



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio y simulación de movimiento de tropas embarcadas.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Fernando Quijano Martínez

DIRECTORES: Roberto Bellas Rivera

Ramón Touza Gil

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio y simulación de movimiento de tropas embarcadas.

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado consiste en el desarrollo de un modelo de simulación de movimiento de tropas embarcadas en el buque anfibio LHD Juan Carlos I, para poder estudiar los tiempos de los desplazamientos realizados por este personal durante las operaciones de desembarco.

Tomando como punto de partida el TFG realizado en el año 2018 del AN don Ignacio Rivera Dodero, se ha perfeccionado el modelo del buque y se ha realizado el modelado de las tropas embarcadas de Infantería de Marina, así como las lanchas y helicópteros que se utilizan para el transporte de las estas tropas. Se ha realizado una simulación en base a una maniobra real de la Armada mediante el software de simulación de evacuación para agentes pedestres Pathfinder. Así mismo, se ha llevado a cabo un análisis estadístico de los resultados obtenidos en diferentes réplicas de la simulación mediante el software Matlab y la herramienta Excel, siendo el fin del análisis disponer de unos tiempos con unos intervalos de confianza aplicables al planeamiento de los tiempos de la secuencia del desembarco.

Por último, se han extraído una serie de valoraciones de los resultados respecto a los procedimientos existentes en la actualidad y la influencia de la localización de los alojamientos de la fuerza embarcada.

PALABRAS CLAVE

Buque anfibio, tropas embarcadas, operaciones anfibias, simulación, análisis estadístico.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis dos tutores, CF don Ramón Touza Gil y a don Roberto Bellas Rivera, su inestimable ayuda y apoyo en todo momento, sin cuya guía el producto de este TFG hubiese quedado en nada.

También me gustaría mencionar a todos aquellos que han contribuido directa o indirectamente a la elaboración de este trabajo, especialmente al CAP don Ricardo Gómez-Lobato Lanzarote, por su ayuda desinteresada.

Además, a mi familia y a Teresa, por estar ahí en todo momento, aún con el tiempo que no os he dedicado mientras me enfrascaba en la realización de este trabajo.

Por último, especial mención merecen mis compañeros de promoción, inigualable compañía en este viaje que ya termina, por otorgarme el privilegio de ser parte de esta gran familia.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Motivación el proyecto	8
1.3 Objetivos	8
1.4 Metodología	8
2 Estado del arte	9
2.1 Movimiento de personal en los buques de guerra.....	9
2.1.1 Armada Española.....	9
2.1.2 Regulación internacional	10
2.2 Fuerza embarcada	12
2.2.1 Buques anfibios en la Armada.....	12
2.2.2 Naval Ship Code (NSC).....	15
2.2.3 Organización de la Fuerza para el desembarco	18
2.3 Proceso de simulación.....	23
2.3.1 Modelos de simulación del movimiento de personal	23
2.3.2 Movimiento “Pedestre”	24
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Desarrollo de la simulación.....	27
3.1.1 Situación real	27
3.1.2 Información de la que se dispone	27
3.1.3 Modelado de espacios singulares.....	32
3.1.4 Reparto de personal en cubiertas	35
3.1.5 Configuración de agentes.....	39
3.2 Ejecución de la simulación	43
3.3 Análisis estadístico de los resultados	46
3.3.1 Cálculo del número de réplicas.....	47
3.3.2 Análisis descriptivo	47
3.3.3 Análisis gráfico.....	48
3.3.4 Bondad de ajuste.....	48
3.3.5 Intervalo de confianza.....	49

4 Resultados	51
4.1 Simulación del desembarco anfibio	51
4.1.1 Rutas	51
4.1.2 Colas	54
4.2 Análisis estadístico.....	55
4.2.1 Análisis descriptivo	55
4.2.2 Análisis gráfico	56
4.2.3 Bondad de ajuste	59
4.2.4 Intervalo de confianza.....	59
5 Conclusiones y líneas futuras	61
5.1 Conclusiones	61
5.2 Líneas futuras	62
6 Bibliografía.....	63
Anexo I: Tiempos máximos de embarque para los casos estudiados.....	65
Anexo II: Glosario de términos y acrónimos	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 BAA Castilla [6].	13
Figura 2-2 LCM1-E cargada con vehículos y personal en el dique del B.A.A Castilla [6].	13
Figura 2-3 LHD Juan Carlos I [6].	14
Figura 2-4 Características del personal embarcable con cada una de las categorías de este [32].	17
Figura 2-5 Ejemplo de diagrama de configuración de carga de una LCM1-E [14].	21
Figura 2-6 Embarque de infantes de marina en un SH-3D a bordo del JCI [6].	22
Figura 3-1 Zona de espera de la FD para el desembarco por medios de superficie [8].	28
Figura 3-2 Zona de espera de la FD para el desembarco por medios aéreos [8].	28
Figura 3-3 Playa situada en el dique del buque JCI.	32
Figura 3-4 Modelización de la playa.	33
Figura 3-5 Zona de mar y playa.	34
Figura 3-6 Espacio aéreo.	35
Figura 3-7 Parte de los alojamientos existentes en la cubierta 2, todos ellos para oficiales [9].	36
Figura 3-8 Vista de perfil de la distribución de los agentes en el buque.	36
Figura 3-9 Vista en perspectiva de la distribución de los agentes en el buque.	37
Figura 3-10 Zonas más pobladas del buque.	37
Figura 3-11 Zona de oficiales.	38
Figura 3-12 Parte del personal de las cubiertas 3 y 4.	38
Figura 3-13 Perfiles participantes en la simulación.	39
Figura 3-14 Parte de los comportamientos creados para la simulación.	39
Figura 3-15 Modificación de las características de los agentes masculinos de IM.	40
Figura 3-16 Comportamiento asociado al personal participante en la ola 2.	41
Figura 3-17 Modelo 3D asociado al personal masculino y femenino.	41
Figura 3-18 Diseño de la forma del perfil LCM1-E.	42
Figura 3-19 Diseño del perfil del helicóptero.	43
Figura 3-20 Secuencia de movimiento de las olas de personal (elaboración propia).	44
Figura 3-21 Secuencia de movimiento de los medios de transporte (elaboración propia).	44
Figura 3-22 Puntos de reunión de la FD para el desembarco por medios de superficie y aéreos.	46
Figura 3-23 Secuencia del análisis de datos estadístico (elaboración propia).	46
Figura 3-24 Ejemplo de <i>boxplot</i> con valores atípicos.	48
Figura 4-1 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E en la cubierta 4 (dique).	51
Figura 4-2 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E en la cubierta 3.	51
Figura 4-3 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E cubierta 2.	52
Figura 4-4 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E cubierta 1.	52

Figura 4-5 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E cubierta 01.....	52
Figura 4-6 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 4 (dique).	53
Figura 4-7 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 3.....	53
Figura 4-8 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 2.....	53
Figura 4-9 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 1.....	53
Figura 4-10 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 01.....	53
Figura 4-11 Colas en la cubierta 4 (dique).	54
Figura 4-12 Colas en la cubierta 3.....	54
Figura 4-13 Colas en la cubierta 2.....	54
Figura 4-14 Colas en la cubierta 1.....	54
Figura 4-15 Colas en la cubierta 01.....	55
Figura 4-16 Colas en la cubierta <i>skyjump</i>	55
Figura 4-17 Histogramas de la ola 1 de desembarco.....	56
Figura 4-18 Histogramas de la ola 2 y la ola 3 del helo 2.	57
Figura 4-19 Histogramas de las olas 4 y 7 del helo 1.....	57
Figura 4-20 <i>Boxplot</i> ola 1.....	58
Figura 4-21 <i>Boxplot</i> de la ola 2 por LCM1-E y 3 por el helo 2.	58
Figura 4-22 <i>Boxplot</i> de las olas 4 y 5 del helo 1.	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Categorías de los parámetros del análisis perfeccionado de la evacuación [4].	12
Tabla 2-2 Personal embarcable en el JCI [8].	14
Tabla 2-3 Categorías de personal embarcable [9].	16
Tabla 2-4 Escenarios a ser considerados para el análisis y ensayos de escape y evacuación [9].	18
Tabla 2-5 Tiempos aproximados de carga/descarga en una LCM1 [14].	20
Tabla 2-6 Configuración de carga de una LCM1-E para vehículos sin remolque [14].	21
Tabla 3-1 Equipo de Embarque del JCI para el ejercicio GRUFLEX-18.	29
Tabla 3-2 Extracto del reparto de camarotes en el JCI para el ejercicio GRUFLEX-18.	30
Tabla 3-3 Extracto del <i>Assault Schedule</i> utilizado en el marco del ejercicio GRUFLEX-18.	31
Tabla 3-4 Trigramas de los vehículos [15].	32
Tabla 3-5 Unidad y velocidad asignada.	42
Tabla 3-6 Hitos de las olas 1 y 2 (elaboración propia).	45
Tabla 4-1 Datos estadísticos.	56
Tabla 4-2 Intervalos de confianza.	59

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El entorno mundial actual es complejo, variable e impredecible en todos los ámbitos, incluido el de la Defensa. El litoral marítimo ofrece un espacio de maniobra adecuado para ser utilizado por fuerzas anfibias tanto para operaciones de guerra convencional, asimétrica o contra insurgencia. Por ello, las operaciones anfibias cobran elevada relevancia, especialmente debido al auge de las mega-ciudades y la localización de los principales recursos cerca de la costa. Además, el espectro en el que pueden desenvolverse estas fuerzas es aún más amplio que el de la Defensa, cabiendo la posibilidad de ser empleadas en operaciones de ayuda humanitaria o de respuesta de crisis, otorgando así una considerable flexibilidad militar y política.

Sin embargo, este tipo de operaciones es una de las más complicadas de ejecutar, cobrando así especial relevancia la necesidad de realizar un planeamiento detallado. Debido a su participación activa como miembro de la OTAN, y aunque España posee su propia doctrina en relación al planeamiento de las operaciones anfibias, esta no es más que una adaptación de la generada a este nivel. Este trabajo se centrará concretamente en la ATP8 (D)-volumen II, donde se recogen las tácticas, técnicas y procedimientos que deben servir como guía cuando se realicen operaciones anfibias conjuntas. Además, España establece como debe realizarse el movimiento de los medios de desembarco entre los buques y la playa mediante la D-AF-01 *Manual de procedimientos anfibios*; y cada buque con capacidad de trabajar como plataforma anfibia especifica todas sus características de carga y procedimientos internos en un documento denominado “Cuadro de características del buque”, que será determinante en cuanto al movimiento de las tropas por sus interiores.

Por otro lado, es necesario velar por la seguridad del personal embarcado, a este respecto la norma OTAN que trata de estandarizar los aspectos de seguridad en todas las fuerzas navales es la *Naval Ship Code*. Esta es el referente internacional a aplicar por las diferentes Armadas de manera voluntaria, de forma que puedan garantizar la seguridad de su personal embarcado teniendo en cuenta las características especiales de este y la plataforma en la que se encuentran. Esta norma recoge los criterios que debe seguir el análisis del abandono de buques militares, además de reconocer a las fuerzas embarcadas como uno de los tipos de personal embarcable en un buque de guerra.

Con todo esto, añadiendo información proporcionada por oficiales tanto de Cuerpo General como de Infantería de Marina, y mediante el programa Pathfinder, se ha desarrollado la simulación del desembarco realizado desde el buque Juan Carlos I (JCI) durante las maniobras GRUFLEX 18, con el fin de analizar los datos relativos al movimiento de la fuerza embarcada por el interior del buque cuando son llamadas para dirigirse a los diferentes medios de desembarco, para poder determinar los

lugares de formación de colas y estimar un intervalo de tiempo en el que el personal se encuentra preparado para embarcar.

1.2 Motivación el proyecto

Debido al elevado número de factores que intervienen en la realización y planeamiento de un desembarco; como la meteorología, el estado de la mar, la rompiente en playa, la situación cambiante en tierra o el número y tipo de vehículos o personal a embarcar en los diferentes medios de transporte, se hace necesario un análisis de los tiempos y rutas de movimiento de las tropas embarcadas a bordo de los buques anfibios teniendo en cuenta la mayor cantidad de estos factores posible.

Otro aspecto muy relacionado con las operaciones anfibias es el planeamiento de los tiempos para la secuencia de desembarco, de manera que puedan estimarse con el mínimo error posible, favoreciendo así una ejecución más precisa.

Adicionalmente, el presente trabajo responde a una de las líneas futuras planteadas por el AN don Ignacio Rivera Dodero en su Trabajo de Fin de Grado del curso 2017/18.

1.3 Objetivos

En primer lugar, la simulación de un desembarco real de la forma más precisa posible en base a un ejercicio realizado por unidades de la Flota.

En segundo lugar, el análisis gráfico y estadístico de los datos y resultados obtenidos de la simulación, de manera que estos permitan obtener unas conclusiones beneficiosas para los procedimientos de la Armada en este campo.

1.4 Metodología

Para la realización del TFG ha sido necesaria la inclusión en el modelo del JCI realizado por el AN Rivera Dodero, mediante el programa Pathfinder, de los espacios relacionados con el desembarco anfibio, como son el dique, el espacio de mar, el espacio aéreo y la playa. Además de estos, se ha hecho imprescindible la parametrización de los agentes que representan a los infantes de marina, en consonancia con los datos aportados por la Armada relativos a su movimiento por interiores del buque, así como los relativos a los medios de desembarco aéreos y de superficie, permitiendo así que la simulación sea lo más rigurosa posible.

Por otro lado, se han obtenido los documentos necesarios que posibilitaran la simulación de un desembarco real y, en base a estos, se ha realizado la distribución del personal en las diferentes cubiertas del buque, se ha dividido a estos en función de la secuencia de desembarco y se han determinado los puntos de reunión en función del medio de desembarco.

Tras esto, se han creado diferentes comportamientos de manera que cada agente tenga una conducta acorde a su función en el desembarco, ya sean fuerza embarcada o agentes que representan a los medios de desembarco. Estos comportamientos incluyen tiempos de espera para determinar los momentos de inicio del movimiento del agente y los lugares a los que debe dirigirse.

Por último, mediante las herramientas Excel y Matlab, se han analizado los datos relativos a seis series del desembarco, tres por cada medio de desembarco, para obtener medidas características de cada una de ellas, determinar si corresponden a una distribución normal y estimar un intervalo de confianza para el tiempo de movimiento por el interior del buque antes de su salida del él.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Movimiento de personal en los buques de guerra

Tanto en los buques de pasajeros como en los buques de guerra, son frecuentes los desplazamientos de personal a través de los diferentes pasillos y compartimentos. Dichos movimientos se realizan de manera ordenada y no es habitual que se produzcan aglomeraciones de personas mientras se llevan a cabo. Sin embargo, en determinadas situaciones, como evacuaciones o movimiento de tropas a sus puntos de embarque, puede suceder que gran parte o todo el personal embarcado deba realizar un movimiento simultáneo por el buque. Es por ello que interesa realizar un estudio de esta casuística, para poder controlar y regular estas situaciones que pueden ser críticas para los buques y el personal embarcado en ellos.

2.1.1 Armada Española

Uno de los casos extremos que implican un máximo volumen de movimiento de personal es la evacuación de un buque. Los buques de guerra están expuestos a mayores peligros que los habituales buques de transporte y carga, por lo que es necesario por parte del personal embarcado un conocimiento exhaustivo de procedimientos de evacuación.

Para la dotación debe existir una premisa clara ante cualquier situación de emergencia, y es que la principal medida de actuación debe ser mantener intacto el buque o aislar de la mejor manera posible la zona afectada por el incidente. Esto parte del concepto básico y fundamental de que el buque en alta mar, aun estando aislado, es un lugar más seguro que un bote salvavidas [1].

Incluso teniendo estas directrices fundamentales fuertemente arraigadas en la dotación del buque, existen situaciones que implican un abandono del buque, momento en el cual los procedimientos de evacuación cobran vital importancia para la supervivencia del personal embarcado.

Frente a esto, la Armada Española posee normativas en forma de doctrina nacional e internacional que regulan los procesos de evacuación de sus buques. En este caso cobra especial relevancia la D-CP-09 (Doctrina de Control de Plataforma) denominada *Manual de doctrina de maniobra y navegación*. En ella se establece, en la Sección X “Procedimiento de abandono del buque”, que el Comandante del buque es el único con potestad para determinar el abandono del buque. Además, establece dos posibles maneras de abandono del buque:

- Abandono de emergencia.
- Abandono controlado.

Mientras en el primero, por la urgencia de la situación, todo el personal embarcado debe acudir con la mayor celeridad posible directamente a las embarcaciones de evacuación, en el segundo es

posible realizar una evacuación organizada, reuniendo al personal en diferentes puntos del buque para su comprobación y posteriormente embarcar en las balsas salvavidas. Aunque las dotaciones de los buques se adiestran en sus correspondientes planes de evacuación, el cual difiere para cada buque en función de sus medios y dimensionamiento, es tónica común que en los buques de Armada embarque personal ajeno a la propia dotación que solo posea conocimientos básicos de estos procedimientos de abandono o no esté siquiera familiarizado con ellos. Es el caso de los infantes de marina, cuyas causas son el desconocimiento del buque y bajo adiestramiento en los desplazamientos por él [2].

2.1.2 Regulación internacional

Debido a la dificultad de llevar a cabo ensayos con personal real, por el elevado coste en recursos que eso implica, cobran especial importancia las simulaciones de los diferentes casos a estudiar relacionados con el movimiento de personal a bordo de los buques españoles. Se busca la mayor utilidad de estas simulaciones para la Armada, la cual viene dada por una semejanza con la realidad lo más precisa posible. Los parámetros necesarios para llevar a cabo la simulación del movimiento de personal a bordo de buques vienen regulados por diferentes organismos internacionales. De estas normativas se extraerá todo aquello que suscite interés para este trabajo y que sea susceptible de beneficiar a la implementación de la simulación.

2.1.2.1 Circulares del Comité de Seguridad Marítima (MSC)

La Organización Marítima Internacional (OMI) es el máximo organismo de las Naciones Unidas responsable de regular los aspectos relativos a seguridad, protección y condiciones medioambientales que debe respetar el transporte marítimo internacional. [3]

Dentro del ámbito de la OMI se encuadra el Comité de Seguridad Marítima (MSC), encargado de las cuestiones relacionadas con la seguridad y protección de los buques de pasaje y transporte de carga.

Este Comité fue el responsable de la aprobación de la circular 1033 en el año 2002 titulada *Directrices provisionales para el análisis de la evacuación de los buques de pasaje nuevos y existentes*, siendo la primera norma reguladora de la evacuación de buques de esta organización. Esta circular fue modificada posteriormente por la circular 1238 en el año 2007 y por la circular 1533 en 2016, encontrándose esta última actualmente en vigencia [4].

En la norma actual se contemplan dos métodos alternativos para estudiar el movimiento del personal y la detección de zonas de congestión:

- Un método simplificado de la evacuación.
- Un método perfeccionado (basado en simulaciones digitales).

Estos métodos se encuentran en los Anexos 2 y 3 de la norma respectivamente. Previo a la definición de estos métodos, es necesario aclarar unos conceptos claves para el entendimiento de ellos:

- Tiempo de reacción(R): es el que tarda el personal en reaccionar y percatarse de la situación. Comienza con una notificación inicial (Ejemplo: llamada por órdenes generales del buque) y finaliza con la asimilación de la situación y comienzo del movimiento hacia su destino por parte del personal.
- Tiempo total de desplazamiento (T): tiempo que transcurre desde que las personas reaccionan a la notificación inicial hasta que llegan a sus puntos destinos (puntos de embarque).
- Tiempo de embarque (E) y puesta a flote (L): en conjunto forman el tiempo que tarda todo el personal implicado en subir a las balsas salvavidas y ser estas lanzadas al mar.

2.1.2.2 Método simplificado de movimiento

Para comenzar, se deben identificar en el sistema los puntos de reunión e identificar las vías de desplazamiento hacia ellos. Al ser este un modelo muy elemental, implica una serie de suposiciones para la correcta parametrización. Primeramente, el personal se moverá a la vez en su totalidad y

utilizará la ruta principal de movimiento hasta su punto de reunión. Además, se supone que el flujo de personas solo se produce en la dirección de la vía y que los medios de desembarco están todos disponibles. Por otro lado, las personas pueden desplazarse sin ninguna restricción (Ejemplo: obstáculos o personal de dotación) y se les aplicará un coeficiente para tener en consideración factores externos como la escora del buque o las características físicas de las diferentes personas [4].

Para realizar un correcto análisis se deben presentar como mínimo 4 casos diferentes, de los que el caso 1 será durante una navegación nocturna, el caso 2 en un tránsito diurno y los casos 3 y 4 se centrarán en la zona vertical del buque con mayor tránsito de personal. El caso 3 utilizará la misma población que el 1 y el caso 4 la misma que el 2. En estos dos últimos casos se debe añadir una alternativa de entre las dos siguientes:

- Considerar inutilizadas el 50% de las escalas de la zona vertical principal.
- Desplazar un 50% del personal de una zona vertical adyacente a la principal.

Para realizar el cálculo del tiempo total de movimiento, se deben considerar varios aspectos. En primer lugar, se dará un valor de 10 minutos al tiempo de reacción(R) de noche y de 5 minutos de día. Los tiempos de embarque (E) y lanzado (L) se calcularán a partir de pruebas reales realizadas en el buque o un sistema a escala, u otra opción es tomar los datos proporcionados por el fabricante. En el caso de que no pudiera conocerse este valor, se le daría uno de 30 minutos.

Los valores límite deben venir dados por las siguientes ecuaciones, donde $n=60$ minutos para buques *Roll On-Roll Off* (Ro-Ro) y resto de buques de transporte de pasajeros; y $n=80$ minutos para buques con más de tres zonas verticales principales.

$$1,25(R + T) + \frac{2}{3}(E + L) \leq n$$

$$E + L \leq 30min$$

La identificación de la congestión se puede realizar mediante dos criterios:

- Una densidad de personas igual o superior a 3,5 por metro cuadrado.
- La formación de una cola (acumulación de más de 1,5 personas/segundo entre un punto inicial de entrada y la salida).

Una vez realizado el análisis de la simulación, se debe generar una serie de documentación, entre la que debe encontrarse la disposición inicial del personal, los supuestos básicos utilizados para el análisis, una representación esquematizada de las zonas sometidas a análisis, método de análisis utilizado, cálculos, tiempo total final y determinación de los puntos de congestión.

En caso de que no se cumplan los requisitos establecidos y el tiempo total calculado es mayor al requerido, deben tomarse las medidas necesarias revisando los procedimientos y así evitar la congestión en los distintos puntos.

