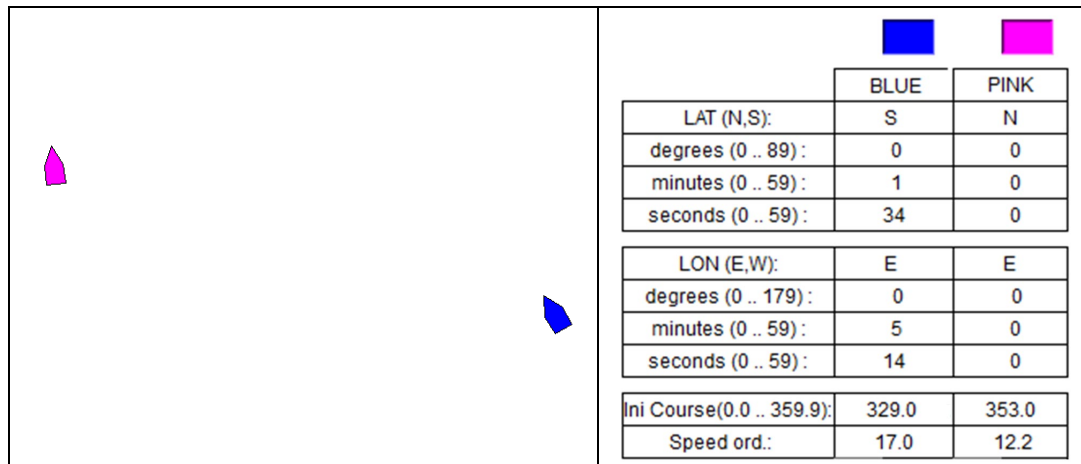


Figura 8.34. Ejemplo3, situación inicial

Con estos datos, se tiene:

- Distancia inicial: 5.4 millas. CPA: 0.24 millas. TCPA: 41 minutos. Situación: BLUE alcanzando a PINK.
- Si los buques siguen con movimiento uniforme, a una distancia de 3.6 millas la situación pasa a ser de cruce, con BLUE a estribor de PINK.

Supongamos que los operadores de los dos buques tienen fijado un CPA mínimo (o CPASafe) de 1 milla. Ambos deberían aplicar COLREGs, puesto que CPA < CPASafe. ¿Cuándo reaccionan los operadores? Vamos a analizar las diferentes posibilidades, asumiendo que conocen perfectamente las Reglas COLREGs:

- Ambos operadores reaccionan ante la situación cuando la distancia entre los buques es mayor de 3.6 millas. Ambos hacen los cálculos correctamente y determinan que BLUE está alcanzando a PINK y que el escenario es buques a la vista (Regla 13). El operador de BLUE realiza la maniobra (debería ser caída a estribor) de forma que se aleje de la derrota de PINK. El operador de PINK no tiene que maniobrar.
- Ambos operadores reaccionan ante la situación cuando la distancia entre los buques es menor de 3.6 millas. Ambos hacen los cálculos correctamente y determinan que BLUE está en situación de cruce por el estribor de PINK y que el escenario es buques a la vista (Regla 15). El operador de PINK ha de maniobrar (a babor) para alejarse de la derrota de BLUE. El operador de BLUE no tiene que maniobrar.
- Como no está definido cuándo (a qué distancia o con cuánta antelación) tienen que reaccionar los operadores, supongamos que el operador de PINK aplica COLREGs cuando los buques están a una distancia mayor de 3.6 millas, y que el operador de BLUE aplica COLREGs cuando la distancia es menor de 3.6 millas. PINK no maniobra puesto que deduce que ha de aplicarse la Regla 13 y que ha de maniobrar BLUE. Y BLUE no maniobra puesto que deduce que ha de aplicarse la Regla 15 y que ha de maniobrar PINK. Consecuencia: ninguno maniobra y los buques se siguen acercando, hasta que, en el mejor de los casos, los operadores consideren que están demasiado cerca y se vean obligados a maniobrar por la Regla 17-Maniobra del buque que "sigue rumbo" a)ii): *“este otro buque puede actuar para evitar el abordaje con su propia*

*maniobra, tan pronto como le resulte evidente que el buque que debería apartarse no está actuando en la forma preceptuada por este Reglamento”.*

- Ambos operadores se amparan en una supuesta correcta aplicación del COLREGs. Y pueden estar en lo cierto. Existe jurisprudencia al respecto de las situaciones de alcance que evolucionan hacia cruce. Parece que se ha establecido que a 5 millas no debe aplicarse el COLREGs por no considerar la distancia como peligrosa. Sin embargo, para 2 millas o menos sí que se ha considerado que la situación a esa distancia es la que tiene que marcar la aplicación del COLREGs. No obstante, hay que recordar que la jurisprudencia se aplica a unos buques concretos y con unas características de maniobra definidas, por lo que esas distancias pueden sufrir cambios.
- En condiciones reales, esa distancia límite calculada de 3.6 millas sufrirá ligeras variaciones, con lo que en las proximidades de esa distancia ambos operadores pueden haber reaccionado al mismo tiempo, pueden haber realizado los cálculos correctamente y pueden haber llegado a deducir que están en situaciones distintas y por tanto apliquen distintas Reglas COLREGs. De todos modos, BLUE OONW debería tener en cuenta la Regla 13 c): "*cuando un buque abrigue dudas de si está alcanzando o no a otro, considerará que lo está haciendo y actuará como buque que alcanza*".

La Tabla 8.1 resume las posibilidades comentadas.

*Tabla 8.1. Distancia de reacción y maniobra a realizar*

Situación – Buque que debe maniobrar	Distancia de reacción				
	Escenario - Buque	dBLUE > 3.6 dPINK > 3.6	dBLUE > 3.6 dPINK < 3.6	dBLUE < 3.6 dPINK > 3.6	dBLUE < 3.6 dPINK < 3.6
IN SIGHT- BLUE		Alcance - BLUE	Alcance - BLUE	Cruce - PINK	Cruce - PINK
IN SIGHT - PINK		Alcance - BLUE	Cruce - PINK	Alcance - BLUE	Cruce - PINK

Como la aplicación de COLREGs distingue entre Reglas para buques a la vista y Reglas para visibilidad reducida, el número de posibilidades de actuación aumenta: alcance con buques a la vista, alcance con visibilidad reducida y ayuda de RADAR, cruce a la vista, etc. Y con ello, aumenta el número de posibles combinaciones de decisiones no coordinadas y por tanto el riesgo de una posible colisión.

Las consideraciones anteriores, suponiendo interpretaciones del COLREGs correctas y cálculos correctos y que sin embargo dan lugar a maniobras incorrectas, podrían ser extrapolables a posibles implementaciones para buques autónomos, con el riesgo que esto conlleva.

A las consideraciones mencionadas habría que añadir aquellos casos en los que, por motivos de mala interpretación del COLREGs o por fallos en los cálculos, los OONWs adoptan decisiones erróneas para las maniobras.

Vamos a analizar el comportamiento del modelo para este ejemplo. La Figura 8.35 presenta los datos de partida.

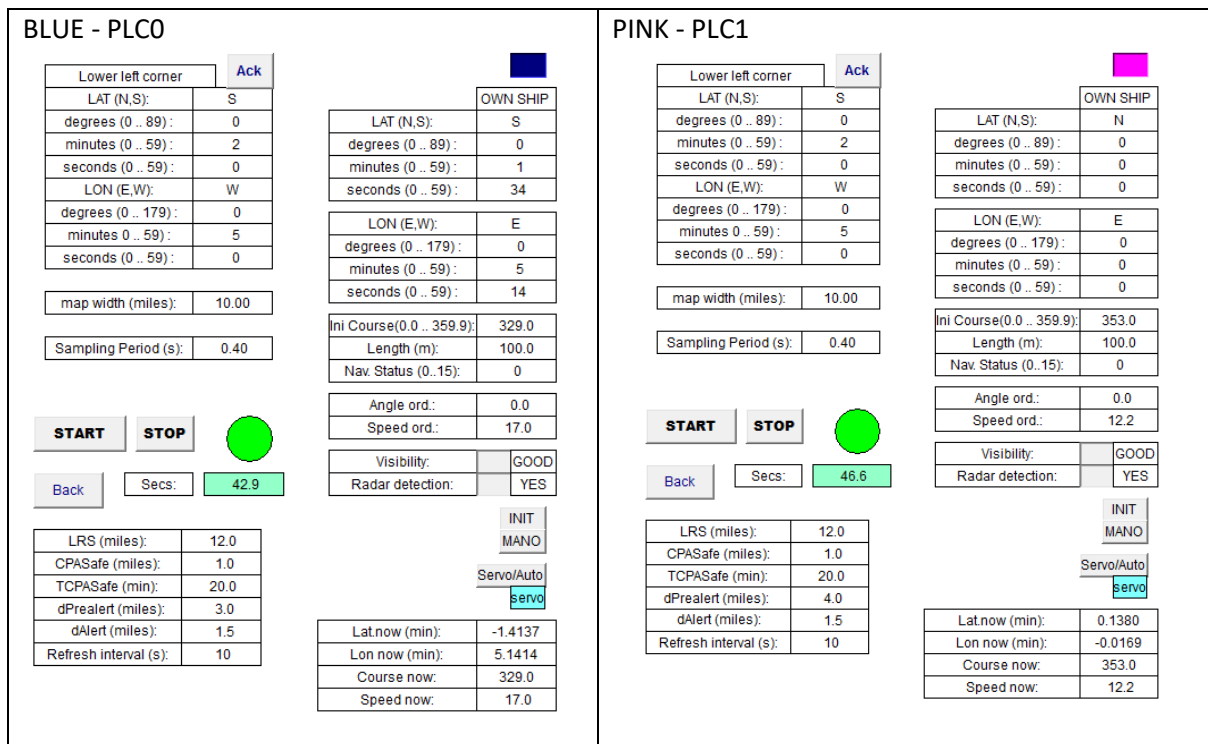


Figura 8.35. Ejemplo3, datos iniciales

Con estos datos, CPA es menor que el valor dado para CPASafe (1 milla), y la prealerta para BLUE saltará cuando la distancia sea menor de 3.0 millas o TCPA menor de 20 minutos. Para PINK, la distancia de prealerta es 4.0 millas.

Se parte de una situación inicial de **alcance** (BLUE alcanzando a PINK), y pasa a ser de **cruce** cuando la distancia entre ambos es 3.6 millas.

Como a esta distancia PINK ya está en prealerta, mantendrá la situación de alcance (en la que se ha generado la prealerta), intentando cumplir la Regla 13.d de COLREGs.

Para BLUE, que aún no está en prealerta, la situación cambiará a **cruce**.

La Figura 8.36 muestra los datos recibidos y calculados por cada PLC en el instante t1.



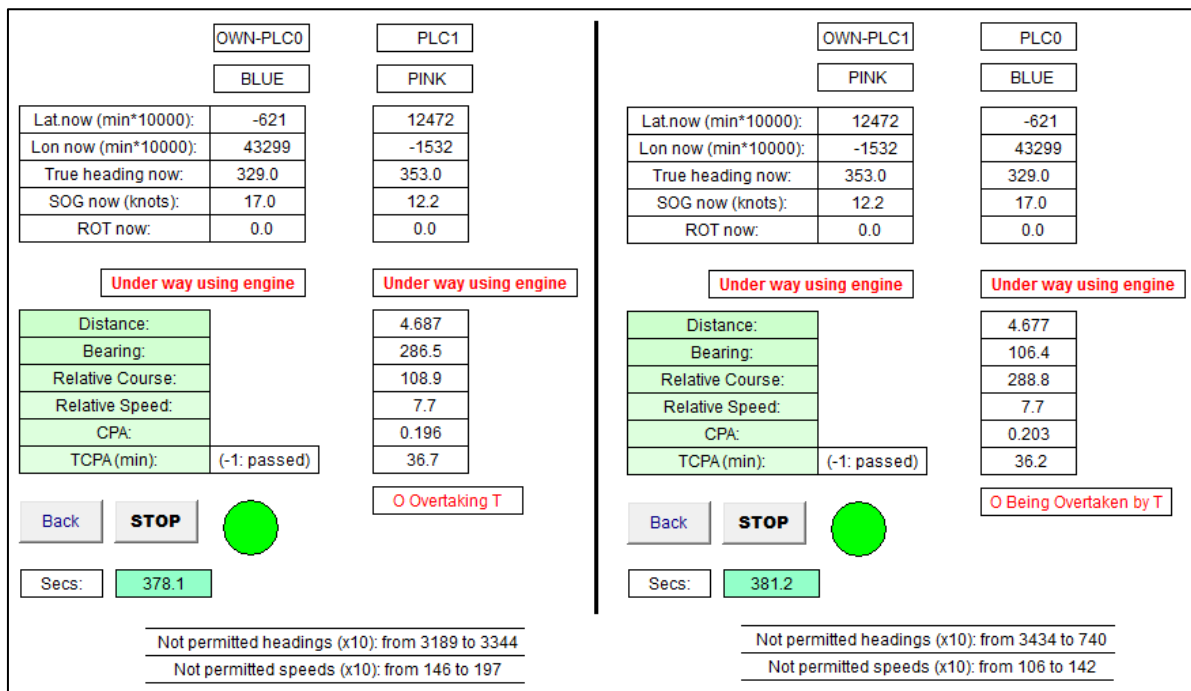


Figura 8.36. Ejemplo3, datos recibidos y calculados por cada PLC (0,1), t1

Como se ve en la Figura 8.37, PINK detecta posición de prealerta cuando  $d < 4.0$  millas, aún en situación de alcance (*O Being overtaken by T*).

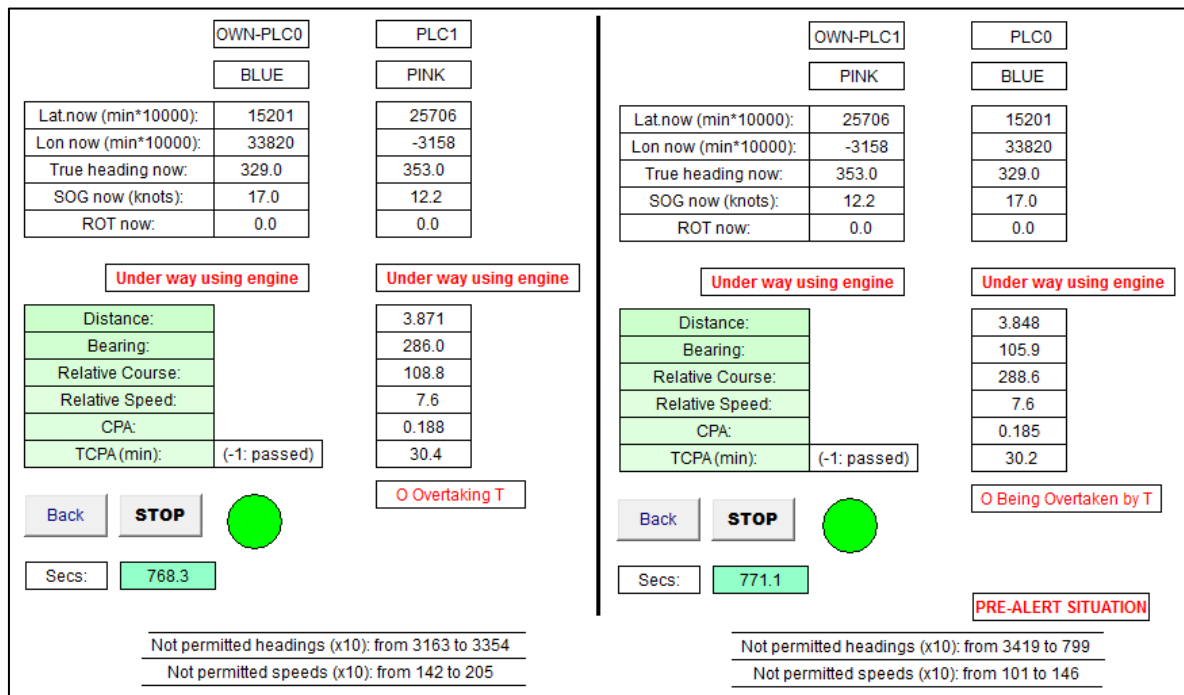


Figura 8.37. Ejemplo3, con situación de prealerta, t2

La Figura 8.38 representa un diagrama con una posible secuencia de mensajes del sistema.

Cuando el PLC1 detecta prealerta, muestra a su operador (PINK OONW) la información sobre el encuentro. Si el operador está de acuerdo, el PLC1 envía al PLC0 el mensaje MSG 50 (ver Tabla 6.4) para iniciar el acuerdo, espera la recepción del MSG 51 y luego envía al PLC0 el mensaje (MSG 54) con la información dinámica asociada.



El PLC0 comprueba la concordancia con sus datos. Si coinciden, PLC0 envía MSG 56 y luego PLC1 envía MSG 3, con la información del acuerdo, e informa a su operador que está esperando una respuesta de BLUE OONW.

PLC0 muestra la información recibida, y si el operador está de acuerdo, ambos PLCs informan sobre el acuerdo.

Los MSGs 3, 50, 51, 52, 54 y 56 se envían por medio de mensajes binarios AIS con dirección (mensaje AIS 6). El AIS que recibe un mensaje binario dirigido lo reconoce enviando un ACK (mensaje AIS 7).

El tiempo de espera para la respuesta a cualquier mensaje es limitado. En caso de retraso, el PLC avisa a su operador.

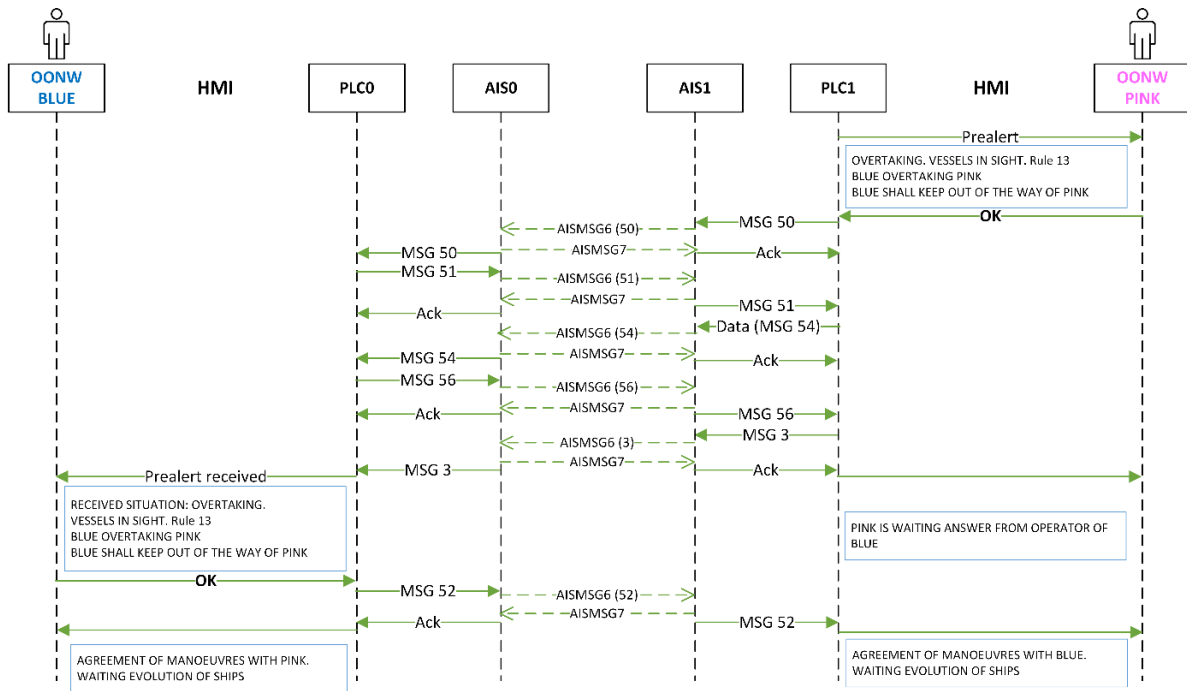


Figura 8.38. Ejemplo3, secuencia de mensajes de acuerdos

Los mensajes de prealerta enviados a los OONWs en un escenario de visibilidad restringida (MSG 40) aparecen en la Figura 8.39.

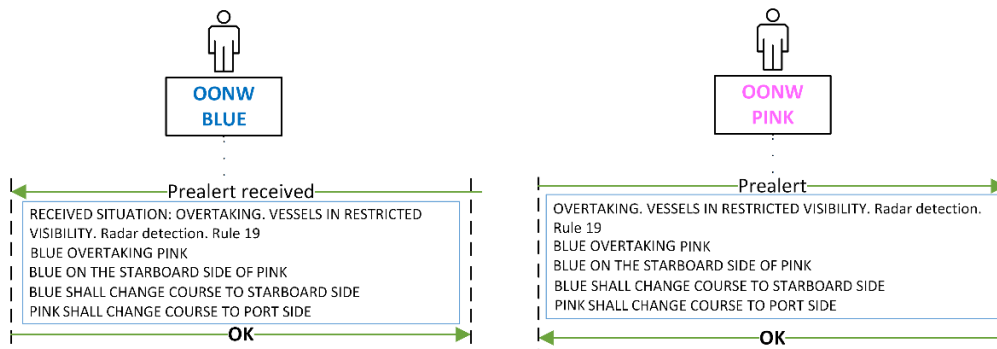


Figura 8.39. Ejemplo3, mensajes de prealerta, visibilidad reducida

Si la distancia es menor de 3.6 millas antes de alcanzar el acuerdo, es decir, antes de que PINK envíe a BLUE el mensaje para maniobrar, se darían las situaciones mostradas en la Figura 8.40. PINK mantiene situación de alcance (*Being Overtaken*) y BLUE, que aún no entró en prealerta, detecta situación de cruce (*Crossing*).

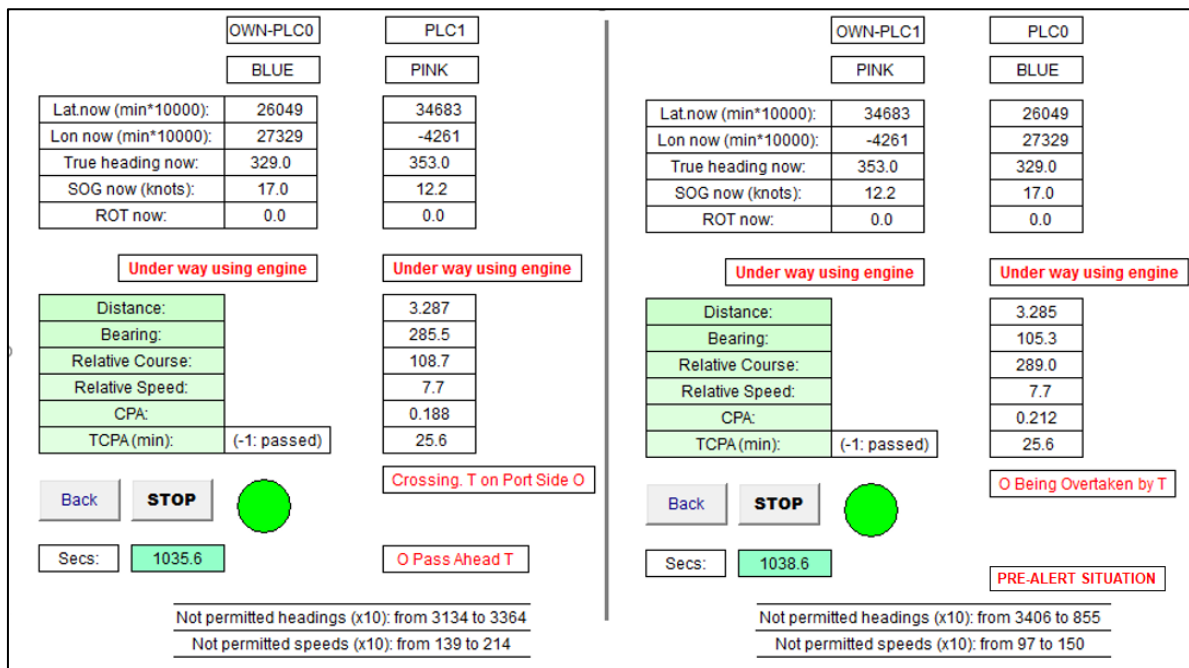


Figura 8.40. Ejemplo3, con situación de prealerta, t3.

La secuencia de mensajes, si PINK OONW está de acuerdo con la advertencia de prealerta del PLC1, se muestra en la Figura 8.41. PLC0 detecta diferencias en los datos recibidos (en MSG 54) respecto a sus propios datos y avisa a su operador. Así, BLUE OONW ve que PINK ha detectado una situación *Being Overtaken*. Además, PLC0 envía a PLC1 el mensaje con la información dinámica disponible en BLUE, y PINK OONW también ve la diferencia. En este caso, PINK OONW ve que BLUE detecta situación *Crossing Port Side*.

Las discrepancias en los valores numéricos (distancia, CPA, etc.) están permitidas dentro de unos rangos de tolerancia que han de estar prefijados.

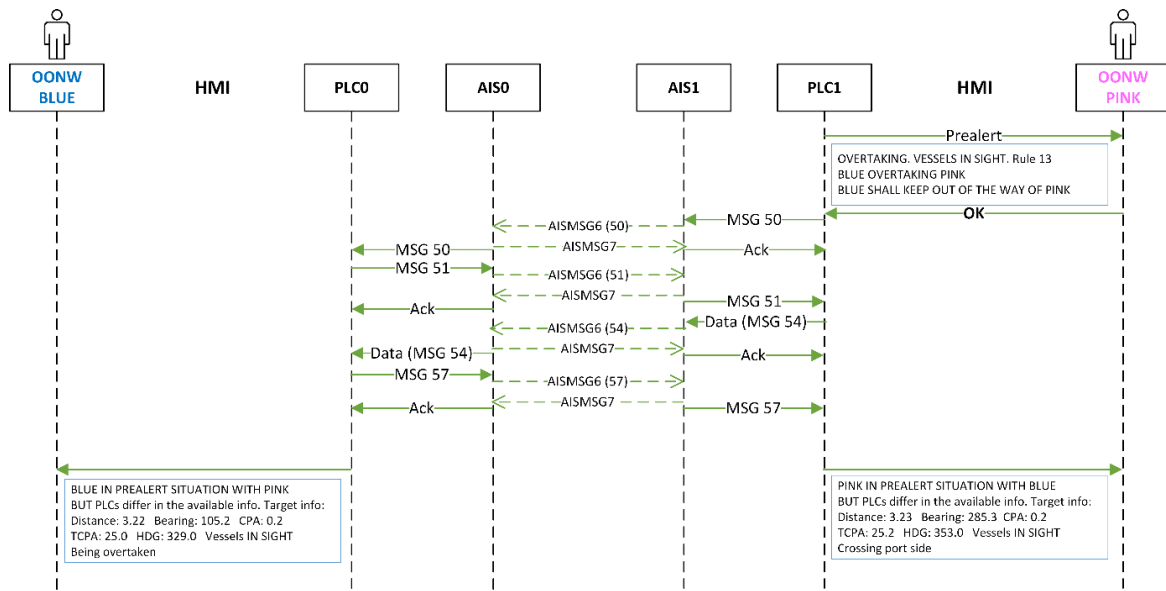


Figura 8.41. Ejemplo3, secuencia de mensajes en caso de discrepancias entre PLCs

Supongamos que la distancia de prealerta fijada para PINK es menor que la dada para BLUE (3 millas). En este caso, PLC0 detecta primero la situación de prealerta, avisa a su operador y a continuación se produce el correspondiente intercambio de mensajes.

Ambos reconocen una situación de cruce, BLUE cruzando la proa de PINK, por su estribor: en el mensaje de aviso: CROSSING. VESSELS IN SIGHT. BLUE CROSSING AHEAD OF PINK. PINK ON THE PORTSIDE OF BLUE. BLUE SHOULD KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF BLUE.

La secuencia de los mensajes aparece en la Figura 8.42.

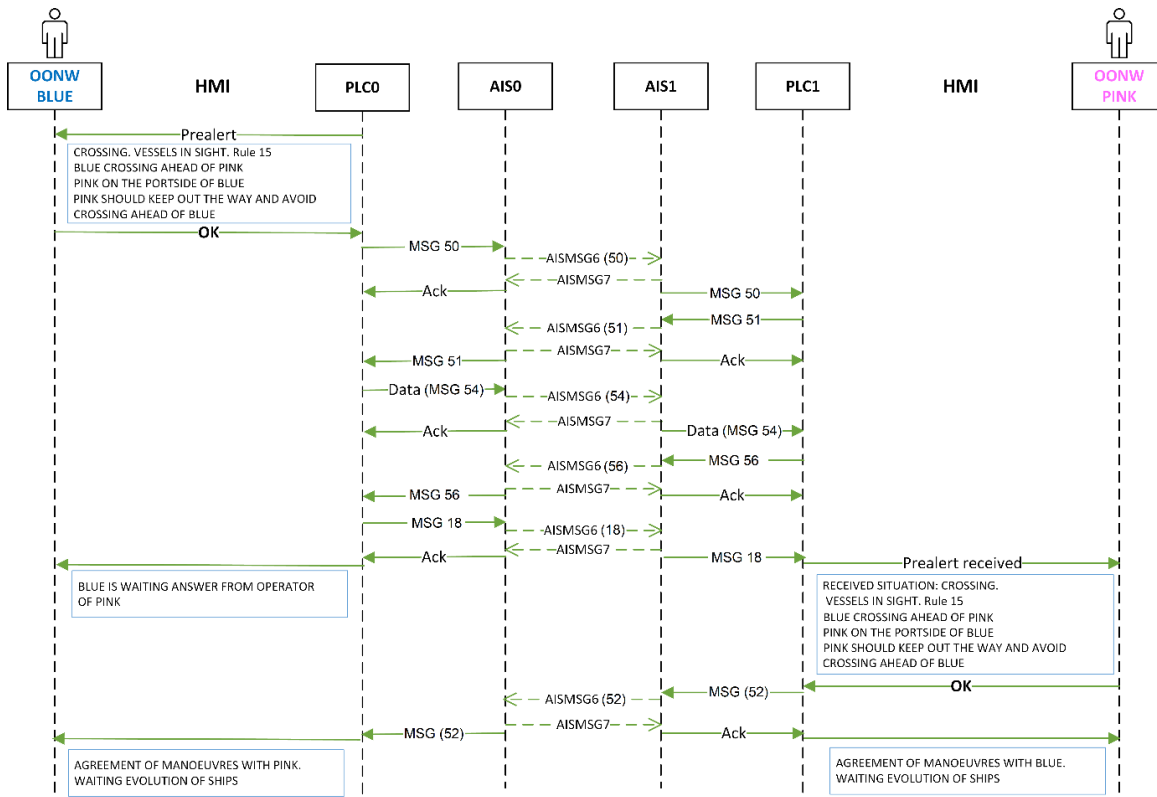


Figura 8.42. Ejemplo3, secuencia de mensajes, dPrealerta = 3 millas

Si un buque (PINK por ejemplo) realiza una maniobra, variando el rumbo a babor o a estribor o modificando su velocidad, la interfaz del otro buque (BLUE en este caso) mostrará a su operador el aviso correspondiente. El PLC de BLUE lo deduce de la detección de cambios apreciables en los últimos valores de SOG o ROT transmitidos en el mensaje dinámico enviado por el AIS de PINK.

### 8.3 Discusión de resultados

El modelo BÁSICO permite probar los cálculos que relacionan al buque propio con cada uno de los blancos, la información a mostrar al operador y los mensajes a transmitir.

Los formatos definidos para la visualización que aparecen en las figuras de este capítulo tienen la finalidad de chequear que se pone a disposición del operador la información pertinente, y que ésta es correcta.

El formato definitivo, que incluirá la definición de tamaños, posiciones, colores, gráficos, etc., será objeto de estudios posteriores. Este formato tiene que facilitar las tareas del OONW sin aumentar el riesgo de error humano (EU-OSHA, 2009; Szlapczynski & Szlapczynska, 2015; Pietrzykowski *et al.*, 2017; Ramos *et al.*, 2019). El HMI debe incluir una señal audible para advertir al OONW sobre la recepción de cualquier mensaje binario AIS.

Como muestran las figuras (por ejemplo, Figura 8.12), el operador visualiza los valores dinámicos recibidos (latitud, longitud, ...), los valores calculados (distancia, demora, ...) y la situación (*Being Overtaken, Crossing ...*) para todos los blancos que están dentro de su radio de visibilidad, independientemente de que estén o no en situación de prealerta.

Cuanto mayor sea la distancia de visibilidad, más buques podrán aparecer en esta visualización, lo cual puede ser motivo de distracción para el operador. Esta cuestión del tamaño del radio de visibilidad se añade a los estudios a realizar posteriormente con personas expertas en la navegación de buques.

Los valores calculados de velocidades y rumbos relativos y de CPA se obtienen a partir de la recta trazada con los últimos valores de demora y distancia correspondientes a las últimas posiciones recibidas por el AIS del buque propio y de cada blanco, siempre que el tiempo entre ambas recepciones sea menor de un valor predefinido (por defecto, 3 segundos) y con un intervalo mínimo entre cálculos dado (en los ejemplos, 10 segundos).

