

## SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE PERSONAS. APLICACIÓN A LA EVACUACIÓN DE BUQUES

Francisco Pérez Arribas<sup>1</sup>, Amable López Piñeiro<sup>2</sup>,  
Ernö Peter Cosma<sup>3</sup>, Rafael Donoso Morillo<sup>3</sup>

*Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN)*  
<sup>1</sup>Dpto. Enseñanzas Básicas, <sup>2</sup>Dpto. Sistemas Oceánicos y Navales  
<sup>3</sup>Aula Izar  
*Universidad Politécnica de Madrid (UPM)*  
Email: [fperez@etsin.upm.es](mailto:fperez@etsin.upm.es), [alopez@etsin.upm.es](mailto:alopez@etsin.upm.es)

Resumen: La simulación del movimiento de personas es un proceso complejo, no sólo por su modelización matemática sino también por las influencias psicológicas que deben formalizarse en el modelo. Una de las aplicaciones de estos modelos es su uso en la evacuación de buques, aspecto al que las normativas de seguridad están dando cada vez más importancia. Este artículo versa sobre la modelización de la evacuación de buques mediante un micromodelo celular, y la descripción de las principales características del modelo empleado. Copyright © 2005 CEA-IFAC

Palabras Clave: Autómatas celulares, simulación de movimientos de peatones, evacuación de buques, modelización

### 1. INTRODUCCIÓN A LA EVACUACIÓN DE BUQUES EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

En el caso de la seguridad de los buques que se dedican al transporte de carga rodada y pasajeros (RO-PAX o ferries) en tráficos cortos, el último impulso en la normativa de seguridad tiene su origen en los conocidos accidentes del "Herald of Free Enterprise" y del "Estonia", por su importante coste en vidas humanas.

El principal eje de la seguridad se centra en mantener intacto el buque (resistencia al fuego, estabilidad después de averías...), o aislar en todo lo posible la extensión de la zona afectada por el accidente.

La idea base es que el buque, si está aislado en alta mar, es un lugar más seguro que un bote o una balsa. Por ello, los procedimientos de evacuación son distintos que en tierra.

Con esto en mente, el objetivo principal de este trabajo es describir una de las herramientas creadas en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de Madrid para el estudio de la evacuación a bordo de los buques, buscando valores cuantitativos de distintas variables relacionadas con la evacuación y permitiendo el estudio comparativo de distintos casos que permitan una optimización de la disposición general del buque y de la distribución de espacios, desde el punto de vista del movimiento de los pasajeros y de la tripulación durante la evacuación.

Por ello, ante una situación de emergencia, el proceso de evacuación de un buque se realiza en dos fases bien diferenciadas:

- La fase de reunión (*mustering* en inglés) en la que, tras activarse la señal acústica de emergencia, todos los pasajeros deben dirigirse desde su localización actual hasta unos locales seguros

denominados puestos de reunión, donde son controlados por diversos miembros de la tripulación.

- La fase de abandono, que sólo se da en casos extremos, cuando el capitán da la orden, los tripulantes guían a los pasajeros hasta los puestos de embarque, donde acceden a los medios de salvamento (botes y balsas) que les permiten salir del buque y esperar a la llegada de ayuda exterior.

Cabe indicar que no siempre que se realiza la fase de reunión, se lleva a cabo la fase de abandono pues puede que el problema que haya producido la emergencia se haya solucionado. Para estudiar estos procesos hay que tener en cuenta el comportamiento humano y las limitaciones que impone un buque.

Sobre el comportamiento humano en situaciones de emergencia, aunque cada situación es distinta, del estudio de distintas catástrofes se ha llegado a conclusiones muy interesantes (Poole, 1998), de las que se destacan las siguientes:

- La mayoría de las personas NO comienzan a moverse cuando oyen la señal de alarma. Existe un determinado "tiempo de impacto" (tiempo de reacción) durante el cual se va asumiendo la situación, antes de adoptar una postura activa

- Las personas no se suelen mover hacia la salida que está más próxima (que debe corresponder con la vía principal de escape). Por lo general se prefiere un camino bien conocido.

- La gente no se mueve como individuos aislados, sino con un complejo entramado de relaciones de grupo.

- Las señales, carteles e indicaciones de identificación de las rutas de evacuación, no suelen ser vistas. Se ha comprobado que esta situación se acrecienta para los mensajes con texto frente a los basados en símbolos.

- Todas las personas no tienen una capacidad de movimiento similar para seguir las rutas de evacuación. Además de la edad y del estado físico, los jóvenes tienden a tomar decisiones más rápidamente.

- La gente suele atreverse a cruzar una zona con humo, especialmente si conocen el lugar o son guiados por alguien con capacidad de liderazgo.

- En caso de aglomeración no se suele producir automáticamente una situación de pánico que afecte a la seguridad de las personas.

Además, en un buque se pueden producir una serie de situaciones especiales, normalmente inexistentes en edificios u otros medios de transporte. Estas situaciones están ligadas a sus propiedades como objeto flotante, a la situación del entorno y a las

características de la situación de emergencia. Las principales son:

- Desconocimiento de un entorno complejo (disposición general del buque) por parte de los pasajeros.

- Movimientos oscilatorios, que pueden dificultar el movimiento y producir (fundamentalmente las aceleraciones verticales) el mareo de los pasajeros y tripulantes.

- Plataforma aislada y rodeada de un entorno "hostil" para el hombre. El mar (con olas, lluvia y viento) no es un lugar "agradable" de evacuación hasta que llegan los medios exteriores de ayuda. Esto hace que la orden de "abandono del buque" deba de ser muy meditada.

- Los pasajeros y la tripulación suelen ser un conjunto multi-língue y multi-cultural con una respuesta muy diversa y con una mayor dificultad para la comunicación.

