



ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE EVACUAÇÃO DE UM NAVIO USANDO A SIMULAÇÃO

JOÃO MIGUEL DE SOUSA E SANTOS

Agosto de 2023

ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE EVACUAÇÃO DE UM NAVIO USANDO A SIMULAÇÃO

João Miguel de Sousa e Santos

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE EVACUAÇÃO DE UM NAVIO USANDO A SIMULAÇÃO

João Miguel de Sousa e Santos

Estudante n.º 1130142

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação do Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira e coorientação da Doutora Elga Costa.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Ao CEO da empresa Douro Azul, Dr. Mário Ferreira, queria agradecer a oportunidade e a disponibilidade por forma a que este trabalho fosse possível de realizar.

Ao Diretor Geral de Operações da empresa Douro Azul, Dr. Rodrigo Mendes pela disponibilidade que sempre demonstrou em me receber e disponibilizar os meios necessários para este trabalho.

Manifesto o meu reconhecimento e maior gratidão ao Professor Doutor Luís Pinto Ferreira, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, por toda a orientação e empenho prestados em prol do sucesso desta dissertação.

À Professora Doutora Elga Costa, da Escola de Hotelaria e Turismo do Porto, agradeço por toda a coorientação e disponibilidade prestada durante o desenvolvimento desta dissertação.

Só é possível ter sucesso nas diferentes fases e projetos das nossas vidas com o apoio incondicional de quem nos rodeia, por isso devo um profundo obrigado aos meus pais e irmã, à minha esposa que me acompanhou durante todo este trajeto e me apoiou incondicionalmente e pacientemente. Dedico também estes agradecimentos aos meus avós e ao meu filho.

A todos os meus amigos, que integraram a minha caminhada durante todo o percurso realizado até este momento, por toda a amizade e boas palavras que souberam dar, o meu sincero obrigado.

página propositadamente em branco

RESUMO

Sabendo que o tempo total de evacuação é um fator determinante para a segurança de qualquer navio, de modo a garantir a segurança e a proteção dos seus tripulantes e tripulação no caso de se depararem com uma catástrofe natural, condições climatéricas adversas, um erro mecânico no navio, um erro provocado pela ação do homem, é fundamental que exista um plano de evacuação de emergência que permita a evacuação de todos os ocupantes no menor tempo possível em segurança.

Assim sendo, a presente dissertação teve como principal objetivo a análise e a melhoria do processo de evacuação do navio MS Douro Elegance. De modo a realizar este estudo, foi utilizada a simulação computacional, com recurso ao *software* Pathfinder, de forma que fosse possível elaborar um modelo de simulação capaz de estudar e analisar diferentes estratégias e métodos de evacuação, encontrar o menor tempo total de evacuação e encontrar possíveis pontos de estrangulamento e de congestionamento.

Por meio do software Pathfinder, foram analisados 6 cenários diferentes para determinar o menor tempo de evacuação, bem como identificar pontos de congestionamento e gargalos. O modelo de simulação foi utilizado para analisar a evacuação de 162 ocupantes (funcionários e passageiros) de um navio de cruzeiro, assumindo que existem 7 botes salva-vidas, cada um com capacidade para 25 pessoas.

Os resultados obtidos nas simulações permitiram concluir que a evacuação mais eficiente (com menor tempo total de evacuação) foi obtida na estratégia 1 com todos os acessos disponíveis, incluindo o elevador operacional e demorou 159.6 segundos para o processo estar completo.

Aferiu-se que os acessos intermédios do navio são críticos para uma evacuação eficaz, visto que são os acessos com mais afluência de passageiros e o lugar do único elevador do navio. Os bloqueios dos acessos intermédios resultam num aumento do tempo de evacuação significativo.

PALAVRAS-CHAVE

Estratégias de Evacuação, Evacuação, Simulação, Simulação Computacional, Navio, Tripulação, Passageiros, *Software* Pathfinder.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

Knowing that the total evacuation time is a determining factor for the safety of any ship, in order to guarantee the safety and protection of its crew and passengers in case of a natural disaster, adverse weather conditions, a mechanical error in the ship, an error caused by the action of man, it is essential that there is an emergency evacuation plan that allows the evacuation of all occupants in the shortest possible time safely.

Therefore, the present dissertation had as main objective the analysis and improvement of the evacuation process of the ship MS Douro Elegance. In order to carry out this study, computer simulation was used, using the Pathfinder *software*, so that it was possible to develop a simulation model capable of studying and analyzing different evacuation strategies and methods, finding the lowest total evacuation time and finding possible bottlenecks and congestion.

Using the Pathfinder *software*, 6 different scenarios were analyzed to determine the shortest evacuation time, as well as identify congestion points and bottlenecks. The simulation model was used to analyze the evacuation of 162 occupants (employees and passengers) from a cruise ship, assuming that there are 7 lifeboats, each with capacity for 25 people.

The results obtained in the simulations allowed us to conclude that the most efficient evacuation (with the lowest total evacuation time) was achieved in strategy 1 with all available accesses, including the operational elevator and waiting 159.6 seconds for the process to be complete.

It was verified that the intermediate accesses of the ship are critical for an effective evacuation, since they are the accesses with the highest number of passengers and the location of the only elevator on the ship. Intermediate access blocks result in a significant increase in evacuation time.

KEYWORDS

Evacuation Strategy, Evacuation, Simulation, Computer simulation, Ship, Crew, Passengers, Pathfinder *Software*.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e pertinência	1
1.2. Questão e objetivos de investigação.....	1
1.3. Opções metodológicas	2
1.4. Apresentação da empresa Douro Azul.....	2
1.5. Conteúdo e Organização da Dissertação.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	4
2.1. Simulação como ferramenta de apoio à decisão	4
2.1.1. Vantagens e desvantagens da simulação	5
2.2. Evacuação de navios – Casos de Estudo.....	6
2.3. Evacuação: Conceito e Fatores.....	11
2.4. Evacuação de Navios de Passageiros – Legislação	12
2.5. Organização Marítima Internacional (OMI)	13
2.6. Softwares de Evacuação.....	13
2.7. <i>Software Pathfinder</i>	14
3. MÉTODOS E APLICAÇÃO	17
3.1. Configuração do Navio MS Douro Elegance.....	17
3.1.1. Convés Inferior.....	18
3.1.2. Convés Principal	21
3.1.3. Convés Superior	23
3.1.4. Tombadilho	25
3.2. Estudo de Simulação	27
3.2.1. Interface Gráfica.....	28
3.2.2. Validação do Modelo de Simulação Desenvolvido	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1. Apresentação de resultados.....	43
4.1.1. Estratégia 1 – Cenário com as escadas frontais inativas (com e sem elevador).....	43
4.1.2. Estratégia 2 – Cenário com as escadas frontais e do meio inativas (com e sem elevador)	47
4.1.3. Estratégia 3 – Cenário com as escadas traseiras inativas (com e sem elevador)	50
4.1.4. Estratégia 4 – Cenário com as escadas traseiras e frontais inativas (com e sem elevador)	53
4.1.5. Estratégia 5 – Cenário com todos os ocupantes posicionados na parte frontal do navio no convés inferior (com e sem elevador).....	56

4.1.6. Estratégia 6 – Cenário de madrugada com a tripulação nas cabines (com e sem elevador)	59
4.2. Discussão de resultados	63
5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	65
5.1. Conclusões finais	65
5.2. Valor Acrescentado para a empresa Douro Azul	65
5.3. Dificuldades Encontradas	66
5.4. Limitações e investigação futura.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE A	73
ANEXO A	87

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Navio MS Douro Elegance	17
Figura 2 - Corredor do MS Douro Elegance.....	18
Figura 3 - Planta MS Douro Elegance – Convés inferior.....	19
Figura 4 – Convés inferior – Cozinha.....	19
Figura 5 - Convés inferior – lavandaria.....	20
Figura 6 - Convés inferior - Armazém alimentos.....	20
Figura 7 - Convés inferior - Cabine tripulação.....	21
Figura 8 - Planta MS Douro Elegance – Convés principal.....	21
Figura 9 - Convés principal - Acesso da cozinha ao restaurante	22
Figura 10 - Convés principal – Restaurante.....	22
Figura 11 - Convés principal - Cabine standard.....	23
Figura 12 - Planta MS Douro Elegance – Convés superior	23
Figura 13 - Convés superior - Hall de entrada e balcão de atendimento	24
Figura 14 - Convés superior - Bar/Sala de estar	24
Figura 15 - Convés superior - Exemplo de suite.....	25
Figura 16 - Planta MS Douro Elegance – Tombadilho	25
Figura 17 - Tombadilho - cápsula dos botes salva-vidas	26
Figura 18 - Tombadilho - Etiqueta da cápsula salva-vidas	26
Figura 19 - Tombadilho - Piscina exterior	27
Figura 20 - Tombadilho - Ponte de comando.....	27
Figura 21 - Ecrã inicial no Pathfinder	28
Figura 22 - Vista 3D do modelo do MS Douro Elegance	29
Figura 23 - Menu de criação de uma área retangular no Pathfinder.....	29
Figura 24 - Menu de criação de uma área poligonal no Pathfinder.....	29
Figura 25 - Menu de criação de uma porta no Pathfinder	30
Figura 26 - Menu de parametrização de portas no Pathfinder.....	30
Figura 27 - Vista 3D dos pisos do modelo de simulação do navio	30
Figura 28 - Menu de parametrização das escadas no Pathfinder	30
Figura 29 - Vista lateral do elevador do navio	31
Figura 30 - Ferramenta de criação de elevadores.....	31
Figura 31 - Convés inferior do modelo de simulação do navio.....	32
Figura 32 - Convés principal do modelo de simulação do navio.....	32
Figura 33- Convés superior do modelo de simulação do navio	32
Figura 34 - Tombadilho do modelo de simulação do navio	33
Figura 35 - Funcionalidade de acrescentar ocupantes a um grupo no Pathfinder	33
Figura 36 - Funcionalidade de adição de perfis de ocupantes no Pathfinder	34
Figura 37 - Menu de escolha de modelos 3D para ocupantes.....	35
Figura 38 - Parametrização da aba "Characteristics" de perfis no Pathfinder.....	36
Figura 39 - Parametrização da aba "Movement" de perfis no Pathfinder.....	37
Figura 40 - Parametrização da aba "Restrictions" de perfis no Pathfinder	38
Figura 41 - Parametrização da aba "Door Choice" de perfis no Pathfinder.....	39
Figura 42 - Menu de criação de comportamentos no Pathfinder.....	39

Figura 43 - Lista de ações disponíveis para serem associadas a um comportamento no Pathfinder	40
Figura 44 - Associação dos ocupantes a perfis e comportamentos no Pathfinder.....	40
Figura 45 - Definição do modo <i>Steering</i> no Pathfinder.....	41
Figura 46 - Visualização 3D dos resultados da simulação	41
Figura 47 - Acessos bloqueados na estratégia 1	43
Figura 48 - Exemplo de comportamento atribuído a um dos ocupantes	44
Figura 49 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 1 com elevadores	45
Figura 50 - Fluxo de ocupantes das salas traseiras dos convés principal e superior na estratégia 1 com elevador.....	46
Figura 51 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 1 sem elevadores	46
Figura 52 - Acessos bloqueados na estratégia 2	47
Figura 53 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 2 com elevadores	48
Figura 54 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 2 sem elevadores	48
Figura 55 - Fluxo de ocupantes das salas traseiras dos convés inferior, principal e superior na estratégia 2 com elevador.....	49
Figura 56 - Fluxo de ocupantes das salas traseiras dos convés inferior, principal e superior na estratégia 2 sem elevador.....	49
Figura 57 - Acessos bloqueados na estratégia 3	50
Figura 58 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 3 com elevadores	51
Figura 59 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 3 sem elevadores	51
Figura 60 - Fluxo de ocupantes dos halls dos convés inferior, principal e superior na estratégia 3 com elevador.....	52
Figura 61 - Fluxo de ocupantes dos halls dos convés inferior, principal e superior na estratégia 3 sem elevador.....	52
Figura 62 - Acessos bloqueados na estratégia 4	53
Figura 63 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 2 com elevadores	54
Figura 64 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 2 sem elevadores	54
Figura 65 - Fluxo de ocupantes nos halls dos convés inferior e principal na estratégia 4 com elevador	55
Figura 66 - Fluxo de ocupantes nos halls dos convés inferior e principal na estratégia 4 sem elevador	55
Figura 67 - Posicionamento dos ocupantes na estratégia 5	56
Figura 68 - Vista de cima do convés inferior	56
Figura 69 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 5 com elevadores	57
Figura 70 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 5 sem elevadores	57
Figura 71 - Fluxo de ocupantes na parte frontal, intermédia e traseira do navio na estratégia 5 com elevador	58
Figura 72 - Fluxo de ocupantes na parte frontal, intermédia e traseira do navio na estratégia 5 sem elevador	58
Figura 73 - Fluxo de ocupantes no hall do convés superior na estratégia 5 com elevador.....	59
Figura 74 - Convés inferior na estratégia 6	59
Figura 75 - Convés principal na estratégia 6	59
Figura 76 - Convés superior na estratégia 6.....	60
Figura 77 - Tombadilho na estratégia 6	60

Figura 78 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 6 com elevadores	60
Figura 79 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 6 sem elevadores	61
Figura 80 - Fluxo de ocupantes nos corredores traseiros na estratégia 6 com elevador	61
Figura 81 - Fluxo de ocupantes nos corredores traseiros na estratégia 6 sem elevador	62
Figura 82 - Fluxo de ocupantes nos halls na estratégia 6 com elevador.....	62
Figura 83 - Fluxo de ocupantes nos halls na estratégia 6 sem elevador.....	63

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Casos de estudo relacionados com o projeto	6
Tabela 2 - Comparação dos tempos de evacuação da simulação real e simulação computacional	42
Tabela 3 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 1 (com e sem elevador)	44
Tabela 4 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 2 (com e sem elevador)	47
Tabela 5 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 3 (com e sem elevador)	50
Tabela 6 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 4 (com e sem elevador)	53
Tabela 7 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 5 (com e sem elevador)	56
Tabela 8 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 6 (com e sem elevador)	60
Tabela 9 - Melhores tempos de evacuação para cada estratégia.....	64

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
OMI	Organização Marítima Internacional
SOLAS	Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar
MARPOL	Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios
ISPS	Código Internacional para a Proteção de Navios e Instalações Portuárias
ISM	Código Internacional de Gestão da Segurança

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é realizada a introdução do tema do trabalho desenvolvido, sendo abordado o seu enquadramento, objetivos, metodologias e a sua respetiva estrutura.

1.1. Enquadramento e pertinência

O acontecimento de desastres naturais, condições climatéricas adversas, erros provocados pelo homem são três constituintes que podem comprometer a segurança de qualquer navio negativamente. A segurança de todos os tripulantes deve ser garantida de tal forma que devem ser desenvolvidas e adotadas medidas com o propósito de diminuir o impacto de possíveis ameaças.

Assim sendo, a evacuação de emergência é uma das principais soluções para reduzir o impacto de algum acontecimento que ponha em causa toda a segurança dos tripulantes e do navio.

Durante emergências, o tempo disponível e a capacidade das rotas de evacuação são ambas limitadas, portanto, o desenvolvimento de planos eficazes de evacuação de emergência é fundamental para garantir a segurança humana e reduzir os danos de emergência (Dulebenets et al., 2019).

Entre uma variedade de fatores que influenciam a eficácia de evacuação de emergência, o comportamento humano é crítico (Pan et al., 2006). Estudos anteriores analisaram vários aspetos do comportamento humano durante uma evacuação de emergência, como o comportamento cooperativo e competitivo (Cheng & Zheng, 2019; Yang et al., 2017), densidade populacional (Rendón Rozo et al., 2019), uso das saídas de emergência pelos evacuados (Liang et al., 2018), e como estes comportamentos podem influenciar uma evacuação de emergência.

Considerando todos estes fatores, torna-se importante a utilizações de ferramentas de apoio à decisão, como as simulações computacionais, que permitem o estudo do problema em questão (Asgary & Yang, 2016; Ferreira et al., 2012).

A simulação é uma ferramenta que permite criar um modelo computacional do sistema real em análise, que possibilita a previsão e análise do desempenho e comportamentos do sistema (Ferreira et al., 2012).

O trabalho aqui apresentado enquadra-se no âmbito da unidade curricular de Projeto / Dissertação /Estágio (PDISE) do Curso de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial.

1.2. Questão e objetivos de investigação

Este trabalho tem como objetivo a análise e a melhoria do processo de evacuação de emergência de um navio. Para isso, foi desenvolvido um modelo de simulação, utilizando o *software* de simulação Pathfinder, para permitir simular a evacuação do navio tendo como base os seguintes pressupostos:

- Identificação e estudo das diferentes particularidades da evacuação de navios;
- Desenvolvimento de uma ferramenta de apoio que permita ensaiar, testar e analisar o plano de evacuação de um navio;

- Identificação de possíveis pontos de estrangulamento e congestionamento do processo de evacuação;
- Análise de resultados.

1.3. Opções metodológicas

A metodologia de investigação escolhida para a elaboração desta dissertação foi o Caso de Estudo. Esta é uma metodologia que permite abordar questões específicas, no cenário em que ocorrem, procurando descobrir e compreender os fenómenos, interpretando-os em contexto (Menezes et al., 2017). O caso de estudo procura “retratar a realidade de forma completa e profunda: tem-se em conta a complexidade natural das situações e as relações das partes” (Amado, 2017). Segundo (Saunders et al., 2019), o caso de estudo é uma estratégia para a realização de uma investigação que envolve uma investigação empírica de um determinado fenómeno no seu contexto de vida real.

Segundo (Crowe et al., 2011), esta metodologia contém cinco fases:

- Definição do Caso – Nesta fase são elaboradas as perguntas para investigação, baseadas na literatura existente e de uma apreciação prévia dos problemas teóricos, importantes para a definição do caso;
- Selecionar o Caso – A seleção do caso de estudo depende do propósito da pesquisa, como tal, nesta fase é realizada a seleção do caso de acordo com a categoria que está inserido (intrínseco, instrumental ou coletivo). Os casos de estudo intrínsecos, constituem o objeto da pesquisa e geram interesse para os investigadores pela sua especificidade. Os instrumentais, aprimoram o conhecimento ou redefinem um problema. Os coletivos, é realizada uma seleção de vários casos de estudo, de forma a serem comparados para melhorar o conhecimento do fenómeno em questão.
- Recolher dados – De modo a haver uma compreensão minuciosa do caso é realizada uma recolha de dados de diferentes fontes, aumentando a autenticidade do mesmo.
- Analise e interpretação dos dados – Os dados devem ser analisados, validados e organizados para oferecerem informação lógica e coerente.
- Reportar os resultados – Nesta última fase, os resultados são publicados e são fornecidas as informações para que se compreenda o processo que foi seguido e como foram alcançados os resultados;

1.4. Apresentação da empresa Douro Azul

É necessário recuar até ao ano de 1993 quando é criada a empresa Ferreira & Rayford Turismo, Lda e é adquirido o barco Vista Douro. Três anos depois, corria o ano de 1996, é adquirida a marca Douro Azul, e com ela surge o barco diário (Princesa do Douro) e o primeiro navio-hotel (Alto Douro). Estas duas embarcações abriram caminho para uma vasta frota de embarcações.

Após o lançamento do navio-hotel Invicta (1999), a réplica do barco Rabelo, Cenários do Douro (2000), do iate Enigma (2001), do Milénio do Douro (2002), dos navios-hotel Douro Queen e Douro Cruiser (2004), em 2011 a Douro Azul apresenta ao público o Douro Spirit; um navio-hotel construído de raiz para navegar no Douro, onde se aposta na inovação tecnológica, spa, ginásio, entre muitas comodidades, com o qual se assume um compromisso com o ambiente através da

redução de consumos e da implementação de práticas socialmente responsáveis, e se abre caminho para uma outra forma de navegar no Douro, ou seja, com luxo, glamour e suprema elegância.

Em 2013, na celebração dos 20 anos da empresa, a Douro Azul inaugurou dois novos navios-hotel - o Ama Vida e o Queen Isabel - que reforçaram a liderança da empresa nos cruzeiros fluviais no Douro. Liderança essa que foi cimentada em 2014 com a inauguração de duas novas embarcações de diferente tipologia, o Viking Hemming e o Viking Torgil, dois navios all-suites que permitiram à empresa posicionar-se num mercado internacional premium (Douro Azul, n.d.).

O crescimento e a expansão geográfica da Douro Azul foram concretizados em 2014 com o estabelecimento da operação comercial no rio Tejo, com a embarcação Trafaria Praia, cacilheiro transformado em obra-de-arte por Joana Vasconcelos que representou Portugal na Bienal de Veneza em 2013, também então operado pela Douro Azul.

Mas a Douro Azul continua, e quer continuar, a crescer, elevando, desta forma, a presença da empresa para um patamar cada vez mais exigente, mas ao mesmo tempo de incontornável consolidação de liderança.

A Douro Azul procura constantemente novos desafios, novas formas de oferecer aos seus clientes um produto e uma experiência de elevada qualidade e inesquecível (Douro Azul, n.d.).

1.5. Conteúdo e Organização da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em 4 capítulos que irão ser explicados mais detalhadamente neste capítulo.

No capítulo 1, é descrito o enquadramento do trabalho, os objetivos que se pretende atingir e as metodologias utilizadas no decorrer desta dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, sendo o principal objetivo deste capítulo enquadrar a simulação como ferramenta de apoio à decisão, apresentar aspetos importantes sobre a evacuação de transportes marítimos e apresentar alguns estudos relacionados com o tema do trabalho.

No capítulo 3 são descritos todos os aspetos do navio em estudo no presente trabalho, o desenvolvimento da ferramenta de simulação proposta, a construção do modelo de simulação, as estratégias adotadas e os resultados obtidos.

Por fim, o capítulo 4 apresenta as conclusões do trabalho e as propostas de melhoramento de possíveis trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

De forma a fundamentar a realização desta dissertação, serve o presente capítulo para elaborar uma revisão bibliográfica das estratégias de simulação usadas na evacuação de navios em casos de emergência. Os conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento do projeto são também abordados, assim como os processos de evacuação, os problemas na evacuação e as diferentes estratégias. O capítulo tem por base a consulta de diversos artigos científicos relacionados com o tema em questão.

2.1. Simulação como ferramenta de apoio à decisão

Existem vários conceitos para definir simulação, e a verdade é que dependendo da utilização ela pode ter vários significados.

A simulação pode ter um papel fundamental na avaliação do desempenho de um sistema operacional, sendo usada como apoio à tomada de decisão uma vez que é uma forma mais barata e mais rápida de construir um sistema e experimentar vários cenários e decisões antes do mesmo ser implementado (Dantas et al., 2016).

A simulação é uma ferramenta de apoio à decisão que permite modelar e analisar o desempenho de sistemas e processos complexos, com um nível de pormenorização que se considere mais ajustado ao caso (Ferreira et al., 2003).

(de Paula Ferreira et al., 2020) define a simulação como uma tecnologia chave para o desenvolvimento de modelos de planeamento e exploração de forma a otimizar a tomada de decisão, assim como o design e operações de sistemas de produção complexos e inteligentes. Também pode ajudar as empresas a avaliar riscos, custos, entraves na implementação e impacto na performance operacional.

(Carillo et al., 2018) afirma que a simulação é a tentativa de recriar um sistema real ao longo do tempo, sendo que se estende por um conjunto de elementos interrelacionados, onde cada um destes elementos está ligado a outro, direta ou indiretamente.

Segundo (Ferreira et al., 2012a), a simulação é uma das ferramentas de suporte no processo de tomada de decisão que permite a projeção e a análise de desempenho em sistemas e processos complexos.

Simulação significa realizar experiências com um modelo construído previamente, em que este imita alguns aspetos do comportamento do sistema em estudo e o utilizador realiza as variações necessários no modelo de forma a avaliar a sua resposta em certas situações plausíveis (White & Ingalls, 2018).

Simulação é um termo genérico que, na simulação computacional, se pode dizer que é fornecida por qualquer programa de computador que imita uma estrutura estática ou um sistema dinâmico do mundo real (Wagner, 2016).

Uma simulação é a manifestação discernível de um modelo, representado por um programa de computador que fornece informações sobre o sistema ou aplicativo sob investigação. Um modelo de simulação refere-se aos algoritmos de computação, expressões matemáticas e equações

que encapsulam o comportamento e o desempenho de um sistema em cenários do mundo real (Abar et al., 2017).

Os métodos de modelagem de simulação dinâmica são usados para projetar e desenvolver representações matemáticas (ou seja, modelos formais) da operação de processos e sistemas para experimentar e testar intervenções e cenários e suas consequências ao longo do tempo para avançar na compreensão do sistema ou processo, comunicar descobertas e informar a gestão e o desenho de políticas (Marshall et al., 2015).

O uso de um modelo de simulação é um substituto para a experiência com o sistema real (existente ou proposto), que geralmente é perturbador, não é econômico ou simplesmente impossível. Assim, se o modelo não for um modelo aproximado do sistema real, quaisquer conclusões derivadas do modelo provavelmente serão erradas e pode resultar na tomada de decisões dispendiosas (Law, 2019).

2.1.1. Vantagens e desvantagens da simulação

A simulação, como outras ferramentas têm vantagens e desvantagens inerentes à sua utilização, que devem ser tidas em consideração de forma a determinar se o uso das mesmas é adequado ou inadequado às diferentes situações.

Segundo a literatura da especialidade, ressaltam-se algumas vantagens que são abordadas com alguma frequência por (Calmon et al., 2016; Carson, 2005; Ferreira et al., 2012b):

- É uma excelente ferramenta para ajudar na tomada de decisão;
- Explorar novas oportunidades, procedimentos ou métodos sem interromper o funcionamento do sistema real;
- Identificação de problemas, pontos de estrangulamento (bottlenecks), testar diferentes opções estratégicas, antes da construção ou modificação de um sistema, com o intuito de procurar otimizar o seu funcionamento;
- Permite um estudo de um sistema com um período existencial de alguma longevidade;
- Permite a análise e avaliação de um sistema para identificação de variáveis que mais contribuem para o seu desempenho.
- A simulação pode ser usada para explorar novas políticas de atribuição de recursos, procedimentos operativos, regras de decisão, estruturas organizacionais ou fluxos;
- Permite a realização de testes a novos designs e layouts sem comprometer os recursos fabris; Tem a capacidade de responder a perguntas do tipo “e se”.

Apesar das vantagens enumeradas, o uso da simulação também possui algumas desvantagens inerentes ao seu uso abordados por (Calmon et al., 2016; Carson, 2005; Ferreira et al., 2012b) entre as quais se destacam:

- Os softwares de simulação são dispendiosos;
- A construção dos modelos de simulação é uma tarefa que requer uma quantidade considerável de tempo e recursos para o seu desenvolvimento;
- Os desenvolvimentos destes modelos exigem treino e recursos especializados, pois os funcionamentos das ferramentas por vezes são de difícil interpretação;

- Não fornece soluções ideais para problemas de casos de estudo, no entanto, permite avaliar o comportamento dos sistemas em diferentes pontos de vista a partir dos cenários criados para o efeito;
- Existem desvios entre o mundo real e a solução simulada;
- Caso o modelo não constitua uma representação válida do sistema em estudo, os resultados da simulação não produzirão informação útil para a tomada de decisão.

2.2. Evacuação de navios – Casos de Estudo

Na Tabela 1 são apresentados vários casos de estudo relacionados com a evacuação de emergência de navios, em que os autores apresentam modelos e algoritmos de forma que simulem diferentes casos de evacuação e apresentem o resultado dos diferentes cenários estudados.

Tabela 1 - Casos de estudo relacionados com o projeto

Referências	Descrição da Simulação
(Kim et al., 2019)	Neste artigo os autores fizeram simulações de evacuações durante o naufrágio do navio MV Sewol que ocorreu na Coreia do Sul e elabora um estudo da influência dos ângulos a que o navio foi exposto no momento da evacuação. Assim sendo, neste estudo considerou-se inclinações de 0, 30 e superiores a 35 graus. Quando o naufrágio começou, o ângulo era nulo, então os únicos fatores que influenciavam a velocidade das pessoas era o congestionamento. Quando a inclinação chegou aos 30 graus, o deck A evacuou totalmente em 439 segundos e o B apenas conseguiu evacuar 97.5% dos passageiros em 438 segundos. Para ângulos de 35 graus ou maiores há uma perda total de atrito e é impossível caminhar, a evacuação teria de ser feita com as pessoas a terem o auxílio de objetos para se conseguirem agarrar.
(Balakhontceva et al., 2015)	Este trabalho apresenta um sistema de simulação multiagente para evacuação de passageiros em caso de inclinação de um navio sob tempestade. Para este estudo estimou-se altura de ondas de menos de 2 metros, de 2 a 3.5 metros, 6 a 9 metros e maiores que 11 metros, com períodos inferiores a 7 segundos, de 7 segundos, 10 segundos e 16 segundos respetivamente. Para ondas com menos de 2 metros, 90 a 100% das pessoas sobrevivem, de 2 a 3.5 metros o estudo revela que apenas 82.5% a 95% das pessoas sobrevive, ondas de 6 a 9.5 metros cerca de a taxa de sobrevivência é de 75 a 85% e finalmente para ondas com mais de 11 metros a taxa desce para 65% a 85%.
(Chen & Han, 2015)	Com o objetivo de aumentar a autenticidade e precisão da simulação de evacuação de passageiros em navios, um novo modelo multi-grid é proposto com base na teoria dos autômatos celulares. Atração, repulsão e atrito também são quantificados no modelo multi-grid para representar o impacto da força de interação entre pedestres. O autor como referência utilizou os resultados dos autômatos celulares para comparar com os resultados do seu modelo multi-grid. Concluiu que num cenário de 600 passageiros, através do método tradicional de autômatos celulares, a evacuação demorou um tempo compreendido entre 500 e 600 segundos, enquanto através do modelo multi-grid a mesma demorou 300 e 400 segundos a ser terminada.
(Cho et al., 2016)	Este estudo usa um modelo que simula os ocupantes existentes num determinado espaço durante uma emergência.