En la simulación, cada buque va avanzando punto a punto, independiente del resto de buques, lo que conlleva variaciones en estos valores. En situaciones reales lógicamente tampoco se mantendrán constantes. El cálculo se ha realizado tomando las 6 últimas posiciones almacenadas y ajustando por mínimos cuadrados las distancias y demoras en los 6 casos, para obtener la recta que proporciona el rumbo relativo. Se ha comprobado que de este modo las variaciones en velocidades y rumbos relativos y CPAs son más pequeñas.

Otro punto a considerar cuando se pruebe el modelo en un entorno real será el de las oscilaciones no deseadas que se den en los valores de los ángulos de proa o rumbos verdaderos (*headings*). Estas variaciones no están contempladas en la simulación realizada del movimiento de los buques ni en la versión actual del modelo. En condiciones de mala mar, los buques darán guiñadas (desvíos de la proa hacia uno y otro lado del rumbo que deben seguir). Se podría considerar que un buque está dando guiñadas si su ángulo de proa oscila respecto a un valor con un periodo pequeño, y en tal caso se puede hacer una corrección en los cálculos.

Para corregir los errores o pequeñas desviaciones en las medidas será conveniente aplicar filtros de Kalman, que minimizan el error cuadrático medio de un conjunto de datos (Fossen & Pérez, 2009).

El operador visualiza un aviso con los posibles cambios para maniobrar en velocidad o en rumbo si se está en situación de prealerta con un blanco. Con estos datos y con la visualización de las Reglas COLREGs a aplicar, el operador puede decidir la maniobra más adecuada. Se mejora esta visualización con una representación gráfica similar a la mostrada en la Figura 8.5, en la que el operador puede seleccionar el radio de la circunferencia (velocidad) o el ángulo (rumbo ordenado) fuera del área sombreada, para efectuar una maniobra segura. Al estar la información disponible para cada uno de los blancos, se hace la representación conjunta de las áreas excluidas de maniobras del buque propio para todos los blancos con los que se está en situación de prealerta.

Se considera conveniente profundizar en el estudio para modificar los cálculos de rumbo y velocidad de las maniobras, de forma que incluyan unos parámetros dependientes de la dinámica del buque. En la simulación realizada del movimiento del buque (ver Anexo 2), los parámetros dependen de la eslora del buque y de la velocidad.

Con la información dinámica proporcionada por el AIS, el sistema desarrollado dispone de datos suficientes para poder aplicar las Reglas de la Sección II del COLREGs, correspondientes a los buques a la vista. En caso de visibilidad reducida, COLREGs de momento sólo considera explícitamente la ayuda proporcionada por el RADAR o por las señales sonoras para la detección de otro buque, según dicta la Sección III. Si no se modifica esta norma, podría cuestionarse la decisión sobre la maniobra basada en la información obtenida del AIS. No obstante, el uso del AIS como fuente de información realizado en este trabajo está respaldado por la Resolución A.1106 de la IMO (2015), las Reglas 5 y 7b de COLREGs y sentencias judiciales (colisión del *Western Neptune* y el *St Louis Express* (Tsimplis & Papadas, 2019)).

En este modelo la selección de la condición de visibilidad depende finalmente de los operadores. Es necesario que éstos decidan y acuerden si se está o no en situación de visibilidad reducida, para aplicar las Reglas de la Sección II o de la Sección III.

La situación de Overtaking con visibilidad reducida y detección por RADAR está identificada en el apartado d)(i) de la Regla 19: “... se evitará lo siguiente: un cambio de rumbo a babor para un buque situado a proa del través salvo que el otro buque esté siendo alcanzado”. COLREGs no define qué hacer en este caso. En este trabajo, para las situaciones de visibilidad reducida con detección por RADAR se propone lo siguiente:

- Si ambos buques están en el mismo estado de navegación, ambos tienen que maniobrar. El buque que está siendo alcanzado deberá maniobrar cayendo a la banda contraria a la que está el buque que le está alcanzando. Al buque que alcanza (maniobra que no está clara en el COLREGs), se le hace maniobrar a la banda contraria a la que está el buque que está alcanzando. Si el estado de navegación es distinto, se aplica la Regla 18 y sólo deberá maniobrar el que debe ceder el paso.
- En las demás situaciones de prealerta con visibilidad reducida y detección por RADAR, en el mensaje se indica hacia dónde deben evitar caer los buques, independientemente de su estado de navegación. Además de lo que dicta la Regla 19 (evitar un cambio de rumbo a babor para un buque situado a proa del través), se indica también si se debe evitar el cambio a estribor (ver MSG 38 en Tabla 6.4 y Figura 6.5).

La implantación del modelo requiere que los buques estén equipados con un AIS para la adquisición de datos y también para la comunicación de los mensajes para acuerdos entre los buques. En la versión actual, el AIS es la única vía contemplada de adquisición de datos. Pero los datos propios también podrían adquirirse de otro GPS, o de un sistema de navegación inercial, y los datos de los blancos pueden ser obtenidos de un RADAR. Estos dispositivos, al igual que el AIS, pueden conectarse a los PLCs con protocolos NMEA. Estas entradas de datos serían redundantes con las provenientes del AIS y podrían utilizarse para mejorar la disponibilidad e integridad de la información dinámica (Last *et al.*, 2014; Felski *et al.*, 2015; Tu *et al.*, 2018), y por lo tanto la fiabilidad del modelo.

A modo de ejemplo, supongamos que el modelo implantado en el buque propio, completo y operativo, detecta un blanco sólo por RADAR. Ese blanco posiblemente no esté equipado con un AIS que transmita sus datos. Obviamente, el sistema en el buque propio no podrá comunicar los mensajes de maniobras y acuerdos con el blanco. Pero sí podrá avisar al operador del buque propio de las reglas que debería aplicar, y éste si es necesario podrá comunicarse con el operador del blanco por otras vías.

A los comentarios anteriores sobre el comportamiento del modelo BÁSICO, con el modelo COMPLETO del apartado 8.2 se añaden las pruebas de las comunicaciones y los acuerdos entre buques.

Los envíos de mensajes comienzan cuando un buque detecta situación de prealerta respecto a un blanco que se encuentre dentro de su radio de visibilidad. Tanto este radio como la distancia y tiempos de prealerta pueden ser seleccionados inicialmente por el operador (OONW) de cada buque.

La secuencia de etapas en la comunicación y los requisitos asociados se describieron en el apartado 6.3. El buque que detecta la prealerta, tras el OK de su operador, envía al blanco un mensaje binario de inicio de comunicación. Para que el blanco responda, es necesario que tenga datos del buque origen del mensaje, es decir, que esté dentro de su distancia de visibilidad. Por tanto, los valores para la distancia de visibilidad (LRS) y distancia de prealerta (dPrealert) deben estar dentro de un rango, de forma que se cumpla  $LRS > dPrealert$ .

Aunque parece obvio, será necesario limitar los valores o señalarlo en la pantalla de entrada de datos. Luego, el PLC del buque que inició el diálogo envía un mensaje al otro buque con la información

dinámica que posee de éste. El PLC que recibe el mensaje chequea estos valores, y si son concordantes presenta a su OONW la información para el acuerdo.

Se debería establecer un criterio común en la asignación de valores para los parámetros de seguridad (CPASafe, TCPASafe, LRS, dPrealert y dAlert, y su dependencia de las dimensiones y características de maniobrabilidad de los buques. También es necesario definir la tolerancia permitida para la comparación de los valores dinámicos adquiridos.

La aplicación permite que cada buque llegue a acuerdos con N blancos, de forma independiente con cada uno de ellos. Es decir, cada buque puede establecer N diálogos, uno con cada blanco. En la simulación se trabaja con un máximo de 4 buques, pero la aplicación puede estar dimensionada para un número de blancos dependiente de la memoria del PLC.

En cada acuerdo, los OONW de los dos buques pactan, o no, lo siguiente (ver apartado 6.3) con los posibles mensajes):

- Escenario en que se encuentran: a la vista, visibilidad reducida con o sin radar.
- Situación, dependiente del escenario.
- Regla a aplicar, incluyendo la variación dependiente del estado de navegación (Regla 18).

Si no se alcanzan acuerdos, bien sea porque los PLCs detectan datos no concordantes en la información, porque los OONWs no están de acuerdo con la maniobra propuesta por los PLCs, o porque se sobrepasa un tiempo de espera por comunicaciones, se avisa a los OONWs y se indica que operan sin comunicación. Será interesante analizar si es conveniente incluir más etapas con otras alternativas en los diagramas de Figura 6.8 y Figura 6.9.

En el acuerdo no se indica cómo ha de ser la maniobra, es decir, no se da el valor que hay que ordenar de rumbo o de velocidad para salir de la situación de prealerta. Se supone que el cálculo de la maniobra es misión del OONW. Como ayuda, la aplicación desarrollada calcula y proporciona al OONW los valores de ángulos y velocidades adecuados para que el CPA no sea menor de un valor mínimo preestablecido. Con estos datos, con la visualización de las Reglas COLREGs a aplicar, y con la información sobre el acuerdo (o desacuerdo) con el blanco, el OONW puede decidir la maniobra más adecuada. Además, cada PLC informa a su OONW si un blanco está maniobrando, deducido de la detección de cambios en los valores de SOG o ROT transmitidos por el AIS de dicho blanco.

Los cálculos de estos ángulos y velocidades para maniobras han de realizarse con valores de STW (no SOG). En las pruebas del modelo realizadas no se ha dispuesto de las medidas de esta velocidad proporcionadas por las correderas de ambos buques. Se ha asumido que los buques no se ven afectados por corrientes, por lo que  $STW = SOG$ . También se ha probado la alternativa de cálculo de los valores de STW a partir de los datos de distancia, demora y headings del buque propio y del blanco, que funciona correctamente, excepto cuando los buques siguen trayectorias paralelas, como se ha explicado en el apartado 6.5.

En el caso de que los buques dispusieran de las medidas de STW, para poder utilizar en los cálculos de las maniobras la STW del blanco es necesario que éste la transmita, ya que no está dentro de los parámetros dinámicos proporcionados por el AIS. Su valor se puede añadir al mensaje de comunicación nº 54 definido en el apartado 6.3.

En el desarrollo del modelo, el movimiento de los buques y las comunicaciones AIS han sido simuladas. Se han realizado chequeos del comportamiento del modelo frente a algunos fallos de comunicación o de invalidez de datos, mediante, por ejemplo, la desactivación de un blanco o introducción de valores erróneos. Se tendrá que hacer un chequeo más exhaustivo y un cambio de los bloques funcionales de tratamiento de datos AIS (apartado 7.6) en una posterior fase del desarrollo, cuando se puedan utilizar equipos reales.



## 9 Conclusiones y ampliaciones

Se ha desarrollado un modelo de seguridad funcional para la prevención de colisiones entre dos buques, orientado a disminuir la probabilidad de ocurrencia de dos factores peligrosos que figuran entre las principales causas de estos accidentes:

- que se cometan errores en la detección de situaciones críticas, y
- que se cometan errores en la decisión de las maniobras para evitar colisiones.

Con este propósito, las funciones de seguridad definidas se encargan de detectar e identificar el tipo de encuentro peligroso, de sugerir la maniobra que hay que llevar a cabo, en cumplimiento del COLREGs, y de que los operadores de los buques involucrados conozcan y acepten (o no) la maniobra sugerida. Es aplicable a encuentros entre dos buques, el buque propio y cada uno de N blancos (casos 1-1, 1-N).

El sistema que implementa el modelo (sistema PE) puede actuar como un medio disponible para que un buque mantenga una vigilancia adecuada, y proporciona una evaluación de la situación y del riesgo de colisión, en apoyo de la Regla 5 del COLREG: *“Todos los buques mantendrán en todo momento una eficaz vigilancia visual y auditiva, utilizando asimismo todos los medios disponibles que sean apropiados a las circunstancias y condiciones del momento, para evaluar plenamente la situación y el riesgo de abordaje”*.

El sistema presentado establece una comunicación entre los dos buques implicados, para llegar a acuerdos a dos niveles:

- Acuerdos entre los sistemas PE de los dos buques, que garanticen que ambos tienen la misma información dinámica y la misma propuesta de maniobra, obtenida a partir de dicha información.
- Acuerdos entre los operadores (OONWs), que garanticen que ambos aceptan (o no) la maniobra sugerida por el sistema.

La principal novedad de esta propuesta radica en que el sistema permite que los OONWs conozcan de antemano si están de acuerdo o no en las maniobras a realizar y actúen en consecuencia. La posibilidad de compartir y contrastar esta información ayuda a tomar decisiones de forma coherente. Si hay discrepancia, se pueden aumentar los márgenes de seguridad y, en caso de litigio, se puede identificar la decisión errónea.

Para determinar la propuesta de maniobra, se ha realizado un análisis de todos los posibles escenarios y situaciones según COLREGs, el marco legal actual que define las Reglas de rumbo y gobierno que deben aplicarse para evitar situaciones críticas que puedan derivar en colisión. En la bibliografía consultada sobre algoritmos de los sistemas de prevención de colisiones (CAS) se encuentran diferencias en cuanto a los escenarios a considerar y en los parámetros que distinguen entre situaciones: pocos tienen en cuenta el escenario de visibilidad reducida, existe mucha disparidad en el rango de ángulos que distinguen entre situaciones de *head-on* y *crossing*. Es necesario unificar criterios, imprescindible para los CAS de los futuros buques autónomos.

Se han definido los mensajes para la información y acuerdos entre los OONWs que incluyen todos los escenarios y situaciones. Con mensajes estandarizados sin ambigüedades se pueden evitar algunos problemas, como los derivados de una comunicación errónea debida a la falta de un lenguaje común o a un limitado dominio del inglés.

La programación de las funciones de seguridad se lleva a cabo siguiendo principios básicos de las normas de seguridad funcional para el software, y la implementación final sólo requiere un PLC conectado a un AIS clase A en cada buque, y un HMI, implementado en un ordenador personal. El



sistema previsto no interfiere con el funcionamiento del buque en condiciones normales y no supone un coste excesivo.

Ampliaciones del trabajo presentado en esta Memoria, algunos ya comentados en el apartado 8.3.

- A corto plazo. Para completar y validar el prototipo desarrollado, es necesario realizar mejoras en los siguientes aspectos:
  - Comunicaciones. En la versión actual, las comunicaciones AIS están simuladas. El prototipo en una versión posterior debe integrar 2 AIS reales y se deben probar las comunicaciones AIS-PLC. Será necesario incorporar 2 girocompases o sensores de rumbo verdadero, para adquirir los valores de los parámetros Heading y ROT.
  - HMI. Se ha implementado un HMI básico, con versiones CoDeSys y WebVisit. Hay que desarrollar un software de supervisión (SCADA) que facilite las tareas del OONW.
  - Base de datos. Hay que desarrollar un programa para PC de lectura y presentación de la información almacenada por el PLC en la base de datos.
  - El prototipo final debe ser testeado en un entorno real, con personal ajeno al desarrollo del mismo y potencial usuario del sistema final.
- A medio plazo. Es conveniente realizar los siguientes estudios, y a partir de los resultados, incorporar las correspondientes mejoras en el software:
  - Corrección de los efectos de las guiñadas y de errores en los datos dinámicos. Uso de filtros de Kalman en los cálculos de velocidades y rumbos relativos.
  - Mejora de los cálculos de cambios de rumbo o de velocidad para las maniobras, de forma que incluyan unos parámetros dependientes de la dinámica del buque.
  - Sería también conveniente incorporar 2 correderas para adquirir los valores de STW y analizar las diferencias entre los valores medidos y los calculados en el caso de que los buques se vean afectados por corrientes.
  - Análisis de los valores a asignar a LRS, CPASafe, TCPASafe, dPrealert y dAlert, y su dependencia de las características de los buques. Posible deducción de valores a partir de las curvas de evolución de los buques.
  - Conveniencia de añadir más etapas en la secuencia definida para la comunicación entre dos buques cuando se entra en situación de prealerta.
- A largo plazo. Una vez se haya validado el prototipo, y si se prueba su efectividad, se pueden afrontar diversos estudios:
  - El sistema se planteó para reducir el riesgo de colisión entre dos buques, el buque propio y cada uno de N blancos (casos 1-1, 1-N). Se podría analizar si tiene utilidad para escenarios con riesgos de colisiones múltiples (casos N-N). Se esboza a continuación una sugerencia, cuyo estudio requeriría fundamentalmente de la participación de especialistas en inteligencia artificial. El conjunto de N buques pueden, vía AIS, compartir la información dinámica disponible acerca de los blancos en su entorno. Se crearía así un “universo visible global” a partir de la unión de los LRS de los N buques. Con esta información, una aplicación software (un sistema experto) decidiría qué maniobras se han de efectuar y qué buques deben maniobrar para evitar las colisiones. Se trataría de un algoritmo con computación centralizada (N-N-C), y se utilizaría el AIS a modo de VTS para proporcionar a todos los buques las consignas para las maniobras, y para que éstos comuniquen, también vía AIS, la recepción de la consigna y su acuerdo

(o desacuerdo) con la misma. Esta aplicación estaría replicada en los PLCs de todos los buques, con lo que tendríamos un sistema redundante distribuido.

- En este proyecto se utilizan las normas de seguridad funcional (IEC 61508, IEC 61511) como guías de requisitos y buenas prácticas aplicadas en la implementación del sistema PE. Se podría plantear una aplicación más estricta de la normativa, siguiendo directrices (IEC 61508-5, IEC 61508-6, IEC 61511-2) para la definición de procedimientos que evalúen y certifiquen que el sistema funciona de acuerdo con la especificación dada de requisitos de seguridad.



## REFERENCIAS

- AAWA. (2016). *Technologies for marine situational awareness and autonomous navigation. Remote and Autonomous Ships. The next steps*. Rolls-Royce plc. <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-whitepaper-210616.pdf>
- Adiego, B. F., Darvas, D., Vinuela, E. B., Tournier, J. C., Bliudze, S., Blech, J. O., & Suárez, V. M. G. (2015). Applying model checking to industrial-sized PLC programs. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *11*(6), 1400–1410. <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2489184>
- Ahmed, Y.A., Hannan, M.A., Oraby, M.Y., Maimun, A. (2021). COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*, 790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>
- Andrews, J. D., & Dunnett, S. J. (2000). Event-tree analysis using binary decision diagrams. *IEEE Transactions on Reliability*, *49*(2), 230–238. <https://doi.org/10.1109/24.877343>
- Antão, P., & Guedes Soares, C. (2008). Causal factors in accidents of high speed craft and conventional ocean going vessels. *Reliability Engineering & System Safety*, *93*(9), 1292–1304. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.07.010>
- Apostol-Mates, R., & Barbu, A. (2016). Human error—The main factor in marine accidents. “*Mircea Cel Batran*” *Naval Academy Scientific Bulletin*, *XIX*(2), 451–454. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-16-12-068>
- Argüelles, R., Maza, J. A., & Martín, F. (2019). Specification and Design of Safety Functions for the Prevention of Ship-to-Ship Collisions on the High Seas. *The Journal of Navigation*, *72*(1), 53–68. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000553>
- Argüelles, R., Maza, J. A., & Martín, F. (2022). Ship-to-ship dialogues using a finite state machine approach. *Journal of ETA Maritime Science*, Ahead of print. <https://dx.doi.org/10.4274/jems.2022.18853>.
- Argüelles, R., Maza, J. A., Martín, F., & Bartolomé, M. (2021). Ship-to-ship dialogues and agreements for collision risk reduction. *The Journal of Navigation*, *74*(5), 1039–1056. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000553>
- Bauer, N., Engell, S., Huuck, R., Lohmann, S., Lukoschus, B., Remelhe, M., & Stursberg, O. (2004). Verification of PLC Programs Given as Sequential Function Charts. Integration of Software Specification Techniques for Applications in Engineering. *Lecture Notes in Computer Science*, *3147*, 517–540. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-27863-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-540-27863-4_28)
- BOE. (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*. BOE núm. 163, de 09/07/1977. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1977-15605>
- Bole, A., Wall, A., & Norris, A. (2014). *Radar and ARPA Manual Radar and Target Tracking for Professional Mariners, Yachtsmen and Users of Marine Radar* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-68325-8>
- Borkowski, P. (2014). Presentation algorithm of possible collision solutions in a navigational decision support system. *Scientific Journals. Maritime University of Szczecin*, *38* (110), 20–26.
- Boström, M. (2020). Mind the Gap! A quantitative comparison between ship-to-ship communication and intended communication protocol. *Safety Science*, *123*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104567>

- Bureau Veritas. (2019). *Guidelines for autonomous shipping. Guidance Note NI 641 DT R01E*. [https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/641-NI\\_2019-10.pdf](https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/641-NI_2019-10.pdf)
- Burmeister, H.-C., Bruhn, W., Rødseth, Ø. J., & Porathe, T. (2014). Autonomous Unmanned Merchant Vessel and its Contribution towards the e-Navigation Implementation: The MUNIN Perspective. *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy*, *1*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2014.12.002>
- Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, J.-P., & Langard, B. (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. *Accident Analysis & Prevention*, *59*, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.006>
- Cockcroft, A. N. (1982). The circumstances of sea collisions. *The Journal of Navigation*, *35*, 100–112.
- Cockcroft, A. N., & Lameijer, J. (2011). *A Guide to Collision Avoidance Rules: Vol. I*. Butterworth-Heinemann.
- CodeSys. (2021). *CodeSys Engineering*. <https://www.codesys.com/products/codesys-engineering.html>
- DASIS (2011). <https://docplayer.net/29667143-Ais-based-collision-prevention-system.html>
- DASIS (2012). [https://www.researchgate.net/publication/258222113\\_Collision\\_Avoidance\\_System\\_using\\_custom\\_AIS\\_protocols](https://www.researchgate.net/publication/258222113_Collision_Avoidance_System_using_custom_AIS_protocols)
- David, R. (1995). Grafcet: A powerful tool for specification of logic controllers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *3*(3), 253–268. <https://doi.org/10.1109/87.406973>
- Deuter, A. (2013). *Slicing the V-Model—Reduced Effort, Higher Flexibility*. 1–10. <https://doi.org/10.1109/ICGSE.2013.10>
- DMAIB. (2021). *Danish Maritime Accident Reports*. <https://dmaib.com/reports>
- DNV. (2018). *DNV GL class guidelines (CG). Autonomous and remotely operated ships*. <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/cg/2018-09/dnvgl-cg-0264.pdf>
- Du, L., Goerlandt, F., Valdez Banda, O., Huang, Y., Wen, Y., & Kujala, P. (2020). Improving stand-on ship's situational awareness by estimating the intention of the give-way ship. *Ocean Engineering*, *201*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107110>
- Du, L., Valdez Banda, O., Huang, Y., Goerlandt, F., Kujala, P., & Zang, W. (2021). An empirical ship domain based on evasive maneuver and perceived collision risk. *Reliability Engineering & System Safety*, *213*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107752>
- Eliopoulou, E., Papanikolaou, A., & Voulgarellis, M. (2016). Statistical analysis of ship accidents and review of safety level. *Safety Science*, *85*, 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.02.001>
- EMSA. (2021). *Annual overview of marine casualties and incidents 2021*. <http://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4266-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2020.html>
- EU-OSHA. (2009). *The human machine interface as an emerging risk*. <https://data.europa.eu/doi/10.2802/21813>
- Felski, A., Jaskólski, K., & Banyś, P. (2015). Comprehensive Assessment of Automatic Identification System (AIS) Data Application to Anti-collision Manoeuvring. *The Journal of Navigation*, *68*(04), 697–717. <https://doi.org/10.1017/S0373463314000897>

- Fiorini, P., & Shiller, Z. (1998). Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *The International Journal of Robotic Research*, *17*(7), 760–772. <https://doi.org/10.1177/027836499801700706>
- Fossen, T. I., & Pérez, T. (2009). Kalman filtering for positioning and heading control of ships and offshore rigs. *IEEE Control Systems Magazine*, *29*(6), 32–46. <https://doi.org/10.1109/MCS.2009.934408>
- García Maza, J. (2000). *El factor humano en la toma de decisiones de los oficiales de puente en las tareas de navegación*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/10803/7007>
- GMC (2021). 4<sup>th</sup> Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation. November 18<sup>th</sup>-19<sup>th</sup>, 2021. Online. <https://globalmaritimeconference.org/en/general-information.html>
- Goerlandt, F., & Montewka, J. (2015). Maritime transportation risk analysis: Review and analysis in light of some foundational issues. *Reliability Engineering & System Safety*, *138*, 115–134. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.01.025>
- He, Y., Jin, Y., Huang, L., Xiong, Y., Chen, P., & Mou, J. (2017). Quantitative analysis of COLREG rules and seamanship for autonomous collision avoidance at open sea. *Ocean Engineering*, *140*, 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.029>
- Hibiscus-Hyundai. (2013). *Report on the investigation of the collision between ACX Hibiscus and Hyundai Discovery*. [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c6f6ce5274a4290000029/ACXHibiscus-HyundaiDiscovery\\_Report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c6f6ce5274a4290000029/ACXHibiscus-HyundaiDiscovery_Report.pdf)
- Hilgert, H. (1983). Defining the close-quarters situation at sea. *The Journal of Navigation*, *36*(3), 454–461. <https://doi.org/doi:10.1017/S0373463300039801>
- Hilgert, H., & Baldauf, M. (1997). A common risk model for the assessment of encounter situations on board ships. *German Journal of Hydrography*, *49*(4), 531–542.
- Hollifield, B., & Habibi, E. (2011). *Alarm management: A comprehensive guide: Practical and proven methods to optimize the performance of alarm management systems*. ISA.
- Höyhty, M., Huusko, J., Kiviranta, M., Solberg, K., & Rokka, J. (2017). *Connectivity for autonomous ships: Architecture, use cases, and research challenges*. 345–350. <https://doi.org/10.1109/ICTC.2017.8191000>
- Hyundai-Sky. (2005). *Report on the investigation of the collision between Hyundai Dominion and Sky Hope in the East China Sea*. [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c70b8ed915d4c100000a9/Hyundai\\_Sky\\_Hope.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c70b8ed915d4c100000a9/Hyundai_Sky_Hope.pdf)
- IALA. (2016). *IALA Guideline No. 1082 On an Overview of AIS*. <https://www.iala-aism.org/product/an-overview-of-ais-1082/>
- IALA. (2018). *Report 18591.620/TECH\_DOC/2. Encounter model*. <http://www.iala-aism.org/wiki/iwrap/images/1/1f/Encounter.pdf>
- IEC 61508. (2010). *IEC 61508. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*. <https://webstore.iec.ch/publication/22273>
- IEC 61511. (2018). *IEC 61511. Functional safety—Safety instrumented systems for the process industry sector*. <https://webstore.iec.ch/publication/60766>

- IEC 62061. (2021). *IEC 62061. Safety of machinery - Functional safety of safety-related control systems*. <https://webstore.iec.ch/publication/59927>
- IEC 62682. (2014). *IEC 62682. Management of alarm systems for the process industries*. <https://webstore.iec.ch/publication/7363>
- IGS. (2019). *Código internacional de gestión de la seguridad operacional del buque y la prevención de la contaminación*. European Union Law. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1474972096677&uri=CELEX:02006R0336-20081211>
- IMarEst. (2018). *Autonomous Shipping – Putting the human back in the headlines*. Institute of Marine Engineering, Science and Technology. <https://www.imarest.org/reports/1055-autonomous-shipping-putting-the-human-back-in-the-headlines-ii>
- IMO. (2002). *Standards for ship manoeuvrability. Resolution MSC.137(76)*, 16 December 2002. International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.137\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.137(76).pdf)
- IMO. (2004). *Performance standards for the presentation of navigation-related information on shipborne navigational displays. Resolution MSC.191(79)*. International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.918\(22\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.918(22).pdf)
- IMO. (2010). *Adoption of performance standards for bridge alert management. Resolution MSC.302(87)*. International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.302\(87\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.302(87).pdf)
- IMO. (2015). *Revised guidelines for the onboard operational use of shipborne automatic identification systems (AIS). Resolution A.1106(29)*. International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1106\(29\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1106(29).pdf)
- IMO. (2017). *Strategic plan for the organization for the six-year period 2018 to 2023. Resolution A.1110(30)*. International Maritime Organization. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1110\(30\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1110(30).pdf)
- IMO. (2018). *Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. Ref—MSC-MEPC.2-Circ.12*. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/MSC-MEPC%202-Circ%2012-Rev%202.pdf>
- IMO. (2020). *SOLAS Consolidated Edition 2020*. International Maritime Organization.
- IMO. (2021). *Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS). MSC.1/Circ.1638*. 3 June 2021. International Maritime Organization.
- ISM. (2020). *Instructions for the Guidance of Surveyors on International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention (The ISM Code) MSIS02*. Maritime and Coastguard Agency. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/508080/ISM\\_I2S\\_Feb\\_2015\\_Updated\\_150316.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/508080/ISM_I2S_Feb_2015_Updated_150316.pdf)

- ITU. (2014). *Recommendation ITU-R M.1371-5 Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band*. International Telecommunications Union. <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1371-5-201402-I/en>
- John, K. H., & Tiegelkamp, M. (2010). *IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12015-2>
- JTSB. (2020). *Japan Transport Marine Accident and Incident Reports*. <http://www.mlit.go.jp/jtsb/marrep.html>
- Katre-Statengracht. (2014). *Safety investigation into the collision between the Maltese registered general cargo KATRE and the Dutch registered general cargo STATENGRACHT*. [http://mtip.gov.mt/en/document repository/msiu documents/investigations 2013/my katre\\_final safety investigation report.pdf](http://mtip.gov.mt/en/document repository/msiu documents/investigations 2013/my katre_final safety investigation report.pdf)
- Kim, D., Hirayama, K., & Okimoto, T. (2017). Distributed stochastic search algorithm for multi-ship encounter situations. *The Journal of Navigation*, **70**(4), 699–718. <https://doi.org/10.1017/s037346331700008x>
- Kontovas, C. A., & Psaraftis, H. N. (2009). Formal safety assessment: A critical review. *Marine Technology*, **46**(1), 45–59. Scopus.
- Kooji, C., Colling, A., & Benson, C. (2018). When Will Autonomous Ships Arrive? A Technology Forecasting Perspective. *INEC Conference*. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3191736](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3191736)
- Kota Duta-Tanya Karpinskaya. (2014). *Marine Accident between Container ship 'KOTA DUTA' and Cargo ship 'TANYA KARPINSKAYA' (Collision). Investigation report*. [http://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-mar\\_report/2014/2012tk0003e.pdf](http://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-mar_report/2014/2012tk0003e.pdf)
- Kujala, P., Hänninen, M., Arola, T., & Ylitalo, J. (2009). Analysis of the marine traffic safety in the Gulf of Finland. *Reliability Engineering & System Safety*, **94**(8), 1349–1357. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.02.028>
- Last, P., Bahlke, C., Hering-Bertram, M., & Linsen, L. (2014). Comprehensive Analysis of Automatic Identification System (AIS) Data in Regard to Vessel Movement Prediction. *The Journal of Navigation*, **67**(05), 791–809. <https://doi.org/10.1017/S0373463314000253>
- Lazarowska, A. (2015). Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation. *The Journal of Navigation*, **68**(02), 291–307. <https://doi.org/10.1017/S0373463314000708>
- Lee, W. S., Grosh, D. L., Tillman, F. A., & Lie, C. H. (1985). Fault Tree Analysis, Methods, and Applications &#2013; A Review. *IEEE Transactions on Reliability*, **R-34**(3), 194–203. <https://doi.org/10.1109/TR.1985.5222114>
- Li, S., Liu, J., & Negenborn, R. R. (2019). Distributed coordination for collision avoidance of multiple ships considering ship maneuverability. *Ocean Engineering*, **181**, 212–226. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.054>
- Lopez-Santander, A., & Lawry, J. (2017). An Ordinal Model of Risk Based on Mariner's Judgement. *The Journal of Navigation*, **70**(2), 309–324. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000576>
- Luo, M., & Shin, S.-H. (2019). Half-century research developments in maritime accidents: Future directions. *Accident Analysis & Prevention*. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.010>



