

PLANTEAMIENTO DE UN SISTEMA DE EVACUACIÓN DINÁMICO

TN. (CIA) D. HEITOR MARTÍNEZ GRUEIRA
(GIMOE)

COAUTORES: TN. (CIA) DR. LUIS FRANCISCO SÁNCHEZ ÁLVAREZ
(CEMEDEN)

DR. JOAQUÍN SANCHO VAL
(CUD-Zaragoza)

1. Introducción

En el momento mismo que un hombre primitivo decidió valerse de un madero para desplazarse sobre una corriente de agua, se dio inicio al hito de la navegación y con él, al riesgo inherente de sufrir un accidente de consecuencias imprevisibles o incluso fatales.

Con el devenir de los siglos, han mejorado drásticamente las técnicas y materiales de construcción naval, así como los procedimientos y equipos de navegación, lográndose reducir en gran medida este riesgo, a pesar del enorme incremento del número de buques que operan en las distintas rutas marítimas.

Sin embargo hasta bien entrado el siglo XX, la seguridad del pasaje y de la propia tripulación, no era un tema trascendente, ni mucho menos tenía el carácter legislativo con el que cuenta actualmente. Por el contrario y en modo paralelo, la seguridad de las dotaciones de buques militares, han contado desde siempre con un tratamiento completamente diferente, puesto que se trata de personal muy especializado que desempeña funciones de alto riesgo, lo que requiere garantizar su integridad física.

Hundimientos que todavía se mantienen latentes en la memoria militar como los del HMS «Hood» (1941), el acorazado de la Kriegsmarine «Tirpitz» (1944) o el HMS «Sir Galahad» (1982); ponen de manifiesto el alto riesgo al que se enfrentan los buques militares durante una contienda y por ende, sus dotaciones.

Minimizar los riesgos o cuanto menos, mitigar sus efectos, son temas tratados recurrentemente en el devenir del tiempo, mediante la implementación de nuevas técnicas y tecnologías, que han permitido disponer actualmente de unos estándares de seguridad nunca vistos en el entorno naval militar.

2. El entorno naval militar y la seguridad

Como contrapunto a la legislación naval civil, surge el entorno naval militar, un entorno reducido, cerrado y esencialmente caracterizado por su gran aportación técnica y tecnológica. Así mismo, el entorno militar está eximido del cumplimiento de la legislación naval internacional, como consecuencia de su carácter funcional y competencial tan remarcados; legislación que por contrapartida es de obligado cumplimiento para todo buque civil, independientemente del ámbito geográfico de navegación o su pabellón.

Precisamente por esta circunstancia, cada país apresta su propia legislación naval militar ex profesa y como consecuencia de ello, la homogeneidad normativa internacional no está garantizada; lo que ha producido situaciones tan pintorescas como que buques de un pabellón concreto, aun encontrándose integrados en

una flotilla de la OTAN¹, han visto restringido su acceso a unas aguas territoriales, debido a que su normativa nacional era incompatible con la del país ribereño.

En otro orden, la importancia de la seguridad en el entorno naval militar, como consecuencia del alto riesgo al que se ven sometidos sus buques, durante el desarrollo de los cometidos para los que han sido concebidos, implica la implantación de medidas de seguridad punteras y por descontado, a la altura de las circunstancias.

Toda esta casuística justifica más si cabe, la necesidad de desarrollar una normativa naval común de ámbito OTAN, al objeto de remarcar una senda o un marco legislativo homogéneo, que trate de aglutinar las normas de sus Armadas integrantes. La publicación en 2014 del NSC² materializó esta vieja demanda, a pesar de tratarse de una normativa generalista y que referencia en gran medida datos, normas y procedimientos recogidos por la IMO, que en muchas más ocasiones de las deseadas, estas resultan de escasa o nula aplicación, en el entorno naval militar.

La aparición del capítulo VII en el NSC, referido a la temática EER³, ha supuesto un hito que marca el punto de partida para la normalización de la temática y su integración normativa acorde a la seguridad naval en el ámbito OTAN. Este novedoso capítulo, igualmente generalista, peca asimismo de ambiguo puesto que se apoya o directamente importa, normas, datos y directrices procedentes de la normativa IMO, que nuevamente resultan de poca o nula aplicación a buques militares.

Sin ánimo de menosprecio y como ejemplo de la afirmación realizada, el NSC recoge la distribución poblacional refrendada por la IMO para un buque civil, por cuanto sus parámetros de sexo, edad y ello discerniendo entre población de pasaje y tripulación, resultan inverosímiles e inaplicables a una dotación militar.

3. Planteamiento de la Armada Española

En previsión del desarrollo normativo que se estaba fraguando en el ámbito OTAN y que se materializaría en el NSC, ya por el año 2007 el EMA⁴ encomienda a su GIMOE⁵, la dirección del proyecto GIMO07⁶ dirigido al estudio de la temática EER.

En base a la normativa vigente por entonces y al estado del arte del momento, el GIMOE presenta un proyecto de mínimos y que partiría de cero, puesto que se planteaban serias dudas acerca de la verosimilitud del conocimiento disponible. Acorde a esto, se propuso como inicio de la investigación un estudio poblacional, al objeto de tratar de identificar aquellos factores más relevantes y sus características propias más notables, que pudiesen ampliar su conocimiento.