	<p>O modelo adota três fatores comportamentais das pessoas: Individual, o comportamento da multidão e o comportamento de emergência. São comparadas duas variantes do modelo em que a determinação do caminho que o passageiro deve seguir no primeiro caso é feita através de um gráfico de visibilidade representado numa grelha e no segundo o passageiro segue o caminho mais curto até ao destino mais próximo. Outro fator diferenciador é na variável de movimento, em que no primeiro caso é usado o algoritmo de Flocking e no segundo uma correlação de densidade.</p> <p>Assim sendo, para o primeiro caso os passageiros demoraram cerca de 481 segundos até chegarem ao ponto de reunião e 1801 segundos a evacuar, para o segundo caso até ao ponto de reunião demorou cerca de 513 segundos e 1841 até à evacuação total.</p>
(Tan et al., 2019)	<p>Neste estudo os autores pretenderam otimizar um modelo de evacuação de um navio de passageiros Yangtze River Gold nº 1 da empresa Chongqing Traffic Tourism Investment Group Co., Ltd, modelo esse que foi elaborado por (Kuangqi, 2011). Este modelo considera a distribuição dos passageiros, densidade, velocidade e o encontro das mesmas num sítio de reunião.</p> <p>Depois de várias simulações o autor concluiu que houve melhorias em comparação com o modelo original, visto que como resultados o seu modelo evacuou a totalidade da população de 360 indivíduos em 75 segundos, enquanto a melhor solução do original demorava 85 segundos.</p>
(Qiao et al., 2014)	<p>Para o propósito deste estudo é considerado um método para selecionar uma rota de evacuação ideal. Para efeitos de simulação, cada evacuado selecionará a rota considerando a extensão da passagem, o congestionamento real e atributos individuais de comportamento. Para verificar a viabilidade do método, irão simular o cenário de evacuação noturna num layout do navio escolhido previamente. O número total de evacuados é de 103 pessoas e a posição inicial do pessoal será distribuída aleatoriamente. Foram elaborados 3 planos de evacuação a serem testados e cada um passará por 1000 simulações.</p> <p>O plano 1 consiste em que todos os tripulantes selecionem o caminho mais curto, o plano 2 os tripulantes que se encontram na mesma cabine irão evacuar em conjunto, por último, o plano 3 consiste em que cada pessoa evacue o navio individualmente sem nenhuma restrição.</p> <p>Como resultados, o plano 2 e 3 foram os melhores, demorando 62.5 e 62 segundos a evacuar todos os tripulantes respetivamente, enquanto o plano 1 demorou 82 segundos.</p>
(Roh & Ha, 2013)	<p>Neste estudo são realizadas simulações para evacuação avançada de navios usando um modelo de simulação baseado em células.</p> <p>A análise avançada de evacuação de navios é um dos métodos em que o tempo total de evacuação é calculado por meio de simulações, considerando as características de cada passageiro (idade, género, entre outros) e o layout detalhado do navio.</p> <p>A amostra inicial é de 1900 pessoas a evacuar, e o navio considerado é um navio de passageiros. O resultado mostrou que o tempo total de evacuação atendeu aos requisitos. Além disso, o resultado foi comparado com o obtido com o software comercial para análise avançada de evacuação EVI, e a diferença foi de 4% em favor deste estudo.</p>
(Ni et al., 2017)	<p>Para investigar a influência dos obstáculos na evacuação das cabines/navios o autor propõe um modelo baseado em agentes para análise. Foram elaboradas 50 simulações da evacuação da cantina de um navio de passageiros para quatro diferentes cenários. No cenário A, a cantina possuía 36 mesas e 216 cadeiras divididas por 6 linhas e 6 colunas. A simulação para este cenário é feita com 216 passageiros com e sem os obstáculos.</p>

	<p>Para este cenário o autor conclui que existe um aumento de 6% no tempo de evacuação quando não existem obstáculos, pois cria um aglomerado de passageiros na porta de saída que retarda a mesma.</p> <p>No cenário B, as primeiras mesas de cada lado a seguir à porta são removidas assim como os seus ocupantes. Neste cenário o tempo médio de evacuação com obstáculos é de 333.7 segundos e sem é de 311.9.</p> <p>O cenário C, retira-se as duas mesas seguintes às retiradas no cenário B e os seus ocupantes. Neste caso a evacuação sem obstáculos é feita em 298.7 segundos e 301.1 segundos com obstáculos.</p> <p>Por último, no cenário D, apenas estão presentes duas mesas imediatamente a seguir à porta e o tempo de evacuação sem obstáculos é de 315.2 segundos, superior aos 295 segundos com obstáculos.</p> <p>Os autores concluem que os a forma de funil nas saídas podem melhorar a eficiência da evacuação, é importante também identificar a potencial influência negativa dos obstáculos dentro das cabines e fornecer sugestões uteis para o design de navios de passageiros.</p>
(Ha et al., 2012)	<p>Este estudo apresenta uma análise de evacuação usando um modelo de simulação baseado em células. Este modelo divide o espaço em uma grid uniforme, em que cada divisão é chamada de célula. Cada passageiro está localizado em uma célula, e move-se para outra célula de acordo com um conjunto de regras locais associadas com os comportamentos individuais, comportamentos da multidão e evita o contra fluxo dos passageiros.</p> <p>O navio de passageiros neste estudo albergava um total de 1892 passageiros. Foi confirmado que o tempo total da evacuação atendeu aos requisitos. O resultado da simulação foi comparado com o obtido com um software comercial de análise de evacuação (EVi), e foi confirmado que eles se diferenciavam em apenas 5%.</p>
(Azzi et al., 2011)	<p>Este estudo aborda a integração de uma simulação de incêndio e evacuação para avaliar o desempenho do plano de segurança de navios de passageiros quando ocorrem cenários críticos de incêndio a bordo.</p> <p>Para realizar esta análise foi necessária a utilização do software EVi, no qual cada passageiro é tratado como um agente individual, e cada um deles tenta chegar ao local de reunião utilizando a sinalização do navio.</p> <p>Os autores concluem que a reação tardia dos passageiros aos alarmes resulta em consequências fatais, numa amostra de 778 passageiros e 30 membros da tripulação, o estudo demonstra que a evacuação feita sem o auxílio da tripulação demora cerca de 1100 segundos a estar finalizada, enquanto com a ajuda da tripulação esse valor desce para os 950 segundos aproximadamente.</p>
(Klүpfel et al., 2001)	<p>Neste artigo os autores exploram um modelo de autómatos celulares para providenciar uma abordagem mais realística e natural das dinâmicas dos passageiros. O modelo apresentado é usado para simular a evacuação através de um software delineado para o efeito.</p> <p>O cenário é apresentado utilizando uma embarcação de alta velocidade com 100 pessoas a bordo. O caminho de evacuação escolhido é o pior possível, começando a simulação com os passageiros na parte frontal da embarcação tendo de evacuar até à parte traseira do mesmo.</p> <p>Depois de executar 100 simulações, o valor médio de tempo de evacuação foi de 24 segundos por passageiro. O tempo total de evacuação foi de 14 minutos que está dentro do intervalo determinado nos pressupostos iniciais. De modo a melhorar o modelo, o autor propõe-se a rever o mesmo de modo a evitar os <i>bottlenecks</i> causados pelo tráfego nas saídas.</p>
(Balakhontceva et al., 2016)	<p>Neste artigo é apresentado um modelo para simulação de um processo de evacuação de um navio, considerando as diferenças angulares que um navio é sujeito numa situação de tempestade. Para um maior detalhe são considerados fatores como as ondas as inclinações do navio e as dinâmicas da multidão.</p>

	<p>Para o efeito é usado um cruzeiro denominado de “Costa Allegra” com 8 decks, 28.430 m³, 187.69 metros de comprimento e capacidade para 1072 passageiros. São considerados 4 estados do mar (sem ondulação, 5,7,9) e 4 valores do ângulo de direção das ondas (0°,30°,60°,90°). Como resultados apenas com 60° de ângulo é que a evacuação total com o mar em estado 9 não é feita mais lentamente, que é ultrapassada pelo estado 7. Em todos os outros ângulos o tempo total de evacuação tem uma relação direta ao estado do mar, onde os estados mais calmos são evacuados mais rapidamente que os estados mais agitados.</p> <p>Os autores concluem ainda que o tempo de evacuação aumenta com a intensidade do movimento do barco. Como era de se esperar, os casos mais favoráveis são os que há menos agitação, e o menos favorável é o aquartelamento (proa relativa de 60°), quando o mar é normalmente considerado o mais perigoso em condições de tempestade.</p>
(Muradi & Mutmainnah, 2020)	<p>O autor deste artigo propõe-se a fazer uma análise qualitativa de evacuação de navios de passageiros com avaliação de risco de incêndio usando a abordagem NFPA 551. O navio em estudo é um 2000 GT de 68.5 metros, 5 decks e com capacidade para 514 passageiros e 36 membros do staff.</p> <p>Para começar a análise o autor identifica as rotas de evacuação do navio baseada em vários critérios existentes no protocolo NFPA 551.</p> <p>De seguida são identificados os tipos e as localizações dos extintores existentes no navio.</p> <p>Através do tratado marítimo denominado de “Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS Convention), o autor identifica os lugares do navio onde a frequência de incêndios e o risco associado é maior baseando-se em dados recolhidos.</p> <p>Por fim usa um método qualitativo para fazer uma avaliação do risco.</p> <p>O autor conclui que para este objeto de pesquisa não foram atendidos os critérios de segurança do passageiro, pois existem rotas de evacuação que passam por áreas com alto nível de classificação de risco, portanto o mesmo afirma que é necessário reorganizar as rotas de evacuação de modo a evitar essas mesmas áreas de alto risco de incendio. Ele aponta a localização da cozinha como altamente prejudicial à estrutura de rotas existente.</p>
(Wang et al., 2014)	<p>Neste artigo é apresentado um modelo de simulação de pedestres baseado em agentes denominado de CityFlow-M, onde é aplicado num caso de evacuação de um navio de passageiros. Este algoritmo varia de um já existente chamado CityFlow adaptando-o para o CityFlow-M que é a versão marítima.</p> <p>Para este estudo, foi considerado um navio com 3 decks, em que no deck 1 tem 3 zonas de reunião, o deck 2 tem apenas uma e no deck 3 nenhuma.</p> <p>Para a simulação foram considerados 1349 passageiros, em posições iniciais aleatórias.</p> <p>Os resultados foram comparados com uma base de dados já existente, e o autor concluiu que o processo de evacuação completo para o algoritmo CityFlow-M demorou cerca de 50 segundos a mais que os dados já existentes.</p>
(Hu & Cai, 2021)	<p>Este artigo propõe um modelo para melhorar a eficiência da evacuação em navios cruzeiro, controlando a densidade de pessoas.</p>

	<p>A partir dos resultados da simulação, concluiu-se que existe uma densidade grande de passageiros nas escadas o que leva a sérios constrangimentos. Neste estudo utilizaram-se o Algoritmo Evolucionário com Inspiração Quântica (QEA) e o Algoritmo Genérico (GA) que serviram de comparação aos dados recolhidos pelo modelo do autor. A inclinação da curva de QEA e GA começou a aumentar gradualmente em relação à curva dos resultados do modelo do autor após 100 segundos do início da evacuação, o que significa que os passageiros começaram a fazer a passagem entre escadas antes dos 100 segundos, e o número de passageiros que conseguiram a evacuação foi maior em relação aos dados originais. Após os 200 segundos a diferença entre o QEA e GA comparativamente aos resultados originais foi ainda maior, indicando que o número de passageiros evacuados nesse período foi maior.</p>
<p>(Hu et al., 2019)</p>	<p>Neste estudo, um modelo multi-grid foi utilizado para simular o processo de evacuação de navios de cruzeiro. Este modelo pode representar com precisão o tamanho do corpo humano e o tamanho dos corredores do navio.</p> <p>A orientação dos passageiros foi adicionada ao modelo e as regras para movimentação e conversão dos passageiros foram definidas. Além disso, a relação entre a orientação dos passageiros e a velocidade de caminhada em condição inclinada foi analisada em detalhe.</p> <p>Através da análise do resultado da simulação sem inclinação vertical, verificou-se que a área D6 era o <i>bottleneck</i> da evacuação total, pois era nesta área que se precisava de mais tempo para evacuar os passageiros.</p> <p>Quando a inclinação foi igual ou menor que 15 graus, o tempo de evacuação praticamente se manteve inalterado, enquanto nos 20 graus de inclinação já existe um ligeiro aumento do tempo de evacuação, dos 25 graus para cima, a diferença já é de quase 100 segundos a mais comparativamente aos casos com ângulos menores.</p>
<p>(Pitana & Kobayashi, 2008)</p>	<p>O estudo verifica, com recurso à simulação computacional, a evacuação de passageiros de um navio cruzeiro, devido a um Tsunami, onde o tempo máximo para a realização da evacuação em segurança é de 6000 segundos. O objeto do estudo é um navio de grandes dimensões, com capacidade máxima de 4160 pessoas, localizado junto ao Tempozan Passenger Terminal, no porto de Osaka, no Japão. Para realizar este estudo foi utilizada a simulação de eventos discretos, com recurso ao software Micro Saint Sharp 2.5, onde foram considerados vários cenários de evacuação com base na norma MSC.1/Circ.1033, onde são consideradas as condições durante a manhã, dia e noite. Os resultados mostram que no cenário de dia, todos os passageiros podem ser evacuados em segurança, se a saída do deck 7 para o Tempozan Passenger Terminal, for larga o suficiente para passar duas ou três pessoas ao mesmo tempo. Nos cenários de manhã e à noite, foi possível verificar que os passageiros não são evacuados antes da chegada do Tsunami. Foi também concluído, que apesar de no cenário de dia ser possível evacuar todos os passageiros, será difícil para o navio após esta evacuação, evacuar para uma área de ancoragem de emergência.</p>

A revisão bibliográfica de artigos relacionados com a simulação de evacuação de navios permitiu comprovar a importância do uso de ferramentas de simulação no apoio à decisão em caso de emergência. Ao verificar os resultados obtidos nos diferentes estudos analisados é possível constatar a importância da simulação para a melhoria dos processos de evacuação, dado que ela permite identificar os fatores principais que influenciam a evacuação de pessoas, os pontos de estrangulamento e o tempo necessário para a evacuação de pessoas em segurança. Estes fatores são muito importantes na análise da segurança de navios em casos de ameaças que originam situações de evacuações de emergência, uma vez que permitem prever acontecimentos e retificar falhas e fazer melhorias, de forma que possa ser feita a evacuação dos navios em segurança.

2.3. Evacuação: Conceito e Fatores

Segundo (Schadschneider et al., 2009), a evacuação é a saída de um local, edifício ou embarcação devido a uma potencial ou ameaça real. Nos casos descritos acima as dinâmicas da evacuação podem ser complexas devido ao grande número de pessoas envolvidas e as interações entre si.

(Kobes et al., 2010) afirma que o processo de evacuação é caracterizado por três atividades básicas:

- A consciência do perigo por estímulos externos;
- A validação e a resposta aos indicadores de perigo;
- O deslocamento para um local seguro.

(Kinatered et al., 2015) divide a evacuação em duas fases distintas, a pré-evacuação e o período de evacuação. O período de pré-evacuação engloba o momento do acontecimento que leva ao alarme, que é seguido por a decisão de evacuação e quando a mesma começa. O período de evacuação começa quando as ações de evacuação começam efetivamente.

Uma evacuação de edifícios eficiente é crucial para salvar vidas durante uma situação de incêndio. A tomada de decisão governa cada movimento em direção a uma segurança local, como a escolha de rotas e saídas e a velocidade e direção de movimento (Gao et al., 2022).

Segundo (Hadzic et al., 2011), o planejamento de evacuação envolve a construção de planos, para uma rápida movimentação das pessoas de uma determinada área afetada pela ameaça ou perigo para áreas seguras.

A evacuação tem sido amplamente utilizada como uma resposta de emergência eficaz e estratégia de mitigação para proteger humanas populações contra vários desastres e eventos catastróficos. Um plano bem definido e flexível é o pré-requisito para o implementação bem-sucedida de uma evacuação urbana ou regional em grande escala. As últimas três décadas assistiram a grandes esforços de pesquisa que contribuíram para o desenvolvimento de políticas e métodos de planejamento de evacuação (Xie et al., 2010).

Segundo (Chiu & Zheng, 2007), as estratégias de evacuação geralmente caracterizam-se de duas diferentes maneiras, desastres de curto prazo ou sem aviso prévio. Evacuação de desastres de curto prazo têm um tempo de espera desejável entre 24 e 72 horas, permitindo a que as agências de gestão de emergências determinem estratégias alternativas de evacuação com base nos impactos esperados do desastre. Uma evacuação sem aviso prévio ocorre quando um incidente inesperado e de grande escala acontece. As evacuações destes eventos geralmente são feitas imediatamente após a ocorrência de tal evento.

A evacuação é definida, geralmente, como o movimento coletivo de pessoas e o modo de transporte utilizado. As evacuações são eventos de “ida e volta”. Existem três tipos de evacuações definidas pelo tipo de ordem de evacuação: obrigatória, recomendada e voluntária (Alsnih & Stopher, 2004).

Segundo (Ghasemi et al., 2019), um programa de logística na fase de resposta a desastres inclui dois objetivos. O primeiro objetivo é transferir feridos pessoas de áreas danificadas para abrigos, hospitais e outros centros médicos de emergência, e o segundo objetivo é enviar socorro

suprimentos de armazéns ou fornecedores pré-designados para as áreas afetadas. A evacuação é realizada no início da fase de resposta e remove os feridos da área afetada. O planeamento eficaz das atividades logísticas durante a fase de resposta pode reduzir drasticamente as mortes de indivíduos. Além disso, neste contexto, recursos existentes, bens e os veículos são geralmente inadequados. Portanto, a localização adequada de centros de cuidados temporários e acomodações temporárias centros e alocação ótima deles podem reduzir as perdas financeiras e humanas.

A gestão do tráfego de evacuação é crítica porque a vida das pessoas está em risco e se não for planeada e conduzida de forma eficaz, o aumento do tráfego que está muito além da capacidade da rede de transporte, pode causar congestionamento e pode deixar os evacuados em perigo, possivelmente resultando em mais perdas (Bayram, 2016).

Uma resposta rápida e uma evacuação oportuna são ações cruciais responsáveis por salvar vidas durante desastres naturais e, portanto, os vários aspetos das respostas humanas durante desastres têm sido estudados há décadas. O comportamento de evacuação é uma ação chave responsável por salvar vidas, especialmente durante desastres de início rápido. Em relação ao aspeto comportamental, os processos de evacuação podem ser amplamente decompostos em comportamentos que antecedem as evacuações e comportamentos de evacuação (Makinoshima et al., 2021).

2.4. Evacuação de Navios de Passageiros – Legislação

Através do Decreto-Lei nº 93/2020, de 3 de novembro o Artigo 6-º alíneas a) e b) e Artigo 7-º alíneas a) e b) é possível a consulta de medidas de segurança para os novos navios e medidas de segurança para navios existentes respetivamente (Governo Português, 2020).

Os artigos mencionados anteriormente remetem-nos para o anexo I deste mesmo Decreto-Lei nº 93/2020, de 3 de novembro.

Neste anexo no capítulo II-1, na Parte D, que se refere às instalações elétricas, o ponto 3 das fontes de energia elétrica de emergência e subponto 3.1 diz que, deve haver em todos os navios uma fonte autónoma de energia elétrica de emergência e um quadro de distribuição de emergência, situados acima do pavimento das anteparas em local facilmente acessível e que não seja contíguo às anteparas delimitadoras dos espaços de máquinas da categoria A ou dos espaços onde estão instaladas a fonte de energia elétrica principal ou o quadro de distribuição principal.

No capítulo II-2, na Parte A, que faz referência à Prevenção, deteção e extinção de incêndios no ponto 2.4.3 diz que os navios devem ser construídos com materiais incombustíveis aprovados; além disso, todos os materiais utilizados na sua construção e montagem devem ser também incombustíveis, podendo, no entanto, ser permitidos folheados combustíveis desde que satisfaçam outras prescrições do presente capítulo;

No capítulo III, que faz referência aos meios de salvação, o ponto 2.1 diz que todos os navios devem dispor com base na sua classe de, pelo menos, meios de socorro radioelétricos, respondedores de radar, meios de salvação pessoais, embarcações de sobrevivência, embarcações de socorro, dos sinais visuais de socorro (paraquedas) e dos aparelhos lança-cabos especificados na tabela seguinte e respetivas notas.

Existem ainda alíneas durante todo este decreto que fazem referência à Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS) que é explicada no subcapítulo seguinte.

2.5. Organização Marítima Internacional (OMI)

A Organização Marítima Internacional (OMI) é uma agência especializada das Nações Unidas responsável pelo estabelecimento de diretrizes e regulamentos para a segurança marítima. A OMI desenvolve e promulga uma série de convenções e códigos que estabelecem os padrões internacionais para a segurança, proteção ambiental e eficiência operacional dos navios. Algumas das principais convenções e códigos da OMI relacionados à segurança marítima incluem:

Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS): Esta é a convenção mais importante da OMI no que diz respeito à segurança marítima. Ela estabelece padrões e requisitos detalhados para a construção, equipamento e operação de navios comerciais em relação à vida humana no mar. A SOLAS abrange diversos aspectos, como estabilidade, equipamentos de segurança, sistemas de combate a incêndio, procedimentos de evacuação, sistemas de comunicação, treino da tripulação entre outros (Organização Marítima Internacional, n.d.-b).

Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL): Esta convenção estabelece padrões internacionais para prevenir a poluição do ambiente marinho causada por navios. Ela abrange diversos aspectos, como descarga de óleo, substâncias químicas nocivas, esgoto, lixo e gases de escape (Organização Marítima Internacional, n.d.-a).

Código Internacional para a Proteção de Navios e Instalações Portuárias (ISPS): Este código estabelece medidas de segurança para proteger os navios e as instalações portuárias contra ameaças de atos de terrorismo. Ele define os requisitos para a segurança do navio, medidas de segurança portuária, procedimentos de controle de acesso, treino da tripulação e cooperação entre os governos e as partes interessadas (Organização Marítima Internacional, n.d.-d).

Código Internacional de Gestão da Segurança (ISM): Este código estabelece padrões para a gestão da segurança operacional e a proteção ambiental em navios e empresas de transporte marítimo. Ele exige que as empresas implementem um sistema de gestão da segurança que abranja aspectos como políticas, procedimentos, treino e avaliação de riscos (Organização Marítima Internacional, n.d.-c).

2.6. Softwares de Evacuação

Um *software* de simulação é desenvolvido para validações de modelos. As simulações envolvem principalmente velocidades e distâncias entre indivíduos. O modelo pode ser integrado em ferramentas para análise de escolhas prováveis de pessoas em diferentes cenários, e verifica soluções para reduzir as interferências homem-ambiente durante o processo de evacuação (Bernardini et al., 2014).

Os *softwares* de simulação de evacuação, são usados para avaliar e desenvolver planos de evacuação de emergência, avaliando um momento contínuo ou estático de um determinado contexto em um instante específico no tempo (Lochhead & Hedley, 2019).

Segundo (Berticelli et al., 2018), os *softwares* de simulação são ferramentas para determinar o tempo necessário de evacuação de um edifício.

As ferramentas de simulação tornaram-se suficientemente confiáveis para prever com precisão, em contextos específicos, simular as dinâmicas e fluxos dos pedestres e destacar com antecedência possíveis situações críticas (Federici et al., 2014).

(Liu et al., 2016) define os métodos de apoio à decisão para problemas relacionados com evacuações de emergência classificando-os como análises matemáticas ou simulações computacionais.

2.7. *Software* Pathfinder

Para a realização deste trabalho foi escolhido o *software* de simulação Pathfinder desenvolvido pela empresa Thunderhead Engineering.

Este *software* tem como principal capacidade a simulação da evacuação de edifícios, veículos entre outros, com um elevado número de pessoas e com *layouts* complexos. Como ponto de partida, este *software* permite criar um modelo computacional, onde os ocupantes dos edifícios irão interagir entre si e tomar decisões de caminhos a seguir até ao local final de evacuação. Isto permite compreender o sistema e ambiente do estudo e descobrir pontos de estrangulamento e gestão do edifício ou transporte (Thunderhead Engineering, 2023).

Através do manual disponibilizado pela empresa no seu *website* (Thunderhead Engineering, 2020), pode-se consultar as diversas funcionalidades que o *software* Pathfinder oferece, que entre elas se destacam:

- Interface gráfica – o *software* oferece uma interface gráfica interativa para o desenvolvimento do modelo de simulação. Os resultados da execução da simulação podem ser visualizados com recurso a ferramentas 2D e 3D, através de vários ângulos que podem ser alterados enquanto a simulação decorre pelo utilizador.
- Criar perfis – Os perfis permitem definir características para um grupo de ocupantes, como velocidade, escolha da saída de emergência, entre outros. No entanto, cada ocupante apenas pode pertencer a um perfil.
- Criar Comportamentos – Os comportamentos são associados aos ocupantes e representam as ações que cada ocupante irá fazer durante o processo de evacuação. Pode-se fazer com que o ocupante espere em determinado local por um determinado tempo e depois comece a evacuar, ou fazer com que antes de se dirigir à saída vá a determinado local para simular alguma outra ação. Da mesma forma que os perfis, um ocupante só poderá ter um comportamento associado.
- Adicionar Ocupantes – O *software* dá oportunidade de adicionar ocupantes ao modelo de simulação. É possível adicionar um grupo de ocupantes ou adicionar ocupantes um a um. Ao adicionar ocupantes em grupo, eles irão ter um laço social entre si, e durante o processo de evacuação irão procurar as pessoas do seu grupo e só depois irão proceder à evacuação. Os ocupantes são representados por uma forma cilíndrica, triangular ou por um boneco 3D de uma pessoa real.

- Adicionar Elevadores – O Pathfinder permite a criação de elevadores de forma que os ocupantes façam a passagem entre pisos. Para que o ocupante solicite um elevador o mesmo deverá estar a pelo menos 0.5 m da porta do elevador. O mesmo não efetua paragens mesmo que seja solicitado num piso e tenha espaço, assim sendo ele dá prioridade à viagem que decorre e acaba-a antes de atender outros pedidos.
- Adicionar Portas – As portas têm a função de conectar diferentes áreas. Depois de criadas, elas permitem que os ocupantes se movimentem entre áreas usando as mesmas. Elas podem ser portas de dois sentidos, ou apenas de um sentido e é possível controlar o fluxo de pessoas que passa em cada porta através de gráficos que são gerados após a execução da simulação da evacuação.
- Adicionar Escadas – As escadas têm como função principal a conexão entre pisos superiores e inferiores. Conforme a inclinação das mesmas elas influenciam a velocidade de movimentação dos passageiros que delas fazem uso. À semelhança das portas as mesmas também têm a possibilidade de serem definidas como tendo sentido duplo ou apenas um único sentido.
- Escolher o modo de simulação – O *software* oferece dois tipos de simulação, o SFPE (*Society of Fire Protection Engineers*) e o *Steering*. O modo SFPE é elaborado a partir dos pressupostos do manual da *Society of Fire Protection Engineers* que pressupõe que exista contacto entre os ocupantes, visto que os mesmos não procuram evitar o mesmo, o que leva a que vários ocupantes possam ocupar o mesmo espaço. O fluxo e a velocidade dos ocupantes são controlados pela dimensão das portas e pela densidade respectivamente. O modo *Steering* é um modo mais realista e com conceitos e aplicação mais avançada. Este modo permite modelar comportamentos dos ocupantes, como a escolha do caminho a seguir, e tem como principal vantagem a prevenção da ocorrência de colisões entre pessoas e a interação entre as mesmas.
- Importação de ficheiros DXF, DWG e FDS – A importação de ficheiros deste tipo é uma grande vantagem no que diz respeito à elaboração do *layout* do espaço. Estes ficheiros são ficheiros CAD 2D que depois de elaborados num *software* próprio para o efeito são importados para o Pathfinder e o mesmo tem a capacidade de os interpretar e demonstrar para o utilizador o *layout* pronto para ser utilizado.

3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

Neste capítulo, numa primeira fase irá ser abordada a configuração do Navio MS Douro Elegance com o intuito de apresentar a planta, os acessos, as divisões e o layout em geral do navio.

De seguida, irá ser apresentado a interface gráfica do modelo elaborado através do *software* Pathfinder em conjunto com as diferentes funcionalidades usadas para a criação do mesmo. Por último, irá ser feita a validação do modelo, com a comparação dos tempos recolhidos no navio e os tempos obtidos através do Pathfinder.

3.1. Configuração do Navio MS Douro Elegance

Como já foi referido no capítulo inicial, este estudo tem como objetivo de análise a melhoria do processo de evacuação de um navio. Para tal, foi escolhido um navio de passageiros da empresa Douro Azul, o MS Douro Elegance, que é utilizado para cruzeiros fluviais no rio Douro, em Portugal.



Figura 1 - Navio MS Douro Elegance

O navio MS Douro Elegance (Figura 1) é um navio de 5 estrelas, construído em 2017, com capacidade para 36 membros da tripulação e 126 passageiros. Possui 2 motores Scania 460kW, e atinge uma velocidade de 11 nós, tem um comprimento total de 79.980 metros. Existem 63 cabines de passageiros e 14 para a tripulação. O espaço do navio é constituído por 4 decks, o convés inferior, o convés principal, o convés superior e finalmente o tombadilho.

As cabines estão distribuídas pelos 3 primeiros conveses respetivamente. As tipologias das cabines variam, existindo 3 tipologias, a Suite VIP, a Suite Júnior, e a cabine Standard. O tombadilho é um convés de lazer e dispõe de uma vista de 360°, possui espreguiçadeiras e uma piscina exterior, dois buffets com mesas e cadeiras para os passageiros usufruírem, também detém a ponte onde o capitão do navio pilota o mesmo juntamente com a sua equipa. É neste convés que se localizam os 7 botes salva-vidas insufláveis com capacidade para 25 pessoas cada um. Nos restantes conveses existem as outras comodidades do navio, como restaurante, bar, spa, as cabines dos passageiros e da tripulação, lavandaria, cozinha e o único elevador que o mesmo possui que liga estes 3 conveses que se localiza na entrada principal do navio. A deslocação entre pisos pode ser feita através de escadas, essas existem nas partes traseiras, intermédias e na frente do navio.

Como já foi referido o MS Douro Elegance tem 4 conveses, estando os quartos inseridos nos 3 convés inferiores, entre o convés inferior e o convés superior, a configuração destes pisos é a seguinte:

- Convés Inferior – 9 cabines para a tripulação, 16 cabines standard para passageiros, lavandaria, armazém de congelados, frios e alimentos secos, cozinha, sala de resíduos e a sala dos motores na parte traseira do deck.
- Convés Principal – 5 cabines para a tripulação, 23 cabines standard para passageiros, o restaurante e o spa.
- Convés Superior – 2 suites VIP, 6 suites Júnior, e 16 cabines standard, hall de entrada, receção e bar.
- Tombadilho – Piscina, 2 buffets, e ponte de comando.

Todos estes conveses têm em comum a sua ligação através de um corredor semelhante ao da Figura 2.



Figura 2 - Corredor do MS Douro Elegance

3.1.1. Convés Inferior

A configuração do convés inferior pode ser observados a partir da planta apresentada na Figura 3, onde é possível verificar os principais locais do deck em questão.

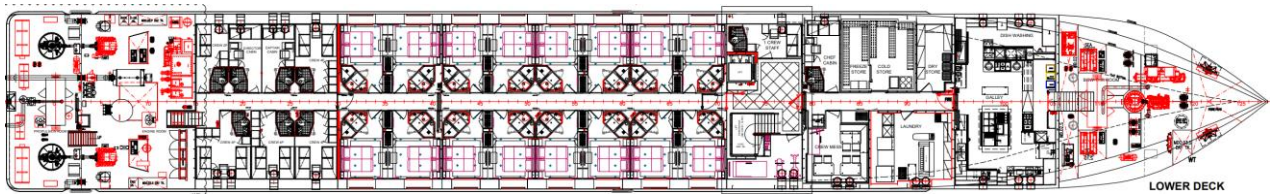


Figura 3 - Planta MS Douro Elegance – Convés inferior

O acesso a este convés pode ser feito através de elevador, ou de escadas localizadas nas extremidades do navio e no meio do mesmo.

É na parte frontal deste piso que se localiza a cozinha Figura 4, que tem acesso por escada ao restaurante localizado no convés principal e por uma porta principal que liga ao corredor deste convés. Aqui para além de ser confeccionada toda a comida necessária para os passageiros do navio, também tem meios para lavagem e desinfecção das louças.



Figura 4 – Convés inferior – Cozinha

Neste piso podemos ainda encontrar a lavandaria que está representada pela Figura 5, onde são lavadas e engomadas todas as roupas, lençóis e outro tipo de têxteis do navio, pode ser acedida apenas por uma porta.



Figura 5 - Convés inferior – lavandaria

Na Figura 6 é possível analisar o armazém de alimentos que não precisam de frio para a sua preservação.



Figura 6 - Convés inferior - Armazém alimentos

Neste piso ainda se pode encontrar alguma das cabines da tripulação e encontram-se na parte de trás do mesmo. Embora haja diferentes tipologias, esta cabine representada na Figura 7 comporta 4 pessoas.



Figura 7 - Convés inferior - Cabine tripulação

3.1.2. Convés Principal

A configuração do convés principal é representada pela Figura 8, este convés à semelhança do anterior possui escadas nas extremidades e no meio, assim como elevador como meio de acesso.

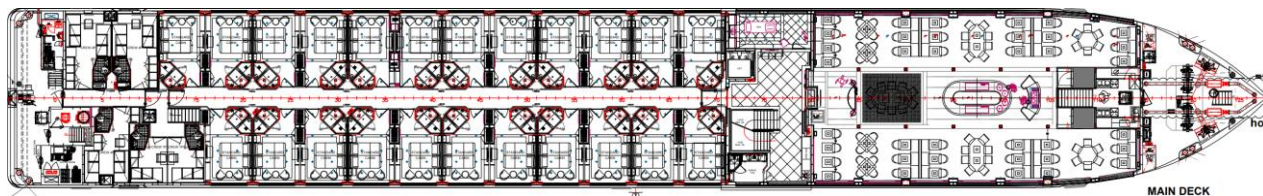


Figura 8 - Planta MS Douro Elegance – Convés principal

Neste piso, à semelhança do convés inferior tem também quartos destinados a passageiros e tripulação, mas o que se destaca é o restaurante e o spa.

Este restaurante (Figura 9 e Figura 10) é único no navio e é o responsável pelas refeições de todos os passageiros, possui no meio da sala uma mesa com diferentes alimentos para as pessoas se poderem servir, ele é acedido pelos passageiros através do hall de entrada deste piso e pela tripulação através de uma escada que liga a cozinha no convés inferior diretamente ao restaurante.



Figura 9 - Convés principal - Acesso da cozinha ao restaurante



Figura 10 - Convés principal – Restaurante

Como mencionado anteriormente, este piso possui cabines standard com cerca de 14m². Estas têm capacidade para 2 passageiros cada uma, elas têm 2 camas *single* e estão equipadas com casa de banho, ar-condicionado, televisão secador de cabelo, telefone e instrumentos para fazer café e chá. Na Figura 11 está representada uma cabine standard.

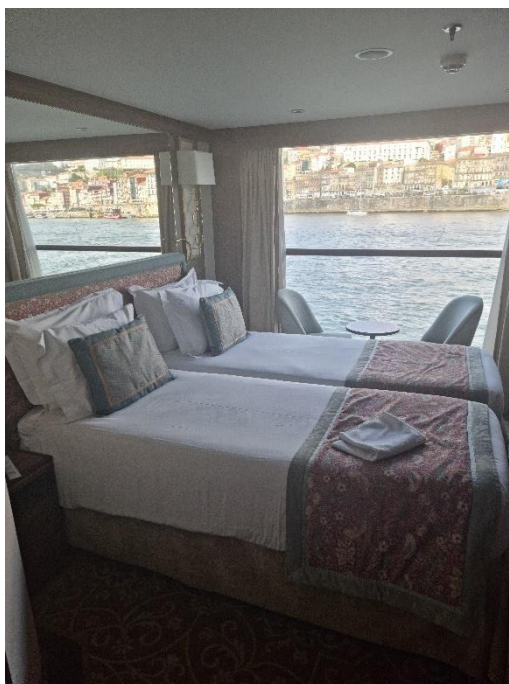


Figura 11 - Convés principal - Cabine standard

3.1.3. Convés Superior

A configuração do convés superior está representada na Figura 12, este convés à semelhança dos outros dois anteriores é acedido através de escadas e elevador, e como particularidade, é neste piso onde as pessoas entram e saem do navio através das entradas e saídas existentes no hall de entrada.

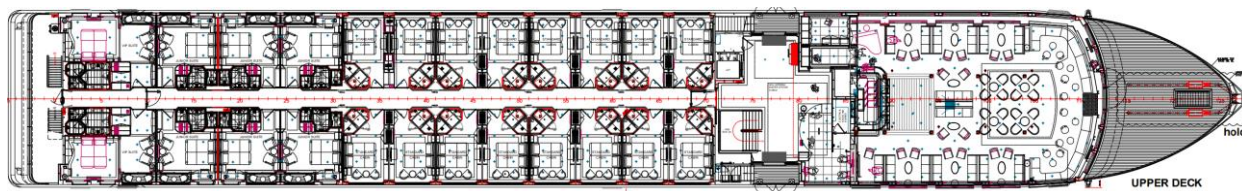


Figura 12 - Planta MS Douro Elegance – Convés superior

No hall de entrada existe um balcão de atendimento, onde os passageiros podem falar com a tripulação sempre que necessitem.



Figura 13 - Convés superior - Hall de entrada e balcão de atendimento

O hall de entrada dá acesso tanto ao bar/sala de estar do navio representado na Figura 13, este bar (Figura 14) localizado na frente do navio tem acesso a um pequeno espaço exterior na proa do navio.



