

UNIVERSIDADE ABERTA

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO



**SISTEMA MULTIAGENTE DE RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE
EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO, BASEADO EM
CONTEXTO E NA IOT**

Joaquim Augusto Queirós Frazão Neto

Doutoramento em Ciência e Tecnologia Web

(doutoramento em associação)



2023

UNIVERSIDADE ABERTA

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO



**SISTEMA MULTIAGENTE DE RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE
EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO, BASEADO EM
CONTEXTO E NA IOT**

Joaquim Augusto Queirós Frazão Neto

Doutoramento em Ciência e Tecnologia Web

(doutoramento em associação)



Tese de Doutoramento Orientada pelo Professor Doutor António Jorge do Nascimento
Morais e Coorientada pelo Professor Doutor Ramiro Manuel Ramos Moreira Gonçalves e
pelo Professor Doutor António Leça Coelho

Fevereiro, 2023

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do Repositório Aberto, da Universidade Aberta.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição
CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Sendo esta tese resultado de um trabalho na maioria das vezes solitário, só foi possível com o apoio e colaboração de um conjunto de pessoas a quem não posso deixar fazer o meu agradecimento.

Os primeiros agradecimentos vão para o meu Orientador, Professor, António Jorge Morais, e para os Coorientadores, Professor Ramiro Gonçalves e Investigador Principal Doutor António Leça Coelho, pelo apoio durante todo o percurso que agora termina.

Um outro agradecimento vai para as Universidades, Universidade Aberta e Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, pela oportunidade e o privilégio de frequentar o Programa Doutoral do Curso de Ciência e Tecnologia Web.

Um agradecimento também ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, na pessoa do Investigador Principal João Viegas, Diretor do Centro de Instrumentação Científica, por todo o apoio concedido e por me ter proporcionado desenvolver este projeto.

Um agradecimento a todos os professores do Curso de Ciência e Tecnologia Web, pela forma como foram capazes de me estimular na busca do conhecimento.

Por último, mas não menos importantes, um agradecimento à minha família pelo apoio e compreensão.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho àqueles que fazem com que seja quem sou, à Isabel pelo amor, compreensão e companheirismo; às minhas filhas Rita, Joana e Bia, por me fazerem o pai mais feliz do mundo; às minhas netinhas Eva e Júlia e ao meu netinho Manuel; ao meu pai e à minha mãe, que não estando presente é como se estivesse.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

STATEMENT OF INTEGRITY

Declaro ter atuado com integridade na elaboração da presente dissertação/tese. Confirmando que em todo o trabalho conducente à sua elaboração não recorri à prática de plágio ou a qualquer outra forma de falsificação de resultados.

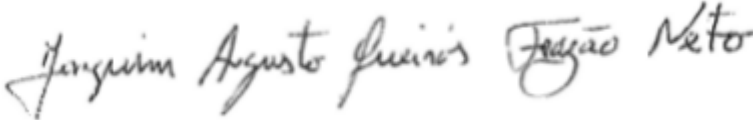
Mais declaro que tomei conhecimento integral do Regulamento Disciplinar da Universidade Aberta, publicado no Diário da República, 2.^a série, n.º 215, de 6 de novembro de 2013.

I hereby declare having conducted my thesis with integrity. I confirm that I have not used plagiarism or any form of falsification of results in the process of the thesis elaboration.

I further declare that I have fully acknowledged Disciplinary Regulations of the Universidade Aberta (regulation published in the official journal Diário da República, 2.^a série, N.º 215, de 6 de novembro de 2013).

Universidade Aberta, 18 de fevereiro de 2023

Joaquim Augusto Queirós Frazão Neto



TÍTULO: SISTEMA MULTIAGENTE DE RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO, BASEADO EM CONTEXTO E NA IOT

RESUMO

Para além de ser uma matéria sensível para a sociedade civil, a evacuação de edifícios em caso de incêndio tem também motivado a comunidade académica para o desenvolvimento e estudo de soluções para melhorar a eficiência na evacuação desses espaços.

O estudo do comportamento humano tem sido uma das áreas que tem merecido a atenção dos investigadores na área da evacuação de incêndios. No entanto, trata-se de um comportamento difícil de modelar, pois depende de fatores difíceis de conhecer e que variam de país para país. Face a essa dificuldade, propõe-se uma mudança de paradigma que, ao invés de se centrar em modelar o comportamento dos ocupantes, tem como foco condicionar esse comportamento, através da disponibilização em tempo real de informação relativa aos percursos de evacuação mais eficientes.

A disponibilização dessa informação aos ocupantes, é possível com uma solução que aproveite os benefícios da crescente utilização da IoT (*Internet Of Things*) em edifícios, para ajudar os ocupantes a adaptarem-se ao ambiente. Os sistemas de recomendação multiagente são usados para ajudar os utilizadores a adaptarem-se ao ambiente em que se inserem, designadamente no âmbito da IoT, pelo que podem ser usados para providenciar aos ocupantes os percursos de evacuação mais eficientes.

Seguindo a metodologia de investigação *design science*, propõe-se um sistema de recomendação multiagente, que a partir de dados contextuais obtidos através de dispositivos IoT, recomenda os percursos de evacuação mais eficientes a cada momento. Os resultados do estudo sugerem que a solução proposta pode contribuir para melhorar a eficiência na evacuação de edifícios em caso de incêndio.

Palavras-chave: Evacuação de Edifícios, Emergência de Incêndio, Sistemas de Recomendação Multiagente, IoT, Ontologias

TITLE: MULTI-AGENT SYSTEM FOR BUILDING EVACUATION ROUTES RECOMMENDATION IN CASE OF FIRE, BASED ON CONTEXT AND IOT

ABSTRACT

In addition to being a sensitive matter for civil society, the fire building evacuation problem also motivates the academic community's attention to the development and study of solutions to improve the efficiency in the evacuation of these spaces.

The study of human behaviour is one area that has deserved researchers' attention in the fire evacuation area. However, this behaviour is challenging to model, as it depends on behavioural factors that are different from country to country. Therefore, this thesis proposes a paradigm shift. Instead of focusing modelling the occupant's behaviour, it focuses on conditioning it, providing the occupants with updated information about the most efficient evacuation routes.

Making this information available to occupants is possible with a solution that takes advantage of the growing use of IoT (Internet of Things) in buildings. Multi-agent recommender systems are typically used to help users adapt to their environment, namely within the scope of the IoT, so they can be used to provide occupants with the most efficient evacuation routes.

Following the design science research methodology, this thesis proposes a multi-agent-based recommender system based on contextual data obtained through IoT devices for recommending the most efficient evacuation routes in real-time. The obtained results suggest that the proposed solution can improve the efficiency in the evacuation of buildings under fire emergencies.

Keywords: Building evacuation, Fire emergency, Multi-Agent Recommender Systems, IoT, Ontologies

NOTA PRÉVIA

Este trabalho de investigação obedece às Normas de apresentação de trabalhos académicos, a defender em provas públicas como requisito para obtenção do grau de Doutor ou de Mestre na Universidade Aberta, 2022.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	III
DEDICATÓRIA	IV
DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE.....	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
NOTA PRÉVIA.....	VIII
ÍNDICE GERAL	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E ACRÓNIMOS.....	XXII
I INTRODUÇÃO	1
1 INTRODUÇÃO	2
2 PROBLEMÁTICA DE INVESTIGAÇÃO.....	2
3 OBJETIVOS E QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO.....	5
3.1 OBJETIVOS	5
3.2 QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO	6
4 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	6
5 JUSTIFICAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO.....	11
6 ESTRUTURA DA TESE	11
II ENQUADRAMENTO TEÓRICO.....	13
1 ENQUADRAMENTO TEÓRICO	14
2 A EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO	16
2.1 REVISÕES DE LITERATURA SOBRE A TEMÁTICA DA EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS.....	17
2.1.1 MODELOS, SISTEMAS E ALGORITMOS DE EVACUAÇÃO	17
2.1.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DOS OCUPANTES DURANTE O PROCESSO DE EVACUAÇÃO.....	18
2.1.3 GUIANDO OS OCUPANTES DO EDIFÍCIO PARA UM LOCAL SEGURO, EM TEMPO REAL	19
2.1.4 CONTRIBUTOS DAS REVISÕES DE LITERATURA.....	20
2.2 ORIENTAÇÃO DOS OCUPANTES DURANTE O PROCESSO DE EVACUAÇÃO DE UM EDIFÍCIO, EM TEMPO REAL.....	21
2.3 TEMPO DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS E TEMPO DE MOVIMENTO DOS OCUPANTES	27
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
3 SISTEMAS MULTIAGENTE.....	30
4 SISTEMAS DE RECOMENDAÇÃO	32
4.1 TIPOS DE ABORDAGEM.....	33

4.2	<i>ABORDAGENS BASEADAS EM CONTEXTO</i>	34
4.3	<i>CONTEXTO EM SISTEMAS DE RECOMENDAÇÃO</i>	34
5	<i>SISTEMAS DE RECOMENDAÇÃO MULTIAGENTE</i>	37
6	<i>INTERNET OF THINGS</i>	40
7	<i>SISTEMAS DE RECOMENDAÇÃO NO ÂMBITO DA IOT</i>	42
8	<i>ONTOLOGIAS</i>	44
8.1	<i>DESENVOLVIMENTO DE ONTOLOGIAS</i>	45
8.2	<i>AVALIAÇÃO DE ONTOLOGIAS</i>	46
8.3	<i>USO DE ONTOLOGIAS NA ÁREA DA EMERGÊNCIA</i>	48
8.4	<i>ONTOLOGIAS IOT</i>	49
9	<i>RESUMO DO CAPÍTULO</i>	50
III	<i>PLATAFORMA WEB DE SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS</i>	51
1	<i>INTRODUÇÃO</i>	52
2	<i>APLICAÇÃO WEB PARA REPRESENTAÇÃO DE UM EDIFÍCIO</i>	53
2.1	<i>REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA E FÍSICA DO EDIFÍCIO</i>	53
2.2	<i>REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO GRAFO</i>	57
3	<i>SIMULADOR MULTIAGENTE DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS</i>	58
3.1	<i>MODELAÇÃO DO MOVIMENTO DOS OCUPANTES</i>	58
3.1.1	<i>MOVIMENTO AO NÍVEL MACROSCÓPICO</i>	59
3.1.2	<i>MOVIMENTO AO NÍVEL MICROSCÓPICO</i>	61
3.2	<i>MODELO SIMPLIFICADO DE PROPAGAÇÃO DO INCÊNDIO</i>	64
3.3	<i>O SISTEMA MULTIAGENTE DE SUPORTE AO SIMULADOR</i>	67
4	<i>RESUMO DO CAPÍTULO</i>	70
IV	<i>SISTEMA MULTIAGENTE DE RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO</i>	71
1	<i>INTRODUÇÃO</i>	72
2	<i>MODELO ONTOLÓGICO DE SUPORTE À RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO EM CASO DE INCÊNDIO</i>	73
2.1	<i>ONTOLOGIA PARA A EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO</i>	73
2.2	<i>ONTOLOGIA PARA A RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO</i>	80
2.3	<i>O MODELO ONTOLÓGICO COMO SUPORTE DO SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO</i>	86
2.3.1	<i>A CARATERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO NO MODELO ONTOLÓGICO</i>	90
2.3.2	<i>O SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DESCRITO PELO MODELO ONTOLÓGICO</i>	91
2.3.3	<i>O MODELO DE INTEROPERABILIDADE</i>	92

3	SISTEMA MULTIAGENTE DE RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO	93
3.1	ARQUITETURA GERAL DA SOLUÇÃO.....	93
3.2	ABORDAGEM DE RECOMENDAÇÃO SEGUIDA	94
3.2.1	FATORES CONTEXTUAIS	96
3.2.2	FORMULAÇÃO DO SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO	97
3.3	O SISTEMA MULTIAGENTE.....	99
3.3.1	ARQUITETURA DO SISTEMA MULTIAGENTE DE RECOMENDAÇÃO.....	100
3.3.2	MODELO DO SISTEMA MULTIAGENTE	101
3.3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS AGENTES	102
3.3.3.1	Agente Configurador	102
3.3.3.2	Agente de Dispositivo de Input IoT	103
3.3.3.3	Agente de Dispositivo de Output IoT.....	103
3.3.3.4	Agente Processador de Contexto.....	105
3.3.3.5	Agente Atualizador do Grafo.....	105
3.3.3.6	Agente Otimizador de Percursos de Evacuação	105
3.3.3.7	Agente Recomendador de Percursos de Evacuação	106
3.3.3.8	IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DO SIMARPEE	106
3.4	MODELO DE ATUALIZAÇÃO DO GRAFO EM TEMPO REAL.....	106
3.4.1	REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO GRAFO DINÂMICO	107
3.4.2	ATUALIZAÇÃO DA MATRIZ DE FATORES CONTEXTUAIS	108
3.4.2.1	MODELO DE CÁLCULO DOS FATORES CONTEXTUAIS DEVIDO AO CONGESTIONAMENTO	109
3.4.2.2	MODELO DE CÁLCULO DOS FATORES CONTEXTUAIS DEVIDO AO RISCO PROVOCADO PELO INCÊNDIO.....	116
3.4.2.3	CONJUGAÇÃO DOS FATORES DE CONGESTIONAMENTO E DE PERIGO.....	120
4	RESUMO DO CAPÍTULO	122
V	EXPERIMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO SISTEMA	123
1	INTRODUÇÃO	124
1.1	ESCOLHA DA PLATAFORMA PARA TESTE DO ARTEFACTO.....	124
1.2	AVALIAÇÃO.....	125
2	EXPERIMENTAÇÃO E SIMULAÇÕES.....	127
3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	129
3.1.1	CASO 1 - DOIS OCUPANTES POSICIONADOS, LADO A LADO, EM LOCAL DISTANTE DAS SAÍDAS.....	130
3.1.1.1	Cenário sem deflagração de incêndio	131
3.1.1.2	Cenário com deflagração de incêndio.....	134
3.1.2	CASO 2 - GRUPO DE 30 OCUPANTES POSICIONADOS NUMA ZONA ESPECÍFICA DO CENTRO DE CONGRESSOS.	138
3.1.2.1	Cenário sem deflagração de incêndio	139

3.1.2.2	Cenário com deflagração de incêndio.....	143
3.1.3	CASO 3 - GRUPO DE 200 OCUPANTES ALEATORIAMENTE POSICIONADOS NO CENTRO DE CONGRESSOS	146
3.1.3.1	Cenário sem deflagração de incêndio.....	147
3.1.3.2	Cenário com deflagração de incêndio.....	154
4	DISCUSSÃO	162
4.1	ALARME DE INCÊNDIO SEM IMPACTO NOS PERCURSOS DE EVACUAÇÃO	163
4.2	OCORRÊNCIA DE INCÊNDIO COM IMPACTO NOS PERCURSOS DE EVACUAÇÃO	165
4.3	OBJETIVOS, QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO e RESULTADOS OBTIDOS.....	167
5	RESUMO DO CAPÍTULO	171
VI	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	173
1	INTRODUÇÃO	174
2	CONCLUSÕES.....	174
3	CONTRIBUTOS	177
4	LIMITAÇÕES.....	180
5	TRABALHO FUTURO	181
6	PUBLICAÇÕES	182
	BIBLIOGRAFIA	184

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I.1 – Diretrizes DSR (adaptada de Hevner et al. (2004))	7
Tabela II.1 – Objetivos e Questões de Investigação	15
Tabela II.2 Dimensões do contexto em Sistemas de Recomendação (Adomavicius et al., 2011)	36
Tabela III.1 Nível de perigo e efeitos no movimento dos ocupantes	65
Tabela IV.1 Questões de competência para a evacuação de edifícios em caso de incêndio (adaptada de Neto et al. (2022a))	75
Tabela IV.2 Especificação e Requisitos da ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio (adaptada de Neto et al., (2022a))	76
Tabela IV.3 Questões de competência para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio	81
Tabela IV.4 Especificação e Requisitos da ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio	82
Tabela IV.5 Valores de k para diferentes tipos de percursos (adaptada de Coelho (1997))	111
Tabela IV.6 Cálculo de V_{NE} para cada um dos tipos de percurso	112
Tabela IV.7 Valores médios para a projeção horizontal (P_h) de uma pessoa (adaptada de Predtechenskii-Milinskii (1978))	113
Tabela IV.8 Expressões de velocidade segundo o modelo de Predtechenskii-Milinskii para diferentes tipos de condições de movimentos e de circulações (adaptada de Coelho (1997))	114

Tabela IV.9 Valores de D_a para $D=0,54$ m/s	115
Tabela IV.10 Valores de V_{NE} de acordo com o modelo de Predtechenskii-Milinskii (Predtechenskii & Milinskii, 1978), numa emergência	116
Tabela IV.11 Efeitos do fumo na visibilidade e velocidade dos ocupantes (adaptada da norma PD 7974-6:2019 (British Standards Institution, 2019)).....	118
Tabela IV.12 Limites suportáveis de exposição a gases asfixiantes expressos na concentração de monóxido de carbono, para exposições de 5 e 30 minutos (adaptada da norma PD 7974-6:2019 (British Standards Institution, 2019))	118
Tabela IV.13 Limite suportável para o calor, devido a radiação ou convecção (adaptada da norma PD 7974-6:2019 (British Standards Institution, 2019)).....	119
Tabela IV.14 Impacto do fumo, gases tóxicos e asfixiantes e calor no movimento dos ocupantes	119
Tabela IV.15 Nível de perigo, efeitos no movimento dos ocupantes e a sua tradução no comportamento do sistema de recomendação, através da atualização da matriz $mfc(i,j)(t)$	120
Tabela IV.16 Conjugação dos valores referentes aos fatores referentes ao congestionamento e ao perigo, em função do nível de perigo.....	121
Tabela V.1 Simulações realizadas para os diferentes cenários.	129
Tabela V.2 Resultados obtidos para o caso de dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas, sem deflagração de incêndio.....	132
Tabela V.3 Resultados obtidos para o caso de dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas, com deflagração de incêndio.	136

Tabela V.4 Resultados obtidos para o caso de 30 ocupantes a posicionados em zona específica do edifício, sem deflagração de incêndio.	140
Tabela V.5 Resultados obtidos para o caso de 30 ocupantes a posicionados em zona específica do edifício, sem deflagração de incêndio. O tempo de movimento é o tempo que leva o último ocupante a abandonar o edifício.....	144
Tabela V.6 Resultados obtidos para o caso de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados, sem deflagração de incêndio. O tempo de movimento é o tempo que leva o último ocupante a abandonar o edifício	149
Tabela V.7 Resultados obtidos para o caso de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados co Centro de Congressos do LNEC, com deflagração de incêndio.....	156
Tabela V.8 Tempo de movimento necessário para que todos os ocupantes abandonem o edifício numa situação em que o incêndio não provoca restrições à sua movimentação, valores em segundos	163
Tabela V.9 Tempo de movimento necessário para que todos os ocupantes abandonem o edifício numa situação em que o incêndio provoca restrições nos percursos de evacuação, valores em segundos,	165
Tabela VI.1 Apreciação do trabalho desenvolvido, à luz das sete diretrizes de Hevner et al. (2004).....	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 Ciclos de investigação em <i>design science research</i>	9
Figura I.2 Processo de desenvolvimento da metodologia de investigação <i>DSR</i> aplicado ao projeto de investigação aqui proposto	9
Figura II.1 Tempo disponível e tempo necessário para uma evacuação em segurança. Adaptada da Norma PD 7974-6:2019 (2019))	28
Figura III.1 Arquitetura global da plataforma Web de Simulação para Análise das Condições de Segurança de Incêndio em Edifícios (WebSimACSIE).....	53
Figura III.2 Planta do piso de um edifício.....	54
Figura III.3 Decomposição em malhas elementares.....	55
Figura III.4 Caracterização das malhas através dos seus lados.....	55
Figura III.5 Representação dos centros das malhas e vãos por nós e ligação dos nós adjacentes por meio de arestas	56
Figura III.6 Grafo representativo do piso do edifício com 20 vértices e 29 arestas	57
Figura III.7 Um ocupante no nó central pode deslocar-se para um qualquer dos oito nós adjacentes disponíveis.....	58
Figura III.8 Estratégia dos ocupantes para sair do edifício	60
Figura III.9 Cada malha é virtualmente dividida numa grelha em que cada célula dessa grelha é ocupada por um ocupante durante o seu movimento	61
Figura III.10 Posições limite para movimentos dos ocupantes para as malhas diagonais adjacentes à malha onde se encontram	62

Figura III.11 Posções limite para movimentos dos ocupantes para as malhas diagonais adjacentes na vertical ou horizontal, relativamente àquela onde se encontram	62
Figura III.12 Movimento de um ocupante no sentido da malha diagonal esquerda superior. Pseudocódigo e representação gráfica	63
Figura III.13 Movimento de um ocupante no sentido da malha vertical superior. Pseudocódigo e representação gráfica	63
Figura III.14 Exemplo de propagação de um incêndio segundo o modelo de propagação proposto. As diferentes cores correspondem aos níveis de carga de incêndio que constam da Tabela III.1.....	65
Figura III.15 Grelha associada a cada malha elementar	66
Figura III.16 Progressão do nível de carga de incêndio numa malha elementar	67
Figura III.17 Arquitetura do SiMAEE – Simulador Multiagente de Evacuação de Edifícios	68
Figura IV.1 Mapa Conceptual de suporte à ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio (adaptada de Neto et al., (2022a)).....	77
Figura IV.2 Lista de classes, subclasses e propriedades da ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio (Neto et al., 2022a). Obtida do Protégé,.....	78
Figura IV.3 Representação gráfica da ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio (Neto et al., 2022a). Obtida do Protégé,.....	79
Figura IV.4 Mapa conceptual de suporte à da ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio	83
Figura IV.5 Lista de classes, subclasses e propriedades da ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio. Obtida do Protégé.....	84

Figura IV.6 Representação gráfica da ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio. Obtida do <i>Protégé</i>	85
Figura IV.7 Sistema de Recomendação resultante do mapa conceptual de suporte à ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio	87
Figura IV.8 Representação do Sistema de Recomendação, obtida a partir do <i>Protégé</i>	87
Figura IV.9 Representação gráfica do modelo ontológico, onde se realçam dois conjuntos de termos caracterizadores desse modelo, suportados na IoT. Obtida a partir do <i>Protégé</i>	89
Figura IV.10 Classes do modelo ontológico caracterizadoras do edifício. Obtida a partir do <i>Protégé</i>	90
Figura IV.11 O sistema de recomendação, os módulos que o constituem e respetivas relações. Obtida a partir do <i>Protégé</i>	91
Figura IV.12 Representação do modelo de interoperabilidade entre os dispositivos IoT e o Sistema de Recomendação (obtido a partir do <i>protégé</i>).....	93
Figura IV.13 Arquitetura global da solução de recomendação	94
Figura IV.14 Processo de construção da informação contextual. Obtida a partir do <i>Protégé</i>	95
Figura IV.15 Arquitetura da solução de recomendação baseada num sistema multiagente	100
Figura IV.16 Arquitetura do SiMARPEE	104
Figura V.1 Planta simplificada do centro de congressos do LNEC, criada com a componente Web da plataforma de simulação <i>WebSimACSIE</i>	128
Figura V.2 Posicionamento inicial dos dois ocupantes para cada uma das situações simuladas.	130

Figura V.3 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os dois ocupantes	131
Figura V.4 Percursos de evacuação adotados pelos ocupantes para o caso em que ambos conhecem o espaço e para os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE ativo.	133
Figura V.5 Planta do Centro de Congressos com indicação das saídas e do local de início do incêndio	134
Figura V.6 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar ambos ocupantes, quando há deflagração de incêndio.....	135
Figura V.7 Percursos de evacuação adotados pelos ocupantes para o caso em que ambos conhecem o espaço e para os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE ativo	137
Figura V.8 Planta do Centro de Congressos com indicação a sombreado cinzento das salas onde se posicionaram os 30 ocupantes	138
Figura V.9 Posicionamento inicial dos 30 ocupantes para cada uma das situações simuladas	139
Figura V.10 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 30 ocupantes numa situação em que o incêndio não tem impacto nos percursos de evacuação.....	141
Figura V.11 Percursos de evacuação adotados pelos ocupantes para o caso em que todos conhecem o espaço e para os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE	142
Figura V.12 Planta do Centro de Congressos com indicação das saídas e do local de início do incêndio	143

Figura V.13 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 30 ocupantes numa situação em que o incêndio tem impacto nos percursos de evacuação.....	145
Figura V.14 Percursos de evacuação adotados pelos ocupantes para o caso em que todos conhecem o espaço e para os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE	146
Figura V.15 Posicionamento inicial dos 200 ocupantes para cada uma das situações simuladas	147
Figura V.16 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 200 ocupantes, numa situação em que o incêndio não causa restrições nos percursos de evacuação	148
Figura V.17 Comparação do padrão de evacuação para cada um dos casos testados, sem incêndio e sem SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 32 segundos da simulação (imagens da esquerda e direita respetivamente)	150
Figura V.18 Comparação do padrão de evacuação para cada um dos casos testados, sem incêndio e com SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 32 segundos da simulação (imagens da esquerda e direita respetivamente)	151
Figura V.19. Compara o padrão de evacuação no caso em que todos conhecem o espaço com os casos em que nenhum conhece, mas sem e com o SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 32 segundos da simulação (imagens da esquerda e direita respetivamente)	152
Figura V.20 Registo de todos os movimentos dos 200 ocupantes agrupados por saídas...153	
Figura V.21 Distribuição dos 200 ocupantes por saída usada para abandonar o edifício. .154	

Figura V.22 Planta do Centro de Congressos com indicação das saídas e do local de início do incêndio.	155
Figura V.23 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 200 ocupantes, numa situação em que o incêndio restringe e bloqueia o espaço transitável na proximidade da saída 1.....	157
Figura V.24 Comparação do padrão de evacuação para cada um dos casos testados, com incêndio e sem SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 50 segundos da simulação (imagens da esquerda e da direita respetivamente)	158
Figura V.25 Comparação do padrão de evacuação para cada um dos casos testados, com incêndio e com SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 50 segundos da simulação (imagens da esquerda e da direita respetivamente)	159
Figura V.26 Compara, numa situação de incêndio, o padrão de evacuação no caso em que todos conhecem o espaço com os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 50 segundos da simulação (imagens da esquerda e da direita respetivamente).....	160
Figura V.27 Registo de todos os movimentos dos 200 ocupantes agrupados por saídas...	161
Figura V.28 Distribuição dos 200 ocupantes por saída usada para abandonar o edifício ..	162
Figura V.29 Gráfico de barras com os tempos de movimento necessário para que todos os ocupantes abandonem o edifício, numa situação em que não existem restrições ao movimento dos ocupantes.....	164
Figura V.30 Gráfico de barras com os tempos de movimento necessários para que todos os ocupantes abandonem o edifício, numa situação em que há restrição ao movimento dos ocupantes.....	166

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E ACRÓNIMOS

ADSA - Automated Direction Setting Algorithm

AI – Artificial Intelligence

API - Application Programming Interface

AR - Augmented Reality

ASET - Available safe escape time

BIM - Building Information Modeling

BIM – Building Information Module

CA - Cellular Automata

DS - Digital Signage

DSR - Design Science Research

IA – Inteligência Artificial

IEGS - Intelligent Evacuation Guidance Systems

IoT – Internet of Things

IVR – Immersive Virtual Reality

JADE - *JAVA Agent DEvelopment Framework*

MA - Matriz de adjacências

MD – Matriz de Distâncias

Oppcomms - Opportunistic communication network

QoE – Quality of Experience

RA – Realidade Aumentada

RSET - Required safe escape time

SG – Serious Games

SiMAEE - Simulador Multiagente de Evacuação de Edifícios,

SiMARPEE - Sistema Multiagente de Recomendação de Percursos de Evacuação em Edifícios.

TIC - Tecnologias de Informação e Comunicação

TMRef - Tempo de movimento máximo de referência.

WebSimACSIE - Web de Simulação para Análise das Condições de Segurança de Incêndio

WSN – Wireless Sensor Network

I INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A evacuação de edifícios em caso de incêndio é um problema amplamente estudado, mas que, ainda assim, carece de mais investigação no estudo de soluções capazes de ajudar os ocupantes desses espaços, orientando-os no seu percurso até que fiquem em segurança. Trata-se de um problema sensível para a sociedade em geral e que tem motivado o interesse crescente da comunidade académica.

O presente trabalho de investigação tem como foco principal o desenvolvimento e estudo de uma solução capaz de, em tempo real, guiar os ocupantes de um edifício até um local seguro, durante uma emergência de incêndio.

Neste capítulo, introduz-se o trabalho de investigação desenvolvido. Começa-se por fazer um enquadramento teórico e por apresentar a problemática em estudo. De seguida, definem-se os objetivos e questões de investigação, apresenta-se a metodologia de investigação seguida e evidenciam-se os potenciais contributos, finalizando o capítulo com a estrutura da tese.

2 PROBLEMÁTICA DE INVESTIGAÇÃO

A evacuação de edifícios em caso de incêndio é um problema para o qual devem ser encontradas soluções capazes de ajudar os ocupantes desses espaços, orientando-os no seu percurso até que fiquem em segurança.

A investigação na área da evacuação de edifícios em caso de incêndio conheceu nas últimas décadas desenvolvimentos significativos, nomeadamente no que se refere à modelação e simulação do movimento dos ocupantes. Contudo, relativamente à componente da modelação relacionada com o comportamento das pessoas não se verificou um desenvolvimento correspondente.

De facto, a modelação do comportamento das pessoas depende de vários fatores que dificilmente se conseguem conhecer e que variam de país para país. Mesmo o recurso à área da inteligência artificial e aos designados jogos sérios (Ribeiro et al., 2013), com o objetivo de criar ambientes suficientemente imersivos que permitam aos potenciais “jogadores” terem reações que, em teoria, serão idênticas às que teriam numa situação de incêndio, não teve

ainda resultados que permitam obter os conhecimentos necessários para concretizar essa modelação com o rigor desejado.

Na sua tese de doutoramento, Cordeiro (2022) refere que os modelos que tentam simular o comportamento das pessoas durante a evacuação, o fazem de forma simplificada e que são muito dependentes da sensibilidade e do conhecimento do utilizador do modelo.

Essa dificuldade em modelar o comportamento dos ocupantes em situações de evacuação em caso de incêndio, deixa o campo de investigação aberto para abordagens em que o foco não se centra em modelos de simulação que procurem exclusivamente o conhecimento do comportamento dos ocupantes, mas em soluções alternativas como a que é objeto do presente trabalho.

Num outro estudo sobre o comportamento da população numa emergência de incêndio em edifícios de escritórios, Cordeiro et al. (2011) concluem que, mesmo tendo conhecimento da ocorrência de um incêndio no edifício, nem todos os ocupantes decidem abandonar o edifício de imediato, provocando reações e comportamentos que levam ao aumento do tempo de evacuação.

Assim, considera-se que um sistema capaz de transmitir aos ocupantes informação em tempo real sobre os percursos de evacuação mais adequados face à realidade incêndio, torna o comportamento das pessoas mais previsível, diminuindo a incerteza que esse comportamento introduz na simulação da evacuação de edifícios. Essa informação permite que os ocupantes possam seguir, desde o início do desenvolvimento do incêndio, os trajetos mais adequados, desse modo evitando a necessidade de, tardiamente, inverter o sentido do movimento quando já se encontram em áreas de perigo elevado. Ao possibilitar disponibilizar informação atempada aos ocupantes acerca dos percursos de evacuação mais seguros, é expectável que um sistema como o referido permita reduzir o tempo necessário para evacuar um edifício em condições de segurança.

Esta abordagem representa uma mudança de paradigma em matéria de evacuação de edifícios, em que ao invés de centrar o foco no conhecimento do comportamento das pessoas em caso de incêndio, para incorporar esse conhecimento nos modelos de simulação, pretende

colocar o foco no condicionamento do comportamento das pessoas, através do fornecimento de informação em tempo real.

O surgimento e evolução da *IoT - Internet Of Things* (Internet das Coisas) tem levado a grandes desenvolvimentos no fabrico e produção de sensores, permitindo disponibilizar no mercado uma imensa gama a baixo custo, levando à sua crescente integração em edifícios e outros tipos de espaços físicos, tornando-se cada vez mais comum termos como, *smart homes* (casas inteligentes), *smart cities* (cidades inteligentes), *smart spaces* (espaços inteligentes) ou *smart buildings* (*edifícios inteligentes*), os quais podem ser entendidos como espaços repletos de sensores que, interligados entre si pela IoT e interagindo com as pessoas, podem contribuir para melhorar o bem estar de quem neles se move e habita.

Ainda que a IoT lide com a integração e a interoperabilidade entre dispositivos, tem-se sempre subjacente a essa integração tecnológica o objetivo de desenvolver aplicações orientadas às pessoas, designadamente no que respeita a serviços que promovam a adaptabilidade destas a espaços inteligentes.

Quanto à integração e interoperabilidade entre dispositivos, considera-se que o paradigma dos agentes inteligentes autónomos e sistemas multiagente se caracterizam por uma arquitetura adequada à conceção e desenvolvimento de sistemas distribuídos, sendo por isso capaz de responder aos requisitos centrais em que assenta a integração de coisas no âmbito da IoT. Acresce ainda o facto da arquitetura dos agentes e sistemas multiagente se adequar a uma integração do tipo *plug-and-play* (*conectar e usar*), pelo que dessa característica decorrerão também vantagens do seu uso como base tecnológica de suporte à interação entre dispositivos e destes com as pessoas.

Como referem Miranda et al (2015), o principal objetivo no desenvolvimento de aplicações para a *IoT* é a integração da tecnologia no dia-a-dia, de modo que daí resulte benefício para as pessoas enquanto habitantes ou utilizadores dos espaços. Um dos benefícios possíveis advém da criação de aplicações ou serviços que promovem a sua adaptabilidade aos interesses dos ocupantes aos ambientes onde se movem. Os sistemas de recomendação são sistemas que permitem fazer essa adaptação do utilizador ao ambiente em que este se insere,

designadamente a partir de informação de contexto, como é o caso daquela passível de obter através da IoT.

A necessidade de integrar informação proveniente de diferentes fontes, como é o caso de sensores, dispositivos móveis ou mesmo de sistemas automáticos de deteção de incêndio, leva à necessidade de acordar formas de representação de informação capazes de servir de base à pretendida interoperabilidade entre coisas e pessoas. Como referem Ye et al. (2007), essa representação e troca de informação produzida pelos diferentes dispositivos e sistemas pode ser feita através de ontologias.

Assim, dadas as suas características e potencialidades, pretende-se com este estudo avaliar como a combinação dos sistemas multiagente e dos sistemas de recomendação, suportados em informação contextual obtida através da IoT, pode contribuir para melhorar a evacuação de edifícios sob emergência de incêndio, recomendando em tempo real percursos de evacuação mais seguros e eficientes.

3 OBJETIVOS E QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO

A definição de objetivos permite focar e centrar o trabalho de investigação no estudo da problemática identificada, pelo que há que definir esses objetivos, bem como as questões de investigação a que o estudo deve ser capaz de responder.

3.1 OBJETIVOS

O objetivo global deste trabalho de investigação é estudar em que medida um sistema multiagente de recomendação baseado em informação contextual e assente num modelo ontológico pode contribuir para melhorar a eficiência na evacuação de edifícios suportados pela IoT, recomendando em tempo real os percursos de evacuação seguros mais adequados e eficientes a cada momento.

Para alcançar com êxito o objetivo global referido, devem considerar-se os seguintes objetivos específicos:

- Aprofundar o estudo das áreas de investigação de suporte ao projeto de tese proposto e tendo presente o objetivo global referido: sistemas de recomendação e sistemas multiagente no âmbito da *IoT*, ontologias e evacuação de edifícios em caso de incêndio.
- Desenvolver um modelo ontológico de suporte à recomendação de percursos de evacuação em edifícios, em caso de emergência de incêndio.
- Desenvolver um Sistema multiagente de recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio, baseado em contexto e na *IoT* e suportado no modelo ontológico referido

3.2 QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO

Considerando a problemática de investigação identificada, bem como os objetivos que se pretendem alcançar com o projeto aqui proposto, consideramos pertinentes as três questões de investigação (QI) seguintes:

- **QI-1:** Como poderá uma abordagem multiagente, suportada num modelo ontológico, assegurar a interoperabilidade entre coisas, pessoas e sistemas, num contexto de evacuação de edifícios suportados pela *IoT*?
- **QI-2:** Como poderá a informação de contexto obtida através da *IoT* contribuir para melhorar as condições de evacuação de edifícios em caso de incêndio?
- **QI-3:** Como poderá um sistema multiagente de recomendação baseado em contexto, melhorar a eficiência da evacuação de edifícios suportados pela *IoT*, através da recomendação de percursos de evacuação em tempo real?

4 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

Como proposto no âmbito do plano de tese aprovado pelo Conselho Científico da Universidade Aberta, o trabalho de investigação seguiu o pragmatismo como paradigma de investigação, pois pretende-se avaliar como o sistema (artefacto) a desenvolver pode contribuir para a construção de uma solução capaz de melhorar a eficiência da evacuação de

edifícios em caso de incêndio. Esta pretensão de estudar e desenvolver um sistema que contribua para a resolução de um problema real, está em linha com o que refere Powell (2001, p. 884): ”*Para alguém pragmático, o mandato da ciência não é encontrar a verdade ou a realidade, cuja existência está perpetuamente em disputa, mas facilitar a resolução de problemas humanos*” (tradução nossa¹).

Por outro lado, pretendendo-se formar novo conhecimento através do estudo, projeto e desenvolvimento de um artefacto, é adequado seguir a metodologia *Design Science Research (DSR)*, pois, como referem Hevner et al., (2004, p. 75), nessa metodologia, “o conhecimento e a compreensão de um domínio de problema e sua solução são alcançados na construção e aplicação do artefacto planeado” (tradução nossa²). No mesmo artigo, os autores estabelecem também um conjunto de diretrizes, que se apresentam na Tabela I.1 para apoiar os investigadores que seguem a metodologia DSR nos seus trabalhos de investigação.

Tabela I.1 – Diretrizes DSR (adaptada de Hevner et al. (2004))

Guidelines (Diretrizes)	Descrição
1 - Design as an Artifact (Design como um artefacto)	Em DSR deve ser construído um artefacto, seja ele um sistema, um modelo, um método ou uma instanciação.
2 - Problem Relevance (Relevância do problema)	Em DSR o objetivo é desenvolver soluções tecnológicas para problemas relevantes das organizações.
3 - Design Evaluation (Avaliação do projeto)	A utilidade, qualidade e eficácia de um artefacto devem ser rigorosamente demonstradas por meio de métodos de avaliação adequados.
4 - Research Contributions (Contributos do estudo)	Um DSR eficaz deve fornecer contribuições claras e verificáveis nas áreas de desenvolvimento do artefacto.
5 - Research Rigor (Rigor do estudo)	O DSR baseia-se na aplicação de métodos rigorosos a construção e avaliação do artefacto
6 - Design as a Search Process (Design como um processo de pesquisa)	A construção de um artefacto eficaz requer a utilização dos meios disponíveis para alcançar os fins desejados, tendo presente o conhecimento que se tem do ambiente em que o artefacto vai ser usado.
7 - Communication of Research (Comunicação dos resultados do estudo)	Em DSR o resultado do estudo deve ser apresentado de uma forma que possa ser entendido por especialistas, como é o caso da comunidade académica, e por decisores.

¹ “To a pragmatist, the mandate of science is not to find truth or reality, the existence of which are perpetually in dispute, but to facilitate human problem-solving”.

² “knowledge and understanding of a problem domain and its solution are achieved in the building and application of the designed artifact”

Com a presente tese, espera-se obter um sistema de recomendação multiagente capaz de recomendar, em tempo real, percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio, o que está de acordo com o que preconizam Hevner et al. (2004, p. 82), para quem “o resultado da investigação *design-science* em sistemas de informação (SI) é, por definição, um artefacto TI (Tecnologia de informação) intencionalmente criado para lidar com um problema organizacional importante” (tradução nossa³).

Hevner (2007), Hevner et al. (2004) e Hevner e Chatterjee (2010) referem também a importância de considerar a existência de três ciclos de investigação em *DSR*: ciclo de relevância, ciclo de rigor e ciclo de projeto. De acordo com os autores anteriormente citados, o ciclo de relevância faz a ponte entre o ambiente contextual do projeto de investigação e as atividades de projeto, sendo neste ciclo do processo essencial compreender o contexto e o domínio de aplicação e identificar o problema e os atores envolvidos, de modo a definir requisitos e critérios de avaliação dos resultados, a aferir testando o artefacto. Os mesmos autores referem que o ciclo de rigor liga as atividades de *DSR* com a base de conhecimento científico relevante para o projeto, permitindo que o conhecimento passado possa suportar e contribuir para novo conhecimento. Finalmente, referem que o ciclo de projeto, consiste num processo iterativo de atividades de desenvolvimento e construção do artefacto, consequente avaliação face aos requisitos e refinamento do projeto até que se obtenham resultados satisfatórios. A Figura I.1, adaptada de Hevner e Chatterjee (2010), apresenta os ciclos adaptados ao trabalho de investigação.

Por outro lado, com base em contributos de diversos investigadores, Peffers et al. (2007) apresentam a metodologia *DSR* como um processo assente em seis atividades sequenciais. Na Figura I.2 apresenta-se esse processo com as respetivas atividades aplicadas ao projeto aqui proposto.

³ “The result of design-science research in IS is, by definition, a purposeful IT artifact created to address an important organizational problem”

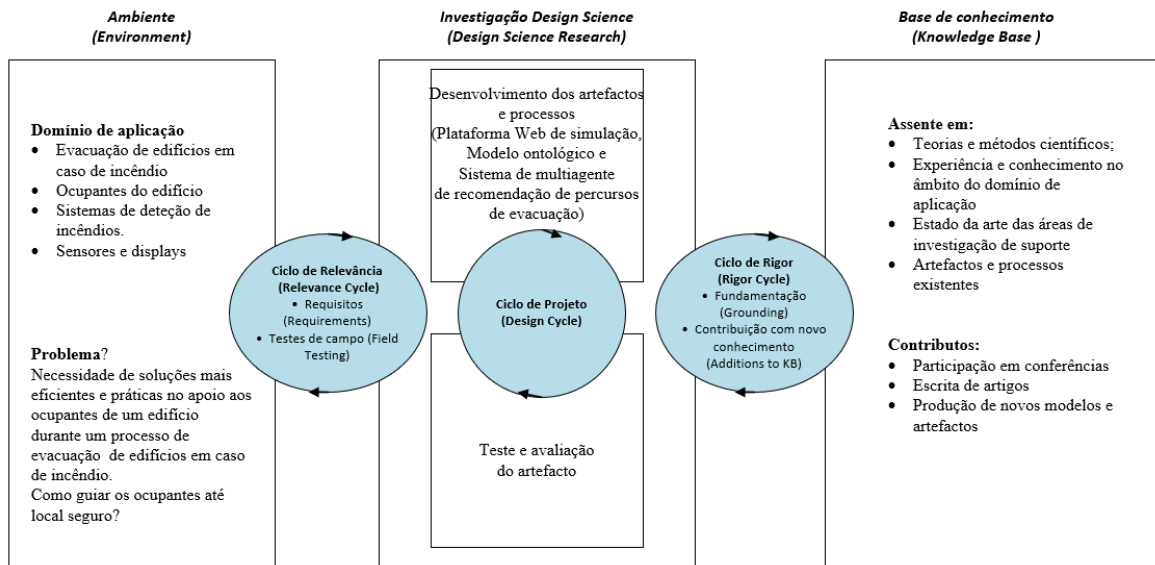


Figura I.1 Ciclos de investigação em *design science research*

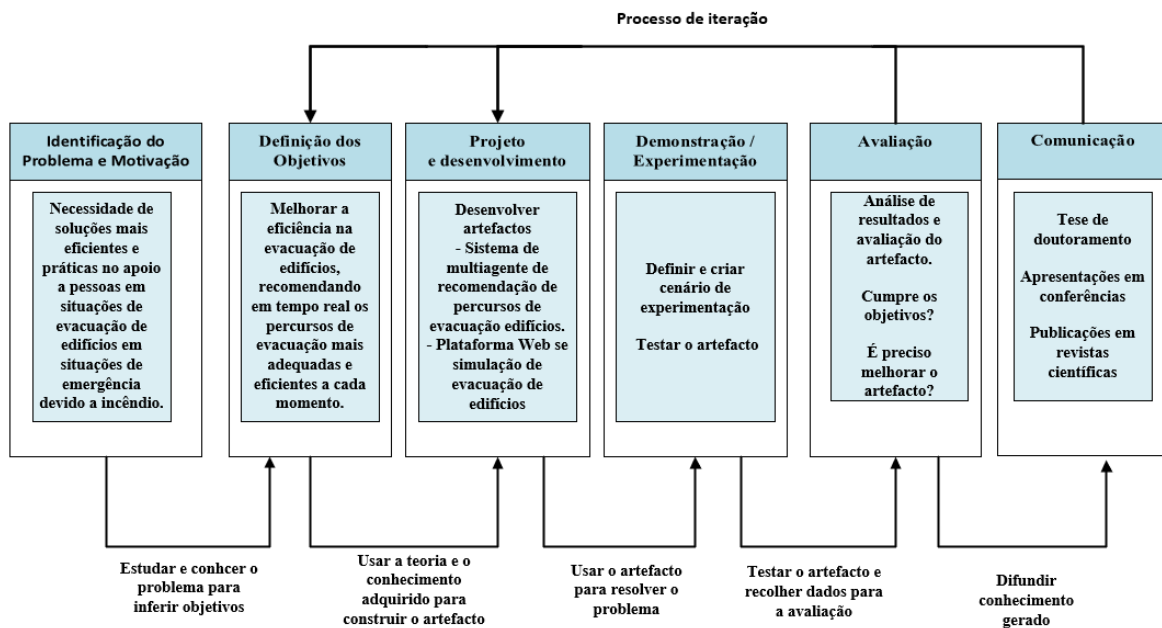


Figura I.2 Processo de desenvolvimento da metodologia de investigação *DSR* aplicado ao projeto de investigação aqui proposto

As duas primeiras atividades iniciaram-se com a proposta de tese em tempo aprovada pelo Conselho Científico da Universidade Aberta, onde já se havia identificado que a motivação para o estudo decorria da necessidade de encontrar soluções mais eficientes para guiar os ocupantes de um edifício sob emergência de incêndio a alcançar local seguro. Essa atividade

prosseguirá através do aprofundamento do estudo e elaboração do estado da arte nas diferentes áreas de investigação envolvidas, de modo a definir os objetivos e a ajustá-los em função dos resultados obtidos.

No âmbito terceira atividade procedeu-se ao projeto e desenvolvimento do sistema multiagente de recomendação de percursos de evacuação. Desenvolveu-se também uma plataforma Web de simulação a ser usada para teste e avaliação do referido sistema de recomendação. As componentes multiagentes destes artefactos assentaram na plataforma JADE⁴ (*JAVA Agent DEvelopment Framework*).

Durante a atividade de experimentação procede-se ao teste dos artefactos, sendo numa primeira fase testado o desempenho e funcionalidade da plataforma Web de simulação e numa segunda fase o artefacto principal da tese, o sistema multiagente de recomendação de percursos de evacuação. Para o desenvolvimento desses testes serão criados cenários de experimentação e testadas diferentes estratégias de evacuação.

A atividade de avaliação do sistema multiagente de recomendação de percursos de evacuação basear-se-á na análise dos resultados obtidos a partir dos testes e simulações para os diferentes cenários de experimentação construídos, considerando para cada um deles duas hipóteses distintas. Na primeira os ocupantes não têm qualquer informação sobre como incêndio se está a desenvolver, enquanto na segunda eles sabem em tempo real os percursos de evacuação mais adequados, por via das recomendações disponibilizadas pelo sistema de recomendação. Para os diferentes cenários simulados, serão determinados os tempos de movimento para cada uma das variantes, de modo a avaliar o impacto do sistema multiagente de recomendação no processo de evacuação do edifício e na segurança dos ocupantes.

Finalmente, no âmbito da atividade de comunicação, que decorrerá ao longo de todo o processo de desenvolvimento da tese, far-se-á a divulgação do conhecimento produzido, designadamente através da escrita de artigos e participação em conferências, culminando com o presente documento.

⁴ <https://jade.tilab.com/>, acedido em 2/04/2022

5 JUSTIFICAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

Este estudo pretende contribuir para o reforço do conhecimento na área da evacuação de edifícios, com particular incidência no âmbito da orientação dos ocupantes durante o processo de evacuação de um edifício, propondo um sistema que recomenda em tempo real os melhores percursos de evacuação seguros a serem seguidos pelos ocupantes.

Para ultrapassar a já referida dificuldade em modelar o comportamento dos ocupantes durante a evacuação de um edifício sob emergência de incêndio, a solução proposta introduz um novo paradigma, propondo uma abordagem que pretende condicionar o comportamento dos ocupantes, fornecendo-lhes informação em tempo real sobre os percursos de evacuação que devem seguir para ficarem em segurança.

Para além do contributo académico para a área dos sistemas de recomendação multiagente e da evacuação de edifícios em caso de incêndio, a importância deste trabalho de investigação reside também no facto de endereçar um problema de muito relevo para a sociedade, relacionado com a segurança e salvaguarda de vidas humanas.

6 ESTRUTURA DA TESE

A tese está dividida em seis partes: Introdução, Enquadramento Teórico, Plataforma Web de simulação, Sistema Multiagente de Recomendação de Percursos de Evacuação; Experimentação e Avaliação do Sistema e Considerações Finais.

No capítulo introdutório faz-se o enquadramento do problema a investigar e definem-se os objetivos, as questões de investigação e a metodologia adotada para concretizar o estudo.

Na segunda parte, faz-se o enquadramento teórico, constando da mesma a revisão da literatura nas áreas de investigação que impactam no trabalho a desenvolver, designadamente no que diz respeito à evacuação de edifícios em emergência de incêndio, sistemas multiagente, sistemas de recomendação e ontologias.

Na terceira parte, apresenta-se a plataforma Web desenvolvida e usada para testar o Sistema Multiagente de Recomendação de Percursos de Evacuação, descrevendo-se com detalhe os

diferentes modelos que a constituem (o modelo de representação geométrica e física do edifício, a representação computacional do grafo representativo do edifício, o modelo criado para o movimento dos ocupantes e o modelo simplificado de propagação do incêndio). Apresenta-se também com detalhe o sistema multiagente em que se baseia o simulador de evacuação de edifícios.

A quarta parte é dedicada à apresentação do artefacto desenvolvido, o Sistema Multiagente de Recomendação de Percursos de Evacuação. Começa com a apresentação do modelo ontológico desenvolvido e que serviu de suporte ao sistema de recomendação. De seguida faz-se a apresentação da arquitetura geral da solução proposta, detalhando os seus diferentes componentes, designadamente no que se refere à abordagem de recomendação seguida e ao sistema multiagente. Apresentam-se ainda o modelo de atualização do grafo em tempo real, bem como os modelos de cálculo dos fatores contextuais que dão corpo à abordagem de recomendação seguida e à implementação do protótipo.

A quinta parte é dedicada aos testes experimentais e avaliação do protótipo do sistema desenvolvido. Começa por se justificar a escolha de plataforma Web desenvolvida para testar o artefacto e clarifica-se como se procederá à sua avaliação. É também neste capítulo que são apresentados os cenários de experimentação, bem como as simulações efetuadas com o protótipo e os resultados obtidos, concluindo-se com uma secção dedicada à discussão desses resultados.

Finalmente, na sexta e última parte apresentam-se as conclusões finais sustentadas na análise e interpretação dos resultados obtidos, tendo presente os objetivos e as questões de investigação formuladas. Realçam-se também os contributos do trabalho desenvolvido para o reforço do conhecimento no âmbito das áreas de investigação da evacuação de edifícios e sistemas de recomendação multiagente, descrevem-se as limitações do estudo, apresentam-se propostas de trabalho futuro e faz-se referência aos artigos escritos e apresentados a conferência.

II ENQUADRAMENTO TEÓRICO

1 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

De acordo com o apresentado na Figura I.2, as duas primeiras atividades da metodologia DSR centram-se na identificação do problema a investigar e nas motivações subjacentes ao trabalho a desenvolver, no sentido de definir os objetivos e formular as questões de investigação norteadoras do estudo objeto desta tese. Como já se disse anteriormente, essas duas atividades iniciaram-se com a proposta de tese em tempo aprovada pelo Conselho Científico da Universidade Aberta. No entanto, o trabalho desenvolvido nessa fase de elaboração da proposta de tese foi um trabalho exploratório, pelo que houve necessidade de aprofundar esse estudo, com o propósito de elaborar o estado da arte nas diferentes áreas de investigação envolvidas, de modo a melhor definir os objetivos e a ajustá-los em função dos resultados obtidos.

Assim, no presente capítulo apresenta-se o referencial teórico de suporte à investigação a que este documento pretende dar corpo. Introduzem-se os conceitos mais relevantes para o estudo e apresentam-se de forma detalhada os resultados obtidos através da pesquisa bibliográfica e consequente revisão de literatura, que permitem um conhecimento científico e uma aturada compreensão dos temas e áreas de investigação mais relevantes para a concretização desta tese.

A revisão de literatura incidiu sobre as áreas que, na fase de formulação da proposta de investigação aprovada pelo Conselho Científico da Universidade Aberta, foram identificadas como essenciais ao desenvolvimento desta tese, e tendo presente as questões de investigação e objetivos anteriormente apresentados e que se resumem na Tabela II.1.

Assim, uma das áreas determinantes para o estudo consistiu na identificação do estado da arte na área da evacuação de edifícios em caso de incêndio, com incidência nos trabalhos de investigação que se focam em soluções e sistemas capazes de conduzir os ocupantes de um edifício a local seguro.

Tabela II.1 – Objetivos e Questões de Investigação

<p>Objetivo global:</p>	<p>Estudar em que medida um sistema multiagente de recomendação baseado em informação contextual e assente num modelo ontológico pode contribuir para melhorar a eficiência na evacuação de edifícios suportados pela IoT, recomendando em tempo real os percursos de evacuação seguros mais adequados e eficientes a cada momento.</p>
<p>Objetivos específicos:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aprofundar o estudo das áreas de investigação de suporte ao projeto de tese proposto e tendo presente o objetivo global referido: sistemas de recomendação e sistemas multiagente no âmbito da <i>IoT</i>, ontologias e evacuação de edifícios em caso de incêndio. • Desenvolver um modelo ontológico de suporte à recomendação de percursos de evacuação em edifícios, em caso de emergência de incêndio. • Desenvolver um Sistema multiagente de recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio, baseado em contexto e na IoT e suportado no modelo ontológico referido
<p>Questões de Investigação:</p>	<ul style="list-style-type: none"> • QI-1: Como poderá uma abordagem multiagente, suportada num modelo ontológico, assegurar a interoperabilidade entre coisas, pessoas e sistemas, num contexto de evacuação de edifícios suportados pela IoT? • QI.2: Como poderá a informação de contexto obtida através da IoT contribuir para melhorar a evacuação de edifícios em caso de incêndio? • QI-3: Como poderá um sistema multiagente de recomendação baseado em contexto, melhorar a eficiência da evacuação de edifícios suportados pela IoT, através da recomendação de percursos de evacuação em tempo real?