2.1.2.3 Método perfeccionado de movimiento

Este método persigue el mismo fin que el modo simplificado, sin embargo, se basa en experimentación computacional que permita relacionar cada individuo con el buque. Para ello, considera a cada persona como un ente individual con su propia caracterización específica diferente a la de todos los demás. Además de las suposiciones realizadas en el método simplificado, se debe añadir un coeficiente de corrección frente a posibles limitaciones del modelo computacional usado para la simulación. Se establecen 4 casos diferentes a estudiar [4]:

- Caso 1(durante la noche): todos los pasajeros y 2/3 de la dotación están en sus camarotes, del tercio restante: un 50% se comportarán como pasajeros, un 25% se encontrarán en sus puestos de emergencia y el resto se dirigirán a los camarotes de los pasajeros para posteriormente regresar a los puntos de evacuación.

- Caso 2(durante el día): 3/4 de los espacios comunes son ocupados por los pasajeros y la dotación se comportará como en el caso 1.
- Casos 3 y 4: tendrán las mismas consideraciones que en el método simplificado.

Centrado el estudio en cada uno de los individuos y dando a cada uno de ellos una representación propia, la toma de datos también debe ser individual y se debe realizar un seguimiento y registro a cada persona de manera particular. Sin embargo, las reglas que determinan los movimientos y decisiones deben ser comunes para todos, basadas en la parametrización en función de las categorías establecidas en la Tabla 2-1, así como la diferencia entre las reacciones entre dos individuos no debe superar el segundo.

Categoría	Incluye
Configuración	Vías de evacuación, obstáculos y distribución de pasajeros y dotación.
Personas a bordo	Parámetros y demografía.
Medio ambiente	Condiciones estáticas y dinámicas del buque.
Procedimientos	Miembros de la dotación dispuestos a prestar ayuda.

Tabla 2-1 Categorías de los parámetros del análisis perfeccionado de la evacuación [4].

Se considera que se produce congestión si:

- Se alcanza una densidad de cuatro personas por metro cuadrado durante un tiempo considerable.
- La congestión dura más de un 10% del tiempo de reunión establecido.

A la documentación a generar tras el análisis en el modelo simplificado se le deben añadir los documentos relativos a los algoritmos, los cuales deberán contener las variables utilizadas (ejemplo: velocidad de desplazamiento del personal), la relación entre ellas, el tipo de actualización (ejemplo: orden en el que se desplazan las personas), la proyección de los elementos geométricos y su influencia en el modelo y un manual de usuario del modelo utilizado.

En el caso de que las medidas sean negativas para el objetivo buscado, se realizarán las mismas correcciones que en el método simplificado.

2.2 Fuerza embarcada

La Armada española cuenta actualmente con una fuerza de Infantería de Marina que, junto con los tres buques con capacidades anfibas, le permite proyectar la fuerza en el litoral de cualquier costa del mundo. Este despliegue de fuerzas implica la creación de numerosa doctrina, tanto nacional como internacional, que regule cualquier tipo de acción que incluya fuerzas anfibas.

2.2.1 Buques anfibas en la Armada

Actualmente existen en la Armada tres buques con capacidad para embarcar una fuerza de Infantería de Marina. Estos buques son los buques de asalto anfibio (BAA's) L-51 Galicia y L-52 Castilla y el buque anfibio portaaviones Juan Carlos I.

2.2.1.1 Clase "Galicia"

Tras la firma de un acuerdo entre los gobiernos de España y Holanda para la creación de un nuevo buque anfibio en 1991, comenzaron los trabajos de construcción en 1995 y fueron entregados a la Armada el 29 de abril de 1998 el Galicia y el Castilla (Figura 2-1) el 26 de junio del año 2000 [5].



Figura 2-1 BAA Castilla [6].

Los buques de esta clase tienen como misión principal la participación en operaciones anfibias, lo que implica que su diseño está orientado a satisfacer las necesidades de estas operaciones y de las fuerzas de desembarco (FD) que puedan embarcar en ellos.

El Galicia tiene capacidad para albergar 185 personas de dotación y hasta 615 para transporte; y el Castilla, que actúa como plataforma de mando del Cuartel General Marítimo de Alta Disponibilidad que España pone al servicio de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN), es capaz de alojar hasta 767 personas, siendo de estas 195 de dotación.

En la Figura 2-2 aparece una de las principales características de estos buques, la existencia en ellos de un dique capaz de albergar hasta 4 embarcaciones LCM1-E (*Landing Craft Mechanized*), utilizadas para transportar las tropas embarcadas y sus vehículos desde los buques hasta tierra.



Figura 2-2 LCM1-E cargada con vehículos y personal en el dique del B.A.A Castilla [6].

Su eficacia en el despliegue de tropas ya ha sido ampliamente probada en numerosos despliegues en el extranjero, como en la Operación Libre Hidalgo en el Líbano en el año 2006 en apoyo a las Naciones Unidas, donde embarcó en el buque Galicia un Batallón Reforzado de Desembarco (BRD)

integrado por 490 infantes de marina, o el traslado hasta Haití de un Subgrupo Táctico (SGT) formado por 165 miembros a bordo del Castilla.

Esto muestra la importancia que tienen en el entorno de los conflictos actuales las operaciones anfibias, y como es clave un correcto ejercicio del mando y control de los contingentes embarcados, normalmente muy numerosos, para contribuir al éxito de la misión.

2.2.1.2 LHD “Juan Carlos I”

El buque multipropósito, con capacidad anfibia y aérea, Juan Carlos I (Figura 2-3), cuya terminología OTAN corresponde a *Landing Helicopter Dock* (LHD), es el buque insignia de la Armada Española y el mayor construido en España, será aquel en el que se centrará este trabajo para analizar el movimiento de las tropas embarcadas y los diferentes casos de evacuación [7].



Figura 2-3 LHD Juan Carlos I [6].

Como buque anfibio, es capaz de transportar a gran cantidad de personal, como se puede apreciar en la Tabla 2-2, entre la que se encuentra una fuerza de Infantería de Marina de gran entidad. Además de esto, el buque está preparado para operar como plataforma para la aviación embarcada, permitiendo así proyectar vectores aéreos estratégicamente [7].

	Oficiales Generales	Oficiales	Suboficiales	Marinería/Tropa	Total
Estado Mayor	1	26	18	39	84
Fuerza embarcada	1	96	104	808	1009
Total	2	122	122	847	1093
Dotación		38	76	226	340
Total	2	160	198	1073	1433

Tabla 2-2 Personal embarcable en el JCI [8].

Debido a su polivalencia, este buque se encuentra orientado a cuatro perfiles de misión diferentes:

- Como buque anfibio, permitiendo el desembarco de una Fuerza Expedicionaria y apoyando sus operaciones en tierra desde la mar.

- Como buque de transporte de unidades de cualquier ejército a teatros de operaciones, proyectando la fuerza en tierra.
- Como plataforma naval eventual para los vectores aéreos, tanto para ala fija como para ala rotativa.
- Como buque de operaciones de ayuda humanitaria, catástrofes naturales, buque-hospital, evacuación en zona de crisis y demás posibles actividades relacionadas con las operaciones denominadas “no bélicas”.

Es por la versatilidad de este buque para realizar cometidos tan variados que se ha elegido como modelo para este trabajo, ya que ofrece una extensa posibilidad de casos diferentes a evaluar, tanto en cuanto al personal embarcado y su disposición dentro del buque, como las acciones que estos realicen dentro de él; siendo todas ellas de relevante aplicación práctica en la actualidad.

2.2.2 *Naval Ship Code (NSC)*

Dentro de la normativa a nivel OTAN, existe una, cuya nomenclatura se corresponde con *Allied Naval Engineering Publication (ANEP-77)*, también conocida como *Naval Ship Code (NSC)* [9], que es la máxima referencia en cuanto a la seguridad tanto para mantener como para operar los buques de guerra. La norma hace referencia a las regulaciones civiles de la IMO y el Convenio SOLAS (convenio internacional para la seguridad de las vidas humanas en el mar, 1974) [10].

El NSC es aplicable a todos los buques de superficie, considerando estos todos aquellos que no posean propulsión nuclear, incluyendo buques de las fuerzas armadas, de guardacostas y cualquier departamento de defensa estatal. Sin embargo, es potestad de cada país decidir que requerimientos del NSC aceptar.

El Capítulo VII del NSC, denominado “Escape, Evacuación y Rescate (EER)”, se centra en todos los aspectos relacionados con el abandono de un buque. Este debe tener como fin el proporcionar escape a todo el personal embarcado en cualquier situación de emergencia mediante medios de evacuación y rescate efectivos.

Es por ello que, para realizar un modelo para el análisis y estudio de datos, este debe responder a una serie de aspectos de gran relevancia:

- Tener validez desde el comienzo hasta el fin del ciclo de vida del buque.
- Ser capaz de simular todos los supuestos operativos.
- Ser apto para considerar todas las posibles distribuciones de personal y tenerlas en cuenta en todo momento.
- Considerar averías previsibles.

Además, en su regla 1 establece los criterios generales que deben cumplir los elementos relacionados con la evacuación, destacando entre ellos:

- Permitir la evacuación de todas las personas embarcadas directamente a las estaciones de abandono del buque, sin que sea necesario agruparse en un punto de reunión previamente.
- Ser robustos y poseer la mínima posibilidad de sufrir errores. Es necesaria la existencia de redundancia frente a posibles fallos predecibles.
- No ser afectados por el armamento y los sensores.
- Buscar el mínimo riesgo de herir al personal durante el movimiento.
- No interrumpir a otras medidas de evacuación del buque.

Las particularidades de los buques de guerra, destinados para servir a diferentes misiones y propósitos, implican la participación en situaciones operativas muy diferentes. Esta variabilidad de las circunstancias en las que se pueden desenvolver estos buques lleva a una pluralidad de posible personal a embarcar en ellos. El Capítulo I del NSC recoge dos categorías principales de personal embarcable, tal y como muestra la Tabla 2-3, dividiendo la segunda en cinco tipos diferentes.

Categoría	Nombre	Tipo
A	Dotación	
B	Personal ajeno a la dotación	Fuerzas embarcadas
		Personal especial
		Personal herido
		Pasajeros y otros
		Personal transportado por emergencia

Tabla 2-3 Categorías de personal embarcable [9].

La más diferenciada es la categoría B, que incluye al personal no perteneciente a la dotación y que, por tanto, no participa en el gobierno y funcionamiento del buque.

De los cinco tipos de esta categoría, es de especial relevancia la diferenciación de las “fuerzas embarcadas”, las cuales no son parte de la dotación, pero sí que están relacionadas con el propósito que tiene el buque, además se les considera como personal en buena forma física y altamente disciplinado. En la Armada Española, estos contingentes de “fuerzas embarcadas”, materializados por la Fuerza de Infantería de Marina (FIM), tienen sentido en relación con los BAA’s y normalmente son muy numerosos, superando en gran medida a la dotación del propio buque. Aun considerando su buena condición física y a pesar de que poseen conocimientos básicos en EER, su nivel de preparación y conocimiento del buque es claramente mucho menor que el de la propia dotación. Acompañando a estas fuerzas para apoyarlas o dirigir las operaciones pueden embarcar desde Estados Mayores (EEMM) hasta una Unidad Aérea Embarcada (UNAEMB). [9]

Pertenecientes también a la Infantería de Marina, son destacables los Equipos Operativos de Seguridad (EOS’s) con funciones de protección del buque frente a posibles amenazas cercanas y llevar a cabo inspecciones en otras embarcaciones, encontrándose encuadrados estos dentro del grupo de “personal especial”, ya que, sin ser miembros de la dotación del buque tienen relación estrecha con los cometidos que este lleva a cabo. Por otro lado, dentro también de este grupo, se encuentran los Equipos de Operaciones Especiales o *Special Operations Task Units* (SOTU’s) con cometidos específicos que requieran tácticas, técnicas y procedimientos (TTP’s) diferentes al del resto de unidades. [11] [12]

Sin embargo, en el espectro actual en el que se desarrollan las operaciones en las que nuestra Armada toma parte, la proliferación de misiones con carácter humanitario con labores implícitas de ayuda, tanto en los países en conflicto como a personal en alta mar, lleva a destacar la relevancia que adquieren todos los individuos rescatados de embarcaciones relacionadas con el tráfico de personas en operaciones como la Operación Sophia. Este personal se encuentra dentro de la categoría de “personal transportado por emergencia” o “personal herido” en caso de necesitar atención médica.

El personal embarcable posee una serie de características que influirán en cómo se desenvuelven dentro del buque para el movimiento, tal y como se puede apreciar en la Figura 2-4.

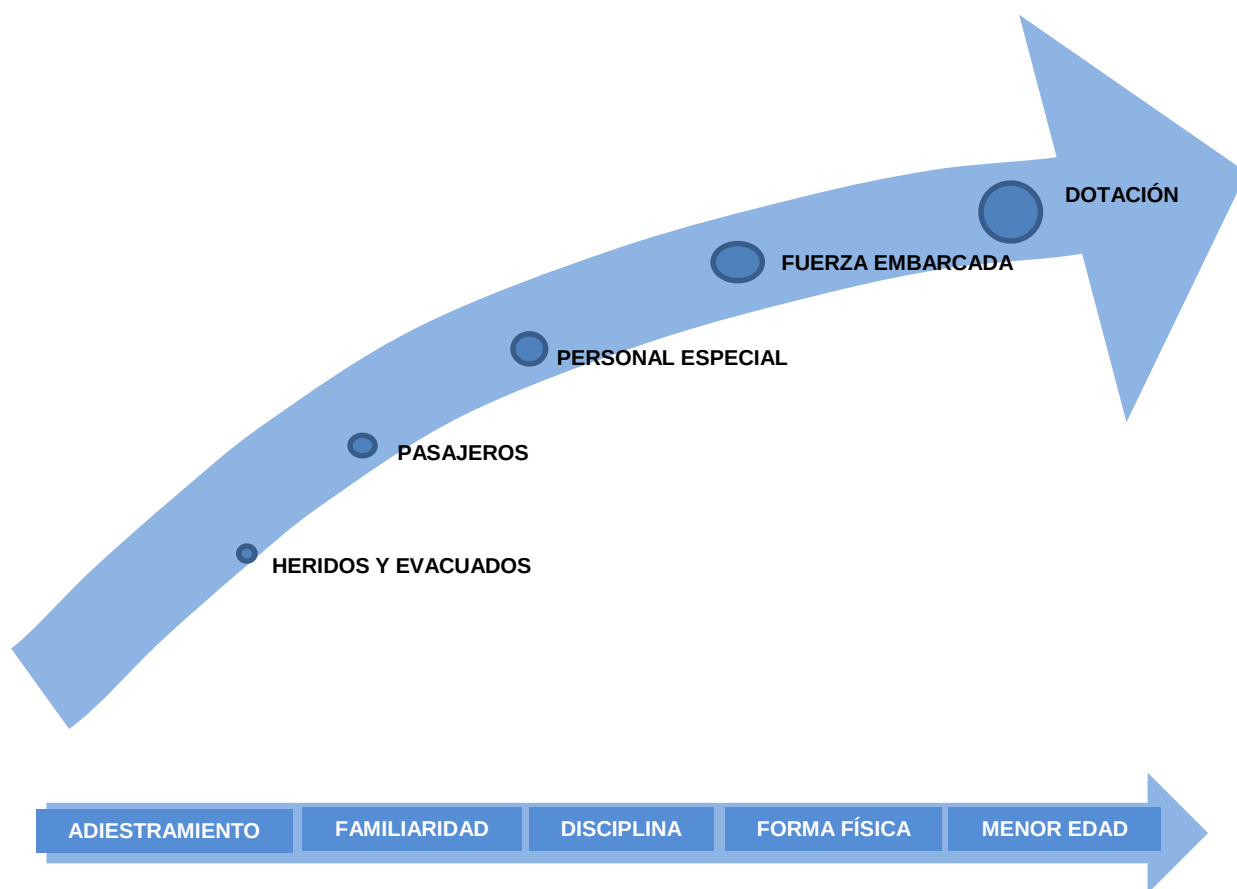


Figura 2-4 Características del personal embarcable con cada una de las categorías de este [32].

A la hora de llevar a cabo el análisis de la evacuación, el NSC considera, en la norma III del Capítulo VII, una serie de requisitos que son aplicables al movimiento de tropas y a la evacuación del buque:

- Simular condiciones de navegación normales.
- Simular posibles daños contemplados en el Concepto de Operación del buque, documento en el que se recogen los datos principales de un buque de manera que la administración o autoridad competente pueda comprender la naturaleza del mismo y, de esta manera, esté en condiciones de aceptar los requerimientos de empleo y sus soluciones.
- Representar el movimiento de personal de manera tan precisa como sea posible.

La extensión y alcance del análisis debe ser acorde al diseño y tamaño del buque así como al número de personas embarcadas; y se deben considerar como mínimo 6 escenarios diferentes (1, 2a, 2b, 3, 4ª, 4b) cuyas particularidades son recogidas en la Tabla 2-4.

	Situación	Población	Particularidades
Caso1	Estándar navegación nocturna	Acorde a las operaciones del buque	-
Caso 2a	Estándar navegación diurna	Acorde a las operaciones del buque	-
Caso 2b	Posible situación de acción	Acorde a las operaciones del buque	-
Caso 3	Variaciones en zona vertical principal	Igual Caso 1	Inutilizadas 50% escalas zona vertical principal 50% zona vertical vecina es forzada a desplazarse por la vertical principal
Caso 4a	Variaciones en zona vertical principal	Igual Caso 2a	Inutilizadas 50% escalas zona vertical principal 50% zona vertical vecina es forzada a desplazarse por la vertical principal
Caso 4b	Variaciones en zona vertical principal	Igual Caso 2b	Inutilizadas 50% escalas zona vertical principal 50% zona vertical vecina es forzada a desplazarse por la vertical principal

Tabla 2-4 Escenarios a ser considerados para el análisis y ensayos de escape y evacuación [9].

Una vez establecidas las diferentes situaciones de estudio y del personal embarcable, deben caracterizarse las rutas óptimas que estos deben seguir durante el movimiento. En la regla 16 del Capítulo VII se enumeran los requerimientos que deben tener las rutas por el interior de los buques para responder lo mejor posible a las necesidades del buque y su seguridad. A destacar entre estas características se encuentra la necesidad de que sean lo más flexible posibles para permitir el uso de rutas alternativas en caso de fuegos, humos o cualquier otro daño; tener en cuenta el posible número de personal embarcable; sus características físicas, su distribución; y permitir los desplazamientos de personal con equipo individual (como puede ser el equipo básico del combatiente, formado por chaleco y mochila de combate o logística, fusil y casco).

2.2.3 Organización de la Fuerza para el desembarco

Todos los conceptos que aparecen en este apartado vienen reflejados en la ATP-08(D) (*Allied Tactical Publication*) volumen I *Doctrine for Amphibious Operations*, doctrina de la OTAN sin clasificar [13].

Para comenzar, es necesario definir qué es una Operación Anfibia, marco operacional donde se encuadra el movimiento de tropas en los buques previo al desembarco. Esto es “una operación militar lanzada desde la mar por fuerzas navales (FN) y fuerzas de desembarco(FD), embarcadas en buques o embarcaciones, con el propósito principal de proyectar tácticamente la FD en tierra en un ambiente que puede variar desde permisivo a hostil”. [13]

Las operaciones anfibias son las operaciones más complejas de realizar, deben integrar tanto FN como FD, lo que implica una coordinación en el planeamiento y desarrollo de las operaciones muy difícil de conseguir. Las características de las operaciones anfibias son las siguientes:

- Integración entre FN y FD.

- Organización operativa basada en la misión.
- Unidad de esfuerzo y coherencia operacional.
- Obtener y mantener acceso en el área operacional.

En cuanto a la organización de las fuerzas, existen tres conceptos diferentes:

- Fuerza Anfibia: una FN y FD, con sus fuerzas de apoyo, que están entrenadas, organizadas y equipadas para operaciones anfibias (Ejemplo: Fuerza de combate de superficie (FUCOM) de la Armada Española).
- Fuerza Anfibia Operativa (FAO): organización operativa formada con el propósito de realizar una Operación Anfibia y que siempre incluye FN y FD, con su aviación orgánica (Ejemplo: buques y tropas embarcadas participantes en el desembarco en Líbano en 2006).
- Fuerza de Desembarco (FD): organización operativa de las fuerzas encargadas de realizar el desembarco y posteriores operaciones en tierra asignadas a una Operación Anfibia (Ejemplo: los 490 infantes de marina que desembarcaron en Líbano).

Centrándonos en la Fuerza de Desembarco, esta a su vez puede adoptar las siguientes organizaciones:

- Organización Táctica Básica: es la organización de la FD para el combate en tierra.
- Organización para el Desembarco: organización para el movimiento de tropas durante el movimiento buque-costa (MBC).
- Organización para el embarque: organización de la FD para embarcar en los buques y realizar el movimiento a la Zona de Operaciones Anfibia (ZOA).

El MBC consiste en el traslado de la FD desde los buques de asalto hasta las zonas asignadas en tierra en la secuencia y momento establecidos para apoyar la maniobra de la FD en tierra. Para este trabajo, de estas organizaciones, la que más interesa es la Organización para el Desembarco. La secuencia de este movimiento es la siguiente [14]:

- Transbordo de tropas y equipos entre buques.
- Reunión buques de desembarco, embarcaciones, AAV's, helicópteros y formación de olas.
- Transbordo de tropas y equipos a medios de desembarco.
- Desembarco de tropas de asalto, apoyo de combate y apoyo de servicios de combate.
- Descarga y desembarco de los restantes elementos y suministros.

Todas estas etapas implican un complejo desplazamiento de personal a bordo de los buques, desde sus sollados hasta los puntos de embarque en sus correspondientes medios de desembarco. Este movimiento sigue una secuencia ordenada y planeada acorde a las operaciones que va a realizar la FD en tierra. Debido a la especial relación de este trabajo con la Infantería de Marina, es relevante aclarar determinados conceptos relacionados con la secuencia de desembarco que llevan a cabo las tropas.

La FD puede realizar el MBC mediante medios de superficie, medios aéreos o una combinación de ambos, lo que influirá en la cantidad de personal que desembarcará en cada momento. Además, estos medios pueden ser lanzados desde más allá del horizonte, en proximidades de la costa o de manera conjunta. Este lanzamiento de medios comienza cuando el Comandante de la Fuerza Anfibia Operativa (CFAO) da la orden de “desembarcar la FD”; y finaliza cuando se ha producido el desembarco de los elementos de asalto, apoyo de combate, apoyo de servicios de combate y el resto de los suministros.

La duración de cada transporte realizado por los diferentes medios dependerá de la distancia a la playa y el tiempo de encuentro entre embarcaciones o helicópteros.