Figura 14 - Convés superior - Bar/Sala de estar

Neste piso existem as VIP suites com 30m² e as suites Juniores com 22m², na Figura 15 podemos ver uma representação das mesmas.



Figura 15 - Convés superior - Exemplo de suite

3.1.4. Tombadilho

Na Figura 16 é possível ver a configuração do tombadilho. Este piso contém a piscina e a ponte de comando do navio, a evacuação do navio é feita para este convés, fazendo deste piso o local de reunião onde se encontram as os 7 botes salva-vidas do navio. Este piso apenas é acedido através de escadas.

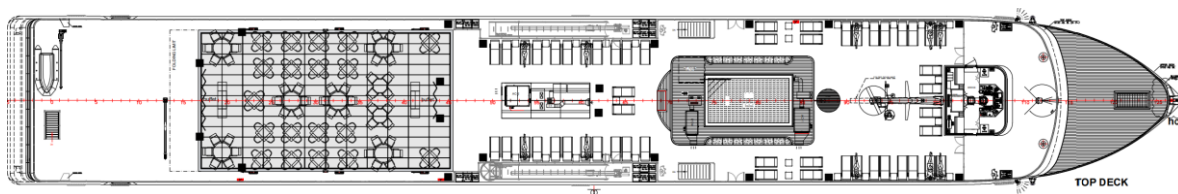


Figura 16 - Planta MS Douro Elegance – Tombadilho

Nas Figuras 17 e 18 pode-se verificar uma das cápsulas que guardam um dos botes salva-vidas do navio. Em caso de emergência ao serem utilizadas um bote insuflável é aberto de forma que as pessoas possam sair em segurança. Como já foi referenciado anteriormente o MS Douro Elegance possui 7 cápsulas com capacidade para 25 pessoas cada.



Figura 17 - Tombadilho - cápsula dos botes salva-vidas



Figura 18 - Tombadilho - Etiqueta da cápsula salva-vidas

Neste piso os passageiros também podem usufruir de uma piscina exterior (Figura 19), localizada bem no centro do mesmo.

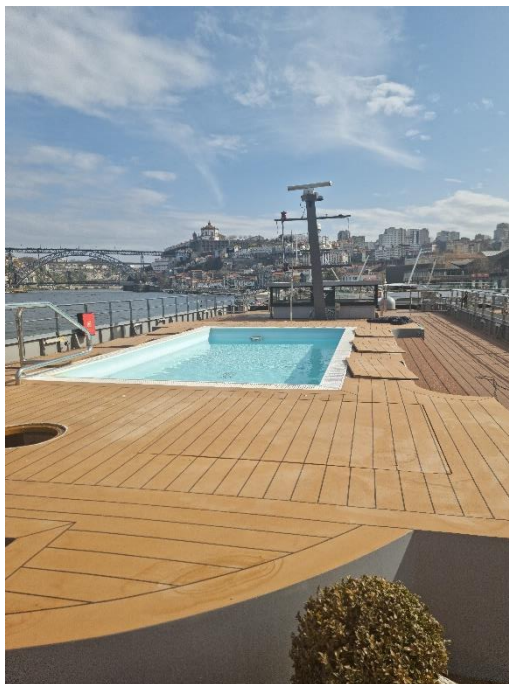


Figura 19 - Tombadilho - Piscina exterior

A ponte de comando representada pela Figura 20 está na parte frontal deste *deck* e é elevatória, o que significa que a altura pode oscilar.



Figura 20 - Tombadilho - Ponte de comando

3.2. Estudo de Simulação

O estudo da evacuação de emergência do navio MS Douro Elegance foi realizado com recurso a ferramentas de simulação computacional. O *software* escolhido para o efeito, como já foi referido

anteriormente, foi o Pathfinder. Este *software* para além de permitir a criação de um modelo de simulação permite também ao utilizador configurar e inserir os parâmetros variáveis e os dados necessários para a simulação das diferentes estratégias de evacuação a serem apresentadas de forma simples e intuitiva. Isto quer dizer que o utilizador não precisa de ter conhecimentos avançados sobre modelação para conseguir usar o Pathfinder.

Para se obter a maior aproximação à realidade na construção do modelo de simulação foi facultada as plantas do navio de forma que as medições dos diferentes espaços fossem as mais corretas possíveis.

3.2.1. Interface Gráfica

O *software* Pathfinder apresenta então uma interface igual à da Figura 21 como ecrã inicial, a partir daqui já é possível começar a criar modelos. Do lado esquerdo temos tudo o que vamos adicionando ao projeto no menu de árvore e uma serie de ícones com várias funcionalidades que vão ser explicadas mais à frente.

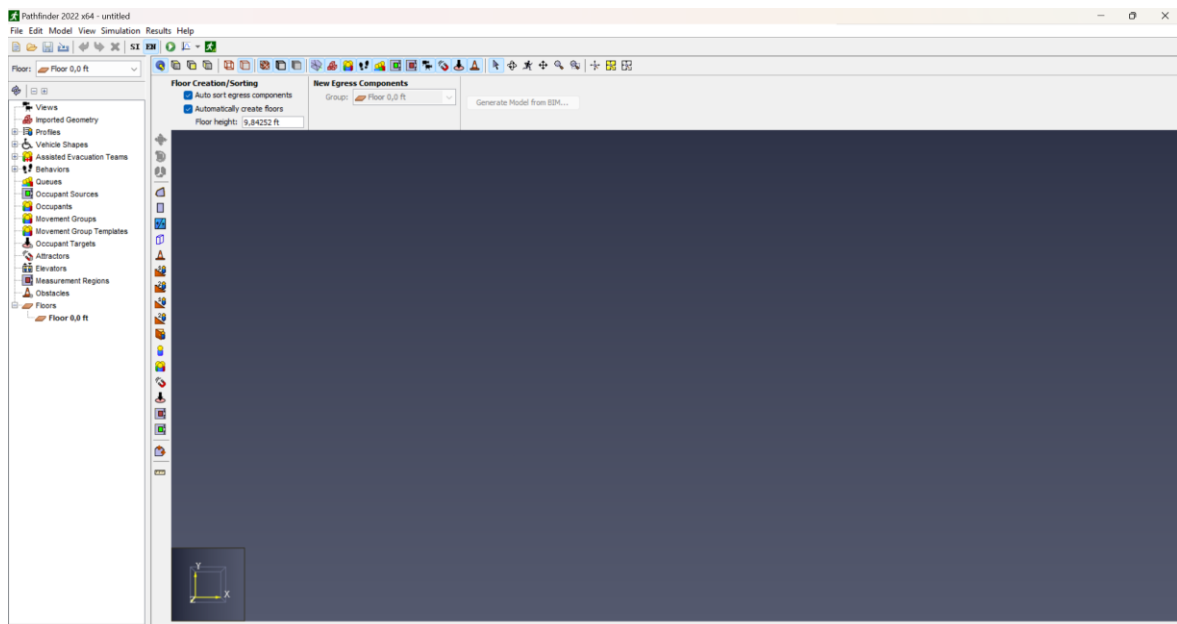


Figura 21 - Ecrã inicial no Pathfinder

Na Figura 22 é apresentado o modelo de simulação criado e desenvolvido para o MS Douro Elegance, através do modo de visualização 3D que o *software* oferece. Podemos ver no menu de árvore, os pisos existentes, os elevadores, ocupantes criados para popular o modelo.

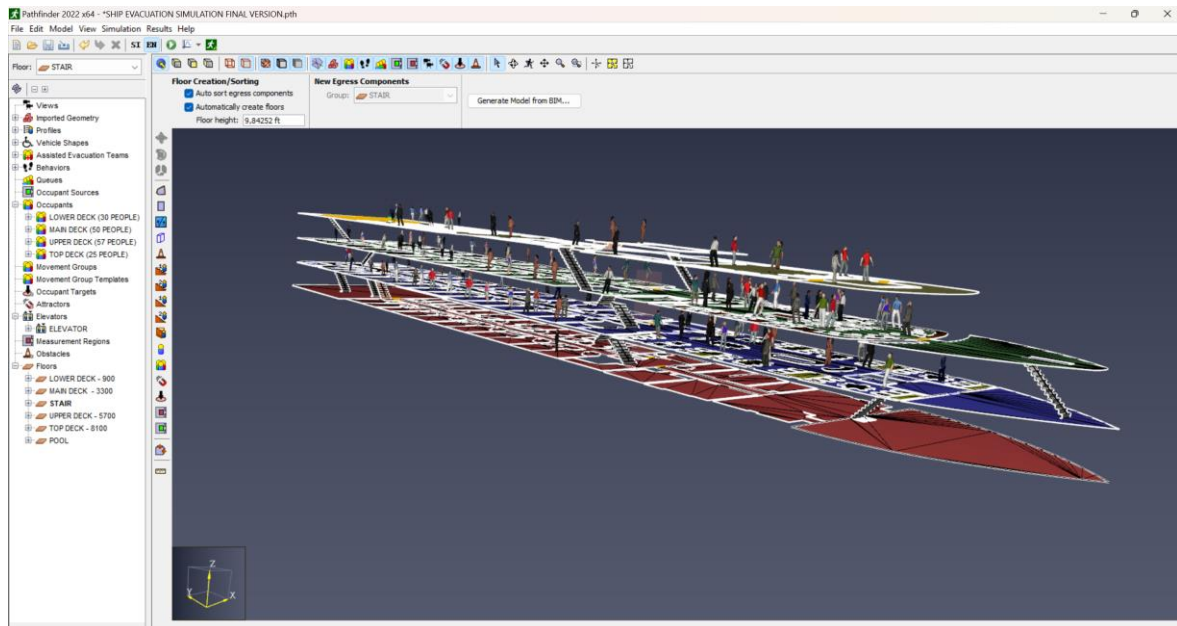




Figura 22 - Vista 3D do modelo do MS Douro Elegance

Como se pode ver na figura anterior, o navio possui 4 pisos e tem várias divisões em cada um, para desenvolver este modelo de simulação houve uma medição das diferentes divisões de forma que o modelo seja fidedigno. Para a construção das diferentes áreas do navio, foram utilizadas as ferramentas “Add a Rectangular Room”  e “Add a Polygonal Room”  do Pathfinder. Estas permitem criar as áreas com as dimensões especificadas pelo utilizador como se pode ver na Figura 23 e na Figura 24.

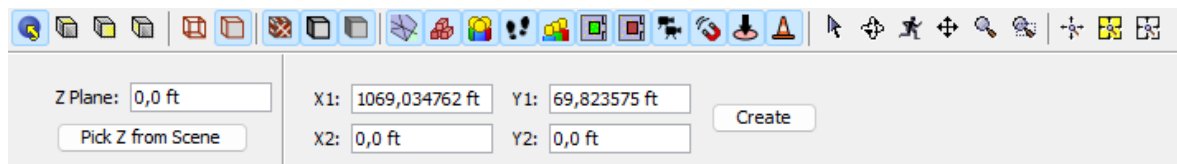


Figura 23 - Menu de criação de uma área retangular no Pathfinder

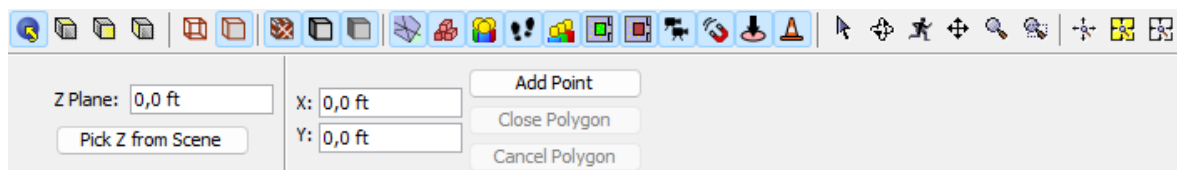



Figura 24 - Menu de criação de uma área poligonal no Pathfinder

Concluída a criação das diferentes áreas é necessário adicionar portas de forma que as mesmas tenham ligação entre si e que os passageiros e tripulação possam caminhar livremente pelo navio. Para a criação das portas existe a ferramenta “Add a New Door” , ela permite criar uma porta, escolhendo a posição e o seu tamanho como se pode ver na Figura 25.

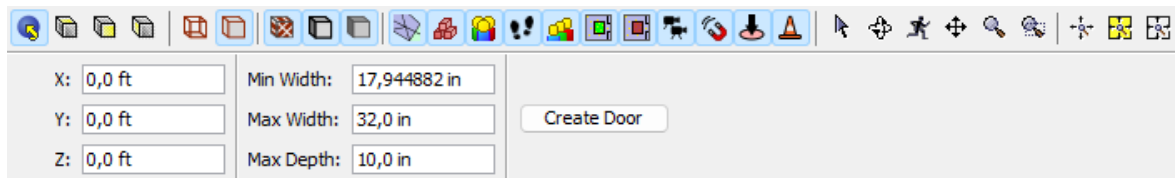


Figura 25 - Menu de criação de uma porta no Pathfinder

Depois da porta criada, existem outros parâmetros passíveis de configuração como a sua dimensão, o estado da porta (aberta, fechada, passagem apenas em um sentido), tempo de espera para os utilizadores poderem prosseguir pela mesma, taxa de fluxo de ocupantes e indicar os perfis de pessoas autorizados a utilizar a porta, esses parâmetros estão representados na Figura 26.

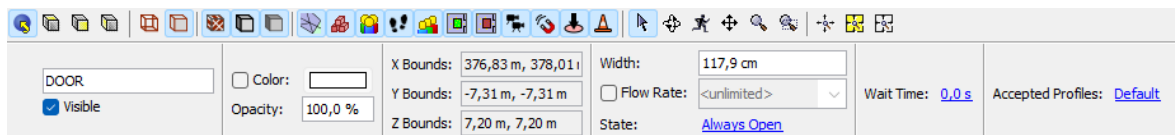



Figura 26 - Menu de parametrização de portas no Pathfinder

Para fazer a conexão entre pisos são necessárias escadas, e o *software* oferece essa funcionalidade ao utilizador. Na Figura 27 podemos ter uma visão geral sobre as escadas existentes no navio, onde as setas indicam o sentido ascendente das mesmas. Embora existam várias ferramentas capazes de criar escadas, para este caso em concreto foi necessário utilizar a funcionalidade “*Create stairs by choosing one point on a edge*” . Esta ferramenta permite ao utilizador definir a posição das escadas, o número de degraus, e a largura das mesmas, a velocidade dos passageiros quando utilizam as mesmas, o material de que são feitas, os perfis autorizados a usar as escadas e também o seu sentido como é possível verificar na Figura 28.

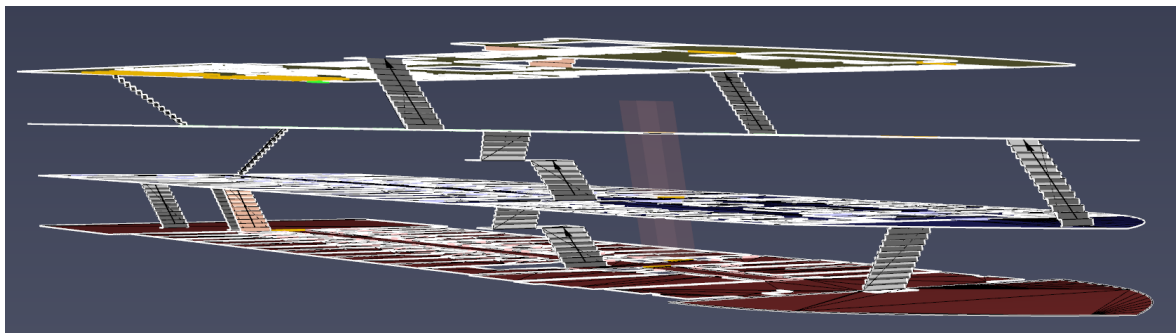


Figura 27 - Vista 3D dos pisos do modelo de simulação do navio

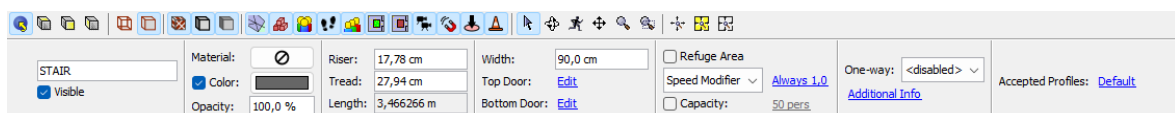


Figura 28 - Menu de parametrização das escadas no Pathfinder

Para além das escadas como elemento de conexão entre pisos o Pathfinder também oferece a possibilidade de acrescentar elevadores para o mesmo efeito. No navio existe um elevador que conecta os 3 pisos inferiores, ele está sinalizado a amarelo na Figura 29.

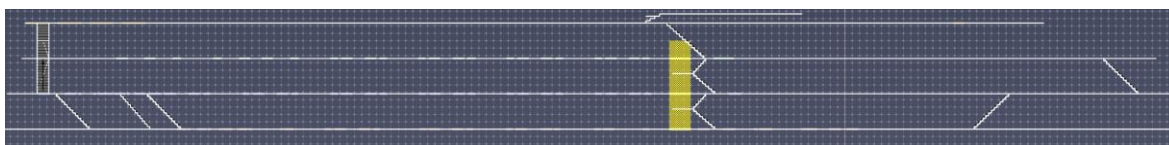


Figura 29 - Vista lateral do elevador do navio

Para a criação de elevadores, o *software* tem uma funcionalidade chamada “*Create Elevator*” que é possível ver na através da Figura 30. Na criação de elevadores, o utilizador pode definir a capacidade máxima do elevador, a velocidade e aceleração, o tempo de abertura e fecho de portas, os pisos que o elevador conecta e a distância mínima ao qual o passageiro tem de estar o elevador para a solicitação do mesmo.

A imagem mostra a janela de diálogo "New Elevator" com os seguintes campos e opções: Nome: Elevator02; Nominal Load: 8,0 pers; Elevator Geometry: CABIN; Travel Direction: X: 0,0, Y: 0,0, Z: 1,0; Elevator Bounds: Bottom Floor: [lowest], Top Floor: [highest]; Elevator Timing: Acceleration: 1,2 m/s², Max Velocity: 2,5 m/s, Open+Close Time: 7,0 s, Call Distance: 0,5 m; Elevator Type: Double-Deck (desativado). Botões OK e Cancel.

Figura 30 - Ferramenta de criação de elevadores

Na Figura 31 é possível visualizar o convés inferior do MS Douro Elegance desenvolvido no modelo de simulação. Este convés é onde a maior parte dos serviços são elaborados para serem fornecidos aos passageiros.

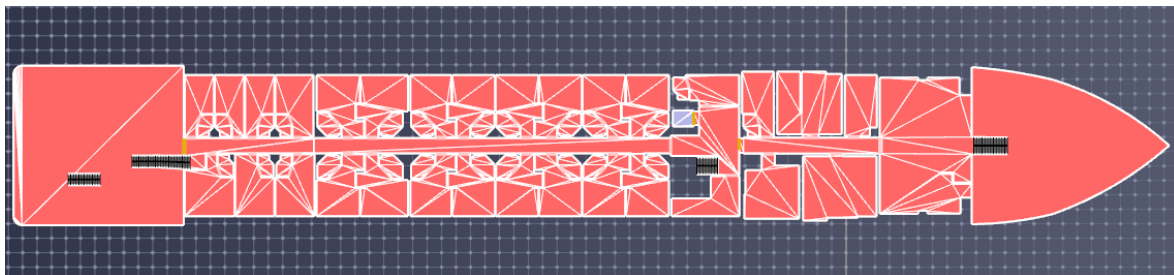


Figura 31 - Convés inferior do modelo de simulação do navio

Na Figura 32 está representado o convés principal do navio no modelo de simulação. Neste convés existem cabines para passageiros e tripulação, assim como na parte frontal o restaurante com as respectivas mesas e cadeiras que estão representadas na figura.

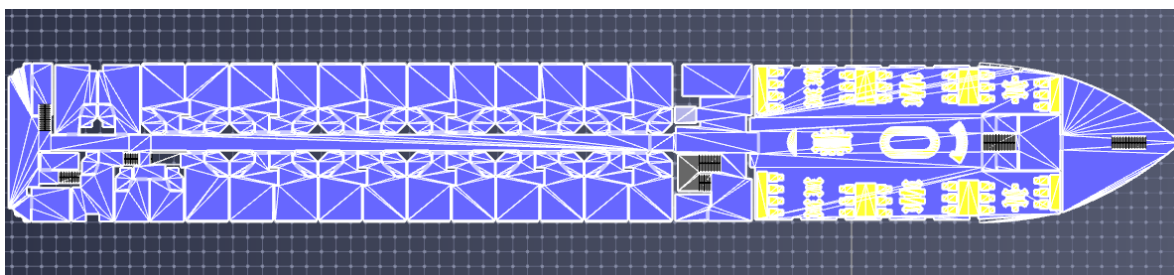


Figura 32 - Convés principal do modelo de simulação do navio

Na Figura 33 está representado o convés superior, onde os passageiros dão entrada no navio através das duas portas laterais existentes em cada um dos lados. Também possui cómodos para os passageiros assim como um bar/sala de estar na parte frontal. Possui ainda uma parte exterior acessível através do bar/sala de estar onde os passageiros podem usufruir da vista frontal do navio.

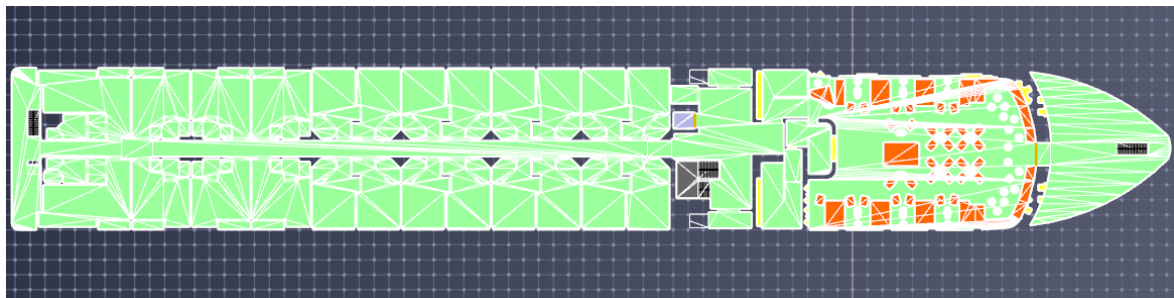


Figura 33- Convés superior do modelo de simulação do navio

A Figura 34 representa o tombadilho, onde estão representadas as espreguiçadeiras, mesas e cadeiras, a piscina exterior e ainda a ponte de comando do navio. É neste convés que os passageiros se reúnem numa situação de evacuação de emergência.

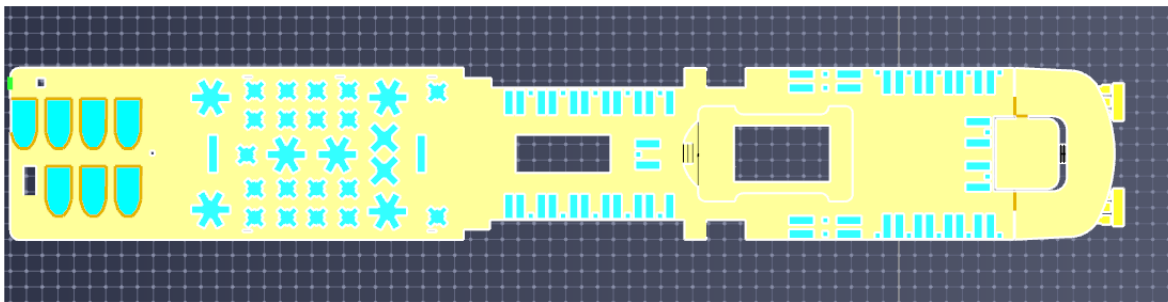




Figura 34 - Tombadilho do modelo de simulação do navio

Depois de os conveses estarem representados no modelo de simulação, é necessário adicionar ocupantes, sejam eles passageiros ou tripulação. Para isso o Pathfinder possui duas funcionalidades, a “Add na Occupant”  na qual permite o utilizador adicionar apenas um único ocupante de cada vez e a “Add Occupants to a Region” , que tem como objetivo permitir adicionar um determinado número de ocupantes definido pelo utilizador numa região específica.

Após a criação dos ocupantes, é possível que os mesmos sejam adicionados a grupos. Este grupo permite que durante a evacuação, ocupantes do mesmo grupo se juntem para evacuar e movimentarem-se em conjunto mantendo uma distância entre si definida pelo usuário. Esta funcionalidade pode ser importante quando o utilizador pretende que uma família na evacuação se reúna primeiro para evacuarem em grupo. A funcionalidade é chamada de “New Movement Group From Selection” e está representada na Figura 35.

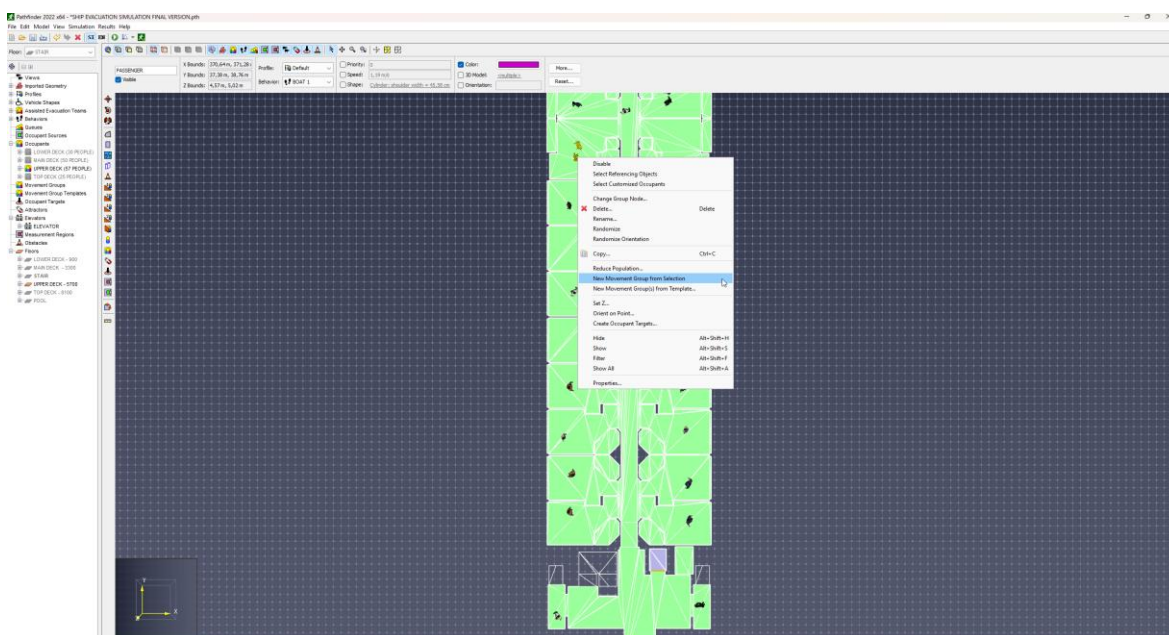


Figura 35 - Funcionalidade de acrescentar ocupantes a um grupo no Pathfinder

Todos os ocupantes necessitam de estar associados a um perfil, para tal é preciso criar cada perfil através da funcionalidade “Add a Profile”. O perfil é usado para definir os parâmetros que controlam a velocidade, tamanho e representação visual do ocupante, assim podemos ter vários tipos de passageiros simulando por exemplo passageiros com dificuldades de movimentação, mais pesados, mais leves, entre outros. Também se pode restringir acessos a certos compartimentos do navio impedindo que passageiros de determinado perfil usem certas portas, escadas, elevadores e

salas. Para este caso de estudo em concreto apenas considerou-se um perfil *default*, onde todos podem usar todos os acessos e movimentam-se a uma velocidade constante de 1.19 m/s. Na Figura 36 é possível perceber como se adiciona um novo perfil ao modelo de simulação.

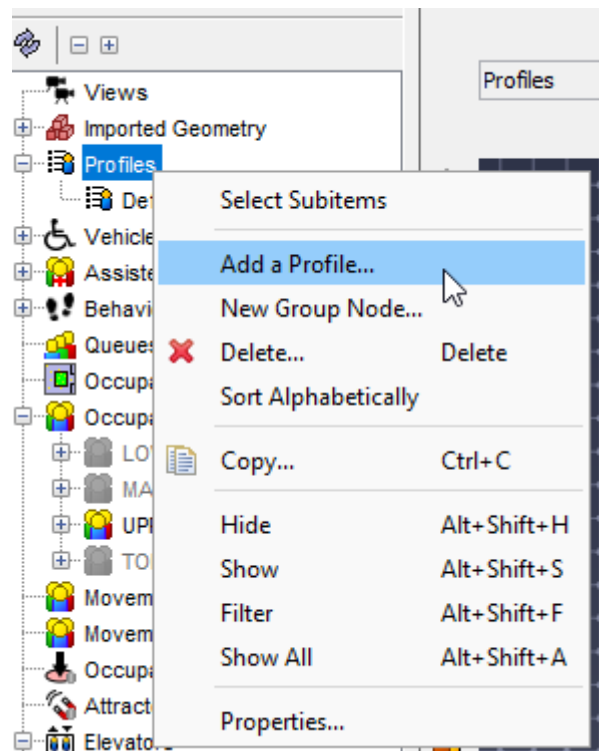


Figura 36 - Funcionalidade de adição de perfis de ocupantes no Pathfinder

Para cada perfil é possível alterar o modelo 3D usado para representar os ocupantes desse perfil, no caso de haver um perfil somente para crianças pode-se escolher um modelo 3D que represente essa faixa etária como é possível verificar na Figura 37.

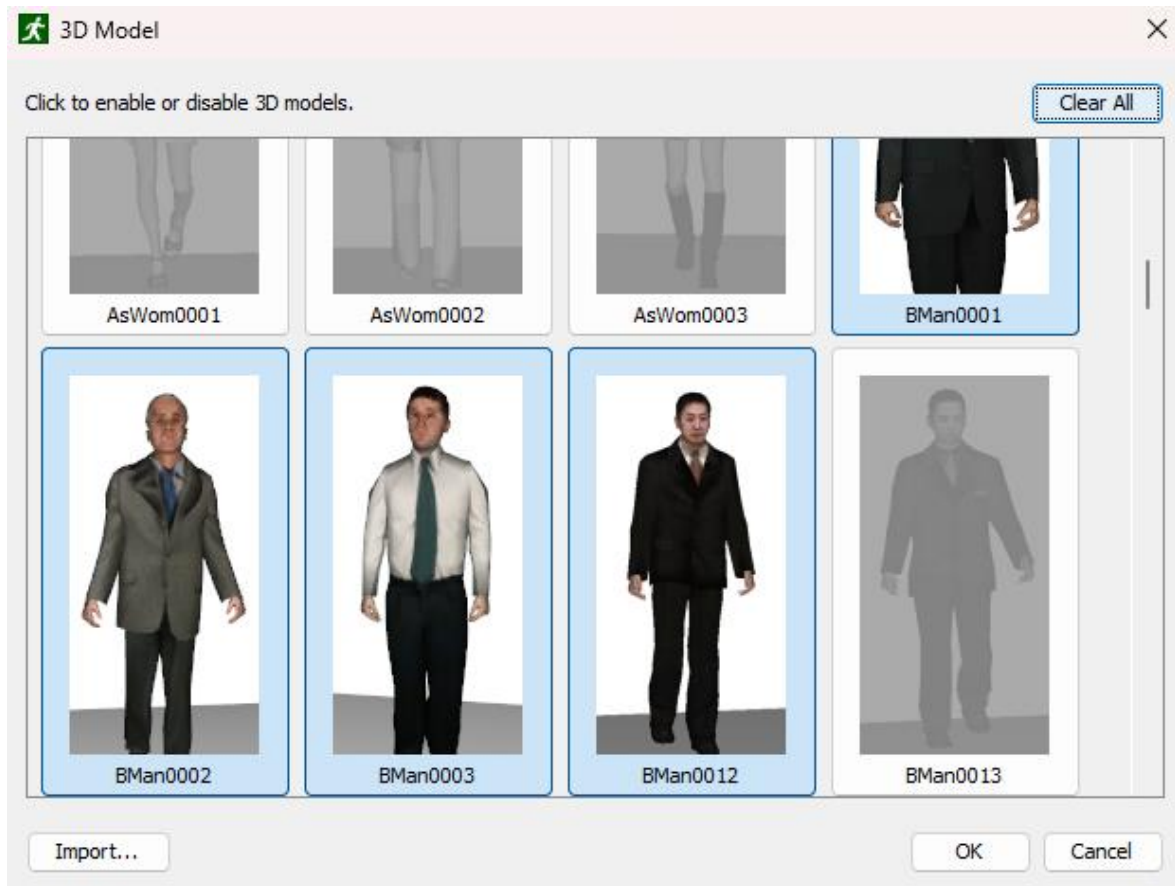


Figura 37 - Menu de escolha de modelos 3D para ocupantes

É possível ver os diferentes parâmetros que o utilizador pode modificar de modo a criar um perfil que se adeque às necessidades do modelo de simulação. Todos os campos parametrizáveis estão separados por abas.

Na aba “*Characteristics*” representada na Figura 38 é possível alterar várias características como:

- “*Priority Level*”, onde um valor maior significa uma prioridade maior também. Isto permite que ocupantes com prioridade inferior deixem o caminho livre para ocupantes com prioridades superiores;
- “*Speed*”, que especifica a velocidade máxima que cada ocupante pode caminhar num espaço sem obstáculos;
- “*Shape*”, onde podemos mudar as características físicas dos ocupantes como a largura dos mesmos, que representa o espaço ocupado pelos mesmos no modelo de simulação.