- Lyu, H., & Yin, Y. (201). COLREGS-Constrained Real-Time Path Planning for Autonomous Ships Using Modified Artificial Potential Fields. *The Journal of Navigation*, *72*, 588-608. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000796>
- MAIB. (2020). *GOV.UK Marine Accident Investigation Branch Reports*. <https://www.gov.uk/maib-reports>
- MASWRG. (2019). *Maritime Autonomous Surface Ships Industry Conduct Principles & Code of Practice*. Maritime UK Autonomous Systems Regulatory Working Group. <https://www.maritimeuk.org/media-centre/publications/maritime-autonomous-surface-ships-industry-conduct-principles-code-practice/>
- Mathur, S., & Malik, S. (2010). Advancements in the V-Model. *International Journal of Computer Applications*, *1*(12), 30–35. <https://doi.org/10.5120/266-425>
- MatLab. (2021). *OPC Toolbox*. <https://es.mathworks.com/products/opc.html>
- Mazaheri, A., Montewka, J., Nisula, J., & Kujala, P. (2015). Usability of accident and incident reports for evidence-based risk modeling – A case study on ship grounding reports. *Safety Science*, *76*, 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.019>
- MCA. (2016). *Navigation: Watchkeeping Safety–Use of VHF Radio and AIS*. Maritime and Coastguard Agency. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/649865/Amendment\\_1\\_MGN\\_324\\_M\\_F\\_Watchkeeping\\_Safety\\_-\\_Use\\_of\\_VHF\\_Radio\\_and\\_AIS.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/649865/Amendment_1_MGN_324_M_F_Watchkeeping_Safety_-_Use_of_VHF_Radio_and_AIS.pdf)
- MEGURI. (2022). *MEGURI 2040*. <https://www.nippon-foundation.or.jp/en/news/articles/2022/20220118-66716.html>
- Montewka, J., Ehlers, S., Goerlandt, F., Hinz, T., Tabri, K., & Kujala, P. (2014). A framework for risk assessment for maritime transportation systems—A case study for open sea collisions involving RoPax vessels. *Reliability Engineering & System Safety*, *124*, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.11.014>
- Montewka, J., Hinz, T., Kujala, P., & Matusiak, J. (2010). Probability modelling of vessel collisions. *Reliability Engineering & System Safety*, *95*(5), 573–589. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.01.009>
- Montewka, J., Krata, P., Goerlandt, F., Mazaheri, A., & Kujala, P. (2011). Marine traffic risk modelling—An innovative approach and a case study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 225–307. <https://doi.org/10.1177/1748006X11399988>
- MSIU. (2020). *Gov.MT Accident and Incident Safety Investigation*. <https://mtip.gov.mt/en/Pages/MSIU/Marine-Safety-Investigation-Unit.aspx>
- NFAS. (2021). *Norwegian Forum for Autonomous Ships*. <https://nfas.autonomous-ship.org/>
- NMEA 0183. (2020). *NMEA 0183 Standard For Interfacing Marine Electronic Devices*. National Marine Electronics Association. [https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA\\_0183\\_Standard](https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA_0183_Standard)
- NMEA 2000. (2020). *NMEA 2000 Standard for Serial-Data Networking of Marine Electronic Devices*. National Marine Electronics Association. [https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA\\_2000](https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA_2000)
- OPC. (2021). *OPC Foundation, Open Platform Communications*. <https://www.opcfoundation.org/>

- Oracle. (2021). *MySQL, The world's most popular open source database*. <https://www.mysql.com/>
- Perera, L. P., Carvalho, J. P., & Guedes Soares, C. (2012). Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy-Bayesian Decision/Action Formulation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, *37*(2), 204–219. <https://doi.org/10.1109/JOE.2012.2184949>
- Perera, L. P., Ferrari, V., Santos, F. P., Hinostroza, M. A., & Guedes Soares, C. (2015). Experimental Evaluations on Ship Autonomous Navigation and Collision Avoidance by Intelligent Guidance. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, *40*(2), 374–387. <https://doi.org/10.1109/JOE.2014.2304793>
- Phoenix Contact. (2021). *Software de programación PcWorx*. <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/es/?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2985385&library=eses&pcck=P-19-05-01&tab=1&selectedCategory=ALL>
- Pietrzykowski, Z., Wolejsza, P., & Borkowski, P. (2017). Decision Support in Collision Situations at Sea. *The Journal of Navigation*, *70*, 447–464. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000746>
- Primorac, B., & Parunov, J. (2016). *Review of statistical data on ship accidents*, *3*, 809–814. <http://repozitorij.fsb.hr/7005/1/Review%20of%20statistical%20data%20on%20ship%20accidents.pdf>
- Psaraftis, H. N. (2012). Formal Safety Assessment: An updated review. *Journal of Marine Science and Technology*, *17*(3), 390–402. <https://doi.org/10.1007/s00773-012-0175-0>
- Ramos, M. A., Utne, I. B., & Mosleh, A. (2019). Collision avoidance on maritime autonomous surface ships: Operators' tasks and human failure events. *Safety Science*, *116*, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.038>
- Raymond, E. S. (2016). *AIVDM/AIVDO protocol decoding*. <https://gpsd.gitlab.io/gpsd/AIVDM.html>
- Rosqvist, T., & Tuominen, R. (2004). Qualification of Formal Safety Assessment: An exploratory study. *Safety Science*, *42*(2), 99–120. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00005-5)
- Rothblum, A. (2000, October). *Human error and marine safety*. National Safety Council Congress and Expo, Orlando, Florida.
- Sánchez-Beaskoetxea, J., Basterretxea-Iribar, I., Sotés, I., & Machado, M. de las M. M. (2021). Human error in marine accidents: Is the crew normally to blame? *Maritime Transport Research*, *2*, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100016>
- SHK. (2020). *Swedish Accident Investigation Authority, Maritime accidents and serious incidents*. <https://www.havkom.se/en/om-shk/civil-sjoefart>
- Silva, M. (2018). On the history of discrete event systems. *Annual Reviews in Control*, *45*, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.03.004>
- SIMAROS. (2017). *Safe Implementation of Autonomous and Remote Operation of Ships*. <https://prosjektbanken.forskningsradet.no/en/project/FORISS/269465?Kilde=FORISS&distribution=Ar&chart=bar&calcType=funding&Sprak=no&sortBy=date&sortOrder=desc&resultCount=30&offset=690&TemaEmne.2=Privat+sektor&source=FORISS&projectId=259869>
- Sinokor Incheon–Toshimaru. (2017). *Marine Accident between Container Ship “SINOKOR INCHEON” and Fishing Vessel “TOSHIMARU” (Collision). Investigation report*. [http://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-mar\\_report/2017/2016tk0002e.pdf](http://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-mar_report/2017/2016tk0002e.pdf)
- Sotiralis, P., Ventikos, N. P., Hamann, R., Golyshev, P., & Teixeira, A. P. (2016). Incorporation of human factors into ship collision risk models focusing on human centred design aspects.

- Reliability Engineering & System Safety*, **156**, 210–227.  
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.08.007>
- Spring-Josephine. (2013). *Spring Glory/Josephine Mærsk Collision*.  
<https://dmaib.dk/media/9128/spring-glory-and-josephine-maersk-collision-on-5-june-2012.pdf>
- Stauffer, T., & Clarke, P. (2016). Using alarms as a layer of protection. *Process Safety Progress*, **35**(1), 76–83. <https://doi.org/10.1002/prs.11739>
- Summers, A. E. (2003). Introduction to layers of protection analysis. *Journal of Hazardous Materials*, **104**(1–3), 163–168. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00242-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00242-5)
- Swain, A. D. (1990). Human reliability analysis: Need, status, trends and limitations. *Reliability Engineering & System Safety*, **29**(3), 301–313. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(90\)90013-D](https://doi.org/10.1016/0951-8320(90)90013-D)
- Szlapczynski, R. (2013). Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories Within Traffic Separation Schemes. *The Journal of Navigation*, **66**(1), 65–81.  
<https://doi.org/doi:10.1017/S0373463312000422>
- Szlapczynski, R., & Krata, P. (2018). Determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in severe weather conditions. *Ocean Engineering*, **158**, 263–274.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.092>
- Szlapczynski, R., Krata, P., & Szlapczynska, J. (2018). Ship domain applied to determining distances for collision avoidance manoeuvres in give-way situations. *Ocean Engineering*, **165**, 43–54.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.041>
- Szlapczynski, R., & Szlapczynska, J. (2015). A Target Information Display for Visualising Collision Avoidance Manoeuvres in Various Visibility Conditions. *The Journal of Navigation*, **68**(06), 1041–1055. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000296>
- Tam, C., & Bucknall, R. (2010). Collision risk assessment for ships. *Journal of Marine Science and Technology*, **15**(3), 257–270. <https://doi.org/10.1007/s00773-010-0089-7>
- Tijardovic, I. (2009). The Use of AIS for Collision Avoidance. *The Journal of Navigation*, **62**(1), 168–172. <https://doi.org/10.1017/S0373463308005055>
- Tsai, C.-C., Chang, J.-R., & Chen, C.-L. (2017). Manoeuvrability-based critical time for preventing close-quarters situations. *Journal of Marine Science and Technology*, **25**(3), 249–258.  
<https://doi.org/10.6119/JMST-016-1207-2>
- Tsimplis, M., & Papadas, S. (2019). Information Technology in Navigation: Problems in Legal Implementation and Liability. *The Journal of Navigation*, **72**(4), 833–849.  
<https://doi.org/10.1017/S0373463318001030>
- Tsou, M.-C., Kao, S.-L., & Su, C.-M. (2010). Decision Support from Genetic Algorithms for Ship Collision Avoidance Route Planning and Alerts. *The Journal of Navigation*, **63**(1), 167–182.  
<https://doi.org/10.1017/S037346330999021X>
- Tu, E., Zhang, G., Rachmawati, L., Rajabally, E., & Huang, G.-B. (2018). Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to Methodology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **19**(5), 1159–1582.  
<https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2724551>
- Uğurlu, Ö., Köse, E., Yıldırım, U., & Yüksekıldız, E. (2013). Marine accident analysis for collision and grounding in oil tanker using FTA method. *Maritime Policy & Management*, **42**, 163–185.  
<https://doi.org/10.1080/03088839.2013.856524>

- UNCTAD. (2021). Review of maritime transport 2021. *United Nations Conference on Trade and Development*. [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021\\_en\\_0.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en_0.pdf)
- Ung, S.-T. (2019). Evaluation of human error contribution to oil tanker collision using fault tree analysis and modified fuzzy Bayesian Network based CREAM. *Ocean Engineering*, *179*, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.031>
- Weng, J., Yang, D., Chai, T., & Fu, S. (2019). Investigation of occurrence likelihood of human errors in shipping operations. *Ocean Engineering*, *182*, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.083>
- Wróbel, K. (2021). Searching for the origins of the myth: 80% human error impact on maritime safety. *Reliability Engineering & System Safety*, *216*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107942>
- Xu, Q., & Wang, N. (2014). A Survey on Ship Collision Risk Evaluation. *Promet – Traffic & Transportation*, *26*(6), 475–486. <https://doi.org/10.7307/ptt.v26i6.1386>
- YARA. (2021). *Yara Birkeland*. <https://www.yara.com/news-and-media/press-kits/yara-birkeland-press-kit/>
- Yildirim, U., Başar, E., & Uğurlu, Ö. (2019). Assessment of collisions and grounding accidents with human factors analysis and classification system (HFACS) and statistical methods. *Safety Science*, *119*, 412–425. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.09.022>
- Zaccone R. (2021). COLREG-Compliant Optimal Path Planning for Real-Time Guidance and Control of Autonomous Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(4), 405. <https://doi.org/10.3390/jmse9040405>
- Zhang, J., Zhang, D., Yan, X., Haugen, S., & Guedes Soares, C. (2015). A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs. *Ocean Engineering*, *105*, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.054>



## Anexo 1. Abreviaturas y definiciones

**ACK:** *Acknowledgment*. Acuse de recibo. Mensaje que el destino de la comunicación envía al origen de esta para confirmar la recepción de un mensaje.

**AIS:** *Automatic Identification System*. Sistema de Identificación Automática universal capaz de intercambiar información entre el barco propio y otros barcos o estaciones costeras.

**ARPA:** *Automatic RADAR Plotting Aid*. Equipo que combina una pantalla de RADAR tradicional con un dispositivo de trazado controlado por computador, que muestra información de ayuda para la navegación.

**BPCS:** *Basic Process Control System*. Sistema que responde a las señales de entrada del proceso y sus equipos asociados, otros sistemas programables y/o de un operador, y genera señales de salida que hacen que el proceso y sus equipos asociados funcionen de la manera deseada y dentro de los límites de producción normales (norma IEC 61511-1).

**CAN:** *Controller Area Network*. Protocolo de comunicaciones basado en una topología bus para la transmisión de mensajes en entornos distribuidos.

**CAS:** *Collision Avoidance System*. Sistema diseñado para prevenir o reducir la gravedad de una colisión.

**COLREGs:** *Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*. Reglamento Internacional para la Prevención de Abordajes (RIPA).

**CPA:** *Closest Point of Approach*. Mínima distancia a la que van a pasar dos barcos.

**DSS:** *Decision Support System*. Sistema informático que ayuda en el proceso de toma de decisiones.

**ECDIS:** *Electronic Chart Display and Information System*. Sistema de información geográfica utilizado para la navegación marítima, que cumple la normativa de la OMI como alternativa a las cartas náuticas de papel.

**ETA:** *Event Tree Analysis*. Método inductivo de análisis de riesgos que permite estudiar procesos secuenciales a partir de sucesos iniciales indeseados, y valorar la efectividad de las medidas preventivas existentes.

**EUC:** *Equipment Under Control*. Equipo, maquinaria, aparatos o planta que se utiliza para la fabricación, proceso, transporte u otras actividades.

**FBD:** *Function Block Diagram*. Diagrama de Bloques Funcionales. Lenguaje de programación de PLCs incluido en la norma IEC 61131-3. Lenguaje gráfico que describe mediante bloques lógicos las relaciones entre variables.

**FMEA:** *Failure Mode and Effect Analysis*. Método sistemático de análisis de los potenciales fallos de los componentes de un proceso/producto, y de identificación de sus efectos sobre el mismo.

**FSA:** *Formal Safety Assessment*. Metodología introducida por la IMO destinada a mejorar la seguridad marítima mediante el uso del análisis de riesgos y la evaluación costo-beneficio.

**FTA:** *Fault Tree Analysis*. Método deductivo para la identificación de los sucesos o cadena de sucesos que pueden conducir a un accidente o fallo del sistema.

**FVL:** *Full Variability Languages*. Lenguajes de programación que proporcionan la capacidad de implementar una amplia variedad de funciones y aplicaciones.

GPS: *Global Positioning System*. Sistema basado en una red de satélites que permite determinar en toda la Tierra la posición de un objeto.

HAZOP: *HAZard and OPerability studies*. Método de identificación de riesgos basado en la premisa de que los accidentes o fallos de operación se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto a los parámetros normales de operación.

HMI: *Human Machine Interface*. Sistema que permite la interfaz entre la persona y la máquina, diseñado para que la persona pueda supervisar y controlar el funcionamiento del proceso/máquina.

HRA: *Human Reliability Analysis*. Técnicas de análisis de la fiabilidad humana.

IL: *Instruction List*. Lista de instrucciones. Lenguaje de programación de PLCs incluido en la norma IEC 61131-3. Lenguaje literal similar a los lenguajes ensambladores de bajo nivel.

IMO (OMI): *International Maritime Organization* (Organización Marítima Internacional). Organismo especializado de las Naciones Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y de prevenir la contaminación del mar por los buques.

INS: *Inertial Navigation System*. Sistema de ayuda a la navegación que utiliza un computador, acelerómetros y giróscopos para determinar la posición, orientación, y velocidad de un objeto en movimiento sin necesidad de referencias externas.

IPL: *Independent Protection Layer*. Capa de protección según la metodología LOPA.

ISM Code: *International Safety Management Code*. Código Internacional de Gestión de la Seguridad (IGS), norma internacional para la explotación segura de los buques y la prevención de la contaminación.

ITU: *International Telecommunication Union*. Organismo de las Naciones Unidas especializado en las tecnologías de la información y la comunicación.

LD: *Ladder Diagram*. *Diagrama de Escalera*. Lenguaje de programación de PLCs incluido en la norma IEC 61131-3. Lenguaje gráfico que se asemeja a la estructura de un circuito eléctrico.

LOPA: *Layers Of Protection Analysis*. Metodología de análisis y determinación de la contribución a la reducción del nivel de riesgo de un proceso de las capas de protección existentes.

LVL: *Low Variability Languages*. Lenguajes de programación, textuales o gráficos, para autómatas programables, con un rango de capacidades limitado.

MARPOL: *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*. Convenio internacional sobre la prevención de la contaminación del medio marino por los buques a causa de factores de funcionamiento o accidentales.

MASS: *Maritime Autonomous Surface Ship*. Buque que, en mayor o menor grado, puede navegar sin depender de la interacción humana.

NMEA: *National Marine Electronics Association*. Organización de comercio electrónico estadounidense que establece estándares de comunicación entre dispositivos electrónicos marinos.

OONW: *Officer in charge Of a Navigational Watch*. Oficial encargado de la guardia de navegación.

OPC: *Open Platform Communications*. Estándar de comunicación para el intercambio de datos en el campo de la automatización industrial. Es independiente de la plataforma y garantiza el flujo continuo de información entre los dispositivos de múltiples proveedores.

PC: *Personal Computer*. Computador diseñado inicialmente para ser utilizado por una sola persona.

PFD (PFD<sub>avg</sub>): *Probability of Failure on Demand (average)*. Probabilidad (probabilidad media) de disfunción peligrosa bajo demanda.

PGN: *Parameter Group Number*. Número que identifica un grupo de datos transmitidos en una red NMEA 2000.

PID: controlador que combina las acciones de control Proporcional, Integral y Derivativa para producir una señal de control que lleve a la variable de salida de un lazo de retroalimentación al valor deseado.

PLC: *Programmable Logic Controller*. Autómata programable, computador diseñado para ser utilizado en la automatización de procesos industriales electromecánicos.

POU: *Program Organization Unit*. Se corresponde con los programas (PRGs), funciones (FUs), y bloques de funciones (FBs) dentro del estándar IEC 61131-3.

RADAR: *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging. Sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles.

RCT: *Risk Contribution Tree*. Modelo conceptual de riesgo, que puede construirse de la combinación de un FTA, que identifica las causas, y un ETA que analiza las consecuencias.

RRF: *Risk Reduction Factor*. Definido como  $1/PFD_{avg}$ , el número de veces que se reduce el riesgo como resultado de la aplicación de una medida preventiva o protectora.

SCADA: *Supervisory Control And Data Acquisition*. Aplicación software para supervisión de procesos.

SFC: *Sequential Function Chart*. Gráfico de Funciones Secuenciales. Lenguaje de programación de PLCs incluido en la norma IEC 61131-3, que permite la descripción gráfica del comportamiento secuencial de un programa de control.

SIF: *Safety Instrumented Function*. Función de seguridad con un nivel de integridad de seguridad especificado.

SIL: *Safety Integrity Level*. Valor discreto (1, 2, 3 o 4) que indica la integridad de seguridad requerida o proporcionada por un sistema. El nivel 4 tiene el grado más elevado de integridad de seguridad y el nivel 1 el más bajo.

SIS: Sistema instrumentado de seguridad. Sistema instrumentado usado para realizar una o más funciones instrumentadas de seguridad, según la norma IEC 61511.

SMCP: *Standard Marine Communication Phrases*. Frases normalizadas de la OMI para las comunicaciones marítimas.

SOG: *Speed Over Ground*. Velocidad del buque sobre el fondo.

SOLAS: *Safety Of Life At Sea*. Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar.

Sistema E/E/PE: Sistema Eléctrico/Electrónico/Programable Electrónico. Sistema utilizado para implementar funciones de seguridad, según la norma IEC 61508.



ST: *Structured Text*. Texto Estructurado. Lenguaje de programación de PLCs incluido en la norma IEC 61131-3. Lenguaje literal de alto nivel basado en el lenguaje Pascal.

STCW: *International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers*. Convenio internacional sobre normas de formación, titulación y guardia para la gente de mar.

STW: *Speed Through the Water*. Velocidad del buque sobre el agua.

TCPA: *Time to CPA*. Tiempo que falta para alcanzar la distancia mínima de aproximación, si los buques mantienen rumbo y velocidad constantes.

TDMA: *Time-Division Multiple Access*. Multiplexación por división de tiempo, técnica que permite la transmisión de señales digitales distribuyendo las unidades de información en ranuras ("slots") alternas de tiempo, proporcionando acceso múltiple a un canal de transmisión.

VHF: *Very High Frequency*. Banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 30 MHz a 300 MHz.

VO: *Velocity Obstacle*. En planificación del movimiento, un VO es el conjunto de todas las velocidades de un objeto dinámico que resultarán en una colisión con otro objeto, asumiendo que éste mantiene su velocidad actual.

VTS: *Vessel Traffic Service*. Servicio de control del tráfico marítimo, sistema que controla el tráfico de buques, establecido por un puerto o la autoridad marítima.

## Anexo 2. Simulación del movimiento y velocidad de una embarcación

### Modelo para el cambio del rumbo

El modelo de maniobrabilidad de la embarcación debe venir representado por la siguiente función de transferencia:

$$\frac{\dot{\Psi}}{\delta} = \frac{K}{1 + Ts} \quad (1)$$

donde:

- $\dot{\Psi}$  es el índice de giro de la embarcación, en grados por segundo
- $\delta$  es el ángulo real del timón, en grados
- K es la constante de capacidad de giro de la embarcación en segundos<sup>-1</sup>
- T es la constante de tiempo de la embarcación, en segundos
- s es el operador de Laplace, en segundos<sup>-1</sup>

K y T deben convertirse desde K' y T' en la forma siguiente:

$$K = \frac{K'}{a}, \quad T = \frac{T'}{a}, \quad a = \frac{L}{v} \quad (2)$$

- K' es la capacidad de giro del índice de maniobrabilidad no dimensional, K'=1
- T' es la capacidad de mantener el rumbo del índice de maniobrabilidad no dimensional, T'=1
- L es la eslora de la embarcación, en metros
- v es la velocidad, en metros por segundo

Ejemplos de L/v se dan en la siguiente tabla:

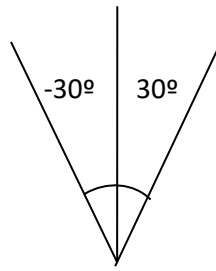
Tipo de embarcación	L	v	a
portacontenedor	230	11.31	20.3
portacontenedor	273	11.82	23.1
granelero	259	7.20	36.0
Transporte de LPG	212	8.22	25.8
VLCC	308	7.92	38.9

El modelo de motor de gobierno debe basarse en la expresión siguiente:

$$\frac{\delta}{\delta^*} = \frac{1}{1 + T_E s} \quad (3)$$

donde:

- $\delta$  es el ángulo del timón real, en grados;
- $\delta^*$  es el ángulo del timón ordenado, en grados;
- T<sub>E</sub> es la constante de tiempo del motor de gobierno, en segundos. T<sub>E</sub> = 2,5 segundos.
- $\delta^*$  estará comprendido entre -30° y 30°;



Dado que  $\dot{\Psi}(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt}$ , la transformada de Laplace es  $\dot{\Psi}(s) = s\Psi(s)$

Sustituyendo en (1):

$$\frac{\Psi}{\delta} = \frac{K}{s(1+Ts)} \quad (4)$$

De (3):  $\delta^* = \delta(1+2.5s)$ , y sustituyendo en (4):

$$\frac{\Psi}{\delta^*} = \frac{K}{s(1+Ts)(1+2.5s)} \quad (5)$$

Sustituyendo (2) en (5):

$$G(s) = \frac{\Psi}{\delta^*} = \frac{0.4}{s(s+0.4)(s+a)} \quad (6)$$

Expresión que da la función de transferencia que relaciona el giro de la embarcación ( $\Psi$ ) con el ángulo de timón ordenado ( $\delta^*$ ), ambos en grados.

La función de transferencia discreta (transformada Z) correspondiente será:

$$G(z) = (1-z^{-1}) \sum_{\text{polos } \frac{G(s)}{s}} \text{Res} \left[ \frac{G(s)}{s} \frac{1}{1-e^{Ts}z^{-1}} \right] \quad (7)$$

donde T representa el periodo de muestreo.

La función  $G(s)/s$  tiene cuatro polos reales, en  $s=-a$ ,  $s=-0.4$  y un polo doble para  $s=0$ .

$$\text{Res} \left[ \frac{G(s)}{s} \frac{1}{1-e^{Ts}z^{-1}} \right]_{p=-a} = \frac{0.4}{a^2(0.4-a)(1-e^{-aT}z^{-1})}$$

$$\text{Res} \left[ \frac{G(s)}{s} \frac{1}{1-e^{Ts}z^{-1}} \right]_{p=-0.4} = \frac{-1}{0.4(0.4-a)(1-e^{-0.4T}z^{-1})}$$

polo doble en  $s=0$  ( $m=2$ ):

$$\frac{1}{(m-1)!} \frac{d^{m-1}}{ds^{m-1}} \left[ \frac{0.4}{(s+a)(s+0.4)(1-e^{Ts}z^{-1})} \right]_{s=0} = \frac{-(a+0.4) + z^{-1}(a+0.4+0.4aT)}{0.4a^2(1-z^{-1})^2}$$

$$G(z) = \frac{0.4(1-z^{-1})}{a^2(0.4-a)(1-e^{-aT}z^{-1})} - \frac{1-z^{-1}}{0.4(0.4-a)(1-e^{-0.4T}z^{-1})} + \frac{-(a+0.4)+z^{-1}(a+0.4+0.4aT)}{0.4a^2(1-z^{-1})} \quad (8)$$

Agrupando términos en (8):

$$G(z) = \frac{N_1 z^{-1} + N_2 z^{-2} + N_3 z^{-3}}{D_0 + D_1 z^{-1} + D_2 z^{-2} + D_3 z^{-3}} = \frac{\Psi(z)}{\delta^*(z)} \quad (9)$$

Obtención de los valores de los coeficientes  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  y  $D_3$ :

$$a = \frac{L}{v}$$

$$CTE = 0.4a^2(0.4-a)$$

$$N_1 = \frac{-a^2 e^{-0.4T} + 0.16 e^{-aT} + a^2(1-0.4T) + 0.16aT - 0.16}{CTE}$$

$$Aux2 = e^{-T(0.4+a)}(a^2 - 0.16) + e^{-aT}(a^2(0.4T-1) - 0.16aT - 0.16);$$

$$N_2 = \frac{Aux2 + e^{-0.4T}(a^2(1+0.4T) - 0.16aT + 0.16) - a^2 + 0.16}{CTE}$$

$$N_3 = \frac{-0.16 e^{-0.4T} + a^2 e^{-aT} + e^{-T(0.4+a)}(0.16 + 0.16aT - a^2(1+0.4T))}{CTE}$$

$$D_0 = 1;$$

$$D_1 = -(1 + e^{-aT} + e^{-0.4T});$$

$$D_2 = e^{-0.4T} + e^{-aT} + e^{-T(0.4+a)}$$

$$D_3 = -e^{-T(0.4+a)}$$

La ecuación en diferencias:

$$\psi_k = N_1 \delta_{k-1}^* + N_2 \delta_{k-2}^* + N_3 \delta_{k-3}^* - (D_1 \psi_{k-1} + D_2 \psi_{k-2} + D_3 \psi_{k-3}) \quad (10)$$

El ángulo de giro de la embarcación en el instante  $k$  ( $\psi_k$ ) es función del ángulo ordenado y del ángulo de giro en los tres muestreos anteriores:

$$(\delta_{k-1}^*, \delta_{k-2}^*, \delta_{k-3}^*, \psi_{k-1}, \psi_{k-2} \text{ y } \psi_{k-3}).$$

### Modelo para la variación de la velocidad

Para simular los cambios de la velocidad del buque en función de la velocidad ordenada, tomamos como modelo del buque la función de transferencia siguiente:

$$G(s) = \frac{Vreal(s)}{Vord(s)} = \frac{B}{B+s} \quad (11)$$

donde:

- $B = K/L$
- $K =$  una constante
- $L =$  eslora del buque

La función de transferencia discreta es:

$$G(z) = (1 - z^{-1}) \sum_{\text{polos } \frac{G(s)}{s}} \text{Res} \left[ \frac{G(s)}{s} \frac{1}{1 - e^{Ts} z^{-1}} \right] \quad (12)$$

donde T representa el periodo de muestreo.

La función  $G(s)/s$  tiene dos polos reales, en  $s = -B$  y en  $s = 0$ .

$$\begin{aligned} \text{Res} \left[ \frac{G(s)}{s} \frac{1}{1 - e^{Ts} z^{-1}} \right]_{p=-B} &= \frac{B}{-B(1 - e^{-BT} z^{-1})} = \frac{-1}{1 - e^{-BT} z^{-1}} \\ \text{Res} \left[ \frac{G(s)}{s} \frac{1}{1 - e^{Ts} z^{-1}} \right]_{p=0} &= \frac{B}{B(1 - z^{-1})} = \frac{1}{1 - z^{-1}} \\ G(z) &= \frac{-(1 - z^{-1})}{1 - e^{-BT} z^{-1}} + 1 = \frac{z^{-1}(1 - e^{-BT})}{1 - e^{-BT} z^{-1}} = \frac{Vreal(z)}{Vord(z)} \end{aligned} \quad (13)$$

La ecuación en diferencias:

$$Vreal_k = (1 - e^{-BT}) Vord_{k-1} + e^{-BT} Vreal_{k-1} \quad (14)$$

### Anexo 3. Publicaciones relacionadas con la Tesis

- 1) Argüelles, R., Maza, J.A. and Martín, F. (2019). Specification and Design of Safety Functions for the Prevention of Ship-to-Ship Collisions on the High Seas. *The Journal of Navigation*, **72**, 53–68. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000553>
- 2) Argüelles, R., Maza, J.A., Martín, F. and Bartolomé, M. (2021). Ship-to-ship dialogues and agreements for collision risk reduction. *The Journal of Navigation*, **74(5)**, 1039–1056. <https://doi.org/10.1017/S0373463321000448>
- 3) Argüelles, R., Maza, J.A. and Martín, F. (2022). Ship-to-ship dialogues using a finite state machine. *Journal of ETA Maritime Science*, Ahead of print. <https://dx.doi.org/10.4274/jems.2022.18853>



# Specification and Design of Safety Functions for the Prevention of Ship-to-Ship Collisions on the High Seas

Reyes Poo Argüelles<sup>1</sup>, Jesús A. García Maza<sup>2</sup> and Felipe Mateos Martín<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(*Electrical, Electronic, Computers and Systems Engineering Dept., University of Oviedo, Spain*)

<sup>2</sup>(*Marine Science and Technology Dept., University of Oviedo, Spain*) (E-mail: repoo@uniovi.es)

Maritime accident statistics reveal that ship collisions are among the most frequent and severe accidents. The same statistics indicate that most of them are caused by human error, mainly due to breaches of the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs) and to the lack of communication between ships. There are also special situations where there is some ambiguity in the application of the COLREGs. In such occasions, and if there is no communication between the ships involved, compliance with the Rules may still end up in a collision. This article presents the development of safety functions for the reduction of ship-to-ship collision risk on the high seas. These functions will help the concerned ships in the coordinated compliance with the COLREGs. Functional safety standards are applied and, in their implementation, real, accessible electronic programmable systems (hardware and software) will be used.

## KEY WORDS

1. COLREGs. 2. Command, Control and Communications. 3. Risk Minimisation. 4. Ship Collision. 5.

AIS.

Submitted: 15 December 2017. Accepted: 30 June 2018.

## 1.- INTRODUCTION

According to the Annual Overview of Marine Casualties and Incidents published by the European Maritime Safety Agency (EMSA, 2016), during the period 2011- 2015 a total of 8,533 casualties involving a ship were recorded. Collisions represent 18% of these and are second on the list of accidents with the most serious consequences. The same source indicates that 62% of the accidental events analysed were attributed to human error.

Various reviews of statistical data and analyses of maritime accidents (Primorac and Parunov, 2016; Eliopoulou *et al.*, 2016; Luo and Shin, 2016; Goerlandt and Montewka, 2015) have been published in recent years. Among them, several analyses of the origins of collisions, such as those using Fault Tree Analysis (FTA) (Uğurlu *et al.*, 2013), Human Factors Analysis and Classification System (Chauvin *et al.*, 2013), or Bayesian Network model (Sotiralis *et al.*, 2016) approaches. These analyses show that most collisions are due to wrong decision-making originated mainly by International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs) (1972) violations and by the lack of inter-ship communication. It therefore seems appropriate to develop a collision avoidance system from the perspective of the Officer Of the Watch (OOW).

Functional safety standards provide requirements and approaches applicable to the implementation of systems (hardware + software) used to reduce the probability of accidents or failures. Functional safety is a term introduced in the series of standards by the International Electrotechnical Commission (IEC) as part of IEC 61508 (2010) "Functional safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic (E/E/PE) safety-related systems". This refers to the part of the overall safety of a system where its components or subsystems, with safety implications, respond adequately to any external input including human errors, hardware and software failures and environmental changes. This standard is generic and applicable to any sector. Two more specific standards derive from IEC 61508: IEC 62061 (2005) "Safety of machinery", and IEC 61511 (2016) "Safety instrumented systems for the process industry sector". Activities in the process industries share many of the risks that can be found on board ships (Vairo *et*



*al.*, 2017; Aven, 2017; Kosmowski, 2006).

The use of these standards as the basis for the development of safety functions to reduce the risk of collision is compatible with the Formal Safety Assessment (FSA, 2014; Montewka *et al.*, 2014), introduced by the International Maritime Organization (IMO) as a methodology aimed at improving maritime safety through the use of risk analysis and cost-benefit assessment. Functional safety techniques are applicable more specifically in step 3 of the FSA (risk control options).