En el caso de las embarcaciones de superficie, las LCM1-E, se reunirán en círculos de espera en las inmediaciones de los buques llamados *Rendezvous Point* (R/V), desde donde partirán a la Línea de partida (LOD) al recibir la orden y, una vez cruzada esta, se dirigirán hacia la playa asignada a través del canal establecido, adquiriendo a 500 yardas de la playa la velocidad de combate para realizar la

varada. Asimismo, el transporte de vehículos, material y suministros a bordo lleva asociadas una serie de medidas encaminadas a la seguridad como son el trincado y destrincado, así como el correcto estibado dentro de los medios de transporte. La publicación española D-AF-01(B) *Manual de procedimientos anfibios* establece una relación de tiempos de carga y descarga de vehículos en una LCM1-E en función del número de vehículos, si estos llevan remolques, el lugar y momento en el que se realice el trincado y si éste se realiza para carga o descarga, todo ello contenido en la Tabla 2-5.

	Maniobras en dique				Maniobras en playa			
Maniobra de carga		1	2 vehículos	2 vehículos +remolque		Un vehículo	Dos vehículos	Dos vehículos +remolque
	Trincado antes de salir del dique	10'	20'	25'	Trincado antes de salir de varada	12'	22'	27'
	Trincado después de salir del dique	5'	10'	15'	Trincado después de salir de varada	7'	12'	17'
Maniobra de descarga	Destrincado después de entrar en dique	4'	8'	10'	Destrincado después de varar	4'	8'	10'
	Destrincado antes de entrar en dique	2'	4'	5'	Destrincado antes de varar	2'	4'	5'

Tabla 2-5 Tiempos aproximados de carga/descarga en una LCM1 [14].

Otro aspecto reseñable, derivado de las posibilidades de cargar tanto material, vehículos o personal, es la capacidad de poder llevar a tierra distintas configuraciones de estos tres factores en función de la maniobra en tierra que se pretenda realizar. Es por ello que existen una serie de normas de seguridad que determinan las posibles configuraciones dado el tamaño limitado de las LCM1-E:

- Un carro de combate (tipo M88A/M60/ Leopard).
- Dos camiones pesados con remolque (tipo 10 Toneladas (T)).
- Seis vehículos tipo Hummer.
- Dos obuses ATP M-109 o un obús M-109 y un FAASV (M992).
- Dos vehículos anfibios (Piranha/AAV).
- Una compañía de fusiles (máximo 170 hombres con su equipo personal).
- Un camión tipo medio con contenedor estándar (6 metros y hasta 20 T).

La Tabla 2-6 muestra las posibles configuraciones que pueden realizarse dentro de una LCM1-E, señalando en color verde las combinaciones posibles, y en rojo aquellas que no pueden llevarse a cabo; y la Figura 2-5 presenta de manera gráfica algunas de estas posibles combinaciones de los vehículos dentro de ellas.

	1 HUMMER (H)	2 HUMMER (H)	3 HUMMER (H)	4 HUMMER (H)	OBUS 155 (OAP)	FAASV (OAM)	AAV (AAV)	M 60	PIRANHA A (VCI)	PIRANHA A ZAP (VCZ)	PIRANHA A EW (VCE)	IVECO 5 TNS (CAM)	IVECO 10 TNS (CAP)
1 HUMMER (H)	S	S	S	S (2)	S	S	S	N	S	S	S (1)	S	S
2 HUMMER (H)	S	S	S (2)	S (2)	S	S	S	N	S	S	S (1)	S	S
3 HUMMER (H)	S	S (2)	S (2)	N	N	S	S	N	S	N	S(3)	S	S
4 HUMMER (H)	S (2)	S (2)	N	N	N	S (2)	N	N	S (2)	N	S (2,3)	S (2)	N
OBUS 155 (OAP)	S	S	N	N	S	S	S	N	S	S	S(4)	S(4)	S(4)
FAASV (OAM)	S	S	S	S (2)	S	S	S	N	S	S	S(1)	S(4)	S(4)
AAV (AAV)	S	S	S	N	S	S	S	N	S	S	S(1)	S(4)	S(4)
M 60	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PIRANHA (VCI)	S	S	S	S (2)	S	S	S	N	S	S	S(1)	S	S

Tabla 2-6 Configuración de carga de una LCM1-E para vehículos sin remolque [14].

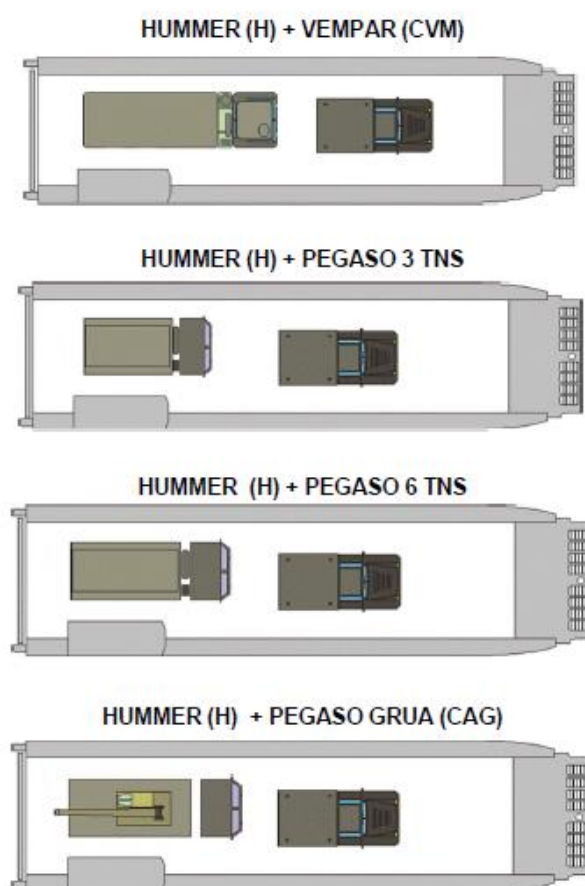


Figura 2-5 Ejemplo de diagrama de configuración de carga de una LCM1-E [14].

En cuanto al transporte realizado vía helicóptero, los que se encuentran en un mismo buque se reunirán en primer lugar en un punto de reunión en las inmediaciones de este para, posteriormente, dirigirse a un R/V común entre los helicópteros de los distintos buques, desde donde se encaminarán a las diferentes *Landing Zones* (L/Z) o zonas de aterrizaje para, inmediatamente después de descargar,

volver al buque para recoger nuevo personal, tal como se observa en la Figura 2-6, y llevar a cabo otra misión.



Figura 2-6 Embarque de infantes de marina en un SH-3D a bordo del JCI [6].

Debido a la necesidad de coordinar todos estos medios y personal, tanto navales como de la FD, surgen unos órganos de control del MBC. En la parte naval se crea el Grupo de Control Naval para los movimientos de superficie, y el Grupo de Control Aerotáctico para los desplazamientos de helicópteros. Por el contrario, la FD establece tres órganos de control con cometidos diferentes [14]:

- Grupo TAGLOG.
- Elemento de Apoyo al Desembarco (EAD).
- Elemento de Apoyo a helicópteros (EAH).

El TAGLOG se encarga de establecer el enlace entre la FD y la FN, además de recomendar los cambios que sean necesarios para satisfacer las necesidades de la FD en tierra. El EAD y el EAH se encargan de proporcionar el apoyo logístico y los puntos de toma y varada iniciales.

Finalmente, el MBC se divide en dos etapas:

1. Descarga táctica: periodo en el que desembarca el primer escalón de asalto y tienen prioridad las consideraciones tácticas. La descarga debe ser flexible para poder ajustarse a la maniobra de las unidades en tierra, cambiante frente a las reacciones del enemigo y el ambiente.
2. Descarga general: descarga de todos los suministros necesarios para que la FD continúe con sus operaciones en tierra. Comienza una vez desembarcado todo el primer escalón de asalto y finaliza con el resto de elementos en tierra. Tiene un carácter eminentemente logístico.

Para el desembarco se organiza al personal en equipos de embarcación o equipos de helicóptero. Cada uno de estos equipos forma parte de una serie, que es un “conjunto de unidades de tropas y su material, embarcados en un mismo buque y que, por razones tácticas o logísticas, desembarcan en una misma playa aproximadamente a la misma hora”. El personal designado para cada serie realizará movimientos simultáneos dentro del buque, separados en equipos de embarcación o equipos de helicóptero, para dirigirse a sus correspondientes medios de desembarco. Estas series forman parte a su vez de olas, que son un “conjunto de series que desembarcan en la misma playa a la misma hora” [13].

Esta clasificación anterior es de gran transcendencia, debido a que es la que señala cuándo y quién debe moverse dentro del buque para realizarse a sus puntos de embarque en función del medio de desembarco a utilizar. Además, para la distribución del personal dentro del buque se busca mantener la integridad de las unidades, de manera que cuando estas sean llamadas para el desembarco realicen el movimiento desde el mismo lugar o lugares cercanos, evitando así desplazamientos por zonas del buque diferentes.

Respecto a las olas, se pueden clasificar en tres tipos:

- Olas de horario fijo: poseen un horario previsto y unos lugares de desembarco asignados.
- Olas a la orden: su activación depende de un desarrollo táctico.
- Unidades sin horario: su desembarco comienza tras la finalización del desembarco de las olas de horario fijo.

Es por esta clasificación que el movimiento de tropas en el buque estará condicionado a la situación táctica, en función del tipo de ola que vaya a realizar el desembarco en la playa. Las primeras suelen ser de horario fijo y buscan establecer la máxima potencia de combate en tierra en el menor tiempo posible, por lo que serán la principal causa del movimiento de personal embarcado perteneciente a las unidades de combate de primer escalón; las olas a la orden acostumbran a incluir a la reserva, para ser empleada cuando se la requiera, o a los EEMM de las unidades; y las unidades sin horario habitan a estar formadas por unidades de carácter logístico que permitan continuar las acciones de la FD en tierra.

2.3 Proceso de simulación

2.3.1 Modelos de simulación del movimiento de personal

Tras demostrar la vigencia e importancia del movimiento de personal a bordo de los buques, especialmente en situaciones de evacuación o durante la realización de Operaciones Anfibias, se hace necesario evaluar estos movimientos. Una manera eficiente de hacer esto es mediante programas informáticos. Estos programas aportan numerosas ventajas [1]:

- Permiten evaluar un gran número supuestos.
- Evitan el empleo del personal de la fuerza, pudiendo destinarse este a otras labores.
- No es necesario la elaboración de prototipos o diseño experimental, suponiendo así un elevado ahorro económico, dadas las dimensiones de los escenarios navales.
- Gran veracidad en las soluciones, debido a la posibilidad de implementar una amplia variedad y cantidad de parámetros diferentes.

El análisis del movimiento de personal se puede tratar de tres maneras: mediante un macro-modelo, un micro-modelo o una combinación de ambos.

El primero supone que se dan una serie de situaciones ideales y estudia al conjunto como un todo, sin particularizar en el comportamiento de los individuos.

El segundo representa a cada persona de manera independiente, asignándole una serie de parámetros, conductas y comportamientos que varían entre ellas, y registra el movimiento de cada individuo de manera independiente. Este sistema permite hacer frente a entornos complejos donde las relaciones de los individuos entre ellos y el entorno son de especial relevancia.

Los modelos intermedios entre ambos, denominados meso-modelos, utilizan para los cálculos de velocidad el macro-modelo y muestran los resultados mediante el micro-modelo.

El presente trabajo se centrará en el micro-modelo para simular el movimiento en el buque.

En el micro-modelo o simulación basada en agentes, que comenzó a utilizarse a partir del año 2000, los agentes poseen las siguientes características [15]:

- Autonomía: los parámetros que poseen determinan el comportamiento que tienen, lo que les otorga cierto grado de autonomía frente al controlador central.
- Reactividad: tienen la capacidad de responder a cambios en el entorno y responder a ellos si es necesario.
- Habilidad social: son capaces de interactuar entre sí.
- Adaptabilidad: mediante la experiencia, son capaces de adecuar sus comportamientos a las diferentes situaciones.

Una ejemplificación de estos agentes son las células autómatas, muy generalizados en micro-modelos de simulación de movimiento de personal, cuyo comportamiento se ve afectado por el ambiente, como la escora del buque u obstáculos.

2.3.2 Movimiento “Pedestre”

Aunque las personas poseen preferencias, deseos y destinos individuales; es posible predecir la dinámica de grupos de personas en entornos abiertos o cerrados. Las personas pueden moverse libremente únicamente en espacios con poca densidad de viandantes, en el resto de casos su movimiento es condicionado por la interacción repulsiva con otras, dando lugar al fenómeno de auto-organización. Puede parecer que el comportamiento humano es caótico, esto solo es así en determinadas situaciones complejas, sin embargo, en situaciones estándar, los individuos no toman decisiones complicadas, prefieren aplicar una estrategia optimizada de comportamiento aprendida a lo largo del tiempo mediante ensayo y error. Un símil que ejemplifica este concepto es la conducta de un conductor con experiencia que reacciona automáticamente frente a las diferentes situaciones de tráfico, sin centrarse en pensar detalladamente en las acciones a realizar para ello. [16]

Es debido a esto que surgen los programas de simulación del movimiento de personal, como consecuencia de la utilidad que tiene el poder estimar de manera altamente precisa como se comportarán determinados grupos o flujos de personas. La utilización de los datos obtenidos en estos programas, tienen provecho para campos tan variados que van desde la arquitectura, estaciones de metro y aeropuertos, como para la realización de planes de evacuación avanzados. Es el software relacionado con este último empleo el que se utilizará para la realización de este TFG.

2.3.2.1 Softwares de evacuación

Actualmente existe gran variedad de software de simulación de evacuación, siendo los más destacados los siguientes:

2.3.2.1.1 FDS + EVAC:

Fire Dynamic System and Evacuation es desarrollado por el *Technical Research Centre* de Finlandia. Está basado en el modelo de fuerza social y permite realizar de manera simultánea la simulación de la evacuación junto con fuego. Trata a cada agente como una identidad única, con sus propias características y estrategias de escape, y su movimiento es simulado mediante planos 2D que representan los diferentes pisos de los edificios.

Sus principales ventajas son el hecho de ser un software gratuito y abierto, la interacción de los agentes con el fuego y el humo generado de este, que les puede hacer escoger diferentes rutas de escape, y posibilidad de interacciones entre los miembros de un grupo. Como inconvenientes, es poco adecuado para escenarios complejos, requiere un elevado trabajo computacional y existe poca documentación relacionada con las últimas versiones. [17] [18]

2.3.2.1.2 Building Exodus

Creado por el *Fire Safety Engineering Group*, perteneciente a la Universidad de Greenwich, permite la interacción entre agentes, con el espacio en que se desenvuelven y con el fuego. Además, posee una versión llamada *Exodus Maritime*, orientada a los requerimientos de la evacuación de

buques de guerra, teniendo en cuenta parámetros como la escora del buque, el tiempo de reacción de las personas ante la situación de escape o el tiempo de preparación de los botes salvavidas.

Se encuentra en constante desarrollo, existen gran cantidad de trabajos para utilizar como referencia y permite simular entornos complejos. Sin embargo, posee un precio de adquisición muy elevado. [17] [19]

2.3.2.1.3 STEPS

Implementado por Mott McDonald, es uno de los más utilizados del mercado, es capaz de realizar simulaciones en un espacio 3D, permite la interacción de los agentes con vehículos, así como con el fuego, y la simulación de escenarios complejos, aunque no admite la elección de la salida en función del humo existente. Permite interactuar con otros programas como FDS. [17] [20]

2.3.2.1.4 Simulex

Propiedad de la empresa IES, permite definir edificios y sus ocupantes y simular como se mueven por él, tanto en situaciones diarias como en una evacuación de emergencia. Además, puede evaluar rutas de evacuación alternativas en situaciones con fuego, trabajar en escenarios en 3D, mantiene la precisión incluso en modelos muy complejos y es capaz de proponer soluciones a problemas identificados tras analizar el comportamiento de los ocupantes.

Posee un tiempo de computación muy rápido y es uno de los programas más utilizados, por lo que existen numerosos casos de referencia. En contra, no permite la interacción con fuego y es de elevado coste. [17] [21]

2.3.2.1.5 Pathfinder

Es el software utilizado en el presente TFG, en su versión de 2018. Ha sido desarrollado por la empresa Thunderhead Engenieering y permite realizar simulaciones avanzadas de evacuaciones. Este simulador incluye una interfaz para el usuario y resultados animados de alta calidad en 3D. Entre las diferentes funcionalidades que ofrece, las más destacables son las siguientes [17] [22]:

- Permite importar archivos en formato DXF y DWG de AutoCAD. En el caso de tener un modelo previo o planos del proyecto a realizar, estos pueden ser importados en GIF, JPG o PNG.
- Utiliza una malla triangular para modelar la geometría, lo que facilita el movimiento de las personas por la simulación y le proporciona una mayor precisión a esta.
- Posee dos modos de simulación: *Steering*, en el cual los agentes se dirigen de manera independiente a sus objetivos, evitando al resto de agentes y obstáculos, pero donde no se tienen en cuenta los flujos a través de las puertas; y *SFPE*, el cual permite dar unos valores de control de flujo en función de la densidad de agentes y poner limitaciones de flujo en las puertas, aunque no previene la presencia de varios agentes ocupando el mismo espacio.
- Los agentes seleccionan su camino hasta la salida mediante la asignación de valores a parámetros como la duración de las colas en cada habitación, el tiempo de movimiento hasta cada una de las puertas, el tiempo desde cada puerta de la habitación hasta la salida final y la distancia recorrida. Además, a cada agente o grupo de agentes se le puede asociar un comportamiento y un perfil que les permitan tomar decisiones dinámicas durante la simulación.
- Incluye modelos de personas en 3D que representan gran variedad de edades, culturas y vestimentas que permite realizar una simulación acorde al grupo o grupos de interés.
- Es posible formar grupos que se busquen entre ellos y que se mantengan a cortas distancias.
- Proporciona numerosas ayudas visuales para conocer los resultados mediante tonos de colores, rangos de valores, tablas y diagramas.

- Es capaz de incluir ascensores, a los cuales se les puede establecer el orden de recogida por los diferentes pisos, a la vez que escaleras y rampas.
- Permite la utilización de una licencia de prueba gratuita de 30 días.

Sus principales desventajas son la imposibilidad de interacción entre los agentes y fuego, la escasez de trabajos de referencia, debido a que es un modelo relativamente nuevo, y su alto coste.

En cuanto a su funcionamiento, Pathfinder utiliza un algoritmo asociado a cada uno de sus agentes de manera individual para la selección de rutas a seguir por cada uno de ellos. [23]

El algoritmo es llamado Locally Quickest y permite al agente seleccionar una puerta de salida en la habitación en la que se encuentre. Para la selección de la puerta, el agente evalúa las posibles rutas de salida, calculando un tiempo estimado para cada una de ellas mediante otro algoritmo llamado A star, que utiliza la distancia a la puerta y la velocidad del agente para proporcionar un valor para este tiempo sin tener en cuenta la formación de colas. A su vez, el agente realiza el cálculo del tiempo de movimiento local. Para ello utiliza el almacenamiento de los datos relativos a cuántos agentes se encuentran esperando para salir por una determinada puerta y, mediante estimaciones de flujo, conocer el tiempo de espera para salir por ella. Finalizados ambos cálculos, el agente compara el tiempo de la ruta de salida hacia una puerta más corto con el tiempo que pasará en la cola de esa puerta, concluyendo que el tiempo que tardará en salir de la habitación por ella es el más alto de esos dos. Realizando esta comparación para cada una de las puertas disponibles, el agente seleccionará el menor de todos ellos.

Para prevenir que los agentes vuelvan a entrar en una habitación al encontrarse una zona muy congestionada, el algoritmo posee dos normas a seguir cuando se valora la selección de la puerta de salida:

- Las puertas disponibles deben encontrarse más cerca del destino del agente que aquella de la que proviene.
- Las puertas de la nueva habitación no deben conducir a la ocupada previamente por el agente.
- Retroceder está permitido y todas las puertas son válidas para ser utilizadas si los dos criterios anteriores eliminan todas las posibilidades de salida del agente o si este falla en la selección de la puerta.

El tiempo que pasan los agentes esperando en colas o en movimiento hacia las salidas tiene una gran influencia en los resultados finales de la simulación a realizar.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Desarrollo de la simulación

3.1.1 Situación real

Para asemejar al máximo la simulación a la realidad y que, de esta manera, los resultados sean de verdadera aplicación a casos reales, se ha basado este TFG en el ejercicio anfibio llamado GRUFLEX 18, uno de los ejercicios más importantes que la Armada realiza anualmente, llevado a cabo entre el 7 y el 23 de noviembre de 2018. Contó con la participación de más de 3.000 militares españoles, además de unidades portuguesas, italianas y americanas. En este ejercicio tomaron parte 8 buques (entre ellos el JCI), 1 submarino, 25 aeronaves y más de 150 vehículos. Se dividió en dos fases, una primera en aguas de las Islas Canarias, en los campos militares de tiro de la Isleta y Pájara; y una segunda en el golfo de Cádiz y el campo de adiestramiento de la Sierra del Retén.

Para la realización del presente TFG se han utilizado los datos y documentos relacionados con las tropas embarcadas de Infantería de Marina en el buque JCI relativos al asalto anfibio llevado a cabo durante la segunda fase de estas maniobras.

3.1.2 Información de la que se dispone

La realización de cualquier maniobra o caso real que implique embarque y desembarco de tropas desde un buque anfibio lleva implícito el desarrollo de determinados documentos que permitan y faciliten la organización de la fuerza y su control. Algunos de estos documentos han sido necesarios para la correcta implementación de la simulación del movimiento de tropas, siendo proporcionados por diferentes oficiales participantes en el ejercicio GRUFLEX 18.

Uno de los documentos fundamentales para permitir la consecución de este trabajo es el *Cuaderno de características del buque*, donde se recogen las características generales del buque, sus capacidades de almacenaje, carga y descarga, los procedimientos de embarque y desembarque establecidos, los alojamientos disponibles para personal embarcable y la dotación, determina los espacios destinados para trabajos de la fuerza embarcada, las limitaciones en cuanto a espacio para la carga y establece las necesidades de personal de refuerzo en función del número de personas embarcadas [8].

Dentro de este cuaderno, un dato importante es la localización de los puntos de reunión de la FD cuando son llamados a series, tanto de helicópteros como medios de superficie. Para ello se dispone que el personal se encontrará atento a su serie y, una vez llamada esta, se dirigirá a una zona de espera para reunirse (normalmente al comedor de tropa situado en la cubierta 2. Una vez reunida la serie se dirigirá al completo a la zona de espera rotulada en el garaje de carga pesada (GCP) para el

- GEBRIMAR: en base al Estado Mayor (EM) de la Brigada de Infantería de Marina (BRIMAR).
- LEÓN: se refiere al Batallón Reforzado de Desembarco (BRD), denominación que se le da a un Batallón de Infantería de Marina cuando cuenta en su organización operativa con unidades ajenas a su organización orgánica, cuya unidad principal es el Primer Batallón de Desembarco (BD-1).
- MARTE: formada por unidades de apoyo de servicios de combate del Batallón de Cuartel General (BCG).
- ÁGUILA: compuesta de unidades de reconocimiento, inteligencia y desactivación de explosivos.
- HALCÓN: constituida por el Grupo de Artillería de Desembarco (GAD).
- PELÍCANO: integrada por personal del Grupo de Apoyo de Servicios de Combate (GASC).