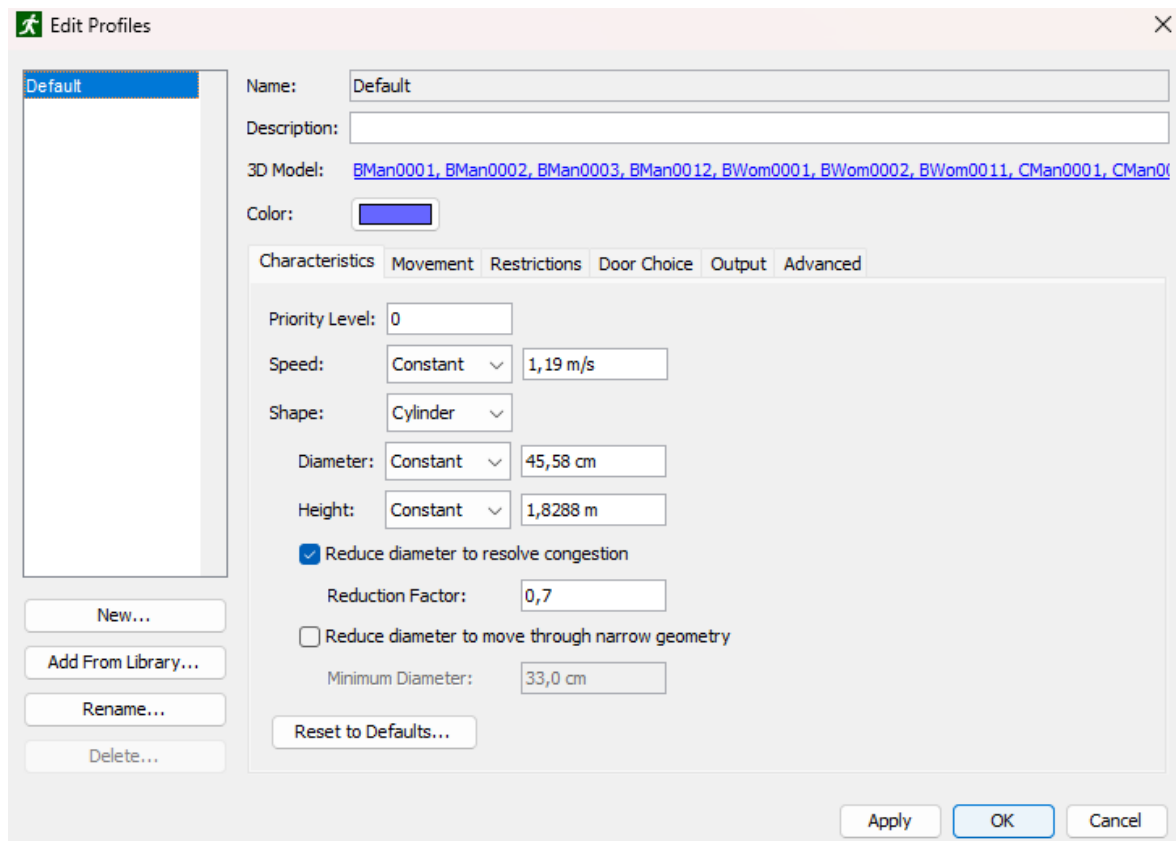


Figura 38 - Parametrização da aba "Characteristics" de perfis no Pathfinder

Na aba "Movement" representada na Figura 39 o software permite alterar as seguintes características:

- "Initial Orientation", que especifica o grau do eixo dos X positivo em sentido contrário ao relógio que os ocupantes irão usar como orientação no início da simulação;
- "Requires Assistance to Move", onde os ocupantes requerem assistência de outros ocupantes para se conseguirem mover. Isto é útil quando um ocupante está incapacitado para se mover, e necessita de ajuda de terceiros;
- "Ignore One-way Door Restrictions", serve para fazer com que os ocupantes ignorem o sentido da porta, caso esta característica não esteja verificada o ocupante irá apenas traspasar portas na direção permitida;

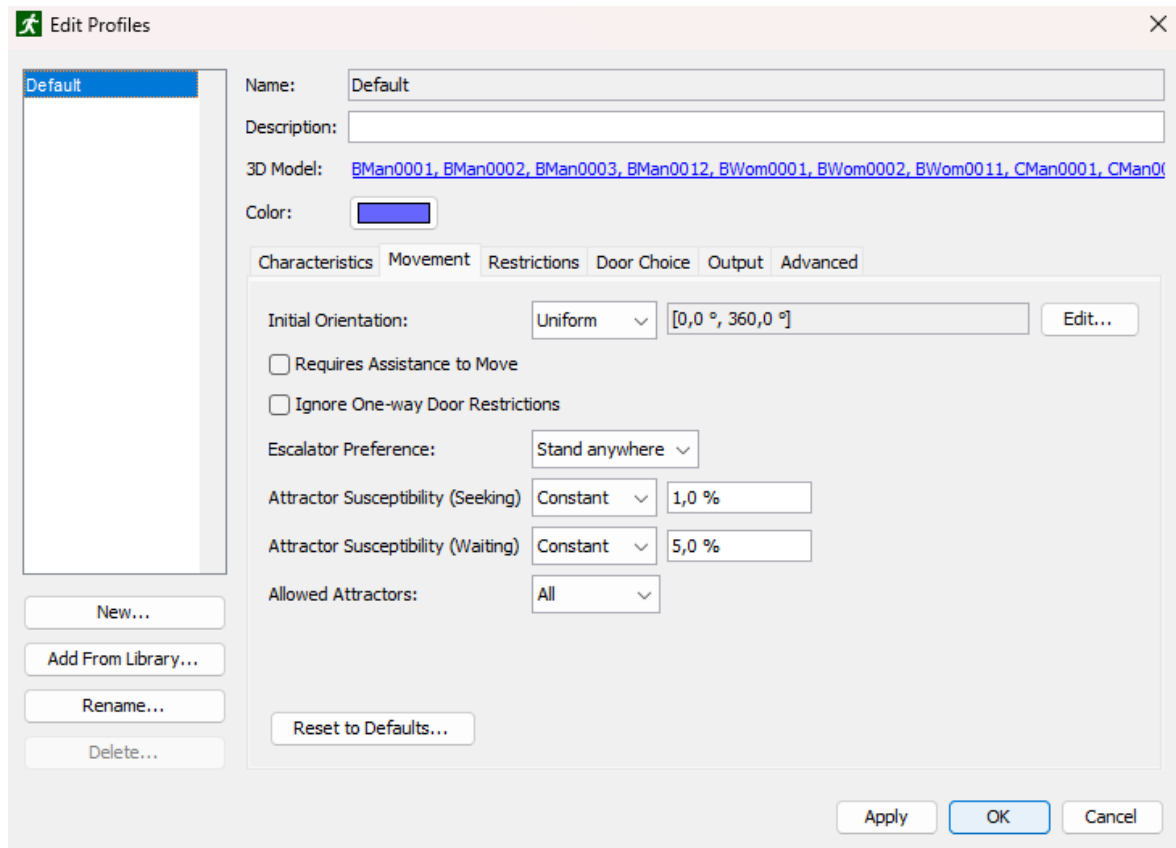


Figura 39 - Parametrização da aba "Movement" de perfis no Pathfinder

Na aba “Restrictions” representada na Figura 40 podemos restringir ou permitir os perfis de utilizar vários elementos ou apenas alguns especificados pelo utilizador como:

- “Use Doors”;
- “Use Rooms”;
- “Use Stairs”;
- “Use Escalators”;
- “Use Ramps”;
- “Use Moving Walkways”;
- “Use Elevators”.

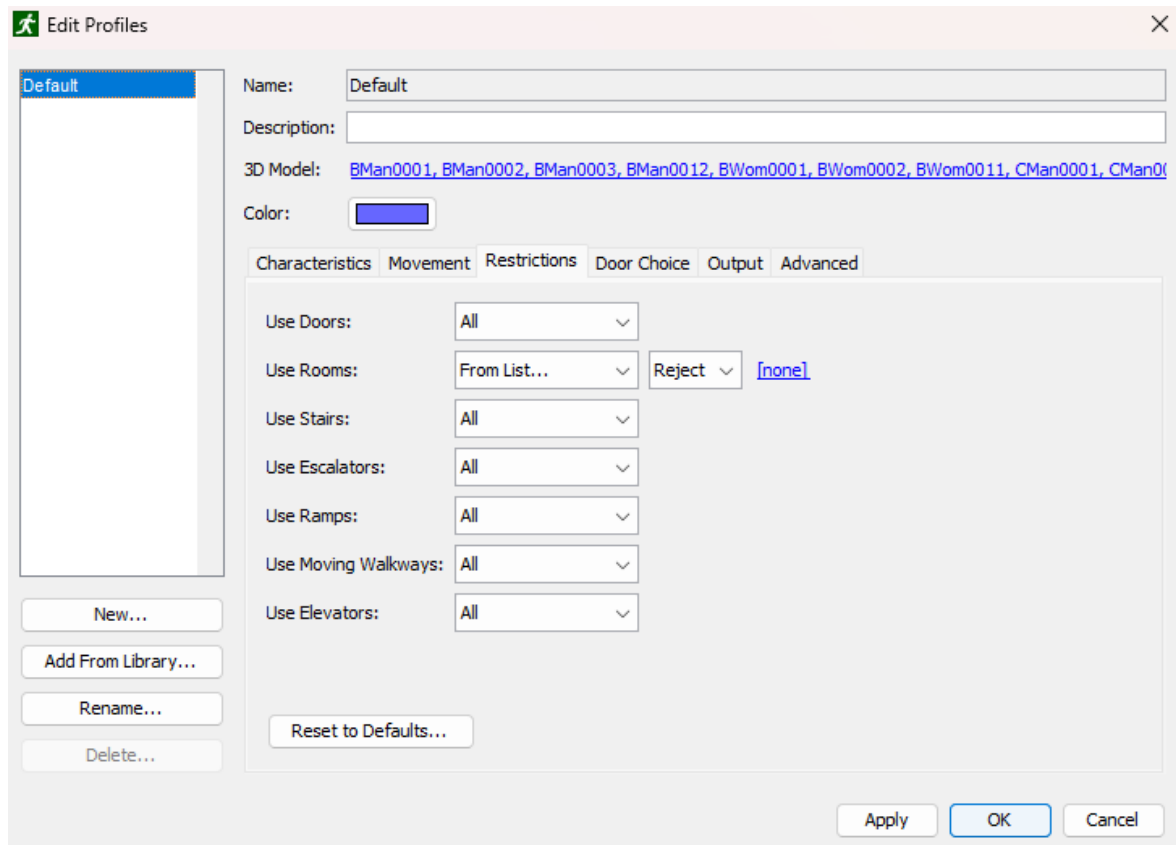


Figura 40 - Parametrização da aba "Restrictions" de perfis no Pathfinder

A aba de "Door Choice" representada na Figura 41 pode ser configurada como é que os ocupantes escolhem as portas de cada sala.

- "Current Room Travel Time", um parâmetro de custo que afeta o custo de viagem para uma porta na sala atual do ocupante, ignorando todos os outros ocupantes. Valores mais altos aumenta o custo da porta nesta categoria, fazendo o tempo de viagem na sala atual relativamente mais importante;
- "Current Room Queue Time", um parâmetro que afeta o custo de espera numa porta na sala atual do ocupante. Valores maiores aumentam o custo nesta categoria.
- "Global Travel Time", o parâmetro que afeta o custo de viagem de uma porta até à saída ou até ao próximo destino do ocupante, ignorando todos os outros ocupantes.
- "Elevator Wait Time", este parâmetro afeta o custo de espera de um elevador.

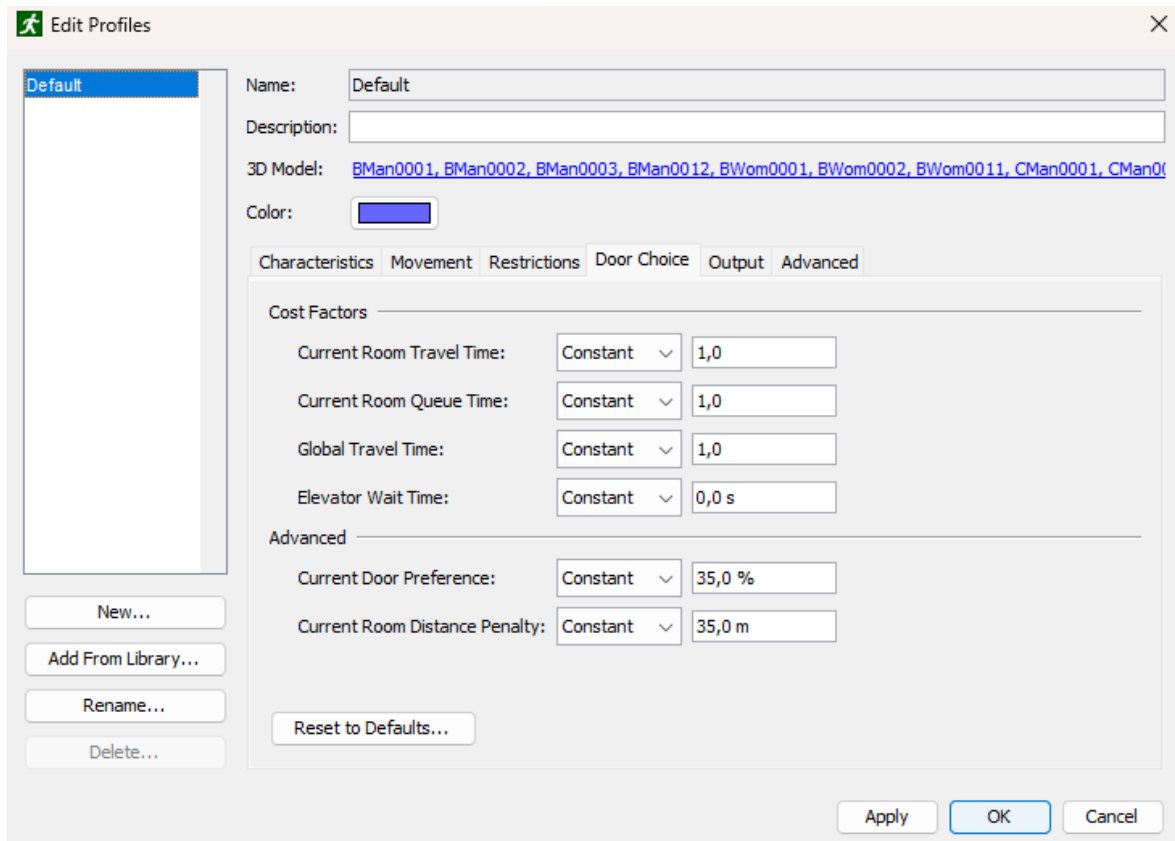


Figura 41 - Parametrização da aba "Door Choice" de perfis no Pathfinder

Após os perfis estarem criados e os ocupantes associados, existe outra funcionalidade chamada “*Add a Behavior*” que é necessária especial atenção. Os comportamentos no Pathfinder representam uma sequência de ações que o ocupante irá executar durante a simulação. Uma vez o ocupante ter realizado todas as ações, eles são removidos da simulação. As ações podem ser adicionadas e podem fazer o ocupante esperar ou ir até um destino, como uma sala, um ponto ou uma saída. Por omissão, existe sempre um comportamento que é “*Goto Any Exit*”, que simplesmente faz com que o ocupante se mova da sua posição inicial para alguma saída existente no modelo pelo caminho mais rápido. Para a criação de comportamentos existe um menu específico para aplicar essa funcionalidade representado na Figura 42.

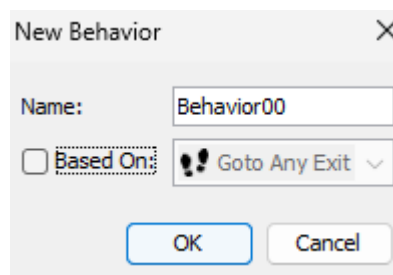


Figura 42 - Menu de criação de comportamentos no Pathfinder

Após a criação do comportamento é necessário acrescentar ações aos mesmos, como ir para uma sala, para um ponto em específico, usar um elevador ou simplesmente esperar um tempo definido num lugar definido. Para adicionar uma ação, deve-se selecionar o comportamento ao qual deve ser associada e o menu de associação de ações irá demonstrar uma *drop-down list* (Figura 43) com a descrição de todas as ações disponíveis para serem adicionadas.

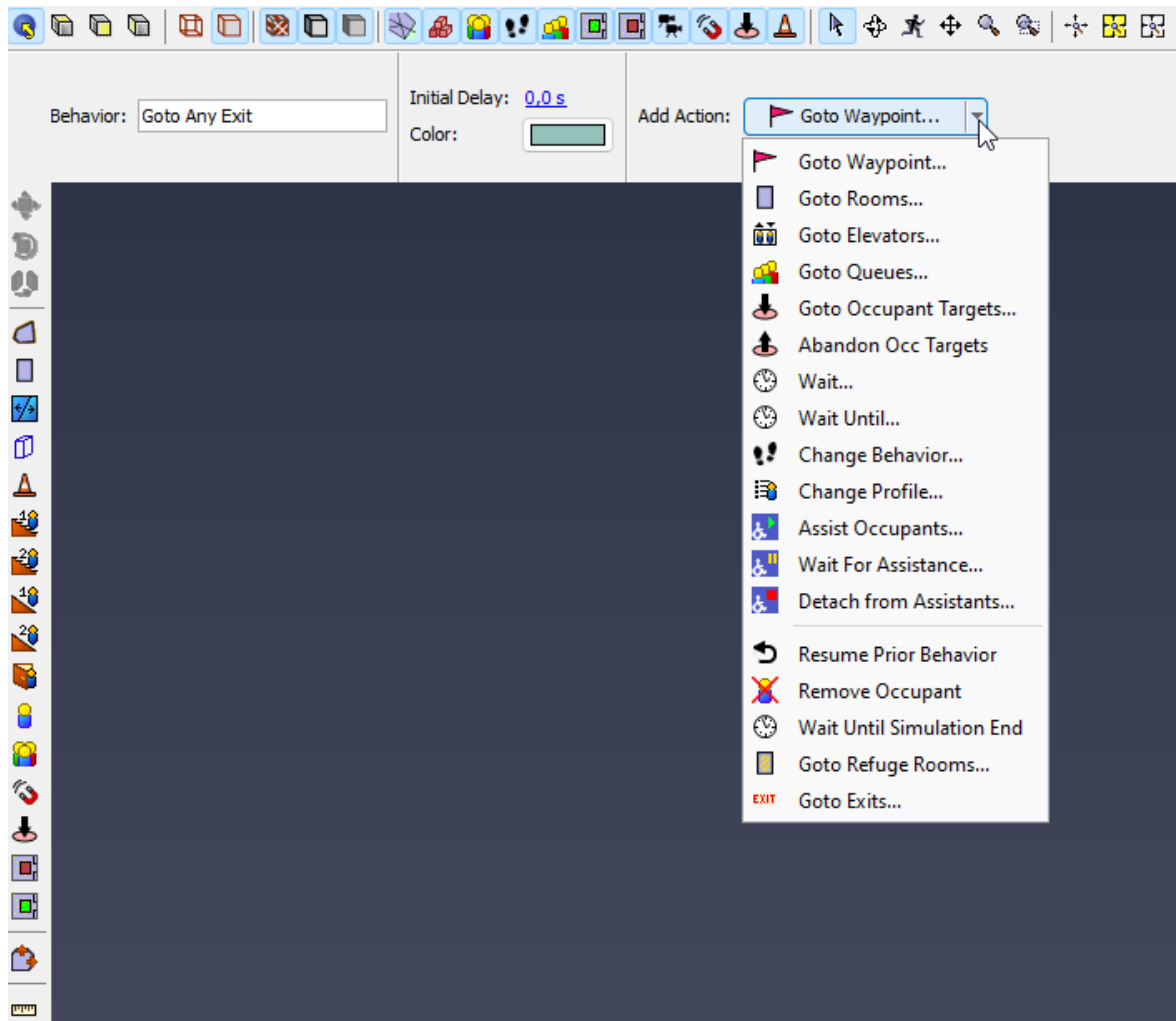


Figura 43 - Lista de ações disponíveis para serem associadas a um comportamento no Pathfinder

Depois de criados os perfis e comportamentos, é necessário associar os ocupantes aos mesmos. Para isso existe uma funcionalidade disponível no *software* denominada “*Edit Selected Occupants*” (Figura 44).

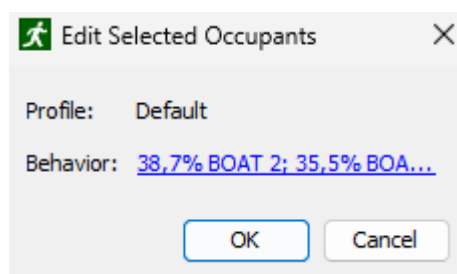


Figura 44 - Associação dos ocupantes a perfis e comportamentos no Pathfinder

O Pathfinder oferece a possibilidade de definir o modo de simulação. Existem dois modos possíveis de simulação, o SFPE que é um modelo que aplica técnicas de modelação baseadas em fluxos de evacuação onde os ocupantes se movem entre dois ambientes através de filas e não tentam evitar outros ocupantes. As portas funcionam como o principal controlo de fluxo e a velocidade é influenciada pela densidade de cada setor. O outro modo é o *Steering* e foi o escolhido para este caso de estudo, pois permite uma análise mais alinhada com uma representação dos processos humanos, no qual surgem os congestionamentos. Este método procura aproximar-se

mais da realidade, pois desloca os ocupantes para que realizem os seus objetivos e possam responder a um ambiente em mudança, isto acontece porque os ocupantes reagem através da avaliação de um conjunto de instruções de movimento. Este modo depende mais da prevenção de colisões e da interação entre ocupantes. Este menu está representado na Figura 45.

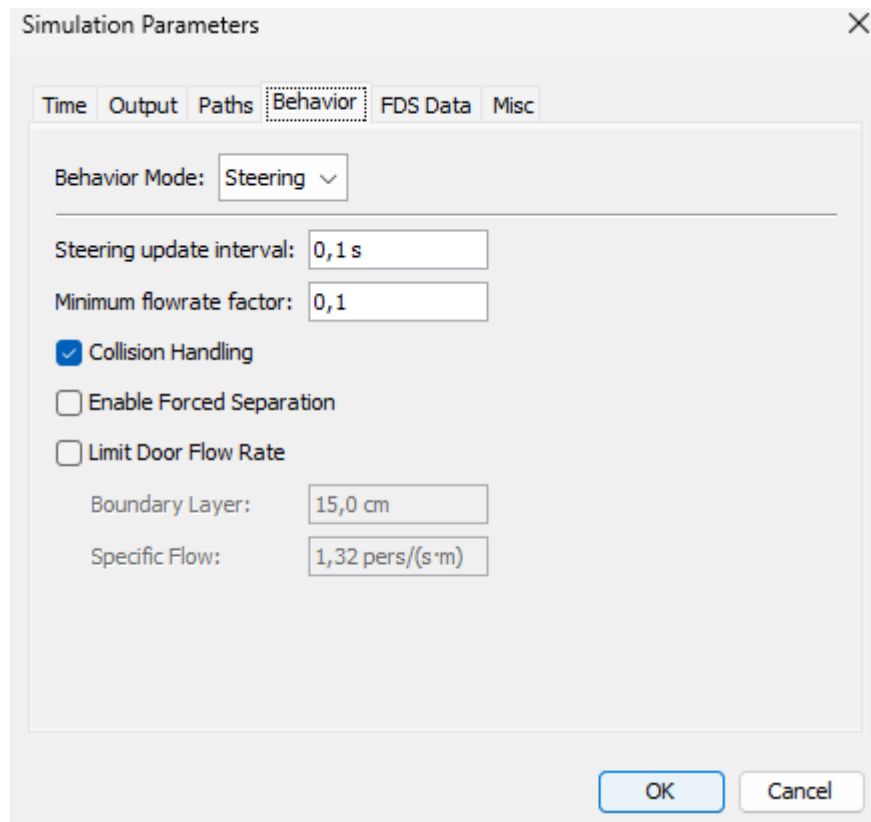


Figura 45 - Definição do modo *Steering* no Pathfinder

Após a execução da simulação, o Pathfinder exibe uma visualização 3D dos resultados da simulação de forma que se possa analisar os mesmos. A reprodução acontece em formato de vídeo, onde é possível que o utilizador pause e recomece a reprodução, aumente e diminua a velocidade e navegue pelo modelo 3D. Também permite verificar o tempo total da simulação e os ocupantes que já evacuaram. A Figura 46 é representativa de um exemplo da visualização 3D.

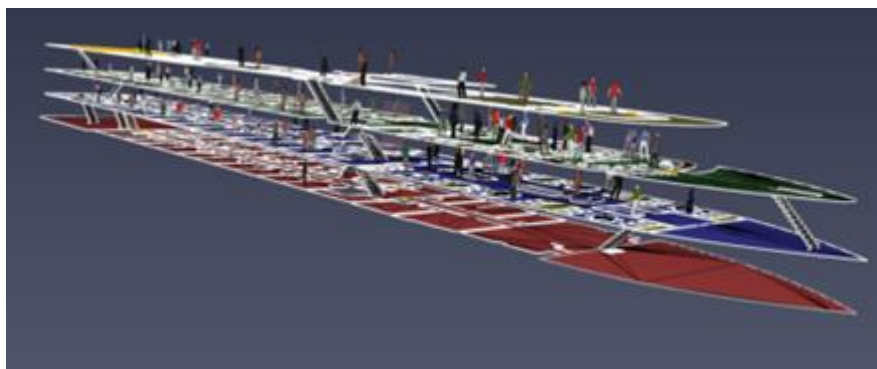


Figura 46 - Visualização 3D dos resultados da simulação

3.2.2. Validação do Modelo de Simulação Desenvolvido

De forma a proceder à validação do modelo de simulação desenvolvido, foi necessário comparar os tempos de uma evacuação real, com os tempos recolhidos através da simulação de uma evacuação no *software* Pathfinder.

Foram cronometrados no MS Douro Elegance tempos em que um ocupante demoraria a deslocar-se de um ponto até outro e, de seguida, os tempos recolhidos no terreno foram comparados com os tempos obtidos para o mesmo percurso, através da simulação da evacuação no Pathfinder. Considera-se que a deslocação do ocupante se inicia imediatamente após o começo da cronometragem, no qual o ocupante tem uma velocidade constante de 1,19 m/s ao longo de todo o percurso.

A Tabela 2 analisa e compara todos os tempos medidos e demonstra o erro percentual existente entre a simulação real e a simulação computacional.

Tabela 2 - Comparação dos tempos de evacuação da simulação real e simulação computacional

Local Inicial	Local Final	Simulação Real	Simulação Computacional	Erro Percentual
Ponte de Comando	Parte traseira do Tombadilho	42,3 s	44.1 s	4.26%
Parte traseira do Tombadilho	Escadas de acesso ao convés superior	31,68 s	33,9 s	7.01%
Parte traseira do convés superior	Parte frontal do convés superior	47,23 s	50,8 s	7.56%
Parte traseira do convés principal	Parte frontal do convés principal	40,66 s	45,8 s	12.64%
Parte traseira do convés inferior	Parte frontal do convés inferior	36,24 s	37,2 s	2.65%
Convés inferior (uso de elevador)	Convés superior	21,4 s	19,8 s	7.48%
Convés superior (uso de escadas)	Convés inferior	16,71 s	15,6 s	6.64%

Através da Tabela 2 é possível verificar que não existe uma dispersão significativa dos tempos de evacuação, tendo sido obtido um erro percentual médio de aproximadamente 6.89%. O erro percentual obtido permite concluir que o modelo desenvolvido é um modelo válido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de analisar e aperfeiçoar o processo de evacuação do navio foi realizado um estudo de simulação de várias estratégias de evacuação, para um total de 162 ocupantes. Estas estratégias baseiam-se na utilização de determinados acessos para a orientação dos ocupantes em direção aos botes salva-vidas. As diferentes estratégias restringem-se ao bloqueio das diferentes conexões entre pisos, como o elevador e colocação dos ocupantes em sítios específicos.

De forma a haver mais coerência entre as diferentes estratégias, foi considerado em todas elas a não orientação dos ocupantes, o que leva a que os mesmos evacuem pelo caminho mais curto. A distribuição dos ocupantes foi elaborada da seguinte forma:

- 30 ocupantes no convés inferior;
- 50 ocupantes no convés principal;
- 57 ocupantes no convés superior;
- 25 ocupantes no tombadilho;

Com esta configuração inicial para todas as estratégias de evacuação, garantimos que a diferença de tempo de evacuação vai derivar dos diferentes bloqueios de acessos em cada estratégia.

Como foi possível analisar no subcapítulo 3.1.2, existem conexões entre conveses na parte traseira, média e frontal do navio, e considerou-se essa estrutura para se efetuar os bloqueios estratégicos para a realização da simulação das estratégias. Também foram consideradas estratégias repetidas, mas com a diferença do bloqueio ou acesso ao elevador.

No subcapítulo 4.1 irão ser abordadas as diferentes estratégias de evacuação, enquanto no subcapítulo 4.2 irão ser discutidos os resultados obtidos através das simulações realizadas.

4.1. Apresentação de resultados

Neste capítulo são apresentadas as diferentes estratégias de evacuação elaboradas para este trabalho e a respetiva simulação. Juntamente com esta apresentação, irão ser demonstrados os resultados das diferentes simulações e analisados os resultados.

4.1.1. Estratégia 1 – Cenário com as escadas frontais inativas (com e sem elevador)

A estratégia 1 bloqueia todas as escadas frontais de todos os conveses do navio, obrigando assim com que todos os passageiros façam uso apenas dos acessos médios e traseiros a Figura 47 ilustra com precisão os acessos bloqueados.

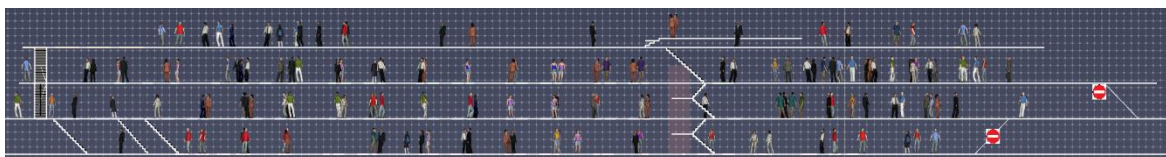


Figura 47 - Acessos bloqueados na estratégia 1

Sendo que não se utilizou nenhuma orientação, os ocupantes seguem pelo caminho mais curto até à saída. Os comportamentos atribuídos a cada ocupante, tem como destino final um dos botes salva-vidas disponíveis no navio, tal como é possível verificar na Figura 48. A orientação e os comportamentos dos ocupantes são iguais em todas as estratégias estudadas neste trabalho.

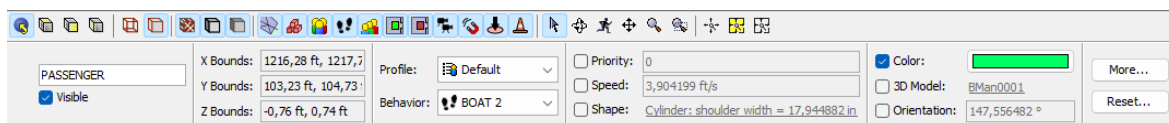


Figura 48 - Exemplo de comportamento atribuído a um dos ocupantes

Para esta estratégia foram simulados para o mesmo cenário, situações com e sem a utilização de elevadores, de forma a perceber o impacto que os mesmos têm numa situação de evacuação de emergência dos ocupantes. Na Tabela 3 são apresentados os resultados das simulações para o cenário previsto.

Tabela 3 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 1 (com e sem elevador)

Cenários	Tempo de Evacuação Total do Navio (s)	Tempo Médio de Evacuação das Pessoas do Navio (s)	Distância Média Percorrida (m)
Com Elevador	159,6 s	78,1 s	50,6 m
Sem Elevador	170,0 s	78,4 s	50,7 m

Analisando os resultados da Tabela 3, verifica-se que efetivamente a evacuação é mais rápida quando o elevador está disponível. Isto acontece devido ao congestionamento criado nos diferentes pontos do navio quando não é possível a utilização do mesmo. A distância média percorrida é maior sem elevador, o que significa que as escadas mais próximas dos ocupantes que usaram elevador estavam mais longe que o elevador.

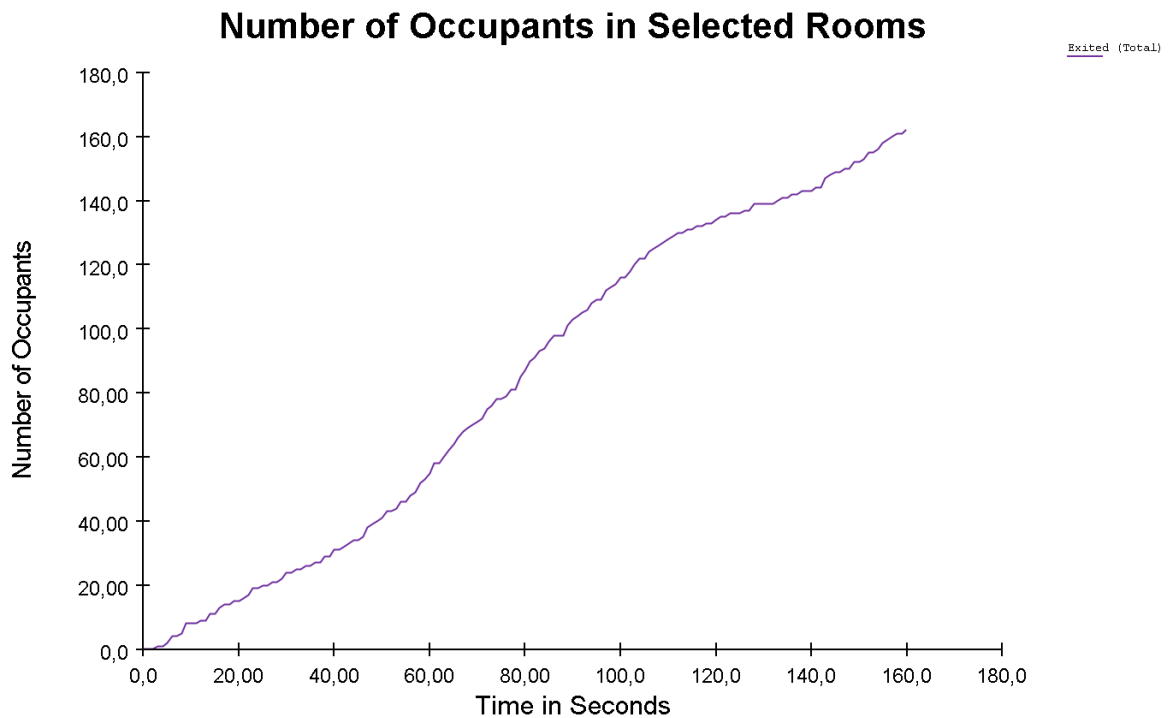


Figura 49 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 1 com elevadores

Através da Figura 49 verificamos que a evacuação é feita maioritariamente de forma constante, havendo um momento entre o segundo 101 e 127 onde há um ligeiro aumento de pessoas evacuadas, isto devido ao momento entre o segundo 20 e 50 onde houve um menor fluxo de evacuação devido a um ponto de estrangulamento. Este ponto de congestionamento acontece na parte de trás dos conveses principal e superior como se verifica na Figura 50.