Esta decisión resultaría trascendental, puesto que con la aplicación de nuevas tecnologías y técnicas en investigación, no solamente se lograría identificar su distribución poblacional, sino que además se obtendrían

¹ Organización del Tratado del Atlántico Norte, 1949.

² *Naval Ship Code (ANEPP-77)*, vigente 3ª edición, versión G (2019).

³ *Escape, Evacuación y Rescate*.

⁴ *Estado Mayor de la Armada*.

⁵ *Gabinete de Investigación Militar Operativa y Estadística*.

⁶ Proyecto de captación y análisis de datos a bordo de la fragata (F-74) «Asturias», 2007.

datos sobre sus características antropométricas, su comportamiento ante determinadas situaciones, su modo de desplazarse, el grado de conocimiento del entorno, etc.

Esta recopilación de datos sustanció y cimentó un conocimiento real, mediante el cual fue posible acometer y proponer nuevas líneas de investigación, mucho más ambiciosas. Algunos de estos proyectos, lograrían finalmente actualizar o implantar nuevos procedimientos de actuación, que lograrían replantear el diseño de la disposición general de un buque, en fase de proyecto o incluso en construcción.

4. Estudio de dotaciones

Una de estas líneas de investigación que proponía el proyecto inicial del GIMOE, se materializó con la tesis doctoral del CN. (CIA-EOF) DR. Francisco Javier Pérez Villalonga⁷; tesis que como novedad planteaba el proceso de evacuación de un buque como si se tratase de un problema de PL⁸.

De este modo y fruto de los datos captados en investigaciones previas, disponibles actualmente en el repositorio del GIMOE; se plantea la implementación de la disposición general de un buque en base a una red de nodos, haciéndose posible de esta manera, ubicar a los miembros de la dotación ante determinadas situaciones previamente definidas (Z/C⁹, 3 vigilancias, tránsito nocturno, etc.). De igual modo, resultará posible asignar a las aristas de la red escenario cierta probabilidad, aludiendo a la posibilidad de sufrir una avería común en determinados espacios.

En base a este planteamiento y su resolución en base a un problema de PL, fue posible discernir la red de rutas de evacuación que optimizaban el tiempo del proceso, minimizando así, el tiempo de abandono de un buque por parte de su dotación.

Minimizar Z

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \frac{d_{k,s} + \tilde{d}_{k,s}}{S_{k,s,n}} x_{k,s,n} + \tilde{t}_n < Z \quad \forall s \in S$$

(1) NOTA: Se establece que la distancia desde cualquier balsa hasta el nodo ficticio súper-sumidero es nula, $d_{k,n} = 0, \forall n \in N^0$,

$$(2) \sum_{n \in N^0} x_{k,s,n} - \sum_{n \in N^1} x_{k,s,n} = \begin{cases} 1 & n \in N^2 \\ -1 & n = n^* \\ 0 & n \in N \setminus \{N^2, n^*\} \end{cases} \quad \begin{matrix} \forall k \in K \\ \forall s \in S \end{matrix}$$

$$(3) \sum_{k \in K} x_{k,s,n} \leq C_n \quad \begin{matrix} \forall n \in N^2 \\ \forall s \in S \end{matrix}$$

$$(4) \sum_{k \in K} x_{k,s,n} \geq 1 \quad \begin{matrix} \forall n \in N^2 \\ \forall s \in S \end{matrix}$$

$$(5) \sum_{n \in N^0} x_{k,s,n} \geq 1 \quad \begin{matrix} \forall n \in N^2 \\ \forall s \in S \end{matrix}$$

$$(6) \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} x_{k,s,n} \geq 1 \quad \begin{matrix} \forall n \in N^2 \\ \forall s \in S \end{matrix}$$

Figura 1. Función objetivo y restricciones, PL.

Tesis: La evacuación del buque de guerra: estudio del movimiento de personal en situaciones de emergencia”, (UPM) 2018.

⁷ «La evacuación del buque de guerra: estudio del movimiento de personal en situaciones de emergencia», Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 2018.

⁸ Programación lineal.

⁹ Zafarrancho de combate.

Esta tesis, dirigida a buques y dotaciones de primera línea de la Flota, propuso como líneas de investigación futuras, el estudio de otras clases de buque y por ende, de sus correspondientes dotaciones, así como profundizar en el estudio del proceso bajo determinadas situaciones (meteorología desfavorable, averías causantes de grandes escoras, etc.) y que ineludiblemente ralentizarían o supondrían una grave merma del procedimiento de evacuación.

Ahora bien, cómo aplicar esta metodología a clases de buque cuya disposición general y población embarcada difieren en gran manera a la de estudio o cómo gestionar la posibilidad de sufrir una avería que resultando poco probable, pueda tener un grave impacto o la anular de la capacidad de las rutas de evacuación preestablecidas.

Ante este supuesto, procede rescatar el término de «**evacuación dinámica**»¹⁰ para referirnos a un sistema reconfigurable, que partiendo de un escenario concreto modelado igualmente como una red de nodos, sea posible configurar una avería fatal y en base a ella, el sistema sea capaz de recalcular en tiempo real, una nueva red de rutas que garanticen la evacuación de la dotación de referencia y al mismo tiempo, dirigir un proceso que optimice el abandono del buque.