			EQUIPO DE EMBARQUE														
			GB	COR	TCOL	COMTE	CAP	TTE	SBMY	STTE	BGDA	SGTO1*	SGTO	CB01*	CB0	SD0	TOTAL
BRIMAR	EM	GEBRIMAR															
BDE-1	PLMM	LEON															
	SVS																
	COM'S																
	SERECO																
	2ª CIA																
	3ª CIA																
	AMP																
	SPICZ																
	M-81																
	ACAF-FSCC																
	EMBAS																
	TP AUTO (GASC)																
	SANIDAD																
BCG	CIA CG	MARTE															
	CIA COM'S																
	TP AUTO (GASC)																
	EAI	AGUILA															
	CIA IS																
SEDEX																	
TAR																	
GAD	GAD	HALCON															
GASC	CIA OMP	PELICANO															
	CIA PLANA																
	MANTTO																
	APVTO																
	TP AUTO.																
	SANIDAD																
UND EXT.	PORT.	LEON															
	USMC																
TOTAL																	

Tabla 3-1 Equipo de Embarque del JCI para el ejercicio GRUFLEX-18.

Una vez conocido el total de personal a embarcar a bordo del buque, el Oficial de Embarque elabora otro documento, en conjunción con las indicaciones de los encargados de la dotación del buque, donde refleja el reparto de todo el personal a embarcar en los diferentes sollados del buque, tal y como muestra la Tabla 3-2. El documento incluye el número del sollado, el primer apellido del individuo, la unidad orgánica y operativa a la que pertenece, la unidad subordinada de la que forma parte, el buque en el que está embarcado y se indica el personal femenino. Este reparto se confecciona dependiendo del rango y la disponibilidad de los sollados y tiene un papel fundamental en el

movimiento de las tropas, siendo uno de los más influyentes factores en los desplazamientos por el interior del buque, tanto en la selección de rutas como en los tiempos de movimiento.

ALOJAMIENTO	N°	COD	EMP	1APELLIDO	U. ORGANICA	U. OPERATIVA	CIA/SECC/DTO/EQ/PN	BUQUE	N.º ESC.
GENERAL FD	1	1	GB	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	1807
DOTACIÓN	2	2	COR	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	1820
O-223	3	3	TCOL	XXX	BD-I	LEON		JCI	1884
O-203	4	3	TCOL	XXX	GRUMA	GEBRIMAR		JCI	1896
	5	3	TCOL	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	1902
O-204	6	3	TCOL	XXX	BCG	MARTE	CIA CG	JCI	1905
	7	3	TCOL	XXX	GASC	PELICANO	CIA PLM	JCI	1909
O-215	8	4	CTE	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	1969
	9	4	CTE	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	1971
O-222	10	4	CTE	XXX	GASC	PELICANO	CIA PLM	JCI	1972
	11	4	CTE	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	1975
O-216	12	4	CTE	XXX	GAD	GEBRIMAR		JCI	1982
	13	4	CTE	XXX	BD-I	LEON		JCI	2006
O-214	14	4	CTE	XXX	BCG	GEBRIMAR		JCI	2007
	15	4	CTE	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	2013
O-207	16	4	CTE	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	2022
	17	4	CTE	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	2036
O-202	18	4	CTE	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	EXTRAN JEROS
	19	5	CAP	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	
O-211	21	5	CAP	XXX	BCG	MARTE	CIA CG	JCI	2050
	22	5	CAP	XXX	GASC	PELICANO	CIA PLM	JCI	2051
O-218	20	5	CAP	XXX	GASC	PELICANO	DEST MANTTO	JCI	2049
	23	5	CAP	XXX	BCG	MARTE	CIA COM'S	JCI	2054
O-210	24	5	CAP	XXX	GAD	GEBRIMAR		JCI	2059
	25	5	CAP	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	2064
O-221	26	5	CAP	XXX	MEM	GEBRIMAR		JCI	2073
	27	5	CAP	XXX	BD-I	LEON		JCI	2074

Tabla 3-2 Extracto del reparto de camarotes en el JCI para el ejercicio GRUFLEX-18.

Por último, sabiendo el reparto de los infantes de marina en el buque, es fundamental conocer la secuencia que van a seguir al desembarcar, que condicionará los momentos de mayor densidad de movimiento de tropas en el buque. Para ello, los documentos utilizados son el *Helicopter Employment and Assault Landing Table* (HEALT) y el *Assault Schedule*. En estos documentos se establece la composición de cada una de las olas (series que la integran), su número asignado y la unidad a la que pertenece el personal a desembarcar, su destino, tipo helicóptero o medio de superficie y la hora de salida del buque y de llegada a su objetivo, que puede ser a determinar (TBD) o establecida, según se observa en la Tabla 3-3.

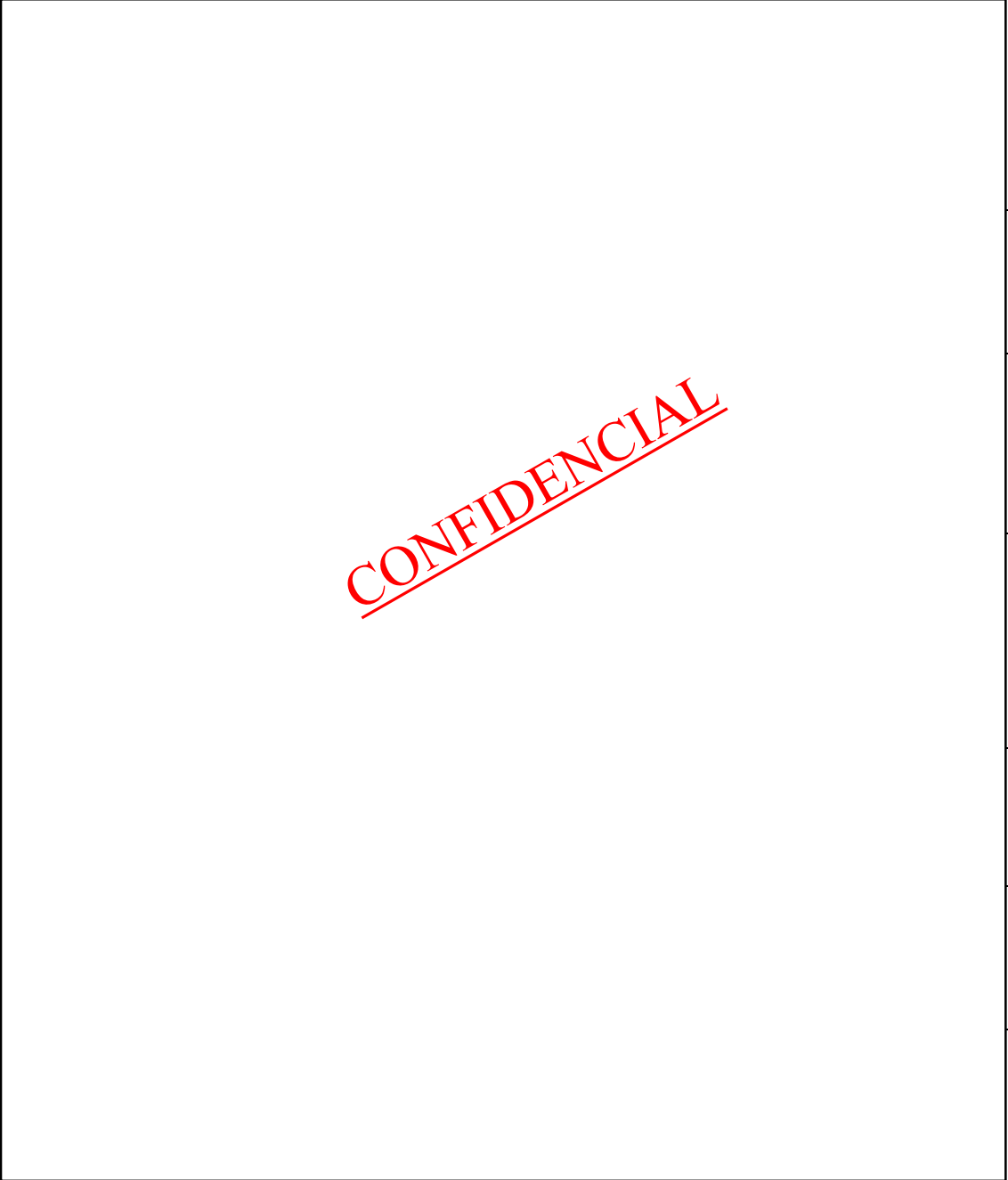
ASSAULT SCHEDULE								
SCHEDULED WAVES	LCM	UNITS	ELEMENT	SERIAL	CARRIER TYPE	PARENT SHIP	BEACH	REMARKS
OLA1 PRECARGADA POPA								
OLA1 PRECARGADA PROA								
OLA2								
OLA2								
OLA3								

Tabla 3-3 Extracto del *Assault Schedule* utilizado en el marco del ejercicio GRUFLEX-18.

Para realizar y comprender este documento se utiliza el Anexo D “Designación de vehículos”, perteneciente a la publicación D-AF-03(B), donde se recogen los diferentes trigramas utilizados para designar a los diferentes vehículos embarcados en las LCM1-E, tal y como muestra la Tabla 3-4.

CAMION ALJIBE	AL J
CAMION MEDIO <10 TM	CAM
CAMION PESADO >=10 TM	CAP
CAMION CISTERNA	CCC
CAMION FRIGORIFICO	CFR
CAMION GRUA	GRU
CAMION SHELTER EOD	CEOD
CAMION VEMPAR	CVM
CAMION VOLQUETE	CVQ
CARRO DE COMBATE MEDIO	CCM
CARRO RECUPERACION	CCR
EMBARCACION F-470	ZOD

Tabla 3-4 Trigramas de los vehículos [15].

3.1.3 Modelado de espacios singulares

Para modelizar el desembarco ha sido necesaria la implementación de tres espacios diferenciados necesarios para que este se lleve a cabo. El primero de ellos es el propio buque JCI, para el cual se ha utilizado como base el modelo realizado por el AN don Ignacio Rivera Dodero para su TFG *Estudio y simulación de la evacuación de un buque* del curso 2017/18 [24], donde divide al buque en 9 cubiertas, recibiendo el nombre de *skyjump* la que contiene a la cubierta de vuelo y dique la que alberga las LCM's. Tomando este como punto de partida, se le han añadido modificaciones para adaptarlo al objetivo de este trabajo. En primer lugar ha sido indispensable el desarrollo de la “playa”, espacio que contiene a las LCM's, situada en la cubierta dique, modelándola lo más similar posible a la Figura 3-3.

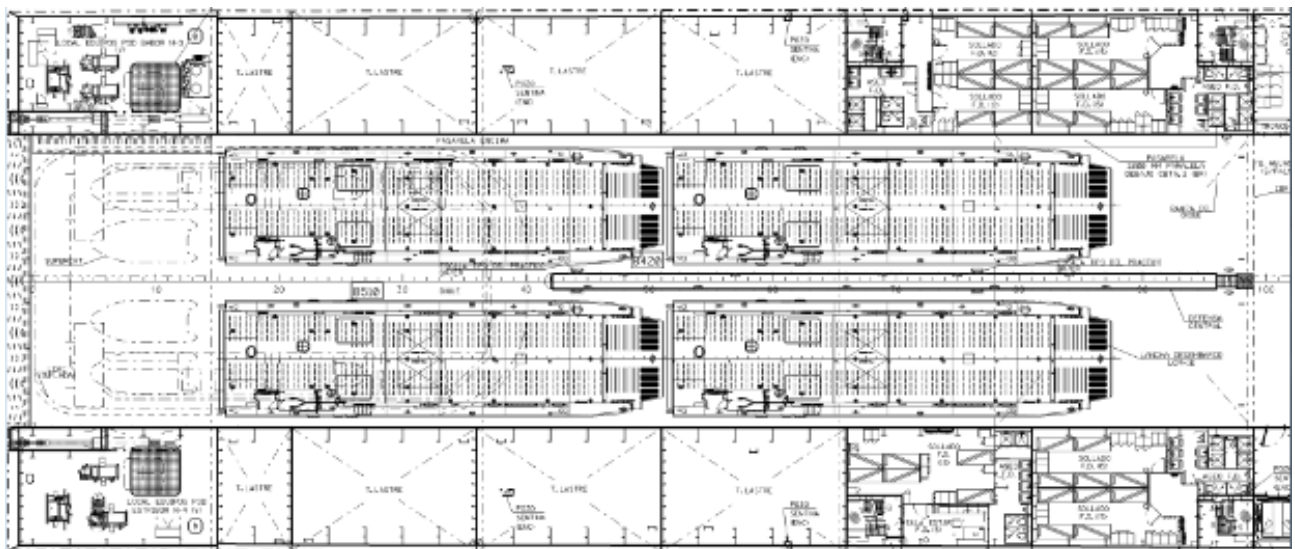


Figura 3-3 Playa situada en el dique del buque JCI.

Para ello se han incluido 4 compartimentos, uno para cada LCM1-E que es capaz de albergar el buque. Se encuentran conectados entre ellos por puertas de manera que puedan salir y entrar del dique para realizar transportes de tropas a playa. Entre ellos, coincidiendo con el centro del dique, se ha colocado otro compartimento para representar la plataforma que permite el movimiento de personal a

las LCM's de popa; este compartimento posee una puerta que faculta a los agentes a entrar en ella desde el GCP y dos puertas de salida a ambos lados de la parte de más a popa del compartimento, coincidiendo con las escalas que allí se encuentran, por la que los agentes hacen su entrada en las LCM's. En la Figura 3-4 se observan los 4 compartimentos correspondientes a las LCM's, la plataforma central, las puertas de acceso en color naranja y las de entrada a las LCM's en color verde. [25]

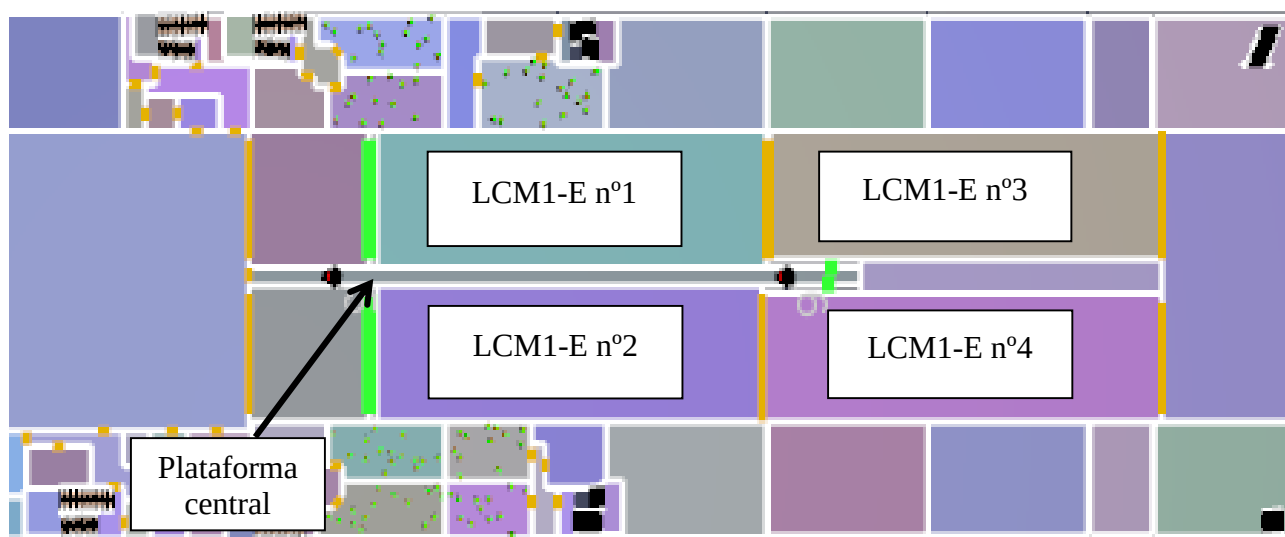


Figura 3-4 Modelización de la playa.

Otra zona a desarrollar ha sido la correspondiente al espacio de mar, según la Figura 3-5, donde realizan su movimiento los agentes que representan las LCM's. Se ha optado por dos habitaciones colocadas a la altura de la cubierta 4, de manera que las embarcaciones realicen los movimientos sin cambiar de altura, sumando ambas una longitud de 950 metros, siendo la más cercana al buque la mayor, con 745 metros, y la más alejada la menor con 205 metros; ambas poseen una anchura de 845 metros. El motivo de modelizar este espacio con dos zonas en lugar de una única es para materializar con la puerta que separa ambas habitaciones la LOD de las embarcaciones. Este espacio cuenta con otras dos puertas, una en la popa del buque, por la que salen las LCM's, y una de salida que representa la playa.

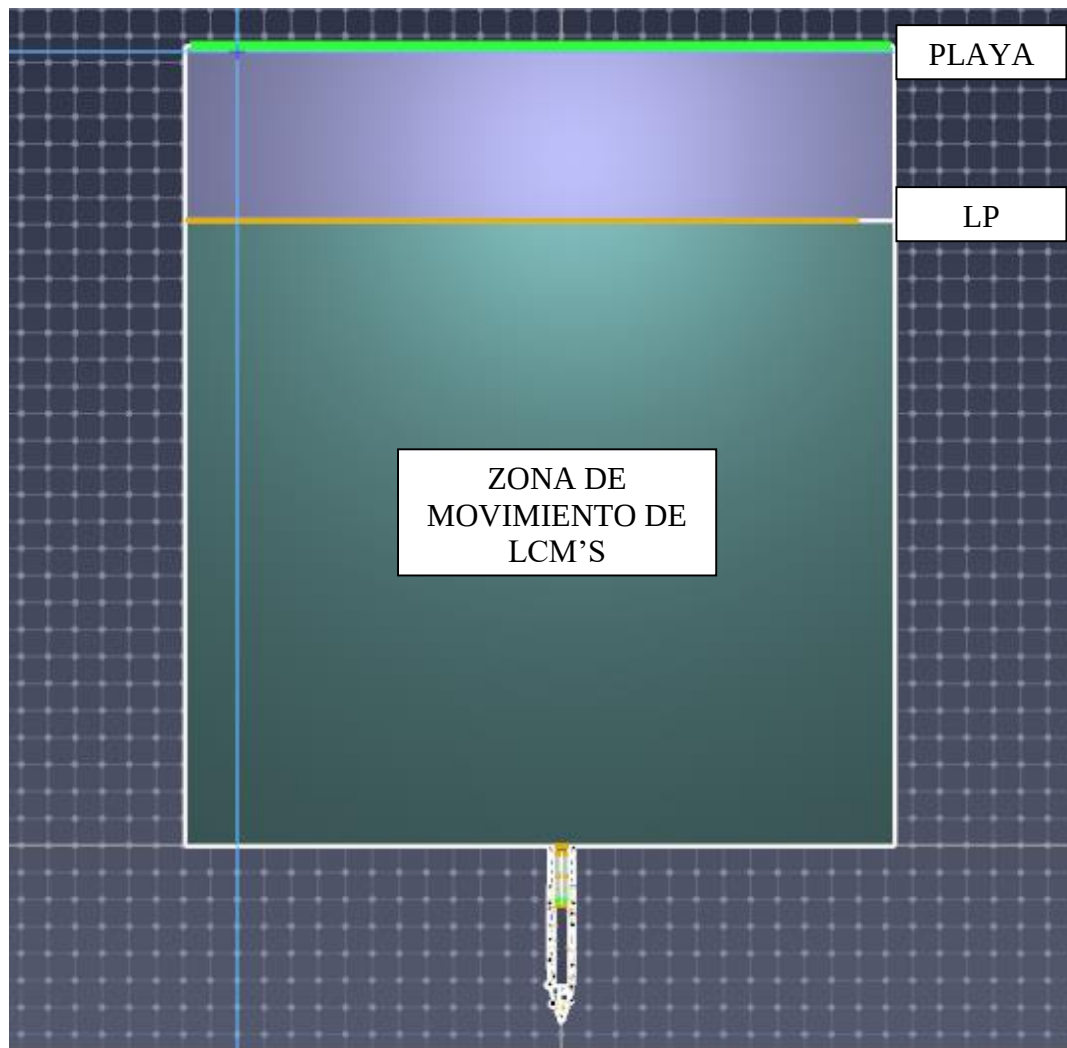


Figura 3-5 Zona de mar y playa.

El último espacio creado ha sido el correspondiente al espacio aéreo, donde se permite el movimiento de los agentes helicópteros. Este espacio está conformado por dos zonas a la altura de la cubierta *skyjump*, la cual alberga a los helicópteros, como se aprecia en la Figura 3-6. La primera de ellas se encuentra a babor del buque con una longitud de 210 metros y una anchura de 380 metros, cuya función es permitir la salida de los helicópteros por esa banda y posibilitarles que realicen el punto de R/V previo a dirigirse a la playa; la zona está localizada a popa y posee las mismas dimensiones que todo el espacio de mar. En ella, los helicópteros realizan los desplazamientos hasta la playa, igualmente materializada con una puerta de salida, además existe otra puerta que conecta ambas zonas y otras dos que permiten el movimiento de los agentes helicóptero desde la cubierta de vuelo hasta el compartimento a babor.