The safety functions presented in this article are implemented by a safety-related Programmable Electronic (PE) system which will provide the OOW with information for the reduction of ship-to-ship collision risk on the high seas. This information includes detection, determination of the rules to be applied according to the COLREGs (1972), communication between both vessels through standardised messages and recognition of agreements or possible disagreements. Several collision analyses (such as those performed in Ever-Alexandra, 2015; Florida-Chou Shan, 2014; Hibiscus-Hyundai, 2013; Katre-Statengracht, 2014; Spring- Josephine 2013) show the relevance of these information parameters.

Safety functions are intended to reduce the risks of the Equipment Under Control (EUC) with respect to specific dangerous events. In our case, the EUC is the set of ships, and the main hazardous event occurs when the calculated Closest Point of Approach (CPA) between the own ship and another ship is less than a safety distance, and the Time to CPA (TCPA) is less than the predefined time. At any rate, the system to be developed should alter neither the normal operation of the EUC, nor other implemented safety measures.

Depending on the measured or received static data (ship type) and dynamic data (position, heading, navigation status, etc), the PE system of each ship shall:

- calculate the distance, bearing (clockwise angle between North and the target observed from the ship), CPA and TCPA relative to each nearby ship (target);
- determine the manoeuvres to be made based on COLREGs to reduce the risk of collision;
- keep the OOW informed.

PE systems of the ships involved shall also:

- communicate with each other safely, sending and receiving calculated manoeuvring data and OOW indications;
- compare their results and
- reach agreements or specify the disagreements.

Figure 1 is a schematic representation of the system for reducing the risk of collision between two ships, being Vessel\_O, the own ship and Vessel\_Ti, one of the targets.

Some of the topics outlined in this introductory section will be further developed. The rest of the paper is organised as follows. Section 2 summarises general aspects of functional safety regulations and justifies their use in this proposal. Section 3 describes the structure of the specific E/E/PE system and communications between PE components. Section 4 presents the specifications of the safety functions and the safety requirements to be fulfilled by the PE system. Section 5 presents some details about their implementation and Section 6 summarises the main conclusions.

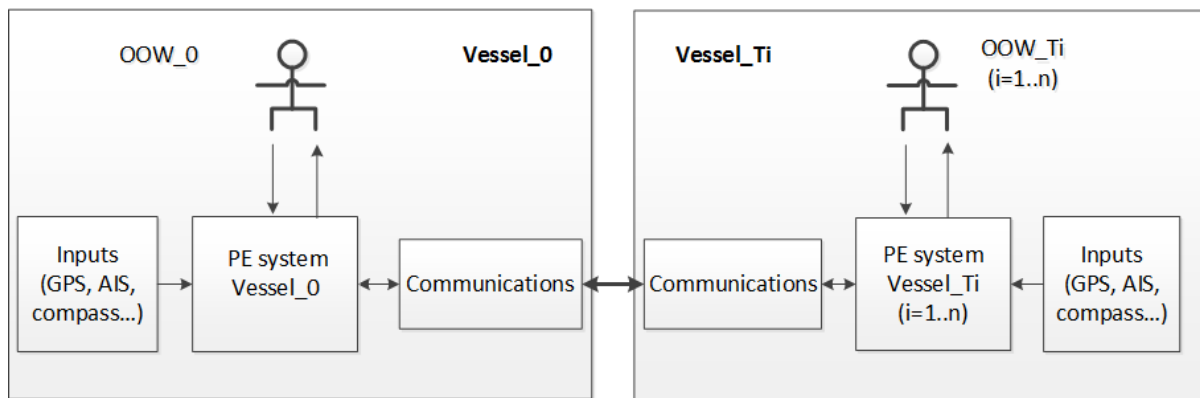


Figure 1. Diagram of implementation of safety functions for reducing the risk of collision.

## 2.- FUNCTIONAL SAFETY REGULATIONS

**2.1.- IEC 61508.** This standard establishes an approach for all activities related to the safety life cycle of systems that include E/E/PE elements used to perform safety functions.

To narrow down the meaning of some of the safety-related terms used throughout this article, some definitions are provided below:

- *Safety function*: A function performed by a safety-related E/E/PE system, or by another risk reduction measure, which is intended to achieve or maintain a safe state of the EUC with respect to a specific hazardous event.
- *Safety Integrity (SI)*: Probability that a safety-related E/E/PE system performs satisfactorily the required safety functions in all specified conditions over a specified period of time.
- *Safety Integrity Level (SIL)*: Discrete level (values 1, 2, 3 or 4) corresponding to the range of safety integrity values. It is related to the risk reduction factor that a safety function can provide. SIL 4 represents a Risk Reduction Factor (RRF) in the range  $10^4 < \text{RRF} < 10^5$ . SIL 1, an RRF in the range  $10^1 < \text{RRF} < 10^2$ .
- *Safety-related system*: A system that implements the safety functions required to achieve or maintain a safe state of the EUC and that is also expected to achieve, either by itself or with other E/E/PE systems, and other risk reduction measures, the safety integrity required for the safety functions. It may be designed to avoid a dangerous event (lowering the probability of occurrence to admissible levels), or to mitigate its effects. A safety-related system comprises everything (hardware, software and human elements) necessary to carry out one or more safety functions. It can be part of the control system or can implement safety functions with separate, independent systems.

The IEC 61508 (IEC, 2010) standard is generic and applicable to any sector. It sets the requirements to ensure that E/E/PE systems are designed, implemented, operated and maintained to provide the required SIL. In this paper, IEC 61508 is used as a guide of good practices applicable in the implementation of the system (hardware + software) that is proposed to reduce the risk of collisions.

The requirements for achieving safety integrity of E/E/PE systems include the use of validated hardware subsystems and software elements, with restricted and specified functionality and documented evidence of use. In the hardware architecture planned for implementing the safety functions of this proposal, two devices, well proven in systems and environments with high reliability requirements, are used together with a communication channel between them. These devices are the Automatic Identification System (AIS), and a Programmable Logic Controller (PLC).

**2.2.- IEC 61511.** Standard IEC 61511 (IEC, 2016) has been implemented as an application of IEC 61508 to the process industry sector. According to this standard, in its first stage the safety life cycle assesses hazards and risks. The result of this assessment consists of a

description of the safety functions required and the risk reduction associated to each function. In the second stage of the life cycle, these safety functions are assigned to "protection layers". Each layer consists of equipment and/or administrative controls that work in concert with the other layers of protection to control and/or mitigate process risk.

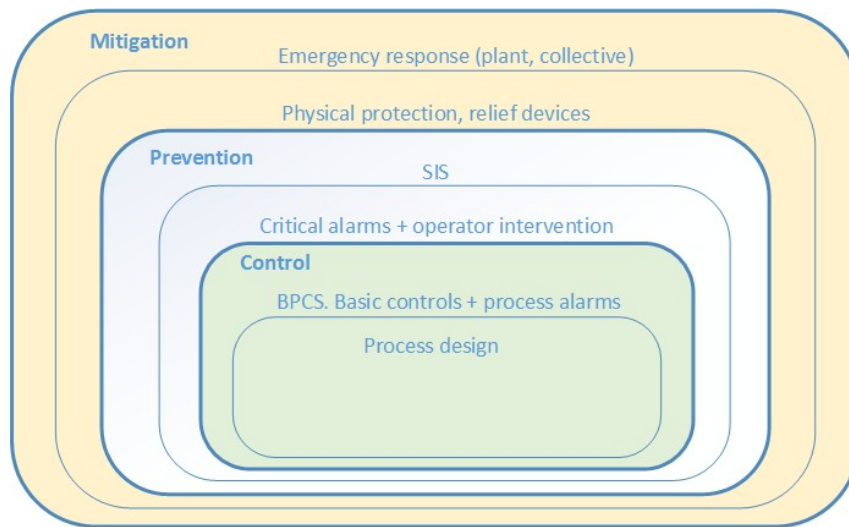


Figure 2. Protection layers as methods of risk reduction.

Figure 2, based on standard IEC 61511, shows a diagram of the various layers of protection in risk reduction. The innermost layer corresponds to the reduction of risks considered in the conception and design of process control. Critical alarms are the next level of active protection and require operator intervention.

Then, if a further reduction in the likelihood of the hazardous events is required, the layers called Safety Instrumented Systems (SIS) are added. These SIS layers, independent from the Basic Process Control System (BPCS), implement the safety instrumented functions. The rest of the layers correspond to systems and measures devised to mitigate damage when the accident has already occurred.

The E/E/PE system proposed would be placed between the two prevention layers, "Critical alarms and operator intervention" and SIS (Figure 2).

A Layer Of Protection Analysis (LOPA) (Summers, 2003; Stauffer and Clarke, 2016) could be performed to set the safety functions as an additional layer for reducing the risk of collision. It is necessary to consider what causes collisions, their probability of occurrence, how much risk reduction the existing layers represent, and what the required integrity level for the safety functions would be so that the level of risk is below a predefined threshold. If the tolerable risk is above the probability of the event, no additional reduction is required; but even in that case, it would be advisable to apply the safety functions to achieve a further reduction in probability of occurrence whenever they do not entail excessive costs (Melchers, 2001; FSA, 2014).

### 3.- E/E/PE SYSTEM

An E/E/PE system for safety functions comprises hardware components for input, logic and output. The proposed system includes as subsystems: an AIS station for Input/Output (I/O) operations (data acquisition and communication) and a PLC for logic (data processing). In an initial version, the AIS Class A station available on the ship can be used. In order to increase the availability and reliability of data and communications received, it will be necessary to analyse and evaluate the inclusion of redundant equipment in the system (Gamer *et al.*, 2014).

**3.1.- PLC.** It has been decided to use a PLC as a PE system as PLCs have input and output interfaces for all process signals, and for communications with other devices. They are robust machines of proven use in industrial environments and there are PLCs specifically designed for safety applications up to SIL 3, approved to comply with IEC 61508 standards (IEC 61131- 6, 2012).

The PLC will be responsible for the following operations:

- Receive from AIS, via digital interface, the messages with static and dynamic information of the own-ship and the targets and the binary messages sent by them.
- Collect information from the OOW (alternatively called the Operator in this paper).
- Perform the appropriate calculations.
- Communicate the calculated data to own-ship OOW.
- Send messages to the OOWs of the targets, using AIS as the communication channel.
- Execute the implemented algorithms for dialogue and agreements between ships.

Figure 3 reflects the structure of the planned architecture, derived from the general image of Figure 1.

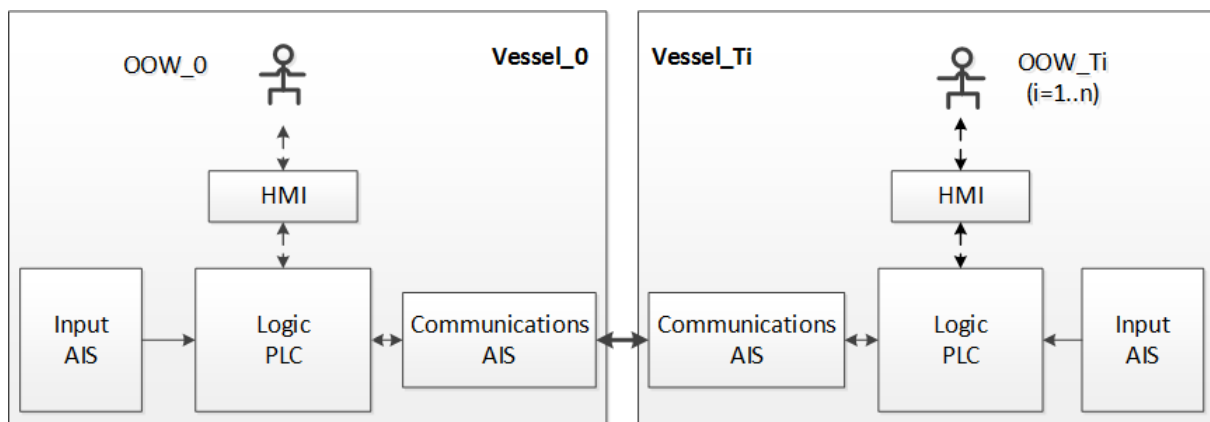


Figure 3. Current implementation diagram for safety functions.

**3.2.- AIS messages.** Communication will be carried out by means of predefined messages exchanged between ships equipped with AIS stations. AIS is a Time-Division Multiple Access (TDMA) protocol-based communication system that uses Very High Frequency (VHF) channels to exchange navigation data. International Telecommunication Union Recommendation (ITU-R M.1371-5, 2014) describes two types of AIS: Class A used on large Safety Of Life At Sea (SOLAS) vessels and Class B, for smaller SOLAS vessels. AIS Class A stations are required for the development of this proposal. Studies on the reliability of data provided by AIS (Felski *et al.*, 2015) show a high availability and integrity of dynamic information. Although the availability falls slightly for data on Rate Of Turn (ROT) and Heading (HDG) (Last *et al.*, 2014), it could be improved by adding appropriate sensors to the AIS system.

There are 27 approved standard messages, shown in ITU-R.M 1371-5 (2014, Annex 8), of which the following are used in the implementation of the safety functions proposed here:

- Messages 1, 2, 3 include dynamic position information.
- Message 5, static ship data.
- Message 6, binary data for addressed (non-broadcasted) communication.
- Message 7, acknowledgment (ACK) of received message 6.

In addition to the exchange of information via VHF channels, AIS stations use maritime digital interfaces and data communication standards for the exchange of data with other devices, systems or networks. This facilitates the visualisation and on board use of AIS information (Pietrzykowski *et al.*, 2017).

Through these digital interfaces, the AIS of a ship communicates its own static and dynamic navigation data and receives the same from other ships through VHF channels. This digital communication is performed by sentences or Parameter Group Numbers (PGN) coded according to National Marine Electronics Association (NMEA) standards (NMEA 0183, 2002; NMEA 2000, 2015). For this proposal, the communications shown in Figure 4 are required.

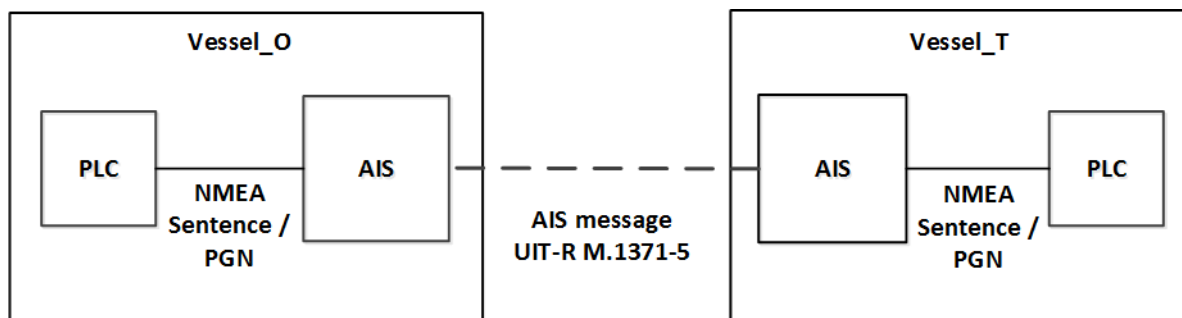


Figure 4. PE Communications.

#### 4.- SAFETY FUNCTIONS

A number of collision alert systems and methods have been proposed, as well as e-Navigation methods for manoeuvring support (Goerlandt *et al.*, 2015; Baldauf *et al.*, 2011). With the same aim of collision prevention, but focusing on direct and immediate assistance to the OOWs in the compliance with COLREGs, the safety functions presented in this paper have two main objectives:

- To assist in the early detection of ships located nearby own-ship, thus, improving the reaction time available for performing manoeuvres. The safety function called FS\_DETECT is in charge of this goal.
- To increase the probability of adequate manoeuvring for both, the own-ship and each target. This second safety function is called FS\_MANOEV.

FS\_MANOEV requires the establishment of communication between the PE systems (PLCs) of own-ship and the target involved in each manoeuvre. This communication will be used in two levels of agreements:

- *To check if the information handled by both PLCs fully agrees.* A ship's PLC must communicate to the other PLC the information it has available. This second PLC will compare the received data with its own data and will answer whether it is in agreement with it or not. If there are differences between the data they handle, each PLC will notify the discrepancy to its operator.
- *To reach agreements between the two operators.* The ship's PLC will inform its operator of the possible manoeuvres, deduced from the available information. Then, it will wait for the operator's decision. Next, it will transmit this decision to the other ship's PLC and will wait until the latter communicates its operator's response and sends his/her answer.

**4.1.- Safety Function FS\_DETECT.** From the static and dynamic information of own-ship and targets, FS\_DETECT will calculate the bearing, distance, CPA, TCPA, and true speed relating own-ship to each target. It will show the operator the "visible universe": information of those targets that are in an area centred on own-ship with an established radius, and with CPA and TCPA lower than specified and adjustable safe values.

The safety function shall use as input devices the AIS systems installed on board, which shall provide static and dynamic information on own-ship and targets. This information is

received through the standard messages 1, 2, 3 or 5, already mentioned.

**4.1.1.- Requirements.** For this safety function, communication between the ship's AIS system and the PLC will be done through a digital interface and NMEA communication standards. In order to calculate bearing, distance, CPA and TCPA for each target, it is necessary for the safety function to receive the dynamic data from the own-ship and from the target with a very small time interval between them. Maximum waiting times should be established for communications, as well as the actions to be taken in case of exceeding those times.

The Human-Machine Interface (HMI) will display information about ships that, within the given radius, have CPA and TCPA values lower than the established safety values ( $CPA_{Safe}$ ,  $TCPA_{Safe}$ ) which depend on the type and dimension of each ship. These data will be updated within a set period of time. No further information about other detected ships will appear on the display, so as not to overload the operator with information non-relevant for safety (EU- OSHA, 2009). From this HMI, the operator will be able to modify the values set for the radius, refresh period and safe values for CPA and TCPA. It will also include an acknowledgment field (ACK) to ensure that the operator is aware of the information being displayed. The PLC will store all received and calculated information in an external database.

**4.2.- Communication between PE systems.** Communication between the PLC of the own- ship and each of the targets will be carried out through the AIS stations, using standard messages 6 and 7. In a simplified way, communication will proceed according to the following steps (see Figure 5):

- Own-ship PLC will write the information to be communicated to the target in an addressed binary message (message 6).
- Own-ship AIS (connected to the PLC) will transmit the message to target AIS.
- When the target's AIS receives the message, it will send an ACK (message 7) to the source AIS, indicating that the message has been transmitted.
- Then, the PLC connected to the target AIS will read the received message, and the source PLC will read the ACK. If the message does not reach its destination, the source PLC will not receive the ACK. The waiting time between a PLC sending a message and receiving the ACK will depend on the number of retries and transmission intervals. A maximum waiting time must be set as a standard value.

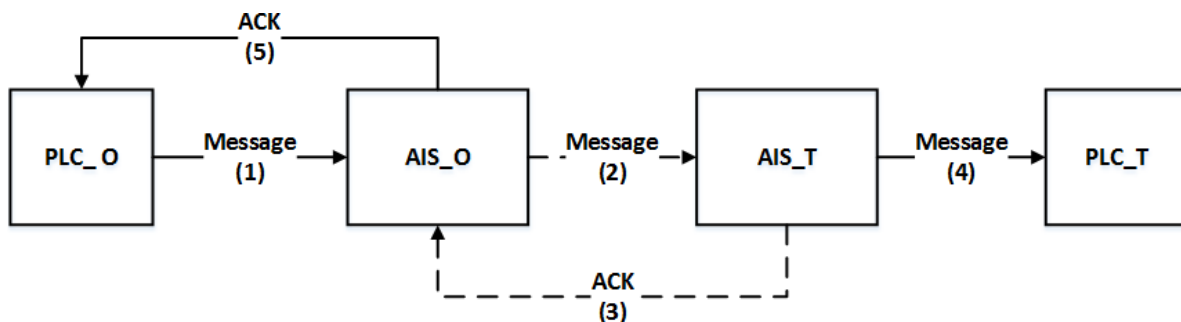


Figure 5. Sequence of PE-PE communication.

Binary messages include a 16-bit application identifier, structured as shown in Table 1.

Table 1. Application identifiers in message 6.

bit	Description
15-6	Designated Area Code (DAC). This code is based on the Maritime Identification Digits (MID). Exceptions are 0 (test) and 1 (international).
5-0	Function Identifier (FI). The meaning should be determined by the authority which is responsible for the area given in the designated area code

The test application identifier (DAC = 0) should be used for testing purposes. The international application identifier (DAC = 1) should be used for international applications of global relevance. For this application, DAC = 0 can be used and the FI (6 bits) will be employed for codifying the messages that a PLC is going to send to other PLC. Up to 64 messages can be codified.

The binary messages that the PLC of the source ship will transmit to the PLC of the destination ship shall have as their purpose:

- To start the communication or accept the communication request.
- To check if the information handled by both PLCs fully agrees. This information includes the received values of the course and speed over ground, true heading and the calculated bearing, distance, CPA and TCPA. One PLC will send the information and the other will compare it with its own and will answer if it is equivalent or not.
- To agree on the possible manoeuvres, calculated by the PLCs from the available information.
- To transmit the established messages between the operators.

**4.3.- Safety Function FS\_MANOEV.** Depending on the distance, the CPA and the TCPA between own-ship and a target, three situations are defined: Safe, Prealert or Alert.

$$\text{Safe: } CPA > CPA_{Safe} \quad (1)$$

$$\text{Prealert: } (CPA \leq CPA_{Safe}) \text{ and } ((Distance \leq CPA_{Safe} * P1) \text{ or } (TCPA \leq TCPA_{Safe})) \quad (2)$$

$$\text{Alert: } \text{Prealert and } (Distance \leq CPA_{Safe} * P2) \quad (3)$$

$P1 > P2 > 1.0$ , parameters that depend on the relative speed, the visibility and on the type and dimension of the vessels. Their values will be calculated by each PLC from the received dynamic and static data.

With the dynamic data (latitude, longitude and true heading) received from own-ship and from each target and with the calculated data for bearing, distance, CPA and TCPA, and according to the COLREGs (Part B - Steering and Sailing Rules), the PE system of each ship should be able to determine a close-quarters situation between the two ships, which is the stand-on vessel and what is the correct action to be taken to avoid a possible collision. In case of Prealert, and after agreement between the ship's PE system and its operator, a dialogue must be established between both PE systems.

A close-quarters situation and the actions to be taken will depend, firstly, on the visibility conditions. Section II of COLREGs (1972) - Part B is dedicated to the conduct of vessels in sight of one another. Section III refers to the conduct of vessels in restricted visibility. As the decision on manoeuvring finally depends on the OOWs, it is necessary that they reach an agreement on whether the situation is one of reduced visibility or not, so as to apply the rules of Section III or Section II. It is therefore necessary to add to the HMI a field in which the OOW will establish whether there is good visibility or reduced visibility. Moreover, a further field to indicate whether there is radar detection or not is also called for.

In order to decide on the manoeuvre and which vessel must carry it out, account should be taken of rule 18, "Responsibilities between vessels", as well as of rule 17, "Action by stand-on vessel", in the case that the give-way vessel does not act as prescribed.

#### 4.3.1. Requirements.

- All possible close-quarters situations between two ships, contained in COLREGs 11 to 19, must be considered.
- The manoeuvring messages to be communicated between the two ships involved (Own and Target) must be defined for each situation.

- The messages indicating the manoeuvre, in addition to the messages for initiating/confirming communication between the PLCs of the two ships, and the messages for checking the matching of the information they handle, will be transmitted using the AIS standard message 6. An appropriate encoding will be included in the lowest six bits of the field Application ID.
- Maximum waiting times should be established for communications, as well as the actions to be taken in case of exceeding those times.
- It is necessary to define what the system should do in the following cases:
  - The information available on both ships is inconsistent.
  - There is no agreement between the operator and the manoeuvre suggested by the PLC of the own ship.
  - There is no agreement between operators regarding the manoeuvre to be performed.
  - Alert situation starts.
- The most appropriate format for displaying messages on the HMI must be defined and standardised.

Figure 6 reflects the sequence of steps defined for the communication between the PE systems of own-ship and a target when entering a pre-alert situation, in order to reach agreements and reduce the risk of collision between both ships. It is developed following GRAFCET (GRAPhe Fonctionnel de Commande des Étapes et Transitions) methodology (David, 1995; IEC 60848, 2013). The sequence will be replicated for each target detected in the visible universe of own-ship. It must include all possible states, the actions to be performed in each state and the transition conditions between them.

The initial step (Safe state) of the own-ship PE system is deactivated for one of two reasons:

- It detects a Prealert situation with respect to the target and takes the initiative of the communication (right branch).
- A message is received from the target (MSG\_Ini), which indicates that the target has detected the Prealert situation (left branch).

Following the right branch, and the communication described in Section 4.2, own-ship PLC first displays the calculated manoeuvre and waits for the operator acknowledgement. Then it sends a message (MSG\_Dyn\_Data) to the target-ship's PLC to check if there is agreement in the information handled by both PLCs, and waits for the target-ship PLC's answer. After that, it sends the message with the manoeuvre (MSG\_Manoe) and waits for the answer of target- ship operator. If there is agreement, it waits for the manoeuvre to be performed. The rest of steps deal with the different alternatives: delays, disagreements and alert situation.



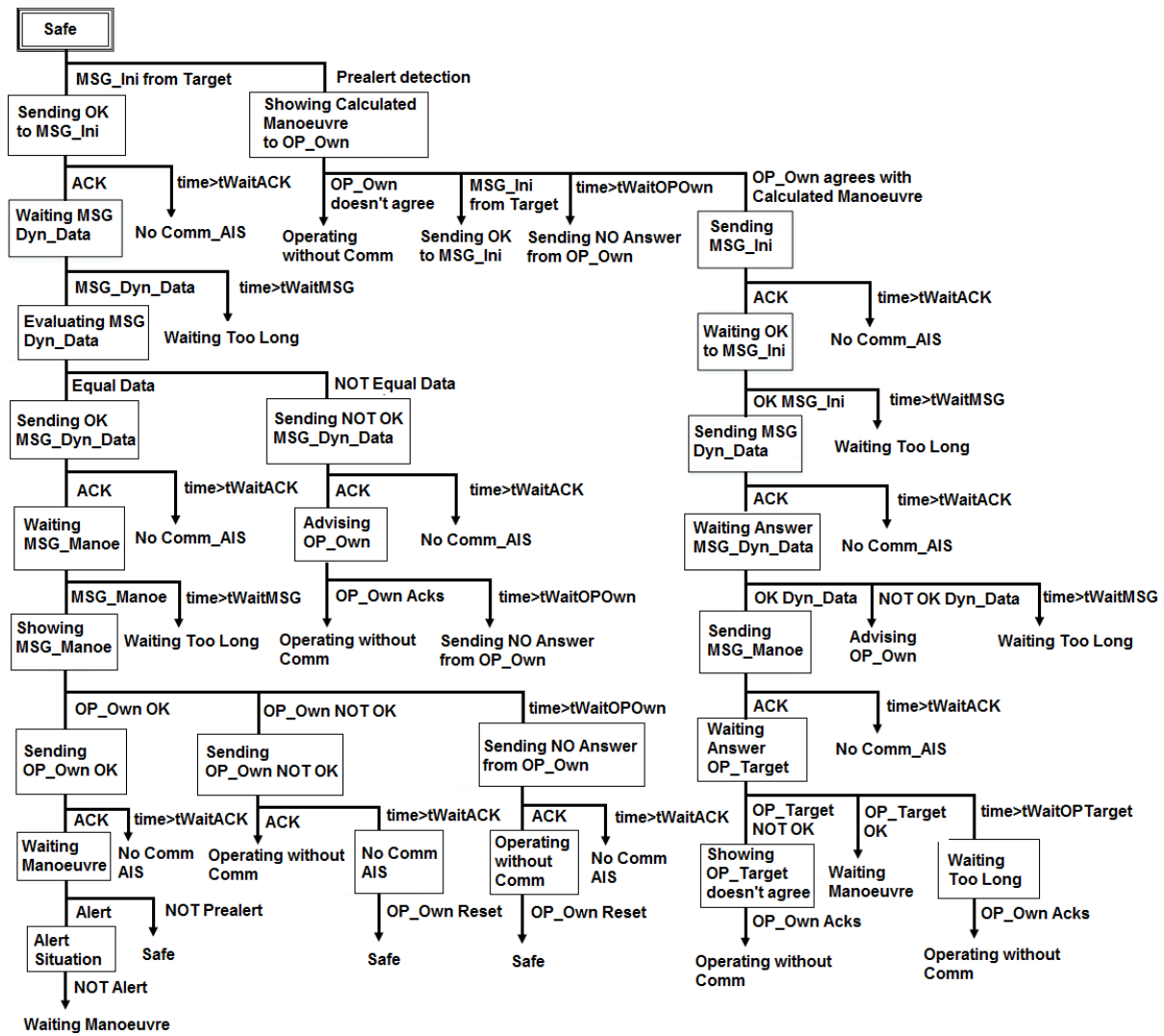


Figure 6. Sequence of steps of the dialogue between own-ship and a target PLCs.

## 5.- IMPLEMENTATION OF THE SAFETY RELATED SYSTEM

**5.1.- Software design of safety functions.** Principles and techniques for coding and verification of software identified in IEC 61508 (2010) apply to the implementation of a safety- related system as proposed here. Part 7 - Annex C includes recommendations on Coding techniques, including code intelligibility, a modular approach and encapsulated information, use of proven / verified software elements and suitable programming languages. It also covers software verification techniques, including data analysis and recording, interface and limit values tests, assumption of errors, data flow analysis and process simulation.

The safety functions are programmed using languages that comply with IEC 61131-3 (John and Tiegelkamp, 2010; Estévez *et al.*, 2009). This standard defines the basic programming elements and rules for PLC programming languages. The Program Organisation Units (POUs) consist of encapsulated modules of small size, each with a particular task that must be well defined and documented.

A list with 28 different manoeuvres has been defined, deduced from possible close-quarter situations, priorities and visibility conditions. The source PLC transmits the calculated manoeuvre using the AIS addressed binary message 6. This message includes the identification of the source and destination ships, that is, their Maritime Mobile Service Identity (MMSI) and, as binary data, only the number of the manoeuvre's order in the list (1...28). The destination PLC receives the message with that number and presents the associated manoeuvre

on its HMI.

Module checking and integration tests should be carried out, following, for example the V-model (Mathur and Malik, 2010; Deuter, 2013; Lloyd and Reeve, 2009) accepted by the functional safety standards.

**5.2.- Testing and integration.** A first version of the software modules for the described safety functions has already been developed. At present, it is being checked with simulated ship movements and communications, and with a basic HMI. A potential test follows, with data extracted from *Katre-Statengracht, 2014*.