5. Proyecto de investigación

De acuerdo con la línea de investigación promulgada y antes de abordar cualquier diseño para un sistema, resulta imprescindible acometer ciertas acciones, que si bien no resultaron novedosas, sí resultarían imprescindibles a posteriori, para desarrollar esta nueva línea de investigación:

- Actualización del estudio de dotaciones, que si bien ya fue abordado, la promulgación de la nueva Ley de personal¹¹, ha provocado el paulatino envejecimiento de sus miembros. Esta realidad, unida a la notoria relevancia que posee el factor *edad* en el modelo de desplazamiento, exige de la imprescindible actualización de estos datos.
- Analizar del proceso de evacuación en buques anfibios de la Armada, por la enorme relevancia de su dimensionamiento y la heterogeneidad de los contingentes embarcados.
- Implementación de un modelo de desplazamiento para los contingentes de estudio, embarcados en el buque de referencia, significando su entidad y sus características singulares, lo cual hace más interesante si cabe, a este proyecto.

Ante la necesidad de disponer de un buque de referencia, el EMA designa al B.A.A. (L-51) «*Galicia*», como buque de estudio sobre el que se desarrollaría la investigación de sus contingentes, de su plan de evacuación y sobre el que implementar el prototipo del sistema de evacuación mencionado; llevándose así mismo una gama de ensayos diseñados y plantificados para tal fin.

¹⁰ Dynamic escape routes for naval ships. Thesis: Francisco Javier Pérez Villalonga. Naval Postgraduate School (NPS), Monterey (CA, USA), 2005.

¹¹ Ley 39/2007 de la Carrera Militar, de 19 de noviembre.



Figura 2. LPD (L-51) «Galicia».

Foto Fuente:< <https://elfarodeceuta.es/buque-armada-galicia-llega-ceuta/>>

Como consecuencia de las funciones tan específicas que pueden desarrollar esta clase de buques, resulta procedente al embarque de dotaciones muy específicas, que permiten implementar tareas y operaciones igualmente específicas (dotaciones de vuelo, sanitarias, Estado Mayor, etc.). Acorde a esta singularidad, la permanencia de estos contingentes embarcados tendrá un carácter meramente temporal.

De entre la disparidad de contingentes embarcados, destaca precisamente por su relevante funcionalidad y tamaño, los miembros pertenecientes a la *fuera de desembarco* (FD). Fuerza compuesta por miembros del Cuerpo de Infantería de Marina (IM), especializados en la ejecución de operaciones y desembarco de tropas en el litoral, proyectando así el poder naval en tierra firme.

Este contingente, puede tener una entidad de Batallón reforzado y su contingente puede alcanzar la cifra de aproximada cuatrocientos cincuenta efectivos (450 pax. aprox.), duplicando prácticamente el número de miembros de la dotación del buque; por cuanto representa el contingente más numeroso y más relevante si cabe, de cara a este proyecto de investigación.

Independientemente de las características inherentes de la FD, su carácter de contingente NO permanente en el buque, resultará una peculiaridad ciertamente notable y a la postre definitiva para el estudio, puesto que a tenor de esta característica, no resultaría correcto considerar a sus miembros como dotación propia, pero tampoco debe caerse en el error de considerarlos de pasaje, puesto que se trata de un contingente militar altamente especializado en el desarrollo de operaciones a bordo de buques anfibios.

Acorde a la normativa específica promulgada por el EMA y de aplicación a esta clase de buques¹², puesto que estos contingentes embarcados carecen del grado de instrucción y adiestramiento que atesora la dotación propia; estos se verán obligados a practicar adiestramientos a modo de simulacros periódicos, dirigidos a adquirir el suficiente conocimiento acerca de la disposición general del buque, así como de sus protocolos y procedimientos de emergencia, entre los que se encuentra el plan de abandono de buque.

6. Plan de estudio

Para llevar a cabo este estudio, el EMA autorizó el embarque de un equipo de investigación en el buque de estudio, para ejecutar una gama de ensayos diseñados durante la realización de las maniobras MARFIBEX-72, que tienen lugar con carácter anual en el golfo de Cádiz.

¹² Manual de organización del buque, Comte. B.A.A. (L-51) «Galicia», 2014.

Como no podría ser de otro modo, se tomaron como referencia los procesos aplicados en investigaciones previas y se programaron una gama de ensayos al efecto, al objeto de captar los datos requeridos para sustanciar la base de conocimiento de este estudio. De acuerdo con la peculiar disposición general de esta clase de buques, estos ensayos estarían dirigidos principalmente, a estudiar los siguientes supuestos:

- Desplazamiento de cinco metros (5m.) a través de un corredor principal.



Figura 3. Foto fuente: GIMOE 2017

- Proceso de apertura, superación y cierre de una puerta estanca.

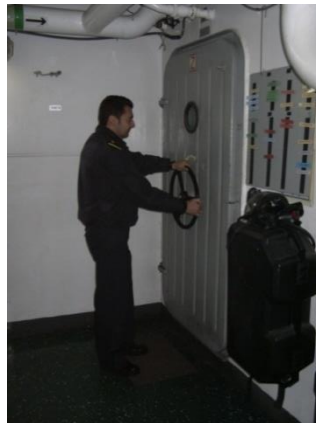


Figura 4. Foto fuente: GIMOE 2017

- Proceso de apertura, superación y cierre de una escotilla.