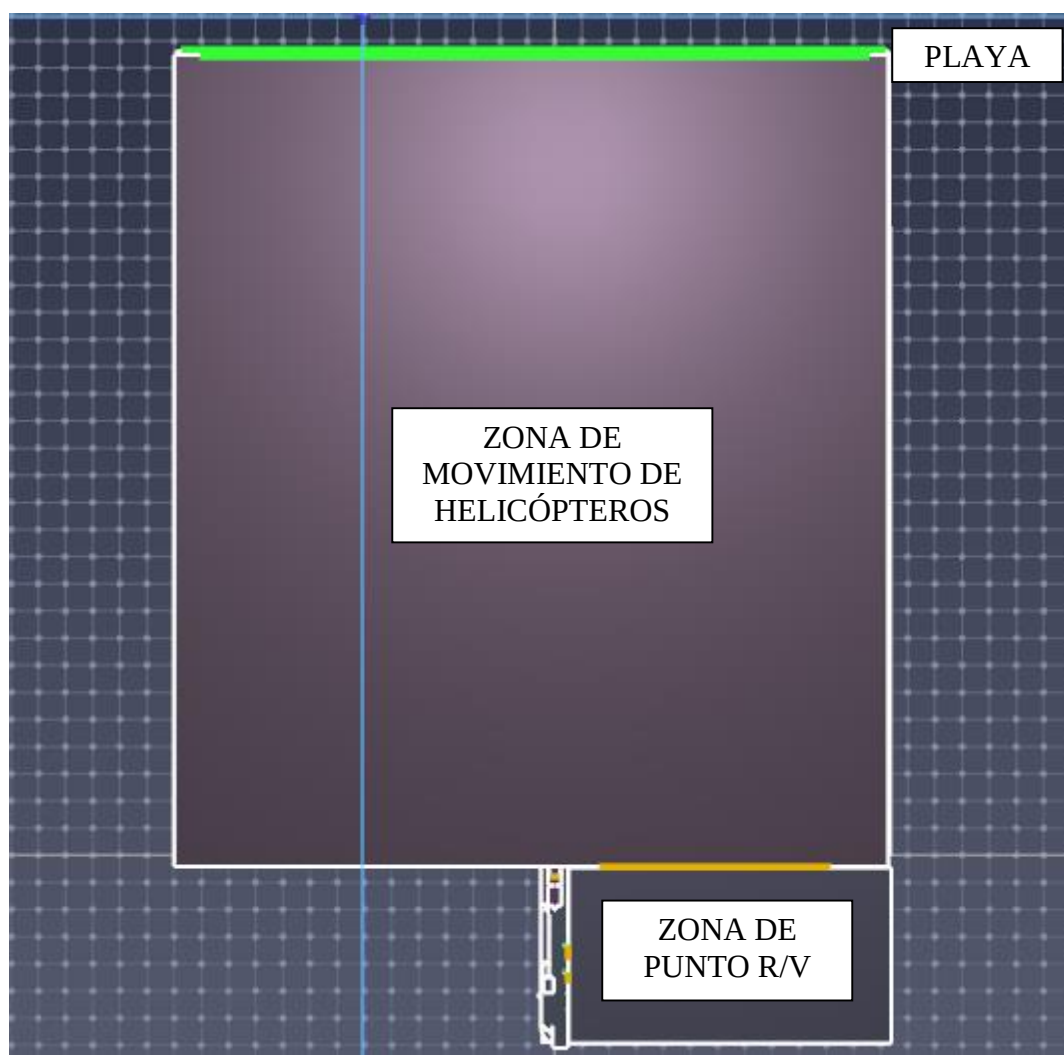


Figura 3-6 Espacio aéreo.

3.1.4 Reparto de personal en cubiertas

El siguiente paso a la configuración de los espacios singulares del modelo es la distribución del personal en los distintos sollados y camarotes del buque.

En primer lugar, es necesario conocer la ubicación de cada uno de los sollados o camarotes destinados a acoger a los miembros de la FD dentro de todos los existentes en el buque JCI. En el punto 3 “Gráfico localización de alojamientos”, dentro de la Sección III del *Cuaderno de Características del buque JCI*, aparece una representación gráfica de cada una de las cubiertas en la que se marcan los sollados y camarotes existentes en ellos, tal y como aparece en la Figura 3-7. Cada uno de ellos posee su denominación y numeración correspondiente, en función del rango al que están destinados (O para oficiales, S para suboficiales, C para cabos primeros y M para tropa y marinería) y la cubierta a la que pertenecen. [8]



Figura 3-7 Parte de los alojamientos existentes en la cubierta 2, todos ellos para oficiales [9].

Conociendo la localización exacta de cada sollado o camarote, y mediante la distribución recogida en el estadillo realizado por el Oficial de Embarque, se ha llevado a cabo el reparto del diferente personal en el buque mediante el comando *Add Occupants* [25], añadiendo a los infantes de marina hasta completar el total del personal que realizará el desembarco. Esto último es importante, porque si bien embarcaron 683 personas, se ha considerado el desembarco de 634, ya que el resto es personal perteneciente al Estado Mayor de la BRIMAR, que no desembarcó durante este ejercicio. Es por ello que al total de agentes que representan a los individuos infantes de marina, entre personal masculino y femenino, hay que añadirle los 4 agentes LCM1-E y los dos helicópteros, haciendo un total de 640 agentes participantes, quedando finalmente distribuidos como recoge la Figura 3-8 y la Figura 3-9.

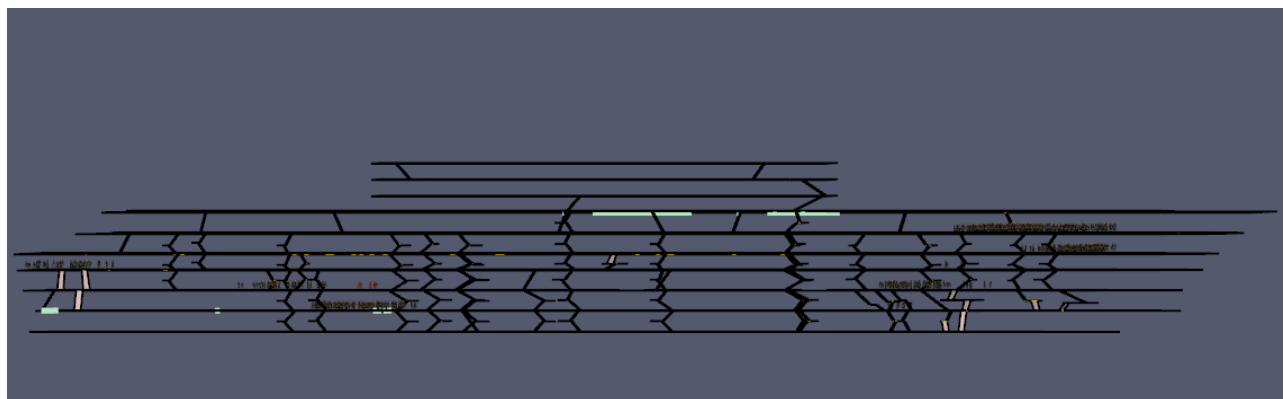


Figura 3-8 Vista de perfil de la distribución de los agentes en el buque.

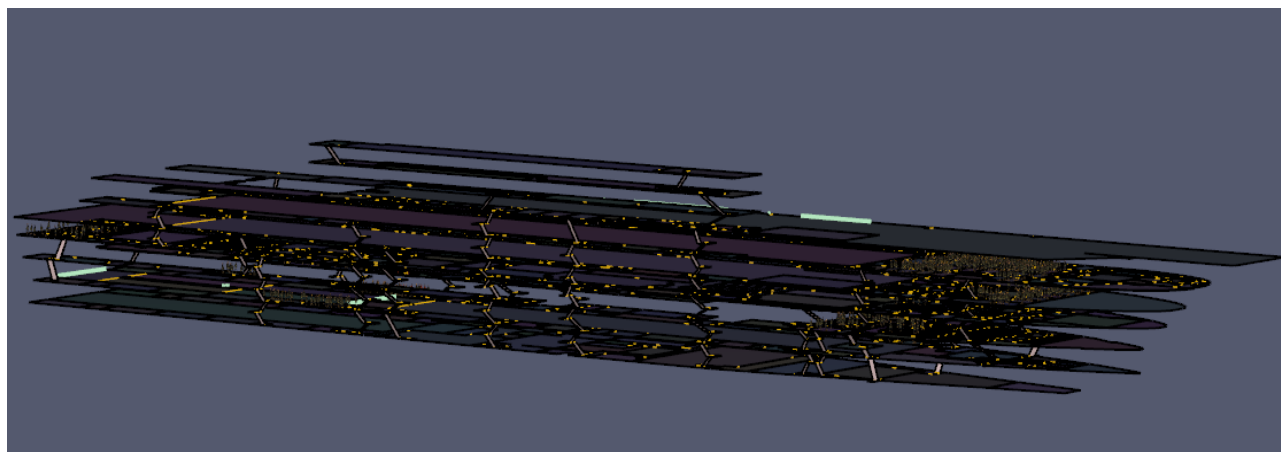


Figura 3-9 Vista en perspectiva de la distribución de los agentes en el buque.

El rango del individuo es el factor principal que determina su posición en el buque, ya que los alojamientos están agrupados según el rango del personal que van a albergar. Como se observa en la Figura 3-10, la mayor densidad de tropas se encuentra en los sollados situados en la proa del buque, en las cubiertas 01,1 y 3, los cuáles están destinados a ser ocupados por la tropa masculina y los suboficiales.

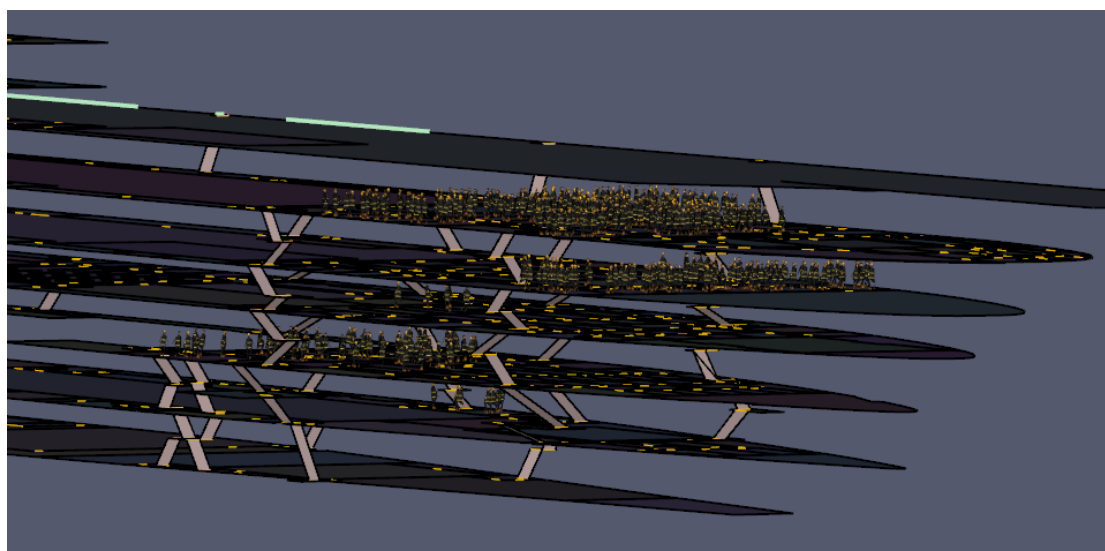


Figura 3-10 Zonas más pobladas del buque.

Sin embargo, los situados en popa, donde se alojan los oficiales, son los menos poblados, como se observa en la Figura 3-11, al ser su número mucho menor en comparación con la tropa.

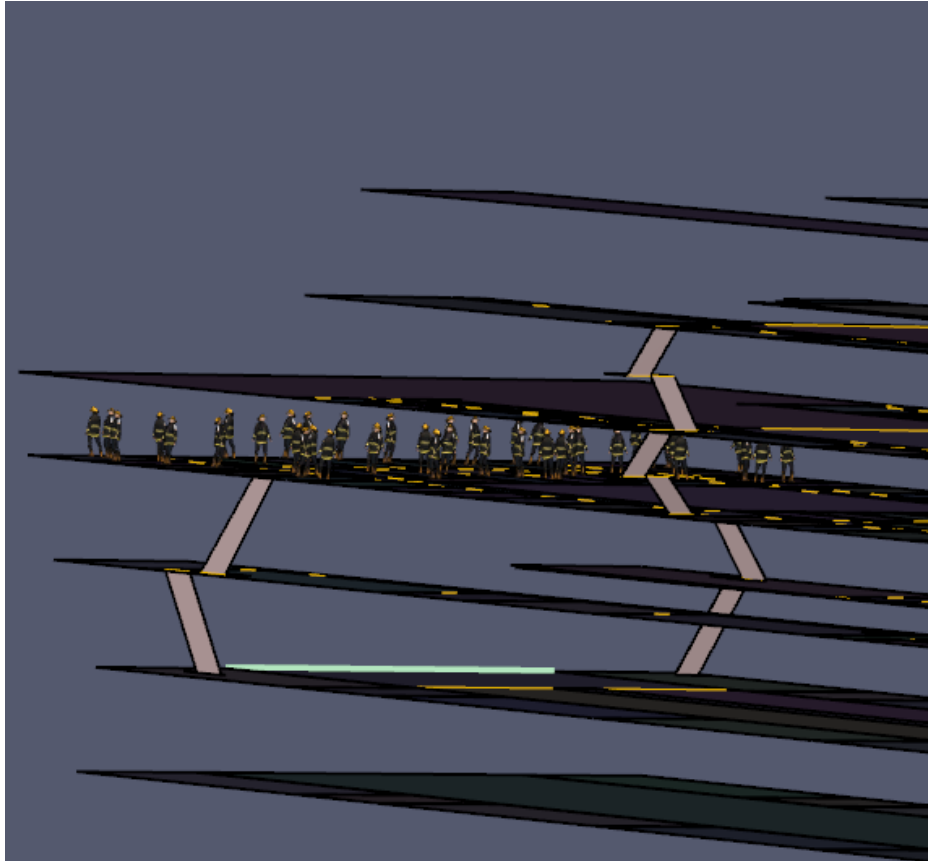


Figura 3-11 Zona de oficiales.

Es reseñable la población situada en la cubierta 4, junto a las LCM's, dónde se encuentra el personal de tropa femenino y los agentes que representan a las tropas extranjeras que embarcaron para participar en el ejercicio. Además, existen agentes alojados en otras zonas del buque, como la proa de la cubierta 4 y la popa de la 3, cuya distribución se observa en la Figura 3-12.

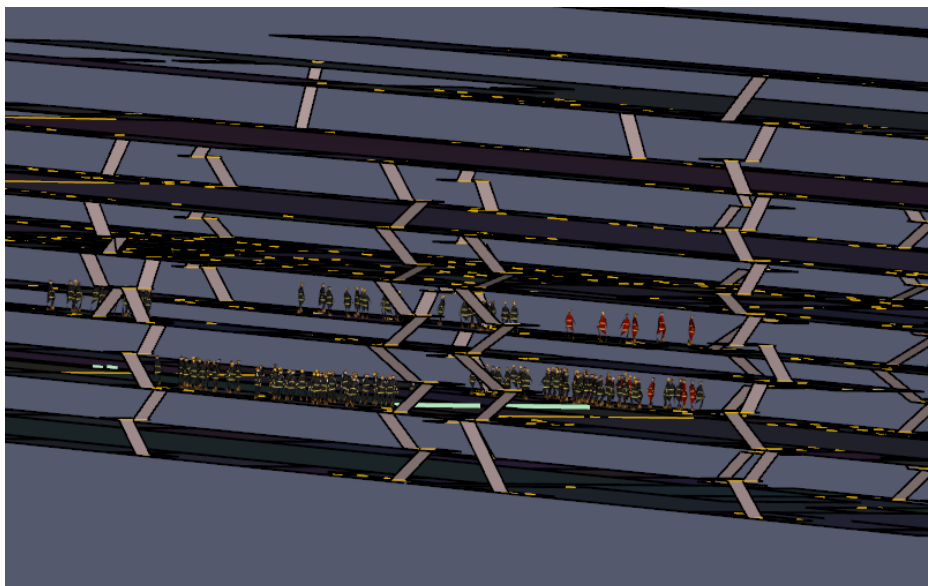


Figura 3-12 Parte del personal de las cubiertas 3 y 4.

Por último, se han asignado dos agentes helicóptero a la habitación que representa la cubierta de vuelo del buque, situada en la cubierta *skyjump*; y una LCM1-E por cada una de las cuatro habitaciones introducidas para formar la playa del dique, en la cubierta 4.

3.1.5 Configuración de agentes

Debido a la existencia de múltiples agentes muy diferenciados participantes en el modelo, se han configurado 4 perfiles distintos [25]. Como se observa en la Figura 3-13, estos vienen a representar a hombres y mujeres pertenecientes al personal embarcado de Infantería de Marina y a los dos helicópteros y cuatro LCM's que realizan los traslados del personal a la playa.

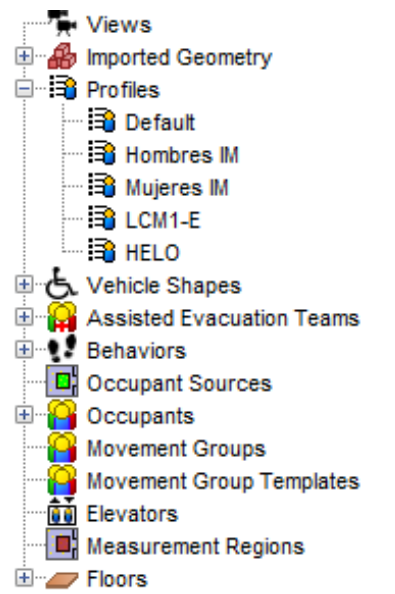


Figura 3-13 Perfiles participantes en la simulación.

A todos los agentes se les deben asignar unos comportamientos de manera que las acciones que realicen representen fielmente el plan de desembarco establecido. Para ello se han creado un total de 34 comportamientos asociados a los diferentes perfiles de agente. Estos comportamientos representan cada una de las olas llevadas a cabo, tanto por medios de superficie como aéreos, pudiendo observarse un extracto en la Figura 3-14.



Figura 3-14 Parte de los comportamientos creados para la simulación.

3.1.5.1 Fuerza embarcada

Para conformar los perfiles del personal de la fuerza embarcada se han utilizado datos correspondientes a pruebas realizadas a bordo del BAA Galicia, en forma de tablas, que recogen las medias de las velocidades de movimiento a través de diferentes espacios del buque como escalas y puertas y los separa en función del rango y el sexo. Conocidos estos datos, se han introducido en las características de los perfiles de manera que estos se asemejen de la más precisa manera a la realidad, como recoge la Figura 3-15. Estos datos condicionarán las acciones de los agentes a la hora de realizar tareas como subida de escalas, movimientos por pasillos o la respuesta al establecer contacto con otro agente. [25]

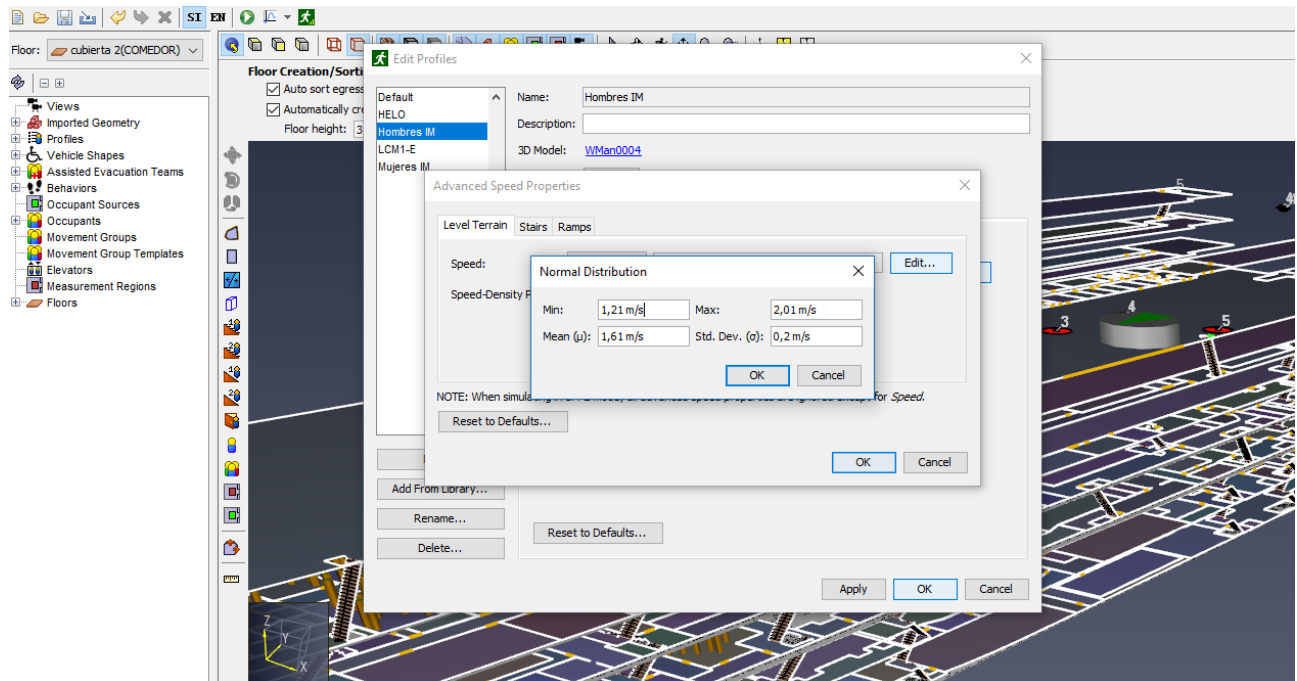


Figura 3-15 Modificación de las características de los agentes masculinos de IM.

Una vez caracterizados los agentes, se les han asignado unos comportamientos a seguir acorde al movimiento que van a realizar por el interior del buque. Del total de comportamientos creados, 28 son asociados a los individuos. Estos comportamientos representan cada una de las olas llevadas a cabo, tanto por medios de superficie como aéreos. Algunas de ellas se dividen a su vez en dos comportamientos diferentes, como es el caso de las olas de helicópteros hasta la ola 6, a partir de la cual es uno de los helicópteros el que realiza los transportes, o la primera ola de LCM's, en la que las 4 embarcaciones se encuentran en el dique y se ha dividido entre proa y popa.

Los comportamientos asignados a los agentes que representan a los infantes de marina se corresponden a la Figura 3-16, con excepción de la primera ola de ambos medios de desembarco, que no tiene establecida un tiempo inicial de espera ya que coincide con el inicio de la simulación, están formados por un tiempo de espera. Este tiempo será el que determine el momento de inicio del movimiento de los agentes asignados a esa conducta, coincide con el momento en que la ola de la que forma parte es llamada por los diferentes medios del buque para acudir a su punto de reunión, y por determinados *waypoints*, que obligan al agente a dirigirse a un punto determinado, en función si debe dirigirse al dique o a la cubierta de vuelo. Tras el *waypoint* que marca el punto de reunión de la ola, hay establecido otro tiempo de espera correspondiente a la espera de la ola a encontrarse al completo, tras lo cual se dirigirán a un *waypoint* colocado en las inmediaciones del medio de desembarco y saldrán por la salida situada junto a este y que representa la subida del personal en el medio de transporte.

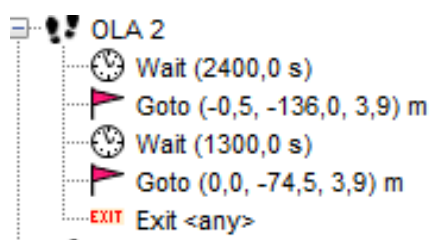


Figura 3-16 Comportamiento asociado al personal participante en la ola 2.