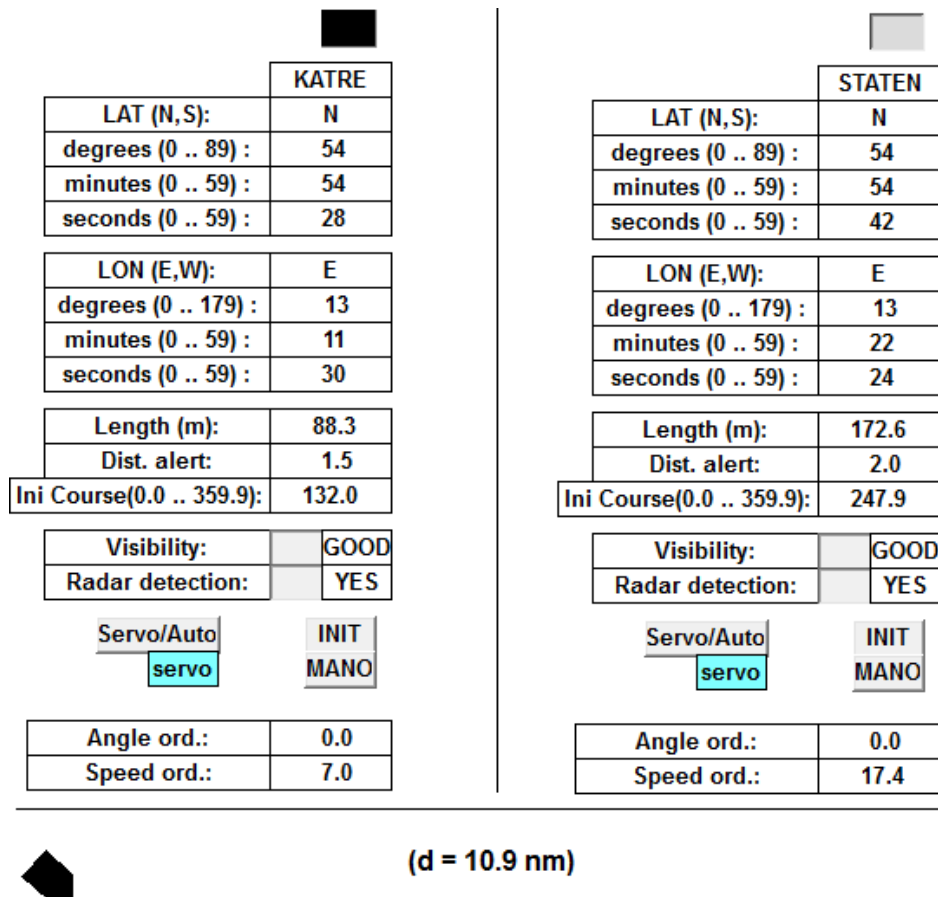
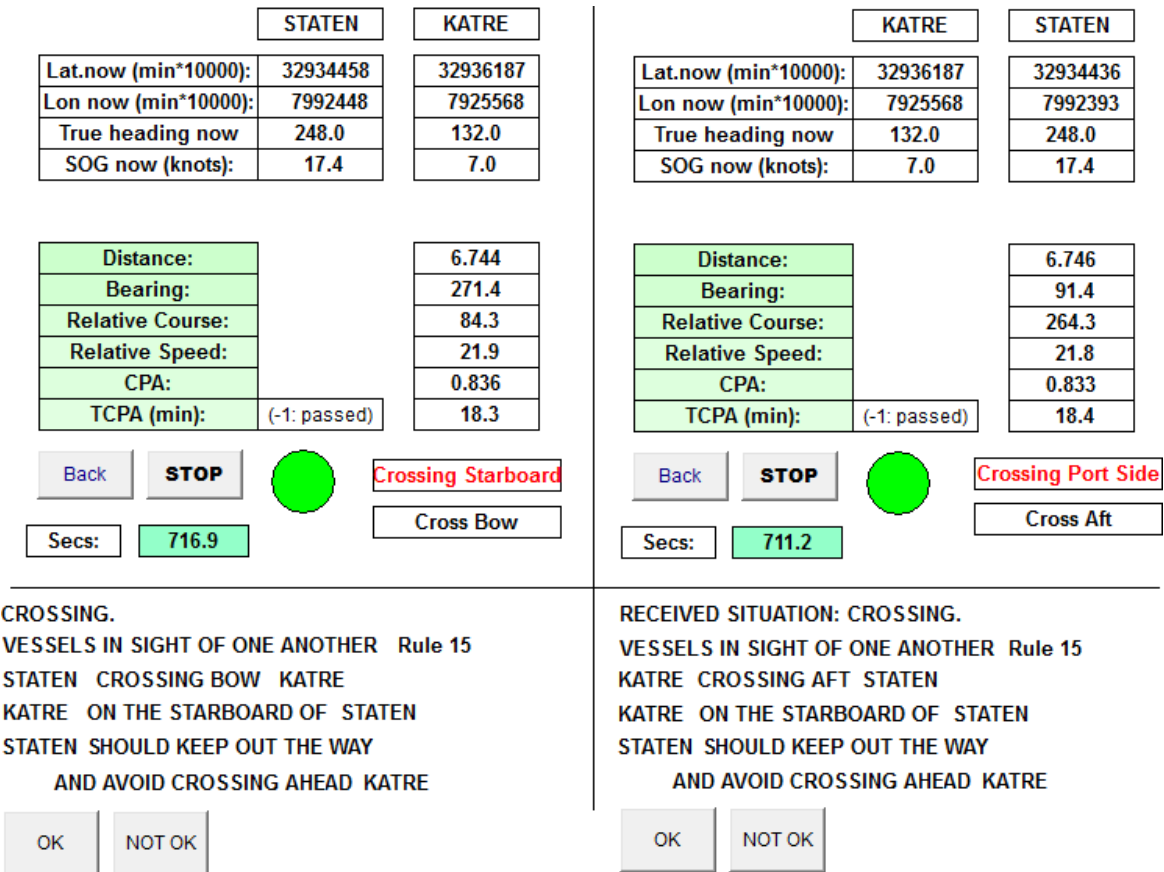


Figure 7. Initial data inputs (2 ships).

Figure 7 shows the initial data for two ships (KATRE and STATEN). The manoeuvres can be performed by varying the ordered courses (angles) or speeds. The models for the simulation of movements have been programmed following the standard ISO 11674-A (2006).

Figure 8 shows the values calculated by the corresponding POUs executed in the PLC of each ship from the AIS received dynamic positions. On the bottom left, the text with the calculated manoeuvre when STATEN PLC have detected pre-alert. If the OOW taps OK, it is transmitted and KATRE PLC will display the message shown on the bottom right. The manoeuvring text includes ships names, visibility conditions, close-quarter situation and the COLREGs rule to apply. Messages are inspired by standardised phrases, which must be understood by all OOWs. With these written messages and data, errors of pronunciation or mistakes in their meaning would be avoided.



KATRE		STATEN	
Lat.now (min*10000):	32936187	32934436	
Lon now (min*10000):	7925568	7992393	
True heading now	132.0	248.0	
SOG now (knots):	7.0	17.4	

Distance:	6.746
Bearing:	91.4
Relative Course:	264.3
Relative Speed:	21.8
CPA:	0.833
TCPA (min):	(-1: passed) 18.4

Crossing Port Side

---

RECEIVED SITUATION: CROSSING.  
 VESSELS IN SIGHT OF ONE ANOTHER Rule 15  
 KATRE CROSSING AFT STATEN  
 KATRE ON THE STARBOARD OF STATEN  
 STATEN SHOULD KEEP OUT THE WAY  
 AND AVOID CROSSING AHEAD KATRE

Figure 8. Dynamic data and manoeuvring messages when pre-alert (2 ships).

A special message will be displayed in both ships if the alert distance is reached by one of them, indicating that both vessels must manoeuvre.

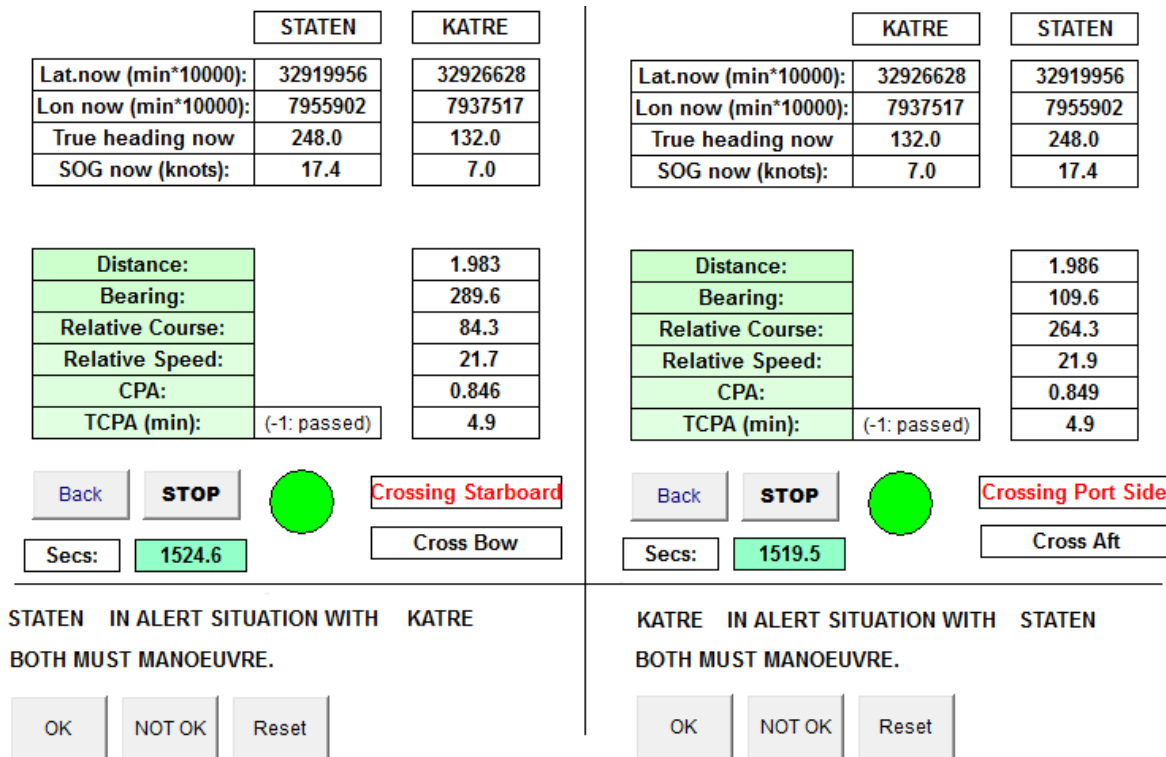


Figure 9. Dynamic data and manoeuvring messages when alert (2 ships).

Other messages (apart from manoeuvring) have been defined, associated to different steps in figure 6: dynamic data handled by both PLCs are non consistent, there is not agreement between OOWs, an OOW doesn't answer, etc.

More software testing and HMI enhancements are currently underway. The next step will be to perform integration with the hardware (PLC+AIS) and validation tests.

## 6.- CONCLUSIONS

Safety functions are being developed with the aim of reducing the risk of collisions between two ships (own-ship and each of N targets) due to errors in collision avoidance manoeuvres. For this purpose, the functions are in charge of generating an alarm event and identifying the type of dangerous encounter and suggest the manoeuvre to be performed, all of it always in compliance with COLREGs. The system needs to establish a reliable and unambiguous communication between the two ships involved, seeking to reach agreements at two levels:

- Agreements between PE systems, which ensure that both have the same dynamic information and the same calculated manoeuvre.
- Agreements between operators, which ensure that both accept (or not) the calculated manoeuvre.

The novelty of this proposal lies in that, for the first time, a system allows the user to know if both OOWs agree or not on the manoeuvres to be carried out. This makes it possible to act accordingly, since if a discrepancy arises, the safety margins can be increased and the wrong decision properly identified.

It should be noted that the programming of the safety functions is carried out following basic principles of the functional safety regulations for software and that the final implementation will require only a PLC connected to AIS class A of each ship. The planned system does not interfere with the operation of the ship under normal conditions and it does not entail an excessive cost. An ulterior emphasis must be placed on the improvement of the reliability of AIS transmissions, which may be directly affected by, among others, the use of unsecure channels.

In a later stage, once the ship-to-ship encounters have been properly delimited, the multi- vessel encounters

will be studied. This scenario is significantly more difficult to resolve (Wen *et al.*, 2015). The E/E/PE structure used here seems suitable, but the safety functions will need to be adapted to this new multiple scenario, always counting on the experience gained from the ship-to-ship case development.

## REFERENCES

- Aven, T. (2017). Improving risk characterisations in practical situations by highlighting knowledge aspects, with applications to risk matrices. *Reliability Engineering and System Safety*, **167**, 42-48.
- Baldauf M., Benedict K., Fischer S., Gluch M., Kirchhoff M., Klaes S., Schröder-Hinrichs J.-U., Meißner D., Fielitz U. and Wilske E. (2011). e-Navigation and situation-dependent maneuvering assistance to enhance maritime emergency response. *WMU Journal of Maritime Affairs*, **10**, 209- 226.
- Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, J.P. and Langard, B. (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. *Accident Analysis & Prevention*, **59**(C), 26-37.
- COLREGs. (1972). Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea. *International Maritime Organization*, London.
- David, R. (1995). GRAFCET: a powerful tool for specification of logic controllers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **3**(3), 253-268.
- Deuter, A. (2013). Slicing the V-Model -- Reduced Effort, Higher Flexibility, *IEEE 8th International Conference on Global Software Engineering (ICGSE)*, 1-10.
- Eliopoulou, E., Papanikolau, A. and Voulgarellis, M. (2016). Statistical analysis of ship accidents and review of safety level. *Safety Science*, **85**, 282-292.
- EMSA. (2016). Annual overview of marine casualties and incidents 2016. *European Maritime Safety Agency*.
- Estévez, E., Marcos, M. and Irisarri, E. (2009). Analysis of IEC 61131-3 Compliance through PLCopen XML interface. *7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 757-762.
- EU-OSHA. (2009). The human machine interface as an emerging risk. *European Agency for Safety and Health at Work*.
- Ever-Alexandra. (2015). Report on the investigation of the collision between the container ship Ever Smart and the oil tanker Alexandra 1. [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5665aff8e5274a0367000010/MAIBInvReport-28\\_2015.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5665aff8e5274a0367000010/MAIBInvReport-28_2015.pdf). Accessed 4 March 2018.
- Felski, A., Jaskólski, K. and Banyś, P. (2015). Comprehensive Assessment of Automatic Identification System (AIS) Data Application to Anti-collision Manoeuvring. *The Journal of Navigation*, **68**, 697-717.
- Florida\_Chou Shan .(2014). Report on the investigation of the collision between CMA CGM Florida and Chou Shan. [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c6f36e5274a4290000017/CMACGMFlorida\\_Report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c6f36e5274a4290000017/CMACGMFlorida_Report.pdf). Accessed 4 March 2018.
- FSA. (2014). Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the imo rule-making process. *International Maritime Organization*, London.
- Gamer, T., Oriol, M. and Wahler, M. (2014). Increasing efficiency of M-out-of-N redundancy. *Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Barcelona, 1 - 8.
- Goerlandt, F. and Montewka, J. (2015). Maritime transportation risk analysis: Review and analysis in light of some foundational issues. *Reliability Engineering and System Safety*, **138**, 115-134.

- Goerlandt F., Montewka J., Kuzmin V. and Kujala P. (2015). A risk-informed ship collision alert system: framework and application. *Safety Science*, **77**, 182-204.
- Hibiscus-Hyundai. (2013). Report on the investigation of the collision between ACX Hibiscus and Hyundai Discovery. [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c6f6ce5274a4290000029/ACXHibiscus-HyundaiDiscovery\\_Report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c6f6ce5274a4290000029/ACXHibiscus-HyundaiDiscovery_Report.pdf). Accessed 4 March 2018.
- IEC 60848. (2013). GRAFCET specification language for sequential function charts. *International Electrotechnical Commission*. <https://webstore.iec.ch/publication/3684>
- IEC 61131-6. (2012). Programmable controllers - Part 6: Functional safety.
- IEC 61508. (2010). Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. <http://www.iec.ch/functionalsafety/>
- IEC 61511. (2016). Functional safety/safety instrumented systems for the process industry sector. <https://webstore.iec.ch/publication/24241>
- IEC 62061. (2005). Safety of machinery - Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems. *International Electrotechnical Commission*. <https://webstore.iec.ch/publication/22797>
- ISO 11674-A. (2006). Ships and marine technology -- Heading control systems. Annex A: Ship-motion simulator. *International Organization for Standardization*. <https://www.iso.org/standard/44047.html>
- ITU-R M.1371-5. (2014). Recommendation ITU-R M.1371-5. Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band. *Radiocommunication Assembly, International Telecommunication Union*. <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1371/en>
- John, K.H. and Tiegelkamp, M. (2010). IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems. *Springer Publishing Company, Inc.*
- Katre-Statengracht. (2014). Safety investigation into the collision between the Maltese registered general cargo KATRE and the Dutch registered general cargo STATENGRACHT. [http://mtip.gov.mt/en/document%20repository/msiu%20documents/investigations%202013/mv%20katre\\_final%20safety%20investigation%20report.pdf](http://mtip.gov.mt/en/document%20repository/msiu%20documents/investigations%202013/mv%20katre_final%20safety%20investigation%20report.pdf). Accessed 4 march 2018.
- Kosmowski, K.T. (2006). Functional safety concept for hazardous systems and new challenges. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **19**, 298–305.
- Last, P., Bahlke, C., Hering-Bertram, M. and Linsen, L. (2014). Comprehensive Analysis of Automatic Identification System (AIS) Data in Regard to Vessel Movement Prediction. *The Journal of Navigation*, **67**, 791-809.
- Lloyd, M.H. and Reeve, P.J. (2009). IEC 61508 and IEC 61511 Assessments. Some Lessons Learned. *4th IET International Conference on Systems Safety*, 1–6.
- Luo, M. and Shin, S. (2016). Half-century research developments in maritime accidents: Future directions. *Accident Analysis & Prevention*. Available online 19 April 2016.
- Mathur, S. and Malik, S. (2010). Advancements in the V-Model. *International Journal of Computer Applications*, **1**(12), 30-35.
- Melchers, R.E. (2001). On the ALARP approach to risk management. *Reliability Engineering and System Safety*, **71**(2), 201-208.
- Montewka, J., Goerlandt, F. and Kujala, P. (2014). On a systematic perspective on risk for formal safety assessment (FSA). *Reliability Engineering and System Safety*, **127**, 77-85.
- NMEA 0183. (2002). NMEA 0183 Standard for Interfacing Marine Electronic Devices. *National Marine*

*Electronics Association.*

- NMEA 2000. (2015). NMEA 2000 Standard for Serial-Data Networking of Marine Electronic Devices. *National Marine Electronics Association*.
- Primorac, B. B. and Parunov, J. (2016). Review of statistical data on ship accidents. *Maritime Technology and Engineering*, **3**, 809-814.
- Pietrzykowski, Z., Wołajsza, P. and Borkowski, P. (2017). Decision Support in Collision Situations at Sea. *The Journal of Navigation*, **70**, 447-464.
- Sotiralis, P., Ventikos, N.P., Hamann, R., Golyshev, P. and Teixeira, A.P. (2016). Incorporation of human factors into ship collision risk models focusing on human centred design aspects. *Reliability Engineering and System Safety*, **156**, 210-227.
- Spring-Josephine. (2013). Spring Glory / Josephine Mærsk Collision. [http://www.dmaib.com/SiteCollectionDocuments/Ulykkesrapporter/Handelskibe/kollisioner/SPRING\\_GLODY\\_JOSEPHINE\\_MAERSK\\_2012.pdf](http://www.dmaib.com/SiteCollectionDocuments/Ulykkesrapporter/Handelskibe/kollisioner/SPRING_GLODY_JOSEPHINE_MAERSK_2012.pdf). Accessed 4 March 2018.
- Stauffer, T. and Clarke, P. (2016). Using alarms as a layer of protection. *Process Safety Progress*, **35**(1),76-83.
- Summers, A.E. (2003). Introduction to layers of protection analysis. *Journal of Hazardous Materials*, **104**(1-3), 163-168.
- Uğurlu, Ö., Köse, E., Yıldırım, U. and Yüksekıldız, E. (2013). Marine accident analysis for collision and grounding in oil tanker using FTA method. *Maritime Policy & Management*, **42**, 163-185.
- Vairo, T., Quagliati, M., Giudice, T., Barbucci, A. and Fabiano, B. (2017). From land- to water-use-planning: A consequence based case-study related to cruise ship risk. *Safety Science*, **97**, 120-133.
- Wen, Y., Huang, Y., Zhou, C., Yang, J., Xiao, C., Wu, X. (2015). Modelling of marine traffic flow complexity. *Ocean Engineering*, **104**, 500-510.

## Ship-to-ship dialogs and agreements for collision risk reduction

Reyes Poo Argüelles<sup>1</sup>, Jesús A. García Maza<sup>2</sup>, Felipe Mateos Martín<sup>1</sup> and Marlene Bartolomé<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(*Electrical, Electronic, Computers and Systems Engineering Dept., University of Oviedo, Spain*)

<sup>2</sup>(*Marine Science and Technology Dept., University of Oviedo, Spain*)

(E-mail: maza@uniovi.es)

Non-compliance or misinterpretation of the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs) when assessing vessel encounters, and the lack of good communication between the vessels involved in a critical situation are primary contributing factors in collisions. Vessels engaged in an encounter should be aware that they are part of the same scenario and situation, which can become critical. Sharing and contrasting their information about the encounter would help to take manoeuvring decisions in a consistent way.

There are situations whose evaluation by the Officer in Charge Of the Navigational Watch (Officers Of the Navigational Watch –OONWs-) may diverge and lead to disagreements in the actions to be taken. If there is no proper inter-ship communication, they may also end up in a collision. This article presents a proposal for safety communication implemented in a programmable system using common equipment (AIS), and applied to a case study of one of these special situations, shows how it could help to reduce the collision risk.

### KEYWORDS

Collision risk reduction; COLREGs; Decision support systems; Inter-ship communications; Maritime safety.

Published online by Cambridge University Press: 24 May 2021

### 1.-INTRODUCTION

Reports and analysis of marine accidents (DMAIB, 2020; EMSA, 2019; JTSB, 2020; MAIB, 2020; MSIU, 2020; SHK, 2020) point to collisions as the most common navigational casualties, and to human erroneous actions as the primary accidental events.

According to the literature reviews on collision avoidance methods (Huang *et al.*, 2020), technologies for reducing the risk due to human factors are mainly focused from two perspectives:

- techniques to assist on board OONWs, and
- development of autonomous systems to eliminate human factors, by automating some of the operation or control tasks, depending on the different degrees of autonomy (IMO, 2018).

Among the reported main contributing human errors in ship collisions (Sotiralis *et al.*, 2016; Ung, 2019, 2019; Weng *et al.*, 2019; Yıldırım *et al.*, 2019) are errors in supervision (not keeping appropriate lookout, failure to take early actions), misinterpretation of COLREGs (IMO, 1972) and poor/lack of communication between their OONWs. Communication failures are mainly related to ambiguities, misunderstandings, unsuitable devices and absence of closed-loop communication (Boström, 2020) to provide a feedback on messages. Very High Frequency radio (VHF) has been the only communication medium for years and its misuse a contributing factor in a significant number of casualties (MCA, 2016).

Whether manual or automatic control, vessels involved in an encounter will face less risks if they reach an agreement (explicit or not) on the manoeuvres to avoid the hazardous situation. Regulations for decision-making, COLREGs, have been designed to determine the manoeuvre without requirements on any communication between the vessels. But, on the other hand, safe navigation demands the use of all available means to obtain optimum situational awareness (Tsimplis and Papadas, 2019), as stated in COLREG Rule 5.



Based on the fact that lack of communication between ships and COLREG violations are, as already mentioned, elements with a high occurrence rate in collisions, it seems necessary to reconsider the premise of non-communication. Some authors propose distributed calculations, assuming an inter-ship communication, broadcasting (Zhang *et al.*, 2015) or negotiating (Kim *et al.*, 2017) their manoeuvring intentions.

A new approach aimed to increase the OONW ability to monitor and handle hazardous situations, in line with Safety II perspective (Hollnagel *et al.*, 2013) in which “humans are seen as a resource necessary for system flexibility and resilience”, was introduced in (Argüelles *et al.*, 2019). The aim of the suggested system is to reduce the risk of collision due to the above factors by:

- helping the OONWs to take early and correct actions in accordance with COLREGs and
- improving the communication between them.

The application of these measures would consist of a system integrated on the bridge, in charge of detecting the dangerous situation, determining the actions and informing the OONW so that they can control the manoeuvres more safely, in compliance with the COLREGs and without conflict with the other vessel. Similar measures could also be applied to unmanned vessels. In this case, the safety instrumented system would be responsible for detecting, calculating and transmitting the reference signals of the manoeuvres to be carried out to the ship’s movement control system.

The most innovative characteristic of the proposed safety system is that the decision on collision avoidance manoeuvres will not be taken in isolation by each ship, but after contrasting the information that the involved ships have about the situation.

The strategy is simple: would it not be better and more reliable if, where possible, a vessel had the information that the vessel with which she is in a close-quarters situation uses to make a decision, rather than having to "guess" her intentions? The aim would be to implement communicative encounters, understood as those in which each vessel makes information available to the other to assist in correct decision making in the event of collision risk.

Its intended functionality can be summarized as follows: When the system installed on a ship detects a risk of collision or close-quarters situation with another ship, it will perform the following tasks, in order:

- Identify the COLREG rules to be applied depending on the scenario and the situation.
- Identify possible manoeuvres for a safe passage.
- Warn its OONW.
- Communicate with the system at the target, to inform and reach agreements for manoeuvring between both OONWs.

The implementation of this system entails the identification of all possible close-quarters situations, scenarios and navigational status in a vessel encounter, and the definition of unambiguous messages to inform the OONWs of the manoeuvres to be carried out, all in compliance with COLREGs.

This paper describes the defined inter-ship dialog and communication messages, using a study case to illustrate the suitability of the prototype.

- Section 2 shows an analysis of vessel encounters, the corresponding manoeuvres inferred from COLREGs and the structure of the associated messages. In addition to considering the situations for vessels in sight scenario (Head On, Overtaking and Crossing), the analysis also includes the conduct of vessels in restricted visibility scenarios (Rule 19), since manoeuvres may differ.
- Section 3 outlines the main aspects concerning the implementation of the prototype.
- Section 4 presents an example of encounter between two ships which may lead to disparate decisions and manoeuvres by their OONWs, and therefore with high risk of collision.
- Section 5 describes how the system would operate in this encounter and discusses the obtained results.
- Section 6 presents the main conclusions.

## 2.- ANALYSIS OF VESSEL ENCOUNTERS AND ASSOCIATED MANOEUVRES

One of the fundamental issues that this paper tries to avoid is the common oversimplification of COLREGs. It is a complex text, which generates uncertainties. We do not know whether it will be simplified or modified in the future, but we will start from the text in force today.

According to the visibility in the encounter area, COLREGs distinguish between three scenarios:

- Vessels in sight (COLREGs Section II),
- Vessels not in sight with RADAR (COLREGs Section III-19 d), and
- Vessel not in sight without RADAR (COLREGs Section III-19 e).

Ships with a totally enclosed bridge must be equipped with a sound reception system. Although the inclusion and use of the information provided by such equipment could be considered, its simplicity (basically, only possible variations in bearings) and the fact that it is not compulsory for all ships, make us decide to defer this scenario of detection only by sound signals (Rule 19 e) to later studies.

Due to length constraints, only the navigation at high seas is considered. Criteria and algorithms referring to geographical restrictions: Narrow Channels (NC), Traffic Separation Schemes (TSS), Inshore Traffic Zone (ITZ) and Traffic Lane (TL), will be part of a further work.

The first step in this analysis consists of identifying all the possible ship-to-ship approaches for each scenario, obtained from their relative positions and headings. Twenty-eight different encounters have been identified: nineteen for vessels in sight scenarios and nine for vessels in restricted visibility scenarios. Each of these encounters will have an associated message to inform the OONWs of both vessels.

It should be noted that there is not a standardized language for collision avoidance in the International Maritime Organization (IMO) Standard Marine Communication Phrases (SMCP) (IMO, 2001). Even in the IMO Model Course 3.17 Maritime English, the importance of "*understand and use vocabulary associated with COLREGs accurately*" is recognised, but without setting a standard phraseology. This is not logical, as the potential assistance that a VHF conversation could provide may be counter-productive if English is not adequately mastered (Sari and Sari, 2020).

We believe that there is a need for standardization of messages that simply and unambiguously inform OONWs of what is considered essential to reduce the risk of the encounters:

- a) Identification of Situation + scenario.
- b) COLREG Rule(s) to apply, including Rule 18, which, depending on the navigational status of the vessels, could alter the default priorities for manoeuvring.
- c) Information about the situation and, when appropriate, about own shipside (port, starboard) or beam (forward-ahead, abeam, abaft-astern) in the Closest Point of Approach (CPA) with the target. From here, the acronym CPA will refer to the distance at the closest point of approach, as defined for RADAR equipment (IMO, 2004).
- d) Prescribed conduct for the vessels (using text and/or images).

For this purpose, messages have been generated using pictograms and phrases that are in line with COLREGs.

Figure 1 shows the basic symbols used for the representation of these situations and associated manoeuvres. Figure 2 outlines all the different encounters between 2 vessels (A, B) in a vessels in sight scenario and their expected conduct according to COLREGs, taking into account their passage priorities, obtained from their navigational status and responsibilities (Rule 18). Figure 3 corresponds to the encounters for vessels in restricted visibility scenarios.

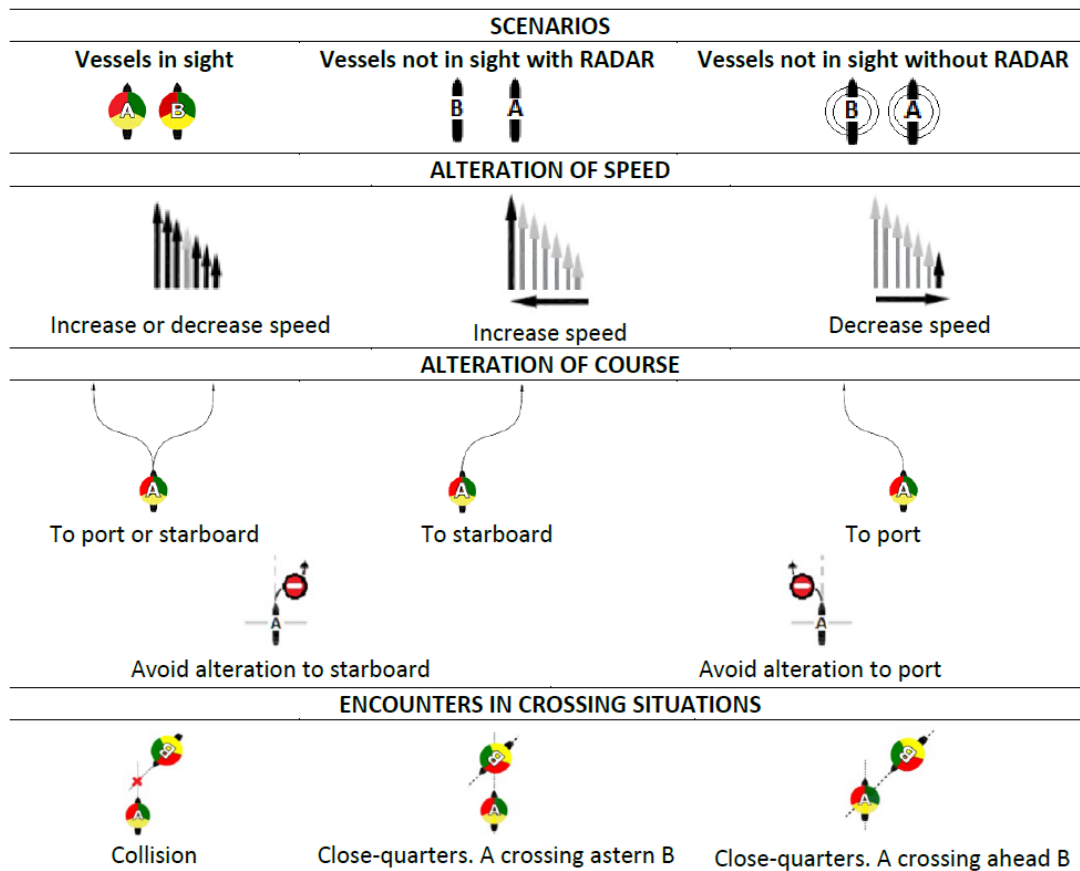


Figure 1. Basic symbols used in pictograms



Figure 2. Situations and manoeuvres for vessels in sight scenarios (COLREGs Section II)

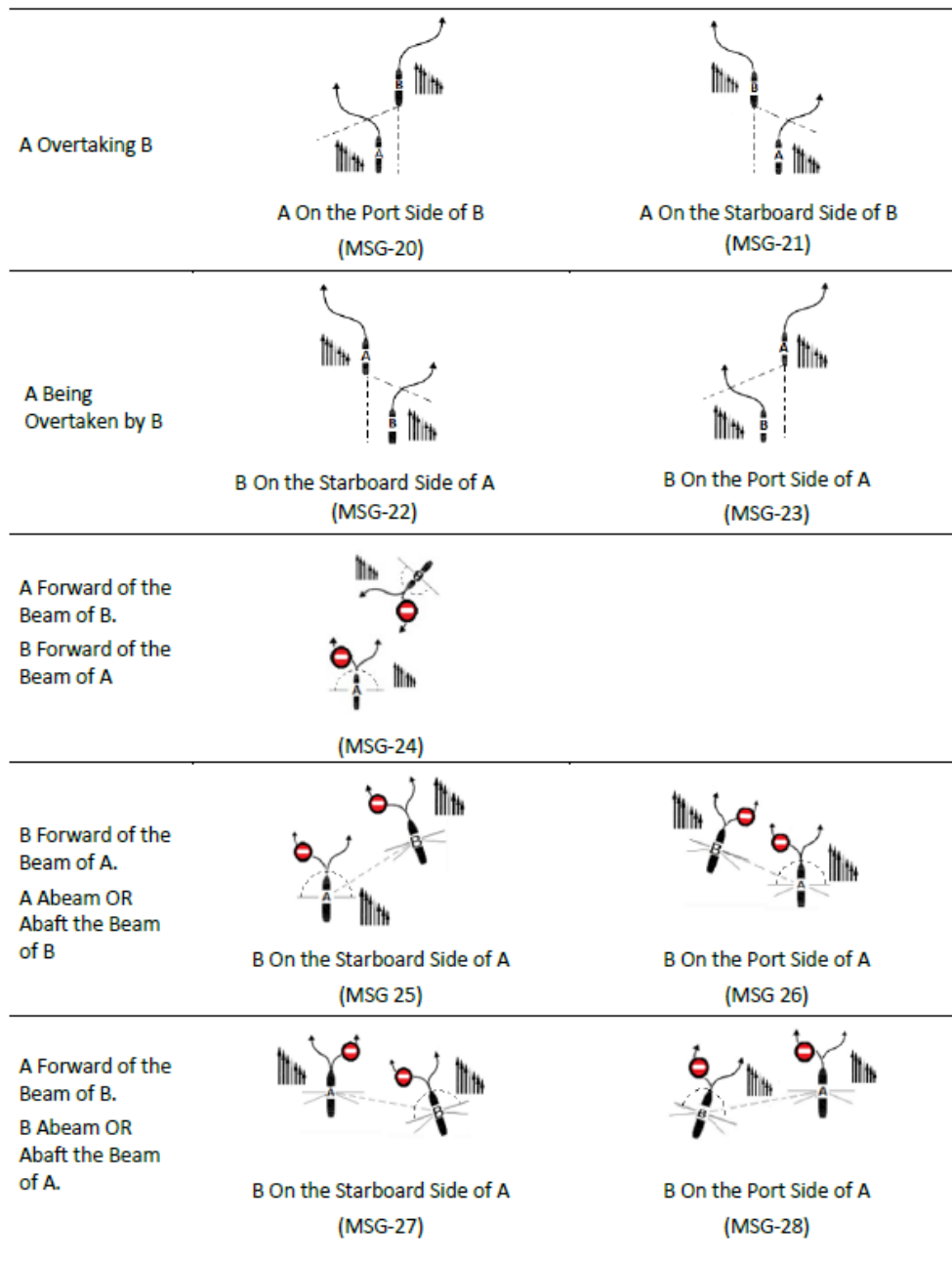


Figure 3. Situation and proposed manoeuvres for vessels not in sight with radar scenarios

Phrases and expressions used in the messages are mainly taken from COLREGs. Table 1 shows the text of some of the defined messages.