Todas estas variables, hacen que el estudio de una evacuación en un buque se complique ante la existencia de distintas situaciones de partida (día, noche, distinto número y disposición de los pasajeros según el tipo de viaje, etc.), multiplicidad de situaciones de riesgo y diversidad de rutas y medios de evacuación.

## 2. NORMATIVA DE LA OMI

La Organización Marítima Internacional (OMI) y en concreto su "Maritime Safety Committee" (MSC) ha desarrollado, a través del "Subcommittee on Fire Protection" (FP), una serie de guías para la realización de estudios de evacuación. Hasta la fecha, se han plasmado en las circulares 909 (MSC-c909) de 1999, 1001 (MSC-c1001) de 2001 y 1033 (MSC-c1033) de junio de 2002 (IMO, 2002).

Esta última, que es la que está en vigor, reconoce en primer lugar la necesidad de realizar más estudios sobre el tema, y plantea que deben estudiarse 4 casos (día / noche para el buque completo y día / noche para la zona más crítica, con vías de evacuación limitadas) con dos métodos alternativos:

- Un método simplificado para calcular el tiempo total de evacuación.

- Un método avanzado (basado en simulación digital).

El método simplificado es un macromodelo basado en los utilizados para el estudio de evacuación de edificios (Nelson, 1995). Supone que se dan una serie de situaciones ideales, pero a cambio impone un coeficiente de seguridad muy grande (2.3), es decir que el tiempo de evacuación es el obtenido

numéricamente y multiplicado por 2.3. Para el cálculo del tiempo de evacuación tiene en cuenta los siguientes tramos (Figura 1):

- El de reacción o respuesta inicial (*A, awareness*) que es de 10 minutos por la noche y 5 minutos por el día.
- El tiempo de traslado (*T, travel*). Es la suma del necesario para llegar hasta los puestos de reunión, más el preciso para llegar desde estos hasta los puestos de embarque. Para su cálculo utiliza un macromodelo de tipo hidráulico, con una función velocidad-densidad modelada en 5 tramos lineales.
- El tiempo de embarque (*E, embarkation*) y el de arriado (*L, launching*). Estos tiempos se pueden obtener por ensayos, datos de los fabricantes, o suponer su suma igual a 30 minutos.

Los valores límites de tiempos han de ser:

$$A + T + 2/3(E + L) < T_{\max} \quad E + L < 30 \text{ min.} \quad (1)$$

$T_{\max}$  es 60 minutos para buques RO-PAX y 80 minutos para buques con más de tres zonas verticales principales.

En el método avanzado, que ha sido el origen de la aplicación Sifbup-S, se engloba en  $T$  los tiempos de reacción y de traslado, indicándose que se deben realizar 50 simulaciones (método de Monte Carlo) de cada caso a estudiar, para disponer de resultados estadísticos válidos y se han de cumplir ciertos tests, que son difícilmente realizables sin la ayuda de un micromodelo que estudie individualmente a los pasajeros, especialmente pruebas relacionadas con el contraflujo de pasajeros.

La normativa y por tanto la modelización, no considera los efectos de movimientos del buque, de grupos familiares, mareo o intoxicaciones y supone que los pasajeros siguen las instrucciones sin perder tiempo. Por ello incluye un margen de seguridad de 600 segundos (casos sin problemas) o de 200 segundos (casos con problemas).

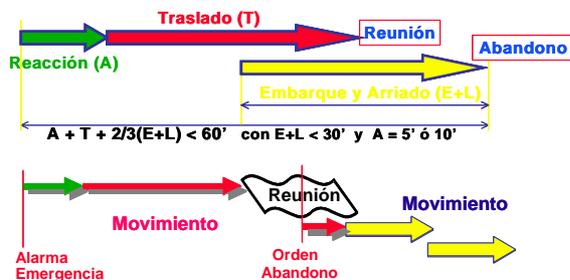


Figura 1 Esquema del tiempo de evacuación

La normativa indica que el cálculo de  $T$  debe realizarse a través de una herramienta de simulación, sin especificar el tipo de modelo a emplear, pero debiendo cumplir con las siguientes características:

- Cada persona debe estar representada de modo independiente. Esto obliga a la utilización de un micromodelo como base de la simulación, modelización que estudia el movimiento de cada pasajero de forma individual, existiendo distintos tipos (Konig, 2001; Pérez, 2001).
- Sus características se determinarán por un conjunto de parámetros, tanto deterministas como heurísticos. Variarán de unos pasajeros a otros.
- Se registrará el movimiento de cada pasajero.
- Las reglas de toma de decisiones y movimientos serán comunes para todos los pasajeros, basándose en un algoritmo universal.
- El tiempo máximo de cálculo entre dos actualizaciones del movimiento de todo el conjunto de los pasajeros será de un segundo.

Por otro lado, indica que los parámetros de descripción de estudio se pueden agrupar en las 4 categorías siguientes:

- Geometría: El modelo que refleja la disposición general del buque debe ser adecuado para la representación de los 4 casos a estudiar (día y noche, con y sin limitaciones), modelando adecuadamente las vías de escape. La posición inicial de los pasajeros debe cumplir unos criterios dados.
- Población: Los tipos de pasajeros y tripulantes se distribuyen en 12 grupos (Figura 11), estableciéndose su distribución estadística. Para cada grupo, se definen su tiempo de reacción y velocidad media.
- Entorno: En este apartado se incluirán el efecto de humo, movimientos del buque, etc. En la MSC-c1033 no se desarrolla, por falta de datos experimentales, y tampoco se ha incluido su efecto en la modelización.