Figura 5. Foto fuente: GIMOE 2017

Estos ensayos programados tenían como único propósito, el registro de los tiempos empleados por los miembros que integraban los grupos de control, en solventar los elementos u obstáculos de paso enumerados. Ante la imposibilidad de emplear a la totalidad del contingente de referencia, primero por su tamaño y además por su falta disponibilidad, el estar ejercitándose en las maniobras que estaban teniendo lugar; este caso se muestra como ejemplo claro de manual, ante la aplicación de un DEE¹³.

Esta metodología permite por una parte, identificar los factores característicos que realmente intervienen en los procesos y en base a estos factores, delimitar las características que deberán validar los miembros que constituyan los grupos de control (*muestras poblacionales*) y que intervendrán en los ensayos para la captura de tiempos, evitando así tener que recurrir a la tradicional técnica de muestreo.

Para fundamentar el DEE, se procedió a emitir una encuesta diseñada, al objeto de recopilar información sobre los conocimientos de la población de estudio acerca del entorno, además de sus datos antropométricos y profesionales, todos ellos imprescindibles para constituir los mencionados grupos de control a emplear en la ejecución de los ensayos.

Desde un inicio, este proceso presentó continuos inconvenientes, aunque a la postre resultarían determinantes, aportando conocimiento suficiente respecto a su distribución, competencia y otras características propias de la población de estudio, lo que redundaría en la simplificación del DEE y por ende, del modelo de desplazamiento planteado para los diferentes contingentes embarcados.

7. Estudio de factores

Partiendo del conocimiento adquirido del proyecto GIMO07, este inducía a suponer que ciertos factores de la población, intervenían en mayor o menor medida en los resultados de los ensayos ejecutados, aunque no se precisaba el grado, ni su magnitud. Estos indicios serían nuevamente identificados, tras el posterior análisis de datos del proyecto e incluso su impacto era fácilmente identificable, durante el visionado de los ensayos programados.

Hallándose disponibles en el repositorio del GIMOE, los datos (personales, antropométricos y profesionales) de los miembros de la población de estudio recopilados en el mencionado proyecto, se procedió a la construcción de un DEE sencillo, al objeto de adquirir mayor conocimiento sobre los factores característicos del estudio.

Acorde a la metodología de diseño factorial (n^f), donde (n) representa el número de niveles de medida o significación, (f) el número de factores designados y habiéndose fijado únicamente dos niveles de significación; se recomienda la reducción del número de factores y niveles que intervengan en el DEE, al objeto de lograr principalmente un diseño abordable y sin perder por ello, potencia de análisis por el descarte efectuado.

Como respuesta del DEE planteado para analizar del desplazamiento de la dotación propia y la FD del buque de estudio, las características principales que finalmente sustentarían el estudio, serían los siguientes tres (3) factores y los dos (2) niveles de significación, mostrados en la tabla siguiente:

¹³ Diseño Estadístico de Experimentos.

Factor	Nivel alto	Nivel bajo
IMC: (peso/altura ²)	<i>superior a la media</i>	<i>inferior a la media</i>
Edad (años)	<i>superior a la media</i>	<i>inferior a la media</i>
Sexo	<i>hombre</i>	<i>mujer</i>
Antigüedad (años)	<i>superior a la media</i>	<i>inferior a la media</i>
Categoría	<i>Oficial-Suboficial</i>	<i>Marinería</i>

Tabla factores de estudio y niveles de significación o medida.

Mediante este DEE implementado, se vino a confirmar e identificar qué factores y con qué grado de influencia, intervienen en el proceso que nos incumbe. El proceso dirimido, así como las conclusiones obtenidas debidamente detalladas, fueron publicados precisamente en un artículo de este BTI¹⁴.

Como siguiente paso de la investigación, se procedió a la ampliación de este DEE, con la finalidad de desarrollar un modelo de regresión que estimase el tiempo de desplazamiento de los efectivos de estudio. Para ello, era preciso disponer de datos debidamente actualizados, los cuales habían sido captados en la comisión realizada en el buque de estudio. Este proceso completo y sus correspondientes conclusiones, fueron descritos pormenorizadamente en un artículo de la RGM¹⁵.

En definitiva y tras los procesos de análisis efectuados, sería posible disponer de unas ecuaciones de regresión (tiempo), que se correspondieran con los tres modelos de desplazamiento emplazados con la gama de ensayos del DEE planteado. Por supuesto, estas ecuaciones se corresponderían con el modelo de desplazamiento implementado para los miembros de la dotación, así como para la FD embarcada en el buque de estudio; acorde con sus respectivos atributos o factores de estudio, intervinientes en el proceso de estudio (tabla anterior).

8. Herramienta de validación

De acuerdo con la disposición IMO¹⁶, se da el reconocimiento normativo preceptivo a la aplicación *EXODUS Maritime*¹⁷, como herramienta de validación. Se trata de un simulador heurístico con capacidad para diseñar la configuración de un escenario, el cual emula la disposición general del buque de estudio. Para ello emplea una maya de nodos a modo de baldosas, sobre las cuales tan solo se podrá situar a un único agente en un instante concreto.

¹⁴ Boletín Técnico de Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Armas Navales (ETSIAN), núm.14- MAY18.

¹⁵ Revista General de Marina, Mayo 2019.

¹⁶ Directrices para el análisis de la evacuación de buques de pasajeros nuevos y existentes, MSC/Circ.1238, 2007.

¹⁷ Fire Safety Engineering Group (FSEG), Universidad de Greenwich, Londres.