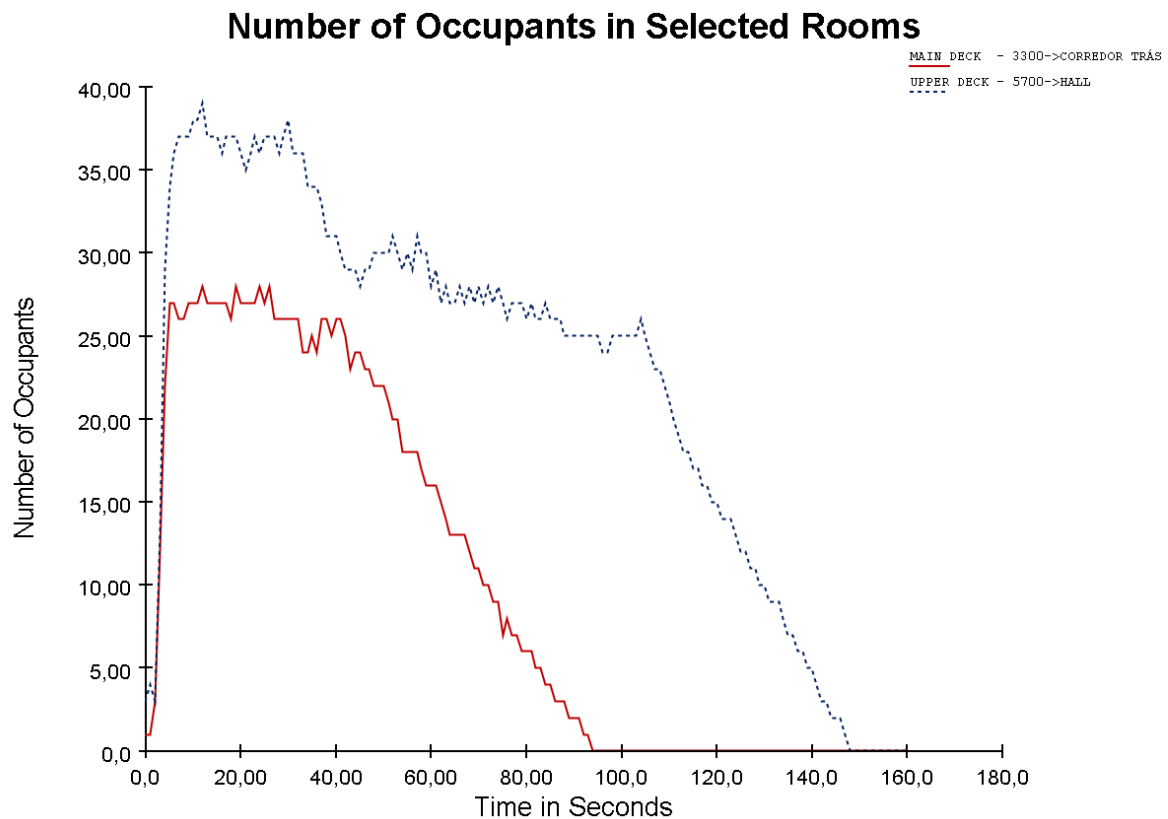


Figura 50 - Fluxo de ocupantes das salas traseiras dos conveses principal e superior na estratégia 1 com elevador

A Figura 51 indica que a evacuação sem elevador também é feita de uma forma quase constante ao longo de quase todo o tempo, apenas notando que a curva nos segundos finais indicia um atenuar no número de evacuações. Neste caso há um maior fluxo de evacuações no segundo 100, no entanto a curva prolonga-se no tempo devido à falta de elevador, o que impossibilita que a evacuação seja feita mais rapidamente.

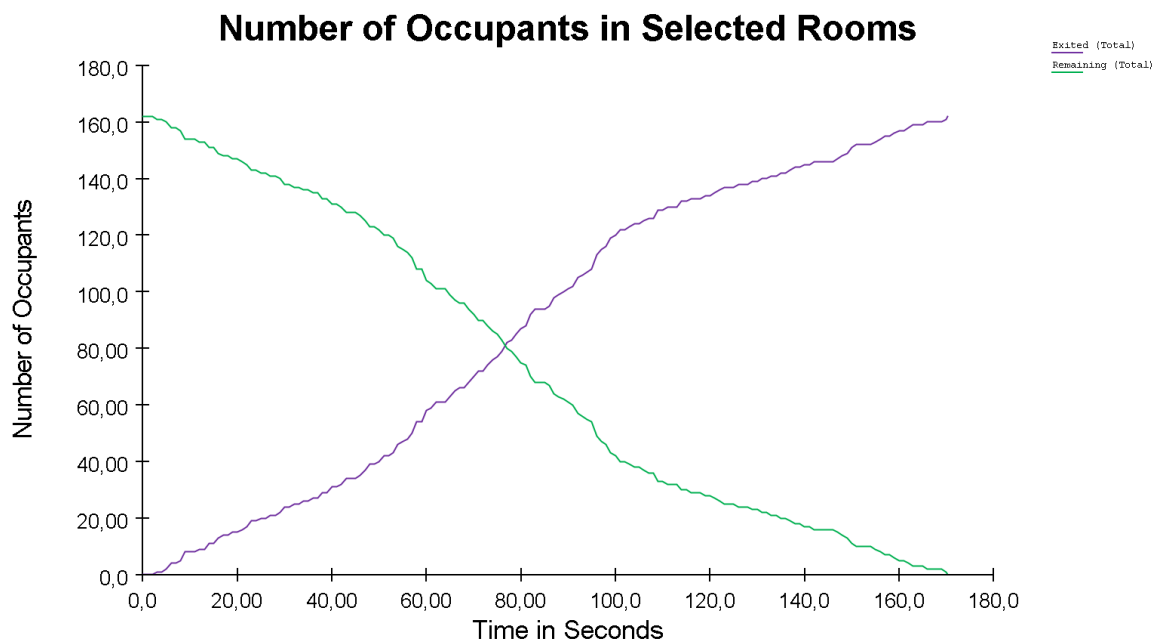


Figura 51 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 1 sem elevadores

4.1.2. Estratégia 2 – Cenário com as escadas frontais e do meio inativas (com e sem elevador)

A estratégia 2 bloqueia as escadas frontais e médias do navio, apenas deixando disponíveis as escadas traseiras como se pode ver Figura 52.

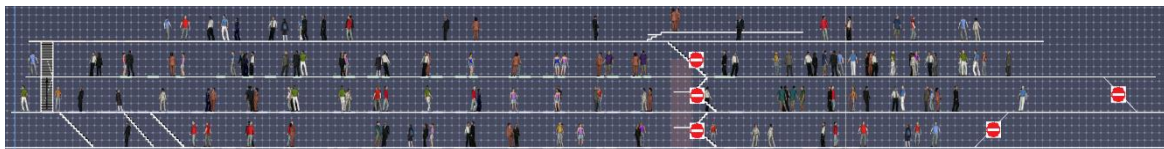


Figura 52 - Acessos bloqueados na estratégia 2

À semelhança da estratégia 1, para esta estratégia também se simulou com e sem elevador e os resultados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 2 (com e sem elevador)

Cenários	Tempo de Evacuação Total do Navio (s)	Tempo Médio de Evacuação das Pessoas do Navio (s)	Distância Média Percorrida (m)
Com Elevador	272,8 s	125,6 s	53,9 m
Sem Elevador	277,8 s	127,3 s	53,5 m

Através da Tabela 4 pode-se verificar que não existem diferenças significativas em nenhum dos parâmetros, isto deve-se ao congestionamento massivo que existe nas divisões e escadas traseiras do navio que é o único acesso disponível para este cenário. Mesmo os ocupantes usando os elevadores, irão ter de subir para o tombadilho usando as escadas traseiras, pois como já foi dito não existe acesso ao mesmo através de elevador, o que fará com que todos os tripulantes que não estejam no tombadilho usem as escadas. Nas Figuras 53 e 54 conclui-se que não há praticamente diferença tanto nos tempos, como nos ocupantes evacuados, sendo a relação entre estas duas variáveis praticamente igual para os dois casos.

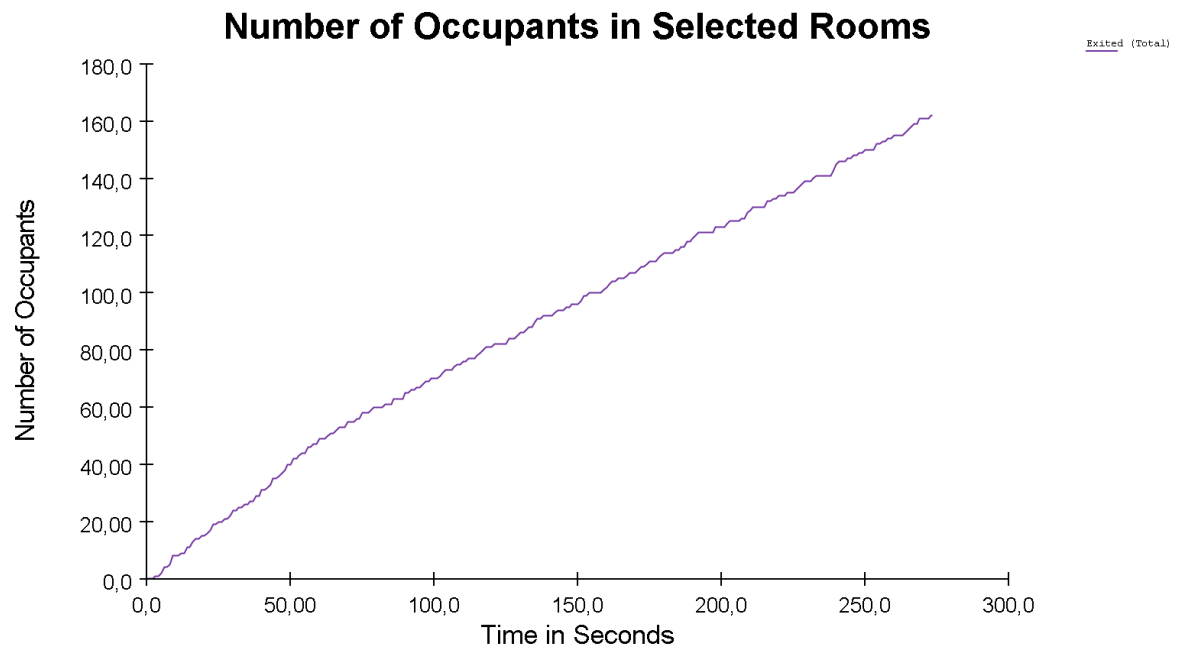


Figura 53 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 2 com elevadores

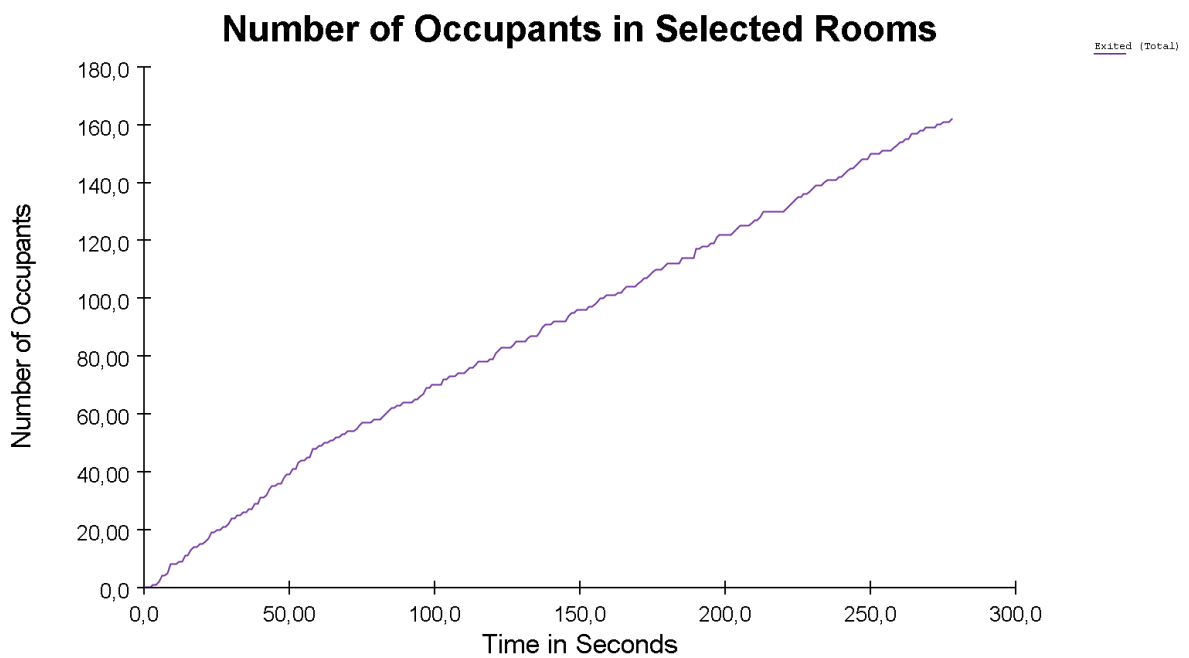


Figura 54 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 2 sem elevadores

Nas Figuras 55 e 56 é possível verificar o grande fluxo existente nas salas e corredores traseiros dos diferentes conveses do navio apenas diferindo o momento em que os picos do fluxo acontecem. Consegue-se também perceber a passagem dos passageiros de uns conveses para os outros, pois quando o fluxo baixa num convés, imediatamente atinge o pico no convés seguinte.

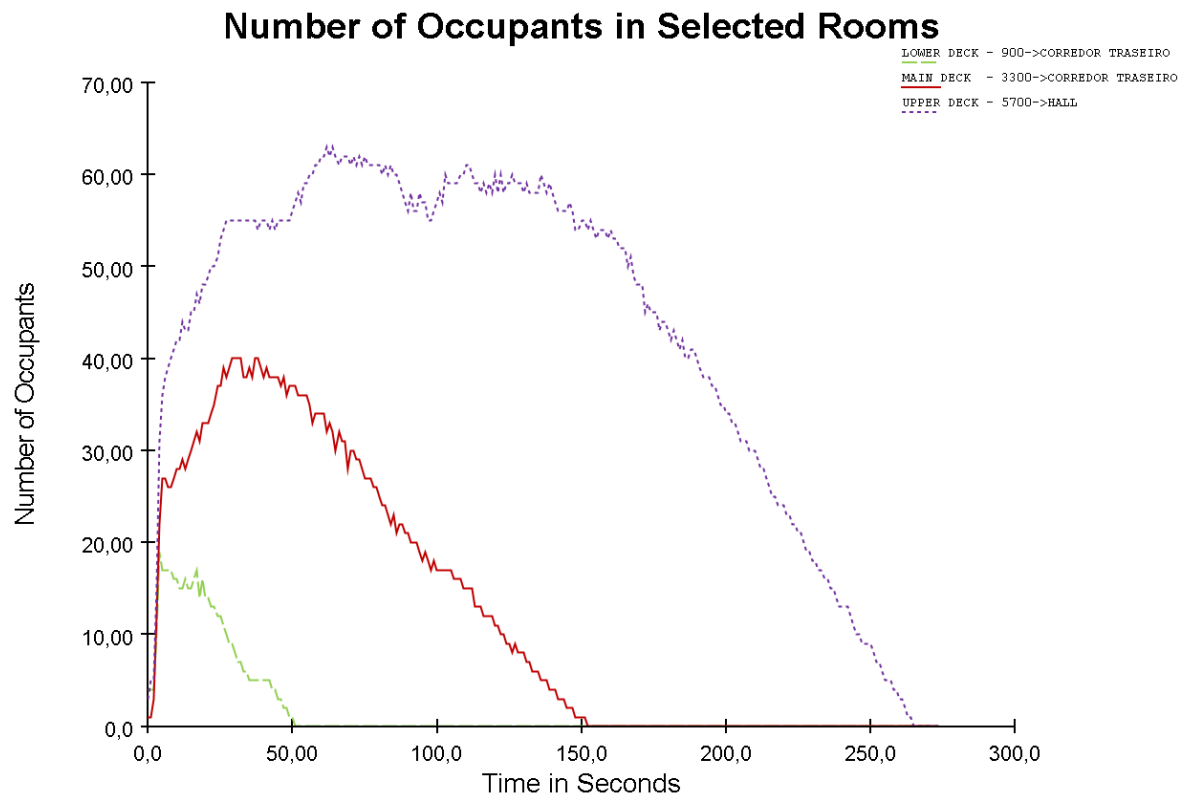


Figura 55 - Fluxo de ocupantes das salas traseiras dos conveses inferior, principal e superior na estratégia 2 com elevador

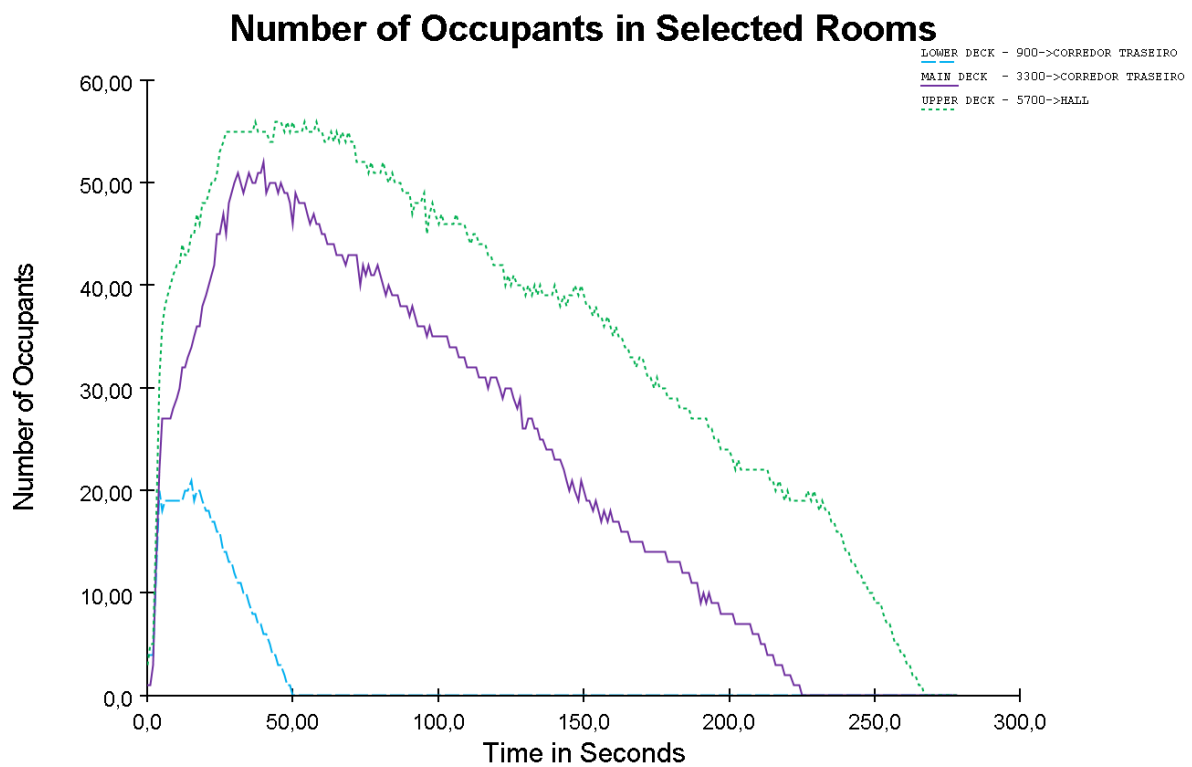


Figura 56 - Fluxo de ocupantes das salas traseiras dos conveses inferior, principal e superior na estratégia 2 sem elevador

4.1.3. Estratégia 3 – Cenário com as escadas traseiras inativas (com e sem elevador)

A estratégia 3 consiste em bloquear as escadas traseiras de todos os conveses do navio como se pode verificar na Figura 57. Com este cenário, os ocupantes apenas poderão aceder a outros conveses através das escadas médias e frontais, sendo que como já foi constatado na análise da planta do MS Douro Elegance as escadas frontais só ligam o convés inferior, convés principal e convés superior, não fazendo ligação ao tombadilho onde os passageiros se devem dirigir para evacuar.



Figura 57 - Acessos bloqueados na estratégia 3

A Tabela 5 demonstra os dados resultantes da simulação da estratégia 3, cenário esse que também foi elaborado com e sem a utilização do elevador.

Tabela 5 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 3 (com e sem elevador)

Cenários	Tempo de Evacuação Total do Navio (s)	Tempo Médio de Evacuação das Pessoas do Navio (s)	Distância Média Percorrida (m)
Com Elevador	188,5 s	101,7 s	74,1 m
Sem Elevador	198,7 s	100,8 s	74,3 m

Analisando os dados recolhidos, percebe-se que como era de esperar neste cenário sem elevador a evacuação torna-se mais demorada, pois há uma concentração muito grande de ocupantes no centro do navio, que também é onde se localiza o elevador. Caso o elevador esteja em funcionamento há sempre menos gente no corredor, o que permite um ligeiro melhoramento nos tempos de evacuação do cenário com elevador.

Nas Figuras 58 e 59 pode-se verificar que inicialmente há um aumentar de evacuações nos primeiros segundos que são os ocupantes do tombadilho que evacuam mais rapidamente visto estarem próximos dos botes salva-vidas, de seguida há uma diminuição que se deve aos congestionamentos de pessoas nas escadas do meio do navio. No entanto, e devido a haver duas escadas de acesso ao tombadilho neste ponto do navio, a evacuação é feita mais rapidamente que por exemplo no cenário 4.1.2 em que ao evacuar pela parte traseira, só tem umas escadas a ligar o convés superior ao tombadilho.

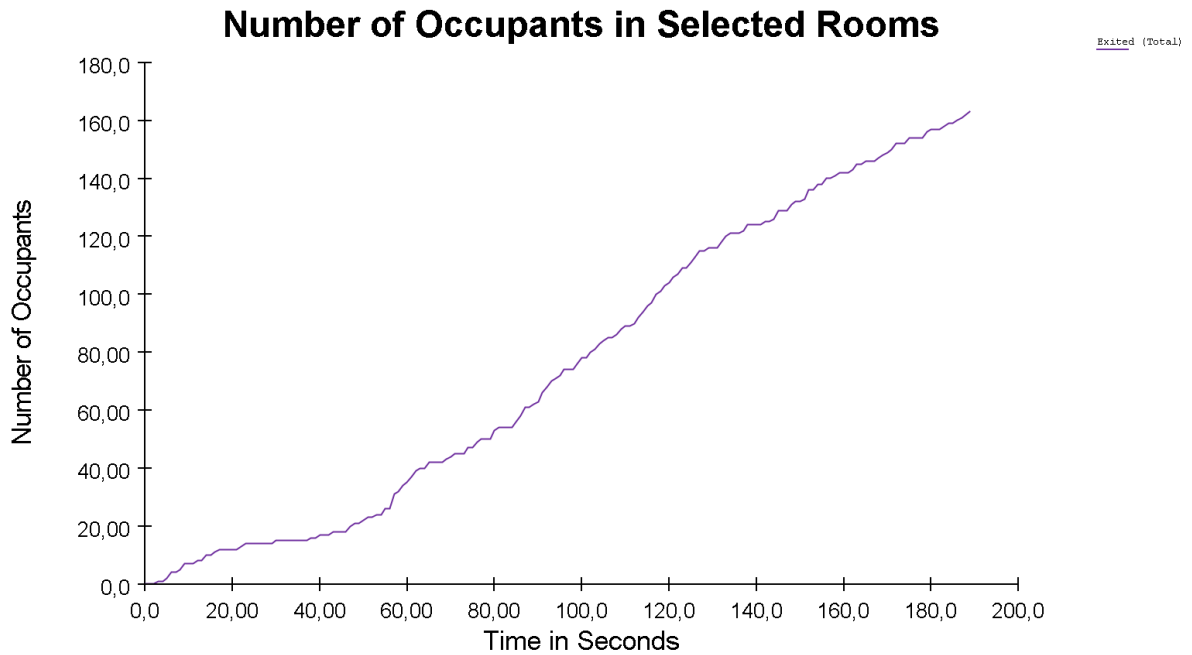


Figura 58 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 3 com elevadores

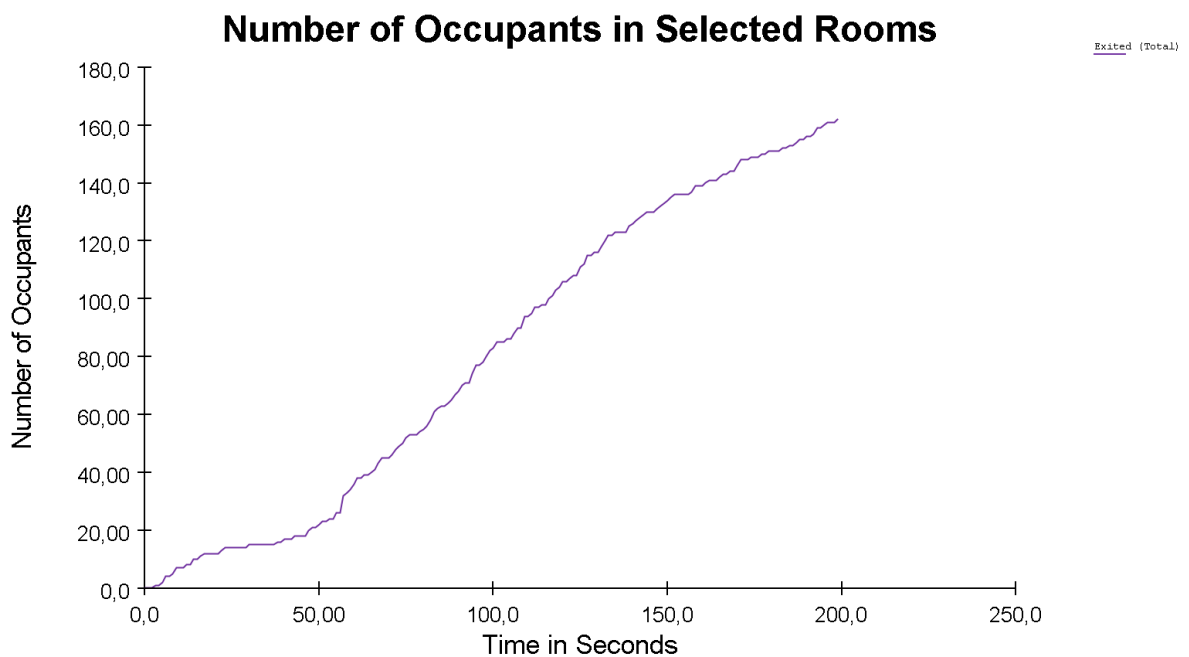


Figura 59 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 3 sem elevadores

Nas Figuras 60 e 61 consegue-se perceber que no convés superior existe um pico de fluxo no hall de entrada devido aos ocupantes que estão nesse convés perto desse hall que se movimentam rapidamente para lá, no entanto e mesmo com alto fluxo nos restantes conveses, o convés superior diminui o seu fluxo constantemente ao longo do tempo devido às duas escadas que dão acesso ao tombadilho que fazem com que o mesmo consiga escoar os ocupantes de forma mais eficaz. Analisando ambos os gráficos verifica-se que o elevador não tem grande influência no escoamento dos ocupantes, apenas o convés principal escoar mais rapidamente com a ajuda do elevador.

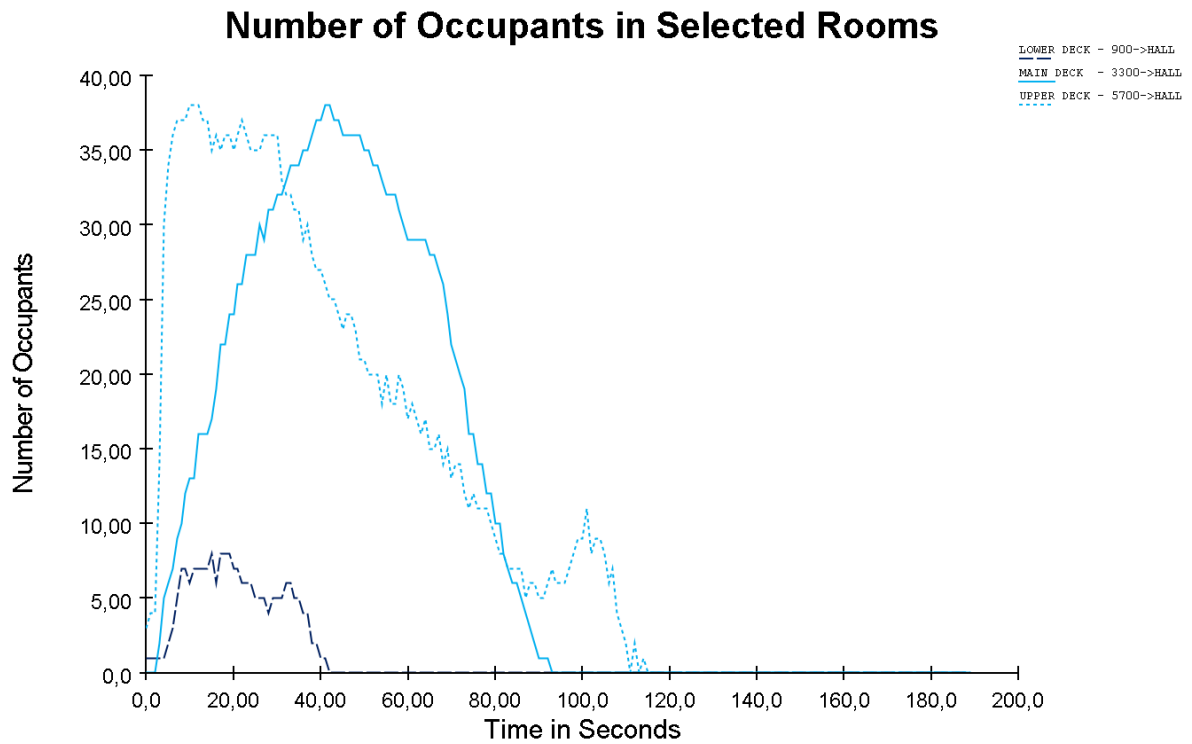


Figura 60 - Fluxo de ocupantes dos halls dos conveses inferior, principal e superior na estratégia 3 com elevador

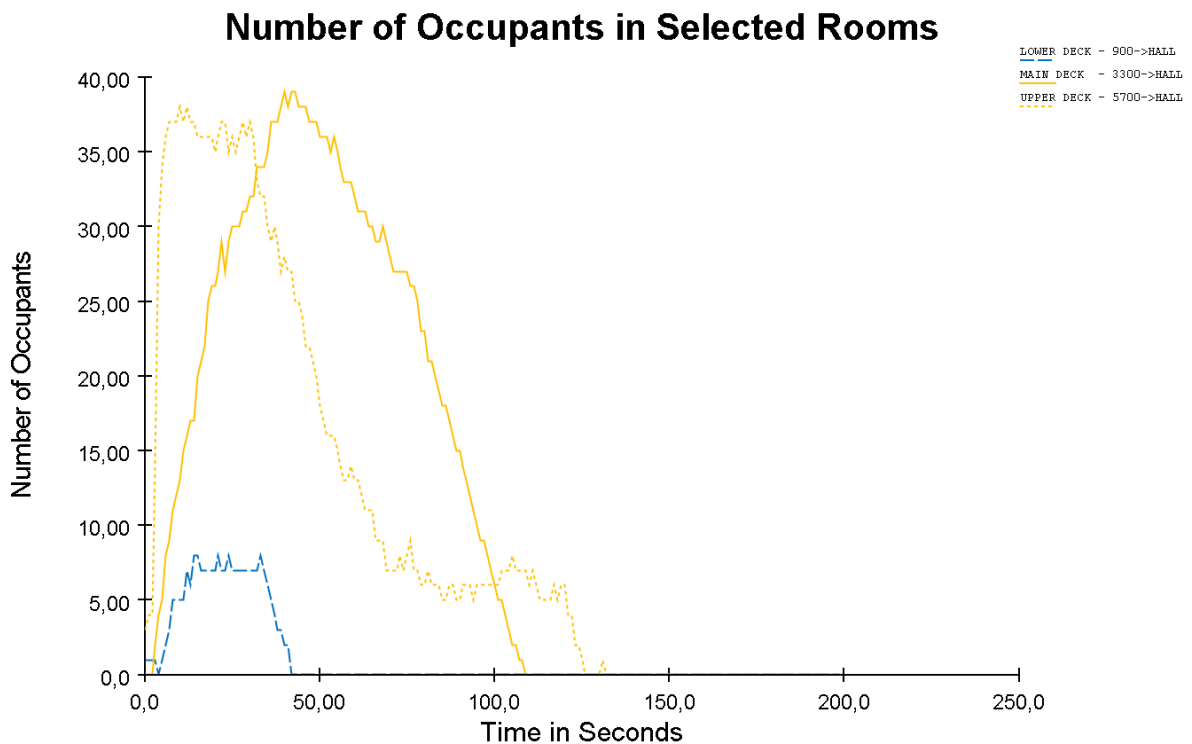


Figura 61 - Fluxo de ocupantes dos halls dos conveses inferior, principal e superior na estratégia 3 sem elevador

4.1.4. Estratégia 4 – Cenário com as escadas traseiras e frontais inativas (com e sem elevador)

Na estratégia 4 os ocupantes irão ter as escadas frontais e traseiras bloqueadas, tendo de se dirigir ao centro do navio obrigatoriamente para fazerem a evacuação pelas escadas que aí se encontram. Os acessos proibidos podem ser verificados na Figura 62.