Porque essenciais para o desenvolvimento do trabalho de tese, o estudo teórico incidiu também sobre as áreas dos sistemas multiagente e dos sistemas de recomendação, com incidência do seu uso no âmbito da *Internet of Things* (IoT).

Uma outra área de interesse que decorre dos objetivos e questões de investigação acima apresentados, é a área das Ontologias e da sua aplicação na área de emergência de incêndio.

Nas secções seguintes introduzem-se os conceitos e apresenta-se o estado da arte das áreas de investigação e domínios de aplicação acima identificados.

2 A EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO

A investigação na área da evacuação de edifícios tem visto desenvolvimentos significativos nas últimas décadas, com particular incidência na modelação e simulação do movimento e do comportamento dos seus ocupantes.

A evacuação de edifícios em caso de incêndio é um problema premente que tem merecido a atenção da sociedade em geral e da comunidade académica em particular, nomeadamente na procura de soluções para orientar os ocupantes até que se encontrem em segurança. Ao fornecer aos ocupantes do edifício informações em tempo real sobre as vias de evacuação mais adequadas desde o início do incêndio, induzir-se-á os ocupantes a um comportamento mais previsível, contribuindo assim para reduzir a incerteza que normalmente está associada a esse evento.

Como resultado do estudo realizado, apresentamos o estado da arte na área da evacuação de edifícios em caso de incêndio. Numa primeira fase focámos a nossa pesquisa bibliográfica na procura de revisões de literatura e estados da arte, em fase posterior incidimos sobre trabalhos de investigação que tenham como foco o desenvolvimento de soluções que contribuam para guiar os ocupantes até local seguro, em tempo real.

2.1 REVISÕES DE LITERATURA SOBRE A TEMÁTICA DA EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS

Começamos o trabalho de pesquisa procurando revisões de literatura sobre a temática da evacuação de edifícios, em particular, aqueles com foco na recomendação ou orientação dos ocupantes em tempo real. Foi possível encontrar várias dezenas de publicações através das quais os autores pretendem sintetizar e destacar os desenvolvimentos científicos na área da evacuação de edifícios e outros tipos de espaços. A maioria dessas revisões de literatura concentra-se no levantamento de modelos de evacuação, sistemas e algoritmos para uso na otimização de percursos de evacuação ou em software de simulação de evacuação. Outros estudos focam-se na identificação de trabalhos de investigação relacionados com o comportamento das pessoas em situações de evacuação, seja como indivíduo ou enquanto inseridos numa multidão.

2.1.1 MODELOS, SISTEMAS E ALGORITMOS DE EVACUAÇÃO

No seu estudo, Gwynne et al. (1999) analisam 22 modelos de evacuação e consideram três modelos de abordagem diferentes:

- modelos de otimização, nos quais os ocupantes são tratados como um todo, não levando em consideração o comportamento individual;
- modelos de simulação que pretendem representar o comportamento e o movimento dos ocupantes durante o processo de evacuação;
- modelos de avaliação de perigo, que buscam identificar perigos e quantificar o perigo associado à evacuação, decorrente de incêndio ou outro tipo de incidente.

Na revisão de literatura desenvolvida por Hamacher e Tjandra (2001), são analisados modelos e algoritmos aplicáveis ao problema de evacuação de edifícios. Os autores distinguem entre modelos de evacuação microscópicos e macroscópicos. Os modelos microscópicos são baseados em simulação e são capazes de modelar as características dos ocupantes, bem como as interações entre eles que influenciam o seu movimento. Os modelos macroscópicos, que são o foco principal do trabalho, não consideram comportamentos individuais durante a evacuação e usam algoritmos de otimização.

Para fornecer informações que ajudam a escolher o modelo mais adequado, Kuligowski e Peacock (2005) apresentam uma revisão abrangente de 30 modelos de evacuação de edifícios. Os autores classificam os modelos de acordo com várias categorias, como o método de modelagem utilizado e sua finalidade; o tipo de movimento dos ocupantes e seu comportamento; e a incorporação ou não de dados de incêndio na simulação.

Também dividindo os modelos em macroscópicos e microscópicos, Dhamala (2014) apresenta o estado da arte sobre modelos, algoritmos, aplicações e implementações na área de evacuação. O autor destaca as vantagens e desvantagens dos modelos analisados, referindo-se à dificuldade de se estabelecer consenso na comparação de desempenhos.

2.1.2 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DOS OCUPANTES DURANTE O PROCESSO DE EVACUAÇÃO

O interesse dos investigadores tem incidido muito no estudo do comportamento dos ocupantes durante o processo de evacuação. Nas suas revisões de literatura, Kobes et al. (2010) e Ronchi e Nilsson (2013) enfatizam a importância da compreensão do comportamento humano na concepção e construção de edifícios, considerando que o comportamento dos ocupantes depende da envolvente e em particular das medidas de segurança implementadas. Os autores destacam a importância de identificar os fatores comportamentais que influenciam o processo de evacuação do edifício, como é o caso da familiaridade do ocupante com o edifício e das características deste.

Compreender ou treinar e educar o comportamento humano para ter uma determinada reação numa situação de evacuação, contribui para tornar os edifícios mais seguros e otimizar esses processos de evacuação. No entanto, treinos baseados em simulacros, seminários, vídeos ou apresentações podem não ser as formas mais adequadas para adquirir e reter conhecimento (Feng et al., 2018). Por isso, alguns investigadores têm proposto, estudado e avaliado o uso de tecnologias inovadoras como os Jogos Sérios (*Serious Games*- SG) e a Realidade Aumentada (*Augmented Reality*- AR). Na sua revisão sistemática da literatura, Feng et al., (2018) buscam compreender o desenvolvimento e implementação de soluções baseadas em Jogos Sérios de Realidade Virtual Imersiva (*Immersive Virtual Reality* - IVR) no contexto de evacuação de edifícios, para o treino e estudo comportamental de pessoas. No seu

trabalho, os autores identificam 15 artigos, com base nos quais propõem um *framework* para apoiar o desenvolvimento de aplicações IVR e SG para uso na evacuação de edifícios.

Observando que a Realidade Aumentada (RA) pode contribuir com conteúdo virtual para a melhoria do desempenho dos ocupantes na evacuação de edifícios, Ruggiero (2018) apresenta uma revisão das aplicações de RA desenvolvidas para a evacuação de edifícios, identificando os seus objetivos e o hardware envolvido, bem como os tipos de incidente e de construção suportados. A revisão da literatura identifica 11 artigos e o autor conclui que o recurso à RA ajuda a aumentar o realismo do treino na evacuação de edifícios, proporcionando aos ocupantes do edifício soluções que melhoram o seu desempenho durante evacuação do edifício.

2.1.3 GUIANDO OS OCUPANTES DO EDIFÍCIO PARA UM LOCAL SEGURO, EM TEMPO REAL

Numa situação de evacuação em caso de emergência a maior motivação dos ocupantes é encontrar o percurso de saída do edifício. Vários têm sido os trabalhos dedicados à simulação do comportamento de pessoas em situação de evacuação, designadamente com o objetivo de procurar os percursos mais eficientes e adequados. Mais relevante, no entanto, é orientar os ocupantes a encontrar o melhor percurso de evacuação. Nesta secção, destacamos algumas revisões de literatura focadas na identificação de trabalhos de investigação que apresentam soluções capazes de guiar, em tempo real, os ocupantes do edifício para um local seguro.

Na revisão da literatura sobre Sistemas Inteligentes de Gestão de Evacuação (*Intelligent Evacuation Management Systems - IEMS*), desenvolvida por Ibrahim et al. (2016), os autores dedicam uma secção às soluções que sugerem os percursos de evacuação mais seguros e adequados. Os autores acreditam que um IEMS tem sucesso se for capaz de sugerir aos ocupantes os percursos que lhes permitam alcançar, de forma segura, o exterior do edifício ou zonas no interior deste que tenham adequadas condições de segurança. Para os autores, com a recomendação de percursos pretende reduzir o tempo de evacuação e evitar zonas em que ocorram congestionamentos e bloqueios dos percursos. Os autores referem ainda a existência de cinco métodos de notificação de percursos de evacuação aos ocupantes: através

de aplicações móveis; fotos ampliadas com setas indicativas; monitores digitais; iluminação inteligente e sinalização sonora.

No seu trabalho, Bi e Gelenbe (2019) apresentam o estado da arte na área da evacuação de emergência e orientação de evacuação, com foco em aspetos relacionados com algoritmos e sistemas. Os autores destacam os impactos dos desenvolvimentos nas tecnologias de informação e comunicação (TIC) e na IoT, na mitigação e prevenção de desastres, identificando como linhas de investigação a orientação de evacuação e a busca e resgate de emergência, mas concentrando o seu trabalho em desenvolvimentos na primeira das áreas referidas. Os autores definem a orientação de evacuação como um processo de direcionar os ocupantes através de zonas seguras com a ajuda de algoritmos ou usando planos de evacuação estáticos pré-concebidos com base na previsão e análise de modelos de comportamento dos ocupantes. No que diz respeito aos sistemas de evacuação, os autores relatam que têm acompanhado o desenvolvimento das TIC, destacando os seguintes:

- sistemas baseados na experiência humana, desenvolvidos entre as décadas de 1970 e 1990;
- sistemas de rede baseados em sensores sem fio;
- sistemas baseados na nuvem e em dispositivos móveis.

Quanto aos algoritmos, os autores fazem um levantamento exaustivo, diferenciando entre algoritmos offline e online. Os algoritmos offline concentram-se na otimização do projeto do espaço lotado e na avaliação do tempo de evacuação. Algoritmos online, pretendem fornecer aos ocupantes percursos de evacuação seguros e em tempo real, combinando modelos matemáticos ou algoritmos com sensores e dispositivos de comunicação e computação. Os autores também identificam possíveis linhas de pesquisa futuras, como o desenvolvimento de algoritmos apoiados em inteligência artificial para melhorar a determinação de percursos de evacuação e alocação de recursos e, ainda, o uso de sistemas multiagentes para modelar e desenvolver melhores estratégias de cooperação.

2.1.4 CONTRIBUTOS DAS REVISÕES DE LITERATURA

Embora não se tenham apresentados todos os estudos relacionados com a revisão de literatura, sobre a temática em análise, considera-se que os referenciados acima sintetizam adequadamente o trabalho de investigação que tem vindo a ser desenvolvido na área de evacuação de edifícios. Os trabalhos enfatizam o estudo de modelos de evacuação através de abordagens de otimização e simulação. Os principais objetivos da investigação estão direcionados para a compreensão do comportamento dos ocupantes, bem como para a melhoria da conceção e construção de edifícios, tornando-os mais eficazes nas situações de evacuação dos seus ocupantes para local seguro. Além disso, com o objetivo de melhor compreender e educar o comportamento dos ocupantes, os investigadores vêm estudando e propondo o uso de tecnologias inovadoras, como jogos sérios e a realidade aumentada. O estudo de soluções capazes de guiar, em tempo real, os ocupantes do edifício a um local seguro, também é uma preocupação dos investigadores, mantendo-se uma linha de investigação em aberto.

2.2 ORIENTAÇÃO DOS OCUPANTES DURANTE O PROCESSO DE EVACUAÇÃO DE UM EDIFÍCIO, EM TEMPO REAL

As revisões de literatura referidas na secção anterior permitem desde logo identificar as principais linhas de investigação na área da evacuação de edifícios. Na presente secção, e considerando o âmbito desta tese de doutoramento, bem como os objetivos e questões de investigação formulados, incidiu-se a pesquisa bibliográfica na procura de trabalhos de investigação focados em aspetos relacionados com a orientação dos ocupantes em tempo real, durante o processo de evacuação.

No seu artigo Pu e Zlatanova (2005) apresentam uma abordagem baseada em modelos 3D, para fornecer instruções de evacuação aos ocupantes de edifícios, referindo a necessidade urgente de sistemas confiáveis para os apoiar em operações de evacuação, fazendo notar a importância de lhes fornecer informação adequada. Na sua proposta os autores apresentam um novo modelo de cálculo de percursos de evacuação que para além do seu comprimento, considera também fatores dinâmicos decorrentes da envolvente e do comportamento dos ocupantes. Esses percursos são transmitidos de modo que alcancem o maior número possível ocupantes.

Hajibabai et al. (2007) apresentam uma solução, baseada em agentes, para simulação do comportamento dos ocupantes de um edifício numa situação de evacuação em caso de incêndio. A hipótese formulada pelos autores é a de que o sucesso na evacuação de edifícios será alcançado se o ocupante for capaz de tomar as decisões corretas em face da informação de orientação que tem ao seu dispor, designadamente através da sinalética de emergência. No modelo apresentado os autores realçam a importância de que o ocupante disponha da informação necessária para a sua tomada de decisão sobre o percurso que deve percorrer até chegar a local seguro. Referem os autores que a escolha do percurso é influenciada por variáveis ambientais percebidas pelos ocupantes, como é o caso da visibilidade, da geometria do edifício e da sinalética de emergência de orientação. Relativamente à informação de orientação, Hajibabai et al. (2007) referem que a mesma deve estar disponível num local que pressuponha uma tomada de decisão e deve cumprir os seguintes requisitos: ser legível e claramente visível; ser clara, concisa e compreensível, ser confiável e ser adequada a pessoas com deficiência.

No seu artigo Inoue et al. (2008) apresentam uma solução de evacuação de edifícios baseada num sistema de posicionamento autónomo, especificamente desenhado para o efeito, usando dispositivos rádio localizados no interior do edifício, que transmitem um sinal a cada intervalo de tempo. Cada ocupante possui um smartphone, que permite calcular o seu posicionamento, e um recetor de rádio interligados por Bluetooth. Além da informação de localização obtida pelo sistema de posicionamento, os autores incorporam também a informação obtida a partir de sensores, de modo a identificar a ocorrência de emergências. De posse dessa informação o sistema notifica o ocupante e apresenta-lhe no smartphone o percurso de evacuação até local seguro.

Filippopolitis et al. (2011) apresentam um sistema de navegação autónomo capaz de orientar e guiar os ocupantes de um edifício, durante um processo de evacuação. Este sistema de navegação resulta da articulação de dois subsistemas, um constituído por nós estáticos colocados em pontos de decisão ao longo do edifício, os quais calculam o melhor percurso a indicar às pessoas na vizinhança de cada um, o outro formado por nós de comunicação móveis, interligados através de uma *opportunistic communication network*, que disponibilizam informações sobre o percurso a efetuar aos que os transportam. O sistema pressupõe a existência de sensores que monitorizam o ambiente do edifício.

Georgoudas et al. (2011) propõem um Sistema que permite gerir dinamicamente uma multidão num espaço fechado, e cujo propósito é antecipar e prever a ocorrência de bloqueios decorrentes do congestionamento dos percursos, de modo a que os ocupantes possam ser informados em tempo real da existência de percursos alternativos. A simulação é baseada num modelo do tipo autómato celular (*Cellular Automata – CA*).

Zhou et al. (2012) apresentam um novo algoritmo *Multiple Streaming Crowd Guidance – (MSCG)* para guiar os ocupantes de um edifício até local seguro, baseado em dados obtidos de uma rede de sensores sem fios (*Wireless Sensor Network - WSN*) e em tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*). A solução proposta usa a rede de sensores para alimentar o algoritmo com dados da envolvente, incluindo a propagação do incêndio, designadamente no que se refere ao fluxo dos ocupantes, acidentes inesperados, condições de iluminação, temperatura e humidade. Na base do algoritmo está um grafo representativo do edifício. Os vértices representam os espaços e as arestas representam o percurso entre os espaços. Com base nos dados de contexto é calculado um índice de perigo (*DI - Danger Index*) para cada vértice. O ocupante desloca-se no sentido do vértice com menor índice de perigo.

Kruger et al. (2012) apresentam um sistema baseado numa WSN capaz de apoiar a evacuação de um edifício, em que os ocupantes são guiados tendo em conta a eventualidade de congestionamento. Os autores desenvolveram uma prova de conceito, tendo construído um sensor de infravermelhos para deteção dos ocupantes e um *display* para indicar aos ocupantes o percurso a seguir.

Wagoum (2013) apresenta um sistema de evacuação para grandes espaços, cujo propósito é monitorizar e antecipar o fluxo de pessoas durante a evacuação de edifícios complexos. Ao prever o fluxo de pessoas para os próximos 15 minutos, o sistema permite apoiar os serviços de segurança e gestores do espaço na tomada de decisões durante a evacuação. Os autores apontam dois grandes objetivos para o sistema proposto: a monitorização da situação durante um evento de grande dimensão e a previsão do fluxo de pessoas numa situação de evacuação, em tempo real. Quanto à informação que alimenta o sistema, divide-se em três grupos: informação relacionada com a geometria do edifício; informação obtida pelos sistemas de deteção e segurança instalados no edifício; e informação obtida de sistemas de contagem de pessoas, constituído por uma *grid* de câmaras instaladas nos locais de interesse.

No seu trabalho, Wu et al. (2013) apresentam um sistema de orientação de pessoas durante um processo de evacuação num edifício em caso de incêndio. O sistema desenvolvido é suportado numa WSN, em leitores e *tags* RFID e em dispositivos portáteis, permitindo que em tempo real os ocupantes recebam nos seus *smartphones* a sua localização, variáveis ambientais e a informação relativa ao percurso que têm de realizar até local seguro, por meio de setas indicadoras de direção. A operabilidade do sistema implica que os ocupantes do espaço têm um *smartphone*, no qual instalaram previamente a aplicação.

Cisek e Kapalka (2014) propõem um modelo baseado num algoritmo que a cada instante calcula os possíveis percursos de evacuação, que são representados por um conjunto de grafos que evoluem dinamicamente ao longo do tempo em função do contexto. Os percursos de evacuação são apresentados aos ocupantes através de sinalética digital dinâmica. Os testes efetuados apresentaram bons resultados no que respeita ao tempo de evacuação.

Hsu et al. (2014) apresentam uma solução de evacuação em tempo real que integra redes WSN, RFID e orientação de percursos em tempo real, de modo a providenciar aos ocupantes a informação direcional, providenciada através de sinalética digital. necessária à sua evacuação do edifício. Essa informação direcional é providenciada através de sinalética digital necessária à evacuação de edifícios. O sistema disponibiliza ainda informação em tempo real aos bombeiros.

Desmet e Gelenbe (2014) apresentam um sistema dinâmico de orientação de evacuação, que atribui percursos a ocupantes com base num algoritmo de restrição de capacidade, que reserva espaço para o ocupante, que é informado através de sinalética direcional dinâmica existente no espaço. Segundo os autores o sistema proposto reencaminha os ocupantes de um modo que reduz o congestionamento no edifício, minimizando o tempo de evacuação.

Cho et al. (2015) apresentam o algoritmo ADSA (*Automated Direction Setting Algorithm*) para ativação automática de um sistema de sinalização de emergência inteligente e desse modo guiar os ocupantes de um edifício em evacuação até local seguro. Para determinação do caminho mais curto, os autores usaram o algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959). O interesse do sistema é o de encontrar alternativas de sinalização dinâmicas, que permitam

orientar as pessoas em tempo real, contribuindo para que os ocupantes não sejam induzidos em erro pela sinalização estática.

No seu trabalho Wang et al. (2015) propõem a integração de informação de sensores na forma de um grafo dinâmico que evolui no tempo e traduz a cada momento o estado dos sensores. O grafo dinâmico de sensores propaga o estado para o grafo de percurso de evacuação, pelo que é com base nesses dois grafos que os autores propõem uma solução de evacuação que considera o perigo. O Modelo proposto foi experimentado e avaliado através de uma simulação baseada em agentes, sendo avaliados os seguintes parâmetros: i) número de evacuados c/ sucesso; ii) o tempo de evacuação médio e o máximo.

Referindo que o sistema de sinalização de emergência de um edifício ajuda as pessoas a circular e é fundamental na sua evacuação, Yenumula et al. (2015) realçam que em situações de emergência, particularmente quando geradoras de pânico, a sinalética estática pode conduzir a situações complicadas, pelo que é importante a existência de uma sinalética dinâmica adaptável às circunstâncias a cada momento. Com o seu trabalho, propõem um sistema de sinalização controlado a partir de modelos BIM (*Building Information Modeling*) suportado em sensores de calor colocados em locais que podem vir a estar sujeitos à ação do incêndio. O sistema determina o melhor percurso e ativa em conformidade a sinalização correspondente, mantendo inativa a sinalização restante. Na demonstração da solução o critério usado para determinar o melhor percurso foi o do caminho mais curto.

No seu artigo Tan et al. (2015) propõem um modelo de simulação de evacuação de edifícios em caso de incêndio, no qual consideram que os ocupantes, representados por agentes autónomos, conhecem a topologia e geometria do espaço a evacuar e têm consciência das alterações no espaço decorrentes do incêndio, selecionando o percurso de evacuação em face desses novos elementos. A solução proposta assenta num modelo ontológico representativo do edifício e das relações entre os seus diferentes espaços. Os ocupantes são modelados através de agentes autónomos.

Weifang e Qiang (2015) propõe uma solução para otimização de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio a partir da topologia do edifício e com base na informação dos diferentes sensores especificamente instalados para o efeito e interligados pela IoT. A

solução proposta baseia-se numa versão melhorada do algoritmo de Dijkstra para determinar o caminho mais curto.

J. Liu et al. (2016) apresentam uma *framework* para calcular percursos de evacuação eficientes para evacuar um edifício. A abordagem integra informação obtida a partir de uma rede de sensores. Essa informação é processada num servidor central que calcula em tempo real os percursos de evacuação, recorrendo ao algoritmo A* (Hart et al., 1968). Esses percursos são comunicados ao ocupante através da sinalização existente no edifício ou através do seu *smartphone*.

No seu artigo, Lujak et al. (2016) apresentam a arquitetura de um sistema multiagente para otimização de percursos de evacuação em *smart spaces* de grande dimensão. O modelo proposto tem em consideração os aspetos de segurança dos percursos a recomendar. Cada ocupante do espaço a evacuar é representado no sistema por um agente que corre numa *app* do seu próprio *smartphone*, onde recebe os percursos seguros mais curtos, calculados por um agente especificamente desenhado para o efeito.

No seu trabalho, Shikhalev et al. (2016) propõem um algoritmo que determina e propõe aos ocupantes o caminho mais seguro numa situação de emergência de incêndio. O algoritmo proposto usa o algoritmo de Floyd-Warshall (Cormen et al., 1990), mas ao invés do peso da aresta ser apenas o seu comprimento, os autores consideram um critério mais complexo, baseado na raiz quadrada da soma de três critérios: um critério que designam por obstrução (*obstruction criterion*), que está relacionado com a densidade de pessoas numa determinada zona do percurso; um critério de oportunidade (*timeliness criterion*) que está relacionado com os perigos decorrentes do fogo (alta temperatura, grande quantidade de fumo, baixa visibilidade, toxicidade resultante da combustão); e um critério relacionado com o comprimento do percurso. Cada critério é sujeito a um coeficiente de ponderação.

Tendo em consideração os aspetos relativos à segurança do percurso e a influência do *stress* na reação das pessoas face à situação de emergência em que se encontram, Lujak e Ossowski (2017) apresentam a arquitetura para uma solução de otimização de percursos de evacuação, baseada num sistema multiagente. Os autores pretendem proporcionar a recomendação de

percursos em tempo-real, sugerindo que essa recomendação se faça através de *smartphones* ou *displays* inteligentes.

O desenvolvimento da tecnologia dos sensores nos mais diversos domínios de aplicação, potencia a implementação de sistemas de automação de edifícios (*Building Automation Systems - BAS*), os quais permitem fazer a gestão desses edifícios. Baseados nesses sistemas, Gokceli et al. (2017) propõem a criação de um serviço de evacuação de emergência que recorre à IoT para integrar as funções típicas de um sistema de automação de edifícios (aquecimento, ventilação, iluminação, segurança e gestão de energia) com sensores, dispositivos *wearable* e *smartphones*.

No seu trabalho de investigação, Lee et al. (2017) propõem um sistema inteligente de percursos de evacuação que combina sensores e dispositivos de sinalética digital, através de uma WSN. Com a informação obtida dessa rede o sistema percebe as condições do edifício, calcula o percurso de evacuação mais adequado, ativando de seguida os respetivos dispositivos de sinalização digital.

No seu estudo, Li e Zhu (2018) apresentam um modelo para otimização de percursos de evacuação que tem em consideração fatores como a distância a percorrer, a densidade de pessoas no espaço a evacuar e o perigo decorrente do incêndio, que depende de fatores como a temperatura, a radiação térmica e a concentração de gás tóxico.

2.3 TEMPO DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS E TEMPO DE MOVIMENTO DOS OCUPANTES

Considerando o âmbito do presente trabalho de investigação, que comporta a modulação da evacuação de edifícios, pretende-se analisar e avaliar o tempo necessário para que os ocupantes abandonem o edifício em segurança.

A Norma PD 7974-6:2019 do British Standards Institution (2019), considera dois conceitos fundamentais, que devem ser considerados na evacuação de edifícios em caso de incêndio: o tempo disponível para uma evacuação em segurança (*ASET - available safe escape time*) e o

tempo necessário para uma evacuação em segurança (*RSET - required safe escape time*). Na Figura II.1, obtida da referida norma, apresenta-se com os vários tempos relacionados com o ASET e como o RSET: ASET é o tempo desde o momento da ignição do incêndio até ao limite máximo sustentável para uma evacuação em segurança; RSET é o tempo desde a ignição até que esteja concluída a evacuação.

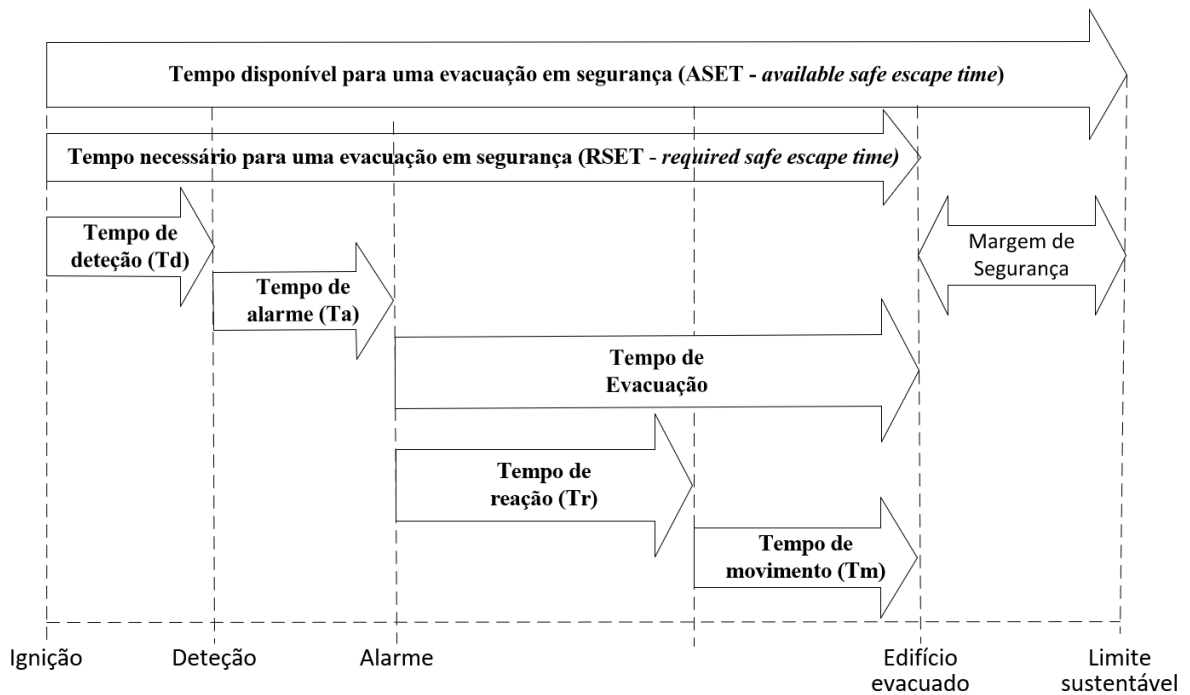


Figura II.1 Tempo disponível e tempo necessário para uma evacuação em segurança. Adaptada da Norma PD 7974-6:2019 (2019))

Como decorre da Norma PD 7974-6 e da Figura II.1, a evacuação de um edifício pode ser considerada segura se o tempo disponível para que ela ocorra em segurança for substancialmente superior ao tempo durante o qual os espaços que os ocupantes têm de percorrer apresentam condições ambientais (temperatura, radiação, gás tóxico) que não representam perigo para que os tem de percorrer, isto é:

$$ASET \gg RSET \quad (II.1)$$

A partir da Figura II.1, podemos escrever RSET através da expressão seguinte:

$$RSET = T_d + T_a + T_r + T_m \quad (II.2)$$

Onde:

- T_d – É o tempo que medeia desde a ignição do incêndio até à sua detecção pelo sistema de detecção de incêndios.
- T_a – É o tempo que medeia entre a detecção e a emissão do alarme para evacuação.
- T_r - É o tempo de reação dos ocupantes ao alarme, que medeia entre o alarme de evacuação e o início do movimento de evacuação.
- T_m – É o tempo de movimento, que medeia entre o início do movimento dos ocupantes até à chegada a local seguro.

No âmbito do nosso estudo e na modelação de evacuação desenvolvida e testada o tempo considerado é o tempo de movimento (T_m).

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da pesquisa realizada constata-se que a evacuação de edifícios é um problema que tem sido estudado ao longo das últimas décadas e sobre diferentes perspectivas como sejam: o comportamento dos ocupantes dos espaços evacuados, a identificação dos percursos de evacuação, o congestionamento desses percursos, bem como o perigo a que os espaços a ser evacuados estão sujeitos, particularmente em situações de incêndio.

A maioria dos trabalhos têm sido orientados para a simulação e modelação de processos de evacuação, com o propósito de apoiar arquitetos e projetistas no desenho de espaços e caminhos de evacuação. São em menor quantidade os trabalhos que utilizam informação em tempo real para melhor servir aqueles que, em emergência, necessitam de apoio. Como referem Pu e Zlatanova (2005), se bem que os edifícios hoje em dia já estejam equipados com sistemas de detecção de incêndio modernos que alertam os ocupantes, esses sistemas não dão pistas ou orientações em tempo real aos ocupantes durante o processo de evacuação. As soluções postas em prática no presente apenas têm sido capazes de disponibilizar informação de evacuação estática baseada nos planos de evacuação.

De facto, as emergências não são estáticas e o percurso de evacuação mais adequado em cada momento não pode ser apenas baseado em informação estática. Segundo Cisek e Kapalka (2014) um dos grandes problemas da sinalética estática é o de continuar a indicar direção de evacuação, mesmo para zonas de perigo. Também Cho et al. (2015) realçam que a sinalética estática pode orientar erradamente os ocupantes, tendendo a levá-los para zonas de perigo, prolongando o tempo de evacuação devido à confusão induzida nos ocupantes.

Assim, a introdução de sinalética digital dinâmica, que seja atualizada em função do contexto e em tempo real, transformando o sistema de sinalização num sistema inteligente, capaz de guiar os ocupantes a local seguro, possibilitará uma melhor orientação destes, guiando-os até local seguro.

3 SISTEMAS MULTIAGENTE

Segundo Wooldridge (2009), não existe uma definição consensual para o conceito de agente, sendo possível encontrar múltiplas definições (Dorri et al., 2018), em que diferentes autores definem agente de acordo com o uso que cada um faz do termo (Franklin & Graesser, 1996). Por exemplo, Gilbert et al. (1995) definem agentes inteligentes como entidades de *software* que desempenham tarefas em nome de um utilizador ou outro programa, com um certo grau de independência e autonomia, e que, ao fazê-lo, empregam algum conhecimento ou representação dos desejos ou objetivos do utilizador. Para Maes (1991) agentes autónomos são sistemas computacionais que inseridos em ambientes complexos e dinâmicos percebem esse ambiente e agem de forma autónoma para cumprir os propósitos para que foram projetados. Uma outra definição para agente autónomo é a proposta por Franklin e Graesser (2015, p. 24), que consideram ser um sistema capaz de perceber o ambiente em que se insere e agir sobre ele de acordo com os seus objetivos, de modo que os efeitos produzidos pelas suas ações nesse ambiente são por ele posteriormente percecionados. Por último, apresentamos a definição de Wooldridge (2009, p. 21), para quem um agente é um sistema computacional capaz de agir de forma autónoma num determinado ambiente com o propósito de cumprir os objetivos que lhe foram delegados. Para Jennings (2000), desta última definição resulta que os agentes:

- i. são capazes de resolver problemas com limites e interfaces bem definidos;

- ii. usam sensores para perceberem o estado do ambiente em que se situam e agem nesse mesmo ambiente através de atuadores;
- iii. são desenhados para cumprir um determinado objetivo;
- iv. controlam o seu comportamento de modo a cumprirem os seus objetivos;
- v. têm de ser reativos e pró-ativos.

Independentemente da diversidade de definições apresentadas, todas elas têm subjacente o conceito de autonomia. No entanto, para Wooldridge (2009), diferentes autores atribuem ao termo autonomia significados diferentes. Considerando que a autonomia é uma característica essencial de um agente, é importante clarificar o que pode entender-se por autonomia quando referida a um agente. Assim, pegando na definição de agente de Wooldridge (2009) anteriormente referida, pode entender-se autonomia como a capacidade de o agente agir autonomamente de forma a cumprir os objetivos que lhe foram delegados.

Além da autonomia, Wooldridge e Jennings (1995) consideram ainda as seguintes propriedades que os agentes devem possuir para que possam cumprir os objetivos que lhe foram delegados:

- Reatividade - capacidade de perceber o ambiente e responder adequadamente e a tempo às alterações percebidas.
- Proatividade – capacidade de tomar iniciativa.
- Habilidade social – capacidade de interagir com outros agentes e, possivelmente, com humanos.

Um sistema multiagente pode ser definido como um sistema composto por múltiplos agentes inteligentes, que são capazes de trabalhar em conjunto para atingir objetivos, que são mais difíceis de atingir por um agente individual (Morais et al., 2012) . Enquanto parte de um sistema multiagente, os agentes podem cooperar ou competir entre si. Quando interagem entre si de forma cooperativa, fazem-no de forma direta ou através do ambiente com o propósito de alcançar objetivos comuns. No entanto, agentes inseridos num sistema multiagente podem também ter os seus próprios objetivos, pelo que terão de negociar de modo a alcançar os objetivos a que se propõe o sistema.

4 SISTEMAS DE RECOMENDAÇÃO

Os sistemas de recomendação têm vindo a ser usados nos mais diversos domínios de aplicação, como é o caso da recomendação de páginas de um sítio Web, da recomendação de produtos numa loja online ou de recursos de aprendizagem em sistemas de *e-learning*, bem como soluções no âmbito da *IoT*, recomendando pontos de interesse turísticos a visitantes de uma cidade, sugerindo percursos mais eficientes a automobilistas ou recomendando “coisas” a utilizadores.

Em face dos tipos de uso acima referidos pode definir-se sistema de recomendação como um sistema capaz de recomendar algo a utilizadores. O termo “algo” da definição anterior pode ser substituído pelo termo “item”, que na terminologia dos sistemas de recomendação se refere àquilo que o sistema recomenda aos utilizadores (Ricci et al., 2011). Esta definição enquadra-se na de Ricci et al. (2011), para quem um sistema de recomendação é um conjunto de técnicas e ferramentas de software que disponibilizam itens para uso dos utilizadores. Em consonância com as definições anteriores está o que Wei et al. (2005) consideram ser uma recomendação: uma referência para um item que é direcionada ao destinatário apropriado.

Quando comparado com um sistema de busca tradicional, Resnick e Varian (1997) consideram que os sistemas de recomendação são menos exigentes no que respeita à experiência de utilização, requerendo um menor esforço por parte do utilizador na caracterização dos seus interesses ao consultar e operar o sistema. Para Wei et al. (2005), essa vantagem dos sistemas de recomendação decorre da sua capacidade para proporcionar aos utilizadores recomendações baseadas nas suas preferências anteriores ou em preferências de outros utilizadores com interesses similares.

A partir das definições anteriormente apresentadas, pode afirmar-se que os sistemas de recomendação têm como um dos seus principais objetivos, apoiar e estimular os utilizadores na sua tomada de decisão, proporcionando-lhes os itens que mais se coadunam com os seus interesses.

4.1 TIPOS DE ABORDAGEM

Os sistemas de recomendação são usualmente classificados segundo o modo como são geradas as recomendações, identificando-se tradicionalmente os três tipos de abordagem seguintes (Balabanović & Shoham, 1997)

- **Abordagens baseadas em conteúdo**, em que os itens recomendados são aqueles com os conteúdos similares aos que o utilizador mostrou preferência no passado. Neste tipo de abordagens as recomendações são geradas com base nos atributos que caracterizam os itens.
- **Abordagens colaborativas**, em que os itens recomendados são os que utilizadores com preferências similares às do utilizador ativo gostaram no passado. As recomendações são geradas com base nas classificações atribuídas pelos utilizadores.
- **Abordagens híbridas**, em que os itens recomendados resultam da combinação de técnicas usadas em abordagens colaborativas e baseadas em conteúdo.

Além das abordagens referidas, Burke (2007) considera ainda mais dois tipos, que também podem ser combinadas em abordagens híbridas:

- **Abordagens baseadas em conhecimento**, em que as recomendações são geradas a partir de inferências sobre as preferências e necessidades dos utilizadores. Neste tipo de abordagem o sistema tem conhecimento sobre como um determinado item satisfaz uma necessidade particular de um utilizador (Akhtar & Agarwal, 2015).
- **Abordagens baseadas na demografia**, em que o sistema produz as suas recomendações a partir do perfil demográfico do utilizador. Este tipo de abordagem não exige um histórico de classificações por parte dos utilizadores, como acontece com as abordagens colaborativas e baseadas em conteúdo (Akhtar & Agarwal, 2015)..

Mais dois outros tipos de abordagem são também comumente referidos na literatura sobre sistemas de recomendação:

- **Abordagens baseadas em funções utilidade.** Referidas por Akhtar e Agarwal (2015) na sua revisão de literatura, estas abordagens geram as suas recomendações a partir de uma função utilidade, que calcula a utilidade de um determinado item para um utilizador.
- **Abordagens baseadas em contexto ou sensíveis ao contexto.** Neste tipo de abordagens as recomendações são geradas tendo em conta o contexto em que os utilizadores se inserem.

Considerando o âmbito e os objetivos do trabalho de investigação, através do qual nos propomos estudar em que medida um sistema multiagente de recomendação baseado em informação contextual pode contribuir para melhorar a eficiência na evacuação de edifícios suportados pela IoT, vamos debruçar-nos com maior detalhe sobre as abordagens baseadas em contexto

4.2 ABORDAGENS BASEADAS EM CONTEXTO

Como referem Adomavicius et al. (2005), ainda que as tradicionais abordagens colaborativas e baseadas em conteúdo continuem a ser as mais usadas em sistemas de recomendação, as recomendações são produzidas tendo apenas em consideração o par item-utilizador e não levam em conta o contexto em que o utilizador se insere. Para Jannach et al. (2011) explorar a localização do utilizador, saber quem o acompanha e que recursos próximos estão disponíveis aumenta consideravelmente a qualidade das recomendações. Assim, ter em conta o contexto contribui para a melhoria e fiabilidade das recomendações (Rahman, 2013), pelo que, como referem Adomavicius et al. (2011), os sistemas de recomendação baseados ou sensíveis ao contexto são capazes de gerar recomendações mais relevantes, pois são produzidas tendo em conta a situação contextual do utilizador.

4.3 CONTEXTO EM SISTEMAS DE RECOMENDAÇÃO

Se, do acima exposto, fica claro o interesse de considerar informação contextual em sistemas de recomendação, importa também definir o próprio conceito de contexto, o qual tem sido

largamente estudado nas mais diversas áreas das ciências cognitivas e também da computação. No seu estudo, Bazire e Brézillon (2005) analisam um corpus de 150 diferentes definições, na sua maioria obtidas a partir da Web, mas não concluem com uma definição consensual, ficando claro que muitos autores assumem como definição aquela que mais se adequa ao contexto em que pretendem usar o termo. Esta ideia é reforçada por Bazire e Brézillon (2005), quando afirmam que uma definição de contexto depende da área de conhecimento em que é usada. Referindo que a palavra contexto é praticamente uma *buzzword* usada em psicologia e noutras áreas como na linguística ou na computação, Bazire e Brézillon (2005) frisam também que na maioria das vezes é usado de uma forma que, quem a usa, pressupõe que qualquer pessoa entende o seu significado. A partir da análise das definições recolhidas na Web, os mesmos autores concluem ainda que o contexto age como um conjunto de restrições influenciadoras do comportamento de um sistema ou utilizador no desempenho de uma tarefa.

Considerando os desafios colocados pela computação ubíqua na interação homem-computador, Dourish (2004) realça o surgimento do interesse na computação sensível ao contexto (*context-aware computing*). No entanto, o mesmo autor faz referência a uma assinalável confusão em torno do termo “contexto”, pelo que no seu trabalho procura compreender o uso desse termo no âmbito da interação homem-computador.

No seu artigo, Dourish (2004) apresenta duas visões diferentes para o termo contexto. Por um lado, uma visão representacional, em que o autor assume que o contexto pode ser visto como forma de informação, estável, delimitável e independente da atividade. Subjacente a esta visão representacional, está a ideia de que o contexto consiste num conjunto de características da envolvente onde a atividade decorre, podendo essas características ser codificadas num sistema em conjunto com a própria atividade (Dourish, 2004). Em alternativa à visão representacional, que considera não interpretar de forma correta o papel do contexto na atividade humana, o autor propõe uma visão alternativa, que denomina de interacional. Na visão interacional, o autor considera que o contexto é uma propriedade relacional entre objetos ou atividades. Considera também que as características contextuais são definidas dinamicamente e que, ao invés de ser estável, o contexto se refere a uma determinada ocasião de uma atividade ou ação. Um outro argumento, é o de que, ao

contrário do assumido na visão representacional, na visão interacional o contexto decorre da atividade.

No seu trabalho, Adomavicius et al. (2011) propõem uma classificação para o contexto em sistemas de recomendação, que assenta nas duas dimensões seguintes dos fatores contextuais: i) o que deve o sistema de recomendação saber sobre os fatores contextuais; ii) como é que os fatores contextuais se alteram com o tempo. Relativamente ao que o sistema de recomendação deve saber sobre os fatores contextuais, os autores identificam três categorias de observação: (i) totalmente observável, em que os fatores contextuais são explicitamente conhecidos; (ii) parcialmente observável, em que apenas é conhecida alguma informação sobre os fatores contextuais; e (iii) não observável, em que não está disponível de forma explícita informação sobre os fatores contextuais. Quanto à segunda dimensão, podem considerar-se que: (i) os fatores contextuais e a sua estrutura se mantêm ao longo do tempo, são por isso estáticos; e (ii) os fatores contextuais são dinâmicos, pelo que mudam de alguma forma ao longo do tempo. A partir das referidas dimensões, Adomavicius et al. (2011), constroem uma matriz 3x2, que se reproduz na Tabela II.2.

Tabela II.2 Dimensões do contexto em Sistemas de Recomendação (Adomavicius et al., 2011)

		Conhecimento do Sistema de Recomendação sobre os Fatores Contextuais		
		Totalmente observável	Parcialmente observável	Não observável
Como mudam os Fatores Contextuais ao longo do tempo	Não mudam com o tempo (Estático)	Tudo se conhece sobre o contexto	Fatores estáticos e parcialmente observáveis	Conhecimento Latente do Contexto
	Mudam ao longo do tempo (Dinâmico)	A relevância do contexto é dinâmica	Fatores dinâmicos e parcialmente observáveis	Nada se sabe sobre o contexto

Estando fora do âmbito do trabalho escarpelizar todas as possibilidades proporcionadas pela combinação das categorias de ambas as dimensões, faz-se aqui referência que, no seu trabalho, Adomavicius et al. (2011) apresentam alguns exemplos de sistemas de recomendação que se enquadram em cada uma das entradas da matriz da Tabela II.2.

Para Adomavicius et al. (2011), a primeira célula da matriz corresponde à visão representacional do contexto referida por Dourish (2004), representando uma situação em

que tudo se conhece sobre o contexto, pois nem os fatores contextuais nem a sua estrutura mudam com tempo e esses fatores são totalmente observáveis. É sobre esta visão de contexto que nos vamos continuar a debruçar.

De acordo com Adomavicius et al. (2011), os sistemas baseados numa visão representacional de contexto são, pela sua natureza, sistemas específicos de um domínio, pelo que o conjunto de fatores contextuais relevantes para a geração das recomendações deve ser especificado como parte do próprio sistema de recomendação.

Haruna et al. (2017) apresentam o estado da arte em sistemas de recomendação baseados em contexto, classificando os trabalhos segundo o domínio de aplicação, o tipo de abordagem na extração da informação contextual, o tipo de abordagem na modelação dessa informação, o tipo de filtragem e as técnicas de avaliação dos sistemas.

5 SISTEMAS DE RECOMENDAÇÃO MULTIAGENTE

A adaptação e personalização de sites e aplicações Web ao interesse dos seus utilizadores é um problema complexo, que justifica o uso de abordagens multiagente em sistemas de recomendação. É Jennings (2001) quem defende o uso de abordagens multiagente para o desenvolvimento de sistemas complexos. Considerando o interesse na conjugação das áreas dos sistemas de recomendação e dos sistemas multiagente para o trabalho de investigação, fez-se uma revisão de literatura aprofundada orientada para os sistemas de recomendação multiagente (Neto et al., 2022b), segundo duas perspetivas distintas. Numa primeira fase a pesquisa focou-se na identificação de revisões de literatura sobre os sistemas de recomendação multiagente, enquanto na segunda fase, essa pesquisa incidiu sobre trabalhos de investigação que propõem soluções de recomendação baseadas na tecnologia dos agentes e sistemas multiagente.

Relativamente à pesquisa por revisões de literatura, não se encontraram revisões dedicados especificamente aos sistemas de recomendação multiagente. Já quanto a revisões de literatura sobre sistemas de recomendação em geral, foi possível encontrar bastantes e valiosos contributos na área dos sistemas de recomendação, merecendo atenção particular, pelo seu impacto, as revisões de literatura sobre sistemas de recomendação em geral,

desenvolvidas por Adomavicius e Tuzhilin, (2005), Bobadilla et al. (2013), Lu et al. (2015) e Beel et al. (2016). A pesquisa permitiu também identificar um conjunto de revisões de literatura orientadas a domínios de aplicação específicos, como é o caso do e-learning (Klašnja-Milićević et al., 2015) ou do turismo (Borràs et al., 2014). Identificaram-se também revisões de literatura sobre abordagens de recomendação baseadas em conteúdo (Lops et al., 2011), baseadas em filtragem colaborativa (X. Yang et al., 2014), abordagens híbridas (Burke, 2002) e baseadas em contexto (Verbert et al., 2012).

Relativamente à pesquisa por trabalhos de investigação que suportam as soluções em sistemas de recomendação multiagente, é de registar a crescente adoção desse tipo de soluções. Após análise de mais de 150 artigos, selecionaram-se um conjunto de trabalhos que se consideram representativos do estado da arte na área dos sistemas de recomendação baseados em sistemas multiagente, nos mais diversos domínios de aplicação.

Uma dessas áreas de aplicação é o comércio eletrónico. Lee, Wei-Po et al. (2002), apresentam uma solução baseada em dois sistemas multiagente para lidar com dois tipos de recomendações: (i) baseadas no comportamento passado do utilizador, através de informação obtida de forma implícita; e (ii) baseadas nas preferências explicitamente fornecidas pelos utilizadores. Miao et al. (2007), apresentam uma solução baseada em agentes que: (i) assegura a comunicação com os utilizadores; (ii) apreende o comportamento recente dos utilizadores; (iii) percebe o ambiente; e (iv) faz inferências a partir das preferências dos utilizadores e do conhecimento de especialistas do domínio.

A área do turismo tem também sido uma área de uso crescente de sistemas de recomendação, para recomendação de pontos de interesse a turistas. Batet et al. (2012) apresentam o *Turist@*, um sistema de recomendação multiagente capaz de recomendar atividades culturais e de lazer a turistas, na área geográfica em que se encontram. A solução de recomendação segue uma abordagem de recomendação híbrida, implementando uma estratégia baseada em conteúdo e outra colaborativa. A modularidade de solução proposta permite a adição de agentes em representação de novas atividades e a possibilidade de correr em smartphone.

Já se referiu que o e-learning é outro domínio de aplicação em que os sistemas de recomendação têm vindo a ser usados com frequência. Rodríguez et al. (2015), apresentam um sistema de recomendação multiagente para recomendar objetos de aprendizagem. A solução proposta assenta numa abordagem híbrida, em que as recomendações são geradas por agentes, cada um deles implementando um tipo de abordagem: filtragem colaborativa, baseada em conteúdo e baseado em conhecimento. As recomendações geradas, em paralelo, por cada um desses agentes são processadas por um agente de recomendação, que entrega ao estudante o objeto de aprendizagem mais adequado. A aprendizagem ubíqua (u-learning) permite a aprendizagem aconteça em qualquer momento e em qualquer lugar, recorrendo a dispositivos móveis e aos serviços disponibilizados pelas redes de comunicação. Salazar et al. (2015), propõem um sistema multiagente de recomendação que providencia: (i) o planeamento de atividades baseada em contexto; (ii) o acesso a atividade de aprendizagem colaborativa; (iii) a avaliação personalizada do curso; (iv) a pesquisa e seleção de objetos de aprendizagem, de acordo com o perfil do estudante; e (v) a pesquisa de tutores por temática de estudo.

A área dos mercados financeiros é outra área de aplicação dos sistemas de recomendação multiagente. Taghavi et al. (2013), propõem um sistema de recomendação multiagente, que combina de uma forma inovadora algoritmos de filtragem colaborativa e baseada em conteúdo, para recomendar as ações mais lucrativas, de acordo com os interesses do investidor.

A área da gestão de energia é também uma área de vasta aplicação dos sistemas multiagente. Pinto, T. et al. (2019), propõem um sistema de recomendação multiagente para gestão inteligente da energia em edifícios. Na abordagem proposta, o sistema recomenda a redução de energia que deve ser aplicada num dado momento, tendo por base casos similares passados. A complexidade do problema é a razão apontada para o recurso aos sistemas multiagente.

Para além das soluções desenvolvidas para domínios de aplicação específicos, como é o caso dos anteriormente referidos, a pesquisa efetuada permitiu identificar muitos outros trabalhos de investigação que propõe sistemas de recomendação multiagente de uso mais genérico, pelo que se apresentam alguns desses trabalhos. Birukov et al. (2005) propõem uma Sistema

de recomendação, em que agentes que representam os utilizadores no sistema usam técnicas de mineração de dados para recomendar páginas Web, a partir de informação relacionada com o comportamento dos utilizadores.

Argumentando que os sistemas de recomendação careciam de iniciativa, inteligência e auto adaptação, Huang et al.(2008) desenvolveram um sistema de recomendação multiagente para recomendar informação personalizada aos utilizadores, com base em informação obtida de forma explícita, a partir do feedback obtido dos utilizador, e de forma implícita, decorrente do comportamento dos utilizadores.

No seu trabalho de investigação, Morais (2009) e Morais et al. (2012) propõem um Sistema de recomendação multiagente, em que agentes de recomendação, implementando diferentes algoritmos, competem entre si para apresentar o conjunto de recomendações mais adequado aos visitantes de um sítio Web. Os testes realizados em modo de simulação foram posteriormente confirmados através de testes em tempo real (Neto & Morais, 2014).

O aparecimento e crescente utilização das redes sociais levou à utilização de sistemas de recomendação para recomendar aos utilizadores informação útil, mas também informação que muitas vezes lhes é de pouco interesse. Para aliviar os utilizadores dessa sobrecarga de informação, Moin et al. (2014) propõem um sistema multiagente para gerar recomendações a partir dos interesses do círculo de amigos do utilizador.

A revisão de literatura realizada permitiu concluir que, na sua maioria, as soluções multiagente seguem abordagens colaborativas, no entanto, é também significativa a presença de abordagens híbridas, o que não surpreende dadas as características típicas dos sistemas multiagente. Merece também destaque a modularidade dos sistemas proporcionada pela arquitetura distribuída dos sistemas multiagente, o que potencia o seu uso no âmbito da IoT.

6 INTERNET OF THINGS

O termo *Internet of Things* (IoT) foi pela primeira vez usado em 1999, por Kevin Ashton, numa apresentação sobre a utilização da tecnologia RFID na *Procter & Gamble* (Ashton,

2009). Desde esse primeiro uso do termo IoT, várias têm sido as definições propostas por diferentes autores.

Atzori et al. (2010) referem-se à IoT como um novo paradigma que tem como base a ideia de que estamos rodeados de uma variedade de objetos físicos, *tags* RFID, sensores, atuadores, *smartphones*, *wearables*, etc., capazes de interagir uns com os outros, podendo cooperar entre si com o propósito de atingir objetivos comuns.

Uma outra definição é a apresentada por Sri et al. (2016), onde se referem à IoT como uma confluência de redes wireless, internet e computação, que assegura a interligação de objetos físicos, sejam veículos, edifícios ou outros dispositivos, que ao incorporarem sensores e atuadores inteligentes, permitem que esses objetos recolham e troquem informação, desse modo ajudando na comunicação entre pessoas, entre pessoas e as coisas e entre estas.

O trabalho de investigação a desenvolver no âmbito desta tese enquadra-se no âmbito de qualquer das definições referidas, na medida em que o estudo a desenvolver se apoia em dados que resultam da capacidade da IoT para assegurar a interligação de objetos físicos instalados ou localizados em edifícios, sejam sensores, displays ou smartphones, de modo a que as pessoas que ocupam o edifício tenham acesso a informação em tempo real acerca dos percursos de evacuação mais eficientes.

Não estando no âmbito deste estudo elaborar o estado da arte da *Internet Of Things*, importa aqui referir os estados da arte desenvolvidos por Atzori et al. (2010), Sri et al. (2016) e Laghari et al. (2021). Os trabalhos referidos dão perspetiva da evolução do estado da arte da IoT ao longo de pouco mais de uma década, em áreas como: (i) a arquitetura da IoT, que Laghari et al. (2021) consideram ainda merecer aprofundamento no sentido de ser possível definir um standard aceite por todos os tipos de aplicação; (ii) a segurança e privacidade dos dados; (iii) as tecnologias de suporte, que Laghari et al. (2021) consideram também ser uma área de investigação em aberto, designadamente no que se refere melhoria da fiabilidade dos seniores e das comunicações, de modo a assegurar a sua utilização em domínios de aplicação mais críticos. Uma outra área que Laghari et al. (2021) consideram merecer atenção e aprofundamento por parte dos investigadores, refere-se à necessidade de considerar nas aplicações IoT a qualidade da experiência (*QoE – Quality of Experience*) dos utilizadores, de

modo a que as aplicações e os serviços disponibilizados estejam alinhados com as efetivas necessidades dos utilizadores.