Sobre este escenario se configuran asimismo unos *nodos sumidero*¹⁸, emulando las balsas de rescate, así como una serie de *nodos hoja*¹⁹ que actuarán como puntos de partida para la colección de agentes constituidos y que a su vez emularán a los miembros de la dotación, cuyos atributos se ajustará a su configuración individual.

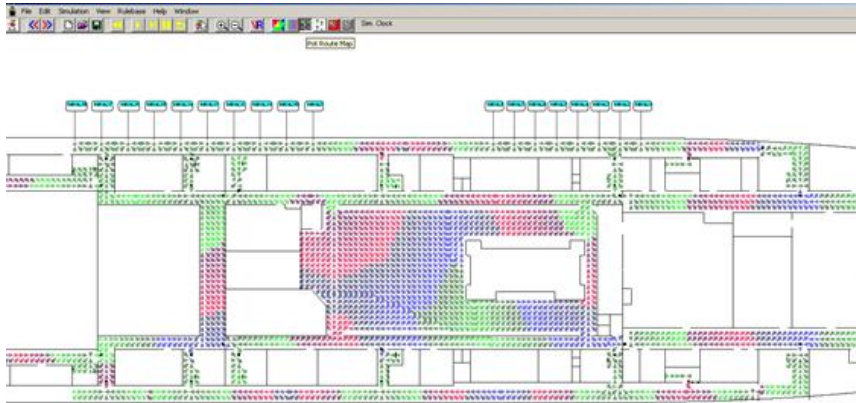


Figura 6. EXODUS Maritime. Vista de pesos por defecto (diagramas de color), cubierta principal, acorde a la ubicación de balsas. Foto fuente: GIMOE 2019

Mediante el empleo de un reloj interno, cada 1/12 segundos aproximadamente, la aplicación reevalúa y posteriormente reubica en baldosas adyacentes a los agentes a lo largo del escenario, velando por cumplir la premisa principal, la cual exige que cada agente alcance su correspondiente *nodo sumidero*. Para ello, el desplazamiento de un agente dependerá de la delimitación de una ruta base, previamente definida (ruta óptima de partida) o en su defecto, en base al criterio de camino más corto (longitud) de cara a alcanzar su correspondiente nodo sumidero.

De acuerdo con la normativa vigente y gracias a los resultados obtenidos de los estudios practicados, resulta posible dirimir una parametrización y la correspondiente configuración de todos los objetos intervinientes en la simulación descrita, lo cual permitirá abordar la simulación de un proceso de evacuación desde una plataforma naval concreta, en un entorno modelado como adverso (Z/C, tránsito nocturno, averías, etc.) y que vele, por el escape de los agentes intervinientes.

La gran potencia de simulación aportada por esta aplicación, así como su configuración de parámetros de entorno y de agentes intervinientes, le permite desarrollar una simulación heurística de gran relevancia y versatilidad.

Como resultado de las simulaciones practicadas e independientemente de los problemas comunes, identificados en un proceso de estas características; los resultados obtenidos premiaron todas las expectativas del equipo de investigación, permitiendo la validación acorde a las disposiciones de la IMO, el plan de evacuación del buque de estudio.

¹⁸ Teoría de Grafos. Vértice o nodo que tiene grado de salida nulo y un grado de entrada positivo.

¹⁹ Teoría de Grafos. Vértice de un árbol que carece de aristas o enlaces, es decir, no está conectado con otros vértices descendientes.

9. Justificación

A pesar de confirmarse que el dimensionamiento de la disposición general del buque no resultaría un inconveniente para la herramienta de simulación, al objeto de abordar un proceso de evacuación de la entidad planteada, aun en el supuesto que el buque se encontrase a plena capacidad y siempre que durante el proceso, NO se aprecie avería alguna que afecte a la integridad de las rutas de evacuación previamente definidas; esta herramienta no muestra la idoneidad que demanda el proyecto de investigación propuesto.

Esta falta de idoneidad, viene causada por las características intrínsecas de la aplicación, es decir, en el caso de desearse la simulación de un proceso donde tengan lugar ciertas averías pronosticadas, la herramienta *EXODUS Maritime* requiere de la identificación previa de las mismas, designando las zonas que resultasen afectadas o impracticables por causa de los daños producidos (desperfectos, fuego, humo, gases, etc.), debiéndose designar previamente la rutas alternativas a la situación producida.

En otro orden, a la vista de los tiempos de configuración, simulación y respuesta de la aplicación, además de no producir los formatos de resultado que demanda el equipo de investigación para dotar a un proceso de ayuda a la decisión, que tiene lugar en tiempo real o el hecho de contar con una herramienta de optimización específica, que a pesar de aportar una gran potencia de simulación, no resulta posible la configuración de un proceso de optimización alternativo, por cuanto no aporta solución al problema de optimización planteado; justifica plenamente la falta de idoneidad de esta aplicación para la implementación del sistema deseado.

A pesar de los inconvenientes que presenta esta herramienta de validación, no se procederá a su descarte del proyecto, puesto que será igualmente de aplicación para validar el sistema que se desarrolle, acorde a las disposiciones de la IMO.