Como puede verse, la normativa deja libertad para la elección del modelo, aunque parece apuntar hacia un “modelado por agentes” o “micromodelo”, en el que cada pasajero se estudia con unas características distintas de las del resto. Tanto nosotros como la mayoría de los grupos que están trabajando en el tema (López, 2003; Konig, 2001; Pérez, 2001), hemos optado por utilizar “autómatas celulares” para realizar la simulación.

Por otro lado, la normativa indica que, como consecuencia del estudio, debe generarse una documentación (de cara a la aprobación por la Administración del plan de evacuación del buque), que debe incluir:

- Una descripción detallada de los algoritmos utilizados.

- Detalles de los cálculos.
- El tiempo de evacuación total (en realidad el de la fase de reunión + 2/3 de E+L).
- La identificación de los puntos de congestión.

Finalmente la normativa da una guía sobre el procedimiento de validación de las herramientas, basándose en la realización de 11 tests propuestos en ésta, en los que se busca comprobar que los pasajeros se mueven de forma adecuada:

- Con velocidades, flujos y tiempos de reacción correctos (tests 1, 2, 3, 4, 5 y 7).
- De forma adecuada ante obstáculos y contraflujos (tests 6 y 8), que son los que más han condicionado la elección de un micromodelo celular.
- Dando resultados coherentes en escenarios complejos y con distintos tipos de limitaciones al movimiento (tests 9, 10 y 11).

### 3. MODELIZACION DEL MOVIMIENTO

Ya se ha mencionado que la reglamentación pide que el estudio detallado de la evacuación ha tratar las características y comportamiento de cada pasajero individualmente, es decir dotando a cada individuo de características independientes del resto, como la edad, sexo o si forman parte de la tripulación o no. Estas características influyen fundamentalmente en su velocidad, pues por ejemplo una persona mayor avanza más lentamente que una más joven, y que son fácilmente modelizables con un modelo multiagente.

Para el estudio avanzado de la evacuación se ha empleado un micromodelo celular multiagente, que divide el espacio o escenario en celdas cuadradas a modo de enorme tablero de ajedrez, por el cual se moverán los agentes (pasajeros, tripulantes) que se estudian de forma individualizada aunque interrelacionada con el entorno en el que se mueven. Existen micromodelos lineales multiagente (Pérez, 2001) pero modelizan con dificultad contraflujos y adelantamientos entre pasajeros.

Existen otros modelos intermedios entre un micromodelo y un macromodelo, denominados mesomodelos (Letizia 2000, López 1999), que emplean el macromodelo para los cálculos por su velocidad y el micromodelo para presentación de resultados. Las prestaciones actuales de los PC, hacen que se tienda al uso de micromodelos como el que se describe en este trabajo.

La modelización del movimiento durante la evacuación se ha dividido en tres niveles que se describirán a continuación.

#### 3.1. Nivel estratégico

La disposición general del buque o la parte de la misma donde se quiere estudiar el movimiento, es importada por lo general a partir de un archivo de intercambio estándar .dxf, y las líneas son transformadas a celdas de 0.4 x 0.4 m, discretizando el espacio tal como se ve en la Figura 9. Las dimensiones de celda son un valor normalmente utilizado en los estudios de evacuación, (Okazaki y Matsushita, 2000; Blue y Adler, 2001) y tiene su origen en el espacio medio ocupado por una persona en situaciones de alta densidad de ocupación, (Hellesoy, 2002; Helbing, 1996). Un pasajero ocupa una sola celda y dos pasajeros no pueden ocupar la misma celda en el mismo instante de tiempo.

Las celdas contienen distinto tipo de información. Pueden representar un obstáculo o una pared y entonces no ser accesibles a los pasajeros. Las celdas accesibles, pueden afectar a la velocidad de los pasajeros que se sitúen sobre ellas o conectar distintas celdas para modelizar las escaleras de abordó, pudiendo con el uso de los mencionados coeficientes de velocidad tratar de forma distinta las escaleras de subida y las de bajada.

El uso de la discretización en celdas del tamaño empleado, es a veces discutido. La mayor deficiencia en los modelos celulares es la pérdida de precisión al reproducir el ancho de los pasillos o de las puertas. Esto es corregido con el uso de los ya mencionados coeficientes de velocidad asociados a las celdas que afectan a la velocidad de los pasajeros.

La forma de dirigir a los pasajeros hacia los puntos adecuados también es un problema importante. La forma en que una persona esquiva obstáculos o adelanta a otras personas es recogida en el nivel operativo, pero la salida que una persona elige es asignada en este nivel estratégico. En el caso de la evacuación, las salidas son elegidas siguiendo el plan principal de evacuación, o el secundario en el caso de que el principal sea inviable debido al fuego o a una inundación. Dentro del buque, el plan de evacuación está claramente indicado mediante señales fluorescentes en los pasillos y aparece indicado en el interior de los camarotes y en los espacios públicos.

#### 3.2. Nivel táctico

La dirección que los pasajeros han de seguir hacia las salidas se halla almacenada en las celdas. Por tanto una persona sabe hacia donde moverse en el siguiente instante de tiempo, llevándole hacia su destino final, bien un punto de reunión o de embarque. El nivel táctico se encarga de dar las direcciones adecuadas a las celdas para dirigir a los pasajeros a las salidas que se les han asignado en el nivel estratégico.

Las celdas pueden contener diferentes rutas a la vez y distintos pasajeros pueden tener asignadas distintas

rutas. Por ejemplo, los miembros de la tripulación tienen rutas distintas de las que siguen los pasajeros, y a menudo ambas rutas se hayan en contraflujo.

En algunos casos, la modelización del movimiento de los pasajeros, concretada en los algoritmos que resuelven como se esquivan y adelantan unos a otros, puede llegar a bloquear el movimiento y la aplicación, en estas situaciones de contraflujo. En estos casos, que pueden darse en pasillos muy estrechos, la solución es generar unos campos de direcciones que tiendan a que los pasajeros de cada ruta tiendan a alejarse de los de las otras, dejando un espacio libre dentro del pasillo.