Considerando o âmbito deste tese apresentam-se na secção seguinte um conjunto de trabalhos de investigação que suportam as aplicações IoT propostas em sistemas de recomendação.

7 SISTEMAS DE RECOMENDAÇÃO NO ÂMBITO DA IOT

Como refere Forestiero (2017), as interações e relações entre pessoas e coisas no âmbito da IoT carecem de abordagens de recomendação adequadas e eficientes no sentido de melhor servir os utilizadores, pelo que a sugestão ou recomendação de coisas nesse tipo de ambientes é um serviço importante em domínios como, por exemplo, os cuidados de saúde, as *smart cities* ou os *smart spaces*. Para Yao et al. (2014) a recomendação de coisas é um passo importante no sentido de aproveitar a IoT em benefício das pessoas e da sociedade, proporcionando coisas de interesse aos utilizadores. Referem-se de seguida alguns trabalhos que propõem sistemas de recomendação no âmbito da IoT, designadamente suportados em sistemas multiagente.

Um desses trabalhos é o desenvolvido por Salman et al. (2015), que propõem um sistema de recomendação proativo, baseado em redes neuronais, para fazer recomendações a utilizadores no âmbito da IoT. Como aspetos inovadores os autores referem a proatividade, conseguida através da determinação do contexto do utilizador, e a recomendação de múltiplos tipos de itens (postos de gasolina, restaurantes e pontos turísticos).

Um outro trabalho é o apresentado por Twardowski e Ryzko (2015), no qual propõem uma solução de recomendação, assente num sistema multiagente e baseada em informação contextual suportada na IoT, para gerar recomendações personalizadas em dispositivos móveis.

A sinalização digital (*Digital Signage - DS*) é uma tecnologia usada no âmbito da IoT, particularmente em espaços exteriores públicos, que permite fornecer informações urbanas e de orientação aos moradores de uma cidade. Considerando que, na maioria dos casos, esses

sistemas de sinalização não incorporam um mecanismo de recomendação que considere o contexto, nem têm em consideração a interatividade, Tu et al. (2016) apresentam um sistema de recomendação baseado em contexto para ultrapassar essa limitação.

Aproveitando as funcionalidades que advêm da *IoT*, Di Martino e Rossi (2016) propõem uma arquitetura para um sistema de recomendação multiagente para mobilidade em *smart cities*. A arquitetura baseia-se numa solução multimodal, em que um utilizador inicia o percurso na sua viatura, mas pode estacionar num parque e fazer o resto do percurso em transporte público. A inclusão do estacionamento no sistema de recomendação é um dos principais contributos, dada a pouca investigação na área. A opção por uma solução multiagente deve-se, segundo os autores, à sua modularidade e adequação a abordagens distribuídas.

Para suportar um sistema de recomendação em tempo real baseado em contexto, Cha et al. (2017) propõe uma plataforma *IoT*, que se suporta nos dados recolhidos pelos *smartphones* para recomendar novos itens a um utilizador, usando georreferenciação para determinar a sua localização e, conseqüentemente, o contexto em que aquele se insere. Essa localização pode ser obtida de duas formas: usando a *Google Location API*, a partir da qual é possível identificar pontos de interesse num determinado raio de ação (usada no exterior dos edifícios); ou recorrendo a dispositivos *IoT*, cujo raio de ação é definido pelo raio de cobertura de sinal desse dispositivo, por exemplo um sinal *Bluetooth*.

Um outro trabalho é o apresentado por Forouzandeh et al. (2017), no qual propõem um sistema cujo propósito é a recomendação de coisas aos utilizadores, a partir da similaridade entre utilizadores e com base nas relações entre utilizadores, objetos e serviços.

No seu *survey* Altulyan et al. (2020) fazem uma revisão de literatura sobre os sistemas de recomendação para a *IoT*, apresentando os trabalhos que consideram mais relevantes, em áreas como as *smart homes*, *smart health*, estacionamento de automóveis ou o turismo. Os autores referem no seu trabalho que o uso das abordagens tradicionais para gerar as recomendações, que têm em conta apenas o par item-utilizador, tendem a ser ineficientes quando se trata de sistemas de recomendação para a *IoT*, sendo necessário mais informação contextual. No seu trabalho de investigação, os autores propõem também uma

framework que para além de permitir comparar os estudos existentes, pretende ser uma ferramenta de apoio ao desenvolvimento de novos projetos de investigação.

8 ONTOLOGIAS

Na área da computação e ciência de informação o termo ontologia refere-se a um artefacto concebido para modelar o conhecimento sobre um domínio, seja ele real ou imaginário (Gruber, 2009). O termo foi desde cedo adotado pela comunidade de investigadores da área da Inteligência Artificial, passando nos anos 80 a ser usado para referir uma teoria de um mundo modelado ou um componente de sistemas de conhecimento (Gruber, 2009).

No entanto, como denotam Noy e McGuinness (2001), na literatura sobre AI é possível constatar múltiplas e contraditórias definições. Num seu artigo largamente citado, Gruber (1995) define ontologia no contexto da AI como uma especificação explícita de uma conceptualização, em que objetos, conceitos ou outras entidades, bem como as relações que existem entre eles, são usados para representar conhecimento dentro de um domínio.

Como referem Pinto e Martins (2004), as ontologias proporcionam um entendimento comum e partilhado de um domínio, que pode ser comunicado entre pessoas e sistemas heterogéneos, sendo constituídas por um conjunto de termos representando conceitos (hierarquicamente organizados) e alguma especificação de seu significado. As ontologias são ainda promotoras e facilitadoras da interoperabilidade entre sistemas de informação, do processamento inteligente por agentes, ou na partilha e reutilização de conhecimento entre sistemas.

Assim, em face das potencialidades proporcionadas pelas ontologias, e considerando o âmbito do trabalho de investigação proposto nesta tese, o desenvolvimento de uma ontologia não só possibilita um melhor conhecimento da área da evacuação de edifícios em situação de incêndio, como também permite construir o modelo ontológico para suportar o sistema multiagente de recomendação que nos propusemos desenvolver e estudar. Nas secções seguintes faz-se um resumo teórico sobre o desenvolvimento de ontologias e a sua avaliação.

8.1 DESENVOLVIMENTO DE ONTOLOGIAS

De acordo com Pinto e Martins (2004) e Noy e McGuinness (2001), no ciclo de vida do desenvolvimento de uma ontologia, podem identificar-se cinco fases:

- Uma primeira fase de especificação, durante a qual é fundamental identificar o objetivo e o âmbito da ontologia. Nesta fase de especificação é essencial encontrar respostas a questões como: Qual o domínio a cobrir pela ontologia? Porque se pretende construir a ontologia? Que tipo de respostas a ontologia deverá dar? Quais são os usos pretendidos? Quem a irá usar e manter?
- Definidos o objetivo e o âmbito da ontologia, segue-se a fase de conceptualização, onde se descreve, através de modelo conceptual, a ontologia a ser construída, para que ela atenda à especificação encontrada na fase anterior. Consiste em conceitos no domínio e relações entre esses conceitos.
- A formalização é a terceira etapa do ciclo de vida do desenvolvimento de uma ontologia, em que se procede à transformação da descrição conceptual num modelo formal. Nesta fase, os conceitos criados na fase de conceptualização são definidos através de axiomas que restringem as possíveis interpretações para o seu significado.
- A quarta fase é a da implementação da ontologia previamente formalizada, numa linguagem de representação de conhecimento.
- A última etapa é dedicada à manutenção, durante a qual é fundamental atualizar e corrigir a ontologia implementada.

Ainda de acordo com Fernández-López et al. (1997) e Pinto e Martins (2004), outras três atividades também devem ser consideradas durante todo o ciclo de vida:

- Aquisição de conhecimento: Aquisição de conhecimento sobre o domínio seja recorrendo a técnicas de eliciação, auscultação de especialistas ou consulta a bibliografia relevante.
- Avaliação: Apreciação técnica da qualidade da ontologia recorrendo a ferramentas de avaliação automática já disponíveis na Web.

- Documentação: Registo do que vai sendo feito, designadamente através da anotação e descrição dos termos representados na ontologia, de modo a tornar mais clara a sua compreensão, bem como para facilitar a manutenção e a sua reutilização futura.

Ainda que não esteja no âmbito desta tese o estudo comparativo das diferentes metodologias usadas no desenvolvimento de ontologias, cita-se, relativamente a esta matéria, Pinto e Martins (2004) que consideram as metodologias TOVE (Grüninger & Fox, 1995), ENTERPRISE (Uschold & King, 1995) and METHONTOLOGY (Fernández-López et al., 1997) como as mais representativas e, ainda, Noy e McGuinness (2001), que referem a metodologia “Ontology Development 101”.

8.2 AVALIAÇÃO DE ONTOLOGIAS

De acordo com Gómez-Pérez et al. (2004) a avaliação de uma ontologia pode considerar-se um juízo técnico do seu conteúdo relativamente a um referencial e deve ocorrer durante todo o ciclo de desenvolvimento. Esse referencial é corporizado pelas questões de competência e pelo conjunto de requisitos obtidos na fase de especificação.

Para Gomez-Perez (1995) devem considerar-se duas vertentes de avaliação: uma vertente em que se faz um juízo técnico das suas características, que o autor designa de “evaluation”; e uma vertente que se ocupa dos aspetos relacionados com a usabilidade e utilidade do modelo de conhecimento representado pela ontologia, a que o autor associa o termo inglês “assessment”.

Como referimos em (Neto et al., 2022a), a vertente técnica de avaliação de uma ontologia, foca-se nos aspetos relacionados com a sua estrutura e arquitetura. Nessa avaliação deve ter-se em consideração a validação sintática das classes e propriedades, bem como aspetos relacionados com a sua documentação, de modo a assegurar uma efetiva compreensão do modelo de conhecimento que se pretende representar. No mesmo artigo são referidas

algumas ferramentas Web, como a *Ontology Improvement Tool (V2)*⁵, que disponibiliza um conjunto de aplicações para validação e apoio na melhoria de ontologias, designadamente no que respeita à validação sintática, através do *RDF Triple-Checker*⁶, e à consistência da ontologia, através da aplicação *OOps!* (Poveda-Villalón et al., 2014). Um outro serviço disponibilizado é o *Vapour*, que permite verificar se os dados semânticos da web estão corretamente publicados e seguem as melhores práticas⁷⁸.

A ferramenta WIDOCO⁹ (Garijo, 2017), também referenciada em Neto et al. (2022a), para além produzir um conjunto de páginas web, para uma adequada e completa documentação da ontologia, permite identificar metadados em falta, integrando outras ferramentas como é o caso da *OOps!*, para validação da ontologia, do *LODE*¹⁰, para documentação dos termos e propriedades da ontologia e da ferramenta de visualização *WebVowl*¹¹.

Como referimos em Neto et al. (2022a), uma segunda vertente de avaliação foca-se na conformidade da ontologia face a um referencial, que é corporizado pelos requisitos de especificação e pelas questões de competência, devendo estas serem passíveis de ser respondidas pela ontologia. Trata-se de uma dimensão de análise em que se avalia se as classes, propriedades e axiomas são capazes de responder às questões de competência e à especificação de requisitos que estiveram na génese da criação e desenvolvimento da ontologia. A linguagem de interrogação SPARQL¹² é muito usada para validar se uma ontologia é capaz de responder às questões de competência e cumpre os requisitos que estiveram na sua origem.

⁵ <http://perfectsemanticweb.appspot.com/?p=ontologyValidation>, acedido em 07/01/2021

⁶ <http://graphite.ecs.soton.ac.uk/checker/>, acedido em 07/01/2021

⁷ <https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html/>, acedido em 07/01/2021

⁸ <https://www.w3.org/TR/cooluris/>, acedido em 07/01/2021 <https://www.w3.org/TR/cooluris/>

⁹ <http://dgarijo.github.io/Widoco>, acedido em 30/4/2022

¹⁰ <https://essepuntato.it/lode>, acedido em 30/4/2022

¹¹ <http://vowl.visualdataweb.org/webvowl.html>, acedido em 30/4/2022

¹² <https://www.w3.org/TR/sparql11-query>, acedido em 18/6/2022

8.3 USO DE ONTOLOGIAS NA ÁREA DA EMERGÊNCIA

Na revisão de literatura realizada encontramos muitos trabalhos de investigação que propõem ontologias para representar o conhecimento na área das emergências, pelo que vamos realçar aqui alguns desses trabalhos, particularmente os que abordam a problemática da evacuação de edifícios em caso de incêndio.

A ontologia *SEMA4A (Simple Emergency Alerts 4 [for] All)* (Malizia et al., 2010), pretende contribuir com uma base de conhecimento para suportar a partilha de informação e a interoperabilidade entre sistemas, entre pessoas e entre sistemas e pessoas, em situações de emergência, de modo a assegurar que as pessoas são informadas e notificadas de modo que possam agir de uma forma que os danos decorrentes do desastre sejam minimizados. A ontologia disponibiliza conhecimento segundo três domínios: diretrizes de acessibilidade, emergências e tecnologias de comunicação.

Mais tarde, a partir da ontologia *SEMA4A* e tendo como âmbito a notificação das pessoas afetadas pela emergência sobre os lugares seguros e os percursos de evacuação adotar, Onorati et al. (2014) apresentam uma extensão da ontologia *SEMA4A*, acrescentando assim um quarto domínio relacionado com a evacuação.

No seu artigo, G. Liu et al. (2011) apresentam uma ontologia que define conceitos sobre o controlo de incêndios, e a relação entre esses conceitos, segundo a perspetiva da comunidade, definindo como os membros de uma comunidade se articulam para controlar um incêndio.

Com o propósito de suportar o desenvolvimento de aplicações inteligentes de resposta a emergências (*intelligent emergency response applications*), que têm de ser capazes de interpretar e filtrar a informação relevante de um conjunto alargado de dados heterogéneos, Hristoskova et al. (2013) apresentam no seu trabalho uma ontologia que designam por *Emergency Response Ontology*.

A gestão de emergências é mais desafiante em situações de crises internacionais, tendo em consideração as diferenças culturais, linguísticas e de semântica entre os atores envolvidos,

muito particularmente no que diz respeito àqueles que têm de responder logo na primeira fase do incidente. Estas dificuldades que advêm da multiculturalidade não têm sido resolvidas pelos sistemas de gestão de emergência. Procurando ultrapassar esses problemas, Casado et al. (2015), desenvolveram a ontologia EMERGEL (EMERGENCY ELEMENTS), que congrega num único e flexível modelo de dados o conhecimento dos diversos parceiros envolvidos, tendo em conta as diferenças culturais e linguísticas. A ontologia EMERGEL em conjunto com a arquitetura de software DISASTER (*Data Interoperability Solution At Stakeholders Emergency Reaction*) fornecem um mecanismo que permite a interoperabilidade entre diferentes sistemas de gestão de emergência, durante um cenário de crise.

A ontologia EmergencyFire (Bitencourt et al., 2018), tem como âmbito a partilha de conhecimento no domínio dos protocolos de resposta a emergências de incêndio em edifícios, de modo a contribuir para o planeamento tático e estratégico nas respostas das organizações a situações de emergência de incêndio em edifícios.

8.4 ONTOLOGIAS IOT

Como já se referiu anteriormente, é conhecida a heterogeneidade dos dados produzidos por dispositivos IoT, como é o caso dos sensores e atuadores, bem como dos sistemas de deteção de incêndio já existentes nos edifícios, os quais são uma fonte de informação essencial no que respeita ao desenvolvimento do incêndio. Essa heterogeneidade cria problemas de interoperabilidade, restringido a possibilidade de reutilização de dados para o desenvolvimento de novas aplicações (Bajaj et al., 2017).

Para ultrapassar esses problemas de interoperabilidade, várias ontologias têm sido propostas para lidar com diferentes aspetos relacionados com a recolha e interpretação dos dados produzidos por dispositivos IoT.

Bajaj et al. (2017) fazem uma revisão das ontologias existentes no âmbito da IoT, fornecendo uma visão geral dos desenvolvimentos recentes. Um outro trabalho muito interessante é o

apresentado por Gyrard et al. (2016), que propõem a *framework Machine-to-Machine Measurement (M3)*¹³, disponível online, que permite o desenvolvimento de aplicações IoT, designadamente através da reutilização de ontologias existentes. No seu artigo, Gyrard et al. (2016) realçam o trabalho de referenciação e classificação de projetos IoT baseados em ontologia, criando o catálogo *LOV4IoT (Linked Open Vocabularies for Internet of Things)*¹⁴, no qual constam, à data de 30/04/2022, 802¹⁵ projetos de investigação baseados em ontologias para a IoT.

9 RESUMO DO CAPÍTULO

Ao longo deste capítulo, fruto de uma revisão sistemática da literatura, apresentou-se o estado da arte nas diferentes áreas de investigação que constituem a base teórica do estudo objeto da presente tese. Como decorre do que se expôs ao longo do capítulo, foi possível consolidar o conhecimento em áreas como a evacuação de edifícios em caso de incêndio e os sistemas de recomendação multiagente. No caso da evacuação de edifícios em caso de incêndio, identificou-se a necessidade de procurar soluções capazes de melhorar a eficiência da evacuação de edifícios em caso de incêndio. Quanto aos sistemas de recomendação multiagente, o estudo desenvolvido permitiu identificar as suas potencialidades e características, que têm justificado a sua adoção nos mais variados domínios de aplicação.

¹³ <http://sensormeasurement.appspot.com/>

¹⁴ <http://lov4iot.appspot.com>, acedido em 30/04/2022

¹⁵ <http://lov4iot.appspot.com/?p=ontologies>, acedido em 30/04/2022

III PLATAFORMA WEB DE SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS

1 INTRODUÇÃO

Como se pode observar na Figura I.2, a terceira atividade da metodologia DSR consiste no desenvolvimento do artefacto, tendo por base o conhecimento adquirido e os objetivos que se pretendem alcançar com o estudo. Neste capítulo apresenta-se a plataforma Web de simulação de evacuação de edifícios, desenvolvida para testar o artefacto principal desta tese, que será apresentado no capítulo 0.

Como já se fez referência, Coelho e Neto (2020) apresentam um modelo para análise das condições de segurança de incêndio em edifícios, que, para além de prever a representação de um edifício, tem em conta todos os fatores impactantes na segurança de incêndio, ao integrar diferentes modelos de simulação: i) desenvolvimento e propagação do incêndio; (ii) evacuação dos edifícios; (iii) desempenho dos meios passivos; (iv) desempenho dos meios ativos de SI; (v) eficácia da intervenção dos bombeiros.

A partir desse modelo, desenvolveu-se uma plataforma **Web de Simulação para Análise das Condições de Segurança de Incêndio em Edifícios (WebSimACSIE)**, cuja arquitetura global se apresenta na Figura III.1.

A plataforma WebSimACSIE é constituída por dois subsistemas: uma aplicação Web, para a representação física, e geométrica do edifício e um sistema multiagente para simulação de evacuação de um edifício sujeito a um incêndio. Os dois subsistemas interagem entre si através de serviços Web.

A plataforma Web foi desenvolvida de modo a poder interagir com sistemas externos, como é o caso do sistema de recomendação objeto desta tese.

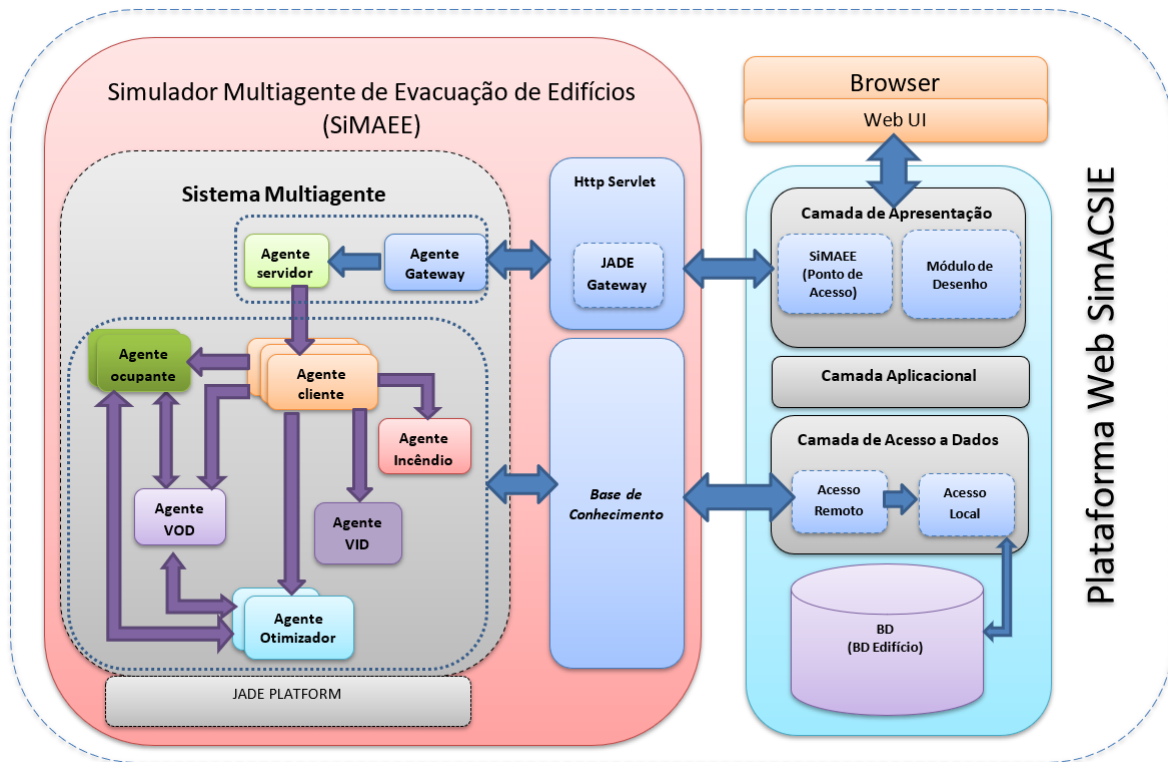


Figura III.1 Arquitetura global da plataforma Web de Simulação para Análise das Condições de Segurança de Incêndio em Edifícios (WebSimACSIE)

2 APLICAÇÃO WEB PARA REPRESENTAÇÃO DE UM EDIFÍCIO

A componente Web da plataforma implementa o modelo de representação geométrica e física de um edifício apresentado com detalhe na secção III-2.1, sendo por isso possível representar cada piso do edifício através de malhas elementares, bem como todos os elementos influenciadores da evacuação do edifício numa situação de incêndio, como é o caso de sensores e sinalética de emergência. Este subsistema incorpora toda a interface com o utilizador, seja para que possa ser realizada a representação do edifício, seja para todo o processo de simulação da evacuação.

2.1 REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA E FÍSICA DO EDIFÍCIO

Na sua comunicação, Coelho e Neto (2020) apresentam um Modelo para Análise das Condições de Segurança de Incêndio em Edifícios (MACSIE), que prevê o desenvolvimento

de um modelo de representação do edifício, o qual foi concretizado no âmbito desta tese. A sua descrição é apresentada, também, num artigo (Neto et al., 2023a) apresentado no *7th International Congress on Information and Communication Technology (ICICT2022)*. Porque se trata de um modelo que está na génese do grafo usado no protótipo desenvolvido, apresenta-se nesta secção o referido modelo de representação do edifício.

O modelo assenta numa matriz, em que as linhas e colunas resultam da decomposição das plantas dos pisos desse edifício em malhas elementares. Essas malhas têm a forma de quadriláteros, de dimensões a definir pelo utilizador. Na Figura III.3, exemplifica-se essa construção, apresentando-se decomposição em malhas elementares da planta esquemática da Figura III.2, tendo-se considerado 11 malhas, para a representação geométrica do piso. Adotando um referencial com a numeração idêntica à apresentada na Figura III.3, com o objetivo de proceder a uma representação matricial do edifício, uma malha genérica, posicionada na linha i e coluna j , será identificada por m_{ij} .

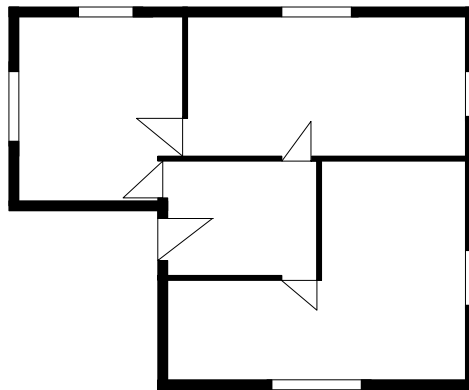


Figura III.2 Planta do piso de um edifício

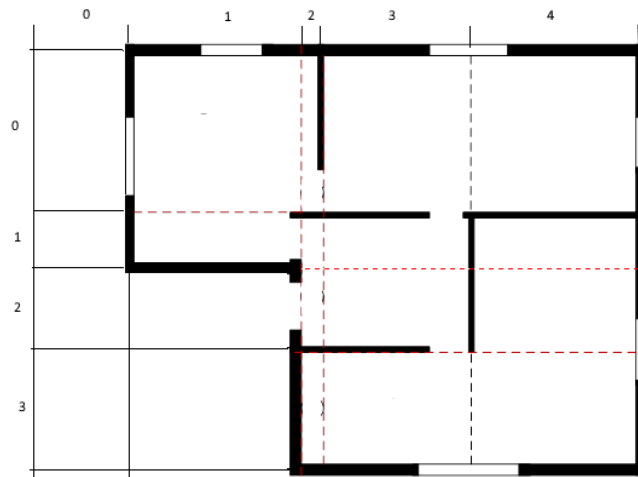


Figura III.3 Decomposição em malhas elementares

É a caracterização de cada um dos lados das malhas elementares que permite dar forma geométrica ao edifício. Assim, para cada um dos lados de cada malha é possível definir um dos três tipos seguintes: lado fictício, que significa inexistência de parede e por isso atravessável pelo ocupante; lado real interior, para representar as paredes interiores; e lado real exterior, para representação das paredes exteriores do edifício. Aos lados reais das malhas podem estar associadas janelas ou vãos. Na Figura III.4, exemplifica-se essa caracterização, recorrendo às malhas **m22** e **m23**.

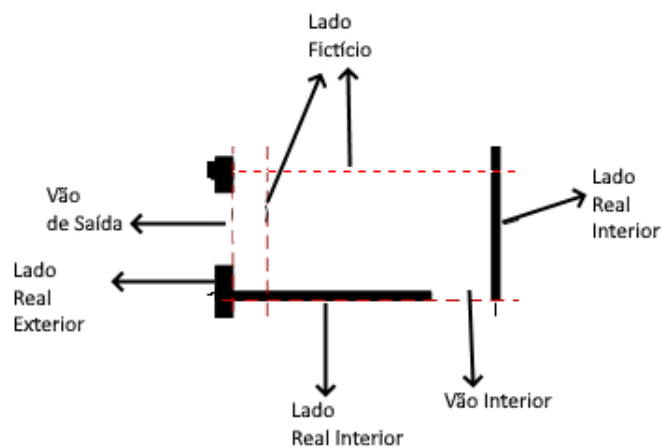


Figura III.4 Caracterização das malhas através dos seus lados

Após a transformação de cada espaço num conjunto de malhas elementares, o passo seguinte consiste na determinação dos possíveis percursos que os ocupantes podem percorrer. Para o

conseguir, transforma-se essa representação em malhas elementares. numa rede de nós, à qual se aplicará a teoria dos grafos.

A transformação da planta da Figura III.3 numa rede de nós, faz-se de modo que cada malha e cada vão sejam representados pelo seu centro, como se apresenta na Figura III.5. No interior do edifício, apenas são transformadas em nós, as malhas livres de obstáculos, isto é aquelas que são passíveis de ser percorridas pelos ocupantes. São também transformadas em nós, as malhas exteriores do edifício, adjacentes a vãos de saída, por serem malhas seguras que os ocupantes buscam no seu processo de evacuação do edifício, como é o caso da malha **m₂₁** na planta da Figura III.5.

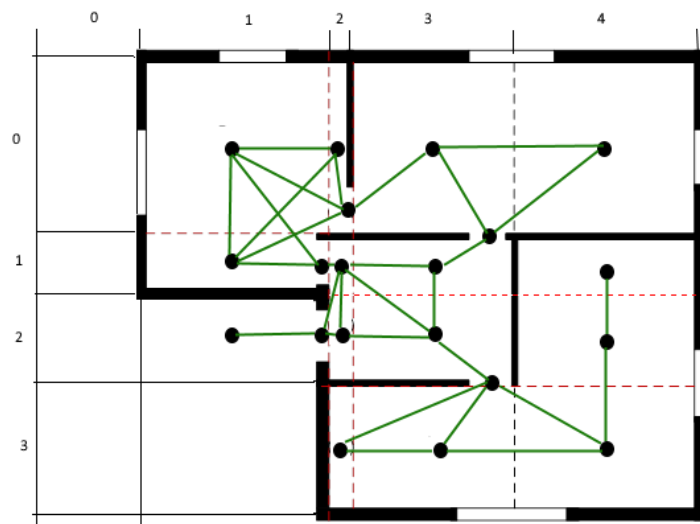


Figura III.5 Representação dos centros das malhas e vãos por nós e ligação dos nós adjacentes por meio de arestas

As arestas do grafo resultam da ligação entre nós, ou vértices, adjacentes e representam os percursos que os ocupantes podem percorrer. A distância entre os nós adjacentes é o peso de cada aresta, resultando assim num grafo ponderado, como o apresentado na Figura III.6, que na teoria dos grafos, são usados para a determinação do caminho mais curto entres dois nós, como é o caso do problema em abordagem no presente trabalho.

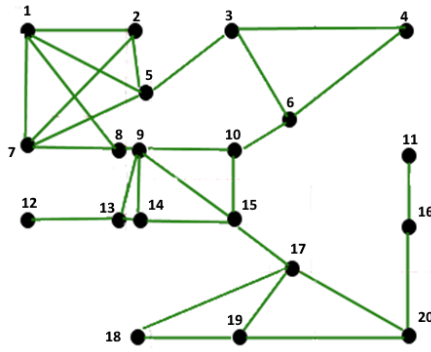


Figura III.6 Grafo representativo do piso do edifício com 20 vértices e 29 arestas

A Figura III.6 mostra uma representação gráfica do grafo, constituído por 20 vértices e 29 arestas. Como decorre do que já foi referido, o peso (w) de cada aresta é a distância (d_{ij}) entre os vértices adjacentes i e j .

2.2 REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO GRAFO

A representação computacional do grafo é feita recorrendo a estruturas de dados do tipo matriz, que no caso em estudo são duas: a matriz de adjacências e a matriz de distâncias (ou matriz de pesos), sendo ambas matrizes quadradas em que as linhas e colunas representam os vértices do grafo.

No caso da matriz de adjacências (MA), cada célula tomará o valor 1 ou 0 consoante os vértices respetivos são ou não adjacentes. Assim, sendo $ma(i,j)$ a célula i,j da matriz MA ter-se-á:

$$ma(i,j) = \begin{cases} 1 - & \text{se os vértices } i,j \text{ são adjacentes} \\ 0 - & \text{se os vértices } i,j \text{ não são adjacentes} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Relativamente à matriz de distâncias (MD), cada célula $md(i,j)$ tomará um valor de acordo com o seguinte:

$$md(i,j) = \begin{cases} d_{ij} - & \text{se os vértices } i,j \text{ são adjacentes} \\ \infty - & \text{se os vértices } i,j \text{ não são adjacentes} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

As matrizes MA e MD permitem assim definir o grafo G do ponto de vista computacional, pelo que podemos também escrever G na forma:

$$G = (MA; MD) \quad (III.3)$$

3 SIMULADOR MULTIAGENTE DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS

O outro subsistema desenvolvido na presente tese, é um sistema multiagente para simulação de evacuação de um edifício em caso de incêndio. Tendo-se desenvolvido, no âmbito desta tese, um modelo para simulação do movimento dos ocupantes, que foi descrito em artigo (Neto et al., 2023a) apresentado no *7th International Congress on Information and Communication Technology (ICICT2022)* e que aqui se descreve com detalhe.

3.1 MODELAÇÃO DO MOVIMENTO DOS OCUPANTES

Como já se referiu um edifício é representado por um grafo, que representa os espaços e vãos transitáveis, podendo os ocupantes movimentar-se ao longo dos nós e arestas desse grafo.

A modelação do movimento dos ocupantes tem por base o modelo CA , que considera que os ocupantes num determinado nó, podem prosseguir o movimento deslocando-se para qualquer um dos oito nós adjacente, respeitando o que é conhecido como vizinhança de Moore¹⁶, tal como se apresenta na Figura III.7.

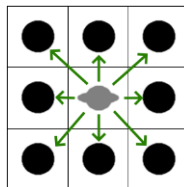


Figura III.7 Um ocupante no nó central pode deslocar-se para um qualquer dos oito nós adjacentes disponíveis

¹⁶ <https://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>, acedido em 7/6/2022

Num modelo CA tradicional cada célula tem a dimensão adequada para acolher um só ocupante, tipicamente 40cm x 40 cm, pelo que cada uma das células adjacentes está à distância de um passo.

No modelo de representação do edifício apresentado em III-2.1 os vértices (ou nós) do grafo representam as malhas elementares e os vãos, os quais têm dimensões variáveis, pelo que o número de ocupantes em cada um desses nós é proporcional às respetivas áreas. Ao não exigir que um edifício seja decomposto em malhas elementares de 40cm x 40 cm, o referido modelo de representação permite grafos de dimensão substancialmente inferior, o que tem vantagens ao nível de tempo de computação. Por outro lado, como os vértices do grafo são posicionados nos centros geométricos das malhas e dos vãos, a distância que o ocupante tem de percorrer para o nó adjacente é variável, pois depende da dimensão das malhas e da sua posição dentro da malha. Assim, o movimento do ocupante não se pode fazer de um nó do grafo ao nó seguinte de uma só vez, como se de um só passo se tratasse, pelo que o movimento entre os nós do grafo, isto é, o percurso ao longo das arestas, tem de ser modelado.

O modelo de simulação do movimento dos ocupantes desenvolvido apresenta duas fases. Numa primeira fase, o modelo considera o movimento dos ocupantes a um nível macroscópico, em que eles se movem de um nó para outro do grafo. Nesta análise macroscópica, em cada momento da simulação os ocupantes estão posicionados em nós, como se deslocassem em grupo de nó para nó. No entanto, como se pretende simular o movimento de cada ocupante entre os nós do grafo, ou seja, ao longo das suas arestas, considera-se uma segunda fase do movimento, mas agora a um nível microscópico, descrevendo-se nas secções seguintes esta dupla análise.

3.1.1 MOVIMENTO AO NÍVEL MACROSCÓPICO

O modelo proposto considera que os ocupantes de um edifício se movem de acordo com: (i) a sua familiaridade com o edifício; (ii) a existência ou não de sinalética de emergência. Conhecendo o edifício, o ocupante desloca-se para a saída seguindo pelo trajeto mais curto. Assim, como no modelo o edifício é representado por um grafo, pode usar-se a teoria dos grafos e recorrer a um dos algoritmos comumente usados para resolver o problema do

caminho mais curto, como é o caso do algoritmo de Floyd-Warshall, usado neste trabalho. Não conhecendo o edifício, o ocupante adota uma de duas estratégias: i) segue a sinalética de emergência instalada, caso exista; ii) na ausência de sinalização, que é comum em edifícios, o ocupante segue o seu caminho movendo-se a cada instante para o vão visível mais próximo. O fluxograma da Figura III.8 resume as estratégias passíveis de serem adotadas pelos ocupantes.

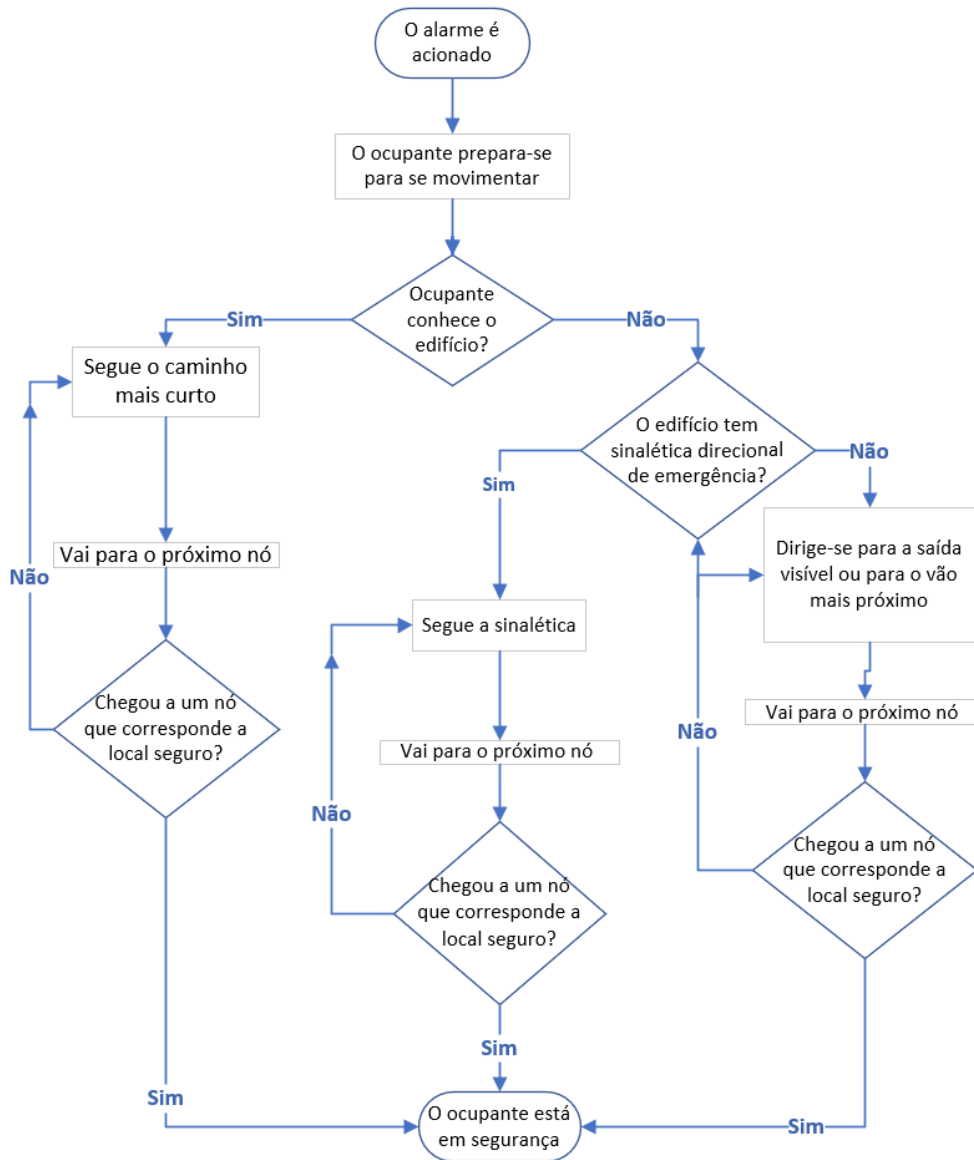


Figura III.8 Estratégia dos ocupantes para sair do edifício

Tendo por base a estratégia adotada, um ocupante posicionado num nó do grafo move-se para o nó adjacente correspondente. Assim, na fase macroscópica do modelo proposto o

ocupante escolhe em que sentido se movimenta. No entanto, como a distancia entre dois nós do grafo é mais do que um simples passo, considera-se de seguida uma análise microscópica, descrita na secção seguinte.

3.1.2 MOVIMENTO AO NÍVEL MICROSCÓPICO

De modo a simular o movimento ao nível microscópico ao longo do grafo, cada malha elementar é virtualmente dividida numa grelha, como se representa na Figura III.9. Cada grelha é constituída por $L \cdot C$ células de 40cm x 40 cm, onde:

$$L = \frac{lv}{0,4} \quad e \quad C = \frac{lh}{0,4} \quad (III.4)$$

lv – comprimento do lado vertical da malha

lh – comprimento do lado horizontal da malha

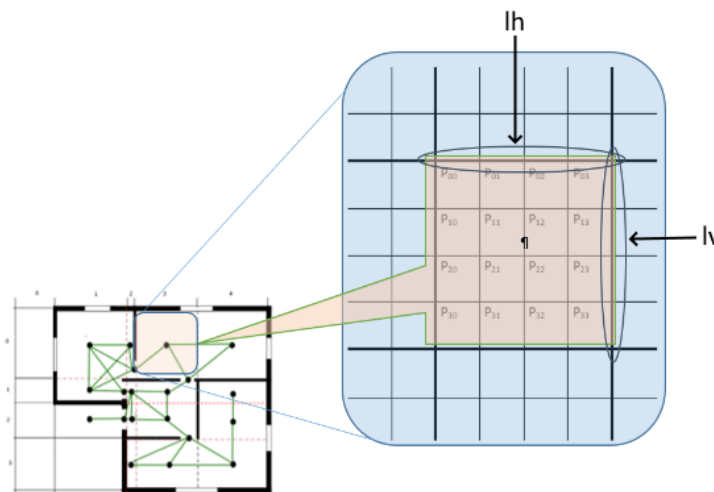


Figura III.9 Cada malha é virtualmente dividida numa grelha em que cada célula dessa grelha é ocupada por um ocupante durante o seu movimento

No modelo aqui proposto, um ocupante move-se para uma célula adjacente para prosseguir o seu percurso de evacuação. Assim, há que definir quais as células da grelha que fazem com que o ocupante passe para a malha (um nó do grafo) adjacente seguinte. Na Figura III.10 e na Figura III.11, apresentam-se o conjunto dessas células P_{ij} . Na Figura III.10, identificam-se as posições limite da malha quando o movimento do ocupante se processa para as malhas diagonais adjacentes, bem como as posições da nova malha passíveis de acolherem o

ocupante, se não ocupadas. Na Figura III.11 faz-se o mesmo, mas para as situações em que os ocupantes se movimentam na vertical ou na horizontal.

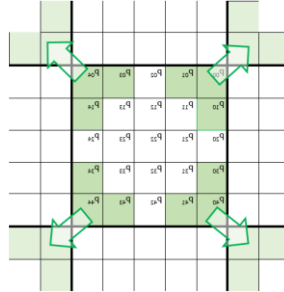


Figura III.10 Posições limite para movimentos dos ocupantes para as malhas diagonais adjacentes à malha onde se encontram

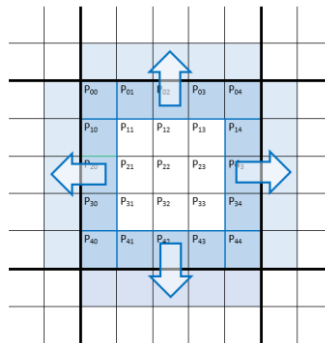


Figura III.11 Posções limite para movimentos dos ocupantes para as malhas diagonais adjacentes na vertical ou horizontal, relativamente àquela onde se encontram

Considerando que:

- G representa uma grelha com $L \times C$ células;
- P_{ij} representa uma célula genérica dessa grelha, onde $0 \leq i < L$ e $0 \leq j < C$;
- cada célula pode estar *VAZIA* ou *OCUPADA*;
- UL representa o movimento no sentido da diagonal esquerda superior;
- UR representa o movimento no sentido da diagonal direita superior;
- DL representa o movimento no sentido da diagonal esquerda inferior;
- DR representa o movimento no sentido da diagonal direita inferior;
- HL representa o movimento no sentido da horizontal esquerda;
- HR representa o movimento no sentido da horizontal direita;

- VU representa o movimento no sentido da vertical superior;
- VD representa o movimento no sentido da vertical inferior.

Então, considerando o ocupante O posicionado numa célula P_{ij} , do nó N_{ij} , o movimento de O no sentido do nó adjacente, faz-se como se exemplifica na Figura III.12, sentido da malha diagonal esquerda superior (UL).

```

O IS IN NODE  $N_{ij}$  POSITION  $P_{ij}$ 
CASE DIRECTION = UL:
  WHILE  $O$  NOT IN [ $P_{00}$  OR  $P_{01}$  OR  $P_{10}$ ]
    IF ( $P_{i-1,j-1}$  = EMPTY)  $O$  MOVES TO  $P_{i-1,j-1}$ 
    ELSE IF ( $P_{i,j-1}$  = EMPTY)  $O$  MOVES TO  $P_{i,j-1}$ 
    ELSE IF ( $P_{i-1,j}$  = EMPTY)  $O$  MOVES TO  $P_{i-1,j}$ 
    ELSE IF ( $P_{i-1,j+1}$  = EMPTY)  $O$  MOVES TO  $P_{i-1,j+1}$ 
    ELSE IF ( $P_{i+1,j-1}$  = EMPTY)  $O$  MOVES TO  $P_{i+1,j-1}$ 
    ELSE  $O$  STAY ON  $P_{ij}$ 
  END WHILE
  REPEAT
    IF ( $[P_{L-1,C-1}$  OR  $P_{L-1,C-2}$  OR  $P_{L-2,C-1}]$  OF NODE  $N_{i-1,j-1}$ )=EMPTY
       $O$  MOVES TO NODE  $N_{i-1,j-1}$ 
    ELSE  $O$  STAY ON NODE  $N_{ij}$ 
  UNTIL  $O$  IS IN NODE  $N_{i-1,j-1}$ 

```

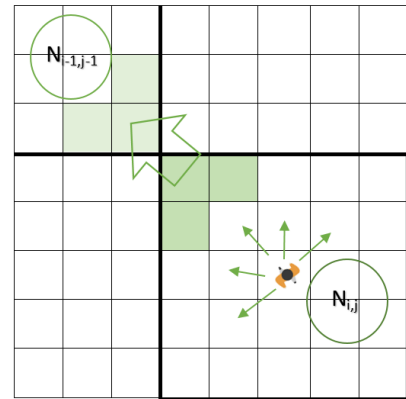


Figura III.12 Movimento de um ocupante no sentido da malha diagonal esquerda superior. Pseudocódigo e representação gráfica

Na Figura III.13 apresenta-se graficamente e em pseudocódigo o movimento de ocupante no sentido da malha vertical superior.

```

O IS IN NODE  $N_{ij}$  POSITION  $P_{ij}$ 
CASE DIRECTION = VU:
  WHILE  $O$  NOT IN [ $P_{0,0} \dots C-1$ ]
    IF ( $P_{i-1,j}$  = EMPTY)  $O$  MOVE TO  $P_{i-1,j}$ 
    ELSE IF ( $P_{i-1,j-1}$  = EMPTY)  $O$  MOVE TO  $P_{i-1,j-1}$ 
    ELSE IF ( $P_{i+1,j+1}$  = EMPTY)  $O$  MOVE TO  $P_{i+1,j+1}$ 
    ELSE IF ( $P_{i,j-1}$  = EMPTY)  $O$  MOVE TO  $P_{i,j-1}$ 
    ELSE IF ( $P_{i,j+1}$  = EMPTY)  $O$  MOVE TO  $P_{i,j+1}$ 
    ELSE  $O$  STAY ON  $P_{ij}$ 
  END WHILE
  REPEAT
    IF ( $[P_{L-1,0}$  OR ... OR  $P_{L-1,C-1}]$  OF NODE  $N_{i-1,j}$ )=EMPTY
       $O$  MOVES TO NODE  $N_{i-1,j}$ 
    ELSE  $O$  STAY ON NODE  $N_{ij}$ 
  UNTIL  $O$  IS IN NODE  $N_{i-1,j}$ 

```

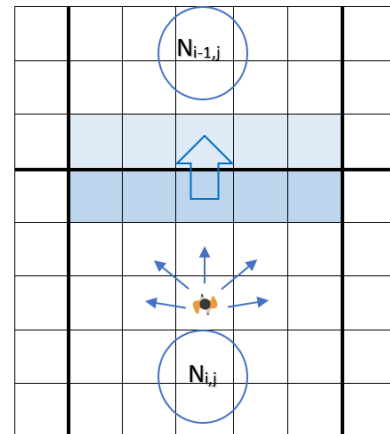


Figura III.13 Movimento de um ocupante no sentido da malha vertical superior Pseudocódigo e representação gráfica

3.2 MODELO SIMPLIFICADO DE PROPAGAÇÃO DO INCÊNDIO

O simulador multiagente de evacuação de edifício aqui proposto, prevê um agente para simular no edifício os efeitos da deflagração de um incêndio. A solução desenvolvida prevê a incorporação futura de dados de incêndio provenientes de simuladores que geralmente são usados pelos investigadores da área, como é, por exemplo, o caso do CFAST¹⁷, um simulador de incêndio para calcular a evolução e escoamento de fumo, gases e temperatura, pelos compartimentos de um edifício.

No entanto, considerou-se que a adoção de um modelo simplificado para simular os efeitos do incêndio pelos compartimentos e áreas de circulação do edifício era suficiente para alcançar os objetivos da presente tese¹⁸.

Assim, optou-se por desenvolver um modelo simplificado adaptado do proposto por J. Liu et al. (2016). Nesse modelo, em que o edifício é dividido em células de 1 m², os autores consideram que o incêndio pode deflagrar, de forma aleatória, numa dessas células e que se vai propagando de forma radial para as células adjacentes a uma velocidade constante. Uma determinada célula é considerada bloqueada, não transitável logo que seja atingida pelo incêndio.

No modelo simplificado que se desenvolveu e incorporou no simulador, considerou-se que o incêndio pode deflagrar em qualquer uma das malhas elementares consideradas no modelo de representação do edifício apresentado anteriormente. Tal como no modelo proposto por J. Liu et al. (2016), os efeitos do incêndio progridem para as malhas adjacentes. No entanto, como as dimensões das malhas são diferentes, essa progressão tem em conta a área de cada uma das malhas, bem como um outro fator, que denominámos por **nível de perigo**, que reflete o perigo para quem tem de transitar nesse local. Assim, só quando uma malha atinge um determinado nível de perigo é que este se propaga para as malhas adjacentes. O nível de perigo numa malha vai crescendo até atingir um valor que a torna intransitável e

¹⁷ [CFAST | NIST](#), acedido em 04/06/2022

¹⁸ Atese não é sobre o desenvolvimento e propagação de um incêndio no interior dos edifícios.

influenciando o perigo para as malhas adjacentes seguintes. O nível de perigo implementado no modelo considera o exposto na Tabela III.1 e resultou do trabalho de investigação resumido na secção IV3.4.2.2. Na Figura III.14 apresentam-se imagens da propagação de um incêndio em seis momentos diferentes.

Tabela III.1 Nível de perigo e efeitos no movimento dos ocupantes

Nível de Perigo		Efeitos no movimento dos ocupantes
0	Muito baixo ou nulo	A malha é transitável
1	Pretende refletir que a malha já está a ser atingida por fumo, mas com baixa densidade	Tem um impacto reduzido no movimento dos ocupantes. Uma pessoa nessa malha prosseguirá o seu percurso de evacuação através do fumo.
2	Reflete uma malha em que a densidade do fumo é notória, dificultando já a visibilidade	Quem se encontra na malha poderá prosseguir o seu percurso de evacuação através do fumo, dado que se trata ainda de limites suportáveis pelo ser humano. No entanto, sendo conhecedores de percursos alternativos, uma percentagem de ocupantes tenderá a equacionar percursos alternativos.
3	Reflete uma densidade do fumo elevada na malha e visibilidade reduzida, começando a sentir-se os efeitos da temperatura	Quem se encontra na malha só prosseguirá o seu percurso de evacuação através do fumo se tiver a clara perceção de que a saída está muito próxima, pois as condições só são suportáveis por períodos curtos, pelo que uma percentagem de ocupantes voltará para trás. Não estando na malha os ocupantes não arriscam entrar no fumo.
4	Numa malha com esta carga de incêndio a densidade do fumo é muito elevada e a visibilidade muito reduzida, e o calor é muito elevado e poderão já existir gases tóxicos. Reflete uma malha muito próxima da fonte de calor.	As malhas são intransitáveis pois as condições ambientais estão para além dos limites suportáveis pelas pessoas, pelo que as malhas não são passíveis de serem ocupadas.
5	Reflete uma área onde o incêndio está a deflagrar	

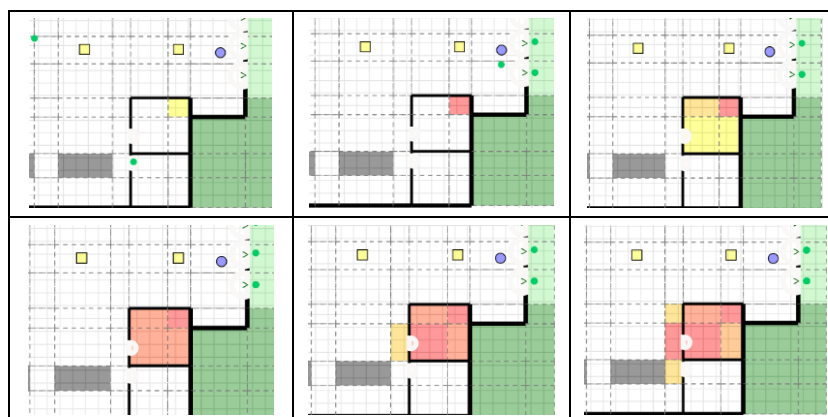


Figura III.14 Exemplo de propagação de um incêndio segundo o modelo de propagação proposto. As diferentes cores correspondem aos níveis de carga de incêndio que constam da Tabela III.1.

Já se referiu sumariamente como no modelo proposto se faz a propagação do incêndio através das malhas elementares, descrevendo-se de seguida esse modelo. Assim, considera-se que a cada malha elementar está associada uma grelha constituída por $L \cdot C$ células de 40cm x 40 cm, como se apresenta na Figura III.15, onde:

$$L = \frac{lv}{0,4} \quad e \quad C = \frac{lh}{0,4} \quad (III.5)$$

lv – comprimento do lado vertical da malha
 lh – comprimento do lado horizontal da malha

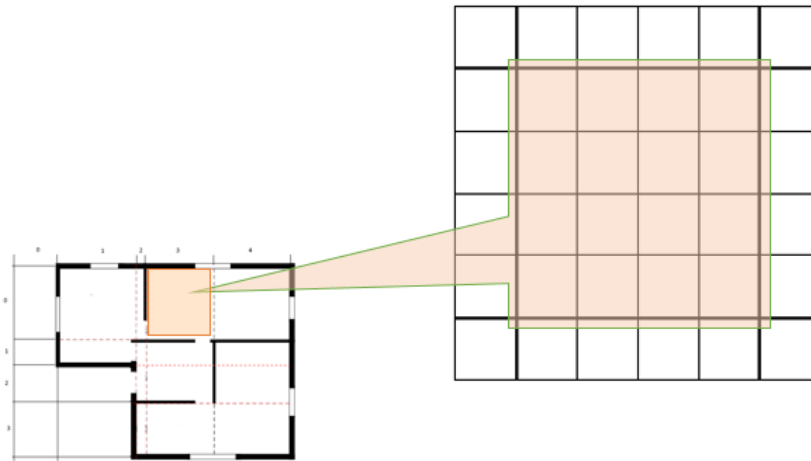


Figura III.15 Grelha associada a cada malha elementar

Cada grelha associada a uma malha elementar contém o nível de perigo na malha. Os valores das células da grelha iniciam-se a zero, indicando inexistência de fumo ou fogo na malha elementar.