10. Planteamiento

A la vista de la descripción realizada, el proyecto de investigación planteado por el GIMOE, estará dirigido al desarrollo de un sistema que permita la configuración de todos los objetos intervinientes en un proceso de simulación, el cual abordará la evacuación de una plataforma naval, mediante la identificación de las rutas óptimas que deban seguir los agentes que traten de abandonar el escenario de simulación, todo ello acorde con las siguientes premisas:

- Todo agente deberá alcanzar su correspondiente *nodo sumidero* (balsa de rescate).
- Todo el proceso velará por su optimización, de acuerdo con la premisa de minimizar el tiempo total empleado por los agentes que intervienen en el proceso.
- La función objetivo descrita en el apartado anterior, puede simplificarse a su vez, como la minimización del tiempo que emplea el último agente en lograr abandonar la plataforma de estudio, a través de su correspondiente *nodo sumidero* (balsa de rescate).

De acuerdo con las premisas planteadas y para proceder a la implementación del sistema pretendido, será preciso disponer previamente de los elementos de configuración siguientes:

- Disposición general del buque de estudio implementada mediante una *matriz de adyacencia*²⁰, que viene a representar una red de nodos que se ajusta con la topología de maya parcialmente enlazada. En esta red, cada nodo representará uno de los obstáculos de estudio planteado en el DEE diseñado (corredores, puerta estanca, escotilla), mientras que cada arista o enlace aportará, albergará o reseñará el coste (tiempo) que supondrá a un agente, alcanzar el nodo aledaño.
- Fichero de registro de las características o atributos de la dotación propia y la FD que intervienen en el proceso de simulación. Cada campo de registro aportará los datos de configuración de los factores intervinientes en el proceso (IMC, peso, antigüedad, etc.).

11. Implementación

El primer paso de cara a la implementación del sistema planteado, pasa por la construcción de una estructura dinámica que emulará el escenario de simulación, partiendo de su correspondiente matriz de adyacencia.

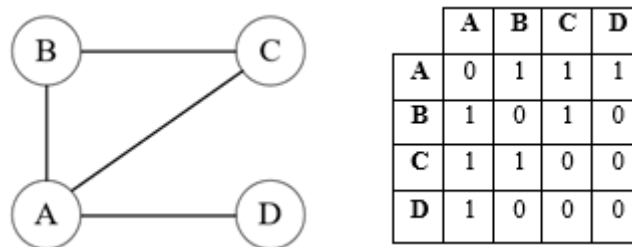


Figura 7. Ejemplo de grafo y su correspondiente matriz de adyacencia.

Foto fuente: <https://www.researchgate.net/figure/Grafo-no-dirigido-con-su-representacion-como-matriz-de-adyacencia_fig12_309278789>

La estructura dinámica diseñada, se ajustarán a las propiedades de un árbol²¹ dinámico con un *grado*²² previamente definido, donde cada *vértice* representará un elemento u obstáculo de tránsito (*corredor, puerta estanca, escotilla, escala, escalera, balsa o punto de partida*) y sus aristas dispensarán los *pesos* concernientes al coste asociado al desplazamiento a través del vértice aledaño.

²⁰ Teoría de Grafos. Matriz cuadrada tamaño n^2 , donde n es el número de vértices. Si existe arista entre los vértices (x e y), entonces el elemento de las coordenadas (x , y) de la matriz, contendrá un valor.

²¹ Teoría de Grafos. *Grafo conexo* sin ciclos, cuyo *grado* coincidirá con el número máximo de descendientes previamente definido.

²² Teoría de Grafos. Número máximo de aristas o enlaces para cada vértice del árbol.

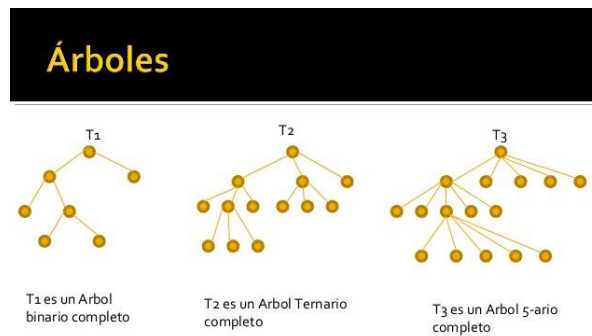


Figura 8. Ejemplo de árboles de diferente grado.

Foto fuente: <<https://es.slideshare.net/espejoxiii/arboles-15510425>>

La designación de este tipo de estructura dinámica, no solamente permite modelar el escenario emulado acorde a las características de la topología definida, sino que mediante el empleo de programación recursiva, resultará sencillo recorrer una estructura que sustenta el proceso de optimización previsto y al mismo tiempo, lograr el uso eficientemente de memoria ocupada. Estas características, acompañadas de la implementación del sistema en base a la POO²³, dotará al entorno de una flexibilidad y potencia de programación que tan solo aporta este paradigma de la programación.

Una vez construida la estructura dinámica y habiendo posicionado en los respectivos *nodos hoja* a los distintos agentes, se procederá a ejecutar de un algoritmo que implementado como una variación del algoritmo de recubrimiento mínimo de un árbol. Este algoritmo determinará o asociará a cada nodo, el coste mínimo (tiempo) que supondrá alcanzar cada uno de los *nodos balsa* o *sumidero*. Es decir, se llevará a cabo la evaluación de las distintas rutas que confluyan en cada *nodo balsa*, de este modo que será posible identificar las rutas óptimas (menor coste en tiempo).

A tenor de esta exposición, se entenderá por *coste de un nodo*, al tiempo total que le supone para un agente concreto, superar el elemento u obstáculo representado por el nodo, además del tiempo de espera ante los agentes precedentes que se encuentran a la espera de superar este nodo (*cola de agentes*).