La asignación de las direcciones a las celdas puede hacerse manualmente o a través de campos potenciales. Mediante esta última opción, basta marcar los puntos de destino que pueden ser múltiples, y los potenciales se extenderán automáticamente por todo el escenario asignando las direcciones a las celdas, de forma que estas conduzcan a la salida o punto de destino más cercano. Se obtiene así la ruta más corta que puede no ser la más óptima pues depende del ancho específico por el que discurre la evacuación. En un buque, estos anchos suelen variar poco de una zona a otra por el empleo de construcción modular, y la ruta óptima tiende a ser la ruta más corta.

Los factores ambientales como los movimientos del buque o una escora debida a una avería, pueden ser modelizados en este nivel táctico. Así por ejemplo, si el buque presenta una escora a estribor durante la evacuación, las direcciones de las celdas pueden definirse de forma que presenten una tendencia a “empujar” a los pasajeros a babor. El giro periódico de balance, de babor a estribor, puede ser modelizado cambiando con el mismo periodo el nivel táctico, de forma que los pasajeros tengan tendencia a moverse de una banda a otra debido al movimiento del buque. El efecto de la escora y de los movimientos, afecta además a la velocidad de avance de los pasajeros, y esto queda recogido siguiendo a (Brumley y Koss, 2000) en el nivel operativo.

### 3.3. Nivel operativo

El comportamiento individual de cada pasajero cuando avanza de una celda a otra, se estudia en este nivel. La velocidad de avance de un pasajero se calcula en función de dos factores principalmente: la densidad de pasajeros en torno a él y el número de celdas disponibles en la dirección de avance. Un pasajero no puede saltar a otros para adelantarlos y deberá pasarlos por su izquierda o derecha siempre que existan celdas libres para hacerlo. Si no es así, deberá esperar al siguiente paso de cálculo para adelantar, o puede moverse lateralmente en algunos casos.

Cada pasajero lleva asociadas dos matrices (Figura 2) orientadas según la dirección de movimiento que el pasajero lleve: una matriz de visión (exterior) y una matriz de cálculo (interior). Estas matrices pueden cambiar su tamaño debido a condiciones de baja visibilidad como por ejemplo debido al efecto del humo.

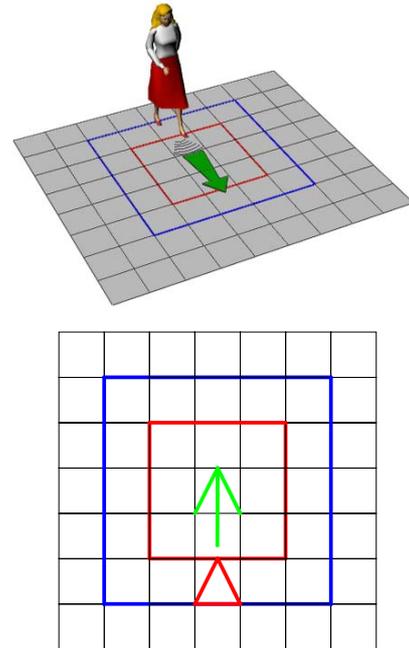


Figura 2. Matrices de visión y cálculo

La densidad de pasajeros ( $D$ , pasajeros/m<sup>2</sup>) es calculada en la matriz de visión. Con esta densidad y siguiendo la ecuación empírica (2) puede obtenerse la velocidad de avance del pasajero en un instante de tiempo.

$$\begin{aligned} S &= S_0 \cdot 1; D < 0.5 \text{ pasajeros/m}^2 \\ S &= S_0 \cdot (1.15 - 0.31 \cdot D); 0.5 < D < 3.5 \text{ pax/m}^2 \\ S &= S_0 \cdot 0.082; 3.5 > D \text{ pasajeros/m}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $S_0$  es un valor que depende del tipo de pasajero (edad, sexo,...) de acuerdo a los valores medios de la Figura 11 obtenida de la MSC-c1033, Anexo 2. Dado que el avance se realiza en celdas de 0.4 m, debido a este redondeo unas veces el pasajero avanzará más que otras, guardándose este exceso o defecto de avance para corregirlo en el siguiente paso de tiempo.

Existen numerosas versiones de la ecuación 2 desarrolladas por distintos autores en función de datos experimentales (Pauls, 1993). El aspecto general puede verse en la Figura 3.

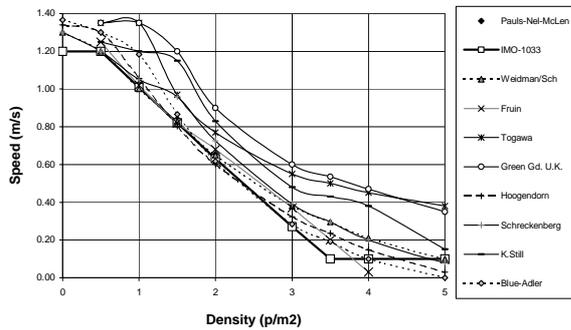


Figura 3 Funciones Densidad - Velocidad

Existen otras expresiones de la ecuación 2 basadas en datos experimentales obtenidas en distintos simuladores que permiten incluir el efecto de los movimientos del buque o de una escora permanente en el plano de avance. De esta forma, cuando se quieren simular estos factores, basta cambiar la ecuación 2 por otra expresión empírica.