Con el fin de equiparar los agentes a la realidad, Pathfinder integra la posibilidad de dotar a estos de una forma 3D. Por el contrario, estos modelos ofrecidos por el programa no contemplan una relativa a personal militar. Frente a esto, se ha seleccionado la forma de un bombero, tanto masculino como femenino, para representar a la fuerza embarcada, quedando así los perfiles como aparece en la Figura 3-17, siendo aquellos con la vestimenta negra los hombres y la roja las mujeres.



Figura 3-17 Modelo 3D asociado al personal masculino y femenino.

3.1.5.2 Medios de desembarco

Por otro lado, ha sido necesario crear comportamientos más complejos para las LCM's y los helicópteros, orientados a sus particularidades de movimiento.

Para poder utilizar un modelo que represente fielmente a las LCM's, ha sido necesario, en primer lugar, darle una forma de tal manera que favorezca su fácil reconocimiento en la simulación. Para ello, Pathfinder incluye la posibilidad de determinar la geometría de los agentes. Aprovechando esta funcionalidad, se ha conseguido modelizar las embarcaciones, como se muestra en la Figura 3-18.

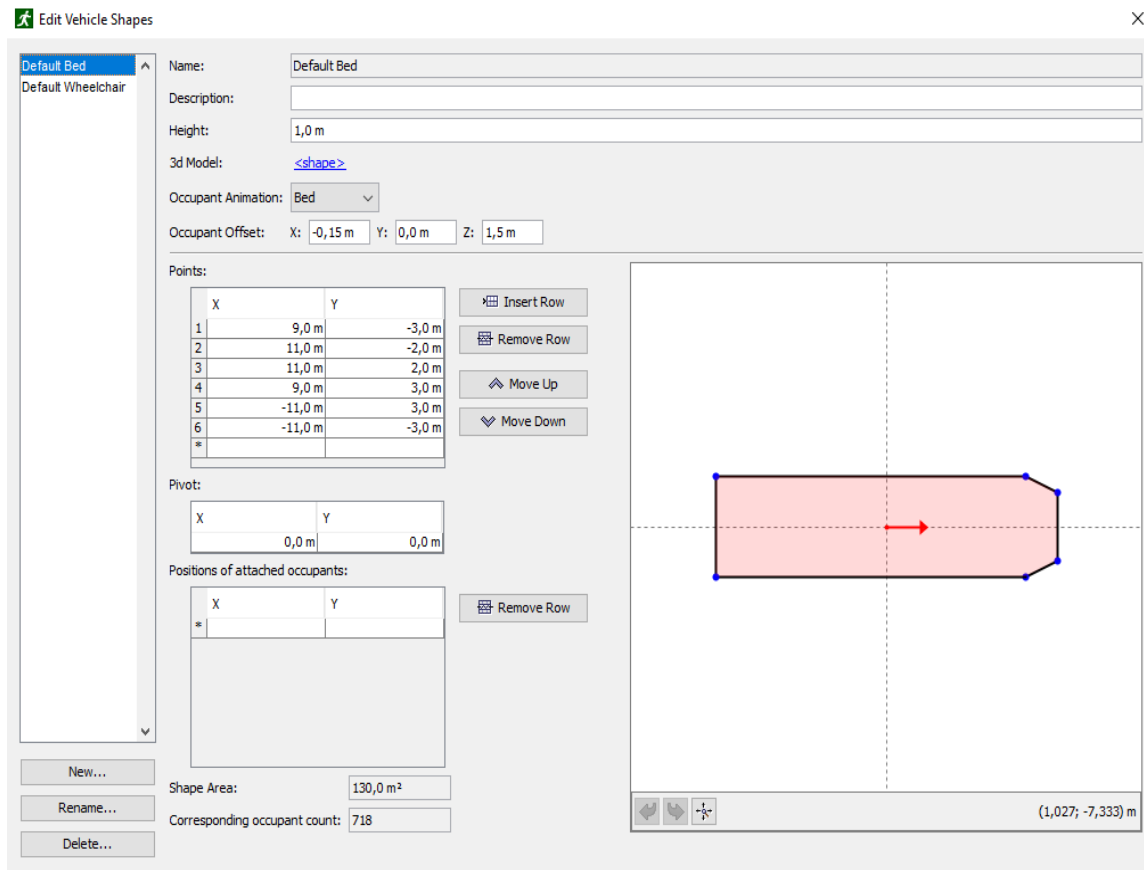


Figura 3-18 Diseño de la forma del perfil LCM1-E.

Además de esto, se le ha introducido una velocidad diferente a la del personal, de manera que se aprecie la diferencia en el movimiento. Esta velocidad es de 10 nudos, que coincide con la velocidad considerada por los buques cuando realizan el planeamiento de tiempos del desembarco según la Tabla 3-5. En cuanto a su comportamiento, las LCM's comienzan su secuencia de movimiento en espera de ser cargada y, tras esto, realiza el movimiento hacia el punto de R/V, donde se junta con el resto de LCM's para dirigirse a su punto de varada en playa. Tras llegar a ese punto, volverán a esperar, saliendo, finalizada la espera, primero las LCM's 1 y 2 de vuelta al dique para volver a realizar otra secuencia de movimiento. Una vez que regresan de nuevo a playa tras realizar la carga, las LCM's 3 y 4 se dirigen al dique, y así de manera sucesiva hasta completar el desembarco.

UNIDAD	VELOCIDAD(nudos)
SCAT	20
LCM1-E	10
AAV	5

Tabla 3-5 Unidad y velocidad asignada.

En cuanto a los helicópteros, debido a las limitaciones del Pathfinder en cuando al diseño de formas no convexas, se ha optado por darle una forma cilíndrica con un diámetro de 8 metros y una altura de 2 metros, de manera que su tamaño sea destacable respecto al resto de agentes, según la Figura 3-19 [25].

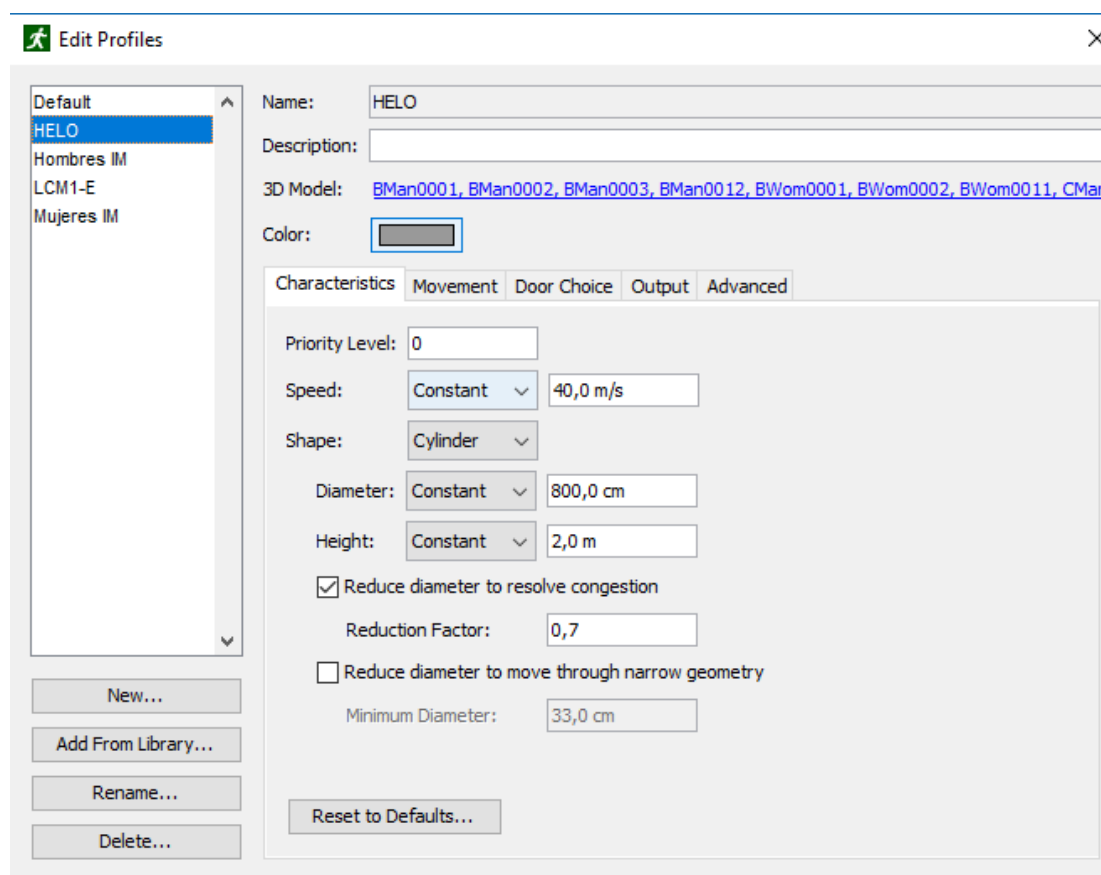


Figura 3-19 Diseño del perfil del helicóptero.

Una de sus características diferenciadoras es su elevada velocidad, de 40 metros por segundo, siendo el agente con mayor velocidad creado. La conducta de los helicópteros, al igual que la de las LCM's, está diseñada para realizar el punto de R/V. A la hora de regresar de playa al buque, siempre vuelven ambos helicópteros hasta la ola 6, a partir de la cual es uno de los helicópteros el que lleva a cabo el resto de desembarco, tal y como sucedió en la realidad.

3.2 Ejecución de la simulación

La realización del desembarco anfibio es un proceso limitado por los medios de desembarco, tanto por su capacidad de carga como por su velocidad. Es por ello que la simulación se ha orientado a representar tal proceso supliendo las limitaciones que impone el programa en cuanto a dimensionamiento mediante los tiempos de espera, tanto de movimiento del personal que conforma las diferentes olas como de los medios de transporte. Este comportamiento de espera es el elemento clave que permite que los tiempos de la simulación sean lo más acorde a la realidad posible. La Figura 3-20 y la Figura 3-21 muestran de manera esquemática la secuencia seguida por cada una de las series que conforman las diferentes olas y los medios de desembarco para sus movimientos en la simulación.

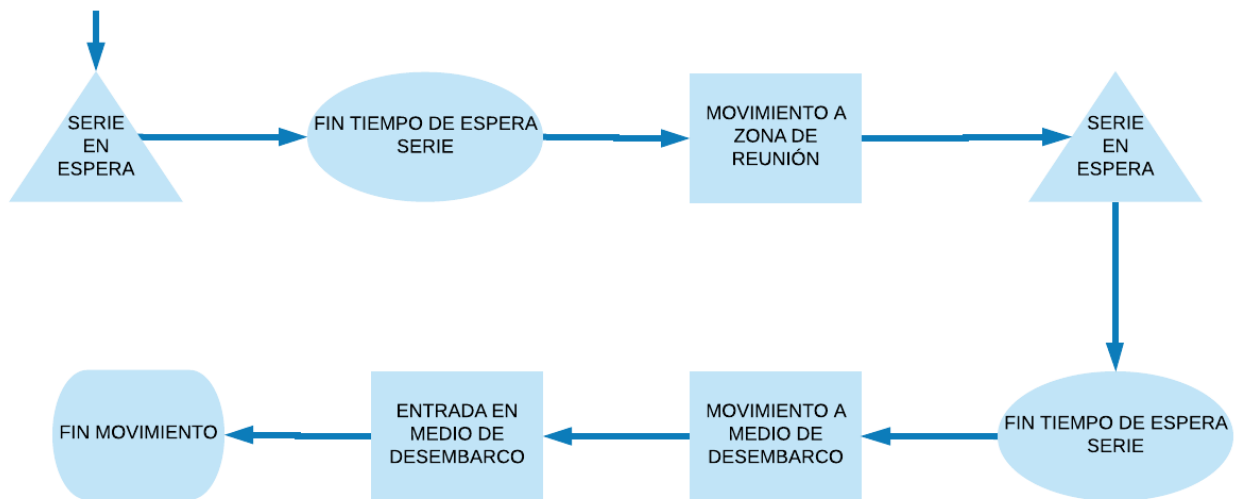


Figura 3-20 Secuencia de movimiento de las olas de personal (elaboración propia).

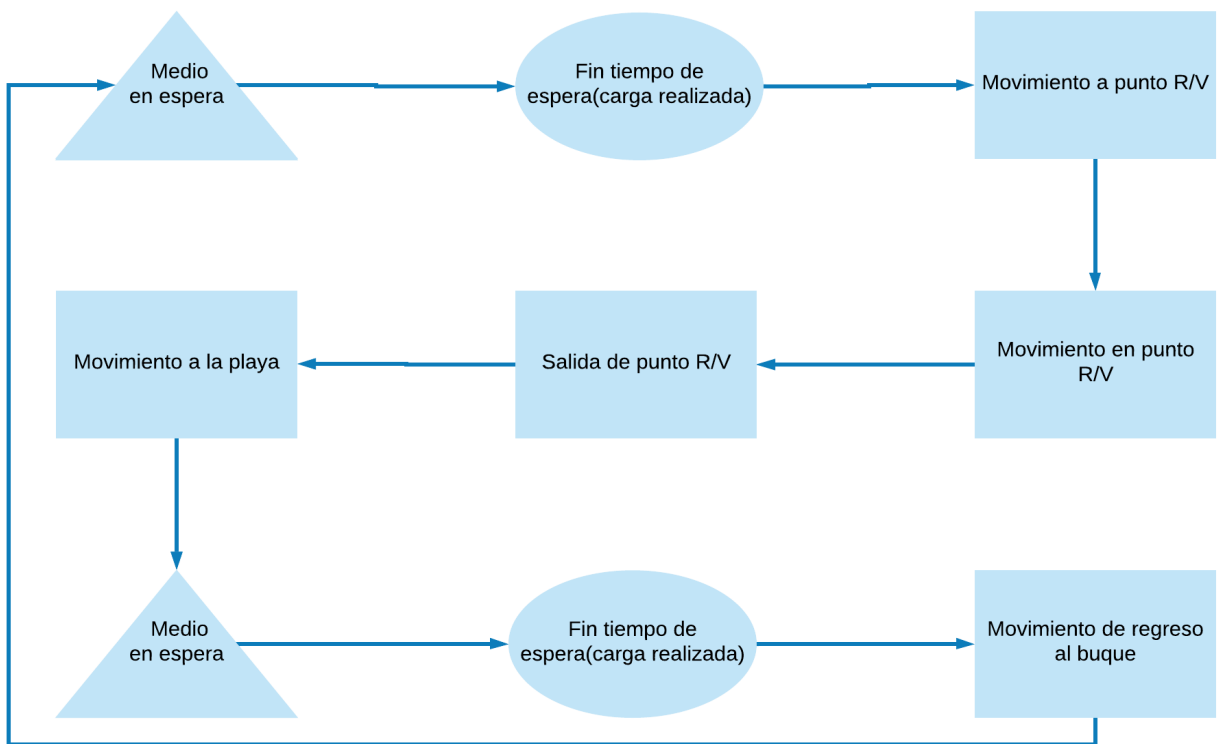


Figura 3-21 Secuencia de movimiento de los medios de transporte (elaboración propia).

El personal permanece en su compartimento a la espera de su turno para comenzar el movimiento, estos tiempos de espera están establecidos en base a información proporcionada por un Capitán que tomó parte en el ejercicio como miembro del TAGLOG, desde donde se controlaba toda la secuencia de desembarco. Según la información aportada, el desembarco se realizó a una distancia aproximada de 2 millas náuticas, y, dando las LCM's una velocidad de entre 6 y 8 nudos cargadas, la célula estimaba un tiempo en torno a los 20 minutos de ida, que incluye movimiento en el punto de R/V,

tránsito a playa y descarga, y 20 minutos de vuelta, que comprende el tiempo de salida de varada, tránsito de regreso y entrada en dique; a todo esto hay que sumarle el tiempo de carga de la siguiente ola una vez establecida en la playa del buque, al que se le ha otorgado un valor de 600 segundos. En relación a los tiempos asociados a las olas que desembarcan por medios aéreos, se ha considerado que el tiempo que tardan estos para la ida, englobando acogida en punto de R/V, desplazamiento hasta la zona de aterrizaje y desembarque del personal transportado, el tiempo para el regreso hasta la cubierta de vuelo y el correspondiente al embarque de la siguiente ola es un total de 9 minutos.

La llamada del personal integrante de la ola por medio de superficie se realiza en el momento que el TAGLOG es informado de la salida de una LCM de playa, lo que equivale de manera aproximada a los 20 minutos anteriormente expuestos. Todo esto es reflejado en la simulación mediante los mencionados tiempos de espera, haciendo que, desde el momento que una LCM sale del buque y regresa a este transcurren 40 minutos; y desde que una ola es llamada hasta que comienza su movimiento hacia la LCM suceden 20 minutos. La Tabla 3-6 muestra la secuencia de acontecimientos correspondientes a las olas 1 y 2 de desembarco, tanto por medios aéreos como de superficie.

HITO	IMPLICADO
LLAMADA OLA1 LCM Y HELO	OLA 1 LCM/HELO
NOVEDAD EN PUNTO REUNIÓN EMBARQUE HELO	OLA1 HELO
NOVEDAD EN PUNTO REUNIÓN EMBARQUE LCM	OLA 1 LCM
EMBARQUE OLA 1 HELO	OLA 1 HELO
EMBARQUE OLA 1 LCM	OLA 1 LCM
SALIDA 2 HELOS	HELO 1 Y 2
SALIDA 4 LCM'S	LCM 1,2,3 Y 4
TD	HELO 1 Y 2
TD	LCM 1,2,3 Y 4
SALIDA HELO 1 Y2 PLAYA/LLAMADA OLA2 HELO	HELOS/ OLA 2HELO
NOVEDAD OLA 2 HELOS EN PUNTO REUNIÓN	OLA 2 HELO
ATERRIZAJE HELO 1 Y 2 EN CUBIERTA VUELO	HELO 1 Y 2
SALIDA LCM 1 Y2 PLAYA/LLAMADA OLA2 LCM	LCM 1 Y 2
EMBARQUE OLA 2 HELO	OLA 2 HELO
SALIDA HELOS	HELO 1 Y 2
NOVEDAD OLA 2 LCM EN PUNTO REUNIÓN	OLA 2 LCM
ENTRADA LCM 1 Y 2 EN DIQUE	LCM 1 Y 2
EMBARQUE OLA 2 LCM	OLA 2 LCM
SALIDA LCM'S	LCM 1 Y 2

Tabla 3-6 Hitos de las olas 1 y 2 (elaboración propia).

En cuanto a puntos de reunión en el buque para la fuerza a embarcar, se han considerado tres diferentes, tal y como se muestra en la Figura 3-22, de los cuatro que existen en el buque [8].

- Comedor de tropa de la FD.
- Pasillo donde no hay vehículos estacionados situado al comienzo de la rampa de subida a cubierta ligera, en el GCP.
- Dos compartimentos en la cubierta de vuelo.

El punto de reunión obviado en esta simulación es el situado en el GCL, destinado al agrupamiento de los individuos que van a desembarcar por medios aéreos, el cual no se utilizó el ejercicio simulado por la poca entidad de los equipos de helicóptero, que se reunían directamente en los compartimentos destinados a tal uso en la cubierta de vuelo.

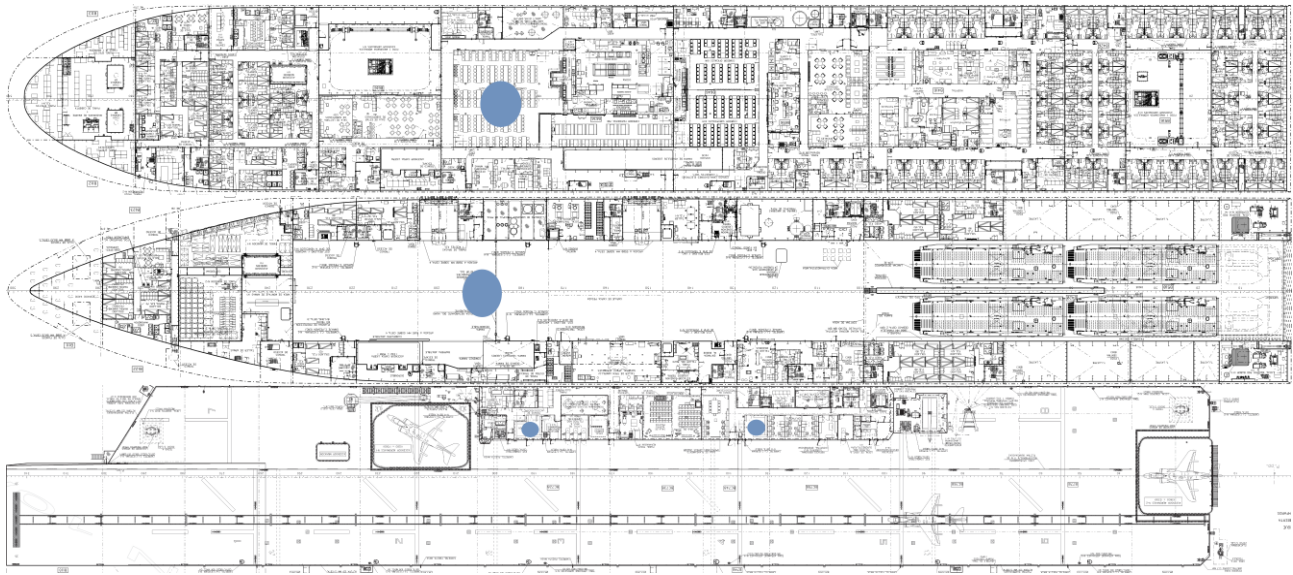


Figura 3-22 Puntos de reunión de la FD para el desembarco por medios de superficie y aéreos.

Los tiempos de espera asignados a los comportamientos de las diferentes series son de 1300 segundos para aquellos participantes de olas de superficie, y de 100 segundos para los de helicópteros. Estos tiempos están establecidos de manera que permitan tanto la congregación de toda la ola en el punto de reunión como que su movimiento hacia el medio de desembarco coincida con la llegada de este al dique o la cubierta de vuelo.

3.3 Análisis estadístico de los resultados

El análisis de los datos obtenidos se ha realizado sobre las 6 series participantes del desembarco más numerosas, tres de LCM y tres de helicóptero, mediante diferentes técnicas estadísticas siguiendo el esquema de la Figura 3-23. Se ejecutarán 10 réplicas piloto para determinar el número total de simulaciones que deben correrse sobre cada escenario y así acotar el error para un determinado nivel de confianza.