²³ Paradigma de la Programación Orientada a Objetos.

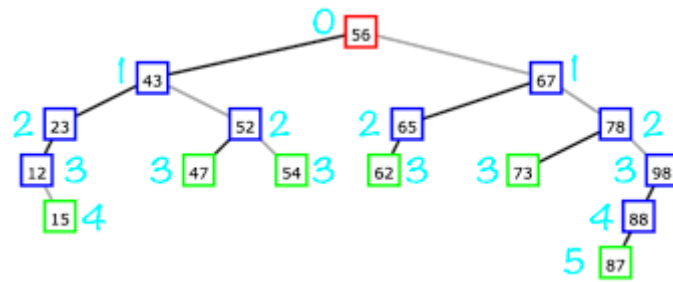


Figura 9. Ejemplo de árbol etiquetado²⁴.

Foto fuente: <<https://elisa.dyndns-web.com/teaching/mat/discretas/md.html>>

Evaluados y actualizados los costes de los respectivos nodos, se ejecuta un *algoritmo voraz*²⁵ que en función de los costes obtenidos para cada nodo, identificará la ruta óptima (menor coste en tiempo) existente entre cada *nodo balsa* y los respectivos nodos que alberguen al menos un agente que trata de alcanzar esta misma balsa.

Este proceso tratará la emulación del proceso de modo inverso al real, es decir, el algoritmo voraz no «empujará» al agente hacia su correspondiente balsa a lo largo de la ruta óptima, sino que por el contrario, «tirará» del agente desde su nodo de partida hasta su correspondiente balsa, a través de la ruta óptima identificada.

Este proceso repetitivo de reevaluación de costes, localización de agentes y su posterior desplazamiento a lo largo de las rutas óptimas, tendrá lugar hasta que todos los agentes intervinientes logren alcanzar su correspondiente nodo sumidero (*balsa de rescate*), modelando en resumidas cuentas el proceso de simulación implementado.

```
public static void daemon(ref nodo arbol, byte balsa, double costeAcumulado, byte ordenArbol)
{
    if ((arbol != null) && (!arbol.estado))
    {
        if (arbol.cola.Count > 0)
        {
            costeAcumulado += arbol.cola.Count * costes.costeRecorridoNodo(arbol.tipo);
            if ((arbol.abierto) && (!costes.identificaCorredor(arbol.tipo)))
                costeAcumulado -= costes.costeInicialNodo(arbol.tipo);
            if (costeAcumulado < arbol.costesBalsa[balsa]) arbol.costesBalsa[balsa] = costeAcumulado;

            arbol.estado = true;
            for (byte z = 0; z < ordenArbol; z++)
            {
                costeAcumulado = arbol.costesEnlace[z] + arbol.costesBalsa[balsa];
                daemon(ref arbol.siguiete[z], balsa, costeAcumulado, ordenArbol);
            }
            arbol.estado = false;
        }
    }
}
```

Figura 10. Fragmento de código del método de evaluación de costes. Fuente GIMOE 2020.

²⁴ Teoría de Grafos. Grafos que dispensan un peso a sus aristas o un etiquetado en los vértices.

²⁵ Estrategia de búsqueda que se sigue una heurística consistente en elegir la opción óptima, en cada paso local, al objeto de alcanzar una solución general óptima.

12. Configuración complementaria

Independientemente de la funcionalidad con la que se dota al sistema implementado, otro de los requisitos expresos del sistema, define la configuración complementaria del «escenario de avería».

Si bien es cierto que la herramienta EXODUS Maritime, permite emplazar una configuración que simule los efectos de una avería, mediante la restricción o inhabilitación de las zonas de desplazamiento que resultasen presuntamente afectadas, nuevamente su configuración previa inherentes a la aplicación y sus tiempos de configuración y respuesta, nuevamente dejan patente su falta de idoneidad para desarrollar el sistema pretendido.

Por ello, el sistema implementado se verá dotado con una configuración complementaria, la cual permitirá desactivar aquellos nodos que se ajusten a la localización o los elementos de paso que la comprendan, inhabilitación que se ajustará de acuerdo a los probables daños causados por la avería configurada.

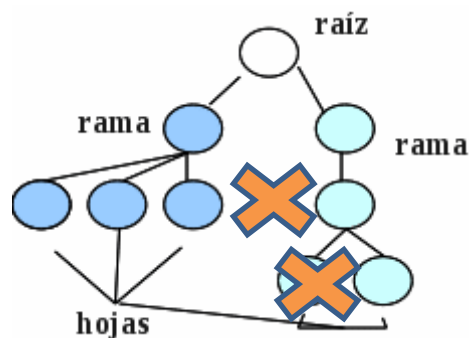


Figura 11. Árbol, nodos inhabilitados.

Foto fuente: <[https://www.ecured.cu/%C3%81rbol_\(Grafo\)>](https://www.ecured.cu/%C3%81rbol_(Grafo)>)

De acuerdo con la estructura de diseño del sistema implementado, esta configuración complementaria no interferirá en su funcionalidad, puesto que los algoritmos están diseñados aportarán la funcionalidad de identificación de rutas óptimas y el desplazamiento de agentes emulando el desplazamiento de la dotación; de modo totalmente independiente a la estructura dispuesta como modelado del escenario.