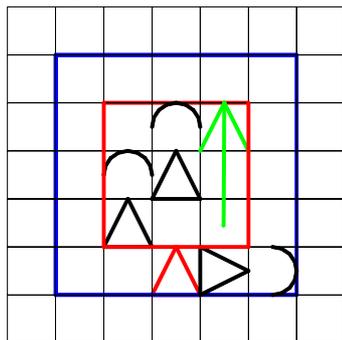
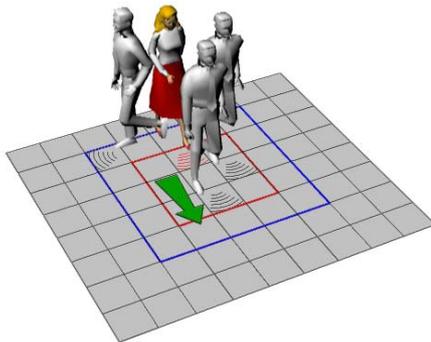


Figura 4. Ejemplo de adelantamiento

A pesar de lo que indique la velocidad de avance, un pasajero sólo puede avanzar el número de celdas que se hallen libres dentro de la matriz de avance. Así que el número de celdas de avance en un paso de tiempo es el mínimo entre el número de celdas libres en la matriz de avance y el valor obtenido a partir de la velocidad de avance de la ecuación 2. Un pasajero elige la calle de avance dentro de la matriz de cálculo, de acuerdo a un algoritmo de optimización. Un ejemplo de los resultados de este algoritmo se ve en la Figura 4 y siguientes. En la primera figura, el

pasajero adelanta por la única calle disponible como indica la flecha.

Cada pasajero reserva la celda que tiene justo delante en la dirección de movimiento (en las figuras esta celda aparece con semicírculos sobre ella). Esta celda no puede ser ocupada o cruzada por ningún otro pasajero (Figura 5), para lograr de esta forma un comportamiento educado de forma que los pasajeros no impidan el paso o corten el camino de los demás, molestándolos, o encarándose a ellos en casos de contraflujo. En esta figura, el pasajero esquiva la celda reservada por otro pasajero.

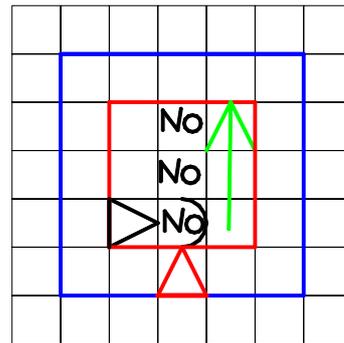
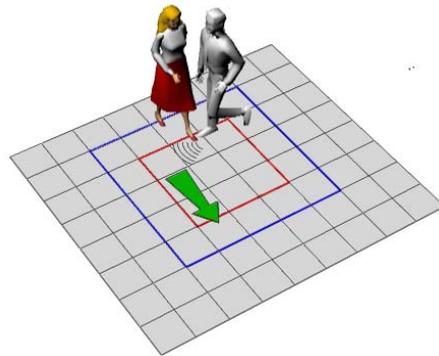


Figura 5 Celdas reservadas

En el nivel operativo se respetan también otras condiciones de contorno, como evitar el “contacto” con otros pasajeros durante el avance. En la Figura 6 el pasajero no puede avanzar puesto que tocaría al pasajero que tiene a su derecha y en este paso de tiempo no puede avanzar de frente o a la izquierda por las características descritas en los párrafos anteriores.

A la hora de avanzar un pasajero se aleja de las densidades altas, tal como viene reflejado en la Figura 7. De esta forma favorece su avance para los posteriores instantes de avance. En esta figura, el pasajero evita la calle central pues en la calle anexa existe mayor densidad de población que si elige la calle izquierda.

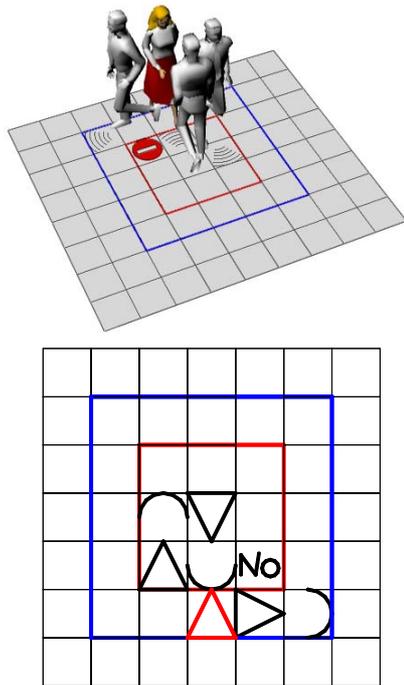


Figura 6. Los pasajeros evitan el contacto con otros pasajeros

Relacionado con lo anterior y buscando también una mejor posición para avances futuros, el pasajero tiende a alejarse de las paredes. Un pasajero tampoco puede avanzar entre otro pasajero y un obstáculo. En la Figura 8 aunque por velocidad el pasajero pudiera avanzar 3 celdas, no podría avanzar a su derecha pues tendría que pasar entre otro pasajero y la pared, y como tiende a alejarse de los obstáculos, elige avanzar por la calle de su izquierda, calle en la que sólo puede avanzar una celda.