Table 1. Text associated to some of the defined messages

MSG-ID	MESSAGE
MSG-3	e) Overtaking. Vessels In Sight. f) Rule 13. g) A Being Overtaken By B. h) B SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF A.
MSG-6	e) Head-On. Vessels In Sight. f) Rules 14 + 18. Priorities. g) A In Head-On Situation With B. h) A, WITHOUT PRIORITY, SHALL KEEP OUT OF THE WAY OF B.
MSG-18	e) Crossing. Vessels In Sight. f) Rule 15. g) A Crossing Ahead Of B. B On The Port Side Of A. h) B SHALL KEEP OUT THE WAY AND AVOID CROSSING AHEAD OF A.
MSG-22	e) Overtaking. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection. f) Rule 19. g) A Being Overtaken By B. h) B SHALL CHANGE COURSE TO STARBOARD SIDE/CHANGE SPEED. A SHALL CHANGE COURSE TO PORT SIDE/CHANGE SPEED.
MSG-26	e) B Is Forward Of The Beam Of A. A Is Abeam Or Aft The Beam Of B. Vessels In Restricted Visibility. Radar Detection. f) Rule 19. g) B On The Port Side Of A. h) A SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO PORT SIDE. B SHALL AVOID AN ALTERATION OF COURSE TO STARBOARD SIDE.

### 3.- CHARACTERISTICS OF THE SAFETY RELATED SYSTEM

The Programmable Electronic (PE) system that implements the safety functions for collision avoidance (conflict detection and resolution) is responsible for data acquisition, processing and communication on each ship. A Programmable Logic Controller (PLC) receives from an Automatic Identification System (AIS) static and dynamic information about Own ship (O) and nearby Targets (Ti). It uses the AIS as a communications channel to send and receive messages to/from the PLCs of the other ships, through addressed binary messages and acknowledgments (ACKs). Figure 4 represents its structure.

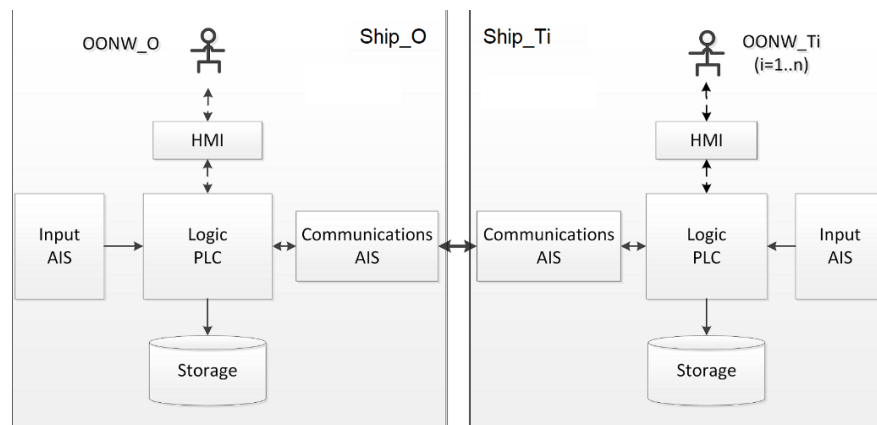


Figure 4. PE system diagram

#### 3.1.- BRIEF OUTLINE OF THE PE SYSTEM

It was decided to use a PLC as the core of the system. Major reasons for using PLCs are their real-time mode of operation, the availability of input and output interfaces for all process signals and for communications with other devices, and their robustness.

For a correct functionality, the PLC requires some information from the OONW/System regarding several ship/scenario criteria, defined in Table 2.

*Table 2. Required parameters*

<b>VIS</b>	<b>Visibility Scenario:</b> In sight, not in sight with RADAR and not in sight without RADAR.
<b>LRS</b>	<b>Long Range Scanning:</b> distance to start analyzing encounters.
<b>CPASafe</b>	Limit value for CPA: minimum CPA, limit between safe distance and close-quarters.
<b>TCPASafe</b>	Minimum value for TCPA, if CPA < CPASafe, to start manoeuvres (including the estimated time to decide and set the manoeuvre).
<b>dPrealert</b>	Distance to start manoeuvres (including the estimated distance to cover while deciding and setting the manoeuvre) if own ship is a vessel which is required not to impede the passage or safe passage of another vessel. It depends on the relative speed and on the type and dimensions of the ships.
<b>dAlert</b>	distance to start manoeuvres (including the estimated distance to cover while deciding and setting the manoeuvre) if own ship is a vessel the passage of which is not to be impeded, in the event that the other vessel does not act correctly. It depends on the relative speed and on the type and dimensions of the ships.

Those parameters will determine the following logical terms:

- Safe distance:  $CPA \geq CPASafe$ .
- Close-quarters/Risk of Collision:  $CPA < CPASafe$ .
- Prealert:  $CPA < CPASafe$  and  $((distance \leq dPrealert) \text{ or } (TCPA < TCPASafe))$ .

Once the information has been obtained, each PLC will, cyclically:

- a) Receive from the AIS the static information (ID, name, type of vessel, dimensions) and dynamic information (latitude, longitude, Heading (H), Speed Over Ground (SOG), Rate Of Turn (ROT), Navigational Status) of own and nearby vessels, and the transmitted binary messages.
- b) Perform the calculations of distance (d), Bearing (B), relative Speed ( $S_R$ ), relative Course ( $C_R$ ), CPA and TCPA.
- c) Determine if there is a close-quarters situation in each ship-to-ship encounter, and the actions to be taken for both ships.
- d) In case of prealert:
  - Communicate the data and the calculated rules to apply to the OONW and wait for his/her response.
  - Exchange messages with the PLC of the target ship:
    - Send the calculated information to check if there is agreement in the data handled by both PLCs, and wait for the target PLC's answer. If there are differences between the data they handle, each PLC will warn its operator.
    - If there is agreement on the previous point, the PLC sends the calculated manoeuvre to the target PLC and waits for it to inform its operator and his/her response.
- e) Inform OONWs of agreements, possible disagreements, delays, communication failures, etc.
- f) Inform OONWs about possible manoeuvres to achieve safe distance.
- g) Store all relevant information for future reference.

A group of messages (see Table 3) is used to initiate or confirm the communication between the PLCs of Own and Target ships (PLC\_Own and PLC\_Target), to check the correspondence between their data and to inform the OONWs about agreements or disagreements.

Table 3. Check and confirmation messages

MSG FROM PLC_Own TO PLC_Target	MSG-ID
Own Ship enters in Prealert. Init and check comm with PLC_Target	MSG-50
Reception of MSG 50 from PLC_Target	MSG-51
OONW_Own agrees with the MSG received from Target	MSG-52
OONW_Own doesn't agree with MSG received from Target	MSG-53
PLC_Own has these available data about the Target	MSG-54
OONW_Own Resets the agreement with OONW_Target	MSG-55
PLC_Own agrees with the data received from PLC_Target - Response to MSG 54	MSG-56
PLC_Own doesn't agree with the data received from PLC_Target - Response to MSG 54	MSG-57
OONW_Own doesn't answer to the received MSGs	MSG-58
Periodic checking of communication between PLCs	MSG-59
Reception of MSG 55 from PLC_Target	MSG-60
Own Ship leaves Prealert	MSG-61

### 3.2.- MANOEUVRING CALCULATIONS FOR COLLISION AVOIDANCE

In case of prealert with a target, besides showing to the OONW the information on the encounter and the messages according to COLREGs, the system will calculate and inform the OONW about ranges of course or speed for which  $CPA \geq CPASafe$ , as an aid to determine the manoeuvre to perform.

Table 4 shows the initial ( $t_0$ ) data for an illustrative example that will be used in the study case. Target positions (lat, Long) in miles, relatives to own ship.

Table 4. Initial data for Own and Target ships

	OWN <sub>SHIP</sub>	TARGET <sub>SHIP</sub>	CPA	TCPA
POSITION	(0,0)	(0.77, -2.59)		
HEADING	329.0°	353.0°	0.104'	21.1min
SPEED	17 kn	12.2 kn		

It is an overtaking situation in a vessels in sight scenario, Own ship overtaking Target. According to Rule 13 of COLREGs, the overtaking vessel shall keep out the way of the vessel being overtaken, if there are no other impediments or priorities.

A  $CPASafe = 0.5$  miles is set. The relative courses ( $CR_1$  and  $CR_2$ ) at this distance to achieve the safe CPA are shown in Figure 5 (lengths not proportional to distance).

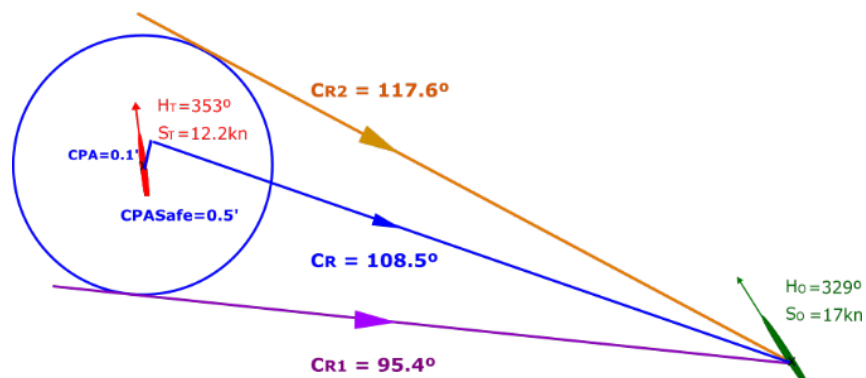
Figure 5. Relative courses, for  $CPASafe = 0.5$  miles

Figure 6 represents the polar chart (R, Theta) with velocity vectors ( $S_O, H_O$ ), ( $S_T, H_T$ ) and relative courses  $CR_1$  and  $CR_2$ .  $S_{OMax}$  and  $S_{OMin}$  are the maximum and minimum speeds for own ship. The shaded area corresponds to the values of the velocity vector ( $S_O, H_O$ ) for which  $CPA < CPASafe$ , assuming the target is a stand-on ship. It is called the Velocity Obstacle (VO) area (Fiorini and Shiller, 1998). To pass at a safe



distance by alteration of course alone, the selected heading must be out of the arc limited by  $H_{O1}$  and  $H_{O2}$ . Similarly, manoeuvring only by altering the speed will require that  $(S_0 > S_{O2})$  or  $(S_0 < S_{O1})$ . Taking into account the dynamic characteristics of the ship (manoeuvrability parameters), the relative speed and the distance to the target, relative courses are recalculated, increasing the VO area.

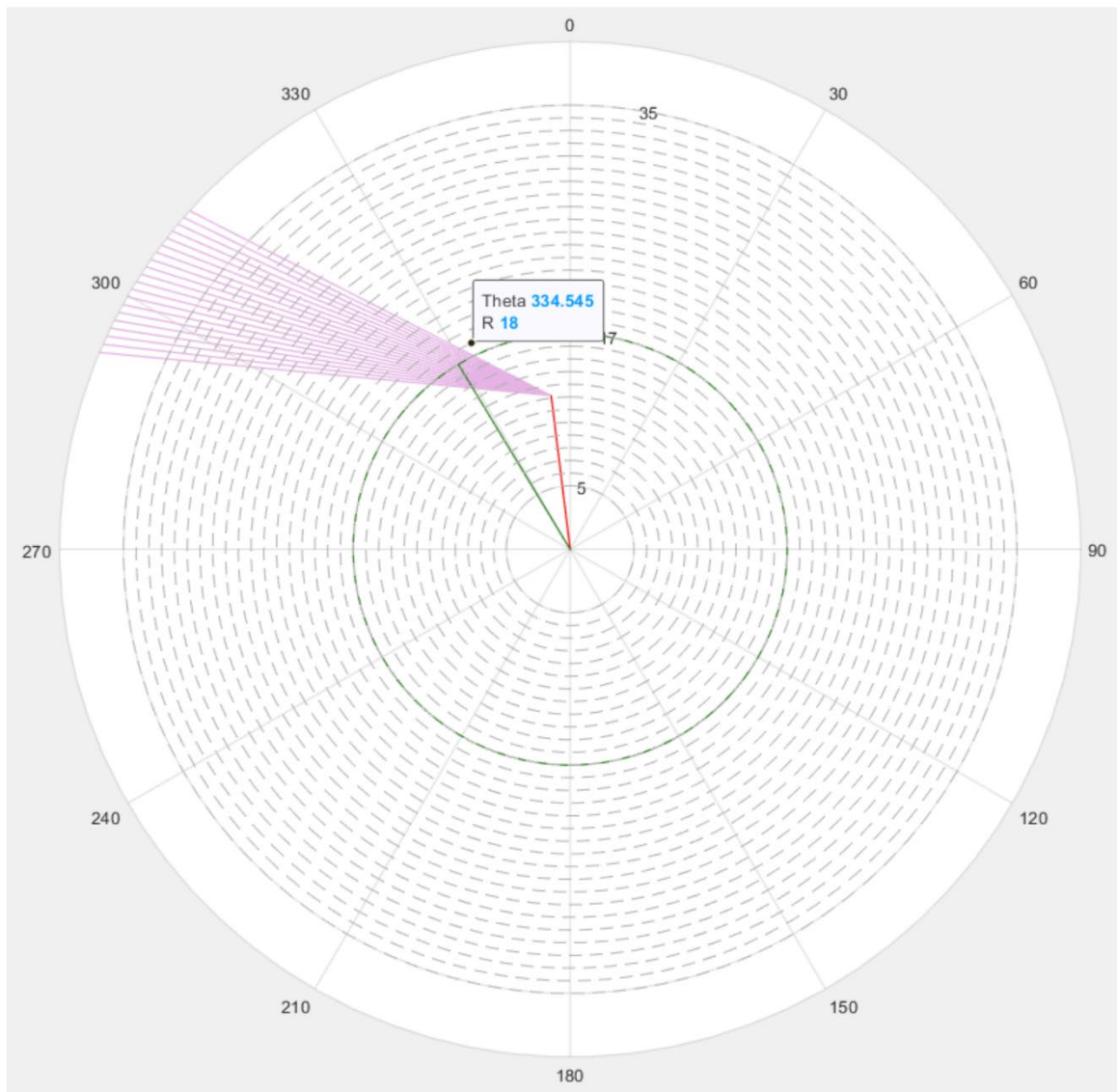
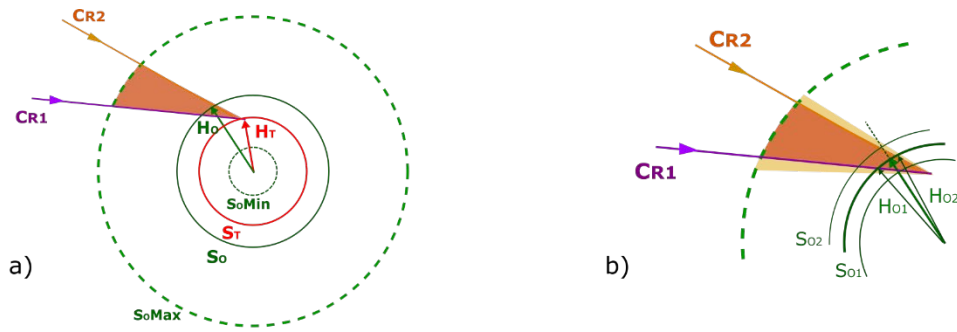


Figure 6. Polar chart with VO area for own ship velocity vectors

A real time graph similar to Figure 6c) will be displayed. Own ship OONW can move the cursor over the chart, to select  $R(S_0)$  and  $\Theta(H_0)$  values for a safe manoeuvre.

#### 4.-A CASE STUDY

All the marine accident reports include synopsis, factual information, analysis, conclusions and recommendations. Conclusions resume probable causes of the accidents. Frequent alleged causes for ship collisions are OONW wrong decisions, lack of early actions and failures or misunderstandings in the communication between OONWs.

One of the most striking cases is related to the boundary between overtaking and crossing situations, that can create errors of appreciation and incorrect application of COLREGs, as in one of the examples from the reports (MAIB, 2005). The legal outcome of a collision between two bulk carriers in Singapore waters (SGHC, 2017) has particularly caught our attention.

Differences in the assessment of the situation can also result in a discrepancy regarding the responsibilities of the vessels. This special situation allows us to illustrate the system functionality and applicability.

The situation shown in Figure 7, equivalent to the example in the previous section, is used as the study case.

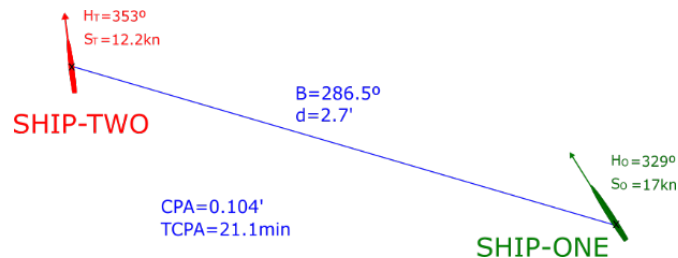


Figure 7. Overtaking situation, vessels in sight (lengths not proportional to distance)

If both ships continue with uniform movement, at a distance of 1.8 miles the situation becomes crossing, with SHIP-ONE on the starboard side of SHIP-TWO.

Let us suppose that the OONWs of both ships have set a CPASafe of 0.5 miles. Both should apply COLREGs since there is a risk of collision ( $CPA < CPASafe$ ). When do OONWs react and start applying the rules? Different possibilities are analyzed, assuming a correct interpretation of COLREGs:

- Both OONWs react when the distance between the ships is bigger than 1.8 miles ( $d_{Prealert} > 1.8$ ). Both perform the calculations and determine that SHIP-ONE is overtaking SHIP-TWO, in vessels in sight scenario. Applying Rule 13, SHIP-ONE must manoeuvre to keep out of the way of SHIP-TWO, which does not have to manoeuvre, in a first moment.
- Both OONWs have  $d_{Prealert} < 1.8$  miles. Both perform the calculations and determine that they are in a crossing situation, SHIP-ONE on the starboard side of SHIP-TWO, in vessels in sight scenario (Rule 15). SHIP-TWO must keep out of the way and avoid crossing ahead of SHIP-ONE, which does not have to manoeuvre, in a first moment.
- As it is not defined when (at what distance or how long in advance) operators have to react, let us suppose that  $d_{Prealert} > 1.8$  for SHIP-TWO and  $d_{Prealert} < 1.8$  for SHIP-ONE. SHIP-TWO OONW does not start a manoeuvre since he/she deduces (correctly) that Rule 13 has to be applied and that SHIP-ONE has to manoeuvre. And SHIP-ONE OONW does not start a manoeuvre since he/she deduces (also correctly) that Rule 15 must be applied, so that SHIP-TWO should manoeuvre, as in the case of Singapore. Consequence: neither ship is manoeuvring and the distance between them keeps decreasing until, at best, an OONW realises that they are too close and is forced to manoeuvre, according to Rule 17, Action by stand-on vessel.
- Finally, if  $d_{Prealert} > 1.8$  for SHIP-ONE and  $d_{Prealert} < 1.8$  for SHIP-TWO, SHIP-ONE OONW should manoeuvre in advance, as she is overtaking SHIP-TWO. But, if this manoeuvre is not initiated or apparent before SHIP-TWO enters in prealert and identifies that they are in a crossing situation, both ships could turn to starboard, increasing the risk of the situation.
- In real conditions, the calculated boundary between overtaking distance and crossing distance may vary slightly. Near that distance both operators may have reacted at the same time, may have performed the calculations correctly and may have inferred different situations and therefore apply different COLREG

rules. Anyway, SHIP-ONE OONW should keep in mind Rule 13 c): “*when a vessel is in any doubt as to whether she is overtaking another, she shall assume that this is the case and act accordingly*”.

If vessels in restricted visibility scenario is also considered, there will be more combinations of reactions from operators, thus increasing the risk of collision. And the number of conflicting reactions increases when adding the cases where there is not agreement about the visibility.

The foregoing considerations, assuming proper interpretations of COLREGs and correct calculations that nevertheless result in faulty manoeuvres, could be extrapolated to possible implementations for autonomous vessels, with the risk that this entails. Even by communicating a disagreement with the other ship's diagnosis, to know it gives a degree of certainty that is not otherwise achieved.

To these considerations should be added those cases in which, for reasons of misinterpretation of COLREGs or faulty calculations, a OONW takes erroneous manoeuvring decisions, that could be highlighted by the other vessel's comments.

## 5.- SYSTEM PERFORMANCE. RESULTS AND DISCUSSION

This section shows the results of applying the implemented prototype of the system to the described example case. Initial given values are displayed in Table 5. SHIP-ONE uses PLC1 and AIS1; SHIP-TWO, PLC2 and AIS2.

*Table 5. Initial data*

<b>Parameter</b>	<b>PLC1</b>	<b>PLC2</b>
Ship Name (ID):	SHIP-ONE	SHIP-TWO
Latitude:	0° 0' 0" N	0° 0' 47" N
Longitude:	0° 0' 0" E	0° 2' 37" W
Navigational Status (0..15):	0 (under way using engine)	0 (under way using engine)
Visibility (good, restricted):	good	good
Heading:	329.0	353.0
Speed:	17.0	12.2
LRS (miles):	12.0	12.0
CPASafe (miles):	0.5	0.5
TCPASafe (min):	10.0	10.0
Dist Prealert (miles):	1.5	2.3
Dist. Alert (miles):	0.8	1.2

Figure 8 includes information visualized by each OOWN, with the calculated data in PLC1 (left) and PLC2 (right) before detecting a prealert situation.

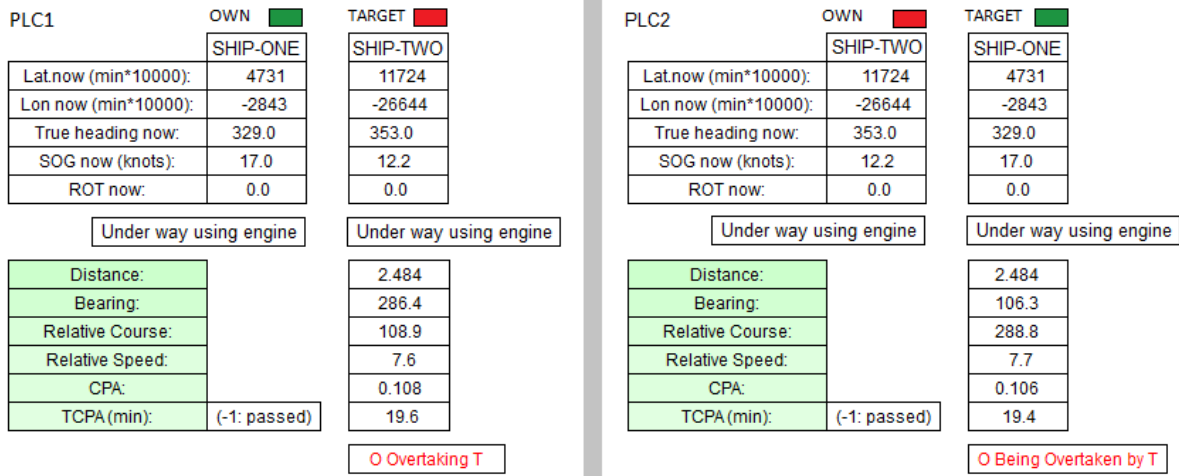


Figure 8. Received and calculated data in each PLC, before prealerts

The calculated CPA is less than CPASafe for both ships. From the initial data, SHIP-ONE will enter in prealert when (distance  $\leq 1.5$ ) or (TCPA  $\leq 10.0$ ). For SHIP-TWO, the selected distance for prealert is 2.3 miles. At that distance, as shown in Figure 9, vessels are in an overtaking situation (SHIP-ONE overtaking SHIP-TWO).

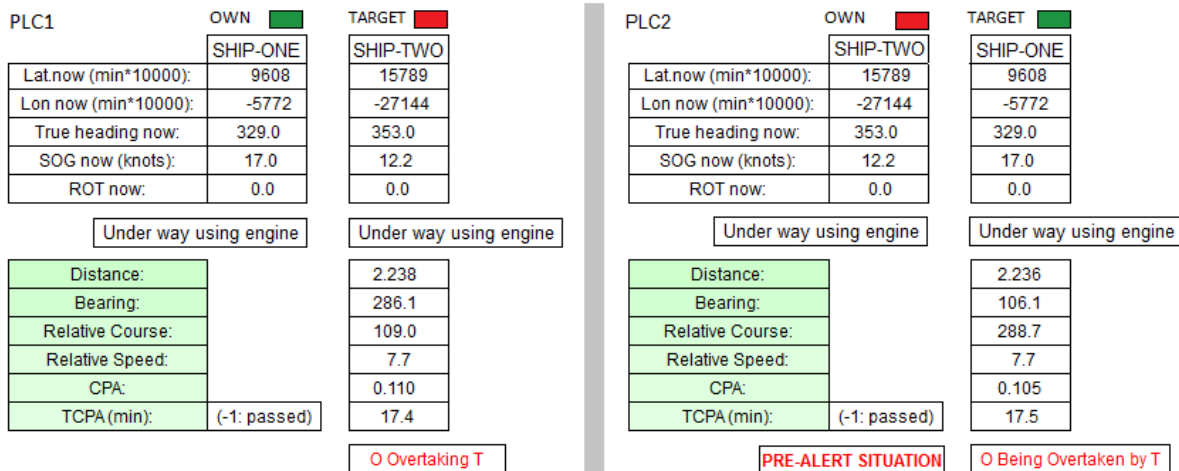


Figure 9. Received and calculated data, SHIP-TWO in prealert

Figure 10 represents the sequence of messages between the systems.

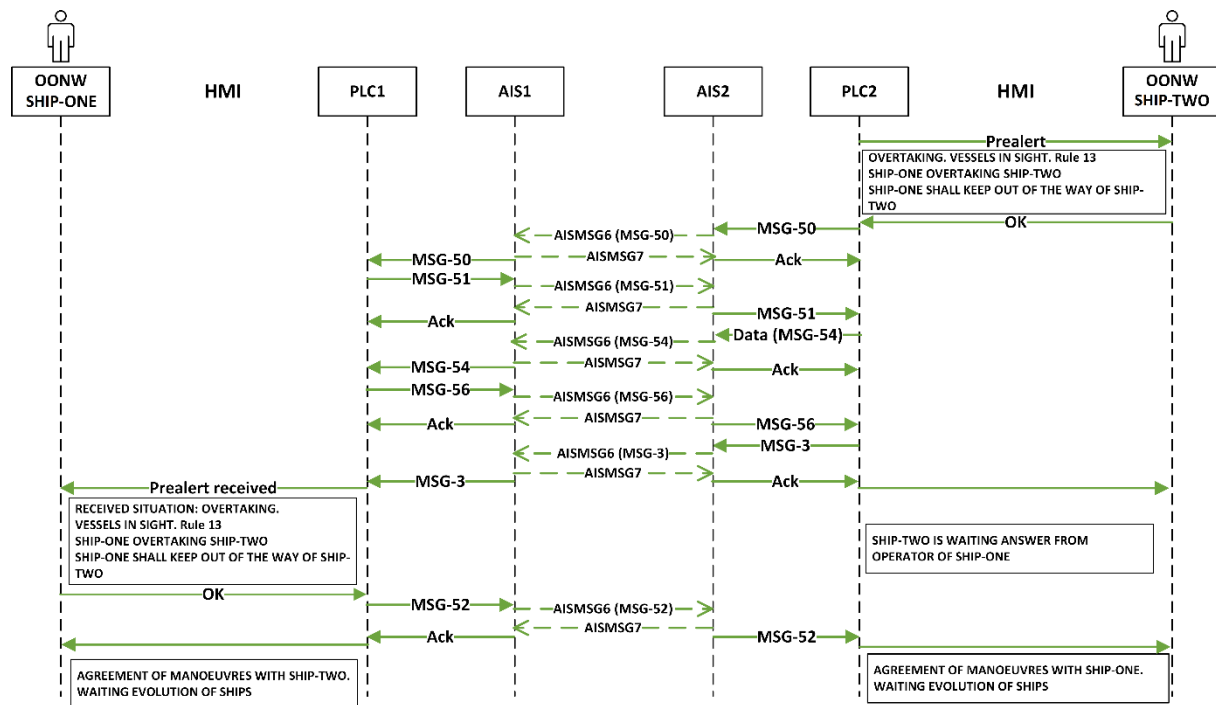


Figure 10. Sequence of messages, in case of agreement between OONWs

When PLC2 detects prealert, it shows to its operator the information about the encounter. If the operator agrees, PLC2 sends to PLC1 the message MSG-50 (see Table 3) to start the dialog, it waits for the reception of MSG-51 and then it sends to PLC1 the message with the associated dynamic information (MSG-54). PLC1 checks the matching with its data. If they match, PLC1 sends MSG-56 and then PLC2 sends MSG-3 (see Table 1), with the information for the agreement, and advises its operator that it is waiting for an answer from SHIP-ONE OONW. PLC1 displays the received information, and if the operator says OK, both PLCs inform about the agreement. MSG-50, MSG-51, MSG-52, MSG-54, MSG-56 and MSG-3 are sent by means of addressed binary AIS messages (AISMSG6). The AIS that receives an addressed binary message acknowledges it by sending back an ACK (AISMSG7). The waiting time for the reply to any message is limited. In case of delay, the PLC alerts its operator.

Figure 11 illustrates the prealert messages sent to the OONWs, as in Figure 10, but in a restricted visibility scenario (MSG-26).

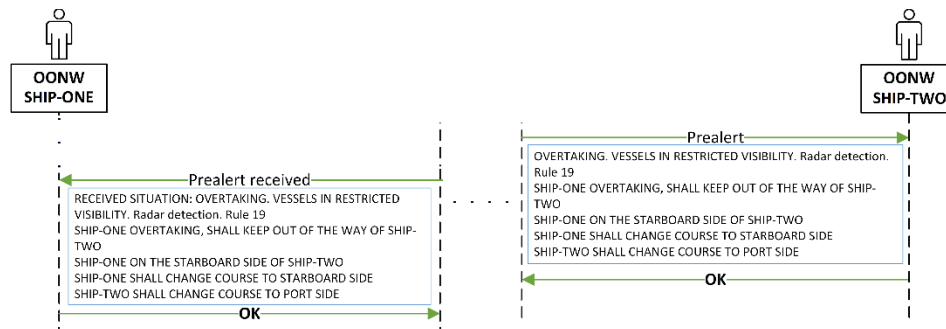


Figure 11. Prealert messages, restricted visibility

The situation turns into crossing when distance < 1.8 miles. As SHIP-TWO is already in prealert at this distance, she maintains the overtaking situation (in which the prealert has been generated), in compliance with COLREG Rule 13.d): “Any subsequent alteration of the bearing between the two vessels shall not make the overtaking vessel a crossing vessel within the meaning of these Rules or relieve her of the duty of keeping clear of the overtaken vessel until she is finally past and clear”.

As SHIP-ONE is not yet in prealert (her dPrealert = 1.5 miles), her system recognizes the crossing situation. If distance < 1.8 miles when SHIP-TWO sends to SHIP-ONE the manoeuvring message, the situations are those given in Figure 12.