13. Conclusiones

A la vista de la problemática identificada, se justifica debidamente la necesidad de desarrollar un sistema que vele por la optimización del proceso de evacuación de los miembros embarcados en el buque de estudio, derivándoles a través de la identificación de rutas que resulten más idóneas (óptimas), para finalmente optimizar (minimización) el tiempo total de evacuación o visto de un modo más simplificado, optimizar el tiempo empleado por el último agente que abandone el buque.

Este sistema basado en una estructura que sigue una topología de red NO totalmente enlazada, como modelo que emula la disposición general del buque de estudio, permite asimismo ubicar a cada agente, que a su vez emula a un miembro de la dotación con sus características peculiaridades (atributos y métodos), para posteriormente transitar a lo largo de la estructura durante el proceso de simulación, en base a las reglas de optimización previamente definidas para el proceso. Este proceso en definitiva, procurará un modelo similar al

balanceo de carga (agentes), teniendo en cuenta la situación (coste) del resto de la estructura, es decir, evaluando el nivel de carga de las restantes rutas de la estructura.

Actualmente, el GIMOE dispone de un prototipo del sistema diseñado, que si bien se encuentra en fase de pruebas, posteriormente deberá abordarse su validación definitiva mediante el contraste de sus resultados, con la aplicación *EXODUS maritime*. A tenor de las capacidades y los resultados obtenidos a fecha de este artículo, estos se muestran claramente prometedores.

14. Inconvenientes

Ahora bien, en qué puede beneficiar un sistema como el descrito al buque de estudio o cualquier otro buque de idéntica entidad de la Armada. Resulta una pregunta perfectamente plausible para un escéptico.

La idea original de este proyecto, surte de la integración de varios sistemas, entre los que destaca el sistema objeto de este artículo y que actuaría meramente como motor de optimización. En otro sentido, sería necesaria la debida integración de otros sistemas diversos, uno de los cuales identificase la ubicación de miembros de la dotación mediante tarjetas RFID, pruebas ya evaluadas durante el proyecto GIMO07; así como de otro sistema que llevase a cabo la obtención de información del SICP²⁶, al objeto de identificar las zonas dañadas y afectadas por causa de una avería producida e integrarla como una reconfiguración del escenario de simulación.

Conocida la ubicación de agentes en los distintos nodos y habiendo calculado su ruta óptima en función de la carga (coste), respecto al resto de la estructura; resulta factible instalar un sistema de corrección de ruta, que emplazando señalización dinámica (visual o acústica) en las intersecciones existentes a lo largo de la disposición general del buque o, mostrasen a cada individuo qué camino debería seguir.

Llegados a este punto, el lector escéptico o el profesional en el campo naval podrían pensar en la futilidad del sistema descrito, puesto que cualquier miembro de la dotación está perfectamente familiarizado con la disposición general del buque, independientemente de disponer o no de información suficiente acerca de los daños sufridos por la estructura del buque y habiéndose iniciado el proceso de evacuación.

En base a la normativa vigente y tal como cree el autor, la proposición que plantea resulta una tautología, es decir, el nivel de instrucción y adiestramiento que alcanza cualquier dotación de un buque de la Armada, hace totalmente innecesario este sistema. Ahora bien, qué ocurre con los contingentes temporales embarcados, ante una situación de abandono de buque, con mala mar, deficiente iluminación y habiéndose producido una avería, que inhabilita parte de la estructura con la que se encuentra familiarizada este contingente.

A tenor de los resultados obtenidos en el análisis practicado a las encuestas dirigidas a miembros de la FD durante la comisión realizada, viene a atestiguar que ante una situación de abandono de buque como la descrita en el apartado anterior, un sistema de estas características resultaría primordial y cuanto menos, resolutivo.

²⁶ Sistema Integrado de Control de Plataforma.

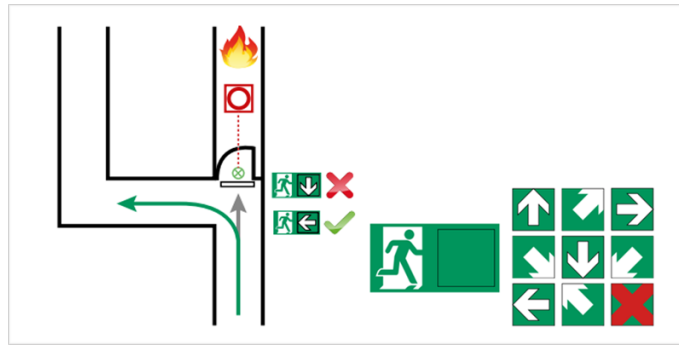


Figura 12. Sistema de señalización ante una evacuación. Foto fuente: <<https://www.casadomo.com/comunicaciones/sistema-seguridad-global- evacuacion-autonoma-inteligente>>

Ahora bien, si un sistema de monitorización de dotaciones como el propuesto, se justifica o confirma su utilidad a bordo de buques militares y puesto que estos buques, representan el baluarte tecnológico de los móviles que surcan mares y océanos; qué valor dispensaría un sistema de estas características, instalado a bordo de un crucero turístico que hubiese sufrido un accidente como el «Costa Concordia» (2012).

Esta es claramente una pregunta, a la que ni puedo ni quisiera dar respuesta por resultar una parte interesada, pero ante un accidente como el mencionado y ante la falta de dirección de un proceso como el abordado, ello podría dar lugar a una tragedia que haría palidecer al mismísimo accidente del RMS «Titanic» (1912).