Figura 62 - Acessos bloqueados na estratégia 4

A Tabela 6 demonstra os resultados para esta simulação. O tempo médio de evacuação é bastante alto, o que indica que há um ponto de congestionamento grande, e para estes casos à semelhança de estratégias anteriores o uso do elevador não tem grande impacto na evacuação.

Tabela 6 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 4 (com e sem elevador)

Cenários	Tempo de Evacuação Total do Navio (s)	Tempo Médio de Evacuação das Pessoas do Navio (s)	Distância Média Percorrida (m)
Com Elevador	192,2 s	102,5 s	74,2 m
Sem Elevador	198,7 s	100,8 s	74,3 m

Nas Figuras 63 e 64 é possível verificar que entre os segundos 23 e 58 há uma taxa de evacuação menor, pois à semelhança da estratégia do subcapítulo 4.1.3 há um congestionamento na parte central do navio durante este tempo o que não permite um escoamento rápido, no entanto após esse período os ocupantes são evacuados de uma forma constante. Ainda entre os segundos 56 e 68 há um pequeno aumento de evacuações que são referentes aos ocupantes que estavam presentes no convés superior e conseguiram subir para o tombadilho antes do congestionamento. Na Figura 64 não é tão perceptível, mas existe.

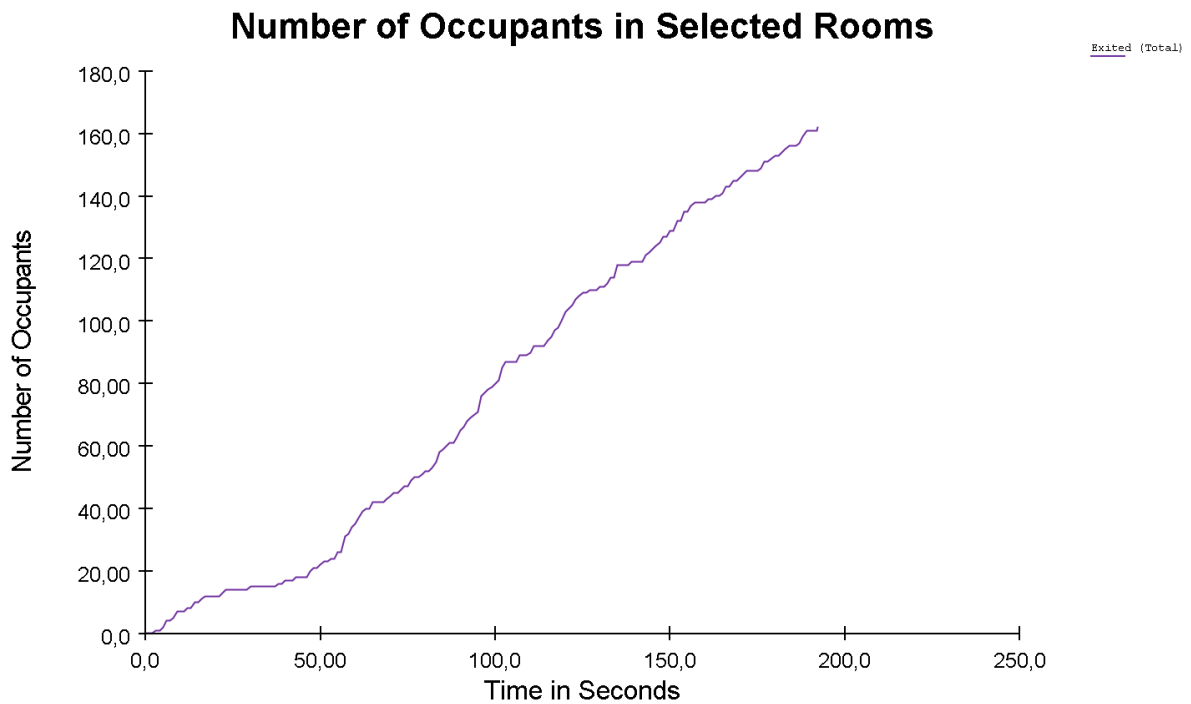


Figura 63 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 2 com elevadores

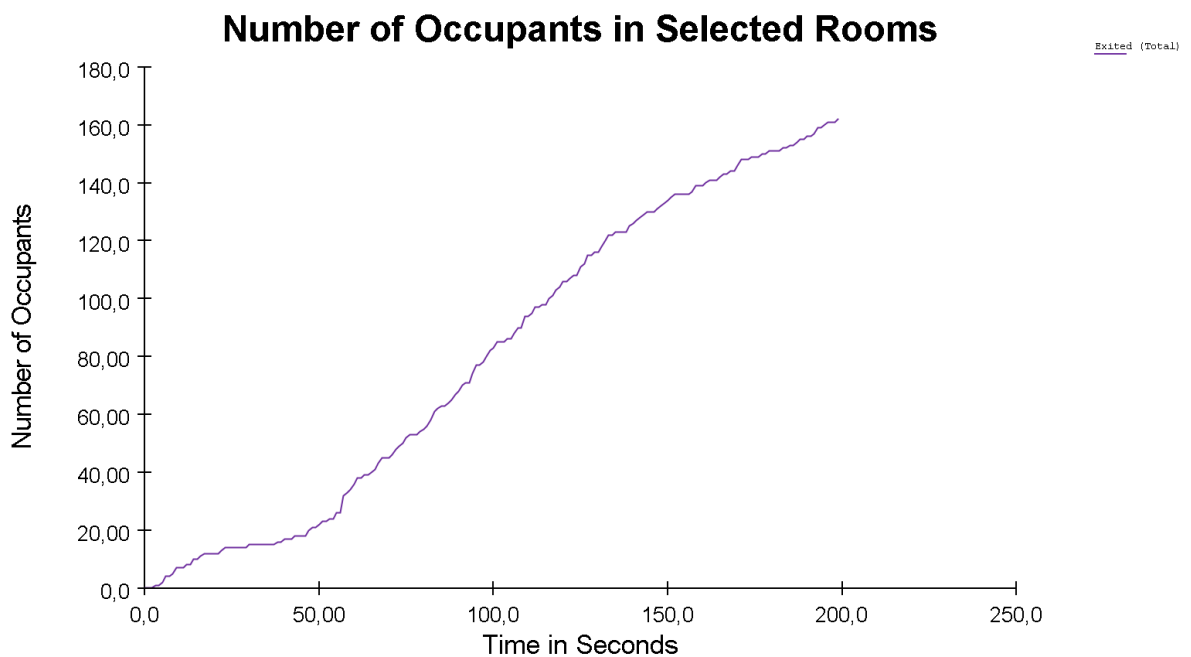


Figura 64 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 2 sem elevadores

Para se comprovar o congestionamento pode-se verificar as Figuras 65 e 66, onde no *hall* de entrada do deck principal há um ajuntamento de quase 40 pessoas ao mesmo tempo num espaço muito reduzido. Para além disso, para este caso, esta divisão tem um fluxo máximo visto que as outras escadas estão bloqueadas e também tem 3 pontos de entrada de pessoas e apenas 1 ponto de saída.

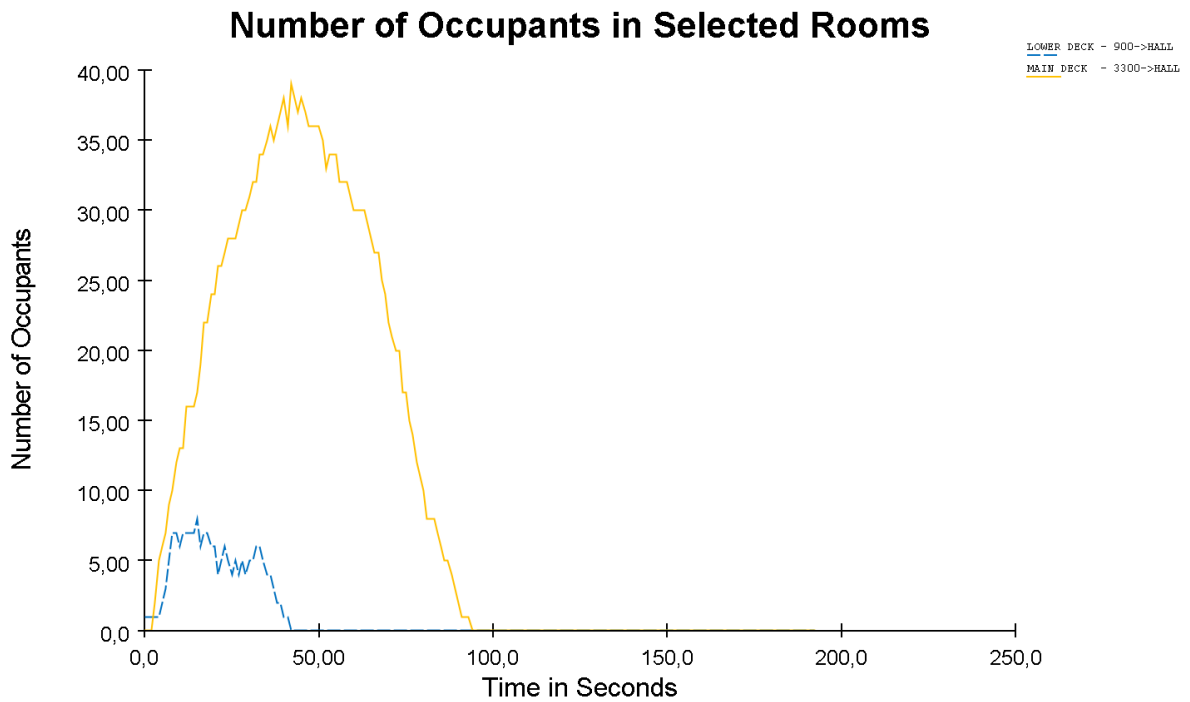


Figura 65 - Fluxo de ocupantes nos halls dos conveses inferior e principal na estratégia 4 com elevador

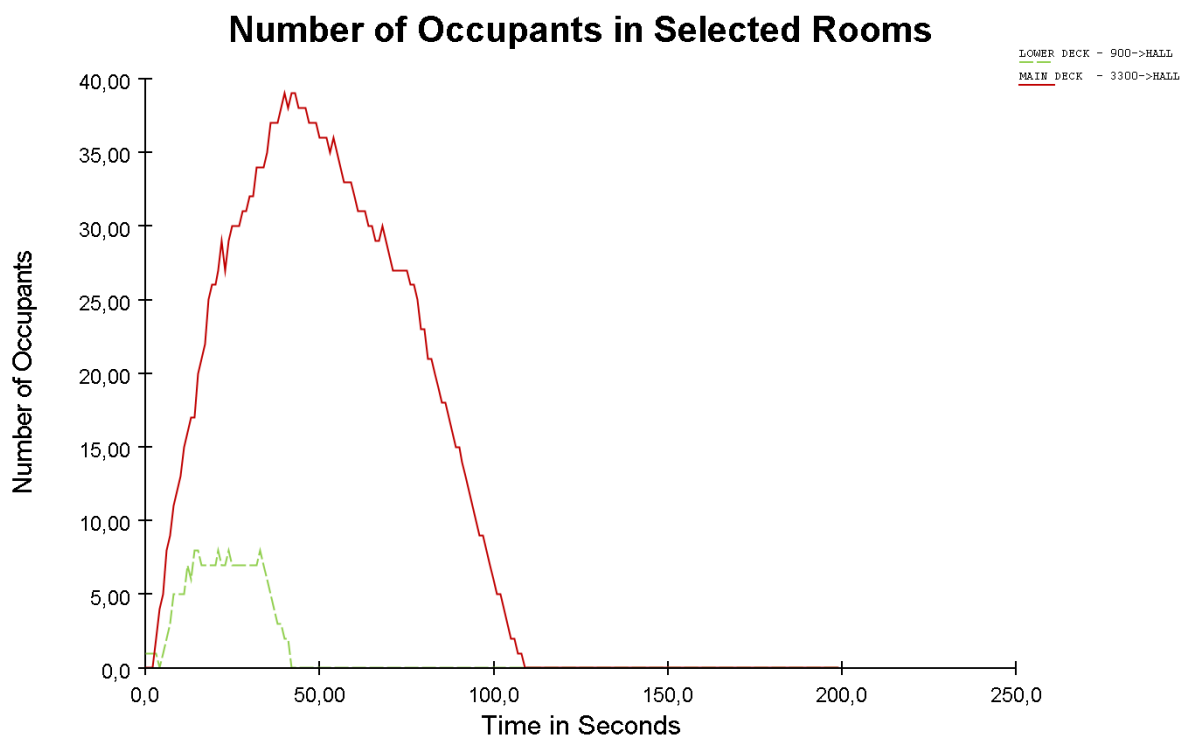


Figura 66 - Fluxo de ocupantes nos halls dos conveses inferior e principal na estratégia 4 sem elevador

4.1.5. Estratégia 5 – Cenário com todos os ocupantes posicionados na parte frontal do navio no convés inferior (com e sem elevador)

Para a estratégia 5 não houve bloqueios nos diversos acessos. Neste cenário especial, todos os ocupantes do navio foram colocados na parte frontal do navio no convés inferior, mais precisamente na divisão da cozinha como se pode ver na Figura 67.

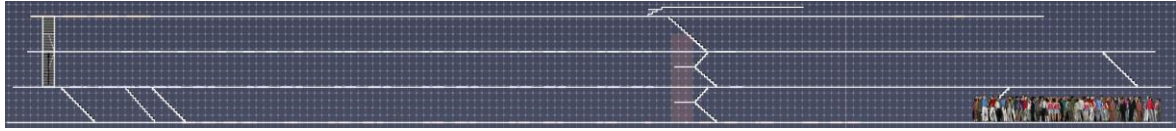


Figura 67 - Posicionamento dos ocupantes na estratégia 5

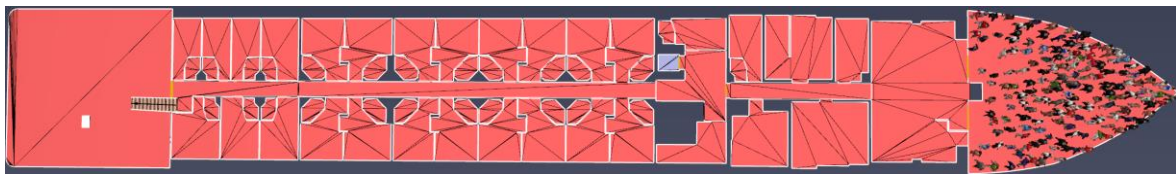


Figura 68 - Vista de cima do convés inferior

Como é possível analisar na Tabela 7, o elevador para esta estratégia não traz vantagens, visto que é um motivo para haver mais congestionamento nas escadas intermédias do navio enquanto os ocupantes esperam pelo elevador.

Tabela 7 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 5 (com e sem elevador)

Cenários	Tempo de Evacuação Total do Navio (s)	Tempo Médio de Evacuação das Pessoas do Navio (s)	Distância Média Percorrida (m)
Com Elevador	232,7 s	154,5 s	101,1 m
Sem Elevador	216,1 s	151,8 s	101,7 m

Visto que os ocupantes estão longe dos pontos de evacuação, como podemos ver nas Figuras 69 e 70 inicialmente não há evacuações, apenas começa a haver ocupantes evacuados a partir do segundo 74. É possível também verificar que a evacuação com o uso de elevador se prolonga no tempo, embora nos últimos segundos o gráfico atenua significando que há menos pessoas a serem evacuadas nesse período. A evacuação sem elevador é feita em menos tempo e de uma forma constante a partir do momento em que o primeiro ocupante é evacuado.

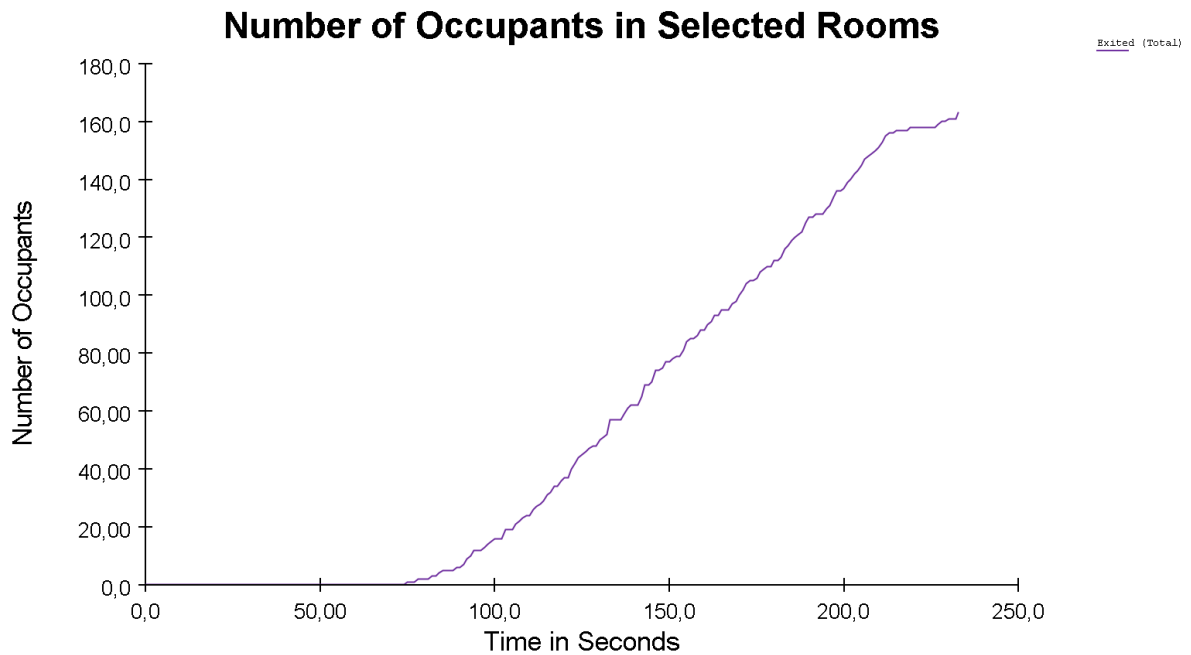


Figura 69 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 5 com elevadores

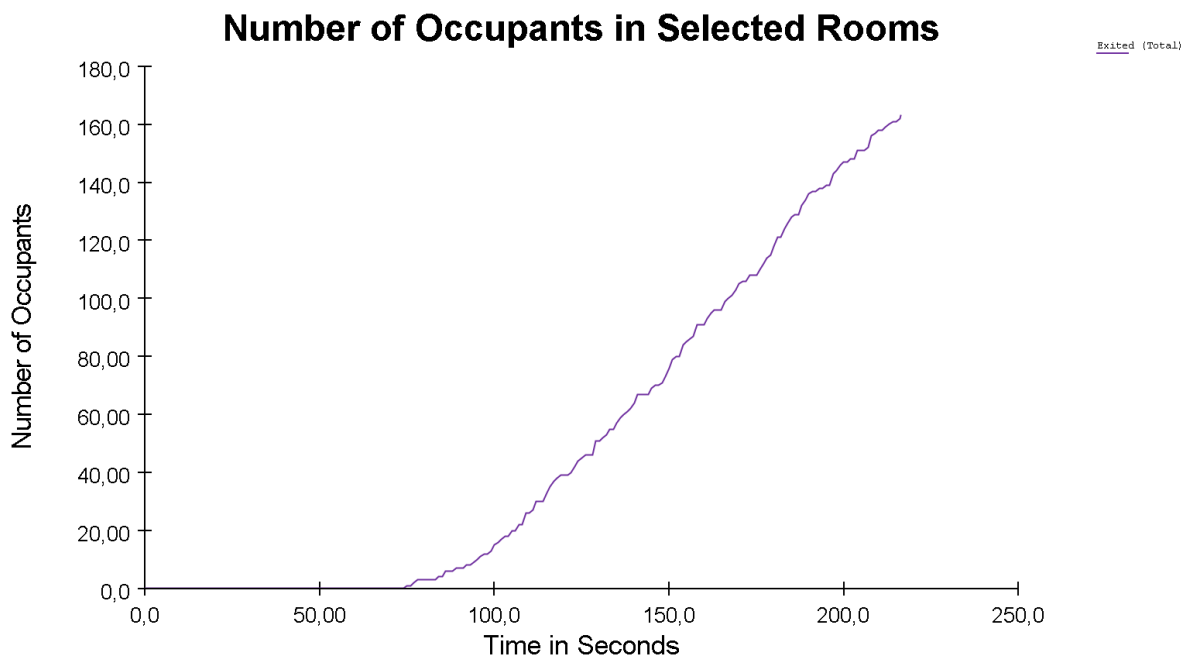


Figura 70 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 5 sem elevadores

Nos gráficos de fluxo de ocupantes representados nas Figuras 71 e 72, percebemos que no *hall* do deck inferior há um pico de fluxo entre os 100 segundos e os 140 segundos na Figura 71 que não existe na Figura 72, isto deve-se aos ocupantes que estão parados no *hall* à espera do elevador para poderem prosseguir com a evacuação. Dá para notar que no cenário sem elevador a maioria dos ocupantes como não podia fazer uso do mesmo, dirigiu-se à parte traseira do navio prosseguindo com a sua evacuação pelas escadas traseiras.

Os dois cenários têm um denominador comum que é um maior fluxo na parte frontal do navio, que indica que a maioria das pessoas usou as escadas da frente do navio.

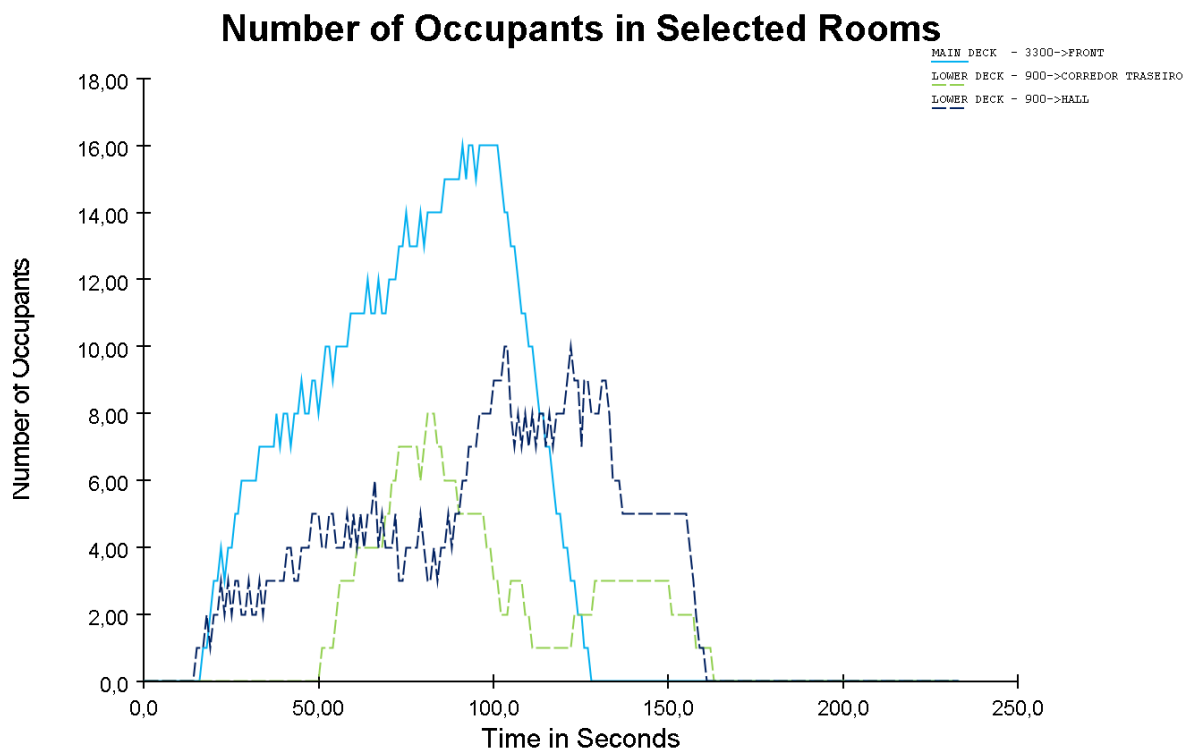


Figura 71 - Fluxo de ocupantes na parte frontal, intermédia e traseira do navio na estratégia 5 com elevador

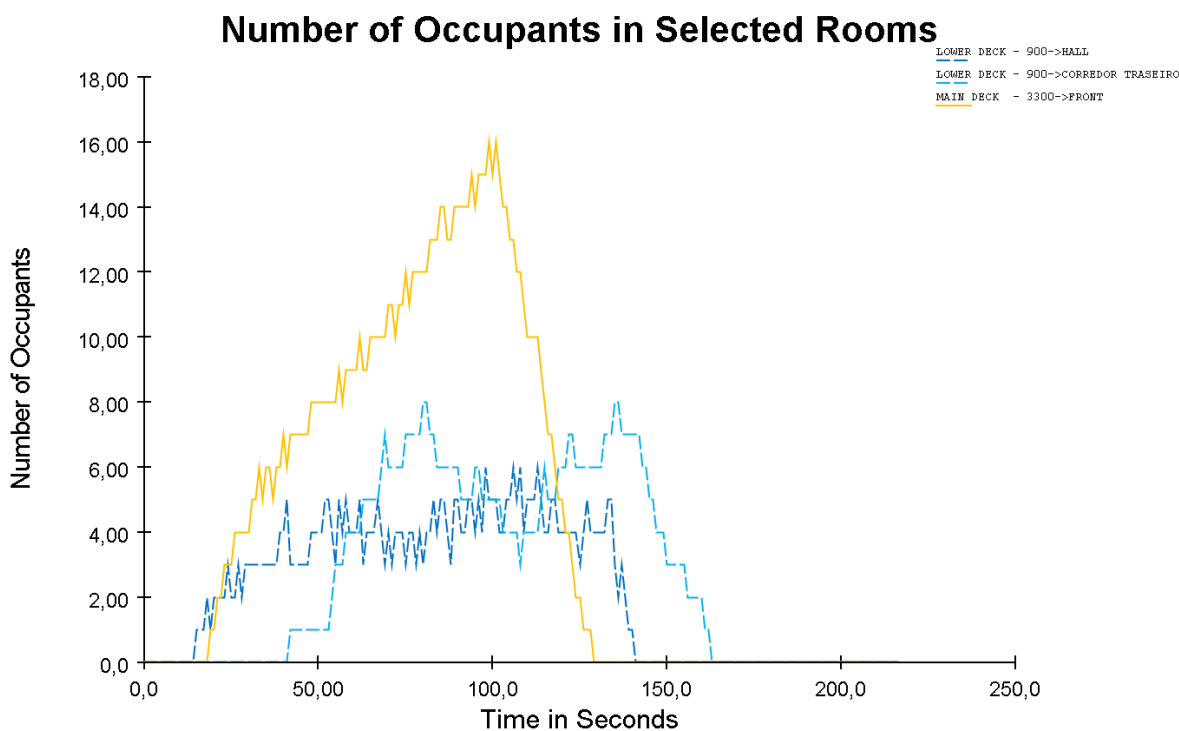


Figura 72 - Fluxo de ocupantes na parte frontal, intermédia e traseira do navio na estratégia 5 sem elevador

O facto de a parte frontal do navio não ter acesso ao tombadilho, faz com que quem use as escadas frontais tenha de se dirigir às escadas intermédias quando se encontra no convés superior. Isto para os dois casos causa um fluxo grande no *hall* do convés superior como se pode verificar na Figura 73 que só não é maior porque como já foi abordado esta divisão tem duas escadas de acesso ao tombadilho.

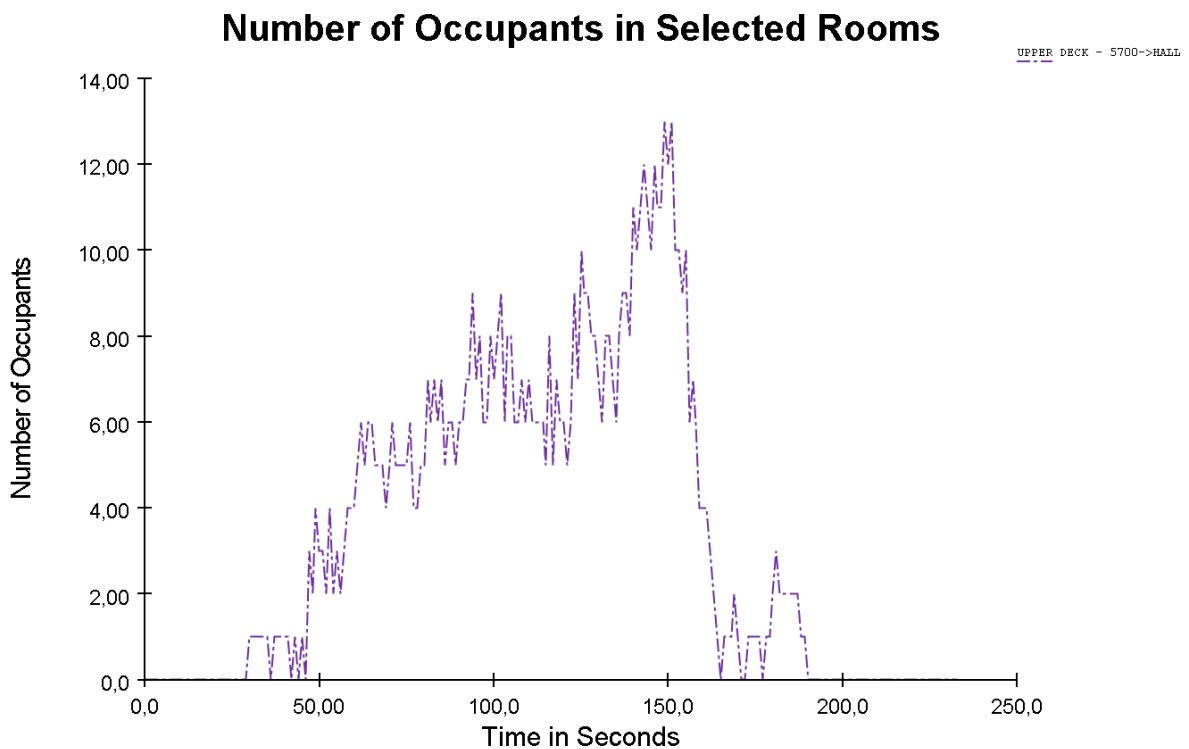


Figura 73 - Fluxo de ocupantes no hall do convés superior na estratégia 5 com elevador

4.1.6. Estratégia 6 – Cenário de madrugada com a tripulação nas cabines (com e sem elevador)

Nesta estratégia, foi simulada um cenário de emergência noturno em que os ocupantes do navio estariam recolhidos nas suas cabines, e apenas alguns elementos da tripulação estavam a operar no navio em outras divisões. Nas Figuras 74, 75, 76 e 77 verifica-se que grande parte dos ocupantes foram distribuídos pelas cabines e que alguns elementos da tripulação se encontram no restaurante no bar/sala de estar e na ponte de comando do navio.

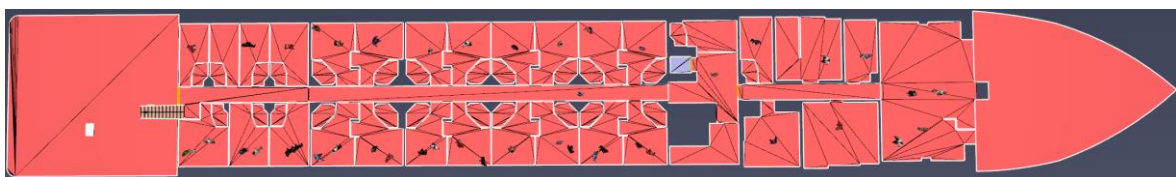


Figura 74 - Convés inferior na estratégia 6

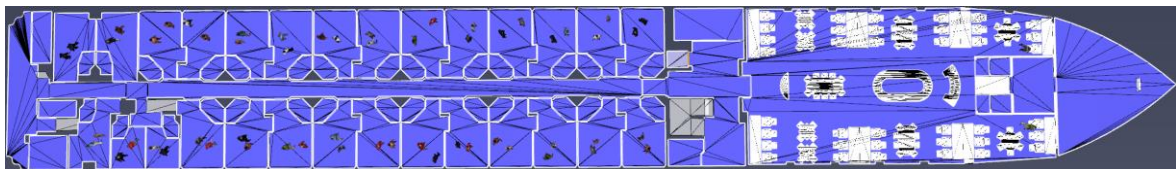


Figura 75 - Convés principal na estratégia 6

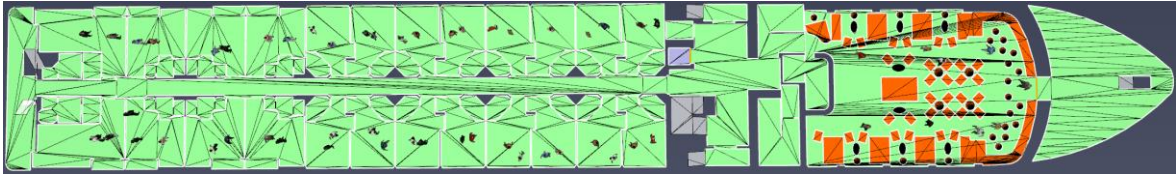


Figura 76 - Convés superior na estratégia 6

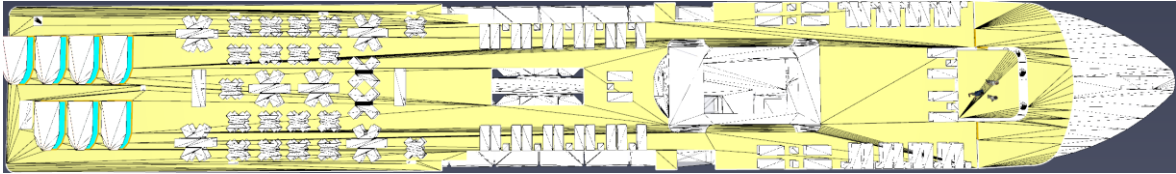


Figura 77 - Tombadilho na estratégia 6

Na Tabela 8 pode-se verificar que para este cenário os ocupantes evacuam mais rapidamente com o elevador operacional, e o tempo médio também é mais rápido embora a distância média percorrida seja maior. Isto justifica-se, pois, apesar de os ocupantes percorrerem mais metros, evitam o congestionamento em certas partes do navio.