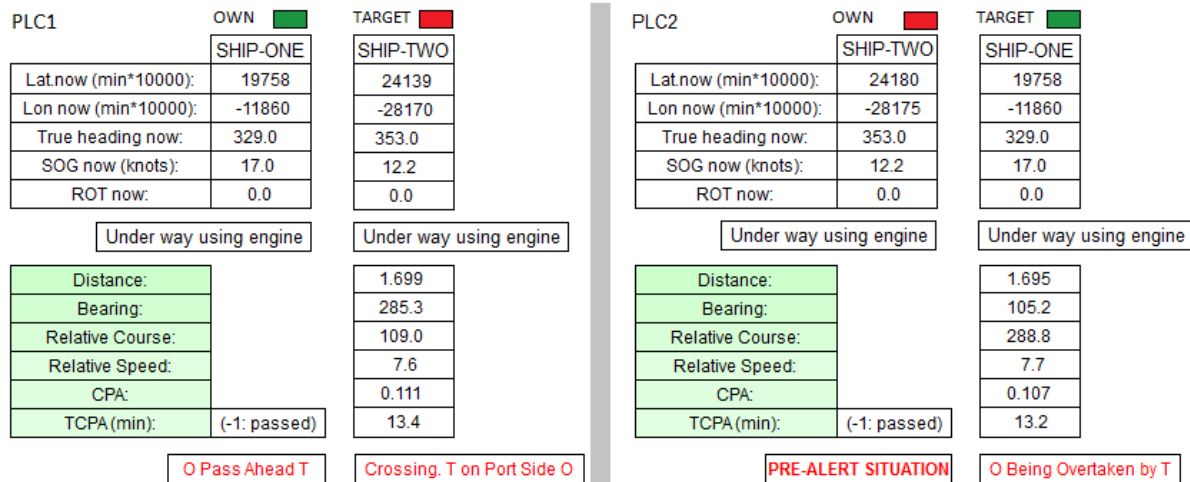


Figure 12. Received and calculated data, discrepancies

The sequence of messages, if SHIP-TWO OONW agrees with the warning of prealert from PLC2, is shown in Figure 13. PLC1 detects differences in the received data (in MSG-54) with respect to its own data, and warns its operator. So, SHIP-ONE OONW sees that SHIP-TWO has detected a Being Overtaken situation. In addition, PLC1 sends to PLC2 the message with the dynamic information available in SHIP-ONE, and SHIP-TWO OONW also sees the difference. Discrepancies in numerical values (distance, CPA, etc.) are allowed within predefined tolerance ranges.

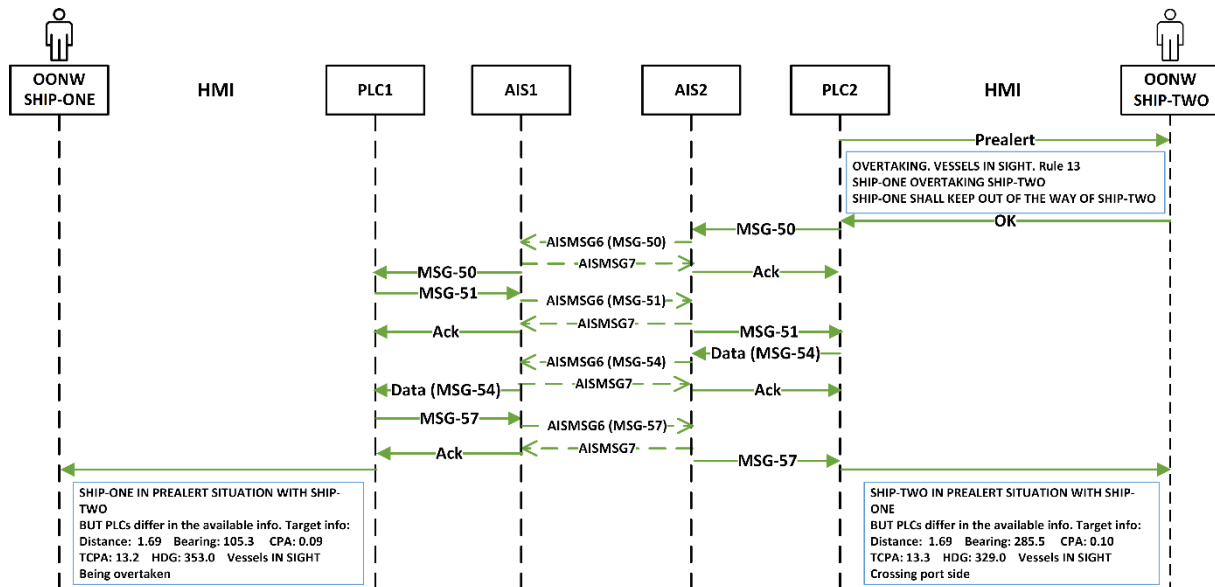


Figure 13. Sequence of messages, in case of data discrepancies between PLCs

Finally, let us assume that the prealert distance defined for SHIP-TWO (1.2 miles) is less than that given for SHIP-ONE (1.5 miles). In this case, PLC1 detects first the prealert situation, warns its operator and then the corresponding exchange of messages will take place. Both systems recognize a crossing situation, with SHIP-ONE crossing ahead on the starboard side of SHIP-TWO. The sequence of messages is shown in Figure 14.



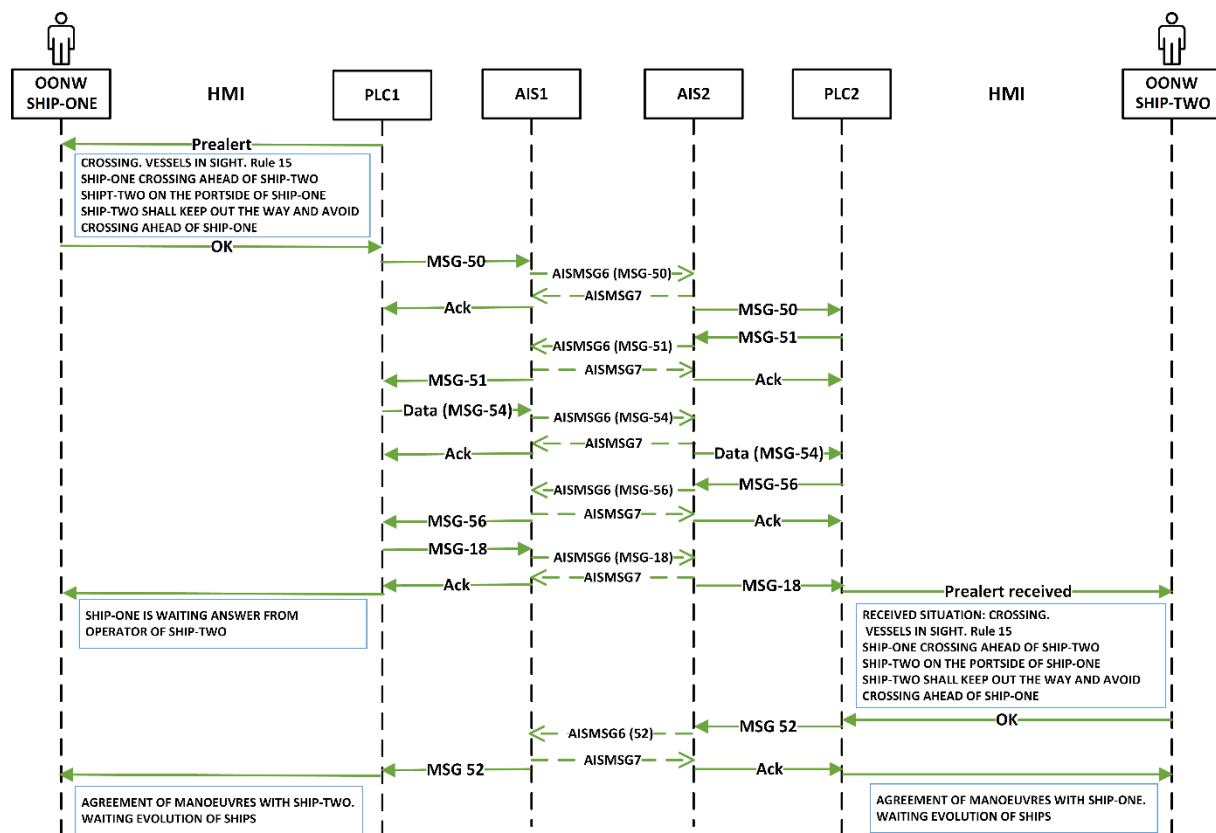


Figure 14. Sequence of messages,  $d_{Prealert} = 1.5$  miles

All the sent or received messages and their associated dynamic data, with date and time, will be stored by each PLC in an external database, for further consultation.

The final implementation of this system will require ships to be equipped with a PLC and an AIS, for data acquisition and communication of messages for agreements between the OONWs. Although AIS data availability and reliability has been improving over time (Tu *et al.*, 2018), its use can be combined with other equipment for data input. These data would be redundant with those from AIS and could be used to improve the availability and integrity of dynamic information (Felski *et al.*, 2015; Last *et al.*, 2014), and hence the reliability of the model.

A common criterion in the assignation of values for CPASafe, TCPASafe, LRS,  $d_{Prealert}$  and  $d_{Alert}$ , and their dependence on the type of vessels and relative speeds must be established. It is also necessary to define the allowed tolerance for the acquired dynamic values.

With the dynamic information provided by the AIS, the developed system has enough data to be able to apply COLREG Section II rules, corresponding to vessels in sight. However, for vessels in restricted visibility, Section III must be applied. In this case, current COLREGs only consider explicitly the information provided by the radar or by sound signals for the detection of another vessel. If this rule is not modified, the decision about the manoeuvre based on the information obtained from the AIS could be questioned. Nevertheless, the use of AIS as the source of information made in this work is supported by IMO Resolution A.1106 (IMO, 2015), COLREG Rule 5 and legal sentences (Western Neptune and St Louis Express collision (Tsimplis and Papadas, 2019)).

In this model it is necessary an input from the OONWs, indicating whether they are in a vessels in sight or not in sight scenario, in order to apply the rules of Section II or Section III. The overtaking situation of vessels in restricted visibility is identified in rule 19 d): "... the following shall be avoided: (i) an alteration of course to port for a vessel forward of the beam, other than for a vessel **being overtaken**". COLREGs do not define what to do in this case.

This model proposes the following:

- In an overtaking situation with restricted visibility, both vessels have to manoeuvre. The overtaking vessel must manoeuvre to the opposite side by which she is overtaking. The other vessel, to the opposite side by which she is being overtaken. See, as an example, Table 1, MSG-22.
- For the rest of situations in restricted visibility with radar detection, the system determines what alteration of course each ship should avoid, as shown in Table 1, MSG-26.

In each agreement, the OONWs of both vessels agree, or not, on the following:

- Time to start actions to avoid collision.
- Scenario in which they are: vessels in sight or vessels in restricted visibility with radar.
- Situation, depending on the scenario.
- Rule to apply, including the alternative dependent on the navigational status.

The agreement does not quantify the manoeuvre, that is, values for heading or speed that should be ordered if there is a close-quarters situation or risk of collision exists are not included in the inter-ship messages. It is assumed that the calculation of the manoeuvre is the mission of the OONWs. Anyway, the system provides each operator with heading and speed values for which the  $CPA \geq CPASafe$ . They can select between different options to visualize the VO areas:

- all targets in their LRS,
- only a particular target,
- targets for which there is a prealert situation,
- stand-on targets.

Figure 15 shows an example, with an additional target.

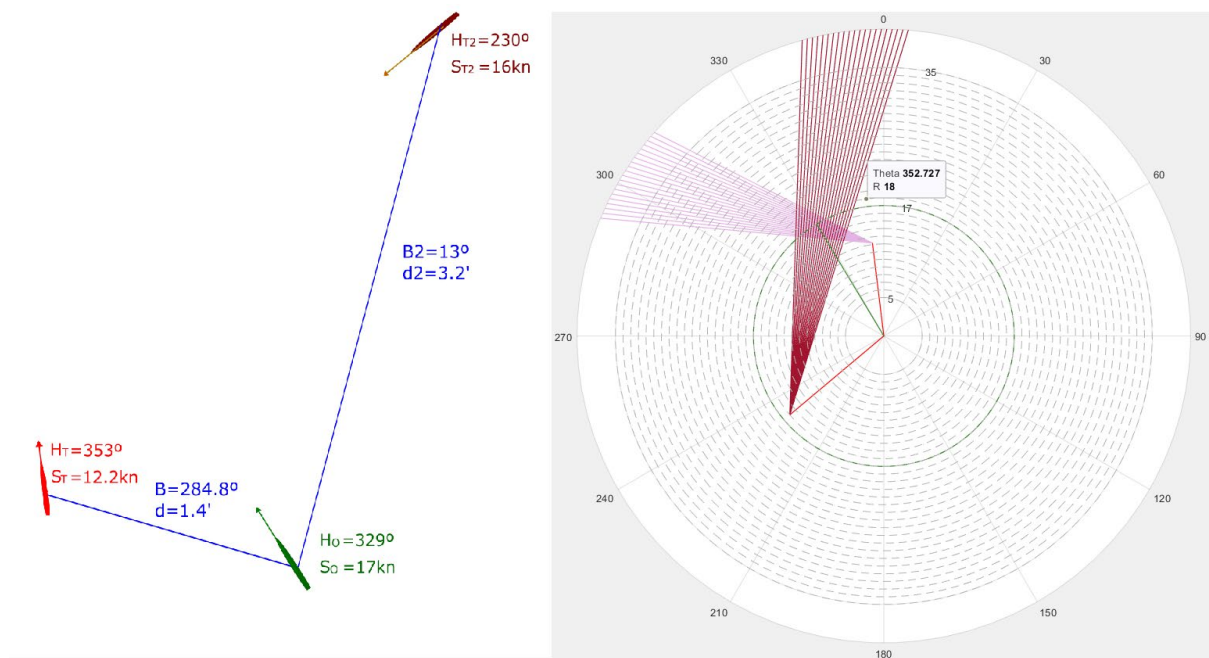


Figure 15. Chart display with 2 targets

From these manoeuvring data, the visualization of the COLREG rules to apply, and the information about the agreement (or disagreement) with the target, the OONW can decide the most suitable manoeuvre. A new binary message could be defined to broadcast, by using AIS MSG 8, the selected manoeuvre.

A simple Human-Machine Interface (HMI) was used in the tests. Possible HMI formats are being analyzed, to facilitate the OONW tasks without increasing the risk of human error (OSHA, 2009; Pietrzykowski *et al.*, 2017; Ramos *et al.*, 2019; Szlapczynski and Szlapczynska, 2015). The HMI must include an audible signal to warn the OONW about the reception of any AIS binary message.



For a critical encounter, this communication system informs the involved ships about the Prealert and Alert distances (dPrealert, dAlert) of both. This could avoid high-risk situations, such as those that can occur in a critical encounter between ships of different sizes, in which a large ship, with large dPrealert and dAlert values and still having priority of passage, would have the need to manoeuvre a small ship if the dPrealert of this one is lower than her dAlert (Rule 17, Action by stand-on vessel).

## 6.- CONCLUSIONS

Ship encounters that may generate a critical situation should be dealt with according to the COLREGs. These rules, in most cases, are presented as good, effective and understandable references. Manoeuvres carried out according to COLREGs are what is known as good seamanship.

It may happen that the interpretation of the rules by the OONWs in charge is not homogeneous, which can lead to catastrophic results.

The model presented in this article can act as an available mean for a ship to maintain a proper lookout, and provides an appraisal of the situation and of the risk of collision, in support of COLREG Rule 5.

The system offers a solution using common on-board equipment along with other easily accessible electronic programmable devices.

With the defined unambiguous and standardizable messages and pictograms some problems would be avoided, as those derived of wrong communication between OONWs due to lack of common language or limited English skills.

Even in special situations, such as the shown study case, the system allows each of those involved in the situation to be informed about the intentions and characteristics of the other, in particular about the safe and prealert distances for each ship.

The messages, accompanied by audible signals, warn the OONWs, an essential feature to prevent lookout errors.

It will be easy to agree on the manoeuvres to be carried out.

In case of disagreement, the knowledge of this fact will allow the consequent adoption of other collision prevention measures.

## REFERENCES

- Argüelles, R., Maza, J.A., Martín, F., 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>
- Boström, M., 2020. Mind the Gap! A quantitative comparison between ship-to-ship communication and intended communication protocol. *Saf. Sci.* 123. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104567>
- DMAIB, 2020. Danish Maritime Accident Reports [WWW Document]. URL <https://dmaib.com/reports> (accessed 9.4.20).
- EMSA, 2019. Annual overview of marine casualties and incidents 2019 [WWW Document]. URL <http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/item/3734-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2019.html> (accessed 9.10.20).
- EU-OSHA, 2009. The human machine interface as an emerging risk. European Agency for Safety and Health at Work.
- Felski, A., Jaskólski, K., Banyś, P., 2015. Comprehensive Assessment of Automatic Identification System (AIS) Data Application to Anti-collision Manoeuvring. *J. Navig.* 68, 697–717. <https://doi.org/10.1017/S0373463314000897>
- Fiorini, P., Shiller, Z., 1998. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *Int. J. Robot. Res.* 17, 760–772. <https://doi.org/10.1177/027836499801700706>
- Hollnagel, E., Leonhardt, J., Licu, T., Shorrock, S., 2013. From Safety-I to Safety-II: A white paper.
- Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R.R., Gelder, P.H.A.J.M. van, 2020. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Saf. Sci.* 121, 451–473. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.018>

- IMO, 2018. Regulatory scoping exercise for the use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) – Report of the Working Group. MSC 100/WP.8. International Maritime Organization.
- IMO, 2015. Resolution A.1106. Revised guidelines for the onboard operational use of shipborne automatic identification systems (AIS).
- IMO, 2004. Adoption of the revised performance standards for RADAR equipment. Resolution MSC.192(79)- Annex 34.
- IMO, 2001. Standard Marine Communication Phrases. Resolution A.918(22).
- IMO, 1972. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs).
- JTSB, 2020. Japan Transport Marine Accident and Incident Reports [WWW Document]. URL <http://www.mlit.go.jp/jtsb/marrep.html> (accessed 9.10.20).
- Kim, D., Hirayama, K., Okimoto, T., 2017. Distributed stochastic search algorithm for multi-ship encounter situations. *J. Navig.* 70, 699–718. <https://doi.org/10.1017/s037346331700008x>
- Last, P., Bahlke, C., Hering-Bertram, M., Linsen, L., 2014. Comprehensive Analysis of Automatic Identification System (AIS) Data in Regard to Vessel Movement Prediction. *J. Navig.* 67, 791–809. <https://doi.org/10.1017/S0373463314000253>
- MAIB, 2020. GOV.UK Marine Accident Investigation Branch Reports [WWW Document]. URL <https://www.gov.uk/maib-reports> (accessed 9.10.20).
- MAIB, 2005. Report No 17/2005 on the investigation of the collision between Hyundai Dominion and Sky Hope in the East China Sea. [WWW Document]. URL [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c70b8ed915d4c100000a9/Hyundai\\_Sky\\_Hope.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/547c70b8ed915d4c100000a9/Hyundai_Sky_Hope.pdf) (accessed 9.9.20).
- MCA, 2016. Navigation: Watchkeeping Safety–Use of VHF Radio and AIS.
- MSIU, 2020. Gov.MT Accident and Incident Safety Investigation [WWW Document]. URL <https://mtip.gov.mt/en/Pages/MSIU/Marine-Safety-Investigation-Unit.aspx> (accessed 9.9.20).
- Pietrzykowski, Z., Wolejsza, P., Borkowski, P., 2017. Decision Support in Collision Situations at Sea. *J. Navig.* 70, 447–464. *J. Navig.* 70, 447–464. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000746>
- Ramos, M.A., 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>
- Sari, L.I., Sari, R.H., 2020. Exploring English Language Needs of Indonesian Marine Pilots: A Need Analysis and Its Implications in ESP Classrooms. *TransNav Int J Mar Navig Saf Sea Transp* 14, 909–917. <https://doi.org/10.12716/1001.14.04.15>
- SGHC, 2017. Collision between two bulk carriers, the Meghna Princess and the Dream Star [WWW Document]. URL <https://www.supremecourt.gov.sg/docs/default-source/module-document/judgement/adm-9---12-sep-finalised-released-pdf.pdf> (accessed 3.3.21).
- SHK, 2020. Swedish Accident Investigation Authority, Maritime accidents and serious incidents [WWW Document]. URL <https://www.havkom.se/en/om-shk/civil-sjoefart> (accessed 9.10.20).
- Sotiralis, P., Ventikos, N.P., Hamann, R., Golyshev, P., Teixeira, A.P., 2016. Incorporation of human factors into ship collision risk models focusing on human centred design aspects. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 156, 210–227. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.08.007>
- Szlapczynski, R., Szlapczynska, J., 2015. A Target Information Display for Visualising Collision Avoidance Manoeuvres in Various Visibility Conditions. *J. Navig.* 68, 1041–1055. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000296>
- Tsimplis, M., Papadas, S., 2019. Information Technology in Navigation: Problems in Legal Implementation and Liability. *J. Navig.* 72, 833–849. <https://doi.org/10.1017/S0373463318001030>
- Tu, E., Zhang, G., Rachmawati, L., Rajabally, E., Huang, G.-B., 2018. Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to Methodology. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 19, 1159–1582. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2724551>
- Ung, S.-T., 2019. Evaluation of human error contribution to oil tanker collision using fault tree analysis and modified fuzzy Bayesian Network based CREAM. *Ocean Eng.* 179, 159–172.
- Weng, J., Yang, D., Chai, T., Fu, S., 2019. Investigation of occurrence likelihood of human errors in shipping operations. *Ocean Eng.* 182, 28–37.

- Yıldırım, U., Başar, E., Uğurlu, Ö., 2019. Assessment of collisions and grounding accidents with human factors analysis and classification system (HFACS) and statistical methods. *Saf. Sci.* 119, 412–425. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.09.022>
- Zhang, J., Zhang, D., Yan, X., Haugen, S., Guedes Soares, C., 2015. A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs. *Ocean Eng.* 105, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.054>

# Ship-to-ship Dialogs Using A Finite State Machine

Reyes Poo Argüelles<sup>1</sup>, Jesús A. García Maza<sup>2</sup>, Felipe Mateos Martín<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Oviedo, Department of Electrical, Electronic, Communications and Systems Engineering, Spain

<sup>2</sup>University of Oviedo, Department of Marine Science and Technology, Spain

## ABSTRACT

Collision Avoidance Systems require correct and unambiguous application of the Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs). Ship-to-ship dialogs, aimed at sharing encounter data to comply with COLREGs and reaching maneuvering agreements, would help to reduce the risk of collision. Finite State Machine (FSM) is a mathematical model for describing the sequential behavior of a control program. Sequential function chart (SFC) based on FSM, is a graphical programming language for Programmable Logic Controllers, defined by the international standard IEC 61131-3. In this work, SFC language is used to model and program the set of states and transitions involved in the ship-to-ship dialogs initiated when one of them detects a risky situation. SFC facilitates the development, verification, and maintenance of the control program. The implemented ship-to-ship communications to share data will help in eliminating differences in decision-making and achieving safer encounters. An example of a risky encounter illustrates this assertion, not contemplated in the related studies consulted. The implemented dialogs will enable sharing information on the encounter characteristics and reaching agreements on the maneuvers to be performed, or maintaining a record about disagreements.

**Keywords:** Collision risk, COLREGs, Inter-ship communications, Discrete event systems

Received: 30.11.2021, Accepted: 06.04.2022

## 1. INTRODUCTION

According to the statistics on marine casualties [1,2], ship collisions remain high on the list of maritime accidents with the most serious consequences, with human actions being the first accident events. Reportedly, incorrect decisions by the Officers in charge of the Navigational Watch (OONW), misunderstandings in oral communication between them, and failure to take early actions are some main contributing factors in ship collisions.

A modern ship is equipped with devices and systems that provide information to the OONW about herself and nearby ships (targets), for e.g., static and dynamic values received via an Automatic Identification System (AIS). From these values, the Programmable Electronic System (PES) in each ship connected to her AIS can calculate the distance, bearing, Closest Point of Approach (CPA), and time to CPA (TCPA) for each target, as well as the maneuvers to be performed based on the COLREGs. The PESs of the ships involved in the encounter can communicate to compare their information and display it in a way facilitating the decision-making by their OONWs.

Thus, ship-to-ship dialogs, sharing encounter data to comply with COLREGs and reaching maneuvering agreements between the two OONWs can help mitigate the collision risk.

This paper describes how these dialogs can be implemented.

- Section 2 presents an example of a close quarters situation illustrating some benefits of the inter-ship dialogs.
- Section 3 outlines the basic aspects of discrete event system (DES) models and languages. The associated state transition graph features facilitate the development of programs to implement the dialogs.
- Section 4 describes the structure of states and transitions in the developed program and the possible evolutions through the graph.

- Section 5 explains how the program is tested and shows an example of the obtained results.
- Section 6 presents the main conclusions.

## 2.- SHIP-TO-SHIP DIALOGS AS A REQUIREMENT TO REDUCE THE RISK OF COLLISION

In encounters between manual, semi-autonomous, and autonomous vessels, sharing data would be a fundamental navigational aid for correct decision-making.

As an illustrative example of this statement and to discuss its benefit, a ship-to-ship encounter case is shown (Figure 1) along with the possible ship responses with or without the reported communications between them.

Crossing situation (COLREG Rule 15): BLUE should keep out of the way and avoid crossing ahead of PINK.

### **RULE 16** Action by give-way vessel

*Every vessel which is directed to keep out of the way of another vessel shall, so far as possible, take early and substantial action to keep well clear.*

What distance corresponds to “so far as possible”?

Let us consider this Give-way distance as  $d_{\text{Prealert}}$ . Thus,  $d_{\text{Prealert}}$  can be defined as the distance to start maneuvering if the ship is a give-way vessel or a vessel that must not impede the passage or safe passage of another vessel.

### **RULE 17** Action by Stand-on Vessel

(a)

(i) *Where one of two vessels is to keep out of the way the other shall keep her course and speed.*

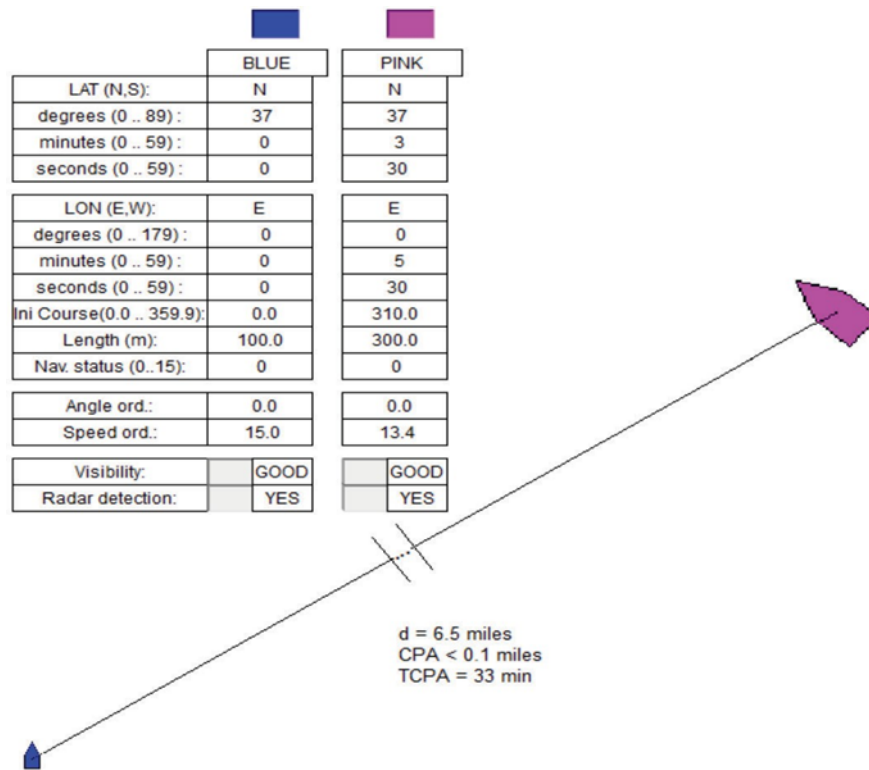
(ii) *The latter vessel may however take action to avoid collision by her maneuver alone, as soon as it becomes apparent to her that the vessel required to keep out of the way is not taking appropriate action in compliance with these Rules.*

(b) *When, from any cause, the vessel required to keep her course and speed finds herself so close that collision cannot be avoided by the action of the give-way vessel alone, she shall take such action as will best aid to avoid collision.*

(c) *A power-driven vessel which takes action in a crossing situation in accordance with subparagraph (a)(ii) of this Rule to avoid collision with another power-driven vessel shall, if the circumstances of the case admit, not alter course to port for a vessel on her own port side.*

(d) *This Rule does not relieve the give-way vessel of her obligation to keep out of the way.*

What distance corresponds to “as soon as it becomes apparent to her that the vessel required to keep out of the way is not taking appropriate action in compliance with these Rules”?



**Figure 1.** Crossing situation, vessels in sight

To determine when the stand-on vessel should act, we consider a distance (combination of time and speed), called  $d_{Alert}$ . Thus,  $d_{Alert}$  can be defined as the distance to start maneuvering if the ship is a stand-on vessel or a vessel whose passage must not be impeded, according to Rules 17 a) ii) and 17 b).

Let us quantify other terms:

- LRS. From Rule 7 (b): *Proper use shall be made of radar equipment if fitted and operational, including long-range scanning to obtain early warning of risk of collision.*
- CPASafe. Minimum CPA, limit between safe distance and close quarters.
- TCPASafe. Minimum value for TCPA to avoid collision, if  $CPA < CPASafe$ .

And four logical terms:

- Safe distance:  $CPA \geq CPASafe$ .
- Close quarters/Risk of Collision:  $CPA < CPASafe$ .
- Prealert condition:  $(CPA < CPASafe)$  AND  $[(distance \leq d_{Prealert})$  OR  $(TCPA < TCPASafe)]$ .
- Alert condition: Prealert condition AND  $(distance \leq d_{Alert})$ .

Evidently, these distances ( $d_{Prealert}$ ,  $d_{Alert}$ ,  $CPASafe$ ) and time ( $TCPASafe$ ) must be quantified (especially for autonomous ships) depending on the ship dynamics and her maneuvering parameters [3]. Each ship will have her own specific values for these distances and times; thus, the values will differ if the ships involved in the encounter have different characteristics.

Figure 2 collects and illustrates an example of values for the encounter shown in Figure 1.  $d_{Prealert}$  and  $d_{Alert}$  are approximately 20 and 9 times the lengths of the ships, respectively.

Parameter	Ship BLUE	Ship PINK
LRS (miles)	12.0	12.0
CPASafe (miles)	0.3	0.5
Length (m)	100	300
TCPASafe (min)	6.0	12.0
dPrealert (miles)	1.0	3.2
dAlert (miles)	0.5	1.5

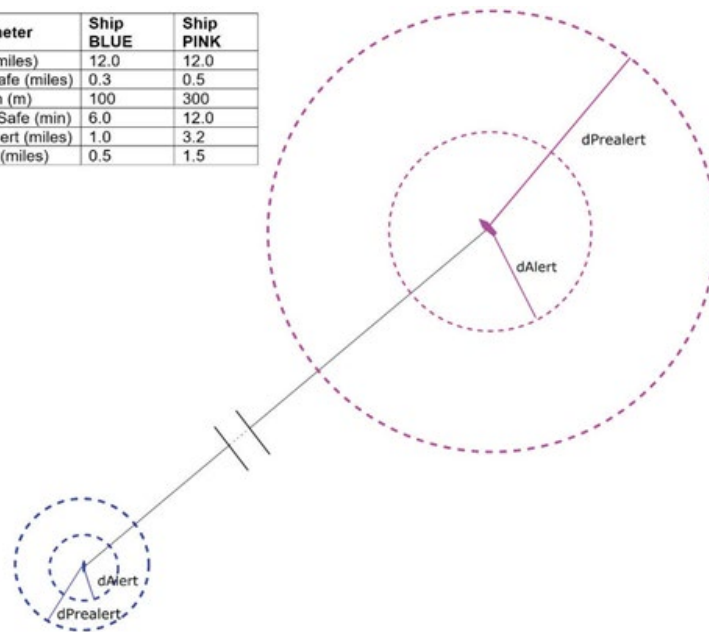


Figure 2. dPrealert and dAlert distances for both ships

In this case, ship PINK is the Stand-on vessel, and ship BLUE is the give-way vessel. For the given values, BLUE will detect prealert condition (and must maneuver) when distance  $\leq 1.0$  miles or when TCPA  $< 6$  min, whichever occurs first.

However, before this situation, PINK enters in alert when distance  $\leq 1.5$  miles, so she is forced to maneuver (Figure 3a), according to Rule 17 (a)(ii).

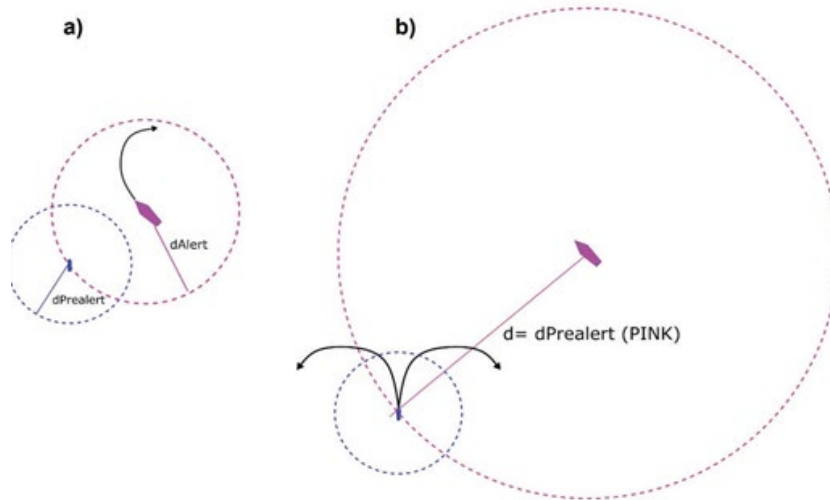


Figure 3. Possible maneuvers: a) without dialogs; b) with dialogs

What should BLUE ship do then? Her subsequent behavior is not contemplated by COLREGs, which will increase the risk of the encounter.