Quando eclode o incêndio numa malha, cada célula vai progressivamente assumindo um valor de nível de perigo. Cada célula com nível de perigo 1, no instante t , propaga, no instante $t+1$, esse mesmo nível para as células adjacentes, até que todas elas atinjam o nível 1. Nesse momento considera-se que a malha elementar tem um nível de perigo 1. O processo repete-se, de modo que a malha elementar passe pelos diferentes níveis de perigo descritos na Tabela III.1 e representados na Figura III.16. Quando numa malha for atingido o nível de perigo 5, o incêndio propaga-se para as malhas adjacentes.

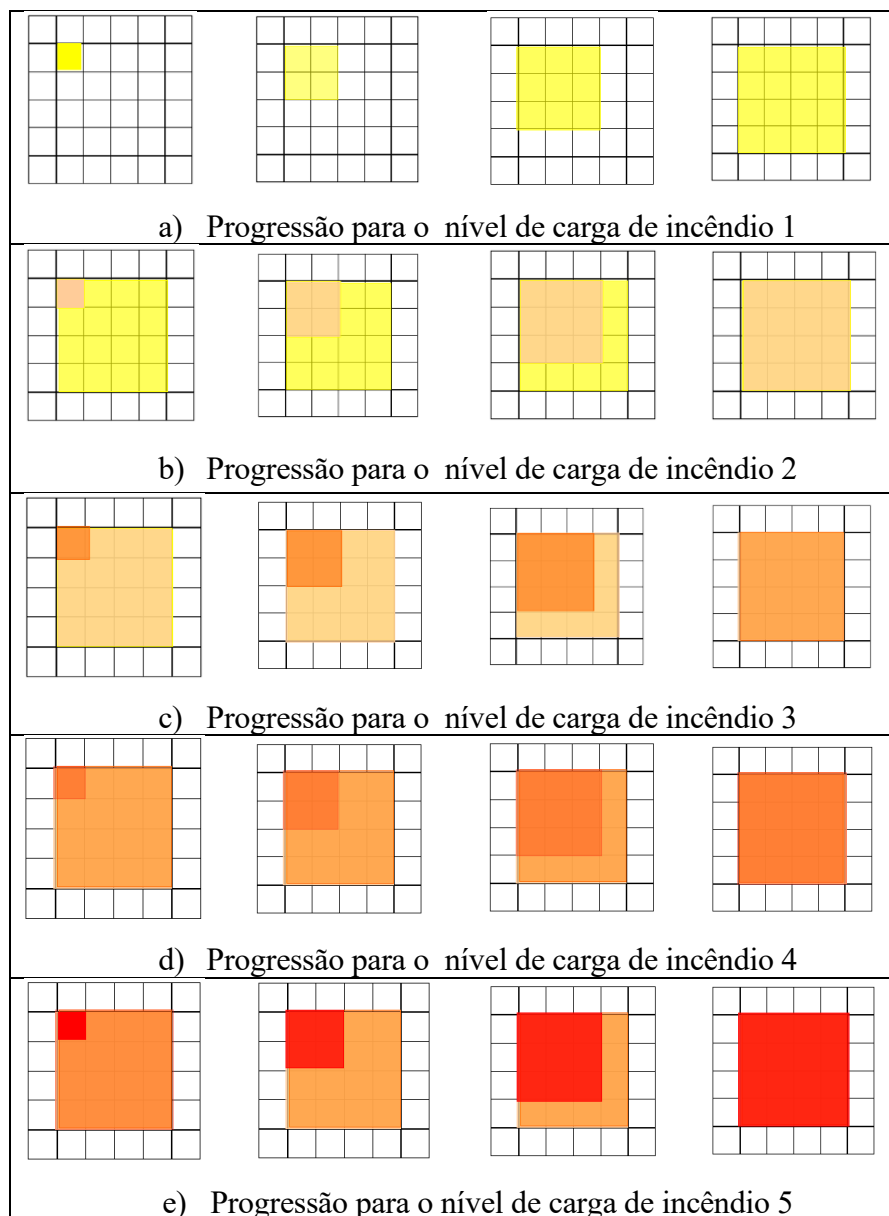


Figura III.16 Progressão do nível de carga de incêndio numa malha elementar

3.3 O SISTEMA MULTIAGENTE DE SUPORTE AO SIMULADOR

É comum o recurso aos sistemas multiagente para a simulação computacional de problemas reais, como é caso da temática da evacuação de edifícios em que se enquadra o presente trabalho de investigação.

Nesta secção descreve-se o **Simulador Multiagente de Evacuação de Edifícios (SiMAEE)**, o qual assenta num sistema multiagente desenvolvido com recurso à *framework JADE*.

Tendo por base a arquitetura global da plataforma Web de simulação apresentada na Figura III.1, na Figura III.17 pode observar-se a arquitetura do SiMAEE, descrevendo-se de seguida cada um dos seus componentes.



Figura III.17 Arquitetura do SiMAEE – Simulador Multiagente de Evacuação de Edifícios

Os agentes *Gateway* e *Servidor* asseguram a interligação com a componente Web da plataforma. É através destes dois agentes que o sistema multiagente recebe os parâmetros da simulação e disponibiliza os dados que permitem ao utilizador acompanhar a simulação. Sempre que um utilizador da plataforma executa uma simulação, o *agente servidor* cria um *agente cliente*, que representará o utilizador no sistema multiagente.

O *agente cliente* usa os parâmetros de simulação que recebe do *agente servidor*, designadamente: os dados do edifício que vai ser objeto de simulação, o número de ocupantes no edifício e a percentagem destes que conhece o edifício. Na posse destes

elementos, o *agente cliente* desencadeia o processo de simulação, executando as seguintes tarefas:

- cria o grafo representativo do edifício;
- cria do *agente Incêndio*, que recebe informação do grafo do edifício;
- cria os agentes que representam os dispositivos de segurança de incêndio instalados no edifício: *agente VOD* e *agente VID*;
- cria o *agente ocupante* que vai representar os ocupantes do edifício, os quais são posicionados no edifício pelo *agente Cliente*;
- cria o agente encarregue da simulação da propagação de incêndio no edifício: *agente Incêndio*;
- informa o utilizador sobre o progresso da simulação, através do agente *Gateway*.

O *agente ocupante* representa um ocupante do edifício durante a simulação. Este agente possui propriedades que permitem caracterizar o seu comportamento, designadamente quanto ao facto de os ocupantes estarem ou não familiarizados com o edifício, bem como no que respeita à sua mobilidade. No início da simulação, cada *agente ocupante* recebe do *agente cliente* a sua posição de partida no edifício. Iniciada a simulação, o ocupante movimenta-se de modo a sair do edifício, adotando uma das estratégias apresentadas na Figura III.8, que tem em conta os dois aspetos seguintes: i) familiaridade do ocupante com o edifício: ii) existência ou não de sinalética de emergência. No caso de conhecer o espaço, o ocupante prossegue o seu percurso para a saída seguindo o caminho mais curto. Como na plataforma de simulação o edifício é representado por um grafo, podemos socorrer-nos da teoria dos grafos e adotar um dos algoritmos comumente usados para a resolução do problema da determinação do caminho mais curto, como é o caso do algoritmo de Floyd-Warshall, pelo que o ocupante pede ao *agente incêndio* o próximo nó a que se deve dirigir. Não conhecendo o espaço, o ocupante adota uma de duas estratégias, dependendo da existência ou não de sinalética de emergência no edifício:

- i. segue a sinalética de emergência instalada no edifício, existindo esta. A sinalética é representada no sistema multiagente, pelos *agentes VOD*, pelo que o *agente ocupante* “vê” essa sinalética, interrogando esses agentes que estão no seu campo de visão.

- ii. na ausência de sinalética, comum em edifícios habitacionais, o ocupante prossegue o seu percurso, dirigindo-se a cada momento para o vão mais próximo do seu campo de visão. Para obter os vãos que estão no seu campo de visão, o **agente ocupante** recorre ao **agente Incêndio**.

O **agente incêndio** recebe o grafo do edifício do **agente cliente** e sobre esse grafo aplica o algoritmo de *Floyd-Warshall*, para determinação do caminho mais curto. Este agente responde a pedidos dos outros agentes, localizados num determinado nó do grafo, informando os caminhos mais curtos desse nó, até uma saída ou até um próximo ponto de decisão. No caso dos agentes ocupantes, o **agente incêndio** pode ser visto como uma forma de simular a “visão” do ocupante, como anteriormente referido.

Os **agentes VOD** e **VID** representam a componente física de segurança ao incêndio no sistema multiagente. A sinalética de emergência direcional do edifício é representada pelos **agentes VOD**, os quais respondem a pedidos dos **agentes ocupante**. Os **agentes VID** representam os dispositivos de deteção de incêndio e outro tipo de sensores.

O **agente Incêndio** representa o incêndio e a sua propagação ao longo das áreas transitáveis do edifício, de acordo com o modelo apresentado na secção III-3.2.

4 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentou-se a plataforma Web de simulação **WebSimACSIE**, descrevendo os seus diferentes componentes, bem como os modelos que a suportam. Numa primeira fase, procedeu-se ao desenvolvimento da componente Web da plataforma, que é sustentada num modelo de representação do edifício que permite que as suas áreas transitáveis e os seus compartimentos possam ser representadas por um grafo. Numa segunda etapa, desenvolveu-se o **SiMAEE**, um sistema multiagente para simular o movimento dos ocupantes durante o processo de evacuação de um edifício em caso de incêndio. Este simulador usa o grafo referido anteriormente e apoia-se num modelo de simulação do movimento dos ocupantes, desenvolvido no âmbito desta tese. Para simular a progressão dos efeitos do incêndio, desenvolveu-se também um modelo simplificado de propagação de incêndio.

**IV SISTEMA MULTIAGENTE DE RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS
DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO**

1 INTRODUÇÃO

Seguindo a metodologia DSR, procedeu-se, no âmbito das duas primeiras atividades, ao aprofundamento da base teórica de suporte à tese, bem como a definição dos objetivos e questões de investigação. Como decorre dos objetivos apresentados na secção I-3.1, há necessidade de desenvolver sistema multiagente de recomendação de percursos de evacuação, de modo a aprofundar o estudo na área da evacuação de edifícios em caso de incêndio, designadamente no âmbito da ajuda aos ocupantes a alcançar lugar seguro. Neste capítulo apresenta-se com detalhe o sistema desenvolvido.

Um dos fatores que pode contribuir para encontrar soluções mais adequadas e eficazes na evacuação de edifícios, refere-se ao aproveitamento das funcionalidades e facilidades proporcionadas pela crescente instalação de sensores e outros dispositivos IoT em edifícios, pelo facto de transformarem esses edifícios em espaços mais capazes de suportar a criação de serviços que beneficiem as pessoas e a sociedade. Essa transformação dos edifícios em espaços inteligentes, pode contribuir para o desenvolvimento de soluções capazes de, em tempo real, recomendar aos ocupantes dos edifícios os percursos de evacuação que permitam orientá-los até lugar seguro.

Como já foi referido, devido a fatores contextuais, pessoais e culturais, é difícil modelar com rigor o comportamento dos ocupantes em caso de incêndio, tornando-se ainda mais complexa essa modelação em fases mais adiantadas do desenvolvimento do incêndio. Assim, uma solução que seja capaz fornecer aos ocupantes, desde o início do incêndio, informação em tempo real relativa aos percursos mais adequados, pode contribuir para que o comportamento das pessoas se torne mais previsível, possibilitando desse modo reduzir o tempo de evacuação.

Em face da revisão de literatura exploratória realizada na fase de elaboração da proposta de tese, considerou-se que as áreas dos sistemas de recomendação e dos sistemas multiagente, conjugadas com a IoT, poderiam contribuir para encontrar uma solução inovadora capaz de gerar novo conhecimento. O aprofundamento do estudo teórico, sumarizado no capítulo II, permitiu consolidar e reforçar essa ideia inicial.

Assim, na Secção 2 do presente capítulo apresenta-se o modelo ontológico de suporte ao Sistema Multiagente de Recomendação, que se descreve com detalhe na Secção 3.

2 MODELO ONTOLÓGICO DE SUPORTE À RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO EM CASO DE INCÊNDIO

A evacuação de edifícios em caso de incêndio carece de soluções que possam ajudar os ocupantes, orientando-os no seu percurso até que fiquem em segurança. A construção de tais soluções exige um profundo conhecimento da temática da evacuação de edifícios em caso de incêndio, o que pode ser conseguido através do desenvolvimento de um modelo ontológico.

No processo de construção do modelo ontológico de suporte à recomendação de percursos de evacuação em edifícios sob emergência de incêndio, optamos por dividir o nosso trabalho em duas fases: Numa primeira fase desenvolveu-se uma ontologia para a evacuação de edifícios sob emergência de incêndio (Neto et al., 2022a) que aqui resumiremos pela sua relevância. Numa segunda fase, e tendo por base a ontologia referida, procedemos à construção do modelo ontológico final.

2.1 ONTOLOGIA PARA A EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO

A revisão de literatura realizada permite identificar diferentes abordagens ontológicas no tratamento da problemática da evacuação de edifícios em caso de incêndio, tais como: abordagens que se centram na resposta dos diferentes atores envolvidos de alguma forma no incêndio; abordagens que se focam no conhecimento relacionado com o controlo do incêndio; bem como outras abordagens, cujo propósito é modelar o conhecimento sobre a segurança contra incêndios, onde se inclui a vertente relacionada com a evacuação do edifício. É no âmbito deste último tipo de abordagens que, numa primeira fase, se desenvolveu uma ontologia para a evacuação de edifícios sob emergência de incêndio (Neto et al., 2022a), com o propósito de modelar o conhecimento sobre a evacuação de edifícios em caso de incêndio.

No processo de desenvolvimento da referida ontologia procurou-se encontrar respostas para quatro questões principais:

- Qual o domínio a cobrir pela ontologia?
- Porque se pretende construir a ontologia?
- Quais são os usos pretendidos?
- Que tipo de respostas a ontologia deverá dar?

Relativamente à questão sobre o domínio da ontologia, decorre do exposto ao longo desta tese que se enquadra na evacuação de edifícios em caso de incêndio. Quanto à segunda questão, tem-se como propósito representar o conhecimento acerca da evacuação de edifícios, considerando as diferentes variáveis envolvidas nesse processo. Quanto ao uso pretendido para a ontologia, para além do que pode representar para reforço e consolidação do conhecimento sobre o domínio da evacuação em edifícios em caso de incêndio, poderá ser usado como suporte no desenvolvimento de aplicações e sistemas de evacuação, designadamente ao nível da interoperabilidade entre os diferentes atores envolvidos num processo de evacuação. Relativamente às respostas que a ontologia deverá ser capaz de fornecer, recorreu-se a um conjunto de questões de competência, que Wisniewski et al. (2018) referem como sendo questões formuladas em linguagem natural delimitadoras do âmbito do conhecimento representado por uma ontologia e que Grüninger e Fox (1995) consideram ser requisitos, formulados na forma de questões, que uma ontologia deve satisfazer. Sendo requisitos que a ontologia deve cumprir, são também questões que os utilizadores da ontologia pretendem ver respondidas interrogando-a e explorando-a.

Com base na legislação e regulamentos em vigor em Portugal, designadamente o Decreto-Lei n.º 220/2008 de 12/11 - Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE), na sua redação atual (Lei nº 1234/2019) e ainda no documento da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC) (Pinheiro, 2012), e ainda de especialistas da área da segurança contra incêndios, identificou-se um conjunto de questões de competência, que apresentamos na Tabela IV.1, na qual também se sumarizam alguns dos aspetos mais relevantes das respostas para as referidas questões.

Tabela IV.1 Questões de competência para a evacuação de edifícios em caso de incêndio (adaptada de Neto et al. (2022a))

Questões de competência	
Questões	Respostas
Como detetar o início do incêndio?	Dependendo do tipo de edifício, a legislação e regulamentação relacionada com a segurança contra incêndios em edifícios (SCIE) exigem a instalação de sistemas de deteção de incêndio, que podem ser acionados de forma automática através de sensores ou de forma manual por ocupantes do edifício.
Como informar os ocupantes do edifício?	Os ocupantes são notificados através de sinais sonoros, visuais ou de mensagens previamente gravadas. A regulamentação SCIE prevê diferentes tipos de alarme: i) Alarme local (dirigido a ocupantes de uma parte do edifício), ii) Alarme geral (para evacuação geral do edifício); iii) Alarme restrito (apenas para o pessoal de segurança).
Quem são os ocupantes? Como se comportam numa situação de emergência?	Consideram-se ocupantes todas e quaisquer pessoas dentro do edifício durante a evacuação. O comportamento do ocupante perante a necessidade de evacuação de um edifício, depende do conhecimento que tem do edifício, da afinidade com outros ocupantes, bem como das suas próprias características físicas e psicológicas.
Qual é o tipo de edifício? Onde estão localizadas as zonas seguras? Qual é a capacidade do edifício?	As respostas a estas questões devem constar no plano de emergência interno, que inclui o plano de ação, o plano de evacuação, instruções de segurança, planos de emergência e a organização a ser adotada em caso de emergência
Como se processa a evacuação de um edifício? Quais são os percursos de evacuação e como estão identificados? Qual o tipo de sinalética de emergência?	A evacuação de um edifício processa-se de acordo com a organização e gestão de segurança do edifício, que deve incluir o plano de emergência interno e todos os restantes planos e procedimentos a seguir em caso de incêndio. Os percursos de evacuação são identificados através de sinalização de emergência, que deve respeitar a planta de emergência do edifício. Durante o processo de evacuação, o ocupante segue a sinalética de emergência e procura apoio junto do corpo de segurança do edifício, bombeiros e forças policiais.
Com que tipos de perigo são os ocupantes confrontados?	Em consequência do incêndio os ocupantes ficam expostos a elevadas temperaturas, fumo e gases tóxicos, fatores que condicionam o seu comportamento durante a evacuação, levando ao congestionamento e bloqueio dos percursos de evacuação.

Tendo por base as respostas às quatro questões iniciais e considerando a tabela das questões de competência, é possível delimitar melhor o âmbito e objetivo da ontologia, o que se faz na Tabela IV.2.

Tabela IV.2 Especificação e Requisitos da ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio
(adaptada de Neto et al., (2022a))

Ontologia: Especificação e Requisitos	
Domínio da Ontologia:	O domínio da ontologia é a evacuação de edifício em caso de incêndio
Objetivo da Ontologia:	Desenvolver um modelo de conhecimento sobre a evacuação de edifícios em caso de incêndio, que considere os diferentes atores e as diferentes variáveis que caracterizam o respetivo processo.
Principais contributos da Ontologia:	Disponibilizar uma representação de conhecimento sobre o domínio da evacuação de edifícios em caso de incêndio e suportar o desenvolvimento de aplicações e sistemas de evacuação de incêndio, designadamente ao nível da interoperabilidade entre os diferentes atores envolvidos.
Respostas que a ontologia deve fornecer:	<ul style="list-style-type: none"> • Como é detetado o início do incêndio? • Como notificar os ocupantes do edifício? • Qual é o impacto do comportamento dos ocupantes? • Quais são os tipos de perigos? • Como identificar as rotas de evacuação? • Como encontrar as saídas e as zonas seguras? • Como guiar os ocupantes para uma saída ou zona segura?

Com base no conhecimento adquirido, resumido na Tabela IV.1 e na Tabela IV.2, desenvolveu-se o mapa conceptual¹⁹ representado na Figura IV.1.

¹⁹<https://www.mindomo.com/mindmap/ontologia-para-evacuao-de-edificios-em-caso-de-incendio-0d37b050ff9943e5acce4cc09da1d4c8>

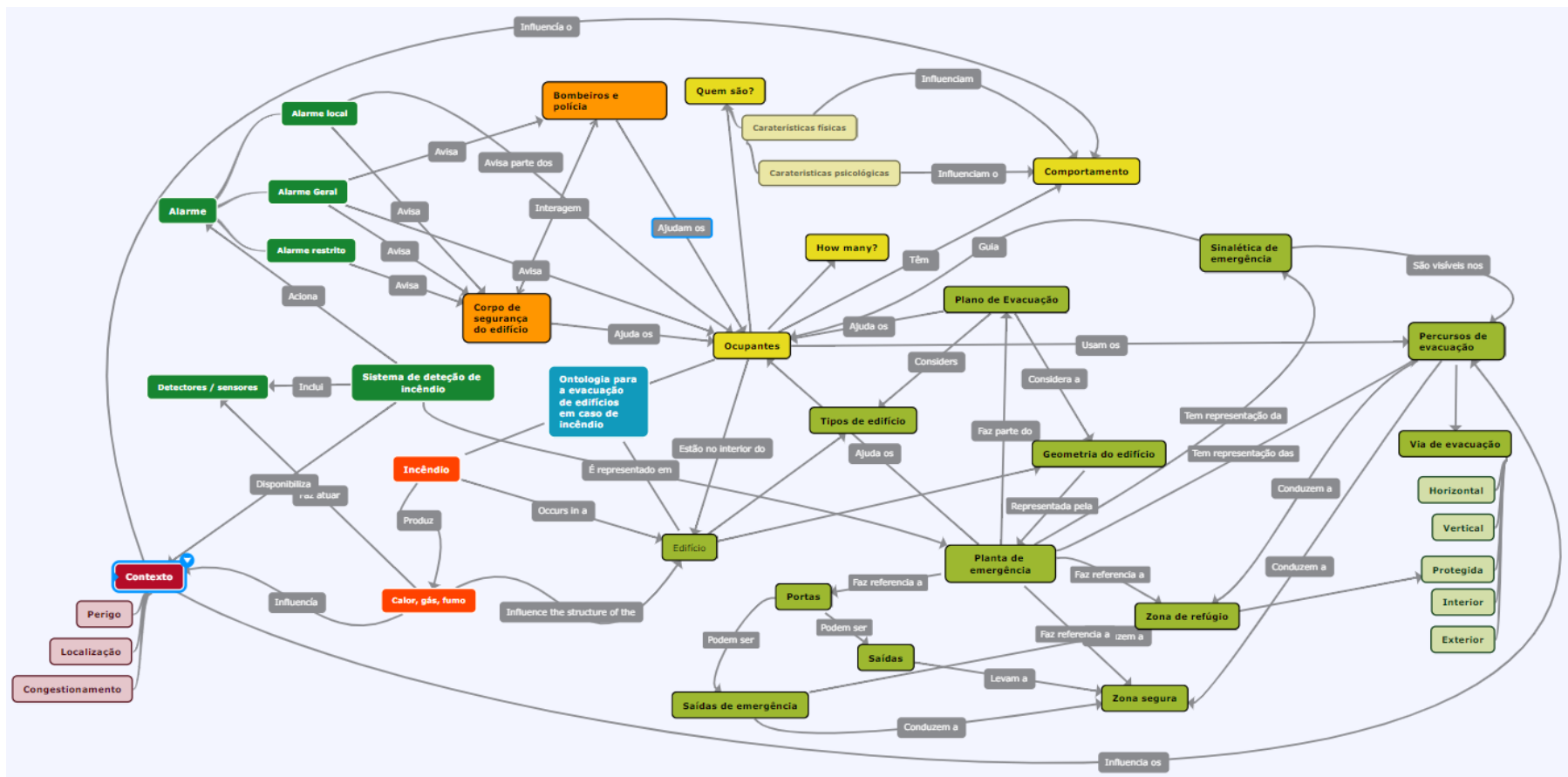


Figura IV.1 Mapa Conceptual de suporte à ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio (adaptada de Neto et al., (2022a))

A partir do referido modelo conceptual, identificaram-se 51 classes e 44 propriedades caracterizadoras das relações entre as classes e, usando a plataforma de código aberto (*open-source*) *Protégé* (Musen, 2015), procedeu-se à criação da ontologia representada pela Figura IV.2 e pela Figura IV.3.



Figura IV.2 Lista de classes, subclasses e propriedades da ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio (Neto et al., 2022a). Obtida do Protégé,

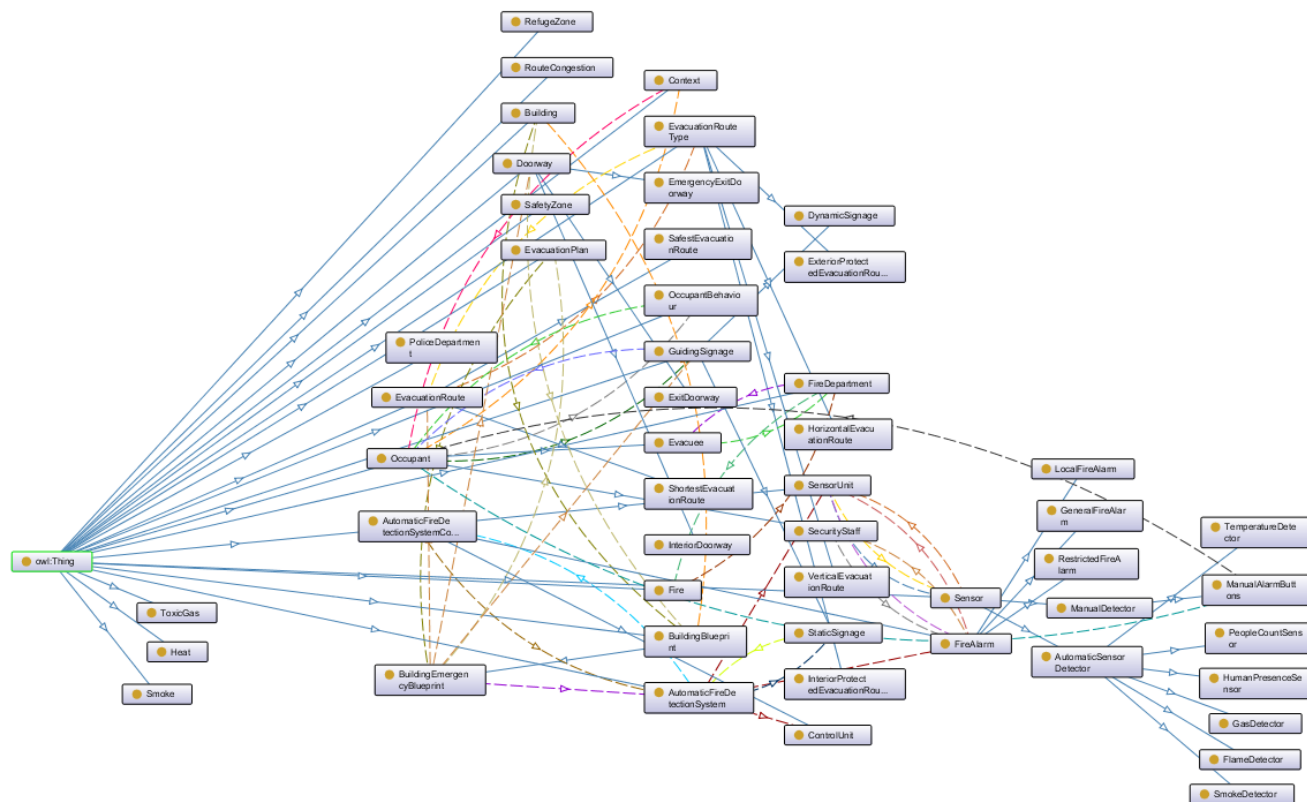


Figura IV.3 Representação gráfica da ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio (Neto et al., 2022a). Obtida do *Protégé*,

Ao longo do todo o ciclo de desenvolvimento, a ontologia foi submetida a avaliação, de acordo com a metodologia descrita na secção II-8.2.

O modelo de representação de conhecimento descrito pela ontologia considera os aspetos mais relevantes a ter em conta num processo de evacuação de edifícios em caso de incêndio e tem o propósito de contribuir para uma melhor compreensão do domínio e para servir de suporte ao desenvolvimento de soluções e sistemas de evacuação capazes de um superior desempenho.

2.2 ONTOLOGIA PARA A RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO

A partir da ontologia apresentada na secção anterior, procedeu-se numa segunda fase ao desenvolvimento de uma ontologia cujo domínio é a recomendação em tempo real de percursos de evacuação em edifícios em caso de incêndio.

Para ajudar na especificação e na definição requisitos da ontologia, considerou-se o conjunto de questões de competência apresentadas na Tabela IV.3, bem com as quatro questões que em Neto, et al. (2022a) se definiram com essenciais na definição do âmbito da ontologia e na sua especificação e requisitos: Qual o domínio a cobrir pela ontologia? Porque se pretende construir a ontologia? Quais são os usos pretendidos? Que tipo de respostas a ontologia deverá dar?

Quanto ao domínio e âmbito da ontologia, enquadra-se na recomendação em tempo real de percursos de evacuação em edifícios em caso de incêndio. Quanto à razão que justifica a construção da ontologia, pretende-se construir um modelo capaz de representar o conhecimento sobre o já referido domínio. Com o desenvolvimento desta ontologia tem-se como propósito, por um lado, o reforço e consolidação do conhecimento na área da evacuação de edifícios em caso de incêndio, com incidência na recomendação de percursos de evacuação em tempo real aos seus ocupantes. Por outro lado, contribuir com uma base de conhecimento para o desenvolvimento de aplicações e sistemas de evacuação capazes de guiar em tempo real os ocupantes de um edifício nessas circunstâncias. Quanto às respostas a

que a ontologia deverá ser capaz de responder, decorrem de uma análise à Tabela IV.3, na qual se apresentam as questões de competência.

Tabela IV.3 Questões de competência para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio

Questões de competência	
Questões	Respostas
Como é que os ocupantes sabem a localização das saídas e zonas de segurança do prédio?	A sinalética de emergência identifica as saídas e zonas de segurança do edifício, bem como os percursos de evacuação.
Como evacuar o edifício? Como identificar os percursos de evacuação?	O processo de evacuação deve seguir a organização e gestão do edifício. A sinalética de emergência orienta os ocupantes no seu percurso até à saída do edifício.
Que tipo de sinalização de emergência existe no prédio? Como a sinalização de emergência pode ajudar os ocupantes durante o processo de evacuação?	Os sinais de emergência são geralmente estáticos e não mudam durante o processo de evacuação. No entanto, a sinalização de emergência dinâmica atualizada em tempo real pode fornecer aos ocupantes melhores informações sobre os percursos de evacuação mais seguros.
Como é que o contexto pode ser capturado e usado para ajudar os ocupantes?	O contexto é capturado por sensores instalados no edifício e é usado para ajudar os ocupantes a alcançar um local seguro
Como pode o contexto influenciar o processo de evacuação?	O contexto afeta os percursos de evacuação, impactando no processo de evacuação de um edifício.
Como podem os dados produzidos pelos sensores ajudar os ocupantes no processo de evacuação do edifício?	Os dados do sensor podem ser usados para notificar os ocupantes e para suportar um sistema capaz de ajudar a guiar os ocupantes durante o processo de evacuação do edifício.
Como pode a IoT contribuir para a criação de uma solução capaz de guiar os ocupantes numa situação de emergência de incêndio num edifício?	A instalação de dispositivos IoT, como é o caso de sensores e da sinalética digital, permite alcançar esse objetivo. Os dados obtidos pelos dispositivos de entrada IoT (sensores, sistemas de deteção de incêndio, smartphones) são enviados a um sistema central para processamento. Esse sistema central processa esses dados e apresenta-os (recomenda-os), na forma de percurso de evacuação, aos ocupantes através de dispositivos de saída IoT (sinalização digital ou smartphones).
Como é representado um edifício no Sistema de Recomendação de Percursos de Evacuação?	A representação de um edifício no Sistema de Recomendação de Percursos de Evacuação pode ser feita através de um grafo.

Em face do acima exposto, resumem-se na Tabela IV.4 a especificação e os requisitos da ontologia.

Tabela IV.4 Especificação e Requisitos da ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio

Ontologia: Especificação e Requisitos	
Domínio da Ontologia:	O domínio da ontologia enquadra-se no âmbito da recomendação, em tempo real, de percursos de evacuação seguros aos ocupantes de um edifício em caso de incêndio.
Objetivo da Ontologia:	Desenvolver um modelo capaz de representar o conhecimento sobre a recomendação em tempo real de percursos de evacuação aos ocupantes em edifícios suportados por dispositivos IoT, em caso de incêndio.
Principais contributos da Ontologia:	Reforçar e consolidar o conhecimento sobre a evacuação de edifícios em caso de incêndio. Disponibilizar um modelo de conhecimento para apoiar o desenvolvimento de soluções de evacuação para orientar em tempo real os ocupantes de um edifício em caso de emergência de incêndio
Respostas que a ontologia deve fornecer:	<ul style="list-style-type: none"> • Como pode o contexto influenciar o comportamento dos ocupantes? • Como podem as informações contextuais ser usadas para orientar os ocupantes? • Como pode o tipo de sinalização de emergência influenciar o processo de evacuação? • Como é possível fornecer informações em tempo real aos ocupantes? • Como guiar os ocupantes até local seguro? • Como é que o edifício está representado no Sistema de Recomendação? • Como são geradas as recomendações de percursos de evacuação?

Tendo por base o modelo conceptual apresentado na Figura IV.1, que suportou a ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio, e a partir do conhecimento adquirido na fase de especificação, desenvolveu-se o modelo conceptual²⁰ que se apresenta na Figura IV.4, partindo de quatro termos principais que decorrem das questões de competência e da tabela de especificação e requisitos: *Route Recommender System* (Sistema de Recomendação de Percursos de Evacuação), *IoT – Internet Of Things* (Internet das Coisas), *IoT Devices* (Dispositivos *IoT*) e *Graph* (Grafo).

²⁰ <https://www.mindomo.com/mindmap/fire-evacuation-route-recommendation-recomendao-de-percursos-de-evacuao-em-caso-de-incendio-2198e2da36074dd2939793a4a35f7cb4>

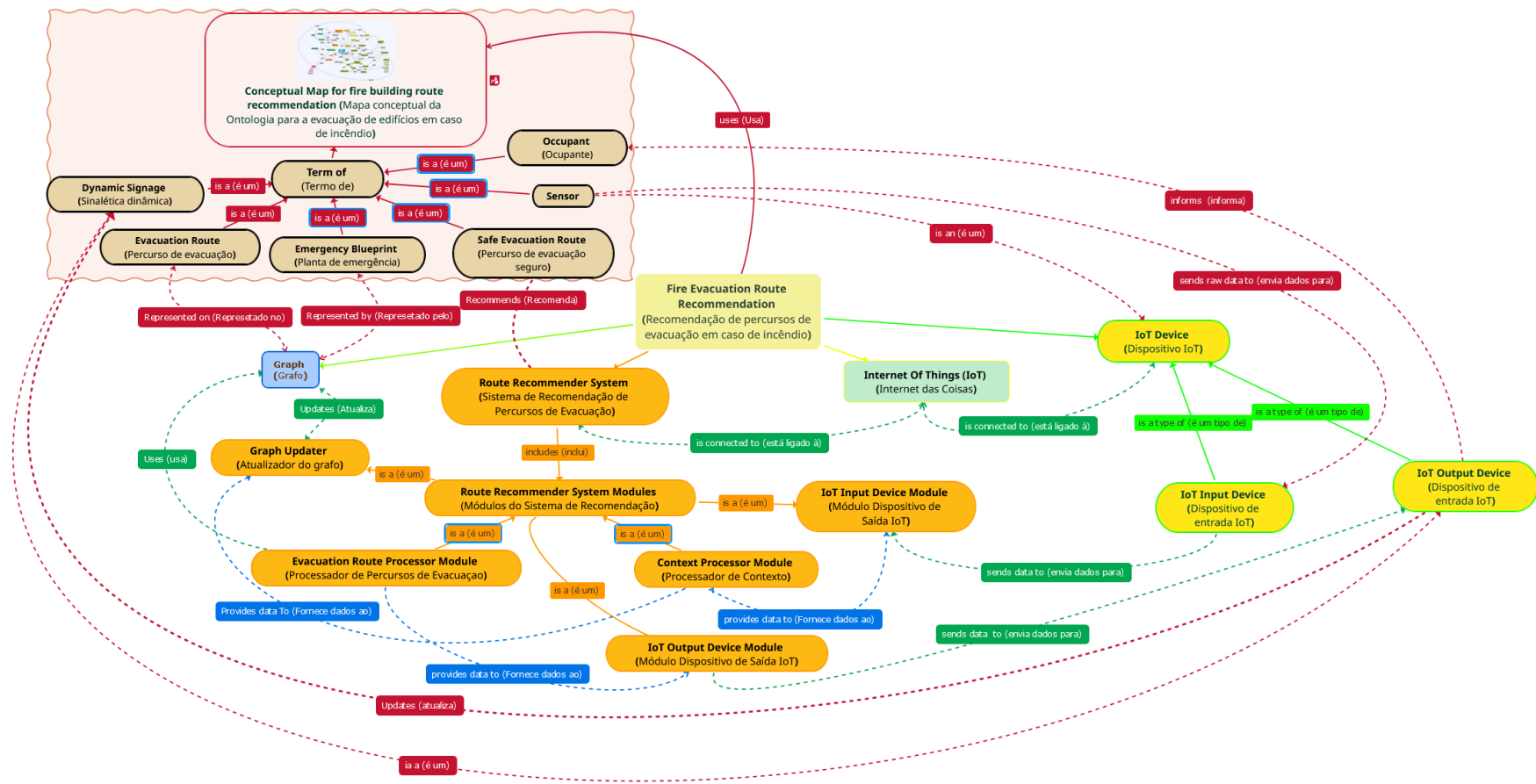


Figura IV.4 Mapa conceptual de suporte à da ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio

A referência ao modelo conceptual apresentado na Figura IV.1 está evidenciada na Figura IV.4, destacando-se os termos desse modelo que se relacionam diretamente com termos do novo modelo conceptual.

Na fase de formalização e implementação construiu-se a ontologia a partir do modelo conceptual da Figura IV.4, recorrendo à plataforma *Protégé* e tendo por base a reutilização da ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio, apresentada na secção anterior. Identificaram-se 14 novas classes e 20 novas propriedades caracterizadoras das relações entre essas classes que se listam na Figura IV.5. Ainda na Figura IV.5, realçam-se as 14 novas classes, bem como as classes da ontologia reutilizada, com as quais as novas classes se relacionam. Na Figura IV.6. apresenta-se a representação gráfica da ontologia.

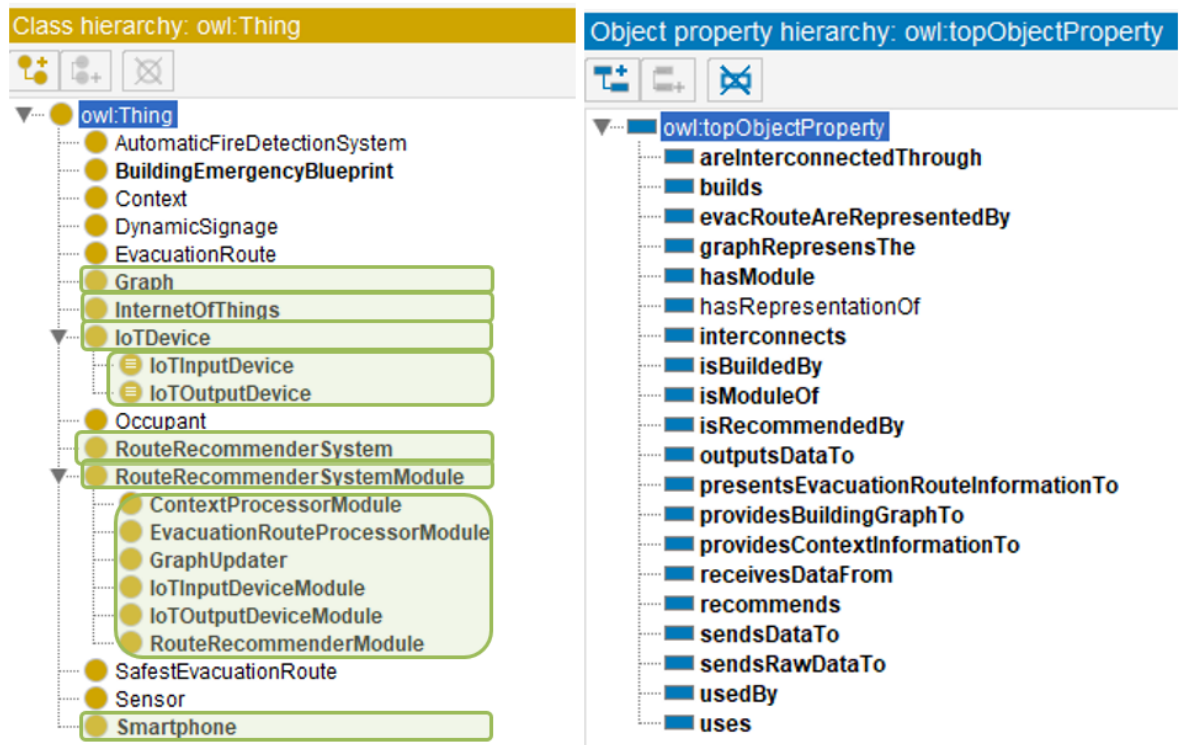


Figura IV.5 Lista de classes, subclasses e propriedades da ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio. Obtida do *Protégé*

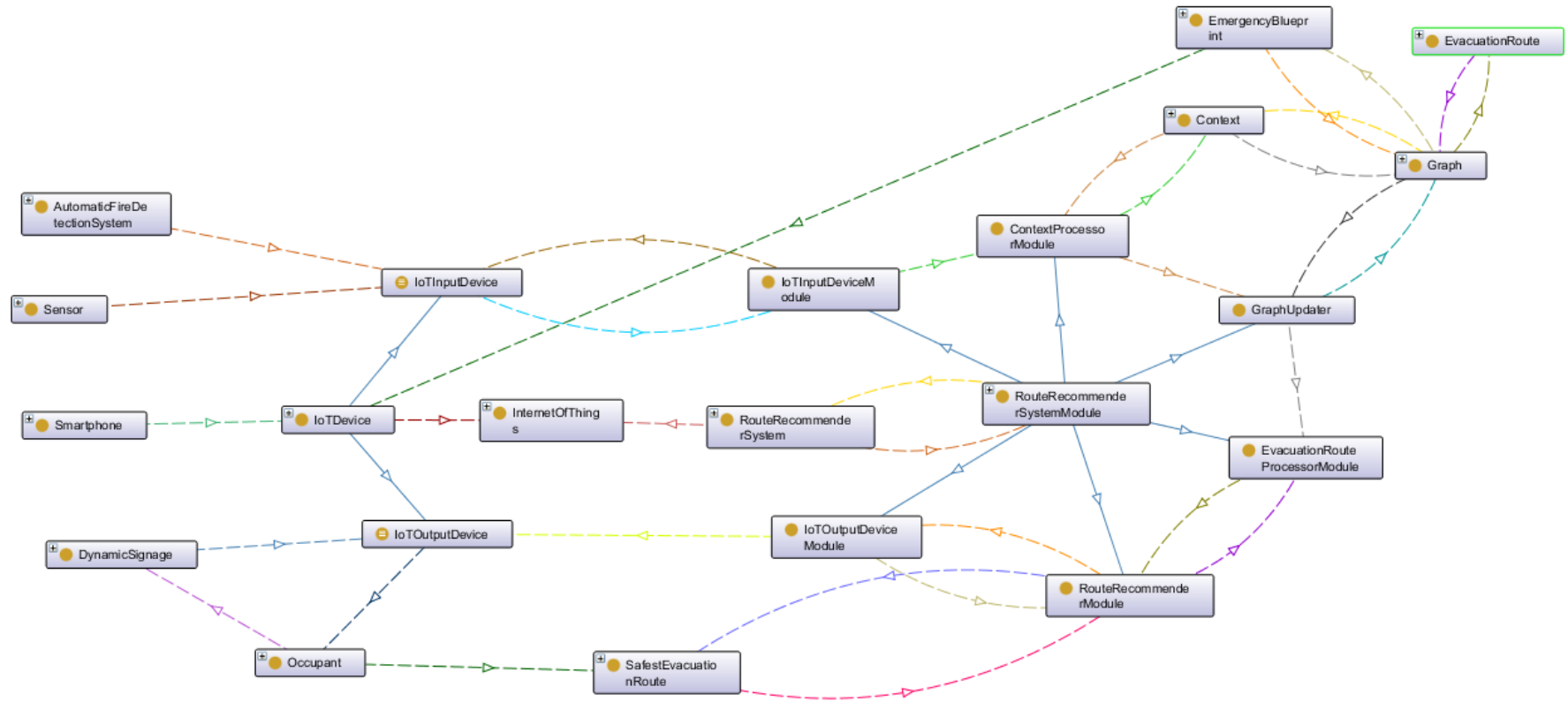


Figura IV.6 Representação gráfica da ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio. Obtida do *Protégé*

A ontologia foi submetida a avaliação durante o seu processo de desenvolvimento, de acordo com a metodologia descrita na secção II-8.2.

Realça-se o contributo da ontologia para o reforço do conhecimento do domínio relacionado com recomendação em tempo real de percursos de evacuação aos ocupantes de um edifício, em caso de incêndio. O trabalho desenvolvido deu origem a um modelo de representação do conhecimento que contribui para apoiar o desenvolvimento de sistemas e soluções capazes de guiar em tempo real os ocupantes durante um processo de evacuação de um edifício, como é o caso do sistema de recomendação objeto desta tese.

Finalmente, importa referir que a ontologia apresentada deu origem a artigo (Neto et al., 2023b) apresentado no *7th International Congress on Information and Communication Technology (ICICT2022)*.

2.3 O MODELO ONTOLÓGICO COMO SUPORTE DO SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO

A motivação para a construção das ontologias apresentadas decorre dos objetivos e questões de investigação que se apresentam na Tabela II.1, designadamente o objetivo global da presente tese:

Estudar em que medida um sistema multiagente de recomendação baseado em informação contextual e assente num modelo ontológico pode contribuir para melhorar a eficiência na evacuação de edifícios suportados pela IoT, recomendando em tempo real os percursos de evacuação mais adequados e eficientes a cada momento.

Resulta assim clara a importância do desenvolvimento das ontologias apresentadas na construção de um modelo ontológico para suportar o desenvolvimento de um sistema de recomendação capaz de guiar os ocupantes de um edifício até local seguro. Esse sistema de recomendação é identificável no mapa conceptual da Figura IV.4, bem como nas Figura IV.5

e Figura IV.6 referentes ao modelo ontológico desenvolvido. Na Figura IV.7, obtida a partir do mapa conceptual da Figura IV.4, realça-se o sistema de recomendação de percursos de evacuação, sendo possível identificar os possíveis módulos em que o referido sistema se pode constituir. Na Figura IV.8, apresenta-se também o referido sistema de recomendação, através de uma representação gráfica obtida com a ferramenta *Protégé*.

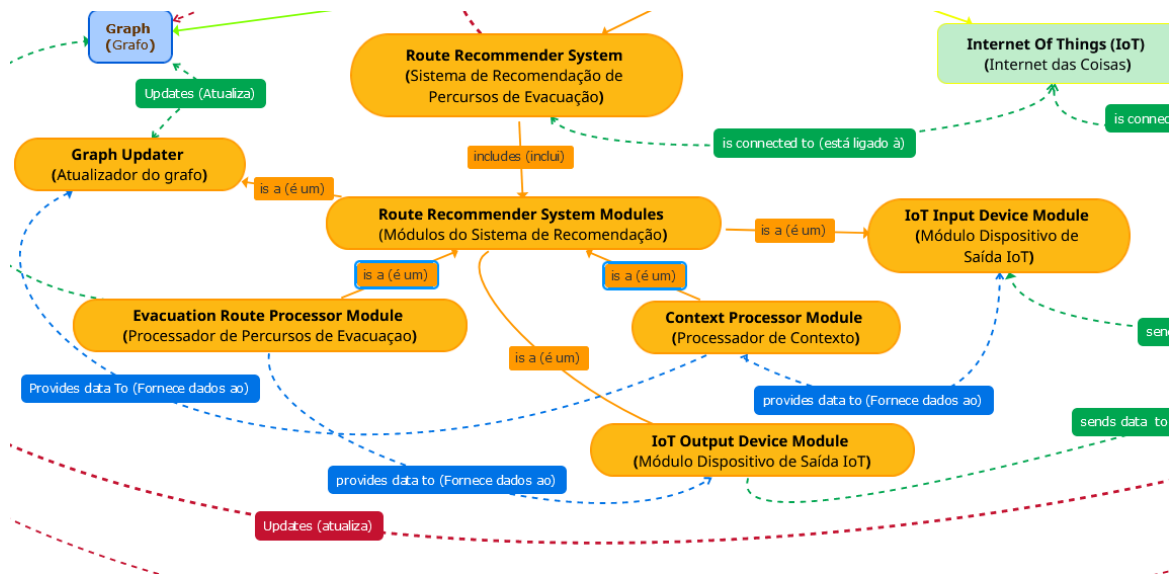


Figura IV.7 Sistema de Recomendação resultante do mapa conceptual de suporte à ontologia para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio

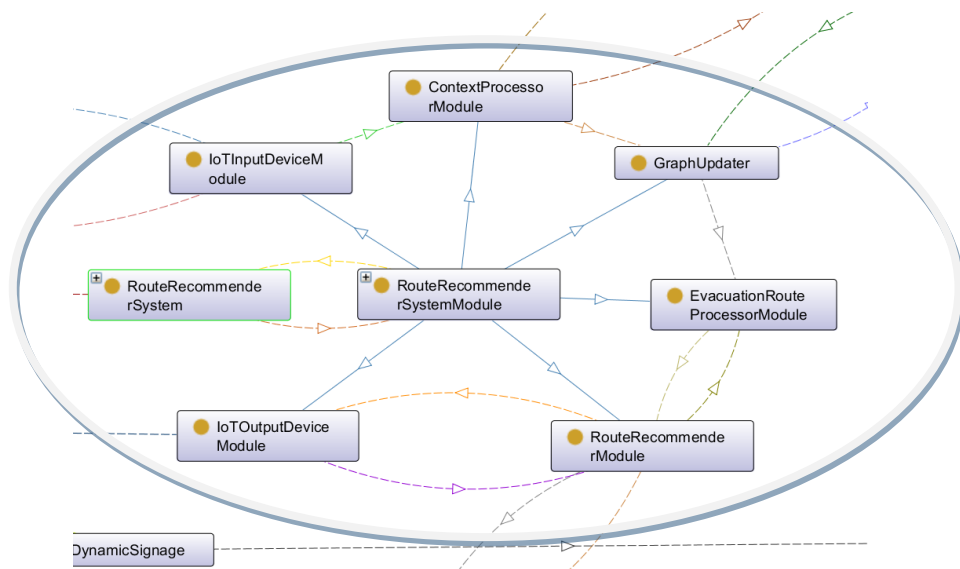


Figura IV.8 Representação do Sistema de Recomendação, obtida a partir do *Protégé*

Importa, no entanto, analisar com detalhe o modelo ontológico desenvolvido, no sentido de melhor compreender e avaliar como o sistema de recomendação que se evidencia do referido modelo pode, de facto, contribuir para a construção de uma solução capaz de guiar em tempo real os ocupantes de um edifício em caso de incêndio.

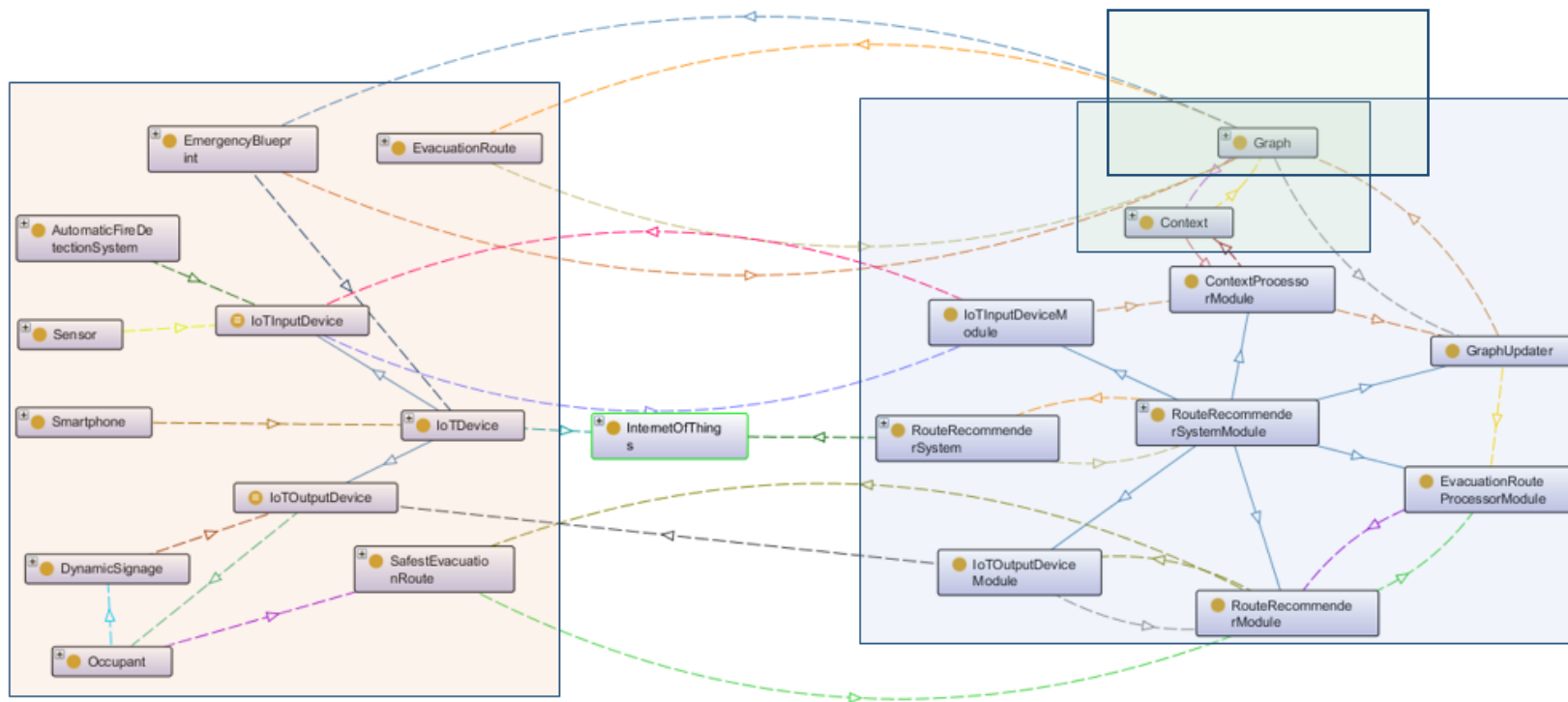


Figura IV.9 Representação gráfica do modelo ontológico, onde se realçam dois conjuntos de termos caracterizadores desse modelo, suportados na IoT. Obtida a partir do

Protégé.