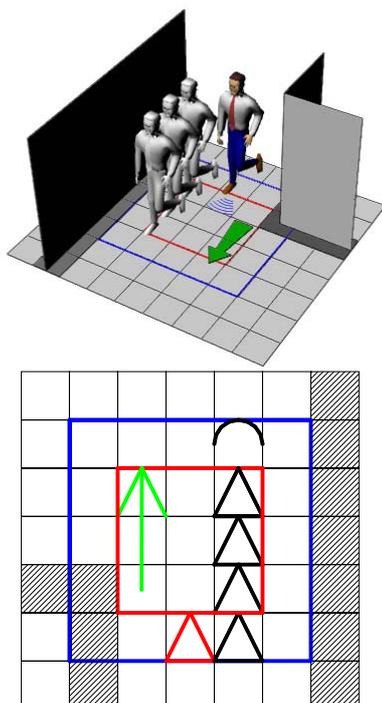


Figura 7. Alejamiento de las densidades altas

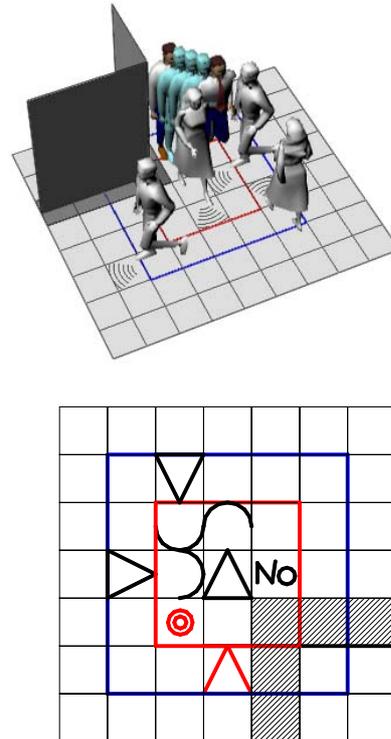


Figura 8. Alejamiento de las paredes

Las anteriores figuras describen gráficamente los principales aspectos recogidos en el nivel operativo, y que se han programado dentro de la aplicación SIFBUP S para modelizar el comportamiento humano. Es un algoritmo relativamente complejo, y que se ha validado resolviendo con éxito los distintos tests propuestos por la normativa existente.

Lógicamente todavía queda un largo camino en la ciencia del estudio del comportamiento humano en situaciones de emergencia, y los modelos numéricos de comportamiento se mejorarán comprobando distintas pruebas experimentales y ejercicios de evacuación que se vayan realizando en un futuro.

Para tener en cuenta la aleatoriedad del comportamiento humano, en el estudio de la evacuación de un buque han de realizarse al menos 50 simulaciones diferentes, tomando como tiempo de evacuación el peor, una vez descartados el 5% de los peores (MSC c 1033).

#### 4. LA APLICACIÓN SIFBUP S

Una vez desarrollado el modelo celular para el movimiento de personas en entornos de geometría compleja, se describe su implementación en una aplicación informática (el Sifbup-S), utilizando como lenguaje de programación Visual-Basic, de forma que se pueda tener mayor control sobre las características del movimiento, entrada y salida de ficheros, y que se pueda implementar futuras modificaciones de las normativas de evacuación.

Nuestro objetivo ha sido desarrollar una aplicación flexible, modular, integrada y orientada al usuario, y

en su concepción ha sido de gran ayuda la participación en el proyecto de un astillero, una compañía naviera y una empresa líder en software de visualización. A modo de resumen de especificación, el Sifbup-S se ha diseñado de tal forma que resuelve los siguientes objetivos:

- Cumple con el método avanzado de la MSC-c1033.
- Su concepto de diseño es abierto, permitiendo la simulación del movimiento de personas en 2D en escenarios complejos (buques, plataformas, edificios, etc.) pudiendo conectarse distintos niveles o cubiertas, con escaleras o rampas.
- Para la definición del caso y su análisis, se utiliza una estructura modular con varios archivos de datos, lo que permite utilizar estudios previos cuando existan modificaciones o ampliaciones en un proyecto. La aplicación trabaja en dos modos diferenciados: Edición y Simulación (en la que se incorpora el análisis).
- Esta estructura permite integrarse con otras aplicaciones, como las de diseño en CAD (importando planos en formato .dxf) y las Sifbup-D y Sifbup-3D. Existe la posibilidad de salidas para su posterior tratamiento con hojas de cálculo.
- Existe la posibilidad tanto de introducción y modificación manual de todos datos a nivel de celda, como con herramientas de ayuda para zonas.
- Se puede partir de un análisis general, aproximado, utilizando entradas de datos rápidas y luego ir refinando el modelo, representando con mayor precisión (puertas, coeficientes de velocidad, etc.) las zonas críticas.
- Además de los tiempos de respuesta global se pueden obtener resultados intermedios gracias a los contadores, y la “simbología dinámica” utilizada, que muestra la variación de la densidad de las celdas en función de cómo evolucione la evacuación.
- La simulación en 2D permite una visión global y de detalle de toda la evolución temporal del caso analizado, con diversas herramientas para facilitar la visualización y la identificación de variables.
- El diseño de la interfaz gráfica es altamente ergonómico, basándose en ventanas y el uso del ratón, lo que facilita el aprendizaje para usuarios de *Windows*.

En la Figura 9 superior, se puede observar el aspecto general de la aplicación en el modo edición. La discretización de un escenario en celdas y el aspecto en el modo de ejecución, aparece en la Figura 9 inferior.

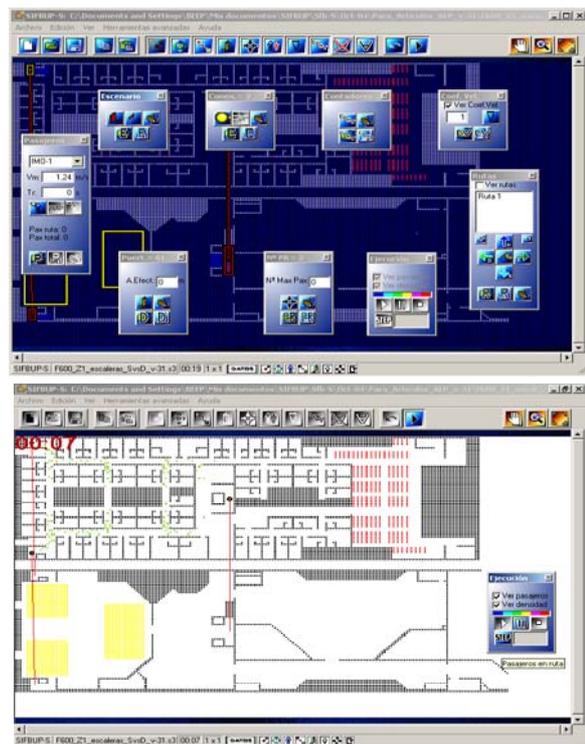


Figura 9. Aspecto general de la aplicación

El proceso de edición puede realizarse en forma manual, si no se cuenta con planos de CAD, o de forma bastante automatizada, si se tienen estudios con otras aplicaciones. En el primer caso, utilizando las ventanas de la Figura 10 se deben realizar las siguientes entradas de datos:

- Representación del escenario. Pueden crearse o borrarse celdas pared u obstáculo, así como abrir o guardarse escenarios.
- Definición de las rutas, pudiéndose definir las rutas manualmente a través de las cuatro direcciones principales, y abrir o guardar distintas rutas.
- Colocación de los pasajeros en sus puntos de origen, pudiendo asignar características individuales de velocidad máxima y tiempo de espera, o emplear los tipos de la OMI definidos en la Figura 11. Pueden guardarse y abrirse archivos con las posiciones y características de los pasajeros.
- Conexiones (escaleras) entre cubiertas o plantas. Marcando las celdas principio y fin de cada conexión. Pueden guardarse y abrirse archivos con las conexiones.

El primer paso puede automatizarse, importando un plano en formato .dxf y/o utilizando las herramientas de copiar y pegar.

Para el segundo, existe una herramienta avanzada de “generación automática de rutas”, basada en un algoritmo de obtención del camino más corto que usa un campo de potenciales de acuerdo las direcciones de movimiento.



Figura 10. Menús de edición de escenario, pasajeros conexiones y rutas

Para los dos últimos pasos se puede partir de la disposición generada en el estudio de evacuación con la aplicación Sifbup-D, quedando cada pasajero colocado en su camarote. Si no se tiene este trabajo previo, como alternativa existen herramientas para la colocación automática de los pasajeros en los locales o en los camarotes que confluyen en un pasillo. En ambos casos, basta con definir, gráficamente, los extremos e indicar el número de pasajeros. Los tipos de pasajeros disponibles (Figura 11) siguen la reglamentación de la OMI, y también se haya disponible la opción de personalizar un pasajero con distintas características de los de la Figura 11.

Grupos de población, pasajeros	Velocidad media (m/s)
Mujeres menores 30 años	1.24
Mujeres entre 30 y 50 años	0.95
Mujeres mayores de 30 años	0.75
Mujeres mayores de 30, movilidad restringida (1)	0.57
Mujeres mayores de 30, movilidad restringida (2)	0.49
Hombres menores de 30 años	1.48
Hombres entre 30 y 50 años	1.3
Hombres mayores de 30 años	1.12
Hombres mayores de 30, movilidad restringida (1)	0.85
Hombres mayores de 30, movilidad restringida (2)	0.73

Figura 11. Tipos de pasajeros de según la OMI

Si se desea un análisis más avanzado, se pueden utilizar las siguiente ventanas (Figura 12) de definiciones complementarias:

- Contadores, para saber el nº de pasajeros que van pasando por un lugar y calcular de esta forma los flujos específicos, medios y máximos.
- Puertas para representar con gran exactitud el flujo real disponible en estrechamientos, puesto que en la zona en que se hallen colocadas, imponen una

limitación al flujo máximos de pasajeros de acuerdo a la normativa MSC 1033.

- Coeficientes de velocidad para ajustar el ancho real del espacio que se ha perdido por efecto de la discretización celular. Tal como se ha mencionado, la mayor deficiencia en los modelos celulares es la pérdida de precisión al reproducir el ancho de los pasillos o de las puertas. Esto es corregido con el uso de los ya mencionados coeficientes de velocidad asociados a las celdas que afectan a la velocidad de los pasajeros.

- Puestos de reunión, que permiten guardar los pasajeros en las zonas de llegada, utilizando estos datos como punto de partida para otro estudio posterior como puede ser la fase de embarque. De esta forma se puede dividir, temporalmente, un problema complejo en varios parciales, estudiando con detalle los resultados intermedios



Figura 12. Menús de coeficientes de velocidad, contadores, puertas y puestos de reunión.

Cuando se está en ejecución cada pasajero aparece con un símbolo triple (que pueden ser ocultados para tener distintos tipos de visualización y aumentar la velocidad de ejecución:

- La forma del símbolo representa el tipo de pasajero (hombre, mujer, mayor, joven,...), ligado a su velocidad máxima.

- El color del símbolo indica la procedencia del pasajero (ruta que sigue).

- El fondo de la celda la densidad de pasajeros en las inmediaciones (alta: tonos rojos, baja: tonos azules).

Lo anterior puede verse más claramente en la Figura 13, en la que se muestran algunos de los distintos tipos de pasajeros empleados y se ve las densidades detectadas en un instante de tiempo para cuatro instantes consecutivos de tiempo.