Tabela 8 - Tempos de evacuação resultantes da simulação da estratégia 6 (com e sem elevador)

Cenários	Tempo de Evacuação Total do Navio (s)	Tempo Médio de Evacuação das Pessoas do Navio (s)	Distância Média Percorrida (m)
Com Elevador	238,1 s	119,5 s	56,5 m
Sem Elevador	254,9 s	124,1 s	55,5 m

Nas Figuras 78 e 79 pode-se verificar que existe uma resistência inicial para os dois casos que representa um congestionamento, embora naturalmente se note mais para o caso sem elevador, pois há mais ocupantes a ocupar os diferentes acessos do navio.

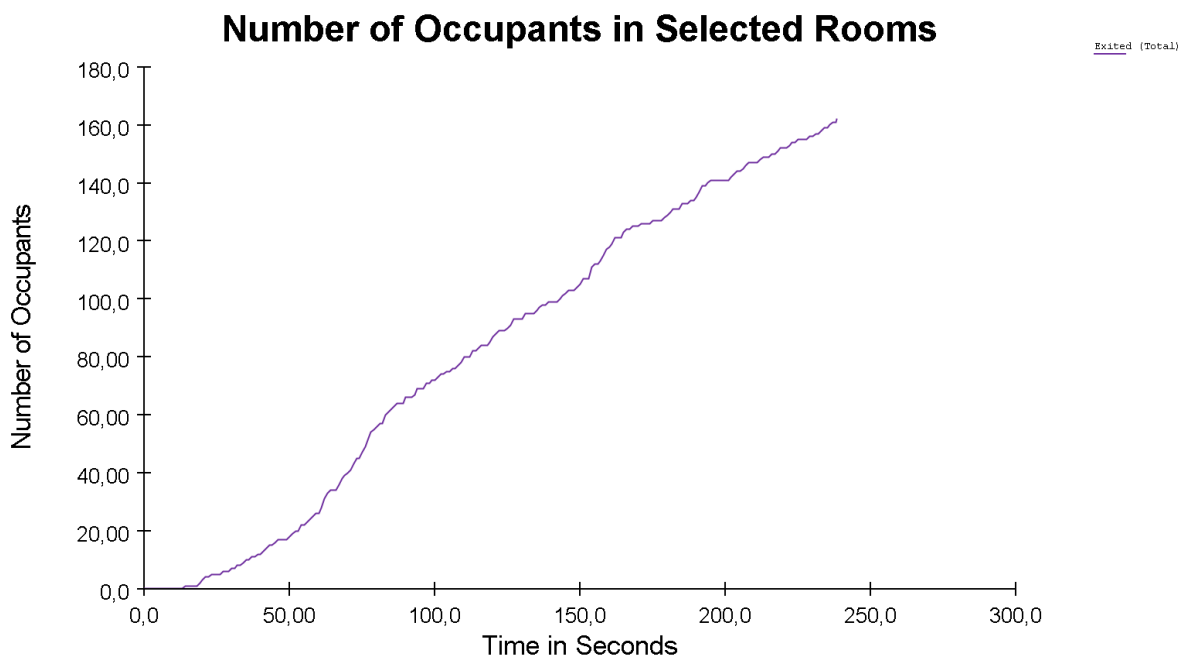


Figura 78 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 6 com elevadores

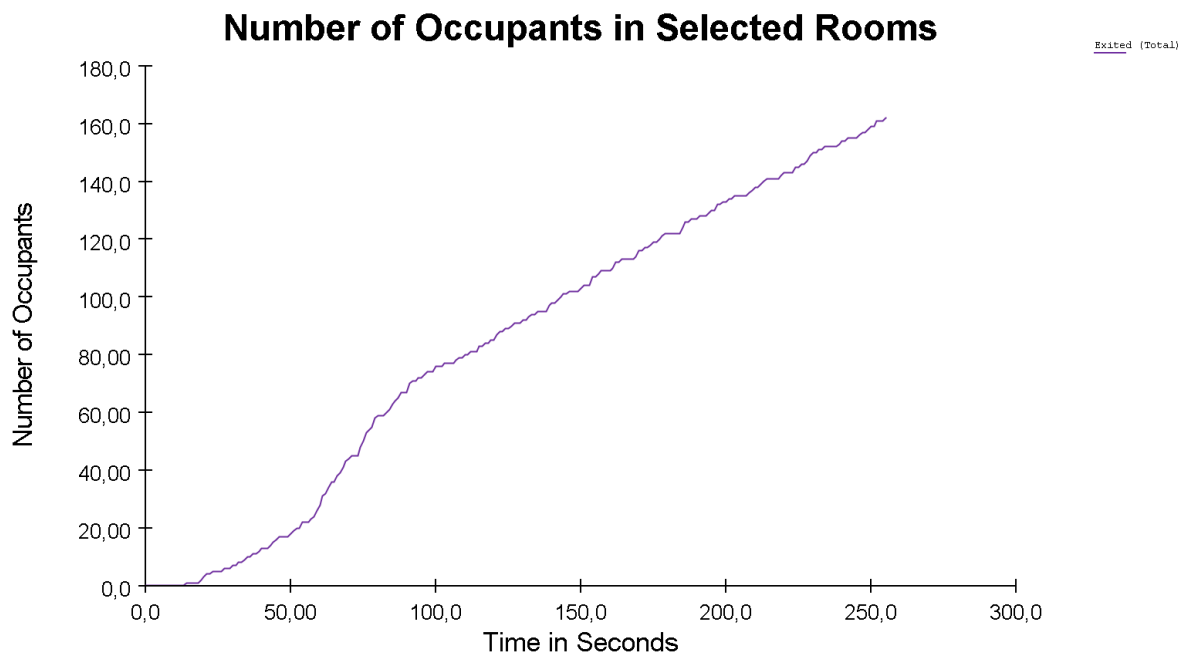


Figura 79 - Gráfico da evolução da evacuação referente à estratégia 6 sem elevadores

Nas Figuras 80 e 81 percebemos que em ambos os casos há uma afluência à parte traseira do navio, pois os gráficos mostram o fluxo de ocupantes dos corredores traseiros nos diferentes conveses.

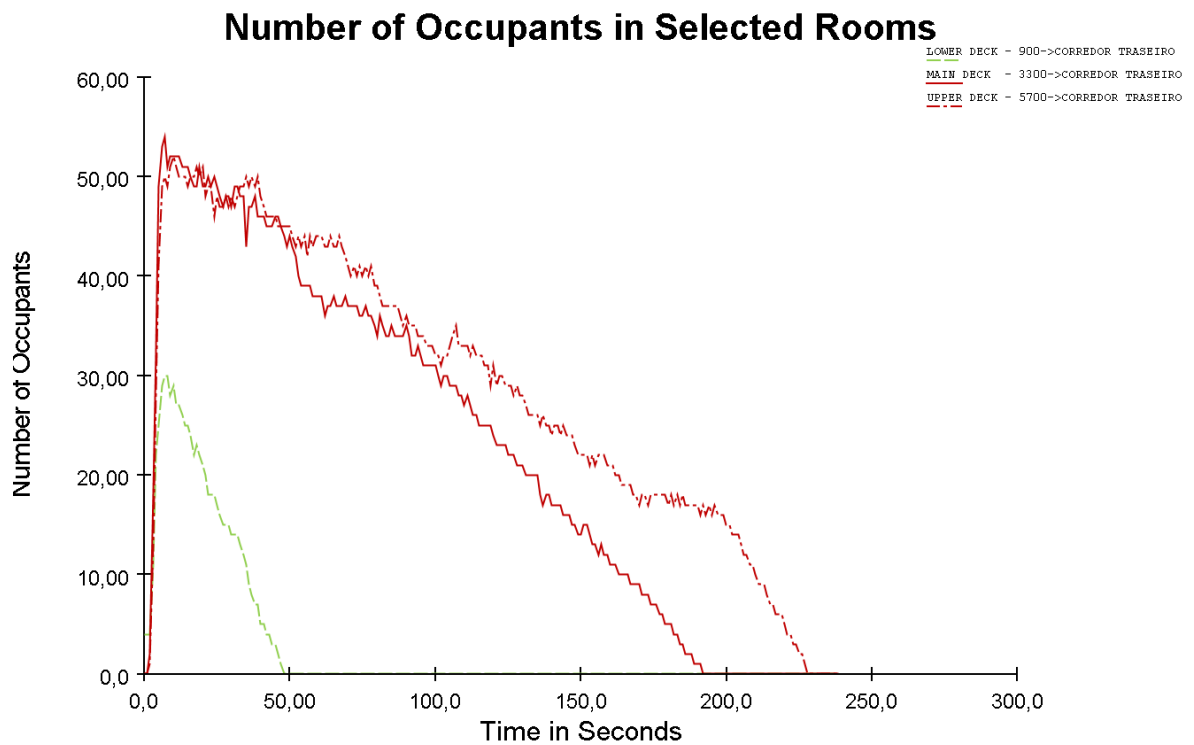


Figura 80 - Fluxo de ocupantes nos corredores traseiros na estratégia 6 com elevador

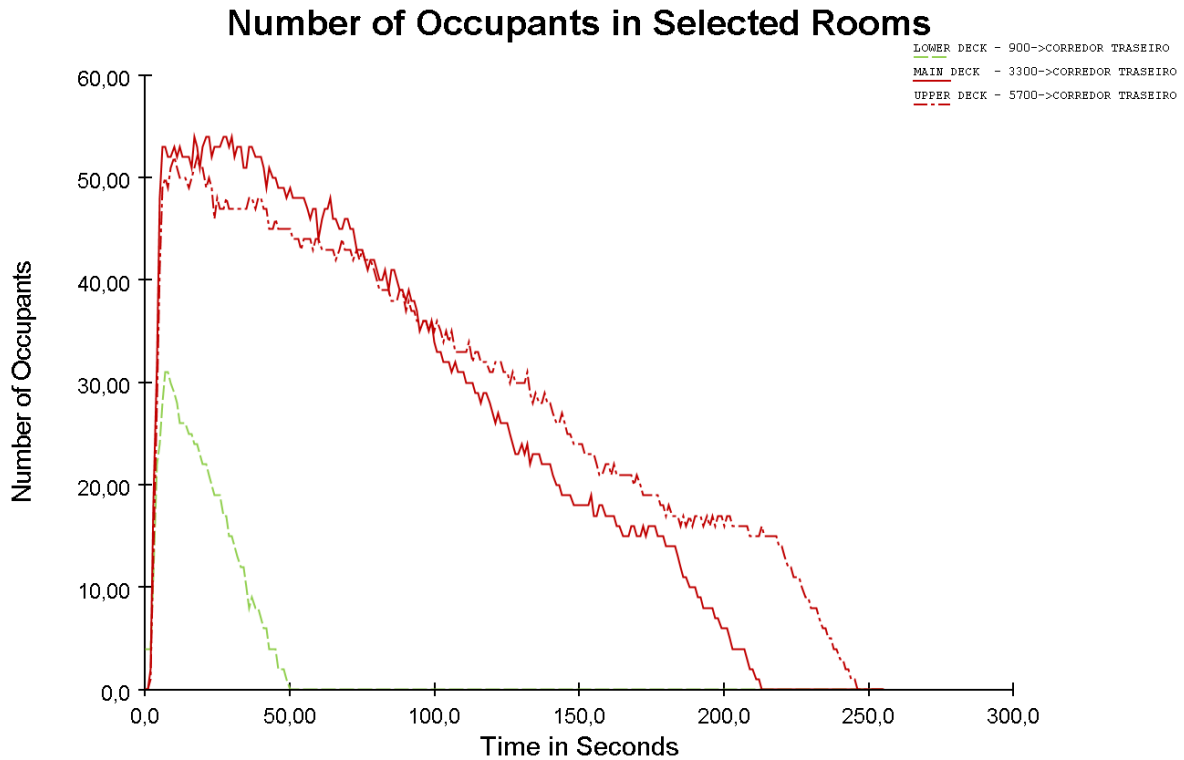


Figura 81 - Fluxo de ocupantes nos corredores traseiros na estratégia 6 sem elevador

Para comprovar que a afluência dos ocupantes é maior nas partes traseiras dos conveses as figuras demonstram que os diferentes *halls* dos conveses inferior e principal não têm fluxos significativos comparativamente aos acessos traseiros.

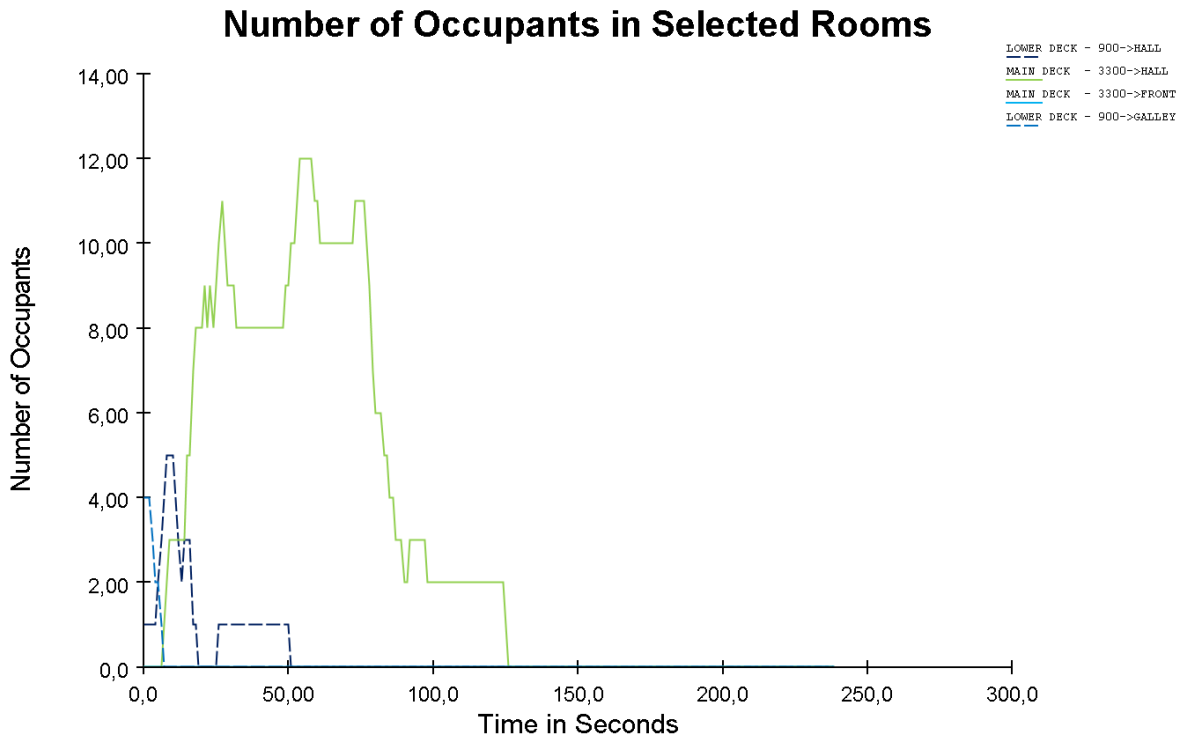


Figura 82 - Fluxo de ocupantes nos halls na estratégia 6 com elevador

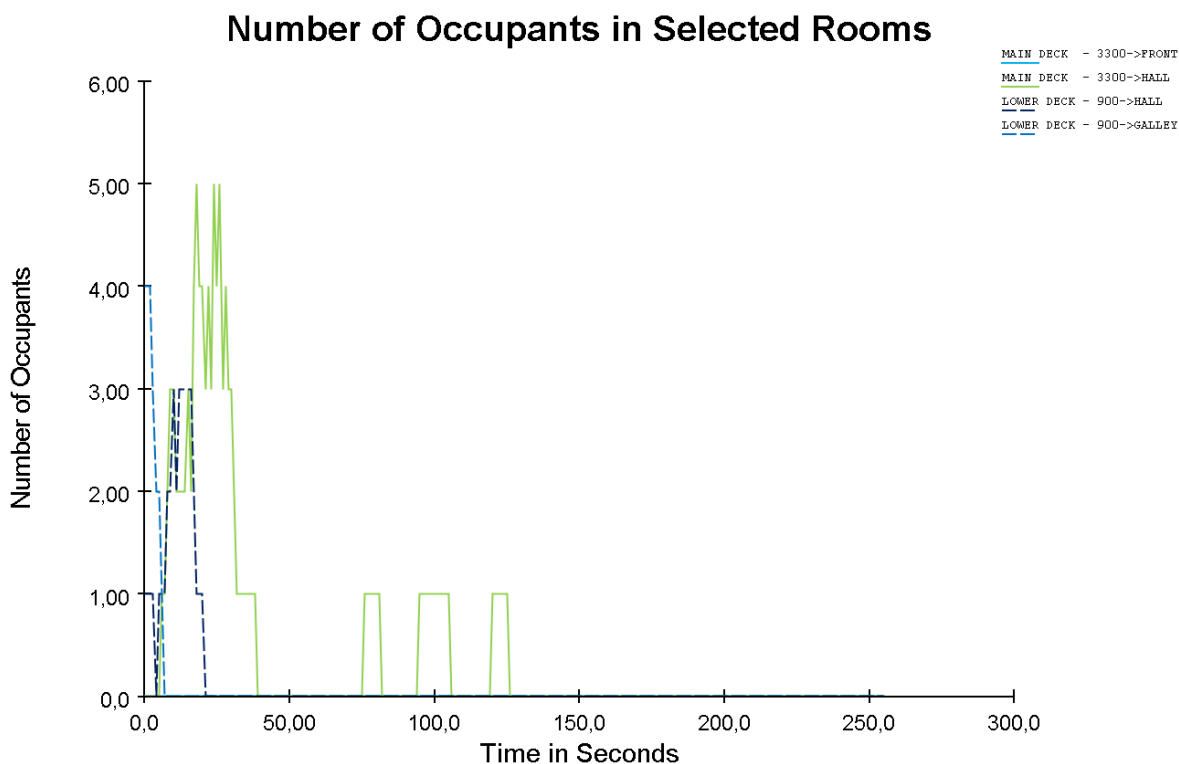


Figura 83 - Fluxo de ocupantes nos halls na estratégia 6 sem elevador

4.2. Discussão de resultados

Como foi possível analisar este estudo, apesar de os ocupantes não terem uma orientação definida o caminho a seguir para evacuar é importante de modo a prevenir congestionamentos que provocam atrasos significativos na evacuação total do MS Douro Elegance.

Nas estratégias e respetivos cenários estudados, foi possível comprovar que quando o elevador está disponível para uso dos ocupantes do navio, os mesmos ao fazer a utilização do elevador fazem com que o congestionamento nos acessos intermédios principalmente seja reduzido o que resulta numa diminuição algo significativa no tempo total de evacuação. Embora de uma forma menos significativa o uso do elevador também influencia positivamente os acessos traseiros e frontais.

Nomeadamente nas divisões como o bar/sala de estar, restaurante e o tombadilho, o facto de haver objetos como mesas e cadeiras obriga os ocupantes a contornarem os mesmos, o que resulta num aumento do tempo de evacuação.

A disponibilidade de todas as escadas e divisões do navio é crucial para o escoamento de ocupantes, nas diferentes estratégias onde eram bloqueados acessos concluiu-se sempre que o tempo total de evacuação sobe drasticamente comparativamente às estratégias que têm todos os acessos livres de serem utilizados. O bloqueio de acessos resulta em uma grande acumulação de pessoas em outros acessos existentes no navio, o que causa um congestionamento massivo visto que o mesmo tem apenas 3 pontos de acessos (traseiro, intermédio e frontal) como foi apresentado inicialmente. O bloqueio de acessos é a principal causa do aumento do tempo de evacuação.

O bloqueio que causa mais congestionamento é das escadas intermédias, pois é o acesso que recebe mais pessoas e que dá mais escoamento ao navio, visto ter elevador, e duas escadas que ligam o convés superior ao tombadilho, o que significa que pelo menos nesse piso tem duas vezes

mais capacidade de escoamento que as escadas traseiras que apenas possui uma escada para o acesso ao tombadilho.

Depois da análise dos resultados da simulação para cada estratégia, concluímos que a maior parte dos casos onde o tempo total da evacuação é menor, é nos casos onde o elevador se encontra operacional. A Tabela 9 demonstra os melhores casos onde o tempo total de evacuação é menor para cada uma das estratégias.

Tabela 9 - Melhores tempos de evacuação para cada estratégia

Estratégia	Elevadores Operacionais	Tempo Total de Evacuação (s)	Tempo Médio de Evacuação p/ Ocupante (s)	Distância Média Percorrida p/ Ocupante (m)
1	Sim	159,6 s	78,1 s	50,6 m
2	Sim	272,8 s	125,6 s	53,9 m
3	Sim	188,5 s	101,7 s	74,1 m
4	Sim	192,2 s	102,5 s	74,2 m
5	Não	216,1 s	151,8 s	101,7 m
6	Sim	238,1 s	119,5 s	56,5 m

Ao fazer a utilização do elevador resulta com que o congestionamento nos acessos intermédios seja reduzido o que resulta numa diminuição algo significativa no tempo total de evacuação. O único caso em que a utilização não compensa é na estratégia 5, isto porque os ocupantes ao estarem todos na parte frontal do navio quando se inicia a evacuação, ao se dirigirem à parte intermédia cria congestionamento com os ocupantes que estão à espera do elevador paradas. Sendo que as divisões têm espaço reduzido, qualquer paragem ou espera de ocupantes cria congestionamento de imediato. Em termos de distância média percorrida e tempo médio de evacuação por ocupante não existem diferenças consideráveis.

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Projeto/ Dissertação / Estágio do 2º ano do curso de Mestrado de Engenharia e Gestão Industrial no Instituto Superior de Engenharia do Porto.

O trabalho consistiu no desenvolvimento de um modelo de simulação de um navio de cruzeiros de rio, por forma a analisar e melhorar o processo de evacuação do mesmo. Foram apresentadas, estudadas e analisadas diferentes estratégias para se perceber o impacto que teriam no processo de evacuação e possíveis melhoramentos nos mesmos.

Nos subcapítulos seguintes são apresentadas as principais conclusões que se retirou deste trabalho e limitações e investigações futuras.

Com base neste trabalho foi elaborado um artigo para uma conferência internacional que se pode verificar através do Apêndice A.

5.1. Conclusões finais

A presente dissertação foi desenvolvida por forma a estudar, com recurso à simulação computacional, a evacuação do navio MS Douro Elegance. Este estudo permitiu a análise de diferentes estratégias de evacuação, de modo a melhorar o processo de evacuação e analisar quais os acessos fulcrais para uma evacuação de emergência concluída com sucesso o mais rapidamente possível. Os resultados obtidos permitem afirmar que condições são fundamentais na evacuação do navio:

- O elevador indisponível para a evacuação dos conveses do navio resulta num aumento considerável do tempo de evacuação e um congestionamento adicional nos outros acessos;
- A não orientação dos ocupantes resulta que todos tentem evacuar pelos acessos mais próximos o que origina um congestionamento dos acessos com mais densidade de pessoas à partida para a evacuação.
- O bloqueio dos acessos intermédios do navio resulta em tempos de evacuação muito acima dos tempos quando existe possibilidade de utilizar os mesmos.
- As escadas traseiras têm maior dificuldade de escoamento de pessoas visto que contrariamente ao acesso intermédio só existe uma escada por cada piso.
- A evacuação pela parte frontal do navio embora não tenha acesso ao tombadilho ajuda no alívio do congestionamento nos acessos intermédios e traseiros visto que ao evacuar pela parte frontal inicialmente há menos ocupantes nas partes intermédias e traseiras do navio o que faz com que a evacuação seja feita mais rapidamente nos primeiros momentos.

A evacuação com todos os acessos livres, incluindo o elevador é feita de forma mais rápida comparativamente à evacuação com algum tipo de bloqueio.

5.2. Valor Acrescentado para a empresa Douro Azul

A realização deste projeto permitiu dar a conhecer à empresa Douro Azul diferentes estratégias de evacuação do navio MS Douro Elegance. Possibilitou ainda a identificação de locais críticos e quais têm mais impacto no processo de evacuação do navio.

Sendo o *software* amplamente mais usado para a simulação da evacuação de edifícios, utilizá-lo em navios de turismo pode ser uma grande mais-valia para o futuro da indústria, traduzindo a utilização do mesmo em mais segurança em todo o processo de emergência.

Este estudo permitiu dar a conhecer a importância que a simulação pode ter nos processos de emergência de um navio de passageiros, onde o tempo não abunda e é necessária uma resposta rápida ao acontecimento.

5.3. Dificuldades Encontradas

Inicialmente houve algumas dificuldades que tiveram de ser ultrapassadas, como o manuseamento e utilização do *software* Pathfinder, visto que o conhecimento do mesmo era bastante reduzido, levando a um estudo e conseqüente aprendizagem do *software*. O uso de um *software* CAD foi necessário de forma a conceber o modelo o mais pormenorizado possível, visto que o navio não possui espaços muito amplos e por isso espaços pequenos necessitam de ser mais bem concebidos de forma que o modelo seja o mais realista possível.

5.4. Limitações e investigação futura

De forma que o estudo abranja mais situações de evacuação e sabendo que existem algumas limitações no mesmo, ele pode ser estendido a outro tipo de trabalhos futuros de forma a haver alguns melhoramentos que estão em falta e devem ser levadas em consideração. Esses tópicos estão descritos abaixo:

- Estudar o impacto da orientação dos ocupantes no tempo de evacuação total;
- Simular a existência de ocupantes com mobilidade reduzida, por forma a analisar o impacto na evacuação do navio;
- Simular a existência de inclinações do navio, de forma que se simule uma situação de naufrágio eminente;
- Estudar o impacto da alteração de velocidade dos ocupantes;
- Estudar o impacto do distanciamento social no processo de evacuação do navio;
- Simular o ajuntamento de famílias no processo de evacuação, de forma que evacuem juntos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P., & O'Hare, G. M. P. (2017). Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. In *Computer Science Review* (Vol. 24, pp. 13–33). Elsevier Ireland Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>
- Alsnih, R., & Stopher, P. R. (2004). Review of procedures associated with devising emergency evacuation plans. *Transportation Research Record*, 1865, 89–97.
<https://doi.org/10.3141/1865-13>
- Amado, J. (2017). *Manual de Investigação Qualitativa em Educação (3ª edição)*.
<https://doi.org/10.14195/978-989-26-1390-1>
- Asgary, A., & Yang, P. L. C. (2016). Simulating campus evacuation: Case of York university. *Simulation Series*, 48(9), 380–385.
<https://doi.org/10.22360/summersim.2016.scsc.062>
- Azzi, C., Pennycott, A., Mermiris, G., & Vassalos, D. (2011). *Evacuation simulation of shipboard fire scenarios*.
https://www.researchgate.net/publication/253650856_Evacuation_simulation_of_shipboard_fire_scenarios
- Balakhontceva, M., Karbovskii, V., Rybokonenko, D., & Boukhanovsky, A. (2015). Multi-agent Simulation of Passenger Evacuation Considering Ship Motions. *Procedia Computer Science*, 66, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.11.017>
- Balakhontceva, M., Karbovskii, V., Sutulo, S., & Boukhanovsky, A. (2016). Multi-agent simulation of passenger evacuation from a damaged ship under storm conditions. *Procedia Computer Science*, 80, 2455–2464.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.547>
- Bayram, V. (2016). Optimization models for large scale network evacuation planning and management: A literature review. In *Surveys in Operations Research and Management Science* (Vol. 21, Issue 2, pp. 63–84). Elsevier Science B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.sorms.2016.11.001>
- Bernardini, G., D'Orazio, M., Quagliarini, E., & Spalazzi, L. (2014). An agent-based model for earthquake pedestrians' evacuation simulation in Urban scenarios. *Transportation Research Procedia*, 2, 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.09.050>
- Berticelli, R., Pilz, S. E., & Costella, M. F. (2018). Simulações de abandono de edificações: Uma revisão preliminar. *Revista de Engenharia Civil IMED*, 5(1), 140.
<https://doi.org/10.18256/2358-6508.2018.v5i1.2433>
- Calmon, P., Chapuis, B., Jenson, F., & Sjerne, E. (2016). *The use of simulation in POD curves estimation: An overview of the IIW best practices proposal*.
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>
- Carillo, M., Cordasco, G., Serrapica, F., Scarano, V., Spagnuolo, C., & Szufel, P. (2018). Distributed simulation optimization and parameter exploration framework for the

- cloud. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 83, 108–123.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.12.005>
- Carson, J. S. (2005). Introduction to modeling and simulation. *Proceedings - Winter Simulation Conference, 2005*, 16–23. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574235>
- Chen, M., & Han, D. (2015). Multi-Grid Model for Crowd's Evacuation in Ships Based on Cellular Automata. *Polish Maritime Research*, 22(s1), 75–81.
<https://doi.org/10.1515/pomr-2015-0036>
- Cheng, Y., & Zheng, X. (2019). Effect of uncertainty on cooperative behaviors during an emergency evacuation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 66, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2018.06.022>
- Chiu, Y. C., & Zheng, H. (2007). Real-time mobilization decisions for multi-priority emergency response resources and evacuation groups: Model formulation and solution. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6), 710–736.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.11.006>
- Cho, Y. O., Ha, S., & Park, K. P. (2016). Velocity-based egress model for the analysis of evacuation process on passenger ships. *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)*, 24(3), 466–483. <https://doi.org/10.6119/JMST-015-1012-1>
- Crowe, S., Cresswell, K., Robertson, A., Huby, G., Avery, A., & Sheikh, A. (2011). The case study approach. *BMC Medical Research Methodology*, 11.
<https://doi.org/10.1186/1471-2288-11-100>
- Dantas, L. F., Luiz, F., Oliveira, C., & Peres, I. T. (2016). *Simulação de Eventos Discretos com balanceamento de linha de produção: uma aplicação na manufatura*.
https://www.researchgate.net/publication/327273090_Simulacao_de_Eventos_Discretos_com_balanceamento_de_linha_de_producao_uma_aplicacao_na_manufatura
- de Paula Ferreira, W., Armellini, F., & De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers and Industrial Engineering*, 149.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>
- Douro Azul. (n.d.). *Douro Azul*. <https://www.douroazul.com/douroazul.php>
- Dulebenets, M. A., Pasha, J., Abioye, O. F., Kavooosi, M., Ozguven, E. E., Moses, R., Boot, W. R., & Sando, T. (2019). Exact and heuristic solution algorithms for efficient emergency evacuation in areas with vulnerable populations. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 39(January), 101114. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101114>
- Federici, M. L., Manenti, L., & Manzoni, S. (2014). *A Checklist for the Evaluation of Pedestrian Simulation Software Functionalities*. <http://arxiv.org/abs/1404.7717>
- Ferreira, L. P., Ares, E., G., P., Resano, A., Luis-Pérez, C. J., & Tjahjono, B. (2012). Simulation of a Closed-Loops Assembly Line. *Advances in Manufacturing Systems (MESIC)*, 502, 127–132. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.502.127>
- Ferreira, L. P., Ares, E., Peláez, G., Resano, A., Luis, C. J., & Tjahjono, B. (2012). Simulation of a closed-loops assembly line. *Key Engineering Materials*, 502(January 2015), 127–132. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.502.127>

- Ferreira, L. P., Gómez, E. A., Lourido, G. C. P., Quintas, J. D., & Tjahjono, B. (2012a). Analysis and optimisation of a network of closed-loop automobile assembly line using simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1–4), 351–366. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3502-4>
- Ferreira, L. P., Gómez, E. A., Lourido, G. C. P., Quintas, J. D., & Tjahjono, B. (2012b). Analysis and optimisation of a network of closed-loop automobile assembly line using simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1–4), 351–366. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3502-4>
- Ferreira, L. P., Pereira, G. A., & Machado, R. J. (2003). *A Simulação Como Ferramenta de Apoio à Decisão na Engenharia da Produção - O Sistema Gams*. VI Congresso Galego de Estatística e Investigación de Operacións, 1–6.
- Gao, D. L., Ming Lee, E. W., & Lee, Y. Y. (2022). Integration of cumulative prospect theory in cellular automata model for building evacuation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102904>
- Ghasemi, P., Khalili-Damghani, K., Hafezolkotob, A., & Raissi, S. (2019). Uncertain multi-objective multi-commodity multi-period multi-vehicle location-allocation model for earthquake evacuation planning. *Applied Mathematics and Computation*, 350, 105–132. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2018.12.061>
- Governo Português. (2020). *Diário da República*, 1.ª série PRESIDÊNCIA DO CONSELHO DE MINISTROS.
- Ha, S., Ku, N. K., Roh, M. Il, & Lee, K. Y. (2012). Cell-based evacuation simulation considering human behavior in a passenger ship. *Ocean Engineering*, 53, 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.05.019>
- Hadzic, T., Brown, K. N., & Sreenan, C. J. (2011). Real-time pedestrian evacuation planning during emergency. *Proceedings - International Conference on Tools with Artificial Intelligence, ICTAI*, 597–604. <https://doi.org/10.1109/ICTAI.2011.95>
- Hu, M., & Cai, W. (2021). Simulation and Optimization for the Staircase Evacuation of a Cruise Ship Based on a Multigrid Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9961536>
- Hu, M., Cai, W., & Zhao, H. (2019). Simulation of passenger evacuation process in cruise ships based on a multi-grid model. *Symmetry*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/sym11091166>
- Kim, H., Roh, M. Il, & Han, S. (2019). Passenger evacuation simulation considering the heeling angle change during sinking. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), 329–343. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.06.007>
- Kinateder, M. T., Kuligowski, E. D., Reneke, P. A., & Peacock, R. D. (2015). Risk perception in fire evacuation behavior revisited: definitions, related concepts, and empirical evidence. *Fire Science Reviews*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40038-014-0005-z>
- Klüpfel, H., Meyer-König, T., Wahle, J., & Schreckenber, M. (2001). Microscopic Simulation of Evacuation Processes on Passenger Ships. In *Theory and Practical Issues on Cellular*

- Automata* (pp. 63–71). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0709-5_8
- Kobes, M., Helsloot, I., De Vries, B., & Post, J. (2010). Exit choice, (pre-)movement time and (pre-)evacuation behaviour in hotel fire evacuation - Behavioural analysis and validation of the use of serious gaming in experimental research. *Procedia Engineering*, 3, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.07.006>
- Kuangqi, W. (2011). Research on evacuation model of passenger ship stairway. *Dalian Maritime University*.
- Law, A. M. (2019). How to Build Valid and Credible Simulation Models. *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1402–1414. <https://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004789>
- Liang, J., Zhang, Y. F., & Huang, H. (2018). The experiment and simulation analysis of bus emergency evacuation. *Procedia Engineering*, 211, 427–432. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.032>
- Liu, C., Mao, Z. L., & Fu, Z. M. (2016). Emergency Evacuation Model and Algorithm in the Building with Several Exits. *Procedia Engineering*, 135, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.072>
- Lochhead, I., & Hedley, N. (2019). Mixed reality emergency management: bringing virtual evacuation simulations into real-world built environments. *International Journal of Digital Earth*, 12(2), 190–208. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1425489>
- Makinoshima, F., Oishi, Y., Nakagawa, M., Sato, S., & Imamura, F. (2021). Revealing complex tsunami evacuation process patterns induced by social interactions: A case study in Ishinomaki. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102182>
- Marshall, D. A., Burgos-Liz, L., Ijzerman, M. J., Osgood, N. D., Padula, W. V., Higashi, M. K., Wong, P. K., Pasupathy, K. S., & Crown, W. (2015). Applying dynamic simulation modeling methods in health care delivery research - The SIMULATE checklist: Report of the ISPOR simulation modeling emerging good practices task force. *Value in Health*, 18(1), 5–16. <https://doi.org/10.1016/j.jval.2014.12.001>
- Menezes, L., Cardoso, A. P., Rego, B., Balula, J. P., & Figueiredo, M. (2017). *Olhares sobre a educação*. 21–33.
- Muradi, M., & Mutmainnah, W. (2020). Passenger Ship Evacuation Analysis with Fire Risk Assessment Approach Using NFPA 551. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 557(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/557/1/012043>
- Ni, B., Li, Z., Zhang, P., & Li, X. (2017). An Evacuation Model for Passenger Ships That Includes the Influence of Obstacles in Cabins. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5907876>
- Organização Marítima Internacional. (n.d.-a). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*.