If both ships share their information about prealert and alert situations, BLUE will know that she shall keep out of the way when she enters in PINK dPrealert and will share her agreement (or disagreement) with the prescribed maneuver. This maneuver is shown in Figure 3b.

This encounter, without communications, can also generate different maneuvering decisions if the OONW of one of the ships considers that the vessels are in sight and applies Rule 15 (BLUE should maneuver) and

the other considers that they are in a restricted visibility scenario, where both ships must maneuver (Rule 19).

The agreement for maneuvering can be achieved as follows: the PES on each ship receives dynamic data about own and target ships (position, heading, speed, ...) from the onboard equipment, calculates distance, bearing, CPA, and TCPA and determines the type of situation and the Rules to be applied for each encounter. In detecting a prealert condition, it will inform the OONW and exchange messages with the PES in the target ship.

An implementation of such communications is presented in Argüelles *et al.* [4], using Programmable Logic Controllers (PLCs) as the PES and AIS for data acquisition and communications.

### 3.- SEQUENTIAL FUNCTION CHARTS

A PLC is a robust and reliable programmable electronic device with proven use in the control of industrial processes. Its architecture and programming are defined in the IEC 61131 standard. The PLC structure mainly consists of the processing unit, memory, Input/Output modules, and communication interfaces. PLC executes its tasks in a cyclic mode (scan cycle), which consists of the following four steps:

- (1) read the inputs from the periphery to the memory,
- (2) execute the user program that reads and modifies the memory contents,
- (3) write the values to the output periphery and
- (4) perform internal tasks, such as checking for errors and storing the duration of the scan cycle.

Sequential function chart, SFC, is one of the five languages defined by the IEC 61131-3 standard. It is a graphical programming language that allows specifying the sequential control logic of a DES in an intuitive way. A brief introduction to this language is given below.

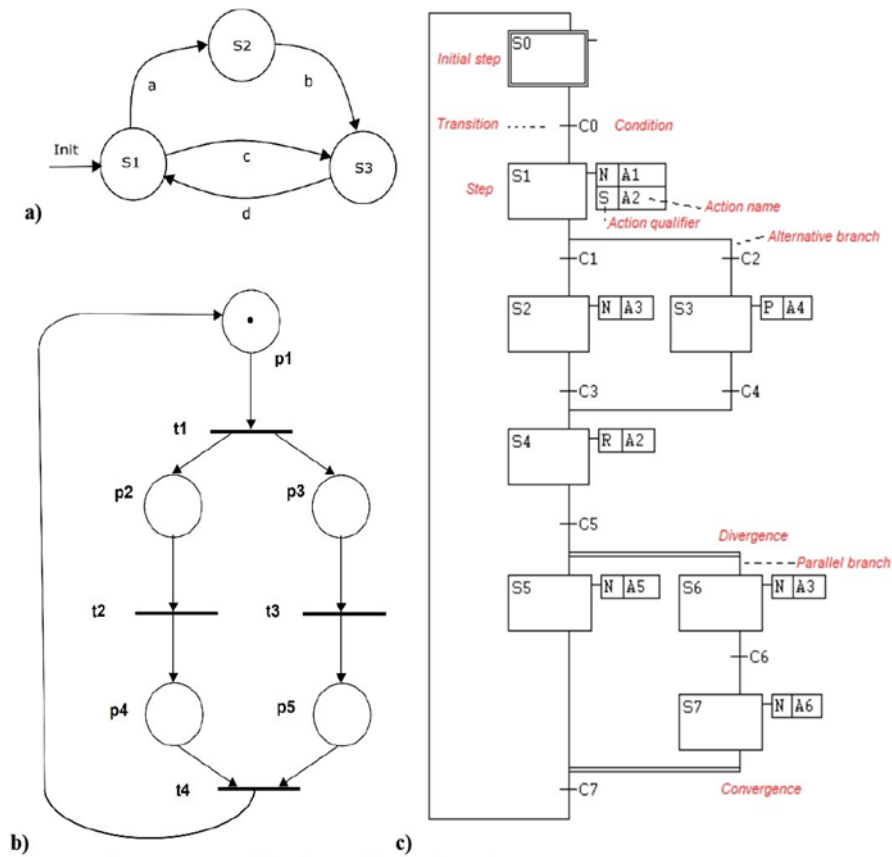
A DES is an event-driven system of discrete states, i.e., its state evolution depends on the occurrence of asynchronous discrete events in time [5]. Since the middle of the last century, several DES modeling approaches have been proposed, including Finite State Machines (FSM) and Petri Nets (PN) formalisms based on states and transitions.

Figure 4a shows a simple FSM an oriented graph that describes the DES. It consists of discrete states represented by circles and the transitions between them represented by arrowed lines. PNs enable modeling and analyzing more complex and concurrent systems. Figure 4b illustrates a graphical representation of a PN with places (states), transitions, and oriented arcs [6,7].

These state transition models, as graphical tools, represent the behavior of sequential systems graphically, facilitating the development of control logic and verification operations (through exhaustive testing) of requirement specifications. In addition, as mathematical tools, FSM and PN models are the basis for formal verification techniques to ensure the correctness of the safety-critical software [8,9].

GRAFCET (GRAphe Fonctionnel de Commande Etape Transition) is a specification language related to PN [10]. It was defined in 1977 and subsequently standardized as IEC 60848 [11] for the functional description of the behavior of the sequential part of a control system. This specification language is independent of any specific technology of implementation. SFC language defined in IEC 61131-3 [12], is based on IEC 60848 and is a specific programming language for PLCs.





**Figure 4.** Discrete event models: a) FSM; b) PN; c) SFC language

In the IEC 61131 standard, the term Program Organizational Unit (POU) is used for all programming objects: PRoGrams (PRG), Function Blocks (FB), and Functions (FU), used to create a controller application.

A POU written in SFC consists of steps (states) and transitions. It has one initial step, and each transition is labeled with an associated condition. Zero, one, or more actions may be associated with each step. Figure 4c shows an example of an SFC.

Actions in the SFC include a qualifier, specifying the duration of the action, and a name, identifying the programmed instructions. Some qualifiers:

- N (Non-stored): The action is active as long as the step is active.
- P (Pulse): The action is executed just once if the step is active.
- R (Reset): The action is deactivated.
- S (Set): The action is activated and remains so until a Reset.

There are different types of transitions:

- simple transitions between two steps,
- alternative branching, i.e., the choice among several transitions,
- parallel branching with divergence from one step into a set of parallel steps and ulterior convergence into a single step.

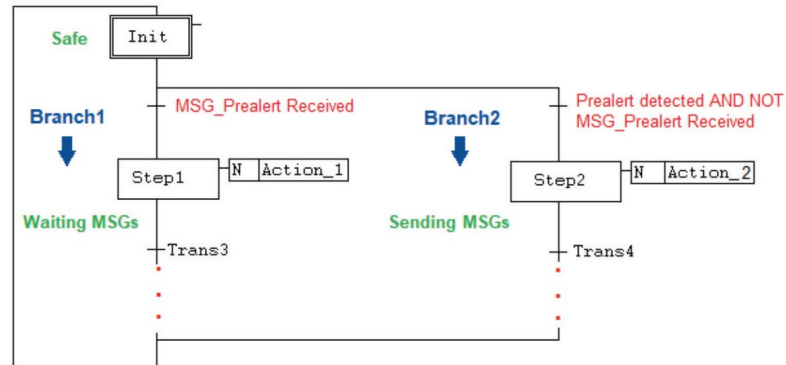
In the first scan cycle of a SFC POU, the initial step becomes active, and the associated actions (if any) are executed. Then, at each cycle, all conditions on transitions starting at active steps are evaluated, and if true, the corresponding transition is enabled, changing the set of active steps.

#### 4.- SFC IMPLEMENTATION OF SHIP-TO-SHIP DIALOGS

SFC is used in this work to model and program the set of states and transitions involved in the ship-to-ship dialogs initiated when one of them detects a risky situation.

The controller application executed on the PLC of each ship includes a number (N) of FBs written in SFC, one for each target;  $0 \leq N \leq \text{Max}$ , where Max: maximum number of targets.

When the PLC application running on a ship detects a target, it activates the initial step of an associated SFC (Figure 5).



**Figure 5.** Basic SFC for Ship-to-ship dialogs

SFC starts from a safe state (safe situation), which is exited for one of two following reasons:

- A prealert message (*MSG\_prealert*) is received from the target (branch1). While progressing through this branch, the target takes the initiative of the communication. The own ship's PLC waits for the messages and then responds (Figure 6).
- Prealert condition is detected (branch2). In this branch, the ship's own PLC takes the initiative. It sends messages and waits for replies from the target (Figure 7).

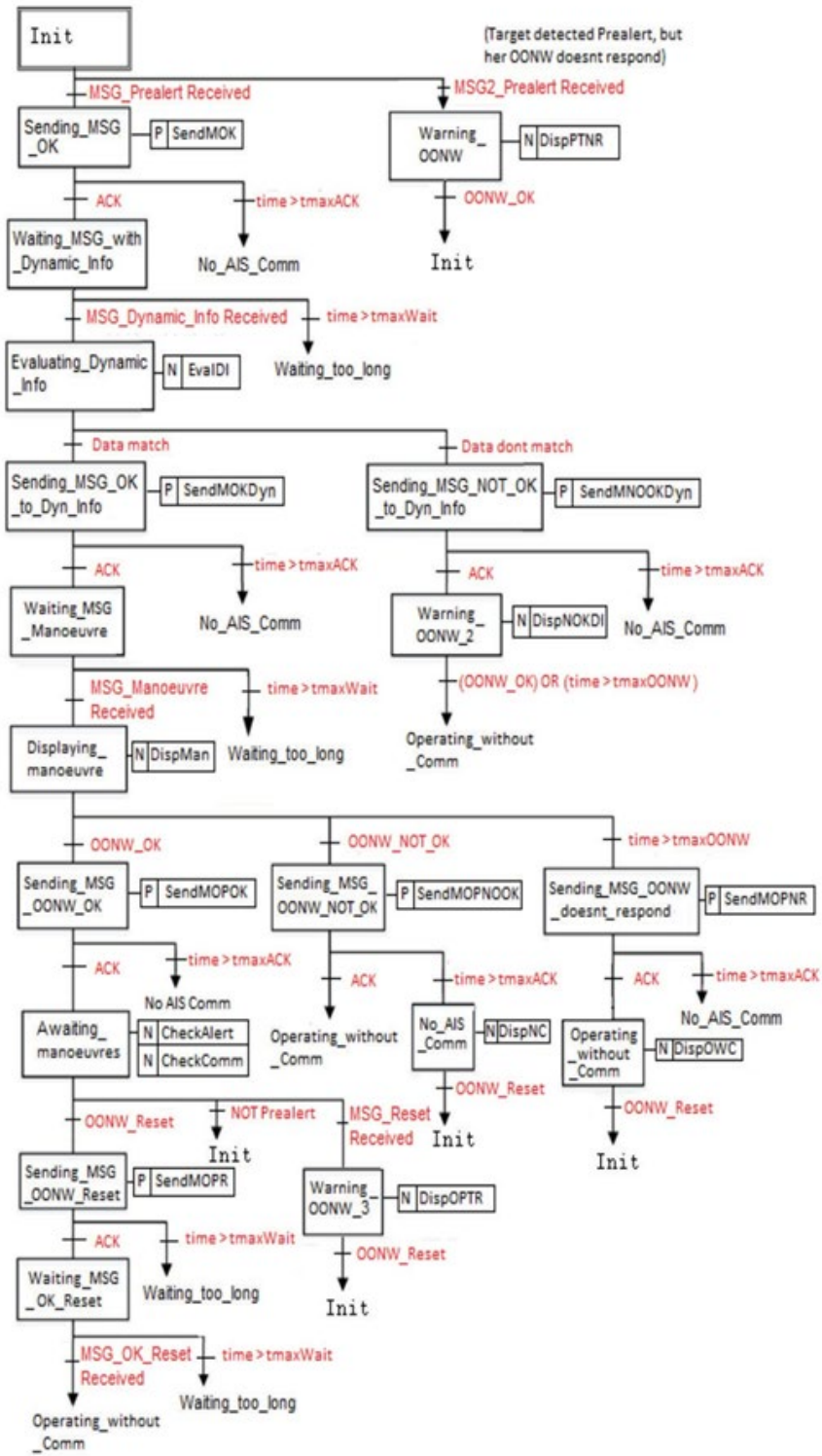


Figure 6. SFC Branch 1

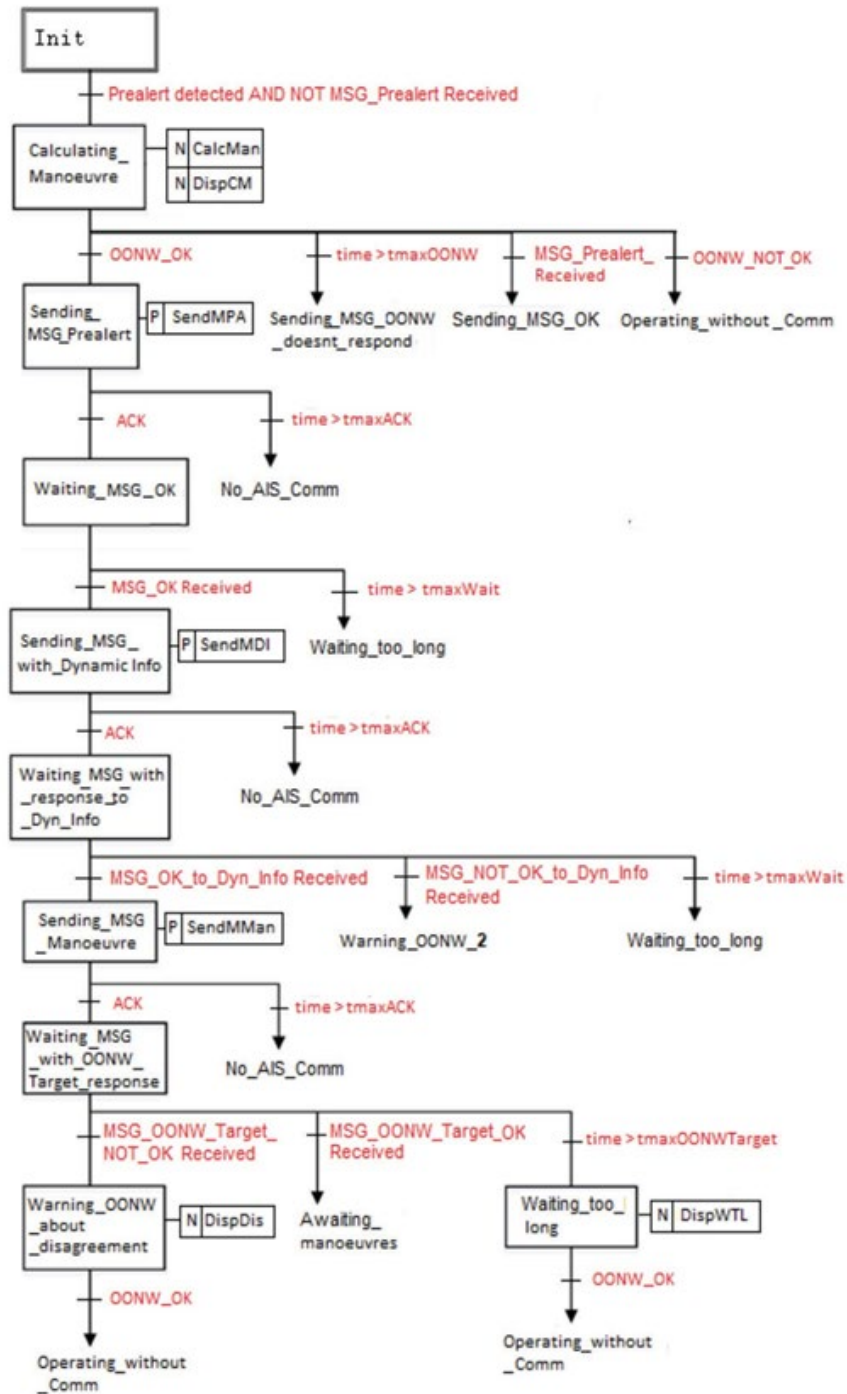


Figure 7. SFC Branch2

To avoid a possible simultaneous activation of both branches, in case both ships detect prealert at the same time, their initial conditions cannot be simultaneously true. To this end, a priority is given to Branch1, including in the following initial condition of Branch2: *Prealert detected AND NOT MSG\_Prealert Received*.

A feasible channel of communication between the PLCs of the ships can be achieved through their AIS stations, using standard messages 6 and 7 [13].

After sending a message, it is necessary to wait for the reception of the ACK issued by the AIS in the target, indicating that the message has been transmitted. If more time than expected ( $t_{maxACK}$ ) elapses without

receiving the ACK, it is understood that there has been a communication failure between the AIS stations, and the SFC moves to a *NO\_AIS\_Comm* step, wherein the operator is informed of the communication failure.

Other maximum waiting times associated with transitions should be established, as listed below:

- PLC communication message waiting time (*tmaxWait*).
- Waiting time for the OONW to respond to a received MSG (*tmaxOONW*).
- Waiting time for the target OONW to respond to the maneuvering proposal sent by own ship (*tmaxOONWTarget*).

The names of the actions in Figures 6 and 7 have been shortened to avoid overloading the images. Main assignments of the action POU's are as follows:

- *Send\**: Generate the corresponding binary message and send it to the target.
- *Disp\**: Display the corresponding text to inform the OONW.
- *EvalDI*: Compare the dynamic information sent by the target with the information available about it to check whether it is consistent. This dynamic information is included as parameters in the received message comprising visibility, navigational status, prealert and alert defined values, distance, bearing, CPA, TCPA, heading, speed, and the calculated situation according to COLREGs.
- *CalcMan*: With the dynamic data received from own and target ships, the calculated bearing, distance, CPA, TCPA, and situation, this POU determines what possible maneuver must be performed.
- *CheckAlert*, *CheckComm*: The step *Awaiting\_maneuvers* is active if there is agreement between the OONWs of both ships about the maneuver to leave the prealert condition. While in this state, waiting for the agreed maneuver to be performed, *CheckAlert* determines if there is an alert condition. In that case, a warning is displayed, indicating that both ships must maneuver. *CheckComm* conducts periodic checking of the communication between the PLCs.

## 5.- RESULTS

The crossing situation described previously is used as an example for checking the operation of the developed POU's. These software tests require the simulation of the ship movements and the AIS messages for data acquisition and communications. The development of the models for the simulation of a ship movement follows the standard ISO 11674-A [14]. AIS messages have been simulated using OPC communications. All values to transmit are transformed into bit strings according to the standard approved by the International Telecommunication Union [15]. Each PLC acts as an OPC server to share the memory area reserved for messages. An application acting as an OPC client is responsible for reading the message string from the source PLC and writing it to the destination PLC.

The simulation starts with the data given in Figure 1. In our example, the PLCs in both ships, PINK and BLUE have an enabled SFC with the initial state active. At 3.2 miles (see Figure 2), PINK PLC detects prealert and activates its branch2 (see Figure 5). Then, it initiates the dialog with BLUE PLC. On receiving the message, the SFC running on BLUE progresses through its branch1.

Figure 8 shows the information visualized by each OONW with the data in the PLC of BLUE (PLC1) and PLC of PINK (PLC2), when PLC2 detects the prealert condition. In addition to the information received from the AIS on positions, headings, speed over ground, rate of turn, and the calculated data (distance, bearing, relative course and speed, CPA, and TCPA), BLUE OONW sees that both ships are Under way using engine (navigational status 0, from their AIS dynamic data) and the situation is crossing. T is on the Starbd Side O (crossing, PINK on BLUE's starboard side). PINK OONW sees that both ships are under way using engine, and the situation is crossing. T is on port side O (crossing, BLUE on PINK's port side) and the prealert SITUATION warning.

When PLC2 detects the prealert, and the evolutions through the SFCs start. Figure 9 shows the sequence of communications between PLCs and the messages displayed by the OONWs.



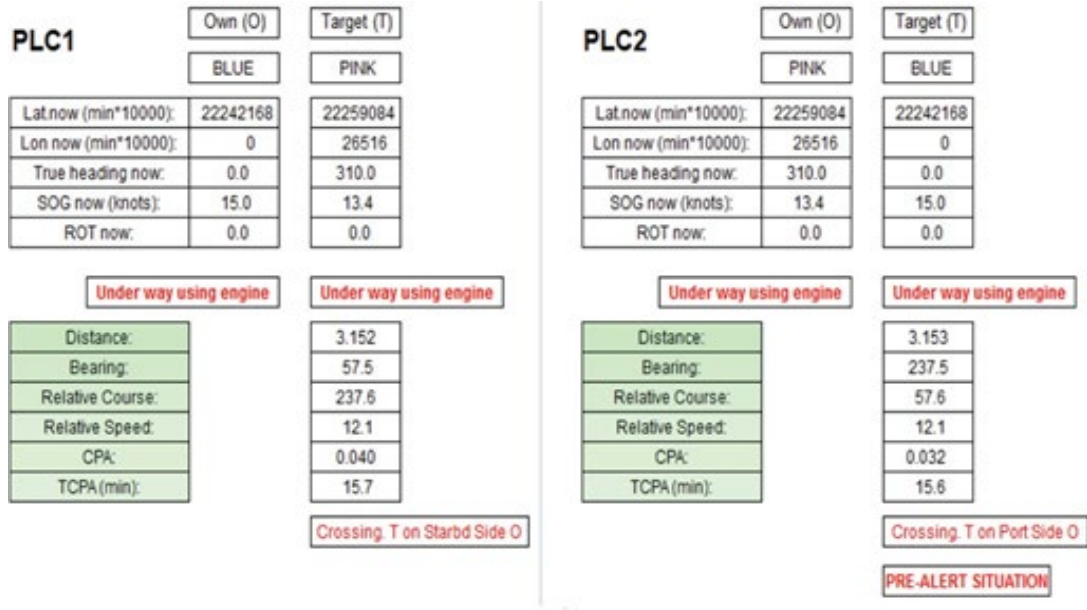


Figure 8. Received and calculated data, PINK on prealert

First, PLC2 calculates the maneuver according to COLREGs and warns its OONW. If she/he agrees, it sends the message with the prealert to PLC1, waits for the reception of MSG OK, and later sends the message with the associated dynamic data to PLC1. PLC1 compares them with its own data and if they match, it sends MSG\_OKDyn to PLC2. Then, PLC2 sends the MSG with the information about the maneuver and advises its OONW that it is waiting for an answer from BLUE OONW. PLC1 displays the received information, and if its OONW says OK, both PLCs inform about the agreement.

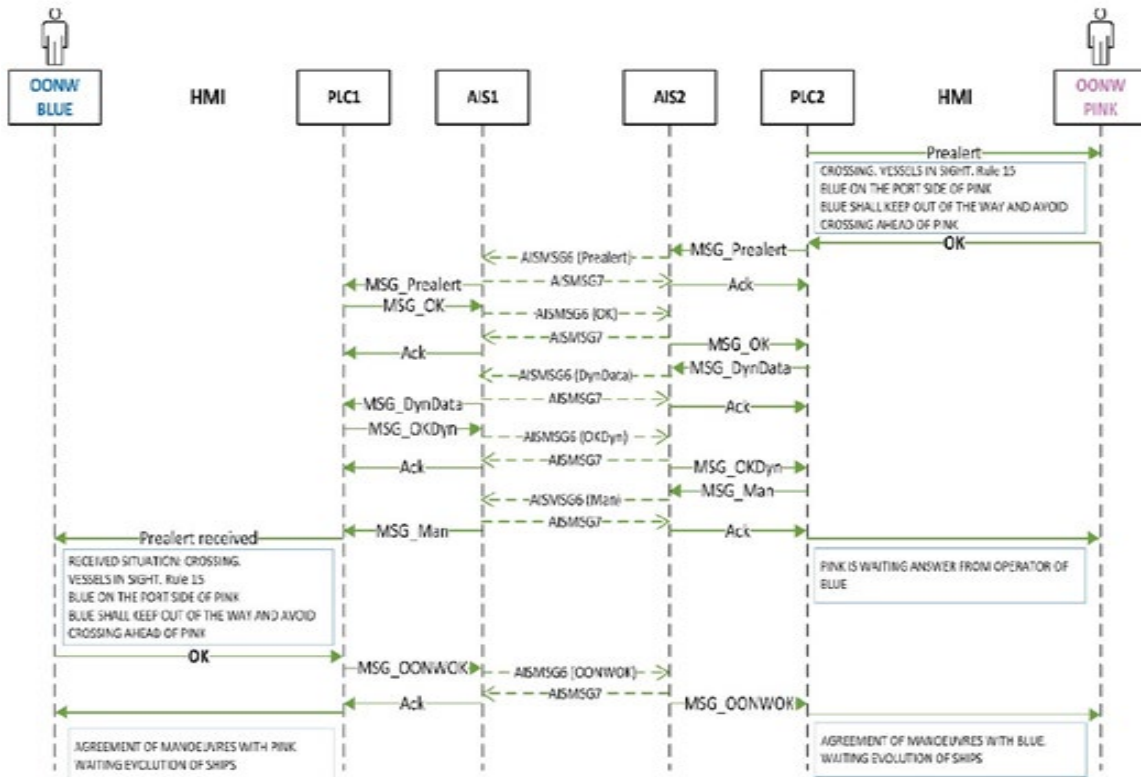


Figure 9. Sequence of messages, in case of agreement between OONWs

The same situation, but assuming a difference in the visibility criteria (PINK OONW considers that they are in a restricted visibility scenario and BLUE OONW that vessels are in sight) produces a sequence of messages shown in Figure 10.

The system informs both OONWs that PINK has entered in prealert, but that there is a difference in visibility considerations, and therefore, possible differences in maneuvering decisions. In this example, messages for OONWs in Figure 10 show the following:

- PINK OONW, after agreeing to apply COLREG Rule 19 sees that the target (BLUE) info is vessels IN SIGHT crossing starboard side (i.e., PINK is crossing on BLUE's starboard side). Therefore, PINK OONW infers that BLUE OONW will act according to this information and will apply COLREG Rule 15.
- BLUE OONW, considering that vessels are in sight, receives the message depicting that PINK is in prealert, and her info is vessels NOT IN SIGHT WITH RADAR, T FWD PSD O, O FWD T (BLUE forward on PINK's portside, PINK forward BLUE). Therefore, BLUE OONW infers that PINK OONW will act according to this information and will apply COLREG Rule 19.

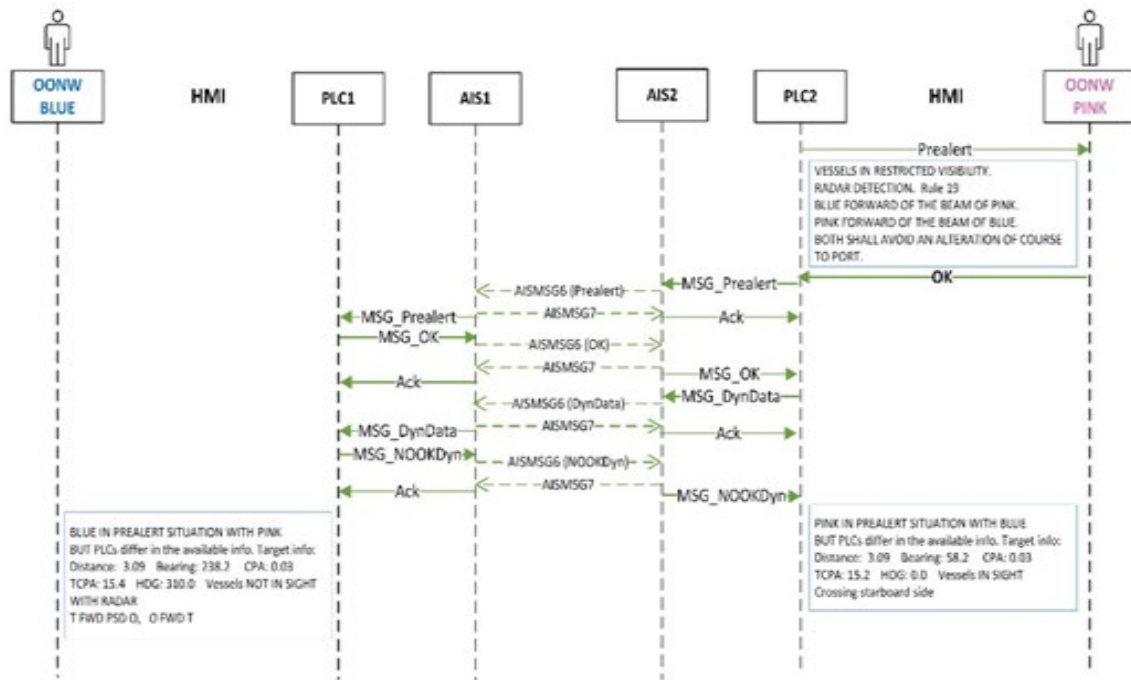


Figure 10. Sequence of messages, in case of disagreement between data

Thus, both OONWs are aware that their maneuvering decisions may differ.

The graphical character of the language facilitates the design, verification, and validation of the software. It allows to visualize and check whether all possible states that the system can go through are considered, without probing how the actions are implemented. This makes it easier to understand how the system works for the potential users of the system.

The visualization of the program execution during software testing, showing which step is active at any given moment, makes it possible to check and verify all possible transitions.

## 6.- CONCLUSIONS

A functional safety model has been developed for the prevention of ship-to-ship collisions, aimed at reducing the probability of occurrence of two dangerous factors among the main causes of these accidents:

- Errors in the detection of critical situations, and
- Errors in the decision-making on collision avoidance maneuvers.

For this purpose, the defined system is responsible for detecting and identifying the type of dangerous encounter, checking that both are handling the same information to suggest the maneuver to be performed in compliance with COLREGs and to ensure that the operators of the vessels involved are aware of and accept (or not) the suggested maneuver.

To reach these decision agreements, the system establishes a communication between the two ships. SFC, a finite state machine-based language, is used to model and program the set of states and transitions involved in the ship-to-ship dialogs initiated when one of them detects a risky situation. This language facilitates the development, verification, and maintenance of the program.

## REFERENCES

- [1] ALLIANZ (2020). Safety and Shipping Review 2020.
- [2] EMSA. (2020). Annual overview of marine casualties and incidents 2020. <http://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4266-annual-overview-of-marine-casualties- and-incidents-2020.html>
- [3] IMO. (2002). *Standards for ship manoeuvrability*. Resolution MSC.137(76). International



- Maritime Organization.
- [4] R. P. Argüelles, J. A. G. Maza, F. M. Martín, and M. Bartolomé, Ship- to-ship dialogues and agreements for collision risk reduction, *The Journal of Navigation*, vol. 74, 1-18, May 2021.
  - [5] M. Silva, On the history of discrete event systems, *Annual Reviews in Control*, vol. 45, pp. 213-222, 2018.
  - [6] Wang, J. *Handbook of Finite State Based Models and Applications*. Chapman and Hall/CRC Press. 2013.
  - [7] R. Zurawski, and M. Zhou, Petri net and industrial application: A tutorial, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 41, pp. 567-583, 1994.
  - [8] B. F. Adiego, *et al.* Applying model checking to industrial-sized PLC programs, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, 1400-1410, Dec 2015.
  - [9] N. Bauer, *et al.* Verification of PLC programs given as sequential function charts, *Integration of Software Specification Techniques for Applications in Engineering*. Lecture Notes in Computer Science, Ehrig H. *et al.* (eds) Springer, vol. 3147, 517-540, Jan 2004.
  - [10] R. David, Grafcet: a powerful tool for specification of logic controllers, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, pp. 253-268, Sep 1995.
  - [11] IEC 60848. *GRAFNET specification language for sequential function charts*. International Electrotechnical Commission. 2013.
  - [12] IEC 61131-3. *Programmable controllers - Part 3: Programming languages*. International Electrotechnical Commission. 2013.
  - [13] R. Argüelles, J. A. G. Maza, and F. Martín, Specification and design of safety functions for the prevention of ship-to-ship collisions on the high seas, *The Journal of Navigation*, vol. 72, pp. 53-68, Jan 2019.
  - [14] ISO 11674-A. *Ships and marine technology - Heading control systems. Annex A: Ship-motion simulator*. International Organization for Standardization. 2006.
  - [15] ITU, 2014. Recommendation ITU-R M.1371-5. Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band. *International Telecommunication Union*. [https://www. itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-5-201402- I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-5-201402- I!!PDF-E.pdf)