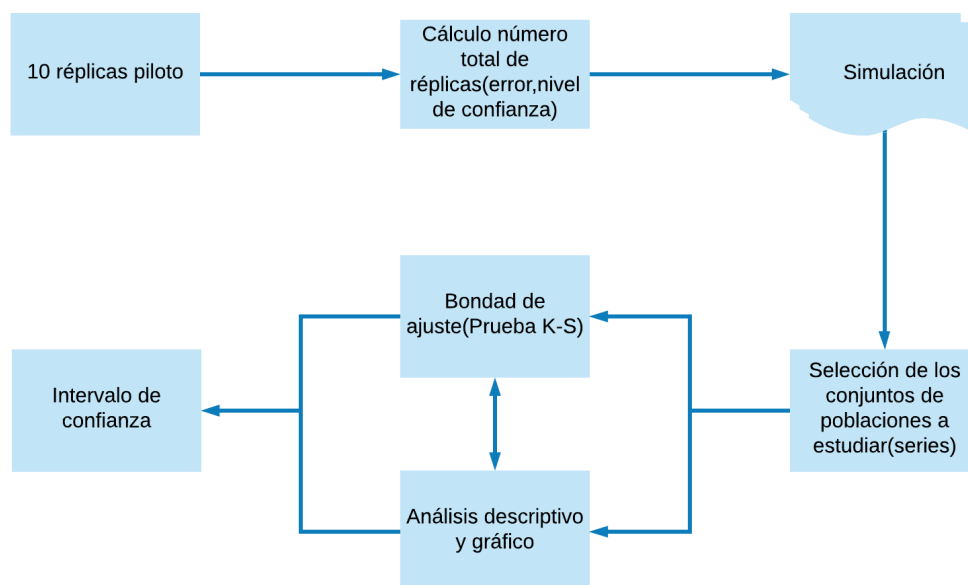


Figura 3-23 Secuencia del análisis de datos estadístico (elaboración propia).

Posteriormente se realizarán las simulaciones correspondientes, se obtendrán los datos, se realizará un análisis descriptivo y gráfico, se comprobará mediante un test de bondad del ajuste (prueba de Kolmogorov-Smirnov) que los datos se ajustan a una normal, para finalmente calcular un intervalo de confianza para la media en cada uno de los escenarios.

3.3.1 Cálculo del número de réplicas

Inicialmente se ejecutan 10 réplicas piloto, para poder determinar el número de simulaciones a realizar a posteriori y así poder acotar el error con un nivel de determinado de confianza.

Estableciendo un error máximo (e) de 60 segundos, aceptable desde el punto de vista de la ejecución de un desembarco, ya que cada viaje de LCM a playa es de 40 minutos (2400 segundos), y un nivel de confianza del 95%, se calcula el número de réplicas a realiza mediante [26]:

$$n = \frac{z_{\alpha}^2 \hat{S}^2}{e^2}$$

Se han seleccionado estos valores debido a que una mayor precisión (menor error) implica la realización de un mayor número de réplicas, lo que no sería asumible en la realización del presente TFG por limitaciones de tiempo.

3.3.2 Análisis descriptivo

Para resumir las características principales de un conjunto de datos de forma numérica se utilizan las medidas características. Estas se dividen en medidas de posición, de dispersión y de forma, cada una de las cuales aporta una información diferente respecto a la muestra de datos, pero todas se complementan entre sí.

Las medidas de posición centrales nos permitirán conocer los valores en torno a los que se distribuyen los datos, indicándonos el centro de la distribución, de manera que pueda determinarse la tendencia de la muestra de datos. Las no centrales nos permiten conocer el mínimo valor correspondiente a un porcentaje determinado, mostrando así en los cuartiles inferior y superior los datos que se encuentran por debajo del primer cuarto del total y por encima del último respectivamente.

Para conocer la variabilidad de los datos se utilizan las medidas de dispersión, lo que complementará la información obtenida mediante las medidas de posición, acotando los intervalos de valores.

Con las medidas de forma se obtendrá información acerca del grado de asimetría respecto a los valores centrales del rango de dato, así como la homogeneidad de la muestra.

Mediante la herramienta Excel se han obtenido medidas de posición centrales: la media, la mediana, y no centrales: los cuartiles inferior y superior; de dispersión: el rango, la varianza y la desviación típica; y de forma: los coeficientes de asimetría y curtosis de Fisher; todas ellas son definidas a continuación [26].

- Media aritmética: centro de gravedad de la distribución, se consigue sumando los valores numéricos de los datos y dividiendo entre el total de ellos.
- Mediana: valor situado en el centro de la muestra, la mitad del resto son menores o iguales que él, y la otra mitad son mayores o iguales que él.
- Cuartiles inferior y superior: punto menor y mayor de los tres que dividen a la muestra en cuatro partes iguales.
- Rango: diferencia entre el valor máximo y el mínimo de la muestra.
- Desviación típica: medida de dispersión asociada a la media, se consigue mediante la media cuadrática de la diferencia entre los datos y su media.

- Varianza: cuadrado de la desviación típica, posee unidades diferentes a la de los datos evaluados.
- Coeficiente de asimetría de Fisher: cociente entre el momento central de orden 3 y el cubo de la desviación típica, permite conocer si la muestra es simétrica o, en caso de no serlo, el lado por el que se produce esta asimetría.
- Coeficiente de curtosis de Fisher: mide el grado de esbeltez de la muestra respecto a la media, un mayor valor del coeficiente implica una mayor concentración de datos en torno a la media.

3.3.3 Análisis gráfico

Los gráficos son una herramienta muy útil para observar de manera visual las diferentes distribuciones estudiadas, así como para realizar comparaciones entre ellas, beneficiando así la obtención de conclusiones acertadas. De entre los diferentes gráficos de representación de datos, los más adecuados para este trabajo son el histograma y el *boxplot*. [26]

El histograma está formado por barras rectangulares cuya anchura es igual a la amplitud del intervalo de valores estudiados, y cuya altura es determinada por la frecuencia en la que se observan estos valores. Proporciona una idea de las regiones en las que tiende a situarse la muestra, que son aquellas que más se repiten, permitiendo así evidenciar la homogeneidad o dispersión de los valores.

El *boxplot* o diagrama de cajas proporciona información acerca de la dispersión y simetría de la distribución. En él aparecen representados los tres cuartiles y los valores máximo y mínimo de la muestra. Está formado por un rectángulo cuyos lados más largos representan el recorrido intercuartílico y cuya línea que lo divide se corresponde con la mediana o el segundo cuartil. Además, de este rectángulo sobresalen dos líneas llamadas “bigotes”, cuyos límites se corresponden con los valores máximo y mínimo no atípicos de la muestra. Se considera atípico todo valor heterogéneo con el resto, en este caso se corresponde con todo aquel que se encuentre fuera del rango dado por $Q_3 + 1,5IQR$ y $Q_1 - 1,5IQR$, apareciendo representado en Matlab mediante una cruz roja, como sucede en la Figura 3-24, la cual ha sido modificada para que aparezcan valores atípicos. [27]

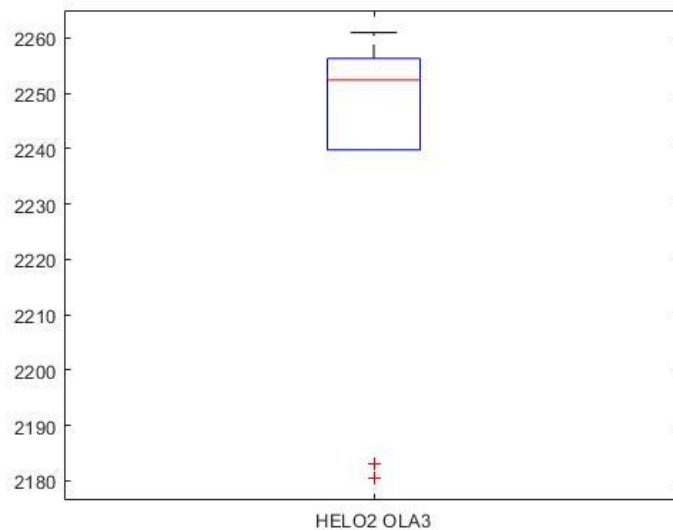


Figura 3-24 Ejemplo de *boxplot* con valores atípicos.

3.3.4 Bondad de ajuste

El siguiente paso es resolver si las distribuciones de datos estudiadas se corresponden a una distribución teórica conocida como es la normal, lo que nos permitirá reforzar la probabilidad de estimar los tiempos de las series.

Para ello se llevará a cabo una prueba de bondad de ajuste para cada uno de los conjuntos de datos, la cual muestra la diferencia entre los valores obtenidos y los esperados. Existen varias pruebas para comprobar el ajuste de normalidad de los valores de una muestra como la de Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov, Chi-cuadrado o Shapiro-Wilk entre otras. La elegida para este trabajo ha sido la prueba no paramétrica de Kolmogorov-Smirnov. Esta prueba compara la distribución acumulada de los datos de la muestra con los de la función teórica con la que se quiere realizar la comparación mediante un contraste de dos hipótesis:

- Hipótesis nula (0) = los datos de la muestra provienen de la distribución de probabilidad evaluada.
- Hipótesis alternativa (1) = los datos de la muestra no provienen de la distribución de probabilidad evaluada.

Finalizado el contraste, el test acepta o rechaza la hipótesis nula. El primer caso implica el hecho de que los datos no se encuentran en contra de esta hipótesis, y el segundo que los datos indican que es poco probable que sea cierta [28] [29].

La implementación de estos test se ha realizado mediante la herramienta informática Matlab, ejecutando el comando $[h, p] = kstest(x)$. El programa presenta dos resultados, h y p. El primero de ellos puede tomar el valor 1, si se rechaza la hipótesis nula, y 0, si se acepta esta; el segundo proporciona el resultado del p-valor asociado a la muestra, que puede oscilar entre 0 y 1, que indica la verosimilitud de rechazar la hipótesis nula. Este valor permite decidir la aceptación del resultado en función de la confianza estimada; valores cercanos a 0 indican que es poco frecuente obtener una muestra como la actual, mientras que valores próximos a 1 señalan que esto es usual [30] [31].

3.3.5 Intervalo de confianza

El último paso del estudio estadístico es la determinación de un intervalo de confianza centrado en la media para cada una de las series tratadas, el cual, para el nivel de confianza determinado de un 95%, contendrá el valor numérico del tiempo asociado al movimiento y preparación de una serie para su desembarco desde el buque. Existen dos formas para estimar el intervalo de confianza, en función de si es conocida o no la desviación estándar de la población. En este caso es conocida la desviación estándar de la muestra, pero no de la población al completo, por lo que hay que utilizar la distribución *t student*, de manera que se tenga en cuenta la incertidumbre añadida que resulta de cada estimación de la desviación estándar. [30]

Para el cálculo de este intervalo también se ha utilizado la herramienta Matlab. En primer lugar, se calcula la media de los valores asociados a cada muestra mediante el comando $mean(x)$. Tras esto, se determina su desviación estándar utilizando $std(x)$. Conocidos estos datos, se obtienen los dos valores correspondientes al 5% que queda fuera del intervalo, 2,5% a cada lado de este, utilizando la tabla de la distribución *t student* mediante el comando $tinvt([0.025 \ 0.095], \text{grado de libertad de la muestra})$.

Realizados estos cálculos, y mediante la siguiente fórmula, se obtienen dichos intervalos de confianza [30]:

$$mean + tinvt([0.025 \ 0.095], \text{grado de libertad de la muestra}) * std(x) / \sqrt{(\text{número de valores de la muestra})}$$

4 RESULTADOS

4.1 Simulación del desembarco anfibio

La duración completa del desembarco es de 30740 segundos, equivalente a 8 horas, 32 minutos y 17 segundos, tomado como inicio $t=0$ el momento en el que se da la orden de “desembarcar la FD”, dando así comienzo al desembarco de las tropas a tierra. Pathfinder es capaz de mostrar los resultados de manera gráfica mediante una visualización en 3D en forma de video de la simulación realizada. Dentro de este video, el usuario puede seleccionar qué resultados visualizar, encontrándose entre las opciones las rutas seguidas por los agentes, la densidad de estos por las cubiertas, las colas que se forman, la velocidad de su movimiento y el tiempo de llegada a la salida entre otras. Este TFG, se ha centrado en los resultados relativos a las rutas y colas.

4.1.1 Rutas

A continuación se muestran las diferentes cubiertas del buque en las que aparecen reflejadas, en color verde, las rutas seguidas por todas aquellas tropas cuyo desembarco se realizó por medios de superficie. Se ha obviado la cubierta 5 y de la *skyjump* en adelante, ya que no existe movimiento de este personal en ellas, por no encontrarse entre las cubiertas donde se encuentran alojadas las tropas y el dique:

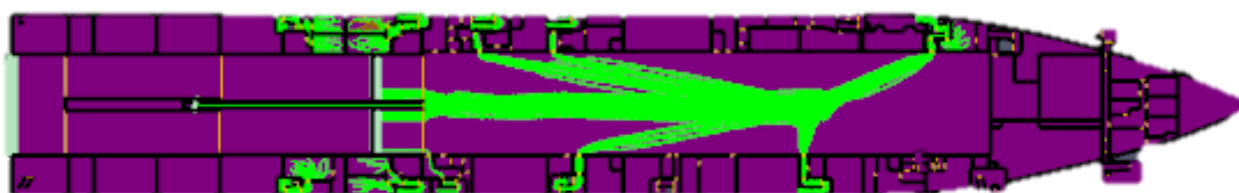


Figura 4-1 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E en la cubierta 4 (dique).



Figura 4-2 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E en la cubierta 3.



Figura 4-3 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E cubierta 2.



Figura 4-4 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E cubierta 1.



Figura 4-5 Rutas del personal a desembarcar en LCM1-E cubierta 01.

En ellas se observa como los recorridos se dirigen a las escalas que lleven de manera más rápida a la zona de reunión de la serie en el dique en función de la localización de los alojamientos, en la proa o la popa del buque. Además, es destacable el movimiento realizado en la cubierta 4, donde llega el personal desde diferentes escalas, teniendo que realizar desplazamientos desde su dirección de llegada este hasta llegar a la zona de reunión establecida.

También, en la cubierta 2 se aprecia un elevado volumen de movimiento en las zonas contiguas al comedor de la FD, punto de reunión previo al situado en el dique de la primera ola de desembarco, por las que los agentes llevan a cabo sus recorridos provenientes desde todas las cubiertas inferiores y superiores en las que hay alojamientos.

Por otro lado, las cubiertas 1 y 3 son aquellas en las que los desplazamientos hacia las escalas desde los alojamientos son menores, al encontrarse estas junto a ellos. Sin embargo, en la cubierta 2 es donde se producen los desplazamientos por pasillos más largos, realizándose movimientos por casi todos los que se encuentran en ella, especialmente desde los camarotes de los oficiales.

Las otras rutas obtenidas han sido las correspondientes a los infantes de marina cuyo desembarco se realizó por medios aéreos. Estos grupos son menores y en lugar de dirigirse hacia la parte baja del buque, tenían que hacerlo hacia la cubierta de vuelo, situada por encima de los alojamientos. Las siguientes imágenes muestran los recorridos seguidos por estas poblaciones:



Figura 4-6 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 4 (dique).



Figura 4-7 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 3.



Figura 4-8 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 2.

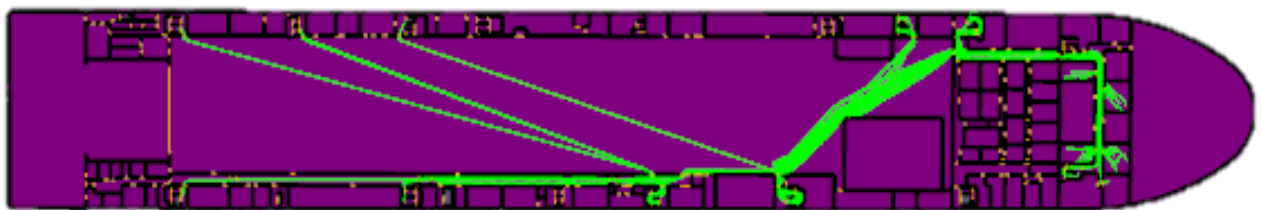


Figura 4-9 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 1.



Figura 4-10 Rutas del personal a desembarcar por helicóptero en la cubierta 01.

De estas imágenes se concluye el hecho de que el movimiento de los agentes está encaminado a las escalas que conducen a la zona de reunión de la FD en la cubierta *skyjump*, a la que se accede por los troncos 9 y 13, situados en estribor. Es reseñable como, a excepción de aquellos alojados en la cubierta 01, el resto del personal ya se encuentra realizando el movimiento por los troncos 9 y 13 antes de llegar a esta cubierta. Sin embargo, aquellos que se encuentran situados en la 01 deben descender a la cubierta 1 para acceder a estos troncos.

4.1.2 Colas

En cuanto a la localización de las principales colas, los resultados obtenidos se recogen en las siguientes imágenes:



Figura 4-11 Colas en la cubierta 4 (dique).



Figura 4-12 Colas en la cubierta 3.

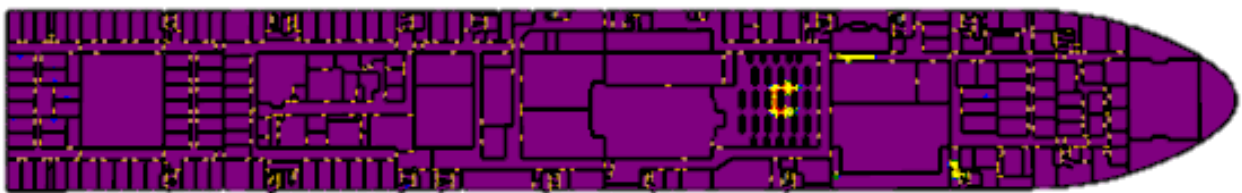


Figura 4-13 Colas en la cubierta 2.



Figura 4-14 Colas en la cubierta 1.



Figura 4-15 Colas en la cubierta 01.



Figura 4-16 Colas en la cubierta skyjump.

Acorde con las principales rutas seguidas por los agentes en cada cubierta, las colas se producen en las escalas cercanas a los sollados y que llevan al dique o a la cubierta de vuelo, así como en los pasillos junto a ellas. Son destacables las que aparecen en la cubierta 2 en los principales accesos al comedor, ya que el personal que conforma la primera serie, que es la más numerosa, pasa por allí antes de dirigirse al dique. Además, el programa considera como una cola el punto de reunión del personal en el dique, en la cubierta de vuelo y el existente en el comedor de la FD en la cubierta 2.

4.2 Análisis estadístico

A partir de los datos obtenidos en las 10 réplicas piloto y mediante la fórmula recogida en el apartado 3.3.1, se han evaluado un total de 22 réplicas, siendo los resultados los recogidos en el Anexo I: Tiempos máximos de embarque para los casos estudiados.

4.2.1 Análisis descriptivo

Mediante la obtención de los datos estadístico reflejados en la Tabla 4-1, se observa como la desviación típica es máxima para la ola 2, que es aquella cuyos resultados se encuentran más dispersos. Además, aunque la ola 1 precargada de popa y proa está formada por un número de agentes mucho mayor que las de helicópteros, la desviación típica asociada a estas últimas supera en dos casos a las de las primeras, señalando que la dispersión no depende únicamente del número de agentes que conforman una muestra.

En cuanto a las dos muestras correspondientes a la ola 1 del desembarco, la de popa posee menores valores mínimos y máximos, y por tanto mayor rango, lo que indica que, aunque las series que conforman ambas son llamadas a la vez, el embarque las tropas en popa finaliza antes que el de aquellas que se dirigen a las embarcaciones de proa, aunque por un corto margen.

Relativo a la asimetría de las muestras, todos los casos excepto el de la ola 2 muestran un coeficiente muy cercano al 0, lo que indica pequeñas desviaciones respecto a la media, aumentando la posibilidad de seguir una distribución normal.

	OLA 1 PRE POPA	OLA 1 PRE PROA	OLA 2	HELO 2 OLA 3	HELO 1 OLA 4	HELO 1 OLA 7
Mínimo	919,500	932,500	3930,250	2235,250	2868,750	4571,500
Máximo	985,250	996,000	4377,250	2265,000	2972,300	4652,250
Rango	65,750	63,500	447,000	29,750	103,550	80,750
1° Cuartil	948,000	948,250	3963,750	2246,000	2899,000	4590,750
Mediana	964,250	953,750	3984,000	2251,000	2906,750	4611,000
3° Cuartil	972,250	981,500	4115,500	2257,500	2928,000	4630,250
Media	960,126	963,879	4047,345	2251,281	2913,574	4611,562
Varianza	296,405	411,616	15945,687	81,684	608,911	584,692
Desviación típica	17,216	20,288	126,276	9,038	24,676	24,180
Asimetría	-0,701	0,217	1,272	-0,217	0,578	0,093
Curtosis	0,023	-1,588	0,572	-1,104	0,318	-1,102

Tabla 4-1 Datos estadísticos.

4.2.2 Análisis gráfico

En primer lugar, los histogramas obtenidos mostrados a continuación incluyen la recta normal asociada a la muestra de datos en color rojo, lo que permite obtener una idea gráfica previa de si la serie estudiada responderá o no a una normal, comprobado posteriormente en la prueba de bondad de ajuste.

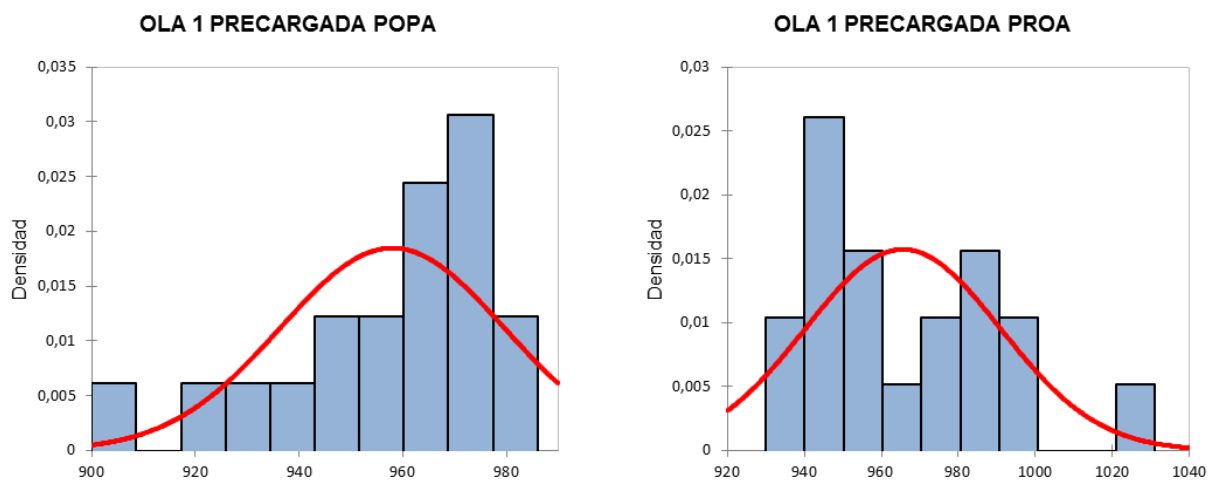


Figura 4-17 Histogramas de la ola 1 de desembarco.