Na Figura IV.9 volta a apresentar-se uma representação gráfica do modelo ontológico, mas agora realçando dois blocos de classes interligados pela IoT. Um desses blocos tem o sistema de recomendação como elemento central do modelo, porque desempenha um papel fundamental no propósito de representar o conhecimento do domínio da recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio. O outro bloco é constituído por classes que no modelo ontológico caracterizam um edifício.

2.3.1 A CARATERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO NO MODELO ONTOLÓGICO

Relativamente às classes que se referiram ser caracterizadoras do edifício, e que se reproduzem na Figura IV.10, pretendem representar no modelo ontológico os ocupantes do edifício e elementos físicos do edifício que impactam no processo de evacuação.

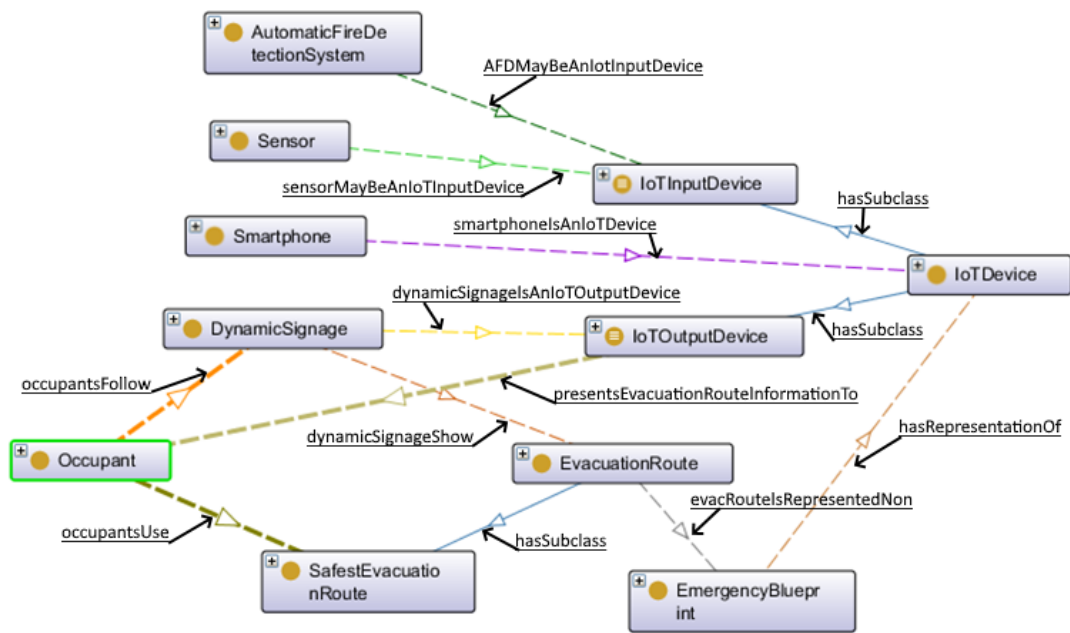


Figura IV.10 Classes do modelo ontológico caracterizadoras do edifício. Obtida a partir do *Protégé*.

Já se referiu que a IoT é o elemento que interliga os dois blocos de classes a que se faz referência na Figura IV.9, ou seja, é a IoT que interliga o edifício e o sistema de recomendação. Essa ligação do edifício à IoT faz-se através de dispositivos IoT (*IoTDevice* class), podendo esses dispositivos ser dispositivos de entrada (*IoTInputDevice* class) que podem ser de entrada (*IoTInputDevice*) ou de saída (*IoTOutputDevice*). Relativamente aos dispositivos de entrada, como é o caso de sensores (*Sensor* class), podem ser de diversos tipos, como decorre da ontologia apresentada em 2.1 e está representado na Figura IV.2.

Como também decorre da Figura IV.10, podem também ser considerados dispositivos de input IoT, os sistemas de detecção de incêndio (*AutomaticFireDetectionSystem class*), desde que devidamente integrados e adaptados; e os próprios smartphones (*Smartphone class*), que através de uma App específica os ocupantes podem usar para fornecer dados ao sistema de recomendação. Está claro que o principal propósito do sistema de recomendação é a recomendação de percursos de evacuação aos ocupantes (*Occupant class*) do edifício. Essas recomendações são apresentadas aos ocupantes através de dispositivos de output IoT, como é o caso de sinalética digital dinâmica (*DynamicSignage class*) que permite guiar em tempo real os ocupantes através de percursos de evacuação seguros (*SafestEvacuationRoute class*). O modelo ontológico apresentado considera que os smartphones podem também ser considerados dispositivos de output IoT, disponibilizando aos ocupantes do edifício os referidos percursos de evacuação seguros.

2.3.2 O SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DESCRITO PELO MODELO ONTOLÓGICO

Quanto ao sistema de recomendação, a sua representação gráfica é reproduzida na Figura IV.11, emergindo da referida representação os seis módulos (*classes*) que o compõem e as relações (*object properties*) entre eles. Na Figura IV.11 realçam-se também as classes *Context* e *Graph*, que servem de base à tomada de decisão do sistema de recomendação.

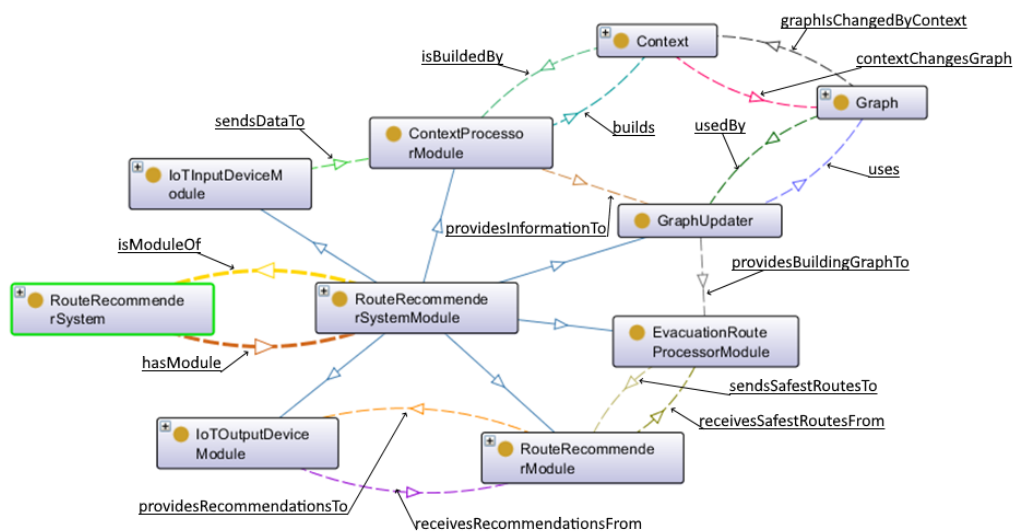


Figura IV.11 O sistema de recomendação, os módulos que o constituem e respetivas relações. Obtida a partir do *Protégé*.

Ao suportar-se na IoT, o sistema de recomendação obtém dados para processamento através do módulo *IoTInputDeviceModule*, que no sistema representa os diversos dispositivos de entrada IoT instalados no edifício, como é o caso de sensores ou outros dispositivos que recolham dados que contribuam para as tomadas de decisão do sistema de recomendação. Após processados, esses dados são enviados ao *ContextProcessorModule*, para que sejam transformados em informação contextual, que é usada pelo *GraphUpdaterModule* para atualizar o grafo representativo do edifício em tempo real. O grafo resultante é disponibilizado ao *EvacuationRouteProcessorModule*, que usa um algoritmo da teoria de grafos para determinar um conjunto de percursos seguros, os quais são disponibilizados ao *RouteRecommenderModule*. Na posse desses percursos seguros o *RouteRecommenderModule* gera recomendações que, através do *IoTOutputDeviceModule*, são enviadas aos dispositivos de output IoT respetivos, como é o caso da sinalética digital ou de smartphone, que os apresentam aos ocupantes do edifício.

2.3.3 O MODELO DE INTEROPERABILIDADE

Como já se referiu anteriormente, o sistema de recomendação utiliza os dados que recebe dos dispositivos IoT, que têm de ser processados e tratados de modo a produzir a informação contextual capaz de gerar recomendações adequadas em tempo real. No entanto, a heterogeneidade dos diferentes dispositivos IoT envolvidos torna necessária a construção de um modelo de interoperabilidade que assegure uma eficaz transferência de dados desses dispositivos para o sistema de recomendação, de modo a que este fique habilitado, por um lado, a perceber o contexto que lhe permita a tomada de decisão quanto à recomendação dos percursos seguros mais adequados a cada momento e, por outro, a transmitir essas recomendações aos ocupantes do edifício, através da atualização da informação nos dispositivos de sinalização de emergência.

Recorrendo a propriedades de tipos de dados (*datatype properties*), definidas na linguagem *OWL (Ontology Web Language)* como propriedades que relacionam indivíduos de uma classe com um determinado valor de dados (W3C, 2004), construiu-se um modelo para assegurar a interoperabilidade entre os dispositivos de emergência instalados no edifício e o sistema de recomendação, como se apresenta no diagrama da Figura IV.12.

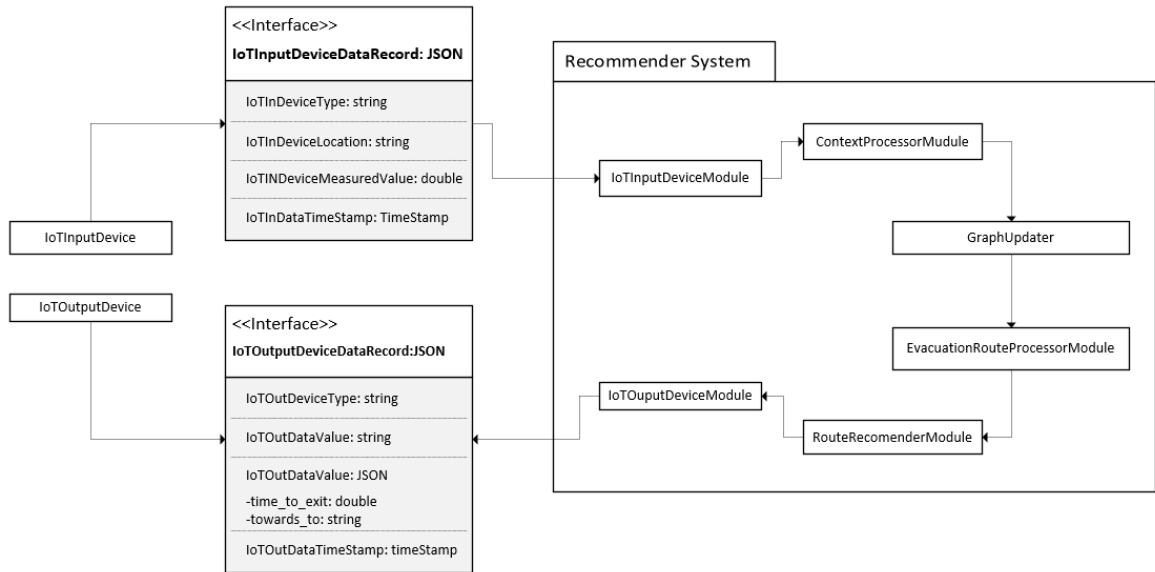


Figura IV.12 Representação do modelo de interoperabilidade entre os dispositivos IoT e o Sistema de Recomendação (obtido a partir do protégé)

3 SISTEMA MULTIAGENTE DE RECOMENDAÇÃO DE PERCURSOS DE EVACUAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM CASO DE INCÊNDIO

Nesta secção iremos apresentar de forma detalhada o sistema de recomendação desenvolvido a partir do modelo ontológico anteriormente apresentado. recorrendo à tecnologia dos agentes e sistemas multiagente, de acordo com o que se definiu ser o âmbito desta tese.

3.1 ARQUITETURA GERAL DA SOLUÇÃO

O modelo ontológico construído, e apresentado no ponto anterior, faz emergir um sistema de recomendação suportado na *IoT*, que se baseia nas condições contextuais de um edifício para recomendar percursos de evacuação seguros aos ocupantes desse edifício em caso de incêndio. Na Figura IV.13 apresenta-se a arquitetura global da solução.

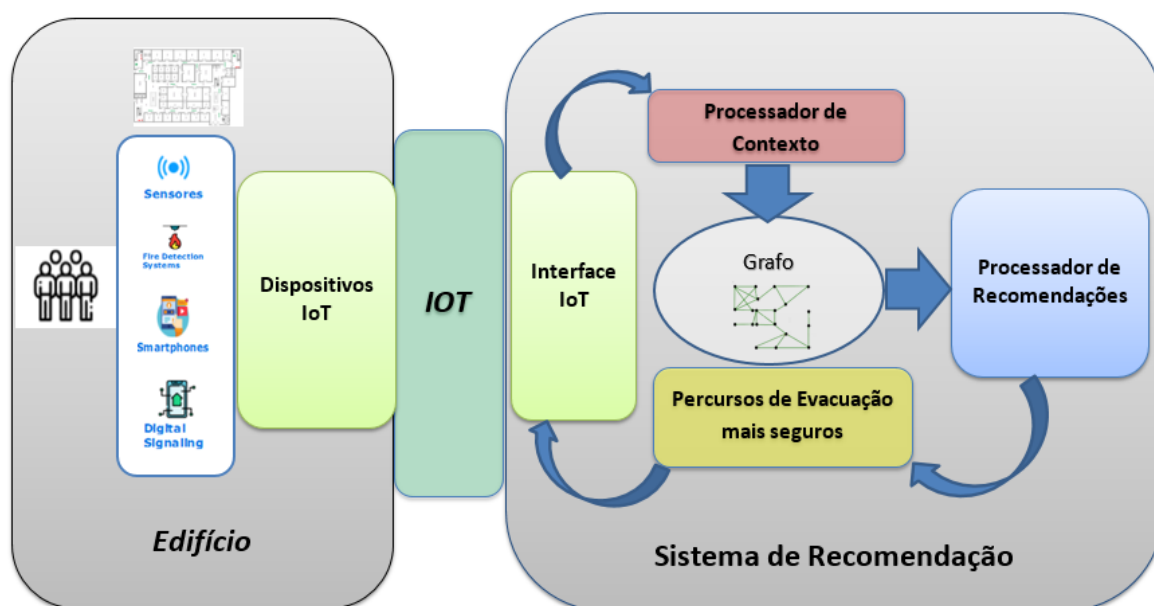


Figura IV.13 Arquitetura global da solução de recomendação

Do modelo ontológico fica também claro que a informação contextual é percebida por dispositivos de input *IoT*, como é o caso de sensores, e que as recomendações são disponibilizadas aos ocupantes do edifício através de dispositivos de output *IoT*, como é o caso da sinalética digital. Decorre ainda do modelo ontológico e está plasmado na arquitetura da Figura IV.13, que a representação de um edifício no sistema de recomendação é feita através de um grafo, o qual será atualizado em tempo real em função do contexto.

3.2 ABORDAGEM DE RECOMENDAÇÃO SEGUIDA

Na secção II-4.1 fez-se referência aos tipos de abordagem mais frequentemente usados em sistemas de recomendação, tendo-se dedicado a secção II-4.2 às abordagens baseadas em contexto (ou cientes dos contexto), no âmbito da quais se enquadra o sistema de recomendação que decorre do modelo ontológico desenvolvido.

Já abordamos anteriormente o conceito de contexto, merecendo realce para o nosso trabalho as considerações de Bazire e Brézillon (2005), para quem o contexto age como um conjunto de restrições influenciadoras do comportamento de um sistema ou utilizador no desempenho de uma tarefa. Já para Dey (2001), contexto é a informação que pode ser usada para

caracterizar a situação de uma entidade numa interação, podendo entidade ser uma pessoa, um lugar ou um objeto relevante para a interação entre um utilizador e uma aplicação. Aplicando esta última ideia de que o contexto se trata de informação capaz de caracterizar a situação de uma entidade numa interação, ao domínio de aplicação da temática que estamos a estudar, contexto será a informação que a cada momento permite caracterizar a situação de um edifício, no que respeita aos percursos de evacuação, na sua interação com os ocupantes desse edifício.

Como decorre do modelo ontológico desenvolvido e da arquitetura apresentada na Figura IV.13, a informação contextual é construída a partir dos dados obtidos pelos diferentes dispositivos de entrada *IoT* instalados no edifício, sejam eles sensores *IoT* de diferentes tipos ou sistemas de deteção de incêndio tradicionais que respeitem o modelo de interoperabilidade apresentado na Figura IV.12. Esse processo de construção da informação contextual caracterizadora do estado do edifício é apresentado na Figura IV.14, obtida a partir da ontologia descrita ao longo de toda a secção IV -2.

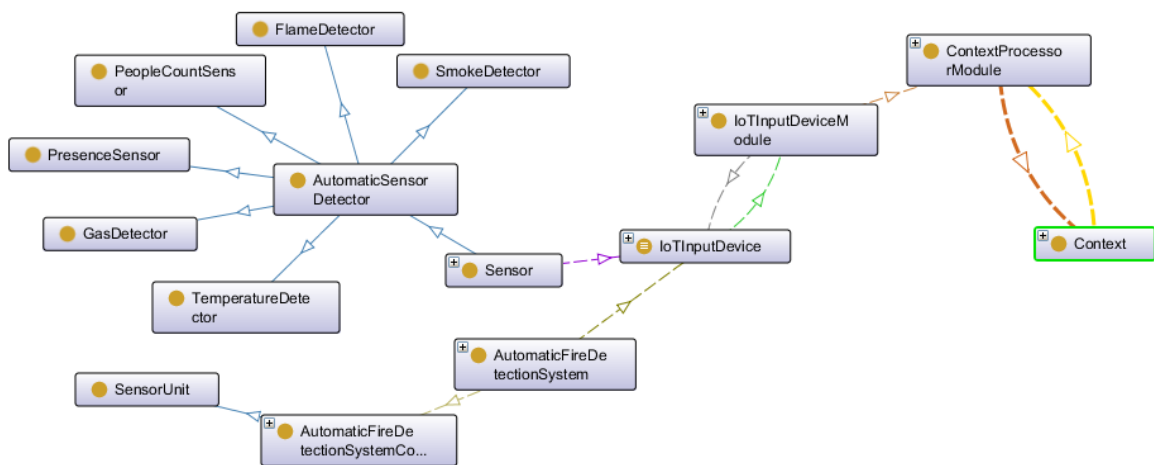


Figura IV.14 Processo de construção da informação contextual. Obtida a partir do Protégé

Considerando a classificação proposta por Adomavicius et al. (2011) para o contexto em sistemas de recomendação, a que se fez referência secção II-4.2, pode dizer-se que, no que se refere aos fatores contextuais, o sistema de recomendação proposto enquadra-se na primeira célula da matriz 3x2, apresentada na Tabela II.2.

Nesse tipo de sistemas os fatores contextuais são totalmente observáveis e não mudam ao longo do tempo, enquadrando-se no que Dourish (2004) considera ser uma visão representacional do contexto, que pode ser visto como forma de informação, estável e delimitável, consistindo num conjunto de características da envolvente (o edifício) onde a atividade (evacuação do edifício) se desenrola. Os sistemas assentes na visão representacional de contexto são, segundo Adomavicius et al. (2011), sistemas específicos de um domínio (evacuação de edifícios em caso de incêndio), devendo os fatores contextuais relevantes para a geração das recomendações, ser especificados como parte do próprio sistema de recomendação.

3.2.1 FATORES CONTEXTUAIS

Em face do anteriormente referido haverá que definir e especificar os fatores contextuais do sistema de recomendação, o que se fará na presente secção.

Como base de partida para a definição dos fatores contextuais há que considerar o domínio do problema em estudo: a evacuação de edifícios em caso de incêndio. Assim, os fatores contextuais de interesse para o referido devem permitir caracterizar os percursos de evacuação usados pelos ocupantes para abandonar o edifício em segurança.

Já se referiu que a informação contextual é construída pelo sistema de recomendação a partir dos dados obtidos pelos dispositivos de entrada *IoT*. Esses dispositivos são sensores de diversos tipos, capazes de medir diferentes grandezas, e podem dividir-se em dois grandes grupos: um primeiro grupo constituído por dispositivos que medem ou detetam grandezas como a temperatura, o fumo, gás ou chama, que passaremos a designar por grupo de fatores de risco, porque refletem o perigo em que incorrem os ocupantes; um segundo grupo, que reflete o congestionamento de percursos decorrente da quantidade de ocupantes, designado por grupo de fatores de congestionamento, onde se incluem os sensores de presença e de contagem de pessoas. Além dos fatores de perigo e de congestionamento, há a considerar também o fator localização, segundo três vertentes: a localização dos dispositivos de input *IoT* que permitem ao sistema de recomendação ter conhecimento da zona do percurso de evacuação sujeita a restrições; a localização dos dispositivos de output *IoT* usados para

indicar os percursos de evacuação seguros; e a localização dos ocupantes no edifício, a quem são dirigidas as recomendações.

3.2.2 FORMULAÇÃO DO SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO

O sistema, como a sua designação deixa perceber, tem como objetivo recomendar, em tempo real, os percursos de evacuação mais seguros e eficientes, para que os ocupantes abandonem o edifício em segurança.

Para construção desse sistema consideraram-se as seguintes representações:

- G , é um grafo que representa toda a área transitável de um edifício, constituído por vértices (V) e arestas (A), que são pares de vértices, às quais estão associadas um peso (w), que se pode referir à distância entre vértices adjacentes ou ao tempo que um ocupante demora a deslocar-se entre dois vértices adjacentes, então, pode escrever-se G na forma:

$$G = (V; A, w) \quad (\text{IV.1})$$

- P , representa o conjunto de todos os percursos do grafo G e é obtido a partir do seguinte:

$$P = \{P_0, P_{01}, \dots, P_N\} \quad (\text{IV.2})$$

em que cada percurso P_i se pode definir como uma sequência de vértices $v \in V$, tal que

$$P_i = (v_{i0}, v_{i1}, \dots, v_{ik}) \quad (\text{IV.3})$$

onde v_{ii} e v_{ii-1} são vértices adjacentes.

- E , representa um subconjunto de P que contém todos os percursos de evacuação que um ocupante do edifício tem de percorrer até local seguro, tal que:

$$E_i = (ve_{i0}, ve_{i1}, \dots, ve_{in}) \quad (\text{IV.4})$$

em que $ve_{i0}, ve_{i1}, \dots, ve_{i,l-1}$ são vértices interiores ao edifício e $ve_{i,l}$ é um vértice representativo de local seguro, seja ele interior (zona de refúgio) ou exterior.

- W_i , representa o comprimento do percurso P_i (ou o tempo que demora a percorrer esse percurso), e é dado pela expressão

$$W_i = \sum_{n=1}^l w_{in} \quad (\text{IV.5})$$

Em que w_{in} , é o peso da aresta e representa a distância entre dois vértices (v_{ii} e $v_{i,i-1}$) adjacentes.

Já se referiu anteriormente que a informação contextual vai ser usada pelo sistema de recomendação para atualizar o grafo. Também já ficou claro que os fatores contextuais impactam nos percursos de evacuação e, conseqüentemente, no condicionamento do movimento dos ocupantes. Esse condicionamento pode traduzir-se em bloqueio de percursos ou numa redução da velocidade de deslocamento dos ocupantes. Assim pode definir-se o contexto na forma:

$$Cx = (GFP; GFCg) \quad (\text{IV.6})$$

Onde **GFP** e **GFCg** são os fatores contextuais de perigo e congestionamento a que já se fez referência anteriormente.

Para introduzir os fatores contextuais no nosso modelo de recomendação há que considerar que o grafo **G** representa o edifício no sistema de recomendação e que as arestas **A** podem ser vistas como troços dos percursos de evacuação **E**, pelo que se pode considerar que o peso **w**, associado a cada aresta, altera o seu valor em função do contexto criado pela deflagração do incêndio e percecionado pelos dispositivos de input *IoT*. Assim, pode reescrever-se **G** em função do tempo, pelo que:

$$G(t) = (V; A, w(Cx(t))) \quad (\text{IV.7})$$

Onde **G(t)** e **Cx(t)** são, respetivamente, o grafo e o contexto no instante **t**.

Já ficou claro que o propósito do sistema de recomendação é recomendar, em tempo real, os percursos de evacuação mais seguros e eficientes, para que os ocupantes abandonem o edifício em segurança.

Assim, definindo $S(t, l)$ como o conjunto de percursos de evacuação mais seguros no instante t , na localização l , tal que:

$$S(t, l) = \{S_0, S_1, \dots, S_J\} \quad (\text{IV.8})$$

Então, seja SR o sistema de recomendação, podemos definir SR , como:

$$SR: (G(t), t, l) \rightarrow S(t, l) \quad (\text{IV.9})$$

A expressão III.9 define o sistema de recomendação de percursos de evacuação como um sistema que suporta as suas recomendações num grafo dinamicamente atualizado em função do contexto construído a partir de dados obtidos pelos dispositivos de entrada *IoT*.

3.3 O SISTEMA MULTIAGENTE

Nas secções anteriores, fundamentou-se e apresentou-se, de modo detalhado, a abordagem de recomendação seguida e procedeu-se à formulação teórica do sistema de recomendação. Na presente secção, apresenta-se de a implementação do referido sistema de recomendação, recorrendo à tecnologia dos sistemas multiagente. ficando claro o seu propósito e o modo como esse propósito pode ser alcançado.

O recurso aos sistemas multiagente já foi anteriormente fundamentado, estando em linha com a crescente presença destes como suporte de sistemas de recomendação nos mais diversos domínios de aplicação e recorrendo a diferentes tipos de abordagem. Para além disso, acresce a modularidade dos sistemas proporcionada pela arquitetura distribuída dos sistemas multiagente, que potencia o seu uso no âmbito da *IoT*. Stone e Veloso (2000) elencam também um conjunto de razões para o uso de sistemas multiagente:

- capacidade para construir sistemas mais eficientes, devido ao facto do paradigma dos sistemas multiagente providenciar mecanismos para o uso de computação paralela;
- possibilidade de distribuir diferentes tarefas por diferentes agentes, bem como partilhar tarefas por diferentes agentes;
- maior escalabilidade, devido à possibilidade de adicionar novos agentes ou tarefas ao sistema, mesmo em tempo real;
- maior robustez, devida à facilidade de construir sistemas sem ponto único de falha.

3.3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA MULTIAGENTE DE RECOMENDAÇÃO

Tendo por base a arquitetura global representada na Figura IV.13 e considerado que a solução de recomendação aqui proposta é suportada por um sistema multiagente, rerepresenta-se na Figura IV.15 a arquitetura da solução, mas já considerando que o sistema de recomendação é baseado num sistema multiagente, pelo que o passará a ser designado por Sistema MultiAgente de Recomendação de Percursos de Evacuação em Edifícios (*SiMARPEE*).

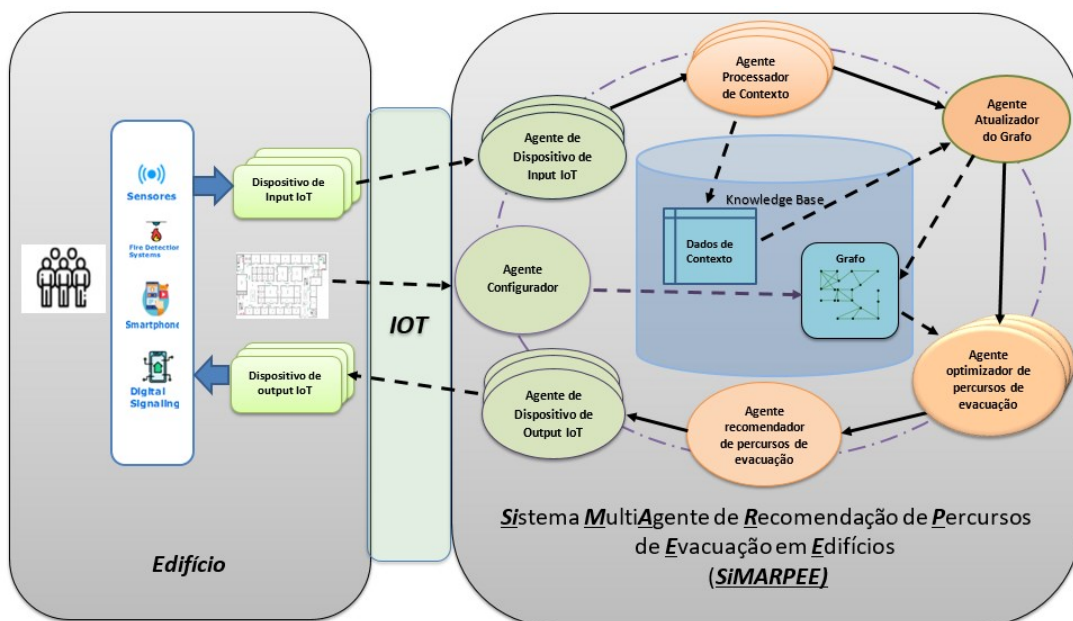


Figura IV.15 Arquitetura da solução de recomendação baseada num sistema multiagente

A arquitetura representada na Figura IV.15 reforça o que tem vindo a ser dito no que se refere à solução de evacuação em caso de incêndio objeto do nosso estudo, seja no que se refere ao papel da *IoT* enquanto suporte do *SiMARPEE* ou quanto à abordagem de recomendação, baseada em contexto, anteriormente apresentada.

3.3.2 MODELO DO SISTEMA MULTIAGENTE

O modelo multiagente do sistema de recomendação *SiMARPEE* aqui proposto considera sete tipos de agentes diferentes, os quais podem ser divididos em dois grupos. Um grupo de agentes que interage com a envolvente do sistema e um outro grupo que é responsável pelo processamento dos dados e produção de recomendações.

No que respeita ao primeiro dos grupos referidos, o modelo considera três tipos de agentes. O *Agente Configurador* é o primeiro desses agentes, o qual pode ser visto como o ponto de arranque do sistema, a quem é transmitida toda a informação relacionada com o edifício e que tem como primeira função criar os restantes seis tipos de agente. Um segundo tipo é o *Agente de Dispositivo de Input IoT*, cujos agentes interagem com os dispositivos de input *IoT* instalados no edifício, tendo cada um destes dispositivos um agente com o qual interage no sistema multiagente. Finalmente, o terceiro tipo de agentes é o *Agente de Dispositivo de Output IoT*, interagindo estes agentes com os dispositivos de output *IoT* existentes no edifício, em que cada um desses dispositivos é representado por um agente no sistema de recomendação.

Relativamente ao grupo de agentes responsável pelo processamento dos dados e produção de recomendações, o modelo considera quatro tipos de agentes diferentes. Um dos tipos de agentes, denominado por *Agente Processador de Contexto*, recebe os dados provenientes dos dispositivos de input *IoT*, processando-os e transformando-os em informação contextual. O modelo prevê um ou mais agentes deste tipo, dependendo dos fatores contextuais envolvidos. O *Agente Atualizador do Grafo* usa a informação de contexto produzida pelo(s) agente(s) processador(es) de contexto para atualizar dinamicamente o grafo, refletindo este, em tempo real, as condições dos percursos de evacuação do edifício. Um outro tipo de agentes, *Agente Optimizador de Percursos de Evacuação*, aplica ao grafo um algoritmo de busca do percurso mais curto, sendo que, no caso presente, “percurso mais curto” significa o percurso com a menor soma de pesos dos troços que o compõem. O quarto tipo de agente,

designado por *Agente Recomendador de Percursos de Evacuação*, na posse da localização dos dispositivos de output *IoT* no edifício, recorre ao agente anterior para determinar os melhores percursos a recomendar aos ocupantes, enviando-os de forma personalizada aos referidos dispositivos de output *IoT*.

3.3.3 CARATERIZAÇÃO DOS AGENTES

Na Figura IV.16, apresenta-se com maior detalhe a arquitetura do sistema multiagente, evidenciando-se as relações entre os diferentes tipos de agentes. De modo a melhor compreender a abordagem multiagente aqui proposta, vamos caraterizar com maior detalhe cada um desses agentes.

3.3.3.1 *Agente Configurador*

O *Agente Configurador* é o agente encarregue da configuração do sistema. Este agente interage com uma aplicação Web responsável pela configuração, gestão e controlo do sistema, da qual recebe toda a informação necessária ao arranque do sistema, designadamente aquela que se refere à caraterização do edifício. Com base nessa informação o agente cria todos os restantes agentes do sistema multiagente, passando-lhes os parâmetros de configuração respetivos. Podem assim resumir-se as seguintes tarefas principais:

- recebe dados caraterizadores do edifício, designadamente: o grafo que irá representar o edifício no sistema de recomendação; o tipo e localização (física e lógica) dos diferentes dispositivos *IoT* instalados no edifício;
- guarda na base de conhecimento toda a informação relativa ao funcionamento do sistema;
- cria cada um dos agentes necessários para o funcionamento do sistema multiagente, passando-lhes a informação que necessitam para o desempenho das tarefas que lhes são delegadas.

3.3.3.2 *Agente de Dispositivo de Input IoT*

Os agentes deste tipo recebem, quando criados pelo *Agente Configurador*, a informação necessária para o seu funcionamento, designadamente a identificação do dispositivo de *input IoT* com quem vão interagir. As suas principais tarefas são as seguintes:

- representar o “seu” dispositivo *IoT* no sistema de recomendação, com o qual interage;
- receber do respetivo dispositivo de *input IoT* os dados medidos pelo sensor respetivo, de acordo com o modelo de interoperabilidade apresentado em IV-2.3.3, transformando-os e guardando-os na base de conhecimento em formato entendível pelo *Agente Processador de Contexto*, notificando este.

3.3.3.3 *Agente de Dispositivo de Output IoT*

Estes agentes são criados pelo *Agente Configurador*, que lhes passa a informação necessária para o seu funcionamento, nomeadamente a identificação do dispositivo de *output IoT* que representam no sistema de recomendação. As suas principais tarefas são as seguintes:

- representar o “seu” dispositivo *IoT* no sistema de recomendação, com o qual interage;
- enviar ao respetivo dispositivo de *output IoT* a informação recebida do *Agente Recomendador de Percursos de Evacuação*, relativa aos percursos de evacuação recomendados, de acordo com o modelo de interoperabilidade apresentado em IV-2.3.3.

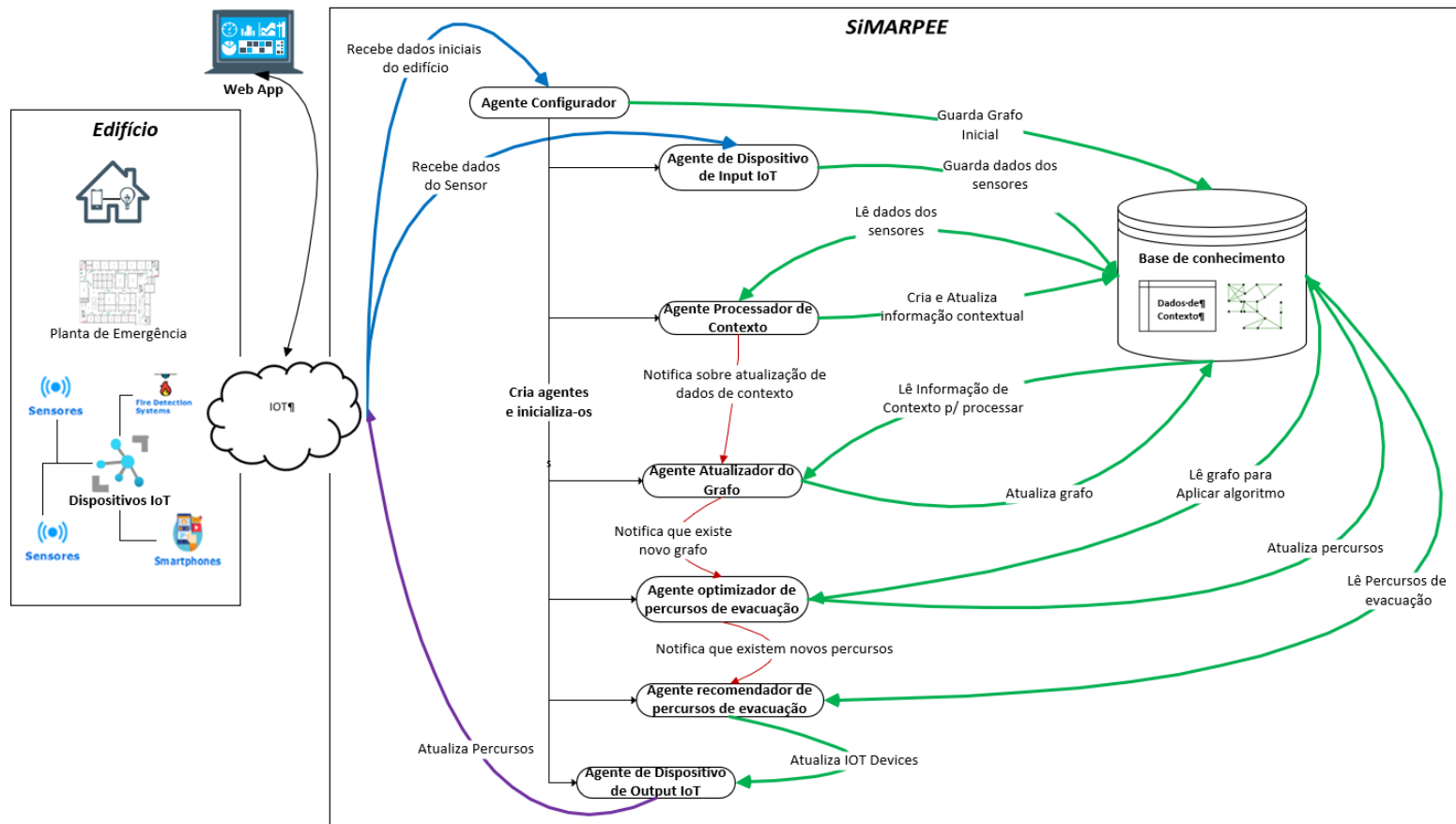


Figura IV.16 Arquitetura do SiMARPEE

3.3.3.4 *Agente Processador de Contexto*

Quando criados pelo *Agente Configurador* recebem deste a informação necessária para o desempenho das tarefas que lhes são delegadas, designadamente no que respeita ao tipo de fatores contextuais que vão processar. Estes agentes agregam e processam os dados de contexto gerados pelos *Agentes de Dispositivo de Input IoT*, transformando esses dados em informação contextual passível de ser usada pelo *Agente Atualizador do Grafo*. O modelo prevê um ou mais agentes deste tipo, dependendo dos fatores contextuais envolvidos.

3.3.3.5 *Agente Atualizador do Grafo*

Este agente também é criado pelo *Agente Configurador*, do qual recebe a informação necessária para o desempenho da sua função no sistema, designadamente o grafo inicial, representativo do edifício e do estado dos percursos de evacuação. As suas principais tarefas são as seguintes:

- usa a informação de contexto produzida pelo(s) agente(s) processador(es) de contexto para atualizar dinamicamente o grafo, o qual, desse modo e em tempo real, passa a refletir as condições dos percursos de evacuação do edifício;
- notifica o *Agente Otimizador de Percursos de Evacuação* após atualizar o grafo.

3.3.3.6 *Agente Otimizador de Percursos de Evacuação*

Como já referido, este agente é também criado pelo *Agente Configurador*. A sua função é usar o grafo atualizado pelo *Agente Atualizador do Grafo* e aplicar-lhe um algoritmo de determinação do percurso mais curto, comumente usado na teoria de grafos. Notifica o *Agente Recomendador de Percursos de Evacuação* sempre que é aplicado o algoritmo ao grafo atualizado e responde a pedidos destes agentes para cálculo do percurso seguro mais curto para cada um dos dispositivos de *output IoT*.

3.3.3.7 *Agente Recomendador de Percursos de Evacuação*

Quando criado pelo *Agente Configurador*, o *Agente Recomendador de Percursos de Evacuação* recebe informação acerca dos dispositivos de *output IoT* instalados no edifício. Tem como função fornecer informação atualizada a esses dispositivos sobre o percurso que estes devem recomendar aos ocupantes do edifício. Tendo conhecimento da localização dos dispositivos de *output IoT* no edifício, recorre ao *Agente Otimizador de Percursos de Evacuação* para determinar os melhores percursos a recomendar aos ocupantes, enviando essa formação a cada um dos dispositivos de *output IoT*.

3.3.3.8 *IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DO SIMARPEE*

Definidas e apresentadas as abordagens de recomendação e multiagente que suportam o *SiMARPEE*, procedeu-se à implementação de um protótipo do sistema de modo a estudar o seu comportamento e, conseqüentemente, permitir responder às questões de investigação formuladas. Na presente secção iremos descrever com detalhe a implementação realizada.

O sistema multiagente foi implementado em Java, com base na *framework JADE (Java Agent DEvelopment Framework)*²¹. Esta *framework*, cuja escolha se deveu, essencialmente, ao facto de se conhecer detalhadamente as suas potencialidades, facilita a implementação de sistemas multiagente e é conforme com o standard FIPA²² da *IEEE Computer Society*.

3.4 *MODELO DE ATUALIZAÇÃO DO GRAFO EM TEMPO REAL*

Como já ficou claro na apresentação das abordagens multiagente e de recomendação desenvolvidas, o grafo representa um papel fundamental na solução aqui proposta. Assim, apresenta-se detalhadamente o modelo de atualização do grafo em tempo real, em que se apoia o *SiMARPEE*.

²¹ <http://jade.tilab.com/>

²² <http://www.fipa.org/>

3.4.1 REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO GRAFO DINÂMICO

Na secção III-2.2 fez-se representação computacional do grafo do edifício que suporta a plataforma de simulação Web. Essa representação assenta em duas matrizes quadradas, em que as linhas e colunas representam os vértices do grafo. A matriz de adjacências MA e a matriz de distâncias (ou de pesos) MD , que permitem escrever G na forma:

$$G = (MA; MD) \quad (IV.10)$$

No entanto, como decorre do modelo de recomendação apresentado e porque as condições ambientais do edifício se alteram com a deflagração do incêndio, podendo impedir determinados percursos de evacuação, há necessidade de atualizar o grafo em tempo real, para que este represente corretamente o edifício. Assim, para um instante t genérico, a equação G toma a seguinte forma:

$$G(t) = (MA(t); MD(t)) \quad (IV.11)$$

A modificação das matrizes de adjacências e de distâncias ao longo do tempo, traduzida pela equação (IV.11), reflete o impacto dos fatores contextuais, como por exemplo, a presença de fumo, de gases tóxicos e a redução de visibilidade, nas condições ambientais dos vários espaços do edifício. Assim, considerando MD_0 , a matriz de distâncias inicial (em $t=0$) e MFc a matriz de valores dos fatores contextuais que impactam nos percursos entre vértices adjacentes, podemos reescrever $MD(t)$ na forma:

$$MD(t) = (MD_0; MFc(t)) \quad (IV.12)$$

Resulta, portanto, que $G(t)$ toma a seguinte forma:

$$G(t) = (MA(t); MD_0; MFc(t)) \quad (IV.13)$$

Assim, na construção computacional do grafo, consideramos três matrizes:

- uma matriz de adjacências $MA(t)$, cujos valores respeitam a expressão:

$$ma(i, j) = \begin{cases} 1 - & \text{se os vértices } i, j \text{ são adjacentes} \\ 0 - & \text{se os vértices } i, j \text{ não são adjacentes} \end{cases} \quad (\text{IV.14})$$

- uma matriz de distâncias MD_0 que reflete o estado inicial do edifício;
- e uma matriz de fatores contextuais $MFc(t)$ que a cada instante t reflete o valor dos fatores contextuais.

Considerando que:

- $md_0(i, j)$ representa os valores de MD_0 , obtidos de acordo com a expressão:

$$md_0(i, j) = \begin{cases} d_{ij} - & \text{se os vértices } i, j \text{ são adjacentes} \\ \infty - & \text{se os vértices } i, j \text{ não são adjacentes} \end{cases} \quad (\text{IV.15})$$

- $mfc(i, j)$, sendo i e j vértices adjacentes, representa os valores que MFc vai tomando ao longo do tempo;

então os valores de $md((i, j), t)$ são obtidos a partir da seguinte equação:

$$md((i, j), t) = (md_0(i, j) + mfc((i, j), t)) \quad (\text{IV.16})$$

Nas secções seguintes apresentam-se os modelos de cálculo dos valores da matriz de fatores contextuais MFc .

3.4.2 ATUALIZAÇÃO DA MATRIZ DE FATORES CONTEXTUAIS

Já definimos anteriormente a matriz de fatores contextuais $MFc(t)$, cujo objetivo é fazer refletir no grafo as condições contextuais dos percursos de evacuação. Na presente secção, descreve-se para o protótipo desenvolvido, como se processa o preenchimento da matriz $MFc(t)$.

Já se referiu anteriormente que a função do *Agente Processador de Contexto* consiste em transformar os dados de contexto gerados pelos *Agentes de Dispositivo de Input IoT* e transformar em informação de contexto que o *Agente Atualizador do Grafo* processa para atualizar o grafo $G(t)$, através da matriz de fatores contextuais $MFc(t)$.

Em IV-2.3.3 apresentou-se um modelo de dados para assegurar a interoperabilidade entre os dispositivos *IoT* instalados no edifício e o sistema de recomendação. No caso dos dispositivos de *input IoT*, o modelo considera uma *string* em formato *JSON* com quatro campos, que definem: (i) o tipo de dispositivo; (ii) a localização do dispositivo; (iii) o valor medido pelo dispositivo; (iv) e quando foi esse valor medido. É a partir desses dados que o *Agente Processador de Contexto* disponibiliza ao *Agente Atualizador do Grafo* a informação de contexto para atualizar a matriz de fatores contextuais.

Em IV-3.2.1 dividiram-se os fatores contextuais em dois grupos, ***GFP*** e ***GFCg***, que incluem, respetivamente, os fatores relacionados com o perigo decorrente do incêndio e os fatores relacionados com o congestionamento dos percursos. Também como já se referiu, os fatores contextuais impactam nos percursos de evacuação, que se traduzem no bloqueio de percursos ou em percursos em que movimento dos ocupantes se torna mais lento. Nas secções seguintes apresentam-se os modelos de cálculo para ambos os tipos de fatores.

3.4.2.1 *MODELO DE CÁLCULO DOS FATORES CONTEXTUAIS DEVIDO AO CONGESTIONAMENTO*

A adaptação das recomendações do sistema de recomendação em função do congestionamento dos percursos de evacuação é um dos aspetos a que o sistema deve ser capaz de responder.

O congestionamento de percursos de evacuação resulta da elevada densidade de pessoas numa determinada secção desse percurso, particularmente próximo de saídas ou de vãos que em certa medida estrangulam o percurso, podendo levar a situações de total bloqueio devido ao facto das pessoas ficarem sem possibilidade de movimentação (Coelho, 1997). Assim, um dos principais objetivos da solução de recomendação aqui proposta é ser capaz de prevenir eventuais situações de bloqueio, através da recomendação de percursos de evacuação seguros alternativos.

A deteção dessas situações faz-se através de dispositivos de entrada *IoT* equipados com os sensores e detetores adequados, cujas medições são encaminhadas para o *Agente Processador de Contexto*, com vista ao seu processamento. A aglomeração de pessoas, designadamente em corredores e junto aos vãos, conduz ao congestionamento das vias, pelo

que o sistema de recomendação deve ser capaz de ter isso em conta aquando da geração das recomendações.

A informação obtida pelos dispositivos de *input IoT* relativa ao número de pessoas num determinado troço do percurso de evacuação, permitirá determinar o tempo de atraso nesse troço. Para determinar esse tempo, recorreremos ao conceito de fluxo específico (F_e), que Coelho (1997, p. 65) define como o “número de pessoas que passam numa determinada secção de um caminho de evacuação por unidade de tempo e por unidade de largura efetiva do elemento de evacuação envolvido”. O fluxo específico pode assim ser dado pelo produto da velocidade de evacuação (V) e da densidade (D), pessoas por metro quadrado, e é dado pela expressão:

$$F_e = V \cdot D \quad (IV.17)$$

Segundo o mesmo autor, o fluxo total (F) é o produto do fluxo específico pela largura (L) da secção, sendo dado por:

$$F = V \cdot D \cdot L \quad (IV.18)$$

Assim, o tempo necessário para que um grupo de pessoas (P) passe através de um vão de largura efetiva L_e , é dado pela expressão:

$$T = \frac{P}{F} = \frac{P}{V \cdot D \cdot L_e} \quad (IV.19)$$

Este tempo T pode ser entendido como o tempo de atraso pela passagem num troço e no nosso modelo é usado para atualizar a matriz $MFc(t)$ e, conseqüentemente, o grafo. Assim, considerando o troço (ou secção) de um percurso de evacuação entre dois nós adjacentes i e j do grafo G e considerando $T((i,j),t)$ o tempo de atraso dos ocupantes nesse troço, no instante t , teremos que:

$$mfc((i,j),t) = V_{NE} \cdot T((i,j),t) \quad (IV.20)$$

Onde V_{NE} é a velocidade a que um ocupante se deslocaria numa emergência de incêndio, num percurso não congestionado ou com baixa densidade de ocupação. A expressão (IV.20

pode ser interpretada como representando um acréscimo de distância entre os nós i e j do grafo G .

Para a determinação da velocidade V_{NE} pode recorrer-se a diversas fontes bibliográficas, referindo-se a norma PD 7974-6:2019 do British Standards Institution (2019) e os trabalhos de Predtechenskii & Milinskii (Predtechenskii & Milinskii, 1978) e Coelho (1997).

Uma primeira abordagem para determinar a velocidade do movimento de evacuação é a apresentada por Coelho (1997) e pela norma PD 7974-6:2019 (British Standards Institution, 2019) e tem por base a expressão (IV.21).

$$V = k(1 - \alpha D) \quad (IV.21)$$

Onde:

V – Velocidade de evacuação (m/s)

k – Constante dependente do tipo de percurso de evacuação

D – Densidade, nº de pessoas por m^2 (p/m²)

α – constante igual a 0,266

Na Tabela IV.5 apresentam-se os valores da constante k para diferentes tipos de percursos de evacuação.

Tabela IV.5 Valores de k para diferentes tipos de percursos (adaptada de Coelho (1997))

Tipo de Percurso de Evacuação	k		
Corredor	1,40		
Galerias	1,40		
Rampas	1,40		
Portas	1,40		
	Espelho (cm)	Cobertor (cm)	
Escadas	19,05	25,04	1,00
	17,78	27,94	1,08
	16,51	30,48	1,16
	16,51	33,02	1,23

Segundo a norma PD 7974-6:2019 (British Standards Institution, 2019) para uma densidade $D < 0,54$ (p/m²) os ocupantes do edifício deslocam-se de acordo com o seu ritmo, não sendo afetados pelos outros ocupantes do espaço. Também de acordo com a referida norma, para

densidades superiores a 3,8 pessoas por metro quadrado, o movimento dos ocupantes cessa levando a bloqueios e estrangulamentos dos percursos.

Pode assim dizer-se que para densidades inferiores a 0,54 p/m² os ocupantes se movimentam sem impedimentos relacionados exclusivamente com o congestionamento de percursos, isto é, em percursos não sujeitos a outros fatores de risco resultantes do incêndio.

Assim, considerando a expressão (IV.20) e considerando que se definiu V_{NE} como a velocidade de evacuação a que um ocupante se deslocaria numa situação de emergência, num percurso não congestionado ou com baixa densidade de ocupação, podemos calcular V_{NE} através da expressão (IV.21). Para a densidade considera-se um valor de 0,54 p/m², por ser a densidade limite para um movimento sem impedimentos, pelo que, a partir da Tabela IV.5, podemos construir a Tabela IV.6, que apresenta os valores de V_{NE} para cada um dos diferentes tipos de percurso.

Tabela IV.6 Cálculo de V_{NE} para cada um dos tipos de percurso

Tipo de Percurso de Evacuação			k	V_{NE} (m/s)
Corredor			1,40	1,20
Galerias			1,40	1,20
Rampas			1,40	1,20
Portas			1,40	1,20
Escadas	Espelho (cm)	Cobertor (cm)		
	19,05	25,04	1,00	0,86
	17,78	27,94	1,08	0,92
	16,51	30,48	1,16	0,99
	16,51	33,02	1,23	1,05

A outra abordagem que aqui se apresenta para o cálculo da velocidade do movimento de evacuação assenta no estudo de Predtechenskii e Milinskii (1978), no qual analisaram exercícios de evacuação e incêndios reais ao longo de três décadas, com especial enfoque no movimento de pessoas em edifícios, seja em situações normais, seja em situações de emergência.

No seu trabalho, em vez de usar a densidade D como definida na abordagem anterior, em pessoas por metro quadrado, Predtechenskii e Milinskii (1978) introduzem o conceito de densidade adimensional (D_a), que tem por base o que os autores definem como a projeção horizontal (P_h) de um ocupante. Assim, considerando um espaço ou troço de um percurso

com uma determinada área (A) e considerando N pessoas no referido troço, pode definir-se a densidade D_a como:

$$D_a = \frac{\sum_{i=1}^N P_{hi}}{A} \quad (IV.22)$$

Os valores de P_h de uma pessoa variam de acordo com a sua característica física, a idade, o tipo de roupa que tem vestida ou o que transporta nos braços, sendo os valores calculados por Predtechenskii-Milinskii (1978) apresentados na Tabela IV.7.

Tabela IV.7 Valores médios para a projeção horizontal (P_h) de uma pessoa (adaptada de Predtechenskii-Milinskii (1978))

Idade	Vestuário consoante a época do ano	Largura média (m)	Espessura média (m)	Área de projeção horizontal (m ²)
Adulto	Verão	0,460	0,280	0,100
	Meia estação	0,480	0,300	0,113
	Inverno	0,500	0,3200	0,125
Jovem		0,430 - 0,380	0,270 - 0,220	0,090 - 0,067
Criança		0,340 - 0,300	0,210 - 0,170	0,056 - 0,040
Adulto	C/ criança nos braços	0,750	0,480	0,285
	C/ bagagem na mão	0,900 - 1,100	0,750	0,350 - 0,825
	C/ mochila	0,500	0,800	0,315
	C/ pacote leve na mão	0,750	0,400	0,235

No seu estudo, Predtechenskii-Milinskii (1978) definem a velocidade (V) em função da densidade (D_a), considerando a expressão (IV.23) para a velocidade normal em movimentações horizontais.

$$V = 112 D_a^4 - 338 D_a^3 + 434 D_a^2 - 217 D_a - 57 \quad (IV.23)$$

A partir da expressão (IV.23), os autores introduzem fatores de correção para determinar as expressões para as circulações verticais e de atravessamento de vãos, para três tipos de movimento diferentes: normal, confortável e de emergência, as quais se apresentam na Tabela IV.8.