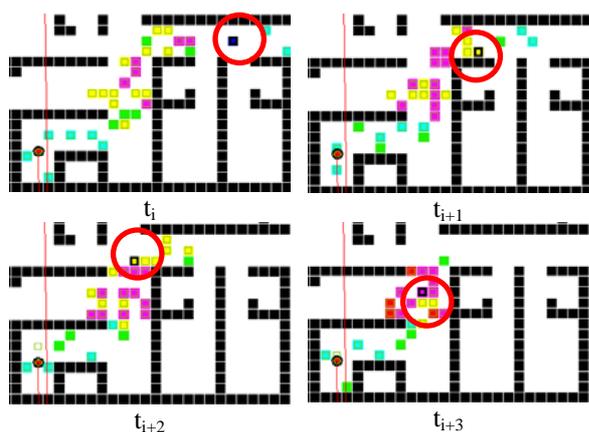


Figura 13. Distintos tipos de visualización en fase de ejecución: tipo de pasajero, densidad y ruta, para distintos instantes de tiempo

Cuando se termina la ejecución aparecen marcadas todas las celdas en las que la densidad ha superado un cierto umbral durante un tiempo apreciable, identificándose de esta forma de modo muy fácil las zonas conflictivas.

El modo de ejecución, se realiza por defecto de forma determinista, lo que facilita los procesos de depuración y análisis iniciales. De acuerdo con la metodología avanzada indicada por la normativa MSC-c1033 existe la posibilidad de un análisis aleatorio, generándose automática y heurísticamente las propiedades de cada pasajero, lo que permite un análisis estadístico del tiempo total de evacuación, y el análisis de múltiples variaciones de velocidad y tiempo de respuesta para un estudio dado.

En cuanto a las salidas, además del tiempo total de evacuación se pueden guardar ficheros con la siguiente información:

- Evolución de los pasajeros en los puntos que se han puesto contadores, permitiendo calcular en el postproceso flujos de entrada y salida en puntos de interés, a lo largo del tiempo.
- Múltiples fotos del proceso, de especial interés en zonas conflictivas de alta densidad. En la Figura 13 se muestran cuatro en las que se puede ver el avance del pasajero marcado.
- Imagen de video de todo el proceso (utilizando herramientas externas), para ver un resumen del proceso.
- Resultados estadísticos (valores medios del tiempo empleado si se realizan distintitos casos de evacuación, desviaciones, histogramas...)
- Posición final de los pasajeros, que puede emplearse para la simulación de la fase de abandono, o como estado intermedio de otra prueba posterior.

- Posición de cada pasajero en cada paso de simulación (trayectoria) siendo posible a partir de este fichero con el postproceso que realiza la aplicación Sifbup-3D, la generación de una simulación en 3D (Figura 14), con inmersión en la escena controlada por el usuario (realidad virtual).



Figura 14. Simulación en realidad virtual a partir de las trayectorias de los pasajeros.

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo, se ha mostrado la necesidad de modelos específicos para el estudio del movimiento de agentes (personas, pasajeros) en escenarios complejos y de gran tamaño como puede ser la disposición general de un buque. Estos modelos han de cumplir con los requerimientos peculiares que posee la evacuación de un buque, y el entorno a veces en movimiento en el que se lleva a cabo.

Los modelos que se utilicen para estudiar la evacuación, han de cumplir ciertos requerimientos de la normativa existente, que en el caso de los buques es más específica y severa que en el caso de evacuación de edificios.

La aproximación al problema abordada en el artículo y que se ha consumado en la programación de la aplicación SIFBUP S, está basada en un micromodelo celular multiagente. La solución propuesta no sólo es eficaz desde el punto de vista teórico, si no que permite simular de forma sencilla todos los aspectos que incluye la evacuación de un buque y superar las limitaciones de estos modelos con la inclusión de coeficientes de velocidad y de puertas que limiten el flujo máximo.

Se ha descrito el nivel operativo usado, que se encarga de controlar las decisiones de los pasajeros en cada instante de tiempo. Con este nivel operativo y con los niveles estratégico y táctico también descritos, se consiguen resolver con éxito los distintos tests propuestos por la normativa existente para un estudio avanzado de la evacuación de un buque.

## REFERENCIAS

- Blue, V., Adler, J. (2001). "Cellular automata microsimulation for modelling bi-directional pedestrian walkways", *Transportation Research B* 35/3, 293.
- Brumley, A., Koss, L. (2000). "The influence of human factors on the motor ability of passenger during the evacuation of ferries and cruise ships", *Conference on Human Factors in Ship Design and Operation*, Londres.
- Nelson, H., H.A. MacLenan (1995). "Emergency movement". *SFPE on fire protection engineering handbook* Cap. 14: NFPA, Nueva York.
- Helbing, D.V. (1996). "*Neue physikalische Modellierungskontexte*". Springer Verlag, Berlin.
- Hellesoy A. (2002). "Evacuation Analysis as a Design Tool". *Hyper 2002 Conference*, Bergen. September.
- IMO (2002). "*Maritime Safety Committee Circ. 1033*", Londres.
- Konig T. et al. (2001). "Assessment of Evacuation of Processes on Passenger Ships by Microscopic simulation". *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Ed. Sharma, Duisburg.
- Letizia, L. (2000), *Developments in Evacuation Systems and Techniques*, Safer-Eurooro Workshop, Madrid.
- López, A. et al. (1999). "Investigación multi-institucional sobre ferry de alta velocidad". 36ª *Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval*. AINE, Cartagena.
- López, A., Pérez, F. (2003). "Ship evacuation optimisation. Tools for master and designer aid". *2nd International Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED'03)*, Londres.
- Okazaki, S.; Matsushita, S. "A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing". [www.anc-d.fukui.ac.jp/~sat/ECS93.pdf](http://www.anc-d.fukui.ac.jp/~sat/ECS93.pdf).
- Pauls J. (1993). "Movement of people". *SFPE on fire protection engineering handbook*. Chapter 13: NFPA, Nueva York.
- Pérez, F., López, A. (2001) "A 2D model to study the evacuation of ship passengers". *Second International Conference "Navy and Shipbuilding Nowadays" (NSN'2002)*, San Petesburgo.
- Poole, T., Springett, P. (1998). "*Understanding human behaviour in emergencies*", Ed. Odyssey, Londres.