- [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-\(marpol\).aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx).
- Organização Marítima Internacional. (n.d.-b). *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974*.
[https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-\(solas\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx).
- Organização Marítima Internacional. (n.d.-c). *The International Safety Management (ISM) Code*. <https://www.imo.org/en/ourwork/humanelement/pages/ismcode.aspx>.
- Organização Marítima Internacional. (n.d.-d). *The International Ship and Port Facility (ISPS) Code*. <https://www.imo.org/en/ourwork/security/pages/solas-xi-2%20isps%20code.aspx>.
- Pan, X., Han, C. S., Dauber, K., & Law, K. H. (2006). Human and social behavior in computational modeling and analysis of egress. *Automation in Construction, 15*(4), 448–461. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.06.006>
- Pitana, T., & Kobayashi, E. (2008). Passengers Evacuation Simulation in a Cruise Ship due to Tsunami Attack as Port Safety Management Consideration. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 55–64*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.7.55>
- Qiao, Y., Han, D., Shen, J., & Wang, G. (2014). A study on the route selection problem for ship evacuation. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2014-January*(January), 1958–1962.
<https://doi.org/10.1109/smc.2014.6974208>
- Rendón Rozo, K., Arellana, J., Santander-Mercado, A., & Jubiz-Diaz, M. (2019). Modelling building emergency evacuation plans considering the dynamic behaviour of pedestrians using agent-based simulation. *Safety Science, 113*(July 2018), 276–284.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.11.028>
- Roh, M. Il, & Ha, S. (2013). Advanced ship evacuation analysis using a cell-based simulation model. *Computers in Industry, 64*(1), 80–89.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.10.004>
- Saunders, M. N. K., Lewis, P., & Thornhill, A. (2019). “Research Methods for Business Students” Chapter 4: Understanding research philosophy and approaches to theory development. In *Researchgate.Net* (Issue January).
- Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C., & Seyfried, A. (2009). Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications. In *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 3142–3176). Springer New York.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_187
- Tan, Z., Chen, B., Xiao, Z., & Zhang, J. (2019). A study on evacuation model optimization in passenger ship. *ICTIS 2019 - 5th International Conference on Transportation Information and Safety, 1324–1329*. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2019.8883788>

- Thunderhead Engineering. (n.d.). *Pathfinder Software*.
<https://www.thunderheadeng.com/pathfinder>.
- Thunderhead Engineering. (2020). *Pathfinder - User Manual*.
- Wagner, G. (2016). Introduction to simulation using javascript. *Proceedings - Winter Simulation Conference, 0*, 148–162. <https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822086>
- Wang, W. L., Liu, S. B., Lo, S. M., & Gao, L. J. (2014). Passenger ship evacuation simulation and validation by experimental data sets. *Procedia Engineering, 71*, 427–432. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.061>
- White, K. P., & Ingalls, R. G. (2018). The Basics of Simulation. *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*, 147–161. <https://doi.org/10.1109/WSC.2018.8632271>
- Xie, C., Lin, D. Y., & Travis Waller, S. (2010). A dynamic evacuation network optimization problem with lane reversal and crossing elimination strategies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 46*(3), 295–316. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.11.004>
- Yang, X., Ban, X., & Mitchell, J. (2017). Modeling multimodal transportation network emergency evacuation considering evacuees' cooperative behavior. *Transportation Research Procedia, 23*, 1038–1058. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.057>

APÊNDICE A

Best Evacuation Simulation Strategies – Analysis of a River Cruise Ship Case

J. Santos¹, L.P. Ferreira^{1,2,*}, A. L. Ramos³, E. Costa^{4,5}

¹ISEP, Polytechnic of Porto, rua Dr. António Bernardino de Almeida, 4249-015 Porto, Portugal

²Associate Laboratory for Energy, Transports and Aerospace (LAETA-INEGI), Rua Dr. Roberto Frias 400, 4200-465 Porto, Portugal

³GOVCOPP, DEGEIT, University of Aveiro, Aveiro, Portugal

⁴ESHT, Polytechnic of Porto, rua D. Sancho I, 4480-876 Vila do Conde, Portugal

⁵CITUR-Centre for Tourism Research, Development, and Innovation, Vila do Conde, Portugal

*lpf@isep.ipp.pt

Abstract. Efficient evacuation constitutes an important factor in the context of cruise ship safety. As such, the creation of an emergency evacuation plan is crucial for the rapid and safe evacuation of all the occupants on a vessel. The main objective of this article is to evaluate and improve the evacuation process of a river cruise ship whose route is the ascent of the Douro River in Portugal. By means of Pathfinder software, one analysed 6 different scenarios so as to determine the shortest evacuation time, as well as identify points of congestion and bottlenecks. The simulation model was used to analyse the evacuation of 162 occupants (staff and passengers) from a cruise ship, assuming that there are 7 lifeboats, each with a capacity for 25 people. Strategy 1, with all the exit points available, including an operational elevator, was the strategy that presented the shortest total evacuation time, taking 159.6 seconds to complete the process.

Keywords: Evacuation; Simulation; river cruise ships; Strategies.

1. Introduction

Nowadays, in cases of emergency such as fires, natural phenomena, technological accidents due to human error, terrorism or vandalism, people must be removed from locations quickly. As a result, emergency evacuations have become a major concern for architects, engineers, governments and people in general [1-4]. During an emergency evacuation, most occupants tend to use the stairways to abandon the area, causing congestion at the exit points. In addition, groups such as the elderly and children are likely to reduce the speed of evacuation and further compound congestion by delaying the evacuation process on the stairs [5]. During emergencies, both the time available and the capacity of evacuation routes are limited. As such, it is crucial to develop effective emergency evacuation plans and thus ensure human safety, as well as reduce the damage caused by the emergency itself [6]. Simulation consists of the recreation of a model represented by a computer program which provides information about the system being

2

investigated. It enables one to analyse evacuation scenarios, strategies and priorities with the aim of minimising evacuation time, identifying factors that limit the process, as well as potential bottleneck points [7-8]. To this end, there are five fundamental functions in simulation: the research instrument, a teaching methodology, a planning tool, a mechanism to balance resources and a support tool for decision-making [9]. One of the ways of doing so is to develop and test evacuation plans by means of simulation. Cruise ship companies present, in a scenario of evacuation need, a different challenge for evacuation simulations, due to the design of a cruise ship itself and, most of all, due to the contingencies a simulator has to deal when analysing and proposing possibilities of passengers' evacuation, guarantying the passengers' safety during emergencies. With the progress of technology and the widespread dissemination of performance-based calculations, the use of computational models has extended globally. Evacuation models are generally designed for purposes such as those of optimization, simulation, and risk assessment [10].

This study aims to analyse and enhance the evacuation process of a river cruise ship, whose route is the Douro River in Portugal. Using Pathfinder software, the objective was to determine the minimum evacuation time for the vessel in the case of emergency, and to analyse where the points of greatest congestion occur during the process. This research study is a contribution to current literature dedicated to the topic of evacuation processes in the transport sector. There are very few studies on the subject, especially when it comes to maritime passenger transport. Our research aims to fill this gap in literature and thus present a relevant perspective on the importance of reformulating evacuation procedures on passenger ships.

This article is divided into four sections. Section 2 consists of a review of literature, and presents practical cases related to the topic. Subsequently, Section 3 comprises a detailed description of the practical work undertaken, which includes an analysis of the ship's layout, the simulation studies carried out and a validation of the evacuation model. It also includes an analysis of the different strategies and a presentation of the results. Finally, section 4 deals with the conclusions of the study.

2. Review of Literature

Tourism is one of the fastest growing industries worldwide, with the number of tourists increasing rapidly. Consequently, more security measures are being implemented to address this issue. Kim et al. [11] carried out a study on the influence of the angles of inclination that the ship MV Sewol experienced during its sinking in South Korea. It was concluded that when the angle is 0 degrees, the only factor which influences the speed of passenger evacuation is congestion. When the angle was 30 degrees, deck A was able to evacuate totally, while in the case of deck B only 97.5% of people managed to do so. For angles of 30 degrees, movement was impossible because there was complete loss of friction and, as such, evacuation would have to be dependent on objects of support for passengers to cling to. Balakhontceva et al. [12] considered the cruise ship

“Costa Allegra” to undertake a study of a multi-agent simulation system for the evacuation of passengers from the ship in the event of a storm. It was concluded that, when waves are below 2 metres in height, 90% to 100% of passengers are able to evacuate; when wave height ranges from 2 to 3,5 metres, 82,5% to 95% of passengers manage to evacuate; and when wave height is between 6 and 9,5 metres, 75% to 85% are able to evacuate successfully. When wave height is over 11 metres, the successful evacuation rate drops to between 65% to 85%. Tan et al. [13] carried out a study which aimed to optimise the evacuation process of the passenger ship Yangtze River Gold n° 1, belonging to the company Chongqing Traffic Tourism Investment Group Co., Ltd. Their model was able to evacuate 360 people in 75 seconds, while the original best solution took 85 seconds. Qiao et al. [14] prepared a study for the evacuation of a passenger ship with a capacity for 103 people. Three plans were drawn up: in the first, occupants would choose the shortest path; in the second, all the passengers in the same cabin would evacuate together; and in the third, each person would evacuate alone without any restrictions. Plans 2 and 3 proved to be the best of the three, taking 62.5 and 62 seconds to complete, respectively. Muradi & Mutmainnah [15] undertook a qualitative analysis of the fire-risk evacuation process of the 2000 GT ship by implementing the NFPA 551 approach. They concluded that the passenger safety criteria were not met, as some evacuation routes would cross areas which are classified as presenting high risk levels. Therefore, the evacuation routes would have to be re-organised in order to ensure that these high fire-risk areas were avoided. The location of the kitchen was pointed out as being a great hazard for the existing routes. Ni et al. [16] carried out a study which analyses the influence of obstacles in the cabins of passenger ships. The results indicate that funnel-shaped exits can improve evacuation efficiency. Furthermore, it is also important to identify the potentially negative impact of obstacles found inside the cabin and, to this end, present useful suggestions for the design of passenger ships. Ha et al. [17] presents a study of evacuation analysis simulations, which use a cell-based model to simulate human behaviour on a passenger ship carrying 1892 occupants. The cell-based simulation model divides space into a uniform matrix called a cell. Each passenger occupies one cell and moves to another according to a set of local rules. These are associated to the passengers’ expected behaviour, whether as single individuals, in a crowd and or when moving in a counterflow direction. The result of the simulation was compared to another, obtained through the Evi commercial program for evacuation analysis, which revealed a mere 5% difference. Azzi et al. [18] addressed the integration of a fire and evacuation simulation to assess the performance of a safety plan for a passenger ship. Considering a sample of 778 passengers and 30 crew members, the evacuation would take 1100 seconds to complete without the aid of the crew, and 950 seconds with assistance. Klüpfel et al. [19] presented the imaginary case of a high-speed boat with 100 people on board, who were all positioned at the rear of the vessel. The evacuation route consisted of the worst possible scenario and, after 100 simulations attempts, total evacuation time was 14 minutes.

4

3. Practical Work

3.1 Cruise Ship Layout

In this study, the cruise ship has a capacity for 36 crew members and 126 passengers, totalling 162 occupants, with a total length of 79.980 meters. There are 63 cabins for passengers and 14 for the crew. The ship area comprises 4 decks: the lower deck, the main deck, the upper deck and, finally, the promenade deck. The cabins are found on the first 3 decks and the types of cabins vary. There are 3 categories: the VIP Suite, the Junior Suite, and the Standard Cabin. The promenade deck is a leisure area and presents passengers with a 360° view of the surroundings. Also available are facilities such an outdoor pool with sun loungers, as well as two buffets with tables and chairs for passengers to enjoy. This deck also includes the bridge, from which the ship's captain steers the vessel, along with the support team. It is on this deck that the 7 inflatable lifeboats are located, which have a capacity for 25 people each. The other ship amenities are located on the remaining decks: a restaurant, bar, spa, laundry, kitchen, passenger and crew cabins, as well as the only elevator on the vessel, which connects these 3 decks and is found at the ship's main entrance. People can move from floor to floor by using the stairways, which are located at the rear, middle and front areas of the ship. The layout of the vessel is distributed as follows:

- The lower deck has 9 cabins for the crew, 16 standard cabins for passengers, a laundry, a storage section for frozen, cold and dry foods, the kitchen, a waste area and the engine room.
- The main deck has 5 cabins for the crew, 23 standard cabins for passengers, as well as the restaurant and spa.
- The upper deck has 2 VIP suites, 6 junior suites, 16 standard cabins, the reception and bar.
- The promenade deck has the swimming pool, buffets and command bridge.

3.2 Simulation Study

In order to develop a simulation model by means of Pathfinder software, one had to collect detailed measurements of the different cruise ship areas, thus ensuring that the simulations undertaken reflected the real-case scenario. As Figure 1 demonstrates, the 3D visualization of the simulation model provides an overview of the ship's layout and its access areas.

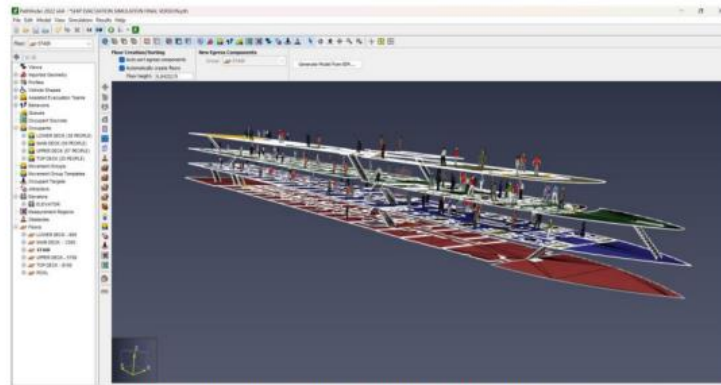


Fig. 1. 3D view of a model of the MS Douro Elegance.

Figure 2 presents a 2D perspective of the lower deck of the ship, where one can observe that there are stairs at the rear, middle and front sections of the ship, as well as an elevator in the central area. All the other decks are similar, with the exception of the promenade deck.

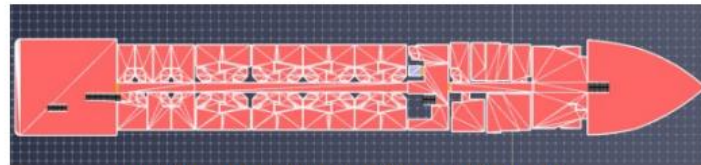


Fig. 2. Lower deck of the simulation model for the ship.

Figure 3 presents a 2D view of the ship's promenade deck, where the pool is located in the central area and the command bridge in the front section. There are several objects scattered around - such as tables and chairs - as well as 7 lifeboats, which are found in the rear section.

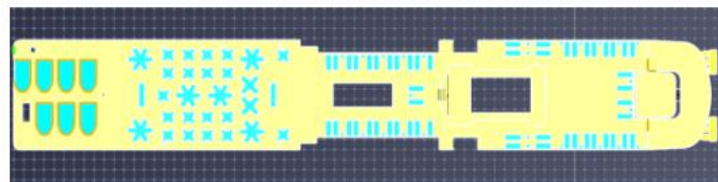


Fig. 3. Promenade deck of the simulation model for the ship.

3.3 Validation of the Simulation Model

In order to proceed with the validation of the simulation model developed, one had to compare the times of a real evacuation procedure with those collected from the simulation of an evacuation process that used Pathfinder software. The implementation of simulation models has become common practice in supporting solutions for decision-making problems. According to Ferreira et al. [20, 21, 22] and Yúmina & Ramos [23], simulation constitutes an extremely useful tool to assist senior managers in their decision-making strategies. Firstly, one measured the time required for an occupant to move between two points. These times were then collected on the ground and compared with those obtained by Pathfinder evacuation simulation for the same route. Passenger movement is considered to begin immediately after timing is initiated, during which each occupant has a constant speed of 1,19 m/s along the entire route. Table 1 analyses and compares all the times measured and demonstrates the percentage error between real and computer simulation. The average error is approximately 6.89%, which allows one to conclude that the constructed model is a valid one, as the value is very low.

Table 1. Comparison of evacuation times for real simulation and computer simulation.

Initial Location	End location	Real Simulation	Computer Simulation	Average Error
Command Bridge	Rear section of the Promenade deck	42,3 s	44,1 s	4,26%
Rear section of the Promenade deck	Staircase to access the upper deck	31,68 s	33,9 s	7,01%
Rear section of the upper deck	Front section of the main deck	47,23 s	50,8 s	7,56%
Rear section of the main deck	Front section of the main deck	40,66 s	45,8 s	12,64%
Rear section of the lower deck	Front section of the lower deck	36,24 s	37,2 s	2,65%
Lower deck (use of elevator)	Upper deck	21,4 s	19,8 s	7,48%
Upper deck (use of staircase)	Lower deck	16,71 s	15,6 s	6,64%

3.4 Analysis of Simulation Strategies

With the purpose of analysing and improving the ship's evacuation process, a simulation study of various evacuation strategies was carried out for a total of 162 occupants (crew + passengers). These strategies are based on the use of certain exits to guide the occupants towards the lifeboats. The different strategies are restricted to blocking the different connections between floors, such as the elevator, and placing the occupants in specific locations. In order to ensure greater coherence between the different evacuation procedures, one considered that occupants would not be guided in any of the strategies,

which would lead them to evacuate by means of the shortest route. The distribution of occupants was elaborated as follows:

- 30 occupants on the lower deck;
- 50 occupants on the main deck;
- 57 occupants on the upper deck;
- 25 occupants on the promenade deck.

With this initial configuration for all of the evacuation strategies, one will ensure that the difference in evacuation time will depend on blocking different exits for each strategy. In order to enable a clearer understanding of the process, the ship was divided into 3 parts - the front, middle and rear sections - since the exits to the different floors are found in these areas. For a greater coherence between the different strategies, one considered that occupants would not be guided in any of the strategies, which would lead them to evacuate by means of the shortest route.

3.4.1 Strategy 1 - Scenario without access to the front staircase (with and without the elevator)

Strategy 1 blocks access to the front staircase on all the ship's decks, thus making everyone use the middle and rear exits. Table 2 presents the simulation results for the two scenarios contemplated in this strategy. On analysing the results of Table 2, one observes that the evacuation process is, in fact, faster when the elevator is available. This is due to the congestion generated in the different sections of the ship where the elevator cannot be used. The average distance covered is longer without an elevator; this means that the stairs closest to the occupants using the elevator were farther away than the elevator itself.

Table 2. Results from the simulation of Strategy 1.

Scenarios	Simulation Evacuation times	Average Evacuation Time p/ Occupant	Average Distance Covered p/ Occupant
With Elevator	159,6 s	78,1 s	50,6 m
Without Elevator	170,0 s	78,4 s	50,7 m

3.4.2 Strategy 2 – Scenario without access to the front and middle staircases (with and without the elevator)

Strategy 2 blocks access to the front and middle staircases, leaving only the rear staircase available for exit. By consulting Table 3, one will observe that there are no significant differences in any of the parameters; this is due to massive congestion in the area

8

around, and including, the rear staircase of the ship, which is the only exit available for this scenario. Even in the case of occupants using the elevators, they will still have to climb to the promenade deck using the rear staircase as there is no elevator access to this part of the ship. Consequently, all the crew members and passengers who are not on the promenade deck will have to use the stairs.

Table 3. Results from the simulation of Strategy 2.

Scenarios	Simulation Evacuation times	Average Evacuation Time p/ Occupant	Average Distance Covered p/ Occupant
With Elevator	272,8 s	125,6 s	53,9 m
Without Elevator	277,8 s	127,3 s	53,5 m

3.4.3 Strategy 3 – Scenario without access to the rear staircase (with and without the elevator)

Strategy 3 consists of blocking the rear staircases on all the decks of the ship. In this scenario, the occupants will only be able to access the other decks by means of the middle and front stairs; the latter will only connect the lower, main and upper decks, providing no access to the promenade deck, from which passengers must evacuate. On analysing the data collected and presented in Table 4, one will observe evacuation takes longer in this scenario without the use of an elevator, as was expected. This is due to a rather large concentration of occupants in the central area of the ship, which is also where the elevator is located. If the elevator is running, there will always be fewer people in the corridor, which allows for a slight improvement in evacuation times for the scenario using the elevator.

Table 4. Results from the simulation of Strategy 3.

Scenarios	Simulation Evacuation times	Average Evacuation Time p/ Occupant	Average Distance Covered p/ Occupant
With Elevator	188,5 s	101,7 s	74,1 m
Without Elevator	198,7 s	100,8 s	74,3 m

3.4.4 Strategy 4 – Scenario without access to the rear and front staircases (with and without the elevator)

In the case of Strategy 4, the occupants will have no access to the front and rear staircases; they will have no other option but to walk towards the central area of the ship so as to proceed with the evacuation process by means of the staircase found there. Table 5 presents the results for this simulation. Average evacuation time is quite high, which

indicates that there is an area of great congestion. In these cases, the use of the elevator does not produce a major impact on the evacuation procedure.

Table 5. Results from the simulation of Strategy 4.

Scenarios	Simulation Evacuation times	Average Evacuation Time p/ Occupant	Average Distance Covered p/ Occupant
With Elevator	192,2 s	102,5 s	74,2 m
Without Elevator	198,7 s	100,8 s	74,3 m

3.4.5 Strategy 5 – Scenario with all of the occupants positioned at the front of the ship on the lower deck (with and without the elevator)

Strategy 5 did not contemplate blocking access to the various exits. In this special scenario, all of the occupants on the ship were positioned at the front of the ship on the lower deck, more precisely in the kitchen area, as can be seen in Figure 4.



Fig. 4. Position of the occupants for Strategy 5.

As can be seen in Table 6, using the elevator is of no benefit to this strategy. Indeed, it is a cause for greater congestion in the central staircase area of the ship, while occupants are waiting for the elevator. Since the occupants are rather far from the area where the lifeboats are located, there is a delay in the evacuation process, beginning only from second 74 onwards.

Table 6. Results from the simulation of Strategy 5.

Scenarios	Simulation Evacuation times	Average Evacuation Time p/ Occupant	Average Distance Covered p/ Occupant
With Elevator	232,7 s	154,5 s	101,1 m
Without Elevator	216,1 s	151,8 s	101,7 m

3.4.6 Strategy 6 – Scenario of evacuation occurring at dawn, when crew are in their cabins (with and without the elevator)

In this strategy, one simulated a night emergency scenario, during which the ship's occupants would be in their cabins, with only a few crew members working on the ship in other areas. Table 7 allows one to observe that, in this scenario, occupants are able

10

to evacuate faster by using the elevator. Average evacuation time is also shorter, although the distance covered is longer. This is justified by the fact that, despite occupants covering a longer distance, congestion in certain parts of the ship is prevented.

Table 7. Results from the simulation of Strategy 6.

Scenarios	Simulation Evacuation times	Average Evacuation Time p/ Occupant	Average Distance Covered p/ Occupant
With Elevator	238,1 s	119,5 s	56,5 m
Without Elevator	254,9 s	124,1 s	55,5 m

3.5 Analysis of Results

After analysing the simulation results for each strategy, one concluded that most of the cases where total simulation was shorter occurred when there was access to a running elevator. Table 8 presents the best cases, in which total evacuation time was the shortest for each of the strategies.

Table 8. Best evacuation times for each strategy.

Strategy	Operational Elevators	Total Simulation Evacuation times	Average Evacuation Time p/ Occupant	Average Distance Covered p/ Occupant
1	Yes	159,6 s	78,1 s	50,6 m
2	Yes	272,8 s	125,6 s	53,9 m
3	Yes	188,5 s	101,7 s	74,1 m
4	Yes	192,2 s	102,5 s	74,2 m
5	No	216,1 s	151,8 s	101,7 m
6	Yes	238,1 s	119,5 s	56,5 m

Use of the elevator leads to less congestion in the central exit areas which, in turn, means that total evacuation time is somewhat shorter. The only situation where elevator use is of little benefit is in the case of strategy 5, during which all the occupants find themselves at the front of the ship when evacuation begins. Once they head towards the central area, they are met with occupants who are waiting for the elevator, which then produces congestion. Since the areas in question are generally rather restricted in size, any pause or waiting time by occupants immediately generates congestion. There are no considerable differences regarding the average distance travelled and the average evacuation time per occupant.

4. Conclusions and Future Studies

One was able to conclude from this study that, although occupants have no defined orientation as to the route they should follow when evacuating, this constitutes an important aspect to consider since it will prevent congestion, which causes significant delays in the total evacuation process of the cruise ship. Another factor that requires some attention occurs particularly in areas such as those of the bar / living room, restaurant and the promenade deck, where objects such as tables and chairs can be found. These obstacles will require occupants to circumvent them, which then leads to longer evacuation times. The availability of all the staircases and remaining areas of the cruise ship is crucial to the unhampered flow of occupants. In the different strategies where exits are blocked, it was always concluded that total evacuation time rises drastically when compared to strategies where all the exits are available for occupants to use. Blocking exits leads to the concentration of many passengers in other existing exit areas on the cruise ship. In addition, as was initially presented, the cruise ship only has 3 access points (rear, middle and front), which will aggravate the situation further and result in massive congestion. The blocking of exits is the main cause of longer evacuation time, leading to greater congestion in the middle staircase. This is the exit point where more people gather, and which enables easier flow due to the elevator and two staircases connecting the upper deck to the promenade deck. This means that, at least on this floor, one will have a better flow capacity than on the rear stairs, where there is only one staircase to access the promenade deck. In order for the study to cover more evacuation contexts, and acknowledging its limitations, further research can be extended to other types of analyses so as to improve certain aspects that should still be considered. These topics are described as follows:

- Study the impact of occupant orientation on total evacuation time;
- Simulate the existence of occupants with reduced mobility in order to analyse the impact of this context on the evacuation of the cruise ship;
- Simulate the existence of inclination angles for the vessel, so that a situation of imminent shipwreck is simulated;
- Study the impact of changes in the speed at which occupants move;
- Study the impact of social distancing on the cruise ship's evacuation process;
- Simulate the gathering of family groups in the evacuation process, so that they are able to evacuate together.

Acknowledgements

The authors acknowledge Thunderhead Engineering Consultants, Inc. for allowing the use of PathFinder, a simulation programme fundamental for the developed research.

References

1. Pelechano, N., Malkawi, A.: Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. *Automation in construction*, 17(4), 377-385 (2008).
2. Ma, J., Song, W. G., Tian, W., Lo, S. M., Liao, G. X.: Experimental study on an ultra high-rise building evacuation in China. *Safety science*, 50(8), 1665-1674 (2012).
3. Oven, V. A., Cakici, N.: Modelling the evacuation of a high-rise office building in Istanbul. *Fire safety journal*, 44(1), 1-15 (2009).
4. McConnell, N. C., Boyce, K. E., Shields, J., Galea, E. R., Day, R. C., Hulse, L. M.: The UK 9/11 evacuation study: Analysis of survivors' recognition and response phase in WTC1. *Fire Safety Journal*, 45(1), 21-34 (2010).
5. Kobes, M., Helsloot, I., De Vries, B., Post, J. G.: Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*, 45(1), 1-11 (2010).
6. Dulebenets, M. A., Pasha, J., Abioye, O. F., Kavooosi, M., Ozguven, E. E., Moses, R., Boot, W.R., Sando, T.: Exact and heuristic solution algorithms for efficient emergency evacuation in areas with vulnerable populations. *International journal of disaster risk reduction*, 39, 101114 (2019).
7. Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P., O'Hare, G. M.: Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, 24, 13-33 (2017).
8. Ullrich, O., Lückerath, D.: An Introduction to Discrete-Event Modeling and Simulation. *Simul. Notes Eur.*, 27(1), 9-16 (2017).
9. Vicente, P.: O uso de simulação como metodologia de pesquisa em ciências sociais. *Cadernos Ebape. BR*, 3, 01-09 (2005).
10. Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., Filippidis, L.: A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and environment*, 34(6), 741-749 (1999).
11. Kim, H., Roh, M. I., Han, S.: Passenger evacuation simulation considering the heeling angle change during sinking. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), 329-343 (2019).
12. Balakhontceva, M., Karbovskii, V., Rybokonenko, D., Boukhanovsky, A.: Multi-agent simulation of passenger evacuation considering ship motions. *Procedia Computer Science*, 66, 140-149 (2015).
13. Tan, Z., Chen, B., Xiao, Z., Zhang, J.: A study on evacuation model optimization in passenger ship. *The 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, pp. 1324-1329 (2019).
14. Qiao, Y., Han, D., Shen, J., Wang, G.: A study on the route selection problem for ship evacuation. In *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 1958-1962). IEEE (2014).
15. Muradi, M., Mutmainnah, W.: Passenger Ship Evacuation Analysis with Fire Risk Assessment Approach Using NFPA 551. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 557, No. 1, p. 012043). IOP Publishing (2020).
16. Ni, B., Li, Z., Zhang, P., Li, X.: An evacuation model for passenger ships that includes the influence of obstacles in cabins. *Mathematical Problems in Engineering* (2017).
17. Ha, S., Ku, N. K., Roh, M. I., Lee, K. Y.: Cell-based evacuation simulation considering human behavior in a passenger ship. *Ocean engineering*, 53, 138-152 (2012).
18. Azzi, C., Pennycott, A., Mermiris, G., Vassalos, D.: Evacuation simulation of shipboard fire scenarios. In *Proceedings, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference 2011* Baltimore, Maryland, (Vol. 3, pp. 23-29), August 15-16 (2011).
19. Klüpfel, H., Meyer-König, T., Wahle, J., Schreckenberg, M.: Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships. In *Theory and Practical Issues on Cellular*

- Automata: Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Karlsruhe, 4-6 October 2000 (pp. 63-71). London: Springer London (2001).
20. Ferreira, L. P., Ares, E., Peláez, G., Resano, A., Luis-Pérez, C. J., Tjahjono, B.: Simulation of a closed-loops assembly line. *Key Engineering Materials*, 502, 127-132 (2012).
 21. Ferreira, L. P., Gómez, E. A., Lourido, G. C. P., Quintas, J. D., Tjahjono, B.: Analysis and optimisation of a network of closed-loop automobile assembly line using simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59, 351-366 (2012).
 22. Ferreira, L. P., Ares Gómez, E., Peláez Lourido, G., Tjahjono, B., Optimization of a multiphase multiproduct production line based on virtual cells. In *Lecture notes in engineering and computer science: Proceedings of the world congress on engineering (WCE2011)*, London (pp. 6-8) (2011).
 23. Yúmina, A. Z., Ramos, A. L. F. A.: Simulation for Decision Support in Process Reengineering in the Automotive Industry. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 7(2), 176 (2022).

ANEXO A