Porque a simulação ocorre num contexto de incêndio, no caso do modelo Predtechenskii-Milinskii (1978), interessam em particular as expressões referentes às velocidades em caso de emergência, de modo a determinar o valor V_{NE} .

Tabela IV.8 Expressões de velocidade segundo o modelo de Predtechenskii-Milinskii para diferentes tipos de condições de movimentos e de circulações (adaptada de Coelho (1997))

Movimento	Velocidade nas circulações horizontais (m/min)	
Normal	$V = 112D_a^4 - 338D_a^3 + 434D_a^2 - 217D_a + 57$	(IV.24)
Confortável	$V_c = (0,63 + 0,25D_a) \cdot V$	(IV.25)
Emergência	$V_e = (1,49 - 0,36D_a) \cdot V$	(IV.26)
Movimento	Velocidade nas escadas (ascendente) (m/min)	
Normal	$V_a = V [0,785 + 0,09 \cdot e^{-3,45D_a} \cdot \overleftarrow{\epsilon} \cdot \text{sen}(15,7 \cdot D_a)]$ se $D_a \leq 0,6$	(IV.27)
	$V_a = V [0,785 - 0,10 \cdot \overrightarrow{\epsilon} \cdot \text{sen}(7,85D_a \overrightarrow{\epsilon} + 1,57)]$ se $D_a \geq 0,6$	(IV.28)
Confortável	$V_{ac} = 0,76 \cdot V_a$	(IV.29)
Emergência	$V_{ae} = 1,21 \cdot V_a$	(IV.30)
Movimento	Velocidade nas escadas (descendente) (m/min)	
Normal	$V_d = V [0,775 + 0,44 \cdot e^{-0,39D_a} \cdot \overrightarrow{\epsilon} \cdot \text{sen}(5,61D_a + 0,224)]$	(IV.31)
Confortável	$V_{dc} = 0,76 \cdot V_d$	(IV.32)
Emergência	$V_{de} = 1,21 \cdot V_d$	(IV.33)
Movimento	Velocidade através de vãos (m/min)	
Normal	$V_v = V \cdot [1,17 + 0,13 \text{sen}(6,03D_a - 0,12)]$	(IV.34)
Confortável	$V_{vc} = V_v \cdot (0,63 - 0,25D_a)$	(IV.35)
Emergência	$V_{ve} = V_v \cdot (1,49 - 0,36D_a)$	(IV.36)

Como já se referiu, V_{NE} é velocidade de evacuação a que um ocupante se deslocaria numa emergência, num percurso não congestionado ou com baixa densidade de ocupação.

Também já referimos que essas condições de movimento dos ocupantes acontecem para valores da densidade iguais ou interiores a $0,54 \text{ p/m}^2$. No entanto, nas expressões da Tabela IV.8 a densidade considerada é a densidade adimensional, D_a , pelo que se tem de determinar a que valor de D_a corresponde o valor de $D=0,54 \text{ p/m}^2$.

A partir das definições de D_a e D , obtém-se a expressão (IV.37) que relaciona ambas as densidades através da projecção horizontal P_h .

$$D_a = P_h D \quad (\text{IV.37})$$

A partir da Tabela IV.7 e da expressão (IV.37) apresentam-se na Tabela IV.9 os valores da D_a para $D=0,54 \text{ p/m}^2$, consoante a idade de uma pessoa, a estação do ano e o tipo de roupa que tem vestida, se leva uma criança nos braços ou algum objeto.

Tabela IV.9 Valores de D_a para $D=0,54 \text{ m/s}$

Idade	Vestuário consoante a época do ano	$P_h \text{ (m}^2\text{)}$	D_a Para $D=0,54 \text{ m/s}$
Adulto	Verão	0,100	0,0540
	Meia estação	0,113	0,0610
	Inverno	0,125	0,0675
Jovem		0,090 – 0,067	0,0486 – 0,0362
Criança		0,056 - 0,040	0,0300 – 0,0216
Adulto	C/ criança nos braços	0,285	0,1539
	C/ bagagem na mão	0,350 – 0,825	0,1890 – 0,4450
	C/ mochila	0,315	0,1701
	C/ pacote leve na mão	0,235	0,1269

Considerando que o objetivo é determinar o valor de V_{NE} , tendo por base o modelo de Predtechenskii e Milinskii (1978), ou seja o valor de velocidade mínimo a que um ocupante se pode deslocar sem impedimentos relacionados exclusivamente com o congestionamento de percursos, apresentam-se na Tabela IV.10 os referidos valores calculados para as diferentes D_a indicadas na Tabela IV.9 e das expressões apresentadas na Tabela IV.8.

Tabela IV.10 Valores de V_{NE} de acordo com o modelo de Predtechenskii-Milinskii (Predtechenskii & Milinskii, 1978), numa emergência

			V_{NE} Velocidade do movimento de evacuação em emergência (m/s)			
Idade	Vestuário consoante a época do ano	D_a Para $D=0,54$ m/s	Circulações horizontais	Escadas (ascendente)	Escadas (descendente)	Vãos
Adulto	Verão	0,0540	1,14	0,79	0,93	1,36
	Meia estação	0,0610	1,11	0,77	0,92	1,33
	Inverno	0,0675	1,08	0,76	0,91	1,30
Jovem		0,0486 – 0,0362 ^(*)	1,19	0,82	0,95	1,42
Criança		0,0300 – 0,0216 ^(*)	1,28	0,85	0,97	1,50
Adulto	C/ criança nos braços	0,1539	0,78	0,54	0,75	0,99
	C/ bagagem na mão	0,1890 – 0,4450 ^(*)	0,51	0,34	0,50	0,66
	C/ mochila	0,1701	0,74	0,51	0,72	0,94
	C/ pacote leve na mão	0,1269	0,86	0,60	0,80	1,08

(*) No cálculo das velocidades foi o usado o valor médio

A Tabela IV.6 e a Tabela IV.10 apresentam os valores de V_{NE} que, em conjunto com o tempo de atraso $T_A(i,j)(t)$ e de acordo com a expressão (IV.20), são usados pelo sistema de recomendação para determinar a componente da matriz $MFC(t)$ referente ao congestionamento dos percursos.

3.4.2.2 MODELO DE CÁLCULO DOS FATORES CONTEXTUAIS DEVIDO AO RISCO PROVOCADO PELO INCÊNDIO

Já se referiu que o congestionamento de percursos leva principalmente à redução da velocidade de evacuação e a bloqueios temporários dos percursos de evacuação. Ainda assim, com o modelo proposto na secção anterior espera-se minimizar esse tipo de ocorrências.

Nesta secção descreve-se a forma como se pode aferir o impacto no movimento dos ocupantes derivado das situações de perigo provocadas pelo desenvolvimento e propagação do incêndio, designadamente no que respeita à existência de fumo, chamas, gases tóxicos e elevadas temperaturas.

A norma PD 7974-6:2019 do British Standards Institution (2019) (doravante designada por Norma) refere que o fumo provoca a diminuição da velocidade dos ocupantes, seja pela diminuição da visibilidade, seja pela toxicidade ou irritação das vias respiratórias. A Norma considera os casos de fumo irritante e não irritante, apresentando equações para determinar a velocidade em qualquer um dos casos, resumindo-se na Tabela IV.11, as conclusões no que respeita aos efeitos do fumo na visibilidade e velocidade dos ocupantes.

Nessa Norma é possível identificar um conjunto de aspetos condicionadores da capacidade e vontade dos ocupantes de entrarem ou deslocarem-se sob fumo:

- há que ter em conta a situação em concreto, designadamente se já estão imersos no fumo e a afastar-se do fogo ou se estão num percurso de evacuação; de qualquer modo, os ocupantes tendem a deslocar-se através do fumo se já imersos nele, evitando entrar se houver percursos de evacuação alternativos;
- cada indivíduo terá a sua sensibilidade face ao fumo, pelo que não deixa de ser uma decisão pessoal, no entanto, ocupantes com maior sensibilidade tenderão a evitar mover-se através do fumo
- os ocupantes decidem também em função da densidade do fumo e visibilidade, tendendo a não atravessar o fumo em condições de elevada incerteza;
- um fumo com propriedades que irritam as vias respiratórias é outro aspeto que influencia a decisão dos ocupantes;
- temperaturas do fumo que provocam dor e desconforto tendem a levar os ocupantes a evitar deslocar-se no fumo, procurando caminhos alternativos.

Tabela IV.11 Efeitos do fumo na visibilidade e velocidade dos ocupantes (adaptada da norma PD 7974-6:2019 (2019))

Densidade de fumo e irritação D.m ⁻¹ (Coeficiente de extinção)	Visibilidade aproximada e iluminação difusa	Efeitos reportados
Nenhum	Não afetada	Velocidade de 1.2 m/s
0.5 (1.15) não irritante	2 m	Velocidade de 0.3m/s
0.2 (0.5) irritante	Reduzida	Velocidade de 0.3 m/s
0.33 (0.76) misto	3 m (Aproximadamente)	30% voltam para trás em vez de prosseguir
Limites sugeridos para edifícios com:		
Pequenos espaços e curtas distâncias: D.m ⁻¹ = 0.2 (visibilidade de 5m)		
Grandes espaços e grandes distâncias: D.m ⁻¹ = 0.08 (visibilidade de 10m)		

Para além dos problemas causados pelo fumo, há ainda a considerar as situações decorrentes da exposição dos ocupantes a gases tóxicos e asfixiantes. Esses gases podem ser incapacitantes para os ocupantes do edifício. Existindo na Norma uma relação entre a densidade do fumo e a concentração de gases irritantes e asfixiantes, considerando que para o limite proposto de $D.M^{-1}=0.2$, a maioria dos incêndios permanecem suportáveis por 30 minutos no que respeita a gases asfixiantes. Relativamente às concentrações máximas admissíveis de gases tóxicos como o monóxido de carbono, o dióxido de carbono e o ácido cianídrico, que se formam no decurso de um incêndio, a Norma tem, também, valores de referência. Na Tabela IV.12 apresentam-se valores para os limites admissíveis de CO, em partes por milhão, para incêndio cujo material combustível têm um teor estimado de azoto inferior, ou superior, a 2% da massa total desses materiais.

Tabela IV.12 Limites suportáveis de exposição a gases asfixiantes expressos na concentração de monóxido de carbono, para exposições de 5 e 30 minutos (adaptada da norma PD 7974-6:2019 (2019))

Categoria	Concentração máxima de asfixiante expressa em CO Exposição de 5 minutos µl/l	Concentração máxima de asfixiante expressa em CO Exposição de 30 minutos µl/l
Nitrogénio >2% por massa de combustível ($\frac{CO}{HCN} = \frac{12.5}{1}$)	800	125
Nitrogénio <2% por massa de combustível ($\frac{CO}{HCN} > \frac{50}{1}$)	1200	275
Para ambos os casos assume-se a relação: $\frac{CO_2}{CO} = \frac{10}{1}$		

Um outro fator limitador do movimento dos ocupantes e da sua decisão de prosseguir por um determinado percurso está relacionado com o calor, em face das temperaturas resultantes de um incêndio atingirem valores que o corpo humano não pode suportar. Na Norma são

propostos limites suportáveis para o calor baseados no tempo de resistência à dor para a pele desprotegida. Esses limites, expressos pela radiação e pela temperatura a que as pessoas podem estar sujeitas, são apresentados na Tabela IV.13. Nas situações em que há uma elevada percentagem de vapor de água no ar, como acontece nos incêndios em locais com aspersores (*sprinklers*), a temperatura máxima suportável é de 60°C.

Tabela IV.13 Limite suportável para o calor, devido a radiação ou convecção (adaptada da norma PD 7974-6:2019 (2019))

Modo de transferência de calor	Intensidade	Tempo de tolerância
Radiação	< 2.5 KW/m ²	> 5 minutos
	2.5 KW/m ²	30 segundos
	10.0 KW/m ²	4 segundos
Convecção	<60°C 100% saturado	>30 minutos
	100°C <10% H ₂ O	8 minutos
	110°C <10% H ₂ O	6 minutos
	120°C <10% H ₂ O	4 minutos
	130°C <10% H ₂ O	3 minutos
	150°C <10% H ₂ O	2 minutos
	180°C <10% H ₂ O	1 minuto

Ao longo desta secção apresentaram-se três fatores impactantes no movimento dos ocupantes em caso de incêndio. Esses três fatores, fumo, gases tóxicos e asfixiantes, e calor, são passíveis de serem medidos através de sensores apropriados integrados em dispositivos IoT, pelo que podem ser usados para atualizar a matriz $MFc(t)$ e, conseqüentemente, o grafo.

Tabela IV.14 Impacto do fumo, gases tóxicos e asfixiantes e calor no movimento dos ocupantes

Fator de perigo	Impacto no movimento dos ocupantes
Fumo e gases tóxicos e asfixiantes	Existindo fumo com densidade $D.M^{-1} \leq 0.2$ é possível que um ocupante se mova através dele, no entanto a velocidade do ocupante tenderá a reduzir-se para 0.3 m/s, pelo que é necessário mais tempo para percorrer o troço do percurso afetado pelo fumo. Considerando que a velocidade em condições de inexistência de fumo é de 1.2 m/s (Tabela IV.11) então um ocupante demorará quatro vezes mais tempo a percorrer o referido troço, o que é equivalente a percorrer mais três troços de igual comprimento á velocidade de 1.2 m/s.
	Se $D.M^{-1} > 0.2$ considera-se não haver condições para entrar ou percorrer o troço com fumo, tanto mais que é alta a probabilidade de existência de gases irritantes ou mesmo asfixiantes, pelo que o troço deve ser considerado interdito.
Calor	A partir da Tabela IV.13 podem considerar-se transitáveis percursos em espaços em que a temperatura na camada fria é inferior a 60°C. Para valores superiores é admissível a presença de pessoas, havendo baixas saturações, mas apenas em situações em que as pessoas já estejam no troço, pelo que deve evitar-se a entrada de pessoas num troço com temperaturas superiores a 60°C.

Na Tabela IV.14 resumiram-se os impactos daqueles três fatores no movimento dos ocupantes, seja quanto à velocidade de deslocação do ocupante no caso de já estar no troço,

seja no que respeita à não entrada nesse troço, havendo percurso alternativo. A partir dessa tabela, e considerando que os três fatores referidos tendem a estar presentes simultaneamente num mesmo troço, considerou-se no protótipo do sistema de recomendação desenvolvido um modelo que considera cinco níveis de perigo, de acordo com o apresentado na Tabela IV.15.

Tabela IV.15 Nível de perigo, efeitos no movimento dos ocupantes e a sua tradução no comportamento do sistema de recomendação, através da atualização da matriz $mfc(i,j)(t)$

Nível de Perigo	Efeitos do nível de perigo no movimento dos ocupantes	Valores de $mfc(i,j)(t)$ (Assunções no protótipo desenvolvido)
0	Os ocupantes movem-se à velocidade normal, sendo o seu movimento apenas condicionado pela densidade de pessoas no troço. O grafo não é afetado.	$mfc(i,j)(t)$ não sofre alteração
1	Reflete a existência de fumo no troço, mas com impacto reduzido no movimento dos ocupantes. Uma pessoa nesse troço prosseguirá o seu percurso através do fumo, mas este nível de perigo já se reflete no grafo do edifício através da redução da velocidade dos ocupantes no troço.	Assume-se no modelo um decréscimo de velocidade de 20%, o que significa um acréscimo aparente no comprimento inicial do troço de 20%, pelo que: $mfc((i,j), t) = 0,2md_0(i,j)$
2	Reflete um troço em que a densidade do fumo e o calor são já notórios. Quem se encontra no troço tenderá a prosseguir, desde que assegurados os limites referidos suportáveis referidos anteriormente.	Assume-se no modelo um decréscimo de velocidade de 50%, o que significa uma duplicação aparente no comprimento inicial do troço, pelo que: $mfc(i,j)(t) = 1,0md_0(i,j)$
3	No entanto, o sistema de recomendação deve penalizar os percursos que usem o troço em questão, pelo que tal facto se refletirá no grafo do edifício, de acordo com o apresentado na coluna à direita.	Assume-se no modelo um decréscimo de velocidade expeável de 1.2 m/s para 0.3 m/s, o que significa uma quadruplicação aparente no comprimento inicial do troço, pelo que: $mfc((i,j), t) = 3,0md_0(i,j)$
4	Significam troços em que valores dos fatores ultrapassam os limites suportáveis pelas pessoas, pelo que não são passíveis de serem ocupados. O sistema de recomendação deve considerar esses troços interditos, pelo que o grafo deve ser atualizado em conformidade.	A interdição do troço reflete-se quer na matriz de adjacência, os nós i e j deixam de ser adjacentes, quer na matriz de fatores de perigo, de acordo com o seguinte: $(ma((i,j), t) = 0)$ $mfc((i,j), t) = \infty$
5		

3.4.2.3 CONJUGAÇÃO DOS FATORES DE CONGESTIONAMENTO E DE PERIGO

Como já se referiu anteriormente, é através da atualização dinâmica das matrizes de adjacência, $MA(t)$, e de fatores contextuais, $MFC(t)$, que o grafo vai ser alterado enquanto decorre a simulação da evacuação do edifício. Nas secções IV3.4.2.1 e IV3.4.2.2 apresentaram-se, respetivamente, os modelos relacionados exclusivamente com o

congestionamento e com o perigo resultante diretamente do desenvolvimento e propagação do incêndio. No entanto, durante uma emergência em caso de incêndio ambos os tipos de fatores coexistem, pelo que há que juntar os valores calculados para cada um dos fatores, de modo a determinar o valor de $mfc((i,j),t)$ referente a cada troço do percurso de evacuação, durante a simulação do processo de evacuação do edifício.

A metodologia adotada assenta no nível de risco decorrentes dos perigos relacionados com o fumo, gases tóxicos e calor. Assim, nos níveis de perigo 4 e 5, considerando que os troços ficam interditos, os nós respetivos deixam de ser adjacentes, o que é equivalente a uma distância aparente infinita entre os nós extremos desse troço. Nos restantes níveis de perigo, o valor da matriz de fatores contextuais, $mfc((i,j),t)$, resulta da soma das componentes referentes ao congestionamento e ao perigo. Na Tabela IV.16 apresenta-se com detalhe as expressões para determinar os valores das matrizes de adjacência e de distâncias.

Tabela IV.16 Conjugação dos valores referentes aos fatores referentes ao congestionamento e ao perigo, em função do nível de perigo.

Nível de perigo		Atualização dos valores de devido ao perigo	Atualização dos valores de devido ao Congestionamento
0	Valores da matriz de fatores contextuais	$mfc((i,j),t)$ não sofre alteração	$mfc((i,j),t) = V_{NE} \cdot T((i,j),t)$
	Valores das matrizes de distâncias de adjacências	$md((i,j),t) = md_0(i,j) + V_{NE} \cdot T((i,j),t)$ $ma((i,j),t)$ mantém-se	
1	Valores da matriz de fatores contextuais	$mfc((i,j),t) = 0, 2md_0(i,j)$	$mfc((i,j),t) = V_{NE} \cdot T((i,j),t)$
	Valores das matrizes de distâncias de adjacências	$md((i,j),t) = (md_0(i,j) + 0, 2md_0(i,j) + V_{NE} \cdot T((i,j),t))$ $ma((i,j),t)$ mantém-se	
2	Valores da matriz de fatores contextuais	$mfc((i,j),t) = 1, 0md_0(i,j)$	$mfc((i,j),t) = V_{NE} \cdot T((i,j),t)$
	Valores das matrizes de distâncias de adjacências	$md((i,j),t) = (md_0(i,j) + md_0(i,j) + V_{NE} \cdot T((i,j),t))$ $ma((i,j),t)$ mantém-se	
3	Valores da matriz de fatores contextuais	$mfc((i,j),t) = 3, 0md_0(i,j)$	$mfc((i,j),t) = V_{NE} \cdot T((i,j),t)$
	Valores das matrizes de distâncias de adjacências	$md((i,j),t) = (md_0(i,j) + 3, 0md_0(i,j) + V_{NE} \cdot T((i,j),t))$ $ma((i,j),t)$ mantém-se	
4 e 5	Valores da matriz de fatores contextuais	$(mfc(i,j)(t) = \infty)$	$mfc(i,j)(t) = V_{NE} \cdot T_A(i,j)(t)$
	Valores das matrizes de distâncias de adjacências	$md(i,j)(t) = \infty$ $ma(i,j)(t) = 0$	

4 RESUMO DO CAPÍTULO

Para alcançar os objetivos inicialmente definidos e responder às questões de investigação inicialmente formuladas, desenvolveu-se um sistema multiagente de recomendação baseado em informação contextual, de modo a estudar em que medida esse sistema pode contribuir para melhorar a eficiência da evacuação de edifícios em caso de incêndio. Neste capítulo, descrevem-se todos os passos que conduziram à criação do referido sistema, que se denominou por SiMARPEE. A primeira fase do processo desenvolvimento do sistema foi dedicado à construção do modelo ontológico de suporte à recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio. Esse trabalho, descrito com detalhe no presente capítulo, não só permitiu consolidar o conhecimento na área da evacuação de edifícios, como também fazer realçar o papel da IoT na construção de uma solução capaz de guiar os ocupantes durante a evacuação de um edifício em caso de incêndio. Numa segunda fase, e tendo por base o modelo ontológico anteriormente referido, procedeu-se ao desenvolvimento do artefacto propriamente dito. Esta fase desenrolou-se ao longo de várias etapas, começando por se definir a arquitetura global da solução de recomendação proposta, de seguida definiram-se os fatores contextuais a considerar no sistema de recomendação, que também se descreve do ponto de vista teórico. Na etapa seguinte procedeu-se à definição do sistema multiagente e conseqüente construção do protótipo, apresentando-se também o modelo de atualização do grafo dinâmico, bem como os modelos de atualização dos fatores contextuais considerados na solução proposta.

V EXPERIMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO SISTEMA

1 INTRODUÇÃO

Como referem Hevner, et al. (2004), o resultado da investigação em DSR é um artefacto propositadamente criado para lidar com um problema organizacional importante, como é o caso do problema objeto do presente estudo. Como decorre do que já se referir na secção I-4, duas das atividades fundamentais do DSR são o teste e avaliação do artefacto desenvolvido, no sentido de aferir o seu desempenho face aos requisitos definidos.

1.1 ESCOLHA DA PLATAFORMA PARA TESTE DO ARTEFACTO

Como já se referiu na secção I-4, o artefacto SiMARPEE será testado em ambiente de simulação, recorrendo à plataforma Web de simulação de evacuação a desenvolver no âmbito do trabalho de tese. Essa plataforma, apresentada no capítulo III, considera plantas 2D dos espaços que serão a base dos cenários de experimentação. A opção pelo uso de referida plataforma Web de simulação, em prejuízo de plataformas de simulação de uso geral baseadas em agentes, como é o caso de plataformas como a NetLogo (Tisue et al., 2004), GAMA (Taillandier et al., 2018) ou AnyLogic²³, justifica-se por duas ordens de razões. Por um lado, deve-se ao facto de se pretender implementar no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) um Modelo para Análise das Condições de Segurança de Incêndio em Edifícios (MACSIE) (Coelho & Neto, 2020), o qual foi parcialmente concretizado no âmbito desta tese. Uma segunda ordem de razão, reside no facto de mais do que a mera simulação de um processo de evacuação num edifício, se pretender desenvolver e testar um protótipo, o sistema multiagente de recomendação de percursos de evacuação, com especificidades e características muito particulares, designadamente quanto à mudança de paradigma em matéria de evacuação de edifícios já referido anteriormente, em que o foco deixa de se centrar no conhecimento do comportamento das pessoas, para se centrar no condicionamento desse comportamento, através do fornecimento de informação em tempo real sobre os percursos de evacuação mais seguros e eficientes. Por esse motivo, a utilização da plataforma *WebSimACSIE*, apresentada no capítulo III, ao permitir o acoplamento de

²³ <https://www.anylogic.com/#tab7>, acedido em 4-5-2022

sistemas externos, permite um maior grau de liberdade no desenvolvimento do protótipo a testar.

1.2 AVALIAÇÃO

Relativamente à avaliação do SiMARPEE, já se fez referência que se baseará na comparação dos tempos de evacuação nos diferentes cenários simulados, de modo a avaliar em que medida se faz sentir o impacto do sistema multiagente de recomendação no modo como os ocupantes se movimentam até ficarem em segurança. De qualquer modo importa fazer um breve resumo sobre a avaliação de operações de evacuação.

Segundo Han et al. (2017) a métrica mais usada é o tempo de evacuação (*evacuation clearance time*), que é tipicamente definido como o tempo necessário para que 95% dos ocupantes atinjam uma zona de segurança. Referem, no entanto, os mesmos autores que tal medida pode negligenciar outros aspetos importantes a ter em conta numa operação de evacuação, pelo que, socorrendo-se de L. D. Han et al. (2007), sugerem que se considere uma avaliação segundo quatro parâmetros: (i) tempo de evacuação; (ii) tempo de percurso individual e tempo de exposição do evacuado; (iii) tempo de exposição ao perigo dos evacuados e (iv) perigo para os evacuados em função do tempo de evacuação e da sua localização. Kasereka et al. (2018) também abordam a problemática da avaliação dos modelos de evacuação, referindo que o número de sobreviventes surge como principal parâmetro de avaliação de todos os modelos. Com o propósito de melhorar a avaliação desses modelos, os mesmos autores propõem uma avaliação segundo quatro parâmetros: (i) o número total de sobreviventes; (ii) o n^o total de mortes; (iii) o estado físico médio dos sobreviventes; e (iv) o tempo de evacuação médio.

A escolha da métrica para avaliar o impacto do *SiMARPEE* deve ter em conta o que se considerou ser o objetivo global do trabalho de investigação desenvolvido, estudar em que medida o *SiMARPEE* pode contribuir para melhorar a eficiência na evacuação de edifícios, recomendando em tempo real os percursos de evacuação seguros mais adequados e eficientes a cada momento. Essas recomendações podem contribuir para reduzir a imprevisibilidade do comportamento dos ocupantes, possibilitando que estes se movimentem

por trajetos que apresentem condições de evacuação adequadas, evitando assim que os ocupantes se movimentem por trajetos que conduzam a áreas bloqueadas pela ação do incêndio.

Assim, pode inferir-se do acima exposto que a avaliação do *SiMARPEE* deve incidir sobre o tempo de movimento dos ocupantes, definido como o tempo que os ocupantes demoram desde o início da evacuação até que alcancem um local seguro, comparando esses tempos a partir de testes e simulações, com e sem o *SiMARPEE*, para os diferentes cenários de experimentação. A base de comparação são os tempos calculados apenas com o simulador de evacuação da plataforma *WebSimACSIE*.

Assim, para os diferentes cenários simulados, serão determinados os tempos de movimento dos ocupantes para cada uma das variantes, avaliando desse modo o potencial impacto do *SiMARPEE* na segurança dos ocupantes.

Para cada cenário de experimentação objeto de simulação, a avaliação proceder-se-á de acordo com a seguinte metodologia:

- **Fase 1** - Calcular os valores de referência usando o simulador de evacuação da plataforma *WebSimACSIE*, sem o *SiMARPEE*, de acordo com o seguinte:
 - ✓ Passo 1: Calcular o tempo de movimento máximo de referência (TMR_{ref}), tempo esse que pode definir-se como o tempo máximo que um ocupante pode demorar a chegar a local seguro, numa situação em que não existem bloqueios ou congestionamentos de percursos. Para determinação deste tempo de referência, considerou-se que o ocupante se movimenta a uma velocidade $V_{NE}=1.2$ m/s, de acordo com o apresentado na Tabela IV.6.
 - ✓ Passo 2: Para cada um dos cenários descritos na secção V-2, registar;
 - o tempo para que todos os ocupantes cheguem a local seguro, que é também o tempo de movimento do último ocupante a abandonar o edifício;
 - a percentagem de ocupantes que alcançam local seguro em tempo igual ou inferior ao tempo de movimento máximo de referência;
 - a percentagem de ocupantes que usa cada uma das saídas disponíveis;

- o padrão gráfico do movimento dos ocupantes.
- **Fase 2** – Integrar o *SiMARPEE* na plataforma *WebSimACSIE* e, para cada um dos cenários descritos na secção V-2, registar;
 - o tempo para que todos os ocupantes cheguem a local seguro, que é também o tempo de movimento do último ocupante a abandonar o edifício;
 - a percentagem de ocupantes que alcançam local seguro em tempo igual ou inferior ao tempo de movimento máximo de referência;
 - a percentagem de ocupantes que usa cada uma das saídas disponíveis;
 - o padrão gráfico do movimento dos ocupantes.
- **Fase 3** – Comparar os resultados obtidos nas fases 1 e 2.

2 EXPERIMENTAÇÃO E SIMULAÇÕES

Para aferir em que medida a solução de recomendação de percursos de evacuação desenvolvida no âmbito do presente trabalho de investigação tem impacto na evacuação de um edifício em caso de incêndio, procedeu-se a um conjunto de simulações de evacuação para testar desempenho do sistema multiagente de recomendação *SiMARPEE*, através da sua integração na Plataforma Web de simulação *WebSimACSIE*.

Para realização dos testes, considerou-se um edifício com uma elevada densidade de pessoas por metro quadrado, como é o caso da área referente ao Centro de Congressos do LNEC. Trata-se de um espaço com cerca de 2000 m², com uma lotação para cerca de 300 pessoas, incluindo o pessoal de apoio. O espaço é constituído por uma sala principal para cerca de 200 pessoas sentadas, 5 salas de menor dimensão com uma lotação média de 20 pessoas, uma sala técnica, 6 gabinetes de apoio e um hall de grande dimensão, que em geral é parcialmente ocupado por stands de expositores.

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresenta-se planta do espaço, desenhada com a componente Web da plataforma de simulação *WebSimACSIE*.

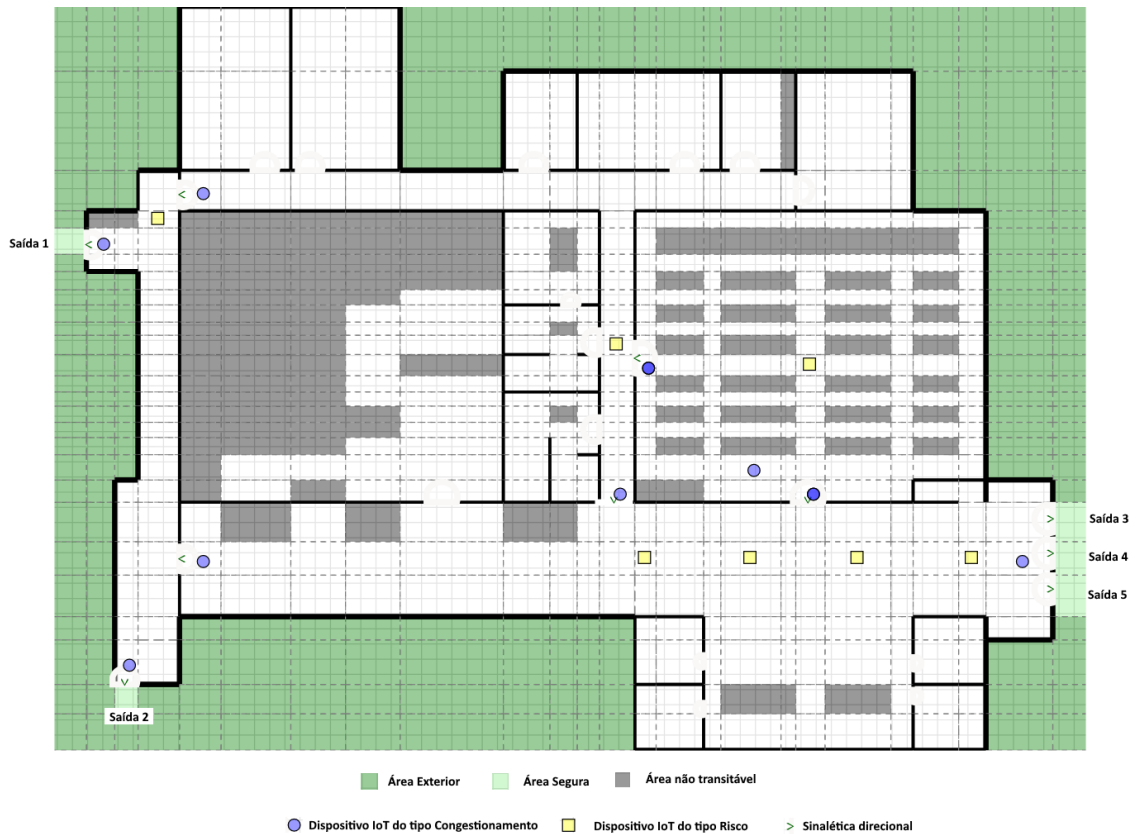


Figura V.1 Planta simplificada do centro de congressos do LNEC, criada com a componente Web da plataforma de simulação *WebSimACSIE*

Considerando que se pretende avaliar o impacto da introdução do SiMARPEE no processo de evacuação, foram realizadas simulações para os seguintes casos:

- CASO 1 - Dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas.
- CASO 2 - Grupo de 30 ocupantes posicionados numa determinada zona do Centro de Congressos.
- CASO 3 - Grupo de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados no Centro de Congressos.

Para cada um dos casos foram efetuadas simulações considerando três situações distintas, relacionadas com a familiaridade dos ocupantes com o edifício:

- **SITUAÇÃO A** - Todos os ocupantes estão familiarizados com o espaço e dirigem-se para a saída de acordo com o seu conhecimento do espaço, pelo que não seguem a sinalização de emergência.
- **SITUAÇÃO B** - Nenhum dos ocupantes conhece o espaço, pelo que prosseguem o seu percurso para a saída seguindo a sinalização de emergência.
- **SITUAÇÃO C** - Metade dos ocupantes conhece o espaço, pelo que se dirigem para a saída de acordo com o seu conhecimento do espaço. Os restantes ocupantes vão prosseguir o seu percurso seguindo a sinalização de emergência

O posicionamento inicial dos ocupantes para cada um dos casos é o mesmo para cada uma das situações simuladas.

3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos com as simulações para cada um dos cenários descritos na secção V-2 e que se resumem na Tabela V.1.

Tabela V.1 Simulações realizadas para os diferentes cenários.

	Sem Incêndio						Com Incêndio					
	Sem SiMARPEE			Com SiMARPEE			Sem SiMARPEE			Com SiMARPEE		
	Situação			Situação			Situação			Situação		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CASO 1	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CASO 2	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CASO 3	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CASO 1 - Dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas CASO 2 - Grupo de 30 ocupantes posicionados numa zona específica do Centro de Congressos CASO 3 - Grupo de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados no Centro de Congressos SITUAÇÃO A - Todos os ocupantes estão familiarizados com o espaço SITUAÇÃO B - Nenhum dos ocupantes conhece o espaço SITUAÇÃO C - Metade dos ocupantes conhece o espaço												

Para qualquer dos cenários, os resultados obtidos são apresentados sob forma de tabela e de imagens. Nas tabelas apresentam-se os resultados obtidos para o tempo de movimento necessário para evacuar todos os ocupantes (ou o tempo de movimento do último ocupante a abandonar o edifício) e para o número de ocupantes evacuados antes de atingido o tempo de movimento de referência (TMRef). As imagens, obtidas da plataforma Web de simulação, registam instantâneos do processo de evacuação, de modo a dar uma perspetiva do padrão do

movimento dos ocupantes durante esse processo, Os resultados são apresentados de modo a possibilitar uma comparação sem necessidade de transitar entre diferentes tabelas ou figuras.

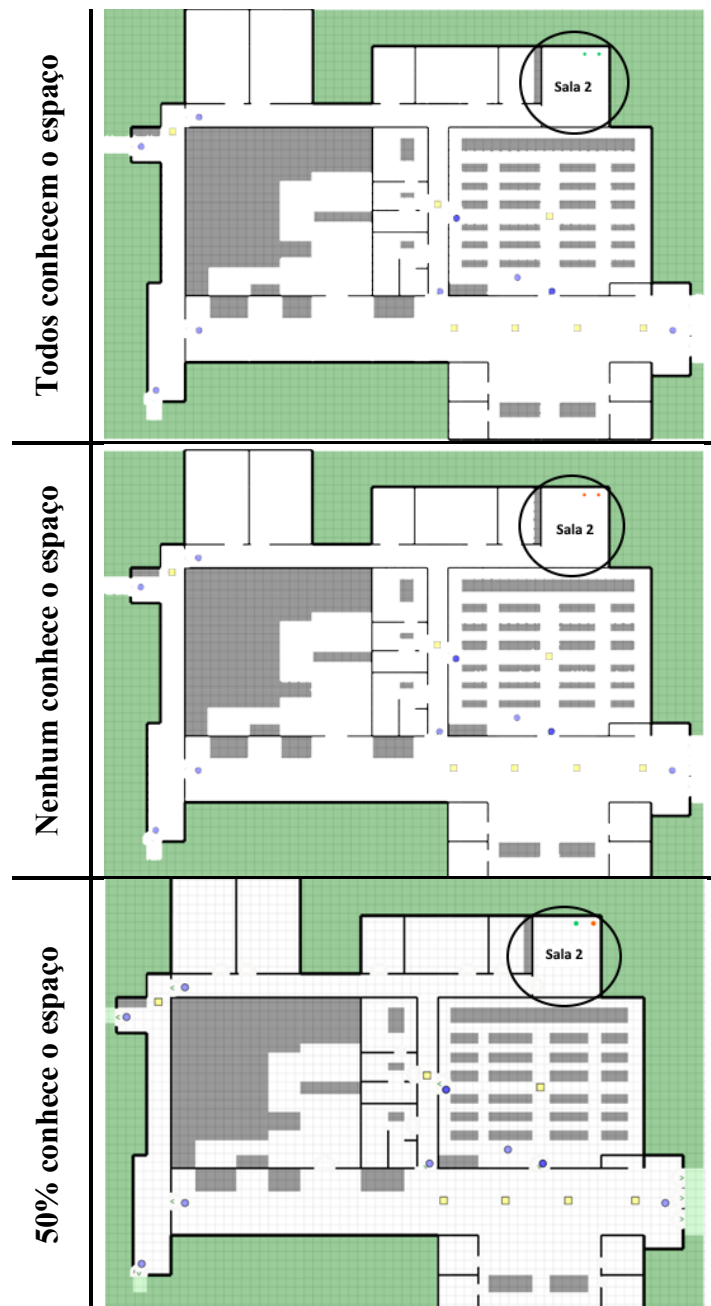


Figura V.2 Posicionamento inicial dos dois ocupantes para cada uma das situações simuladas.

3.1.1 CASO 1 - DOIS OCUPANTES POSICIONADOS, LADO A LADO, EM LOCAL DISTANTE DAS SAÍDAS

Os testes e simulações iniciaram-se para um cenário com dois ocupantes posicionados na sala 2, como se mostra na Figura V.2, para cada uma das situações descritas na Tabela V.1.

Os ocupantes são representados por círculos, em que o de cor verde representa o ocupante familiarizado com o centro de congressos e o de cor laranja representa o ocupante que não conhece o espaço.

3.1.1.1 Cenário sem deflagração de incêndio

Num primeiro conjunto de simulações, considerou-se não existir qualquer condicionamento nos percursos de evacuação, apesar de acionado o alarme de incêndio.

Os resultados apresentados na Tabela V.2 mostram que com o SiMARPEE se obtêm melhorias no processo de evacuação, levando a que num cenário em que não estejam familiarizados com o edifício, ambos os ocupantes abandonam o edifício antes do TMR_{Ref}. As melhorias decorrentes da introdução do SiMARPEE refletem-se também no que respeita ao tempo de movimento necessário para evacuar ambos os ocupantes, como se mostra no gráfico de barras da Figura V.3.

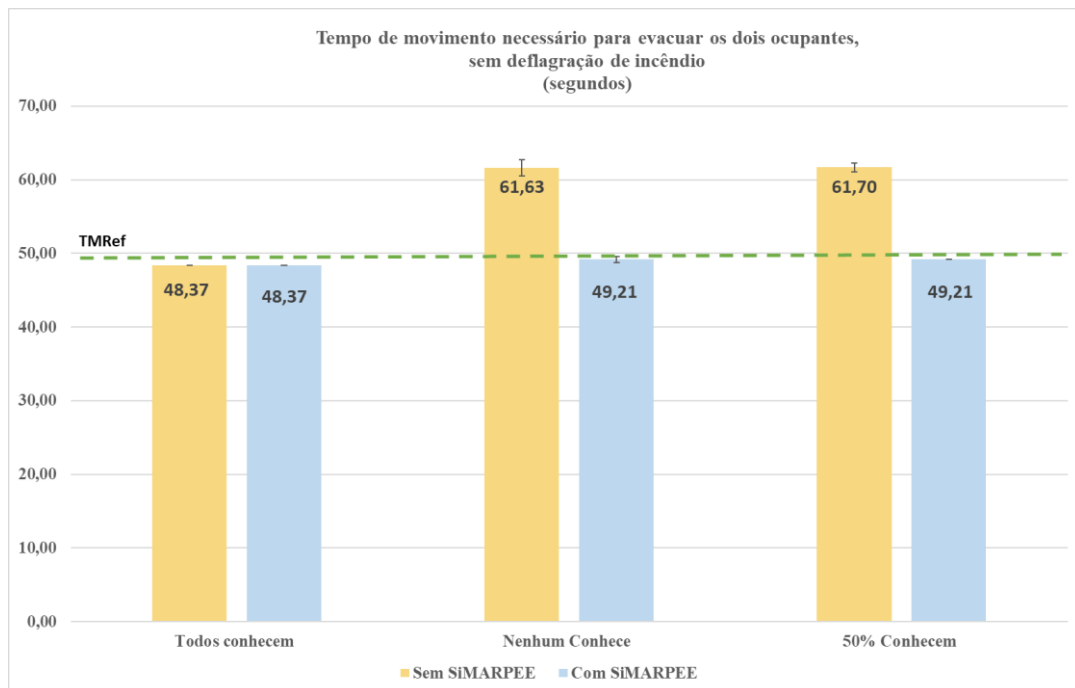


Figura V.3 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os dois ocupantes

Tabela V.2 Resultados obtidos para o caso de dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas, sem deflagração de incêndio.

CENÁRIO DE EXPERIMENTAÇÃO – CENTRO DE CONGRESSOS DO LNEC														
CASO		Dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas (sala 2)												
SEM INCÊNDIO		Foi acionado alarme, mas o incêndio não condicionou qualquer percurso de evacuação												
Nº de Ocupantes no início do incêndio					2									
Tempo de movimento de referência (TMRef) (seg.)					50,51									
Familiaridade com o edifício	Sem SiMARPEE					Com SiMARPEE					COMPARAÇÃO C/ e S/ SiMARPEE			
	Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício		
		(1)	(2)	(3)	(4)		(5)	(6)	(7)	(8)		'(5) - (1)	'(6) - (2)	
	Un.	Seg.	Seg.	%	Un.	Seg.	Seg.	%	Un.	%	Seg.	%		
	Valor Médio	σ				Valor Médio	σ							
Todos conhecem	2	48,37	0,00	-2,14	-4,24%	2	48,37	0,00	-2,14	-4,24%	0	0,00%	0,00	0,00%
Nenhum Conhece	0	61,63	1,09	11,12	22,02%	2	49,21	0,42	-1,30	-2,58%	2	∞	-12,43	-20,16%
50% Conhecem	1	61,70	0,60	11,19	22,15%	2	49,21	0,00	-1,30	-2,57%	1	100,00%	-12,49	-20,24%

Para uma melhor análise dos resultados obtidos, registaram-se todos os movimentos dos dois ocupantes, sendo apresentados na Figura V.4.

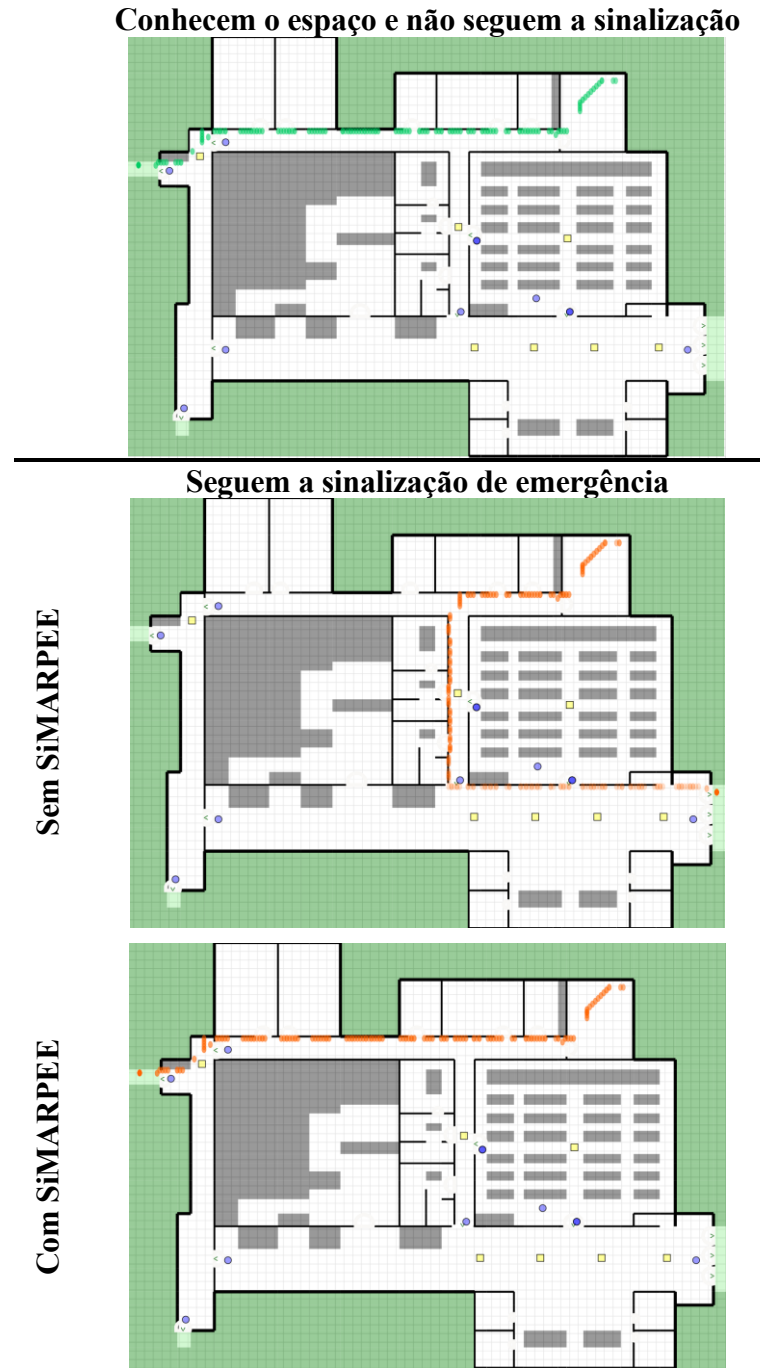


Figura V.4 Percursos de evacuação adotados pelos ocupantes para o caso em que ambos conhecem o espaço e para os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE ativo.

O impacto do SiMARPEE no processo de evacuação é também visível nas imagens apresentadas na Figura V.4, sendo possível verificar que o percurso de evacuação

recomendado pelo SiMARPEE coincide com o percurso seguido por quem conhece o edifício.

3.1.1.2 Cenário com deflagração de incêndio

No âmbito deste cenário, pretende avaliar-se como se movimentam os dois ocupantes numa situação em que um incêndio nas proximidades da saída 1, como se assinala na Figura V.5, tem impacto em áreas transitáveis no edifício, designadamente em consequência do escoamento do fumo.

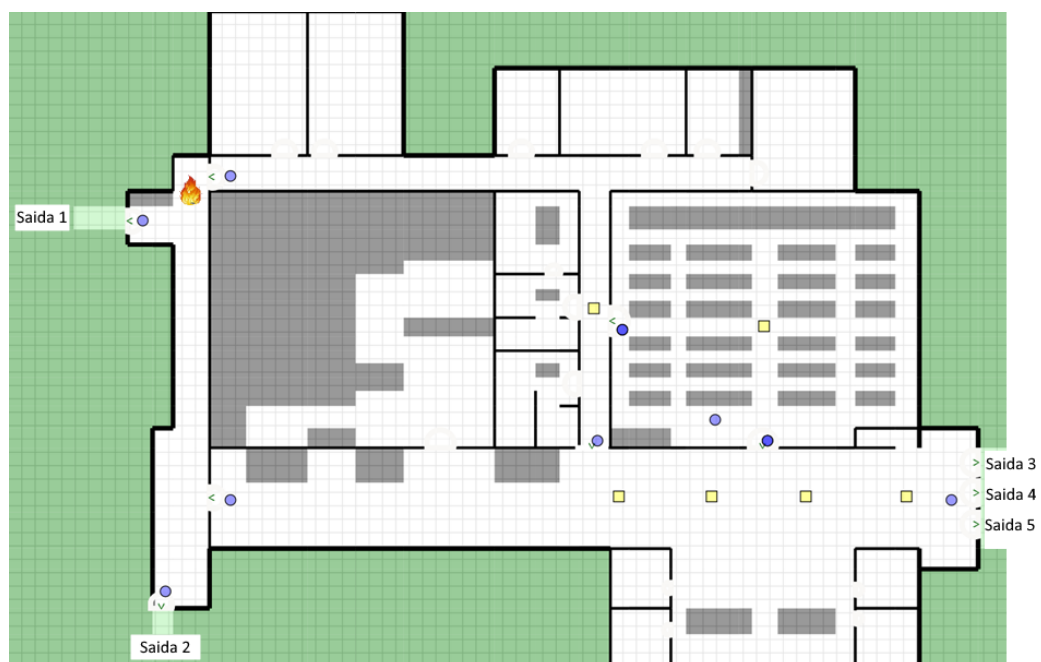


Figura V.5 Planta do Centro de Congressos com indicação das saídas e do local de início do incêndio

Os resultados das simulações realizadas resumem-se na Tabela V.3 e mostram que, com o SiMARPEE ativo, se obtêm melhores no caso em que ambos os ocupantes seguem a sinalização, levando a que seja necessário menos tempo para que os dois ocupantes abandonem o edifício, como se mostra na Figura V.6. Essa melhoria decorrente da introdução do SiMARPEE é mais notória quando se compara o tempo de movimento obtido numa situação em que ambos conhecem o espaço, 71,31 segundos, com o tempo registado na situação em que os dois ocupantes seguem a sinalização recomendado pelo SiMARPEE, 57,88 segundos.

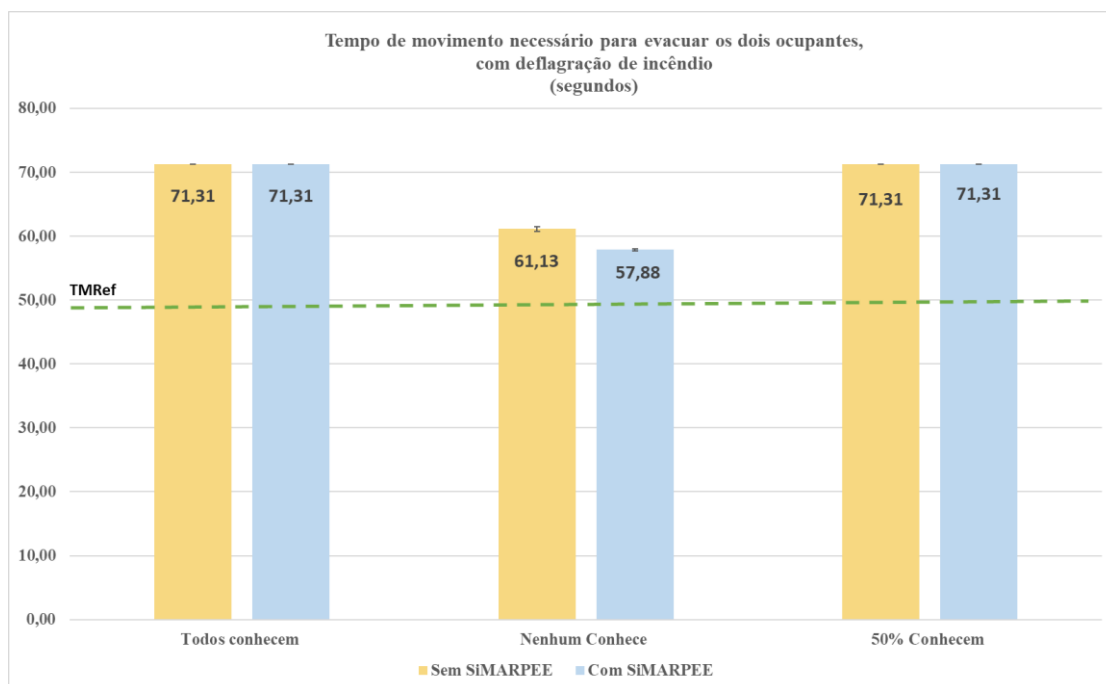


Figura V.6 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar ambos ocupantes, quando há deflagração de incêndio

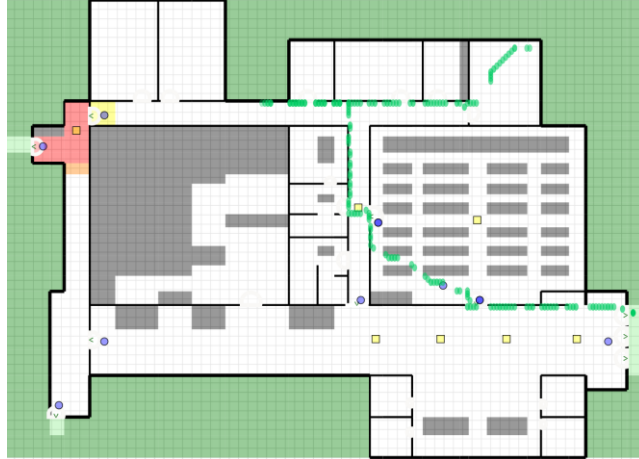
À semelhança do que se fez para o cenário sem deflagração de incêndio, registaram-se e apresentam-se na Figura V.7 todos os movimentos de ambos os ocupantes, para o caso em que o incêndio tem impacto nos percursos de evacuação.

Os padrões registados nas imagens da Figura V.7, permitem também observar o impacto do SiMARPEE no movimento dos ocupantes. As imagens permitem perceber que quando os ocupantes não seguem a sinalização, porque conhecem o edifício, apenas mais tarde se apercebem da localização do incêndio, levando a uma inversão de marcha e, conseqüentemente, a um tempo de movimento superior ao que ocorre quando seguidas as recomendações do SiMARPEE.