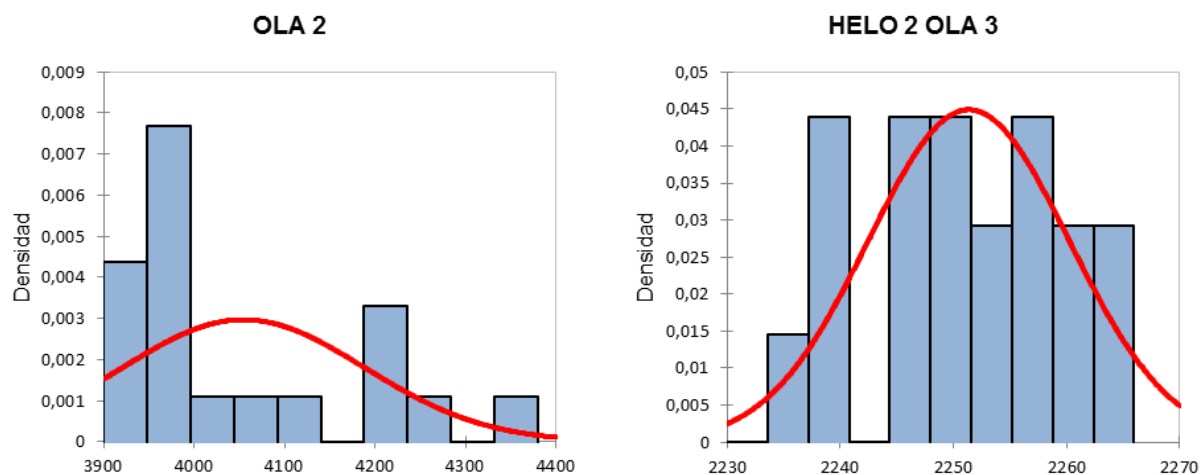


Figura 4-18 Histogramas de la ola 2 y la ola 3 del helo 2.

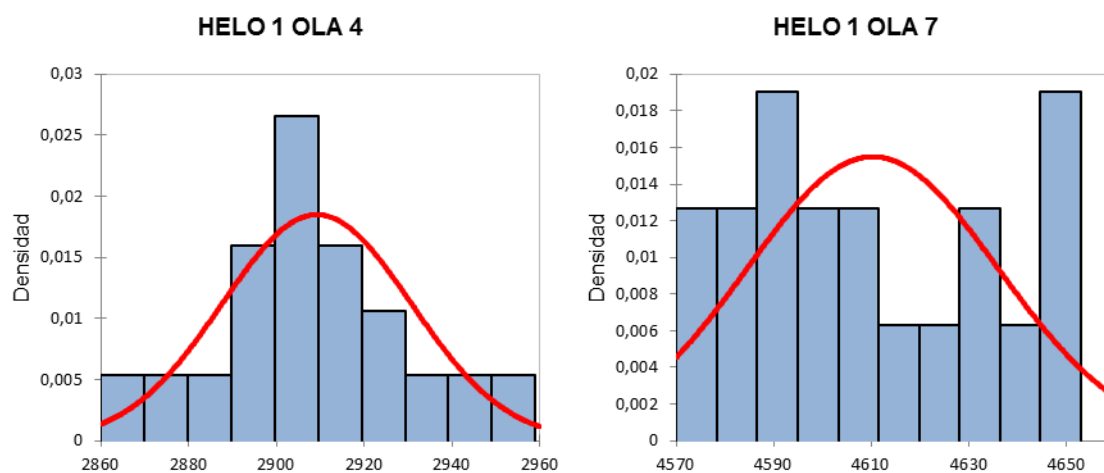


Figura 4-19 Histogramas de las olas 4 y 7 del helo 1.

Por otro lado, permiten observar las diferencias en cuanto a la homogeneidad que existe entre el personal que desembarca por helicóptero y aquellos que lo hacen por LCM, siendo muestras más homogéneas las del primer caso. Esto ocurre debido al elevado número de agentes que conforman las series de LCM estudiadas, donde en función de la velocidad adquirida por los agentes en cada una de las réplicas, los resultados son más propensos a oscilar entre todos los posibles. Sin embargo, en las olas de helicópteros, al estar conformadas por menos personal, los resultados obtenidos de las réplicas tienden a presentar mayor homogeneidad.

Los gráficos *boxplot* obtenidos se muestran a continuación, mostrando el eje y el tiempo en segundos:

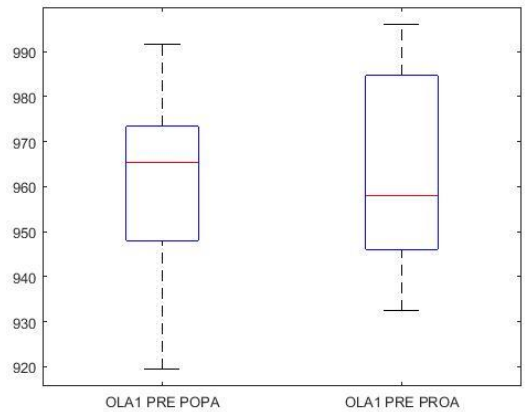


Figura 4-20 *Boxplot* ola 1.

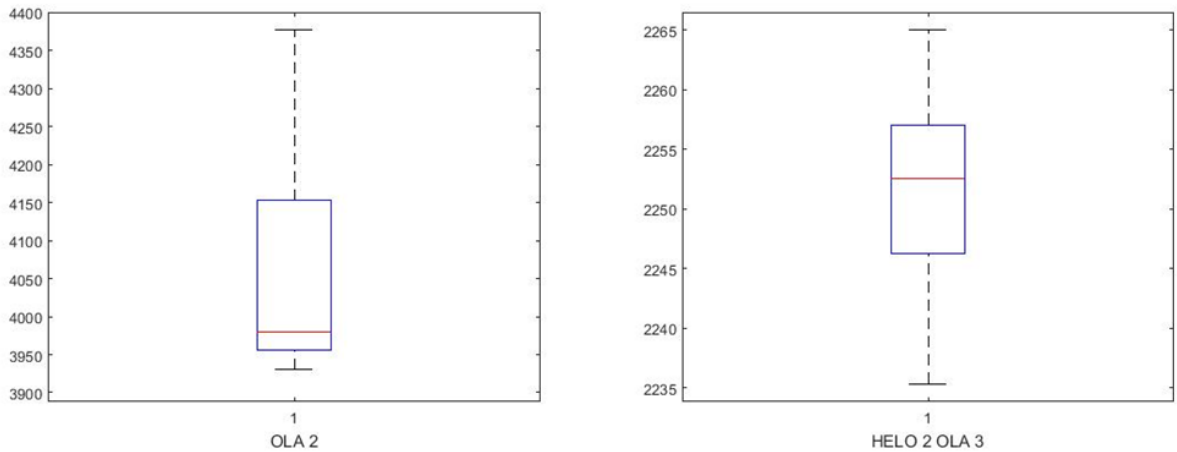


Figura 4-21 *Boxplot* de la ola 2 por LCM1-E y 3 por el helo 2.

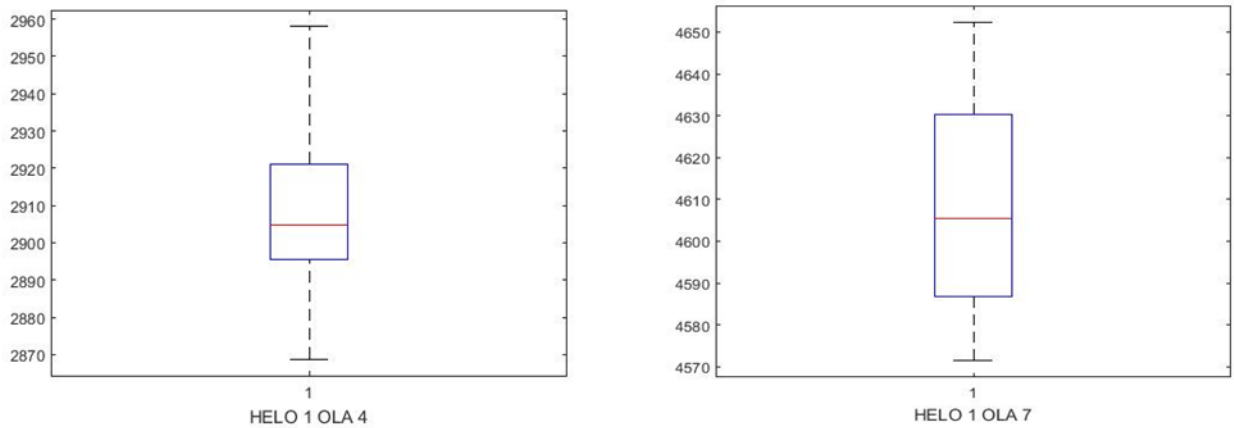


Figura 4-22 *Boxplot* de las olas 4 y 5 del helo 1.

A simple vista se aprecia como los relativos a las olas a desembarcar por medios aéreos se encuentran más centrados en torno a la mediana que los correspondientes a los medios de superficie, debido a la dispersión en los datos causada por un mayor número de personal participante en ellas.

Adicionalmente, se observa la inexistencia de valores atípicos, lo que pone de manifiesto la consistencia de la simulación y de los datos obtenidos.

Comparando el gráfico que contiene a la ola 1 completa, aquellos que se dirigen a las LCM's de popa embarcan antes que los de proa, siendo de nuevo el motivo de esto la distancia de los agentes a los puntos de reunión. Al corresponderse los tiempos máximos y mínimos de ambas con el del primer y último agente en embarcar, se deduce que en estos casos extremos su distancia era mayor en el caso de proa que de popa.

4.2.3 Bondad de ajuste

Una vez realizado el test de Kolmogorov-Smirnov sobre cada una de las poblaciones estudiadas, se ha obtenido un resultado de 1 en todos los casos, lo que implica no poder asumir el hecho de que se correspondan a una distribución normal.

Aunque sea cierto el hecho de que todos los agentes poseen el mismo intervalo de posibles velocidades para ser asignadas, el hecho de tener que atravesar numerosas cubiertas por medio de escalas, las cuales llevan asociadas un factor de reducción, sumando a esto la creación de colas en ellas y los pasillos, da lugar a variaciones de los valores en cada réplica que impiden seguir una distribución normal.

4.2.4 Intervalo de confianza

Para finalizar el análisis estadístico, se ha obtenido un intervalo de confianza para la media para un nivel de significación de $\alpha = 0,05$ para cada uno de los grupos estudiados, quedando los resultados finales como recoge la Tabla 4-2.

	Intervalo de confianza	
Ola 1 Pre Popa	953,0	970,4
Ola 1 Pre Proa	955,0	975,3
Ola 2	3987,6	4111,6
Helo 2 Ola 3	2247,5	2255,6
Helo 1 Ola 4	2897,4	2918,0
Helo 1 Ola 7	4595,9	4620,8

Tabla 4-2 Intervalos de confianza.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En primer lugar, se ha llevado a cabo la compleja tarea de representar un desembarco real en el marco de unas maniobras internacionales de la manera más precisa posible y teniendo en cuenta el mayor número de factores que permitan asemejar la simulación a la realidad. El resultado es una simulación que refleja fielmente el movimiento de los infantes de marina desde sus sollados hasta sus puntos de desembarco, tanto en la secuencia seguida como en las rutas utilizadas.

En el modelado del buque se ha añadido el espacio correspondiente al dique del buque en base a los planos de este. Además, se han conseguido integrar en la simulación los medios de desembarco, tanto aéreos como de superficie, así como unos espacios para su movimiento, dotando al modelo de una mayor consistencia gráfica. Estos medios poseen unos parámetros y forma diferentes acordes con sus particularidades. Por otro lado, se ha parametrizado a las tropas embarcadas según sus condiciones y la programación del desembarco.

Una vez obtenidos los resultados numéricos y gráficos, se ha puesto de manifiesto la importancia de la localización de los puntos de reunión en el buque, así como las escalas y pasillos que conducen a ellos, como condicionantes principales del movimiento de las tropas. A mayor distancia de los sollados al acceso a estas escalas, menor congestión debido a la dispersión del personal. Sin embargo, en los casos en los que los accesos se encuentran muy próximos a los sollados, se ha hecho patente una mayor congestión, tanto en las escalas como en los pasillos junto a ellas. Igualmente, olas muy numerosas implican una amplia diferencia entre el tiempo de llegada del primer individuo al punto de reunión y el último, factor condicionante a la hora de determinar el tiempo de movimiento de una serie. Una posible solución podría ser aumentar el ancho de los pasillos que conducen a los troncos y escalas principales de movimiento de la FD.

Adicionalmente, el análisis estadístico ha aportado unos intervalos de tiempos asociados a la preparación y desplazamiento a los puntos de reunión de las seis olas evaluadas, de manera que permitan, durante el planeamiento de la secuencia de desembarco, una mayor precisión a la hora de realizar el horario de las llamadas a series en el buque. Esto tendrá consecuencias favorables para el desembarco minimizando los desplazamientos por interiores y la espera de las tropas en los puntos de reunión, así como facilitando el control de estas.

Por último, teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, se destaca la importancia de la preparación del personal que conforma cada serie a la espera de ser llamados, de manera que su reacción sea inmediata, disminuyendo los tiempos de reunión de una serie al completo. Otro factor importante observado es la congestión generada por la existencia de puntos de reunión intermedios como el comedor de la FD, cuyas zonas próximas se ven muy afectadas, especialmente en el caso de

olas numerosas. Se debe determinar si su utilización es beneficiosa o no en términos de control y rapidez.

5.2 Líneas futuras

Como consecuencia de determinadas situaciones planteadas durante la realización del presente TFG, se proponen las siguientes líneas futuras:

- Evaluar diferentes situaciones durante el desembarco, realizando combinaciones del número de LCM's y helicópteros disponibles.
- Introducir las Supercats como medio de desembarco adicional.
- Incluir incidencias durante el desembarco, como la inutilización de los troncos de movimiento principales de la FD.
- Realizar la simulación con un software que permita que los agentes interaccionen con derivados de un incendio como el humo y el fuego.
- Aumentar la Fuerza Embarcada hasta la máxima capacidad del buque.
- Disminuir el error mínimo y realizar una mayor cantidad de réplicas, de manera que se compruebe que los resultados se ajustan a la realidad.
- Evaluar estadísticamente un mayor número de olas.
- Utilizar un modelo en base a un BAA de la clase Galicia en lugar del JCI.
- Realizar un modelo de simulación más detallado con datos sobre las tropas que permitan una parametrización más real. Con todo ello, sugerir posibles mejoras en el diseño de futuros buques anfibios.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Peter Cosma, R. Donoso Morillo, F. Pérez Arribas y A. López Piñero, Simulación del movimiento de personas. Aplicación a la evacuación de buques., Comité Español de Automática (CEA), 2005.
- [2] Armada Española, D-CP-09 "Manual de doctrina de maniobra y navegación".
- [3] «Organización Marítima Internacional,» [En línea]. Available: <http://www.imo.org/es/Paginas/Default.aspx>. [Último acceso: 01 2019].
- [4] Organización Marítima Internacional, MSC.1/Circ.1533, 2016.
- [5] Ministerio de Defensa, «Armada Española,» [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/pr efLang-es/03Buquesanfibios>.
- [6] Armada Española, «Armada Española,» Flickr, [En línea]. Available: <https://www.flickr.com/photos/armadamde/>.
- [7] Ministerio de Defensa, «Armada Española,» [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/pr efLang-es/02lhd-juan-carlos-i>.
- [8] P. Bellido Laprada, Cuaderno de características de carga del buque JCI, 2016.
- [9] North Atlantic Treaty Organization, Naval Ship Code, 2014.
- [10] Organización Marítima Internacional, Safety of Life at Sea(SOLAS), 1974.
- [11] Armada Española, D RIM-311 La Brigada de Infantería de Marina, 2013.
- [12] Armada Española, D RIM-321 Batallón de Fusiles, 2016.
- [13] North Atlantic Treaty Organization, ATP-08(D) vol.I "Doctrine for amphibious operations", 2017.
- [14] Armada Española, *DA-F-01 "Manual de procedimientos anfibios"*, 2000.
- [15] A. Sarmiento Vázquez y E. López Sandoval, Una comparación cualitativa de la dinámica de sistemas, la simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes., 2017.

- [16] D. Helbing, P. Molnár, I. J. Farkas y K. Bolay, Self organizing pedestrian movement, 2001.
- [17] E. Ronchi, «Evacuation modelling and Virtual Reality for fire safety engineering.,» de *Seminar on fire protection for physics research facilities*, 2015.
- [18] Korhonen,Timo; Hostikka,Simo, Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac.Technical Reference and User's Guide., 2009.
- [19] Fire Safety Engineering Group, [En línea]. Available: <https://fseg.gre.ac.uk/exodus/index.html>. [Último acceso: 11 03 2019].
- [20] «STEPS. Simulating Pedestrian Dynamics.,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.steps.mottmac.com/key-features>. [Último acceso: 11 03 2019].
- [21] «IES Virtual Environment,» [En línea]. Available: <https://www.iesve.com/>. [Último acceso: 11 03 2019].
- [22] «Thunderhead Engenieering,» [En línea]. Available: <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/>. [Último acceso: 11 03 2019].
- [23] C. Thornton, R. O'Konski, B. Klein, B. Hardeman y D. Swenson, New finding techniques in Pathfinder and supporting research, Manhattan: Thunderhead Engineering.
- [24] I. Rivera Dodero, Estudio y simulación de la evacuación de un buque, 2018.
- [25] Thunderhead Engineering, Pathfinder user's guide, 2014.
- [26] Centro Universitario de la Defensa, Estadística aplicada, 2018.
- [27] Liceo Marta Donoso Espejo, Diagrama de cajas y bigotes.
- [28] Universidad de Granada, «Entorno de autoaprendizaje de la Estadística,» [En línea]. Available: <http://wpd.ugr.es/~bioestad/>.
- [29] Universidad Complutense de Madrid, Contrastes de hipótesis para una muestra.
- [30] «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/stats/kstest.html>. [Último acceso: 12 03 2019].
- [31] Universitat de Barcelona, «El p-valor,» [En línea]. Available: <http://www.ub.edu/stat/GrupsInnovacio/Statmedia/demo/Temas/Capitulo9/B0C9m1t18.htm>.
- [32] F. Pérez Villalonga y J. M. Ropiña Rodríguez, La evacuación del buque de guerra, 2008.

ANEXO I: TIEMPOS MÁXIMOS DE EMBARQUE PARA LOS CASOS ESTUDIADOS

	OLA1 PRE POPA	OLA1 PRE PROA	OLA2	HELO2 OLA3	HELO1 OLA4	HELO1 OLA7
SIM01	991,5	996,0	3956,0	2255,0	2879,5	4571,5
SIM02	976,3	987,8	3968,8	2251,0	2892,0	4647,8
SIM03	972,5	980,0	3930,3	2256,6	2906,8	4576,0
SIM04	966,3	943,8	3945,8	2239,0	2899,0	4630,3
SIM05	974,3	943,8	3945,8	2239,0	2899,0	4630,3
SIM06	941,8	996,0	3956,0	2255,0	2879,5	4571,5
SIM07	964,3	949,3	4190,5	2265,0	2906,3	4600,8
SIM08	963,8	993,5	4377,3	2261,0	2934,8	4636,5
SIM09	971,4	932,5	3977,0	2264,5	2901,3	4587,3
SIM10	953,3	981,5	3963,8	2235,3	2940,5	4611,0
SIM11	984,2	981,5	4022,0	2247,8	2902,8	4592,5
SIM12	946,0	951,3	4229,7	2254,0	2868,8	4652,3
SIM13	931,5	953,3	4261,5	2250,8	2925,0	4607,8
SIM14	985,3	974,8	3934,5	2250,3	2887,3	4603,0
SIM15	972,0	991,3	3984,0	2256,3	2914,8	4582,5
SIM16	967,5	942,5	4202,5	2261,0	2911,0	4590,8
SIM17	958,8	939,8	3965,0	2246,5	2917,3	4612,0
SIM18	950,0	962,3	4115,5	2257,5	2903,0	4650,3
SIM19	919,5	948,3	3994,5	2246,0	2928,0	4586,0
SIM20	944,0	953,8	4071,5	2239,8	2958,0	4626,8
SIM21	967,5	986,4	3974,5	2238,3	2972,3	4623,3
SIM22	958,0	948,5	3984,0	2262,5	2938,0	4624,5

ANEXO II: GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
ATP	<i>Allied Tactical Publication</i>
D-AF	Doctrina Anfibia
JCI	Juan Carlos I
D-CP	Doctrina de Control de Plataforma
MSC	Comité de Seguridad Marítima
SOLAS	<i>Safety of Life at Sea</i>
OMI	Organización Marítima Internacional
Ro-Ro	<i>Roll on – Roll off</i>
BAA	Buque de asalto anfibio
LHD	<i>Landing Helicopter Dock</i>
FD	Fuerza de desembarco
FN	Fuerza naval
LCM	<i>Landing Craft Mechanized</i>
BRD	Batallón Reforzado de Desembarco
SGT	Subgrupo Táctico
NSC	<i>Naval Ship Code</i>
ANEP	<i>Allied Naval Engineering Publication</i>
FIM	Fuerza de Infantería de Marina
EEMM	Estados Mayores
UNAEMB	Unidad Aérea Embarcada
SOTU	<i>Special Operations Task Unit</i>
TTP	Tácticas, técnicas y procedimientos
FUCOM	Fuerza de Combate de Superficie
ZOA	Zona de Operaciones Anfibia
MBC	Movimiento buque-costa
CFAO	Comandante de la Fuerza Anfibia Operativa
R/V	<i>Rendezvous Point</i>
EAD	Equipo de Apoyo al Desembarco
EAH	Equipo de Apoyo a Helicópteros
Grupo TAGLOG	Grupo Táctico Logístico
LOD	<i>Line of Departure</i>
FDS + EVAC	<i>Fire Dynamic System and Evacuation</i>
GCP	Garaje de carga pesada
GCL	Garaje de carga ligera
GAD	Grupo de Artillería de Desembarco
GASC	Grupo de Apoyo de Servicios de Combate
HEALT	<i>Helicopter Employment and Assault Landing Table</i>
TBD	<i>To be determined</i>
BRIMAR	Brigada de Infantería de Marina
TD	<i>Touchdown</i>