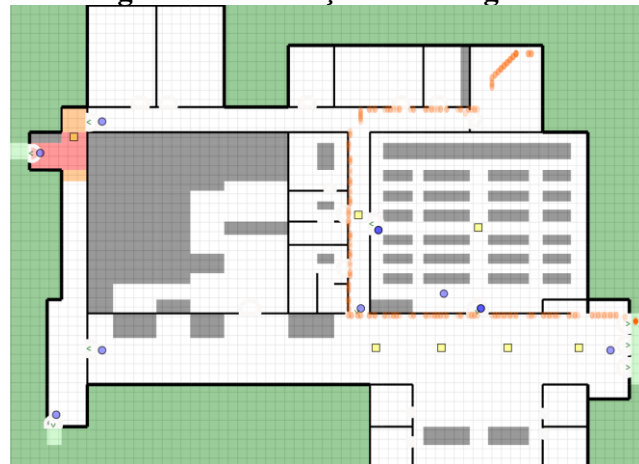
Tabela V.3 Resultados obtidos para o caso de dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas, com deflagração de incêndio.

CENÁRIO DE EXPERIMENTAÇÃO – CENTRO DE CONGRESSOS DO LNEC														
CASO		Dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas (sala 2)												
COM INCÊNDIO		Local de início do incêndio: proximidade da Saída 1												
Nº de Ocupantes no início do Incêndio					2									
Tempo de movimento de referência (TMRef) (seg.)					50,51									
Familiaridade com o edifício	Sem SiMARPEE					Com SiMARPEE					COMPARAÇÃO C/ e S/ SiMARPEE			
	Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef		Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício	
		(1)	(2)	(3)	(4)		(5)	(6)	(7)	(8)	'(5) - (1)		'(6) - (2)	
	Un	Seg.		Seg.	%	Un	Seg.		Seg.	%	Un.	%	Seg.	%
		Valor Médio	σ				Valor Médio	σ						
Todos conhecem	0	71,31	0,00	20,80	41,18%	0	71,31	0,00	20,80	41,18%	0	-	0,00	0,00%
Nenhum Conhece	0	61,13	0,37	10,62	21,03%	0	57,88	0,18	7,37	14,59%	0	-	-3,26	-5,33%
50% Conhecem	0	71,31	0,00	20,80	41,18%	0	71,31	0,00	20,80	41,18%	0	-	0,00	0,00%

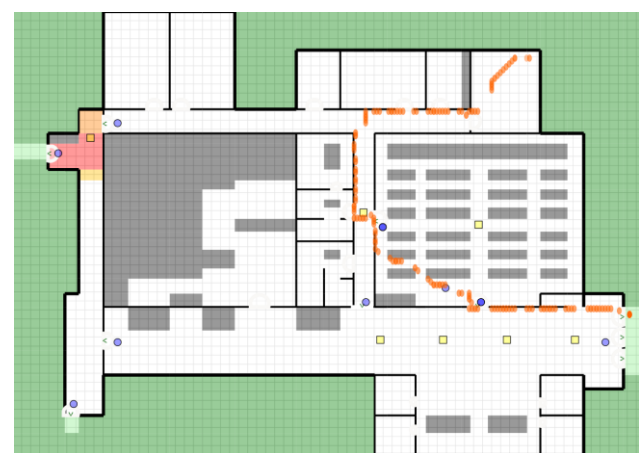
Conhecem o espaço e não seguem a sinalização



Seguem a sinalização de emergência



Sem SiMARPEE



Com SiMARPEE

Figura V.7 Percursos de evacuação adotados pelos ocupantes para o caso em que ambos conhecem o espaço e para os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE ativo

3.1.2 CASO 2 - GRUPO DE 30 OCUPANTES POSICIONADOS NUMA ZONA ESPECÍFICA DO CENTRO DE CONGRESSOS.

Neste cenário, considerou-se a presença de 30 pessoas numa zona do centro de congressos que integra as salas 2 a 4, onde decorrem reuniões e eventos com muita frequência e que se assinalam a sombreado na Figura V.8. O posicionamento inicial dos trinta ocupantes é o que se apresenta na Figura V.9.



Figura V.8 Planta do Centro de Congressos com indicação a sombreado cinzento das salas onde se posicionaram os 30 ocupantes

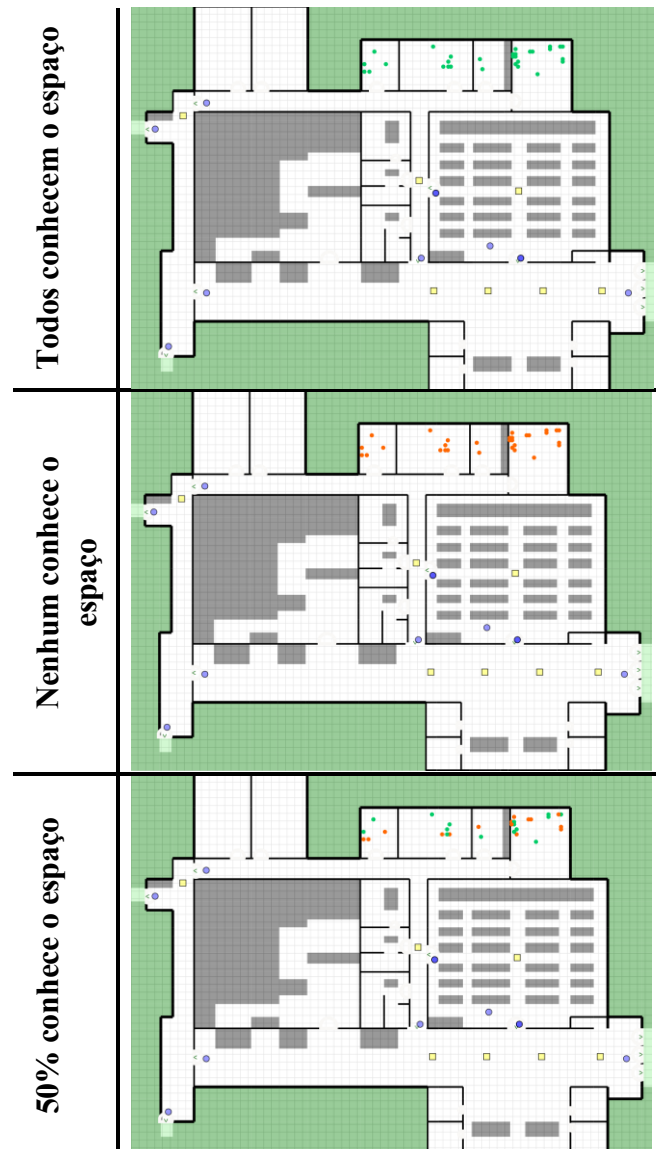


Figura V.9 Posicionamento inicial dos 30 ocupantes para cada uma das situações simuladas

À semelhança da metodologia de testes usada para o cenário apresentado na secção anterior, também neste cenário se realizaram testes e simulações sem e com deflagração de incêndio.

3.1.2.1 *Cenário sem deflagração de incêndio*

Um primeiro conjunto de simulações considerou-se que o alarme de incêndio foi acionado, mas o incêndio não condicionou qualquer percurso de evacuação.

Tabela V.4 Resultados obtidos para o caso de 30 ocupantes a posicionados em zona específica do edifício, sem deflagração de incêndio.

CENÁRIO DE EXPERIMENTAÇÃO – CENTRO DE CONGRESSOS DO LNEC														
CASO	30 ocupantes posicionados em zona específica (salas 2, 3 e 4) do centro de congressos													
SEM INCÊNDIO	Foi acionado alarme, mas o incêndio não condicionou qualquer percurso de evacuação													
Nº de Ocupantes no início do incêndio					30									
Tempo de movimento de referência (TMRef) (seg.)					50,51									
Familiaridade com o edifício	Sem SiMARPEE					Com SiMARPEE					COMPARAÇÃO C/ e S/ SiMARPEE			
	Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef		Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício	
		(1)	(2)	(3)	(4)		(5)	(6)	(7)	(8)	'(5) - (1)		'(6) - (2)	
	Un.	Seg.		Seg.	%	Un.	Seg.		Seg.	%	Un.	%	Seg.	%
		Valor Médio	σ				Valor Médio	σ						
Todos conhecem	28,6	51,54	0,76	1,03	2,05%	28,6	51,54	0,76	1,03	2,05%	0	0,00%	0,00	0,00%
Nenhum Conhece	9,8	64,30	0,80	13,79	27,31%	28,6	51,79	0,19	1,28	2,54%	18,8	191,84%	12,51	19,45%
50% Conhecem	19,0	64,55	0,69	14,04	27,79%	28,6	52,38	0,63	1,87	3,70%	9,6	50,53%	12,17	18,85%

Na Tabela V.4 , apresentam-se os resultados obtidos para o cenário com trinta pessoas posicionadas na zona das salas 2, 3 e 4 do Centro de Congressos. Neste cenário, o alarme de incêndio é acionado, mas o incêndio não chega a provocar qualquer tipo de condicionamento dos percursos de evacuação. Os resultados mostram que com o SiMARPEE se obtêm melhorias no processo de evacuação, seja quanto ao número de ocupantes evacuados antes do TMR_{ref}, seja no que respeita ao tempo de movimento, como se mostra no gráfico de barras da Figura V.10, que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 30 ocupantes.

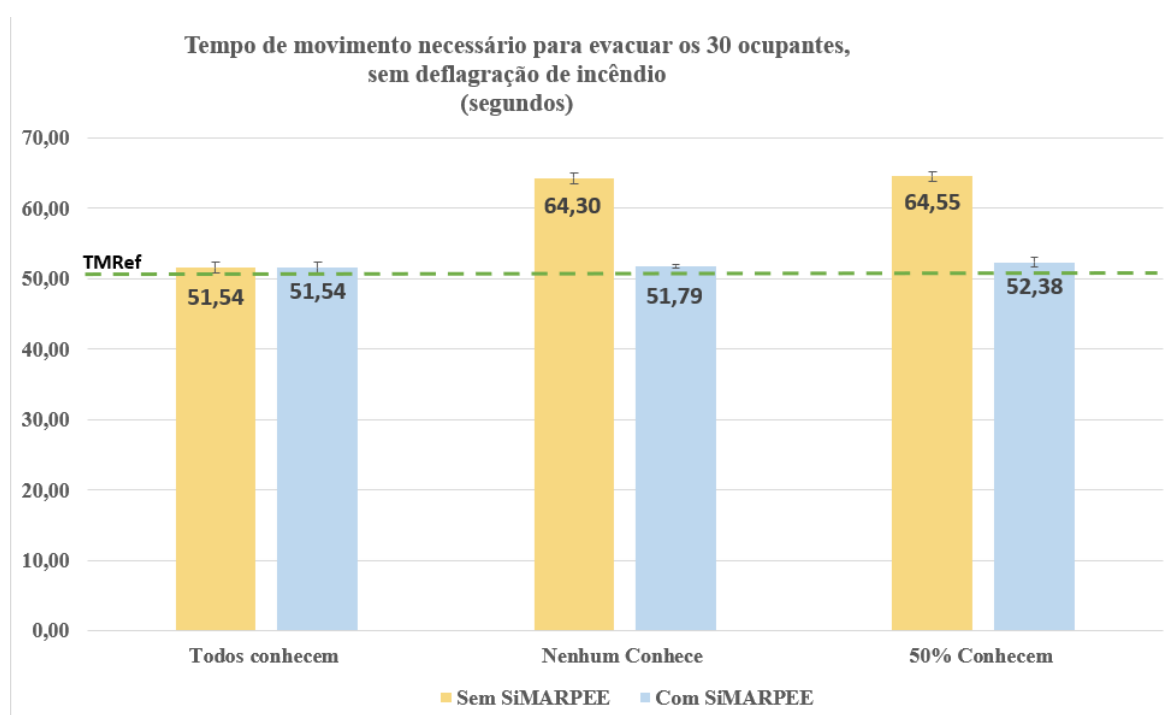


Figura V.10 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 30 ocupantes numa situação em que o incêndio não tem impacto nos percursos de evacuação

O gráfico da Figura V.10 mostra que a introdução do SiMARPEE para recomendar os percursos de evacuação a quem não conhece o espaço leva que estes ocupantes abandonem o edifício em tempos de movimento semelhantes aos de que conhece o espaço e próximos do TMR_{ref}.

Na Figura V.11 apresenta-se o padrão de evacuação, obtido a partir do registo do movimento de todos os ocupantes, sendo visível o impacto do SiMARPEE no percurso seguido pelos ocupantes, levando a um comportamento semelhante ao daqueles que conhecem o espaço.

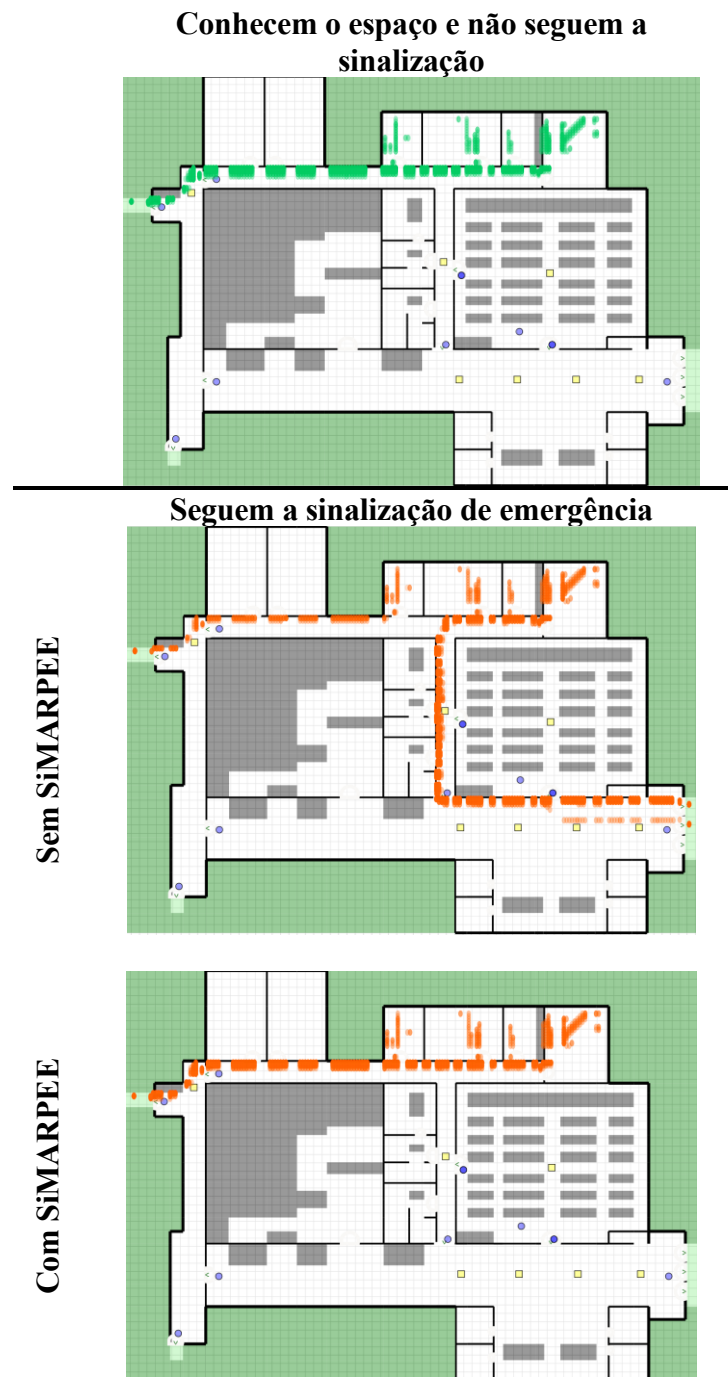


Figura V.11 Percursos de evacuação adotados pelos ocupantes para o caso em que todos conhecem o espaço e para os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE

3.1.2.2 Cenário com deflagração de incêndio

Para os mesmos 30 ocupantes posicionados de acordo com o apresentado na Figura V.9, mas considerando a que o incêndio tem impacto nos percursos de evacuação nas proximidades da saída 1, Figura V.12, foram realizadas várias simulações, tendo-se obtido os resultados que se mostram na Tabela V.5.

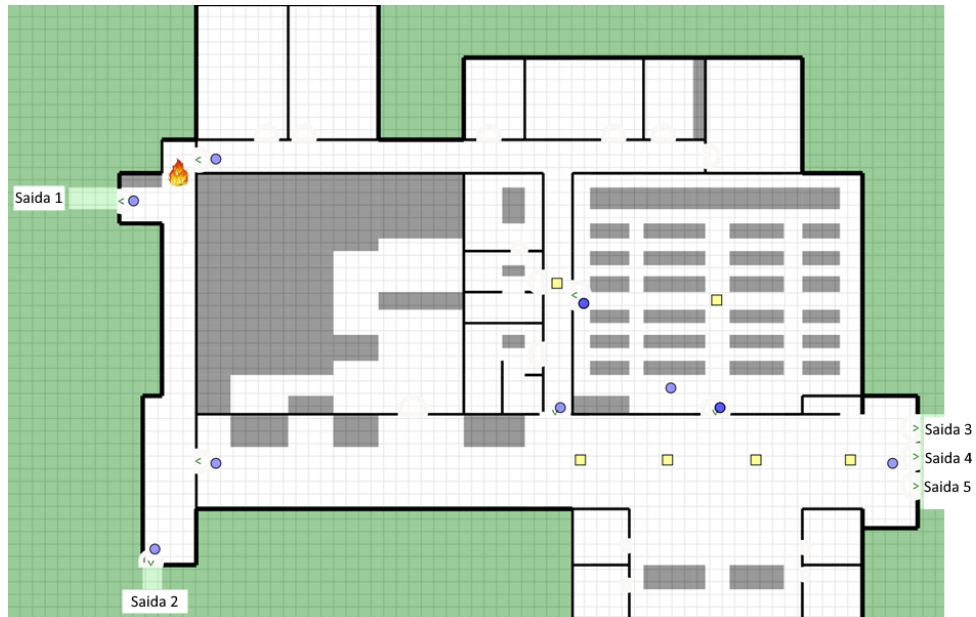


Figura V.12 Planta do Centro de Congressos com indicação das saídas e do local de início do incêndio

Os resultados das simulações efetuadas mostram que num cenário em que o incêndio restringe a circulação junto à saída 1, seguir as recomendações do SiMARPEE dá origem a melhorias no processo de evacuação, levando a que mais ocupantes sejam evacuados antes do TMR_{ef}. Essa melhoria decorrente da introdução do SiMARPEE é também notória no que respeita ao tempo de movimento, como se mostra no gráfico de barras da Figura V.13, que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 30 ocupantes. A introdução do SiMARPEE permite reduzir consideravelmente o tempo necessário para que todos os ocupantes abandonem o edifício, sendo cerca de 32% inferior ao tempo necessário quando os ocupantes conhecendo o edifício, não seguem as orientações do SiMARPEE.

Tabela V.5 Resultados obtidos para o caso de 30 ocupantes a posicionados em zona específica do edifício, sem deflagração de incêndio. O tempo de movimento é o tempo que leva o último ocupante a abandonar o edifício

CENÁRIO DE EXPERIMENTAÇÃO – CENTRO DE CONGRESSOS DO LNEC																
CASO		30 ocupantes posicionados em zona específica (salas 2, 3 e 4) do centro de congressos														
COM INCÊNDIO		Local de início do incêndio: proximidade da Saída 1														
Nº de Ocupantes no início do Incêndio				30												
Tempo de movimento de referência (TMRef) (segundos)				50,51												
Familiaridade com o edifício	Sem SiMARPEE					Com SiMARPEE					COMPARAÇÃO C/ e S/ SiMARPEE					
	Nº de evacuados antes do TMRef		Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef		Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef		Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício	
	(1)		(2)		(3) (4)		(5)		(6)		(7) (8)		'(5) - (1)		'(6) - (2)	
	Un		Seg.		Seg. %		Un		Seg.		Seg. %		Un. %		Seg. %	
			Valor Médio	σ					Valor Médio	σ						
Todos conhecem	0		88,78	0,47	38,27	75,76%	0		88,78	0,47	38,27	75,76%	0	-	0,00	0,00%
Nenhum Conhece	5		95,41	0,95	44,90	88,89%	6,8		60,30	0,37	9,79	19,38%	1,8	36,00%	-35,11	-36,80%
50% Conhecem	2		94,78	0,19	44,27	87,65%	1,4		86,65	0,68	36,14	71,55%	-0,6	-30,00%	-8,13	-8,58%

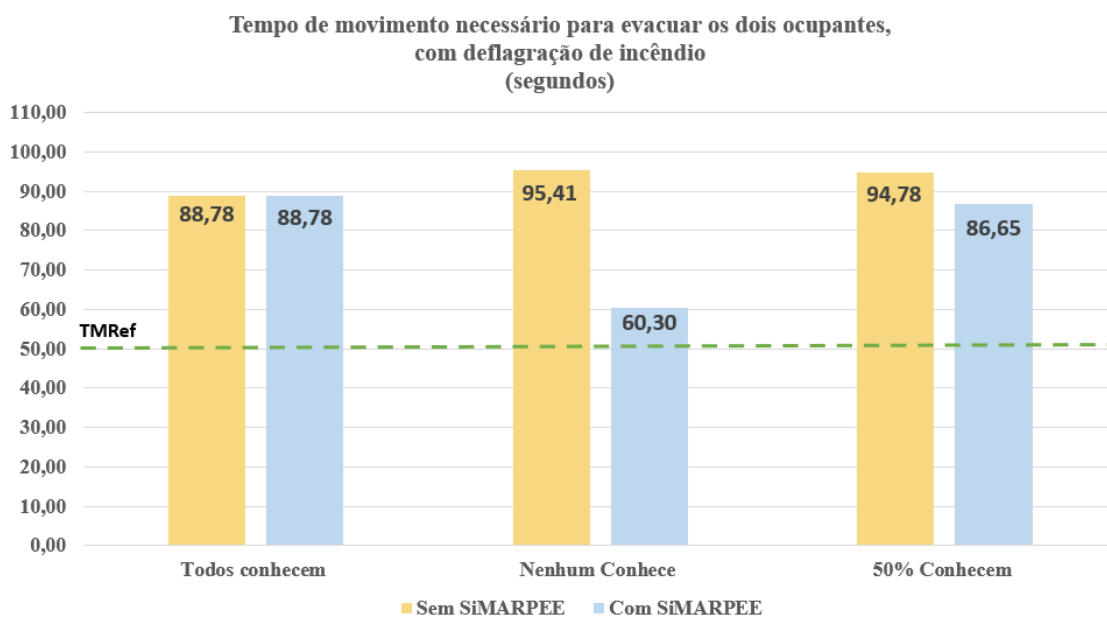


Figura V.13 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 30 ocupantes numa situação em que o incêndio tem impacto nos percursos de evacuação

Na Figura V.14 apresenta-se o padrão de evacuação, obtido a partir do registo do movimento de todos os ocupantes, sendo visível o impacto do SiMARPEE no percurso seguido pelos ocupantes. Verifica-se que ao seguirem as recomendações do SiMARPEE, os ocupantes têm uma perceção mais rápida acerca das restrições de movimento junto à saída 1, levando-os a inverter a marcha mais cedo, necessitando por isso de menos tempo para que todos fiquem em segurança.



Figura V.14 Percursos de evacuação adotados pelos ocupantes para o caso em que todos conhecem o espaço e para os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE

3.1.3 CASO 3 - GRUPO DE 200 OCUPANTES ALEATORIAMENTE POSICIONADOS NO CENTRO DE CONGRESSOS

Na Figura V.15 apresenta-se o posicionamento inicial dos ocupantes para cada uma das situações descritas na Tabela V.1. O posicionamento foi gerado aleatoriamente e mantido

igual para cada uma das situações simuladas de modo a permitir uma correta avaliação por comparação dos resultados obtidos.

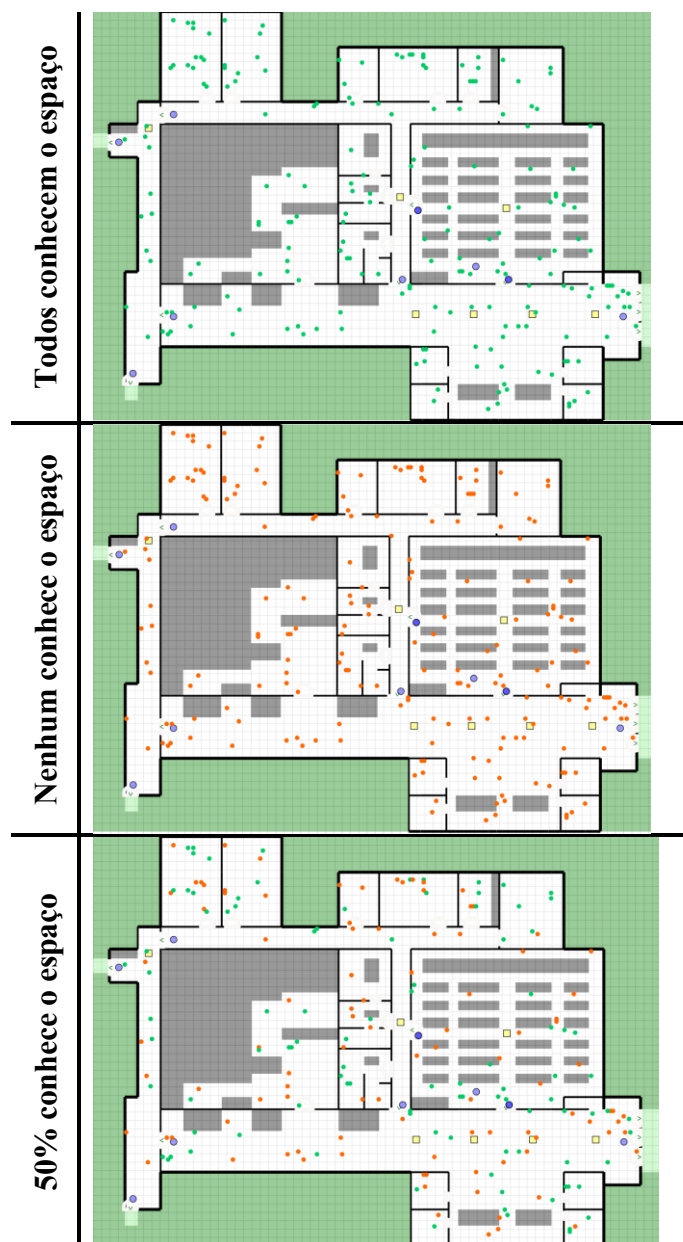


Figura V.15 Posicionamento inicial dos 200 ocupantes para cada uma das situações simuladas

3.1.3.1 Cenário sem deflagração de incêndio

Um primeiro conjunto de simulações considerou-se que o alarme de incêndio foi acionado, mas o incêndio não condicionou qualquer percurso de evacuação, apresentando-se na Tabela V.6, os resultados para esse cenário.

Os resultados mostram que com o SiMARPEE se obtêm melhorias no processo de evacuação, seja quanto ao número de ocupantes evacuados antes do TMR_{ref}, seja no que respeita ao tempo de movimento, como se mostra no gráfico de barras da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 200 ocupantes.

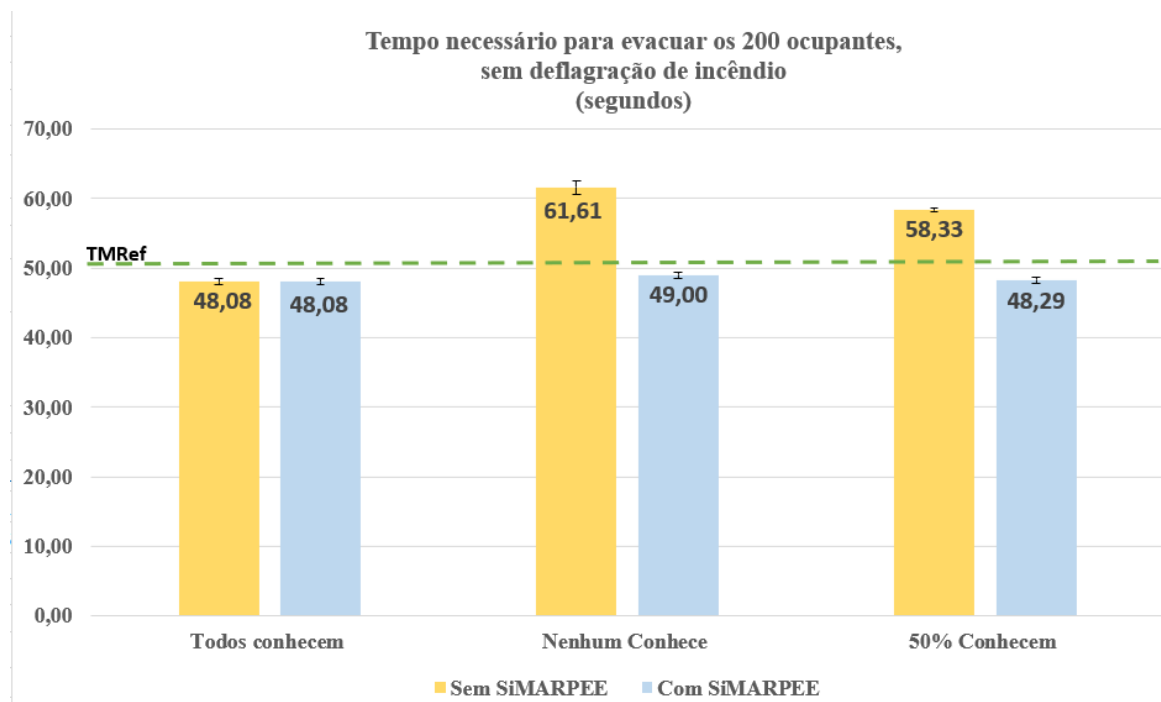


Figura V.16 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 200 ocupantes, numa situação em que o incêndio não causa restrições nos percursos de evacuação

Tabela V.6 Resultados obtidos para o caso de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados, sem deflagração de incêndio. O tempo de movimento é o tempo que leva o último ocupante a abandonar o edifício

CENÁRIO DE EXPERIMENTAÇÃO 1 – CENTRO DE CONGRESSOS DO LNEC														
CASO	Grupo de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados no Centro de Congressos													
SEM INCÊNDIO	Foi acionado alarme, mas o incêndio não condicionou qualquer percurso de evacuação													
Nº de Ocupantes no início do incêndio					200									
Tempo de movimento de referência (TMRef) (seg.)					50,51									
Familiaridade com o edifício	Sem SiMARPEE					Com SiMARPEE					COMPARAÇÃO C/ e S/ SiMARPEE			
	Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef		Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício	
		(1)	(2)	(3)	(4)		(5)	(6)	(7)	(8)	'(5) - (1)		'(6) - (2)	
	Un	Seg.		Seg.	%	Un	Seg.		Seg.	%	Un.	%	Seg.	%
		Valor Médio	σ				Valor Médio	σ						
Todos conhecem	200	48,08	0,37	-2,43	-4,80%	200	48,08	0,37	-2,43	-4,80%	0	0,00%	0,00	0,00%
Nenhum Conhece	181	61,61	1,01	11,10	21,98%	200	49,00	0,48	-1,51	-2,99%	19	10,50%	-12,61	-20,47%
50% Conhecem	191	58,33	0,29	7,82	15,49%	200	48,29	0,46	-2,22	-4,40%	9	4,49%	-10,05	-17,22%

Para uma melhor comparação dos resultados obtidos, registaram-se instantâneos com a localização dos ocupantes em dois momentos diferentes da simulação.

Com o SiMARPEE desligado, apresentam-se na Figura V.17 instantâneos do movimento dos ocupantes aos 16 e 32 segundos da simulação, para cada uma das situações simuladas, sendo possível verificar a diferença no padrão de evacuação para cada um dos casos.

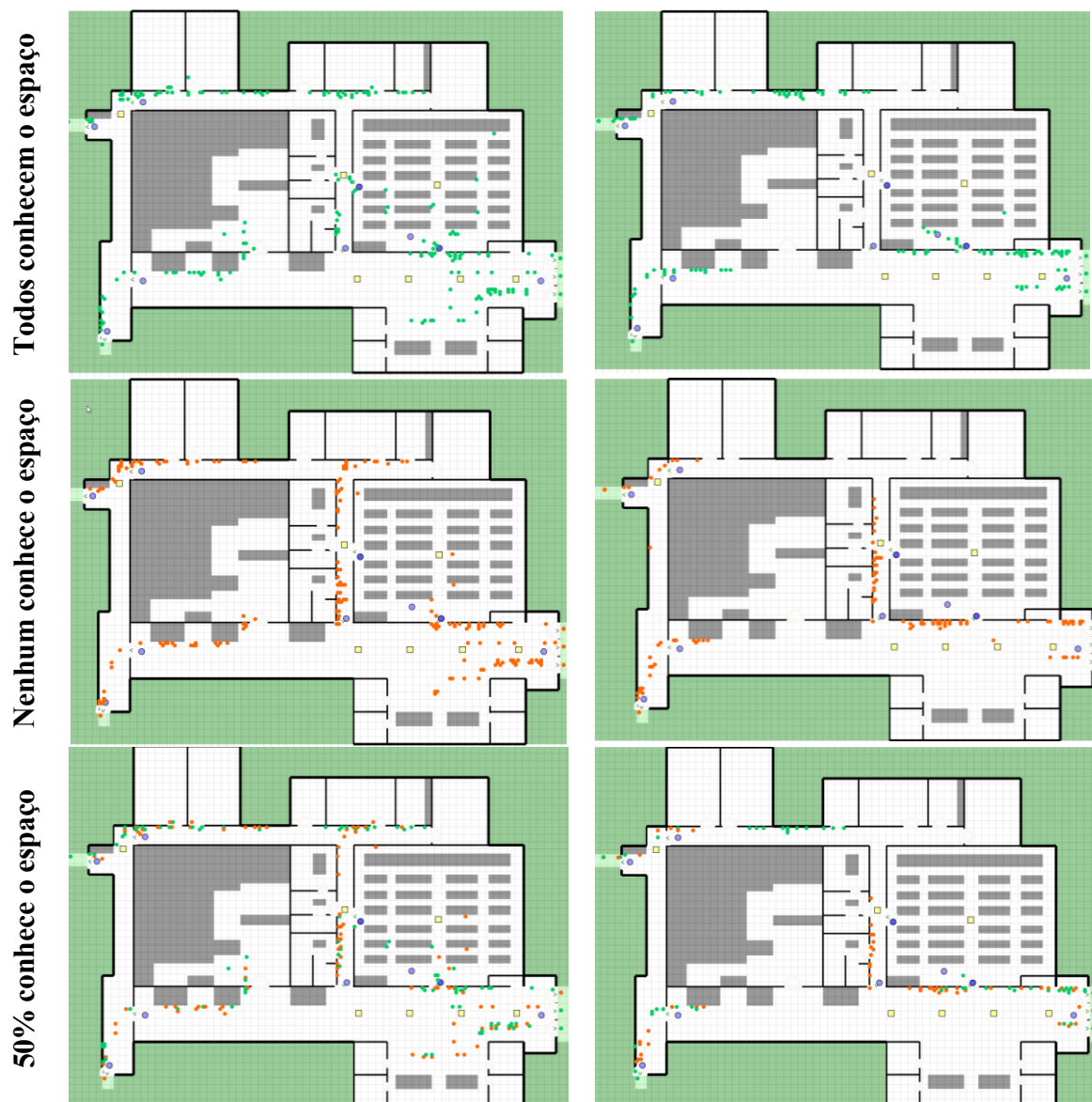


Figura V.17 Comparação do padrão de evacuação para cada um dos casos testados, sem incêndio e sem SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 32 segundos da simulação (imagens da esquerda e direita respectivamente)

Na Figura V.18 os instantâneos referem-se a simulações com o SiMARPEE ativo, sendo possível verificar o impacto do sistema de recomendação nos percursos adotados pelos ocupantes que não conhecem o espaço e por isso seguem a sinalização de emergência, sendo que esta é atualizada em tempo real pelo SiMARPEE.

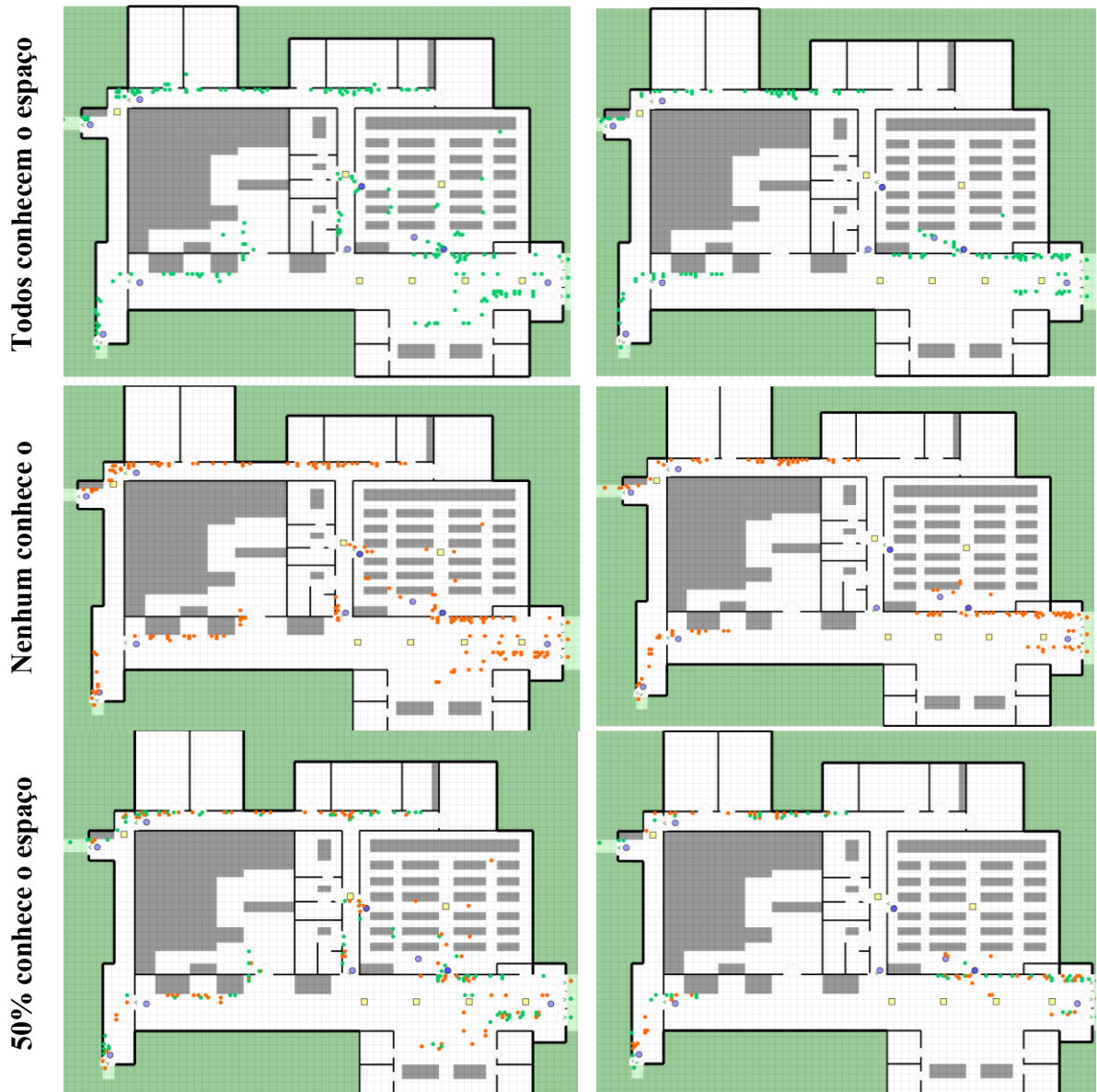


Figura V.18 Comparação do padrão de evacuação para cada um dos casos testados, sem incêndio e com SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 32 segundos da simulação (imagens da esquerda e direita respectivamente)

Na Figura V.19 apresentam-se imagens que permitem comparar o padrão de evacuação entre os casos em que os ocupantes conhecem e não conhecem o espaço, sendo que neste caso a comparação é feita sem e com o SiMARPEE. Como o SiMARPEE recomenda os percursos

seguros mais curtos, o padrão de evacuação é semelhante para quem conhece e para quem não conhece o espaço, confirmando os resultados apresentados na Tabela V.6.

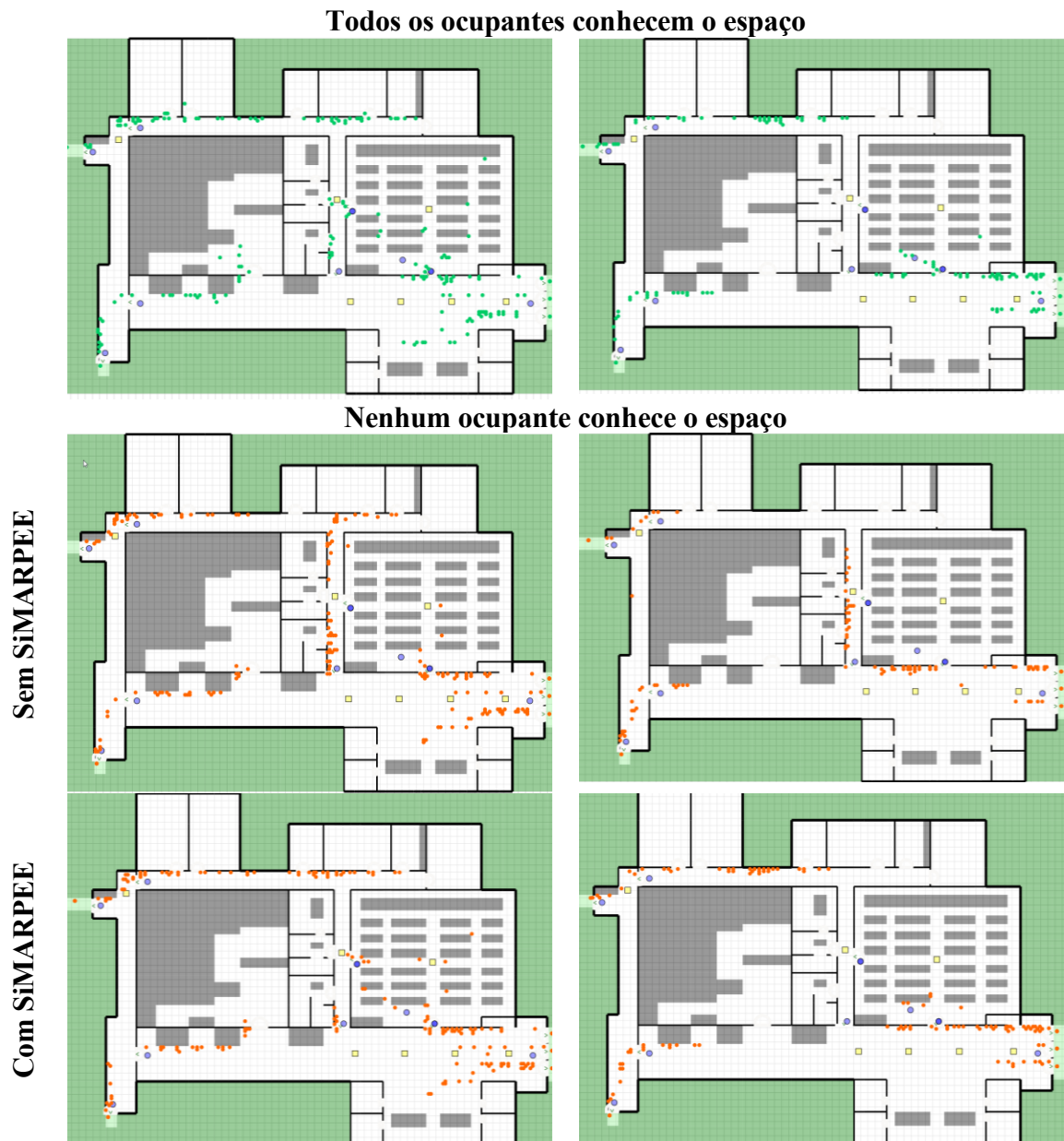


Figura V.19. Compara o padrão de evacuação no caso em que todos conhecem o espaço com os casos em que nenhum conhece, mas sem e com o SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 32 segundos da simulação (imagens da esquerda e direita respetivamente)

Para uma melhor visualização das vantagens obtidas com a introdução do SiMARPEE, registaram-se todos os movimentos dos 200 ocupantes, como se tivessem deixado pegadas durante o seu movimento para sair do edifício. Esse registo é apresentado na Figura V.20.

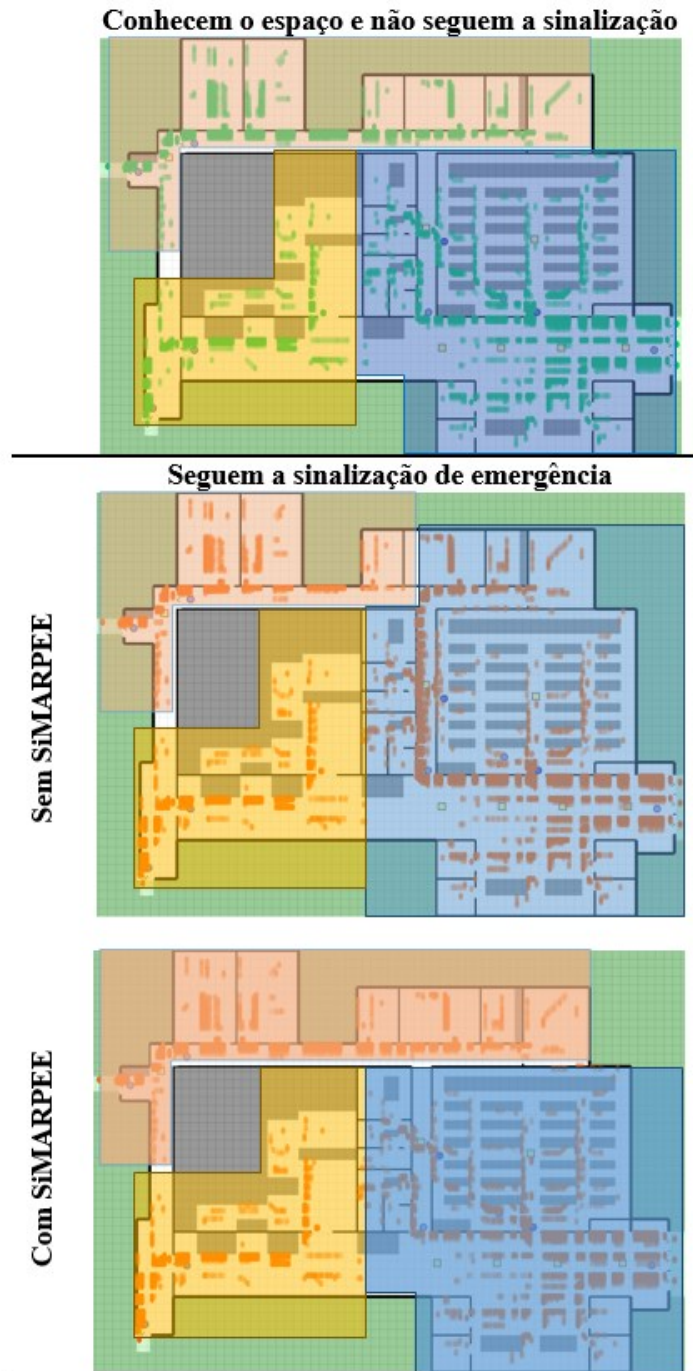


Figura V.20 Registo de todos os movimentos dos 200 ocupantes agrupados por saídas.

As imagens da Figura V.20 realçam três conjuntos de ocupantes, agrupados de acordo com as saídas usadas para abandonar o edifício. As zonas sombreadas com cor laranja agrupam as áreas do edifício em que os ocupantes se dirigiram para a saída 1. Os ocupantes nas zonas sombreadas com cor amarela dirigiram-se para saída 2. Por último, nas zonas

sombreadas com cor azul os ocupantes abandonaram o edifício por uma das saídas 3, 4 ou 5.

Os padrões registados na Figura V.20 confirmam o já referido no que respeita ao impacto da presença do SiMARPEE, verificando-se que o padrão do movimento dos ocupantes com o SiMARPEE ativo é igual ao padrão que resulta do movimento dos ocupantes que conhecem o edifício.

Finalmente, o gráfico de barras da Figura V.21 apresenta distribuição dos ocupantes por saída usada para abandonar o edifício, ficando também clara as semelhanças entre o cenário em que os ocupantes não seguem a sinalização porque conhecem o edifício e o cenário em que os ocupantes, não conhecendo o edifício, seguem a sinalização recomendada pelo SiMARPEE:

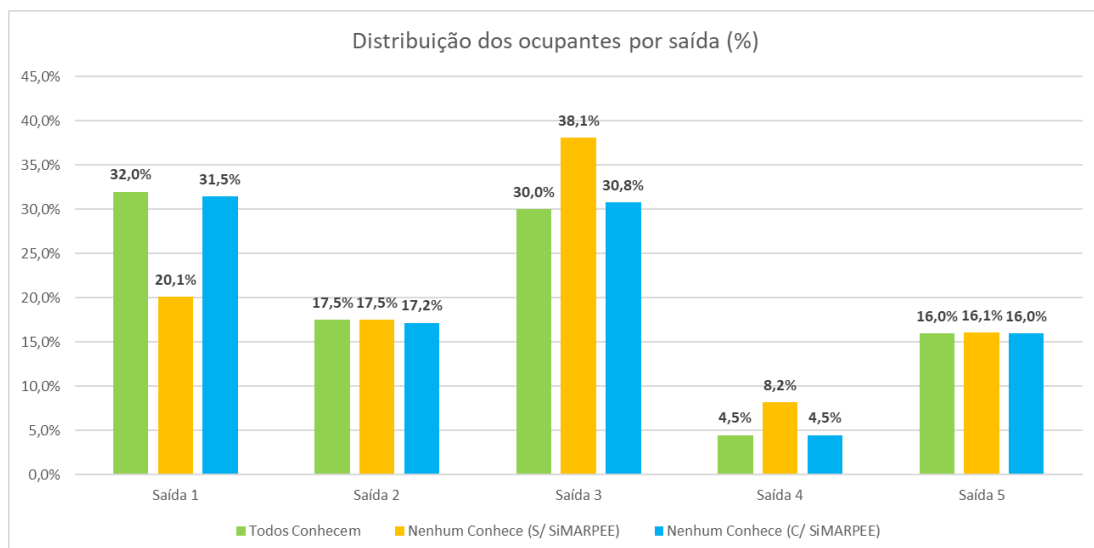


Figura V.21 Distribuição dos 200 ocupantes por saída usada para abandonar o edifício.

3.1.3.2 Cenário com deflagração de incêndio

Apresentaram-se na secção anterior os resultados obtidos para um cenário em que soa o alarme de incêndio, mas não existe impacto do incêndio sobre os percursos de evacuação. Os resultados que a seguir se apresentam, consideram um cenário em que a deflagração e propagação de incêndio impactam diretamente nos percursos de evacuação. Na Figura V.22 identifica-se a localização do início da deflagração do incêndio, junto à saída 1. O

posicionamento inicial dos ocupantes é o mesmo que no cenário anterior e que já foi apresentado na Figura V.15.

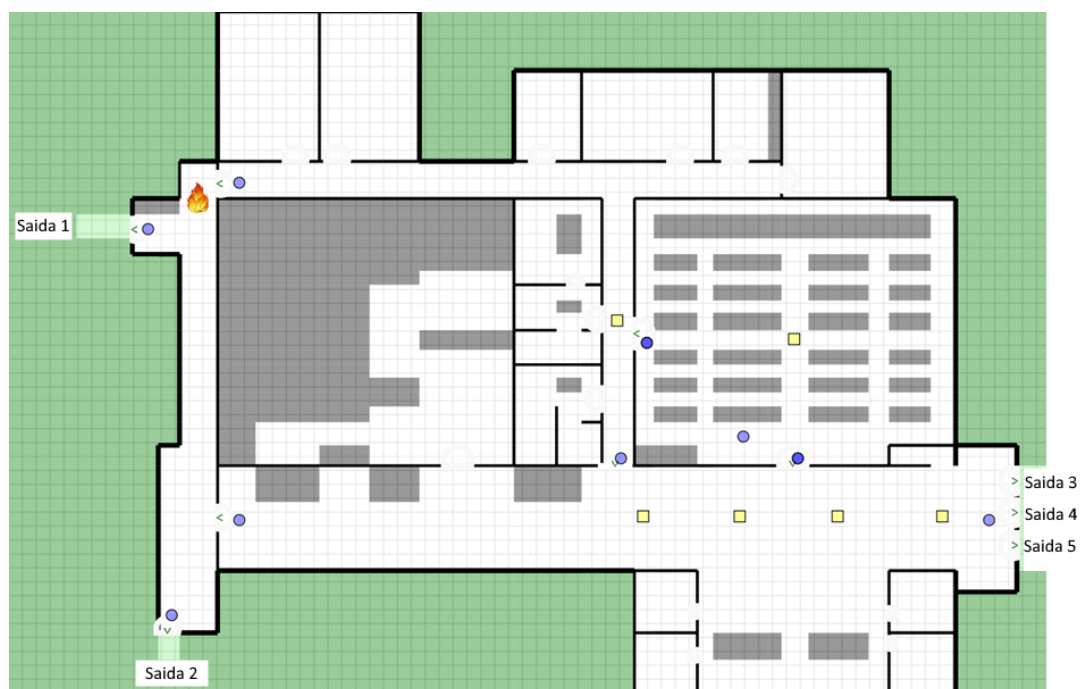


Figura V.22 Planta do Centro de Congressos com indicação das saídas e do local de início do incêndio.

Tabela V.7 Resultados obtidos para o caso de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados no Centro de Congressos do LNEC, com deflagração de incêndio

CENÁRIO DE EXPERIMENTAÇÃO – CENTRO DE CONGRESSOS DO LNEC														
CASO		Grupo de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados no Centro de Congressos												
COM INCÊNDIO		Local de início do incêndio:				proximidade da Saída 1								
Nº de Ocupantes no início do Incêndio						200								
Tempo de movimento de referência (TMRef) (segundos)						50,51								
Familiaridade com o edifício	Sem SiMARPEE					Com SiMARPEE					COMPARAÇÃO C/ e S/ SiMARPEE			
	Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef	Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício (segundos)		Diferença para o TMRef		Nº de evacuados antes do TMRef		Tempo de movimento do último ocupante a sair do edifício	
		(1)	(2)	(3)	(4)		(5)	(6)	(7)	(8)	'(5) - (1)		'(6) - (2)	
	Un	Seg.		Seg.	%	Un	Seg.		Seg.	%	Un.	%	Seg.	%
	Valor Médio	σ				Valor Médio	σ							
Todos conhecem	143	97,82	0,54	47,31	93,66%	143	97,82	0,54	47,31	93,66%	0	0,00%	0,00	0,00%
Nenhum Conhece	148	100,25	0,48	49,74	98,47%	149	80,53	1,01	30,02	59,42%	1	0,61%	-19,72	-19,67%
50% Conhecem	146	99,08	0,48	48,57	96,16%	148	93,40	0,66	42,89	84,92%	2	1,58%	-5,67	-5,73%

Na Tabela V.7, apresentam-se os resultados obtidos para um cenário com 200 pessoas numa situação em que ocorre deflagração e propagação de incêndio nas proximidades da saída 1. À semelhança do cenário em que não existe propagação de incêndio, os resultados mostram o impacto positivo da presença do SiMARPEE, seja quanto ao número de ocupantes evacuados antes do TMR_{ref}, seja no que respeita ao tempo de movimento, como se mostra no gráfico de barras da Figura V.23, que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 200 ocupantes.

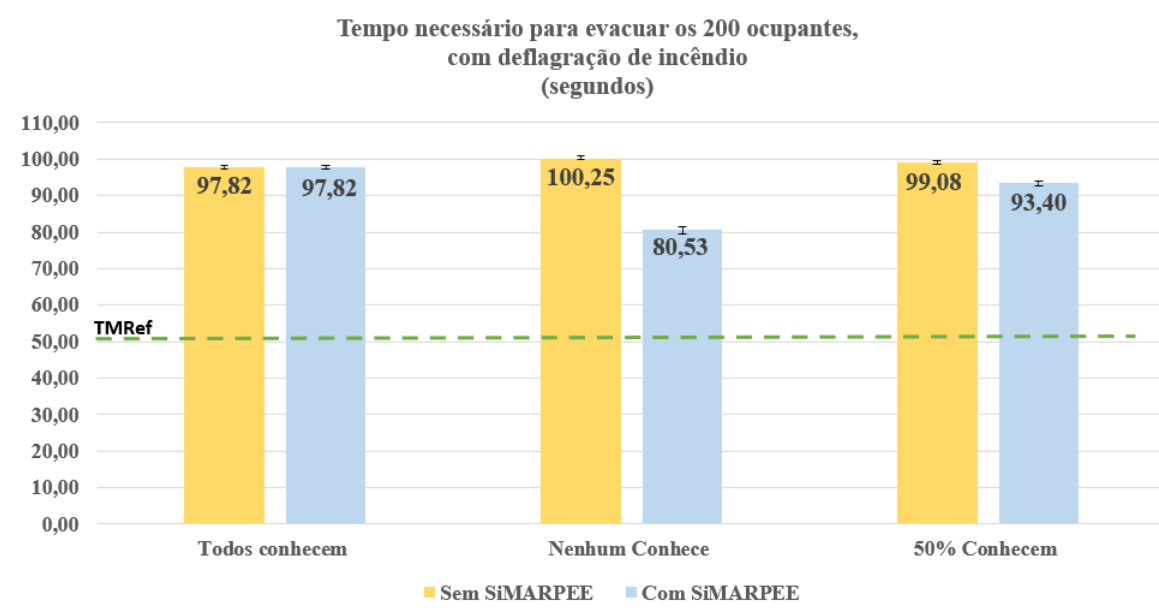


Figura V.23 Gráfico de barras que compara o tempo de movimento necessário para evacuar os 200 ocupantes, numa situação em que o incêndio restringe e bloqueia o espaço transitável na proximidade da saída 1.

O gráfico de barras mostra que na simulação com incêndio, durante a qual existem restrições nos percursos de evacuação, o tempo necessário para evacuar os duzentos ocupantes inicialmente no centro de congressos é 17,7% inferior quando todos os ocupantes seguem as recomendações do SiMARPEE.

Para complementar os resultados apresentados na Tabela V.7, registaram-se imagens do processo de evacuação, que se apresentam na Figura V.24 para o cenário sem o SiMARPEE e na Figura V.25 para o cenário com o SiMARPEE ativo. As imagens mostram a diferença dos padrões de evacuação para cada uma das situações simuladas.

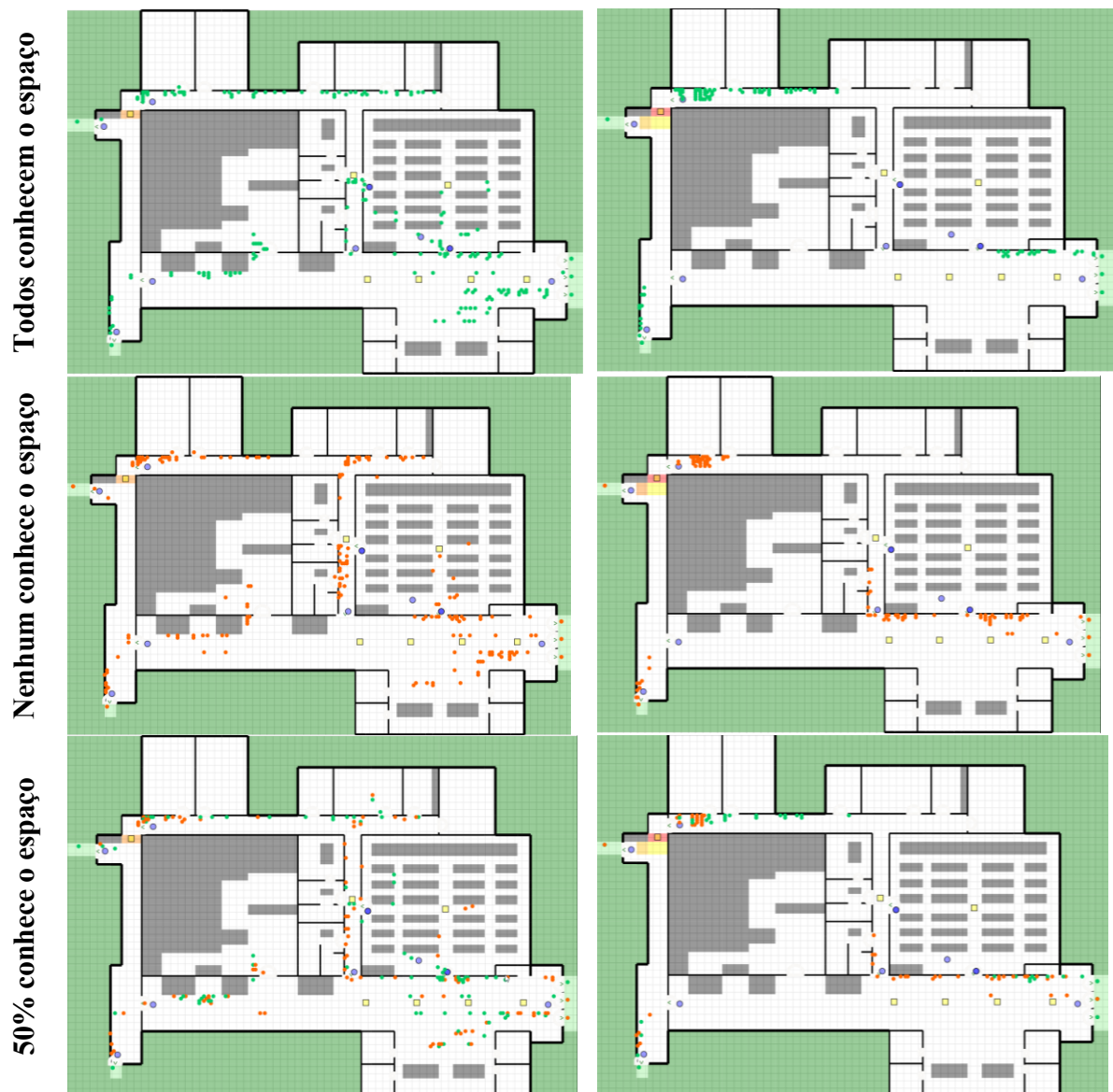


Figura V.24 Comparação do padrão de evacuação para cada um dos casos testados, com incêndio e sem SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 50 segundos da simulação (imagens da esquerda e da direita respectivamente)

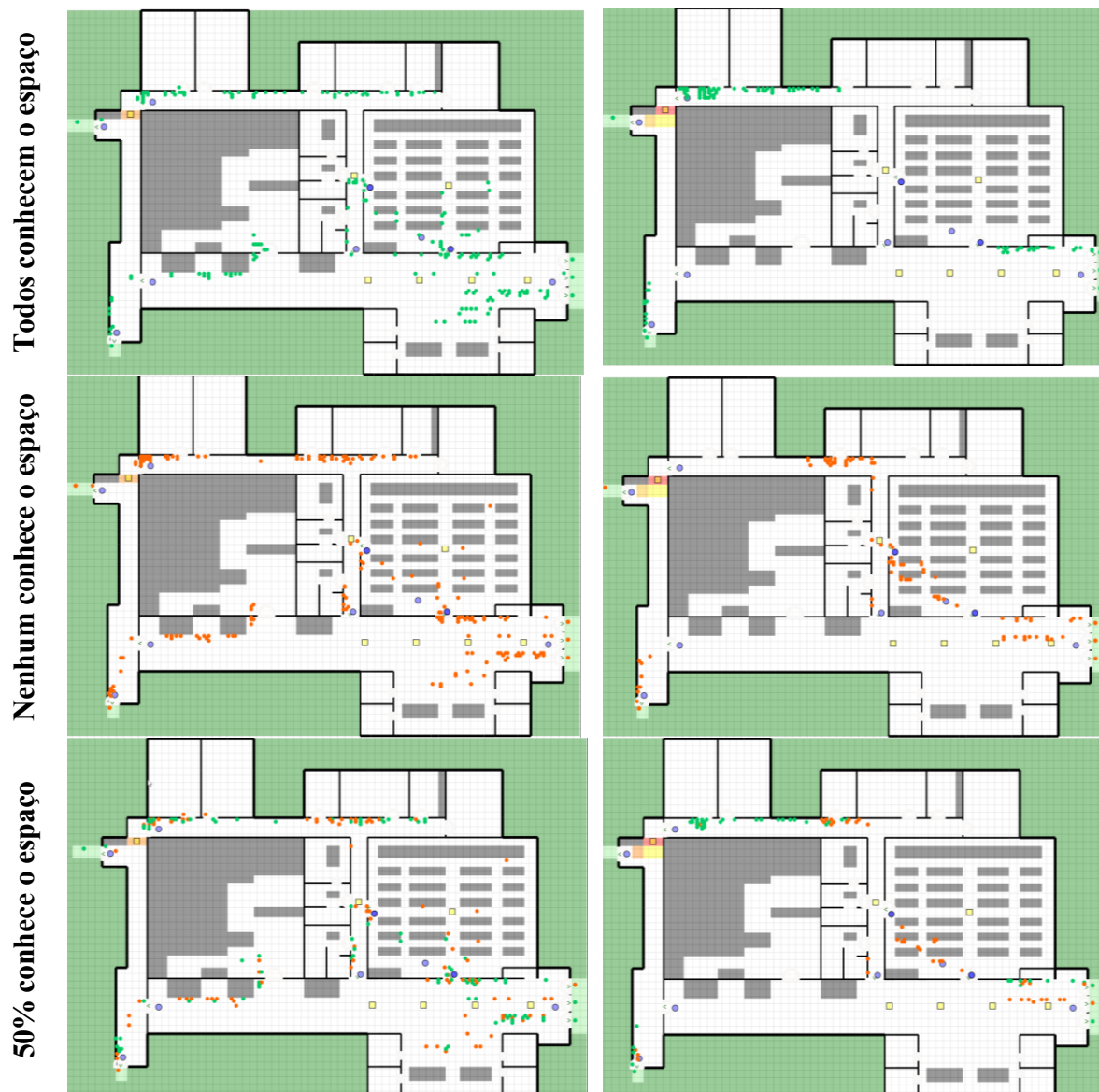


Figura V.25 Comparação do padrão de evacuação para cada um dos casos testados, com incêndio e com SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 50 segundos da simulação (imagens da esquerda e da direita respectivamente)

As imagens dos padrões de evacuação apresentadas na Figura V.26 permitem uma mais fácil comparação do padrão de evacuação entre o caso em que os ocupantes conhecem o espaço e não seguem a sinalização e o caso em que não conhecem o espaço e seguem a sinalização. Essa comparação é feita sem e com o SiMARPEE.

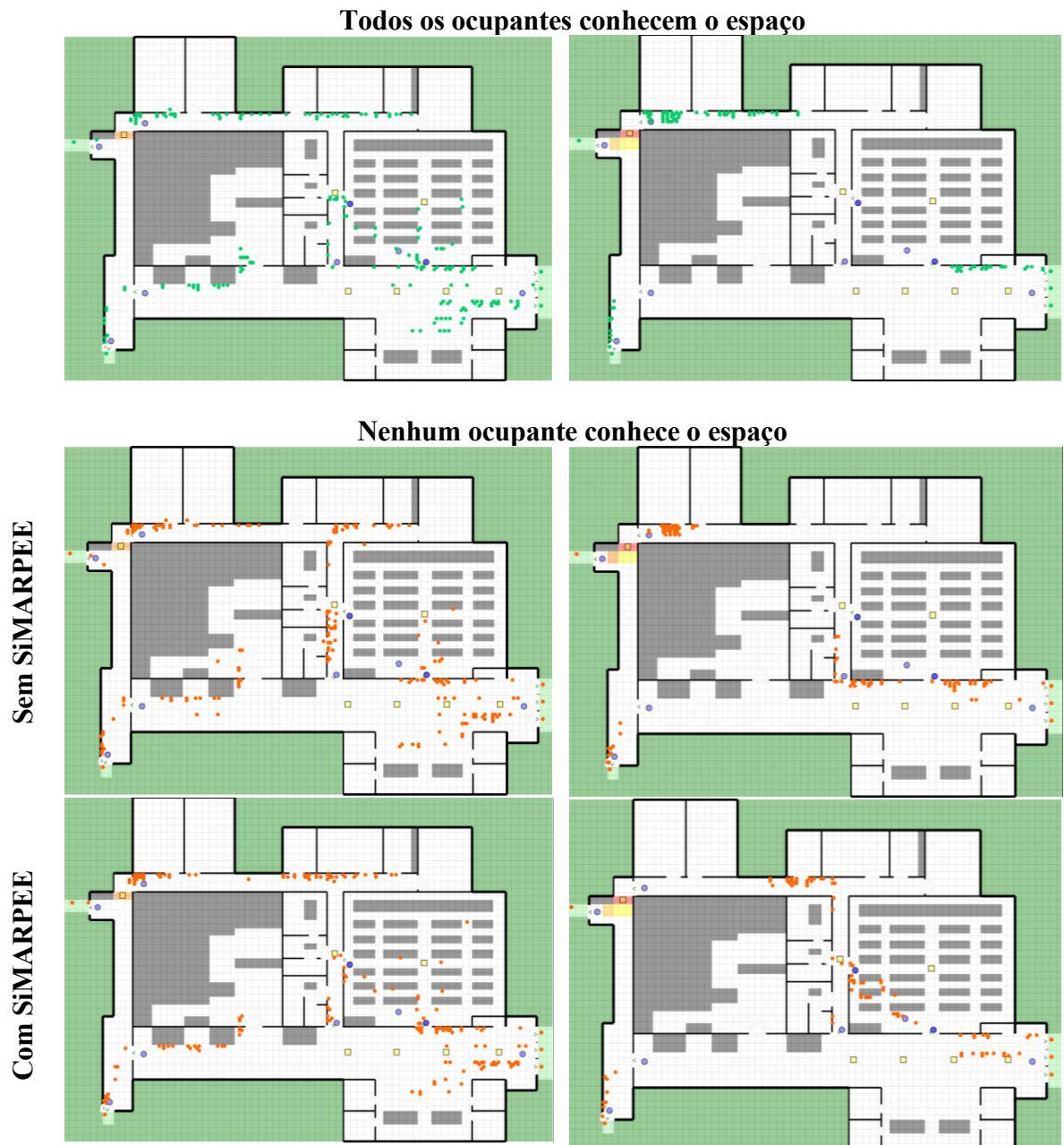


Figura V.26 Compara, numa situação de incêndio, o padrão de evacuação no caso em que todos conhecem o espaço com os casos em que nenhum conhece, sem e com o SiMARPEE. Os instantâneos foram tirados aos 16 e 50 segundos da simulação (imagens da esquerda e da direita respetivamente)

Como o SiMARPEE recomenda os percursos seguros mais curtos, na primeira fase do processo o padrão de evacuação é semelhante para quem conhece e para quem não conhece o espaço, no entanto, é visível que a atualização em tempo real da sinalética de emergência leva a uma reação mais rápida da parte dos ocupantes que seguem as orientações dadas pela referida sinalética.

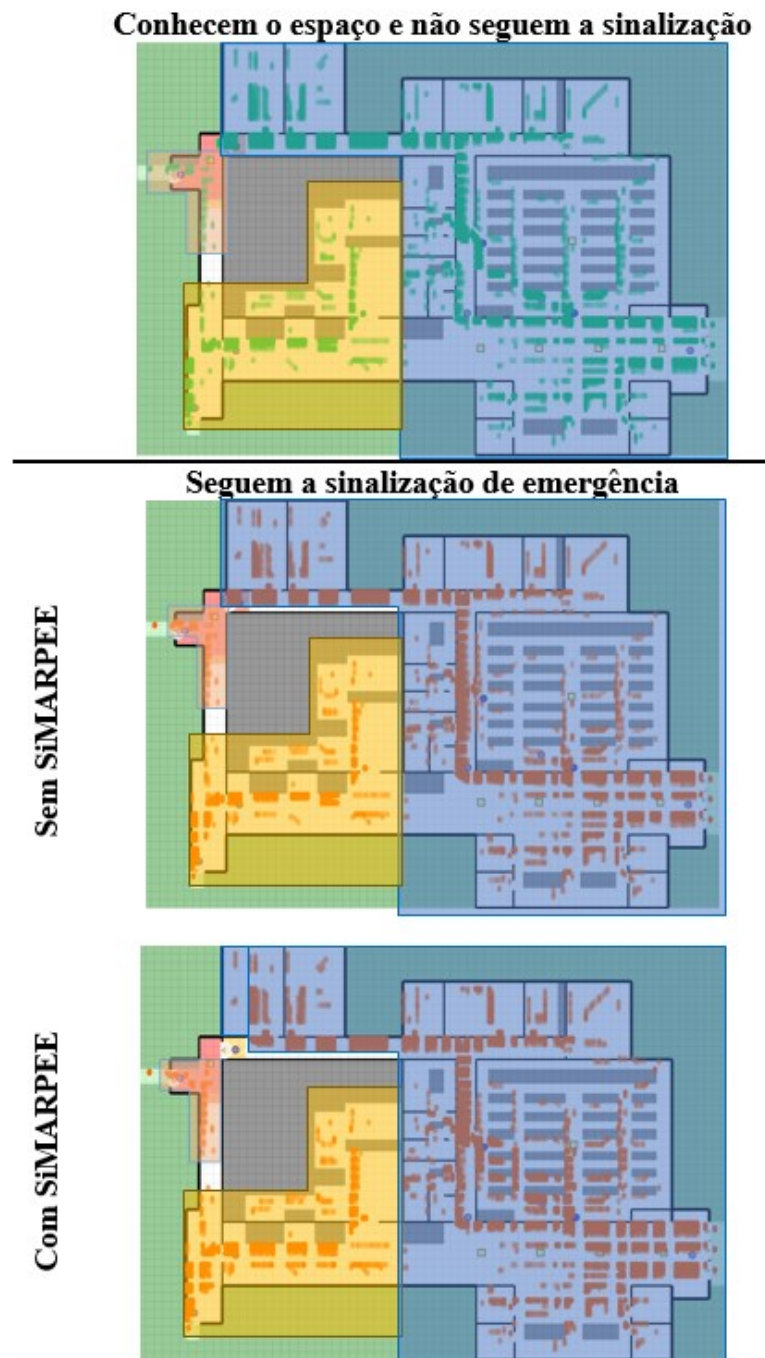


Figura V.27 Registo de todos os movimentos dos 200 ocupantes agrupados por saídas

A Figura V.27 mostra que o movimento dos ocupantes é muito semelhante para os três cenários apresentados. No entanto, como consequência de se ter o SiMARPEE ativo, os ocupantes que inicialmente se deslocam para a saída 1 invertem a marcha mais cedo, levando a que seja necessário menos tempo para evacuar todos os ocupantes, como já se referiu anteriormente. Se à análise juntarmos o gráfico da Figura V.28, constata-se que, para

qualquer dos cenários, um ocupante de uma determinada zona do edifício usa a mesma saída ou grupo de saídas, no entanto, com o SiMARPEE ativo há uma maior distribuição de ocupantes pelas saídas 3 e 4.

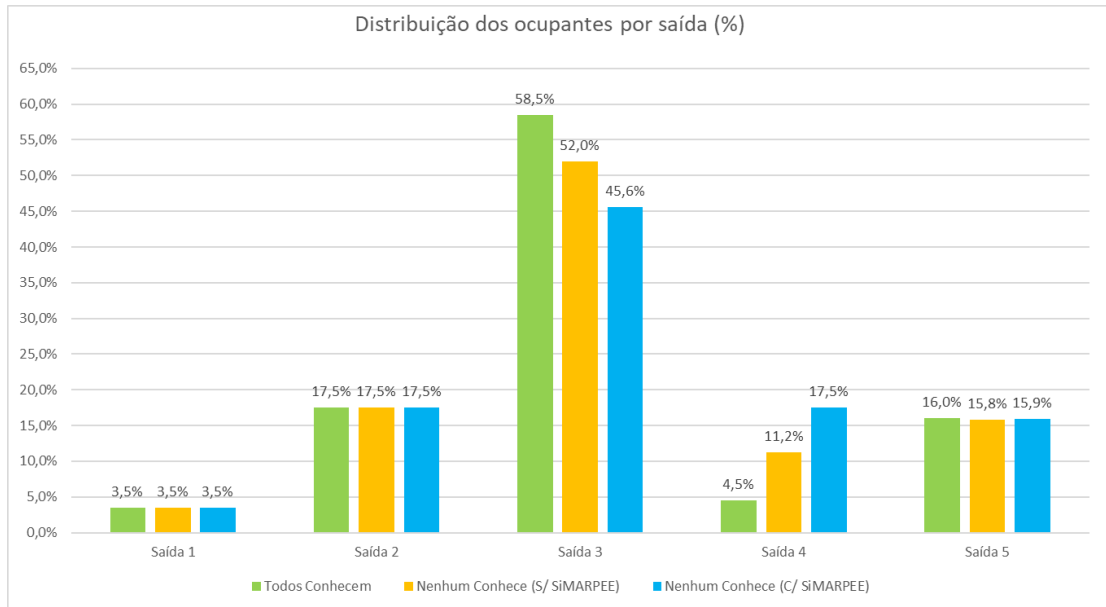


Figura V.28 Distribuição dos 200 ocupantes por saída usada para abandonar o edifício

4 DISCUSSÃO

Ao longo de toda a secção anterior fez-se a apresentação dos resultados das simulações para os diferentes cenários de experimentação previamente definidos. Essa apresentação foi secundada com uma breve descrição dos resultados apresentados, de modo a permitir uma melhor leitura dos mesmos.

Nesta secção, faz-se uma discussão aprofundada dos resultados obtidos, tendo presente os objetivos e questões de investigação inicialmente formuladas e que estão na origem de todo o trabalho que foi necessário desenvolver, desde a conceção e desenvolvimento dos modelos que suportam o sistema multiagente de recomendação, até ao desenvolvimento, teste e avaliação do protótipo do SiMARPEE.

A leitura mais imediata que pode ser feita dos resultados, apresentados na secção anterior, sugere que as recomendações de percursos de evacuação geradas pelo SiMARPEE contribuem para que os ocupantes de um edifício em caso de incêndio necessitem de menos

tempo para sair do edifício. Trata-se de um dado que vem ao encontro do objetivo global do trabalho de investigação aqui apresentado.

Nas secções seguintes vamos fazer uma análise mais aprofundada dos resultados, orientada para a avaliação do impacto da solução de recomendação desenvolvida e corporizada no SiMARPEE. Na secção V-4.1 faz-se uma análise e interpretação dos resultados para os cenários simulados em que não há impacto nos percursos de evacuação. Num cenário real seria uma situação em que algo faz soar o alarme de incêndio, mas não existem consequências no que respeita ao movimento dos ocupantes. Na secção V-4.2 analisam-se os resultados para os cenários em que o incêndio tem impacto nos percursos de evacuação. Finalmente, na secção V-4.3, faz-se uma análise dos resultados face aos objetivos e questões de investigação.

4.1 ALARME DE INCÊNDIO SEM IMPACTO NOS PERCURSOS DE EVACUAÇÃO

Começamos por analisar e avaliar o comportamento do SiMARPEE nos cenários em que soa o alarme de incêndio, mas não ocorre qualquer tipo de obstrução das áreas transitáveis do edifício e que são parte dos percursos de evacuação.

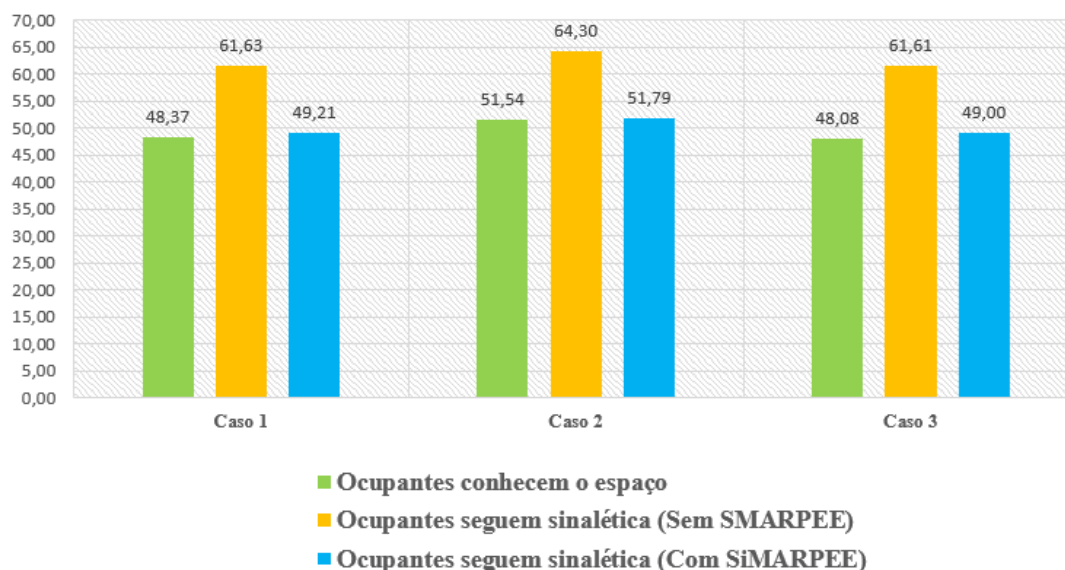
Para uma melhor análise e interpretação dos resultados, recuperam-se e resumem-se na Tabela V.8 e na Figura V.29 os resultados referentes ao tempo de movimento necessário para que todos os ocupantes abandonem o edifício.

Tabela V.8 Tempo de movimento necessário para que todos os ocupantes abandonem o edifício numa situação em que o incêndio não provoca restrições à sua movimentação, valores em segundos

	Os ocupantes conhecem o espaço e não seguem sinalética de emergência	Os ocupantes seguem sinalética de emergência	
		Estática (Sem SiMARPEE)	Dinâmica (Com SiMARPEE)
Caso 1	48,37	61,63	49,21
Caso 2	51,54	64,30	51,79
Caso 3	48,08	61,61	49,00

CASO 1 - Dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas
CASO 2 - Grupo de 30 ocupantes posicionados numa zona específica do Centro de Congressos
CASO 3 - Grupo de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados no Centro de Congressos

Tempos de movimento necessários para que todos os ocupantes abandonem o edifício, sem incêndio (Segundos)



CASO 1 - Dois ocupantes posicionados lado a lado na sala 2 do Centro de congressos
 CASO 2 - Grupo de 30 ocupantes posicionados nas salas 2 a 4 do Centro de Congressos
 CASO 3 - Grupo de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados no Centro de Congressos

Figura V.29 Gráfico de barras com os tempos de movimento necessário para que todos os ocupantes abandonem o edifício, numa situação em que não existem restrições ao movimento dos ocupantes

Num cenário em que é acionado um alarme de incêndio, mas não existe obstrução das vias de evacuação, os ocupantes familiarizados com o edifício tendem a abandoná-lo prosseguindo pelo percurso que conduz à saída mais próxima. Assim, pode dizer-se que num cenário como o referido, em que qualquer ocupante conhecedor do edifício opta por abandonar o edifício dirigindo-se para a saída mais próxima e não se confronta com obstrução ou bloqueios de percursos, se está perante um processo de evacuação eficiente, pelo que os resultados se podem considerar como um referencial.

Considerando que os resultados das simulações para as situações em que os ocupantes seguem as recomendações do SiMARPEE são muito semelhantes aos obtidos para os casos em que os ocupantes conhecem o edifício, pode concluir-se que a introdução do SiMARPEE torna mais eficiente o processo de evacuação para aqueles que, não estando familiarizados com o edifício, têm de seguir a sinalização de emergência.

Essa melhoria introduzida pelo SiMARPEE resulta do facto da solução de recomendação que suporta o sistema permitir a integração de sinalética de emergência dinâmica, através da qual é disponibilizada aos ocupantes informação acerca da saída segura mais próxima.

4.2 OCORRÊNCIA DE INCÊNDIO COM IMPACTO NOS PERCURSOS DE EVACUAÇÃO

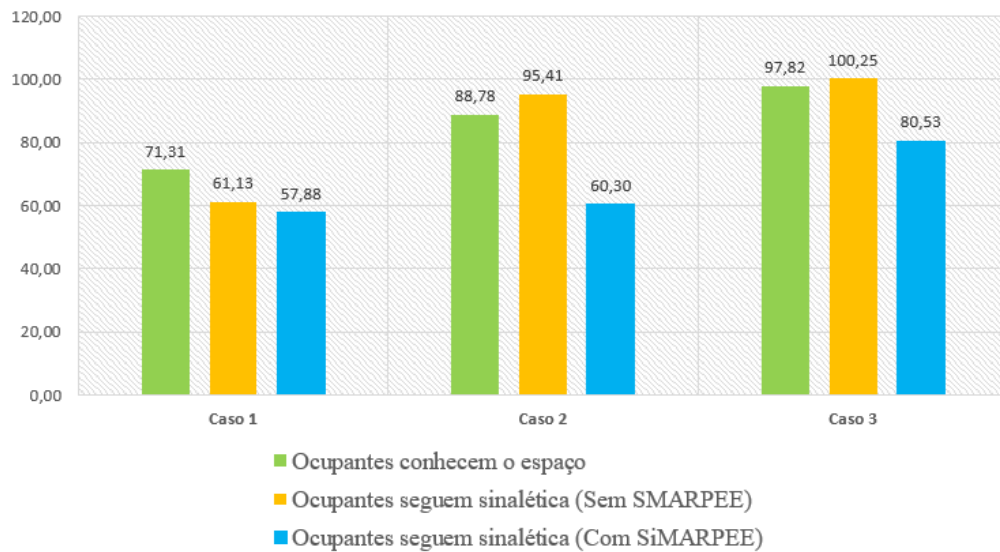
Relativamente aos cenários que consideram a ocorrência de um incêndio em que existe impacto nos espaços transitáveis pelos ocupantes, apresentam-se na Tabela V.9 e na Figura V.30 os resultados das simulações referentes ao tempo de movimento necessário para que todos os ocupantes alcancem lugar seguro.

Tabela V.9 Tempo de movimento necessário para que todos os ocupantes abandonem o edifício numa situação em que o incêndio provoca restrições nos percursos de evacuação, valores em segundos,

	Os ocupantes conhecem o espaço e não seguem sinalética de emergência	Os ocupantes seguem sinalética de emergência	
		Estática (Sem SiMARPEE)	Dinâmica (Com SiMARPEE)
Caso 1	71,31	61,13	57,88
Caso 2	88,78	95,41	60,30
Caso 3	97,82	100,25	80,53

CASO 1 - Dois ocupantes posicionados, lado a lado, em local distante das saídas
CASO 2 - Grupo de 30 ocupantes posicionados numa zona específica do Centro de Congressos
CASO 3 - Grupo de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados no Centro de Congressos

Tempos de movimento necessários para que todos os ocupantes abandonem o edifício, com incêndio (Segundos)



CASO 1 - Dois ocupantes posicionados lado a lado na sala 2 do Centro de congressos
 CASO 2 - Grupo de 30 ocupantes posicionados nas salas 2 a 4 do Centro de Congressos
 CASO 3 - Grupo de 200 ocupantes aleatoriamente posicionados no Centro de Congressos

Figura V.30 Gráfico de barras com os tempos de movimento necessários para que todos os ocupantes abandonem o edifício, numa situação em que há restrição ao movimento dos ocupantes

A existência de impacto do incêndio nos percursos de evacuação, passíveis de ser percorridos pelos ocupantes, leva a que o conhecimento do edifício não seja condição necessária e suficiente para o abandonar da forma mais eficiente. Conhecer o edifício não significa ter conhecimento da localização do incêndio, nem da alteração das condições ambientais que ele provoca nos diferentes espaços.

Os resultados obtidos sugerem que a introdução de um sistema como o SiMARPEE, capaz de informar em tempo real os ocupantes sobre os percursos de evacuação que devem seguir, torna o processo de evacuação mais eficiente, levando a que seja necessário menos tempo para que todos os ocupantes abandonem o edifício.

A melhoria que os resultados sugerem suportam-se no facto de o sistema de recomendação SiMARPEE assentar numa abordagem de recomendação baseada em contexto, que é obtido através de sensores IoT, os quais detetam alterações do ambiente e recolhem os dados associados a essa alteração, transmitindo-os em tempo real ao SiMARPEE.

No caso do protótipo desenvolvido e testado, os dados de contexto considerados relacionam-se com dois tipos de fatores. Por um lado, com o congestionamento de percursos, decorrente da elevada densidade de pessoas por metro quadrado numa determinada área. Por outro lado, com o que no modelo apresentado designámos por fatores de perigo, que resultam diretamente da deflagração de incêndio e que levam ao condicionamento e bloqueio dos percursos de evacuação.

Considerando que, para o SiMARPEE, o edifício não é mais do que um grafo que se vai alterando em função dos dados de contexto que recebe dos dispositivos de entrada IoT, pode dizer-se que, na verdade, é o SiMARPEE quem melhor conhece o edifício em cada instante, pois só ele tem informação sobre as alterações que ocorrem durante o incêndio, pelo que ficará mais habilitado para ajudar os ocupantes do edifício a alcançar local seguro, como os resultados obtidos também sugerem.

Para além dos aspetos referidos importa, ainda, realçar um outro, menos evidenciado nas secções anteriores desta tese e que está relacionado com os aspetos comportamentais dos ocupantes ainda antes destes decidirem deixar o edifício. A este propósito, refere-se o trabalho de Cordeiro (2022), no qual a autora refere, com base num modelo comportamental que desenvolveu a partir da análise da informação recolhida, que os resultados das simulações realizadas com esse modelo mostram que o tempo relacionado com a tomada de decisão dos ocupantes e o tempo consumido na realização de tarefas influenciam significativamente o tempo total de evacuação.

As decisões ou indecisões de que fala Cordeiro poderão ser, em grande parte, eliminadas em edifícios onde seja possível instalar sistemas idênticos ao apresentado.

4.3 OBJETIVOS, QUESTÕES DE INVESTIGAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

Já se referiu que os objetivos e questões de investigação são elementos fundamentais e orientadores de todo o trabalho de investigação desenvolvido. Para Recker (2012), as questões de investigação são a pedra angular em torno da qual gira e evolui todo o trabalho de investigação, balizando-o e suportando-o, desde o momento da sua formulação.

Assim, há que fazer uma análise e interpretação dos resultados obtidos face aos objetivos e questões de investigação. Na presente secção, dá-se ênfase ao trabalho que foi necessário desenvolver para concretizar os objetivos previamente definidos, bem como para nos habilitar a encontrar respostas para as questões de investigação inicialmente formuladas. Pretende-se com esta análise realçar que foi esse trabalho continuado, desenvolvido de acordo com a metodologia de investigação adotada, que permitiu a concretização de uma solução, corporizada no SiMARPEE, cujos resultados sugerem ser capaz de tornar mais eficiente o processo de evacuação de edifícios em caso de incêndio.

Para melhor enquadrar a discussão que aqui se pretende fazer, importa recordar que o objetivo global da tese era estudar como um sistema multiagente de recomendação, usando dados de contexto obtidos em tempo real através da IoT, pode contribuir para melhorar a eficiência na evacuação de edifícios em caso de incêndio, através da recomendação dos percursos de evacuação seguros mais adequados e eficientes a cada momento.

Porque importa também centrar a discussão em torno de como os resultados obtidos contribuem para responder às questões de investigação inicialmente formuladas, importa também reescrevê-las:

- **QI-1:** Como poderá uma abordagem multiagente, suportada num modelo ontológico, assegurar a interoperabilidade entre coisas, pessoas e sistemas, num contexto de evacuação de edifícios suportados pela IoT?
- **QI-2:** Como poderá a informação de contexto obtida através da IoT contribuir para a evacuação de edifícios em caso de incêndio?
- **QI-3:** Como poderá um sistema multiagente de recomendação baseado em contexto, melhorar a eficiência da evacuação de edifícios suportados pela IoT, através da recomendação de percursos de evacuação em tempo real?

Para alcançar o objetivo global acima referido, definiram-se três objetivos específicos, pelo que o trabalho se foi desenvolvendo no sentido de dar cumprimento a esses objetivos específicos inicialmente definidos.

O primeiro desses objetivos específicos teve como propósito reforçar o conhecimento nos domínios de investigação relacionados com o âmbito do nosso estudo. Foi nesse sentido que se aprofundou o estudo na área dos sistemas de recomendação baseados em sistemas multiagente, consubstanciado na publicação e apresentação em conferência de uma revisão de literatura sobre a temática (Neto et al., 2022b). Esse estudo foi complementado com o estado da arte acerca do uso de sistemas de recomendação no âmbito da IoT, sendo de assinalar o crescente uso deste tipo de soluções, em face do que a IoT permite oferecer quanto ao conhecimento do contexto em que são geradas as recomendações.

Considerando que a área da evacuação de edifícios em caso de incêndio é central ao nosso estudo, desenvolveu-se o estado da arte sobre a temática. Esse estudo aprofundado permitiu concluir que área relacionada com a orientação em tempo real dos ocupantes de um edifício numa situação da sua evacuação, é uma área de investigação em aberto e, por isso, merecedora de aprofundamento e de novos contributos. É no seguimento desse estudo que ganhou corpo a opção por se estudar uma solução que propõe uma mudança de paradigma na área da simulação de evacuação de edifícios em caso de incêndio, que se centra no condicionamento do comportamento dos ocupantes, disponibilizando-lhes informação em tempo real, em vez de se focar em compreender o comportamento das pessoas, para incorporar esse conhecimento nos modelos de simulação. Considera-se que uma solução capaz de informar os ocupantes acerca dos percursos de evacuação mais eficientes, desde o início do processo de evacuação, poderá condicionar de forma positiva o seu comportamento e contribuir para uma evacuação do edifício mais eficiente e aumentar as suas condições de segurança, sem que isso signifique custos acrescidos relevantes.

O segundo objetivo específico inicialmente definido, previa o desenvolvimento de um modelo ontológico de suporte à recomendação de percursos de evacuação em edifícios em caso de incêndio. O cumprimento deste objetivo permitiu um conhecimento aprofundado da área da evacuação de edifícios, identificando os diferentes atores e variáveis que impactam num processo de evacuação de edifícios.

O modelo ontológico foi desenvolvido através de um processo iterativo com duas etapas principais. A primeira etapa consistiu no desenvolvimento de uma ontologia para a evacuação de edifícios em caso de incêndio que deu origem a uma publicação e

apresentação em conferência (Neto et al., 2022a). O trabalho centrou-se na construção de um modelo de conhecimento para reforçar a compreensão da problemática da evacuação de edifícios em caso de incêndio. Na segunda etapa, tendo por base a ontologia desenvolvida na primeira, construiu-se um modelo ontológico para a recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio, que deu também origem a um artigo, aceite para publicação e apresentado em conferência. No âmbito deste desenvolvimento introduziram-se os conceitos relacionados com a orientação dos ocupantes em tempo real, como é o caso, entre outros, da IoT, da sinalética de emergência dinâmica e da recomendação de percursos de evacuação.

O modelo ontológico desenvolvido, descrito com detalhe na secção IV-2, serviu de suporte à concretização do terceiro objetivo específico inicialmente definido, que consistiu no desenvolvimento de um sistema multiagente de recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio, baseado em contexto e na IoT. Permitiu também a criação de um modelo para suportar a interoperabilidade entre os dispositivos de emergência instalados no edifício e o sistema de recomendação, apresentado na secção IV-2.3.3.

De facto, é o próprio modelo ontológico que faz emergir um sistema de recomendação como o elemento fundamental para corporizar a mudança de paradigma pretendido, pois é através desse sistema que será produzida a informação necessária para guiar os ocupantes do edifício até lugar seguro.

Como também decorre do modelo ontológico desenvolvido, adotou-se para esse sistema de recomendação uma abordagem de recomendação baseada em contexto, tendo-se definido os designados fatores de perigo e de congestionamento, bem como, de forma implícita, o fator localização, seja no que se refere à localização dos dispositivos de entrada e de saída IoT, seja no que respeita à localização dos ocupantes no edifício, a quem são dirigidas as recomendações.

De acordo com a formulação teórica do sistema de recomendação, apresentada na IV-3.2.2 e descrito pela expressão (IV.9, o sistema considera que o edifício é representado por um grafo que se altera com o tempo em função dos dados referentes aos fatores contextuais referidos, dados esse que chegam ao sistema de recomendação através da IoT. Para atualização do

grafo em tempo real foi criado o modelo apresentado na secção IV-3.4, que incorpora modelos de cálculo dos fatores contextuais desenvolvidos a partir dos trabalhos de Predtechenskii & Milinskii (1978), Coelho (1997) e da norma PD 7974-6:2019 da British Standards Institution (2019). Esses modelos de cálculo definem o nível de perigo associado a um determinado troço de um percurso de evacuação, em consequência de fatores como a densidade do fumo, temperatura ou densidade de pessoas por metro quadrado. Ao serem incorporados num sistema de recomendação como o SiMARPEE, permitem uma tomada de decisão mais consentânea com as condições ambientais e de ocupação do edifício num determinado instante.

O sistema de recomendação foi desenvolvido com recurso ao paradigma dos sistemas multiagente, opção já anteriormente fundamentada, e deu origem ao protótipo SiMARPEE, detalhado na secção IV-3 e cujos resultados dos testes realizados foram apresentados na secção V-3. Os testes foram realizados recorrendo à plataforma Web de Simulação WebSimACSIE, apresentada no capítulo III, desenvolvida no âmbito desta tese. O desenvolvimento dessa plataforma assentou na criação de dois modelos que foram apresentados em conferência e aceites para publicação: um modelo para a representação geométrica e física de um edifício e o outro para a modelação do movimento dos ocupantes.

Ao longo desta secção, mais do que concluir que os resultados obtidos sugerem que a adoção de um sistema como o SiMARPEE contribui para melhorar a eficiência de evacuação de edifícios em caso de incêndio, pretendeu-se fazer realçar como os objetivos e as questões de investigação foram determinantes para a construção de uma solução que os resultados experimentais sugerem ser capaz de contribuir para a melhoria da eficiência na evacuação de edifícios em caso de incêndio.

5 RESUMO DO CAPÍTULO

No presente capítulo descrevem-se as atividades desenvolvidas para testar o sistema SiMARPEE. O capítulo inicia-se com a justificação da escolha da plataforma Web de simulação WebSimACSIE para o teste do protótipo do referido sistema. De seguida, descrevem-se os passos a dar para a sua avaliação, que incide sobre o tempo de movimento dos ocupantes, que se definiu como o tempo que os ocupantes demoram desde o início da

evacuação até que alcancem um local seguro. Nesse sentido, foram definidos cenários de experimentação, representativos dos principais cenários possíveis, sendo apresentados os resultados das simulações realizadas. Conclui-se o capítulo com a discussão aprofundada dos resultados obtidos, tendo presente as questões de investigação inicialmente formuladas e os objetivos que se pretendiam alcançar com esta tese. Os resultados obtidos sugerem que uma solução de recomendação como a corporizada pelo SiMARPEE é capaz de melhorar a eficiência da evacuação de edifícios em caso de incêndio.

VI CONSIDERAÇÕES FINAIS

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões do estudo efetuado, resumindo os principais resultados obtidos face aos objetivos inicialmente definidos, como esses resultados dão respostas às questões de investigação formuladas, bem como quais os principais contributos desta tese. Referem-se ainda as limitações do estudo e sugestões de trabalho futuro.

2 CONCLUSÕES

Importa começar por referir que a adoção da metodologia DSR se mostrou adequada e decisiva para alcançar os objetivos do estudo. Na Tabela VI.1, faz-se uma análise do trabalho desenvolvido, à luz das sete diretrizes estabelecidas por Hevner et al. (2004).

Tabela VI.1 Apreciação do trabalho desenvolvido, à luz das sete diretrizes de Hevner et al. (2004)

Diretrizes	O caso da presente tese
1 - Design como um artefacto	Em face dos objetivos do estudo, o SiMARPEE foi o principal artefacto desenvolvido. No entanto, podem identificar-se outros artefactos desenvolvidos no âmbito desta tese, que foram fundamentais para a realização do estudo, designadamente: Plataforma WebSimACSIE; Modelo Ontológico; Modelo de representação geométrica e física de um edifício; Modelo de simulação do movimento dos ocupantes; Modelos de atualização dos fatores contextuais
2 - Relevância do problema	A relevância do trabalho desenvolvido reside no facto de se ter como objetivo melhorar a eficiência da evacuação de edifícios em caso de incêndio. Trata-se de um problema relevante para as organizações e para a sociedade em geral.
3 - Avaliação do projeto	Os testes efetuados com o SiMARPEE sugerem que uma solução de recomendação de percursos de evacuação, como proposta nesta tese, é capaz de melhorar a eficiência da evacuação de edifícios em caso de incêndio.
4 - Contributos do estudo	Na secção 3 deste capítulo, apresentam-se os contributos mais relevantes do estudo, destacando-se o SiMARPEE e os modelos que o suportam.
5 - Rigor do estudo	O artefacto desenvolvido baseou-se em tecnologias amplamente estudadas e desenvolvidas, como é o caso dos sistemas de recomendação e sistemas multiagente, e em suporte teórico consolidado da área da evacuação de edifícios.
6 - Design como um processo de pesquisa	Ao longo desta tese evidencia-se o trabalho desenvolvido na consolidação do conhecimento sobre o domínio de aplicação do artefacto. Numa primeira fase com o desenvolvimento do estado da arte, posteriormente com o desenvolvimento das ontologias e com a construção dos modelos de atualização dos fatores contextuais.
7 - Comunicação dos resultados do estudo	Na secção 6 deste capítulo, listam-se os artigos publicados e apresentados em conferência. Ainda que se trate de artigos direcionados para a comunidade académica, os artigos contêm também informação útil para a tomada de decisão.

O estudo desenvolvido tinha como objetivo estudar em que medida um sistema multiagente de recomendação, usando dados de contexto obtidos em tempo real através da IoT, pode contribuir para melhorar a eficiência na evacuação de edifícios em caso de incêndio.

Os resultados obtidos sugerem que, na posse de dados que a cada momento refletem o ambiente do edifício, um sistema como o que se propõe no nosso estudo, é capaz de guiar até lugar seguro os ocupantes de um edifício em caso de incêndio, através da recomendação dos percursos de evacuação seguros mais adequados e eficientes a cada momento.

Considera-se, assim, alcançado o objetivo principal do estudo, tendo para isso sido fundamental o cumprimento dos três objetivos específicos inicialmente definidos. Desde logo, e reportando-nos ao primeiro desses objetivos, importa realçar o aprofundamento do estudo nas áreas de investigação de suporte ao projeto, particularmente no que concerne à temática da evacuação de edifícios em caso de incêndio. Esse estudo na área da evacuação de edifícios foi crucial para o cumprimento do segundo objetivo específico, que previa desenvolvimento do modelo ontológico de suporte à recomendação de percursos de evacuação em edifícios em caso de incêndio. O modelo ontológico desenvolvido, para além de permitir consolidar o conhecimento no domínio da evacuação de edifícios, foi fundamental para dar cumprimento ao terceiro objetivo específico, a conceção e construção de um sistema multiagente de recomendação de percursos de evacuação, que produz recomendações a partir de dados de contexto obtidos através de sensores IoT instalados no edifício.

Conjuntamente com os objetivos, as questões de investigação são um pilar fundamental para o sucesso de um projeto de investigação, pelo que há que avaliar em que medida o estudo desenvolvido e os resultados obtidos permitem dar resposta às questões de investigação formuladas no início do estudo.

- **QI-1** - Como poderá uma abordagem multiagente, suportada num modelo ontológico, assegurar a interoperabilidade entre coisas, pessoas e sistemas, num contexto de evacuação de edifícios suportados pela IoT?

Relativamente a esta questão, a solução de recomendação desenvolvida suporta a tomada de decisão em dados recolhidos por sensores IoT de diferentes tipos e

produzindo dados diversos. Para resolver o problema decorrente dessa heterogeneidade, o modelo ontológico desenvolvido considera um conjunto de requisitos que os dispositivos IoT devem respeitar para que possam ser integrados na solução de recomendação desenvolvida. O modelo de interoperabilidade desenvolvido a partir do modelo ontológico assegura também a interoperabilidade do sistema de recomendação com os dispositivos de saída IoT. A abordagem multiagente desenvolvida para o sistema de recomendação considera que cada dispositivo IoT tem um agente que o representa no sistema de recomendação, assegurando a interoperabilidade do sistema de recomendação com os dispositivos de entrada IoT, para recolha dos dados contextuais, e os dispositivos de saída IoT, para disponibilização das recomendações aos ocupantes do edifício.

- **QI-2** - Como poderá a informação de contexto obtida através da IoT contribuir para a evacuação de edifícios em caso de incêndio?

A solução de recomendação proposta no âmbito desta tese segue uma abordagem sensível ao contexto, em que os dados recolhidos pelos sensores IoT são transformados em informação contextual, que a cada momento é capaz de caracterizar o edifício do ponto de vista das suas condições ambientais. De modo a usar essa informação contextual para guiar os ocupantes a alcançar lugar seguro, considerou-se que no sistema de recomendação o edifício é representado por um grafo, cujos nós e arestas representam os espaços transitáveis do edifício. Esse grafo altera-se ao longo do tempo, a partir da informação de contexto obtida através da IoT. A solução proposta e implementada no protótipo, considera dois tipos de fatores contextuais: (i) um desses fatores está relacionado com congestionamento dos percursos de evacuação; (ii) o outro considera o perigo decorrente da deflagração do incêndio. Para ambos os tipos de fatores foram criados modelos de cálculo baseados nos trabalhos de investigação de Predtechenskii & Milinskii (1978), Coelho (1997) e na norma PD 7974-6:2019 do British Standards Institution (2019), relacionados com a velocidade de movimento dos ocupantes numa situação de incêndio e com os impactos provocados por este, designadamente devido ao escoamento de fumo, elevadas temperaturas e toxicidade.

- **QI-3** - Como poderá um sistema multiagente de recomendação baseado em contexto, melhorar a eficiência da evacuação de edifícios suportados pela IoT, através da recomendação de percursos de evacuação em tempo real?

Grande parte da resposta a esta questão de investigação pode ser encontrada nas respostas às questões de investigação anteriores. De facto, só assegurando a interoperabilidade entre os diferentes dispositivos IoT e o sistema de recomendação, o que é conseguido com a abordagem multiagente proposta, é possível fazer refletir no comportamento dos ocupantes os constrangimentos contextuais provocados pelo incêndio. Através da construção de uma solução de recomendação que vê o edifício como um grafo dinâmico, que se altera à medida que esses constrangimentos no edifício vão ocorrendo, é possível gerar recomendações capazes de guiar os ocupantes no seu movimento de saída do edifício, levando-os a adotar, a cada momento, os percursos mais eficientes. Os resultados obtidos com o SiMARPEE sugerem que uma solução como a proposta no presente estudo, contribui para melhorar a eficiência da evacuação em edifícios, em caso de incêndio.

Os resultados obtidos sugerem que a implementação futura de um sistema baseado na metodologia desenvolvida no presente estudo, em que os ocupantes o considerem fiável, poderá contribuir para condicionar o comportamento das pessoas, reduzindo o tempo que medeia entre a emissão do alarme e o início efetivo da evacuação do edifício. De facto, ao condicionar o comportamento individual dos ocupantes, o sistema permitirá minimizar as ações que eles podem concretizar inicialmente e que não têm como objetivo abandonar o edifício, para além de indicar os trajetos que são mais seguros. Naturalmente que se torna necessário, no futuro, quando estes sistemas estiverem implementados, avaliar o grau de confiança que podem gerar nos ocupantes, tornando-se necessário monitorizar em que medida é que estes seguem a informação que recebem.

3 CONTRIBUTOS

Na presente secção vamos debruçar-nos sobre os contributos mais significativos do trabalho de investigação desenvolvido.

Considerando os objetivos que se pretendiam alcançar com a presente tese, pode dizer-se que o seu principal contributo é a apresentação de uma solução capaz de contribuir para a melhoria da eficiência na evacuação de edifícios em emergência de incêndio. No entanto, esse contributo principal assentou num conjunto de outros contributos, que consideramos ser de realçar e que se elencam de seguida:

- Um desses contributos decorreu do estudo das temáticas necessárias para o desenvolvimento da tese, que resultou na publicação e apresentação a conferência do artigo “*Multi-Agent-Based Recommender Systems: A Literature Review*” (Neto et al., 2022b).
- Criação de um novo modelo para representação geométrica e física de um edifício, que permite que este possa ser representado por um grafo de menor dimensão, levando a ganhos do ponto de vista computacional. Este modelo foi apresentado em conferência e é parte do artigo “*Geometric and Physical Building Representation and Occupant's Movement Models for Fire Building Evacuation Simulation*”, que aguarda publicação, na série *Lecture Notes in Networks and Systems*.
- Criação de um novo modelo para modelação do movimento dos ocupantes, baseado no tipo autómato celular, que aproveita o modelo de representação do edifício referido anteriormente. Este modelo foi apresentado em conferência e é parte do artigo “*Geometric and Physical Building Representation and Occupant's Movement Models for Fire Building Evacuation Simulation*”, que aguarda publicação, na série *Lecture Notes in Networks and Systems*.
- Desenvolvimento da plataforma Web de simulação WebSimACSIE, suportado no modelo de representação de um edifício e no modelo de simulação do movimento dos ocupantes, anteriormente referidos.
- Criação de ontologia que contribui para o reforço do conhecimento no domínio da evacuação de edifícios em caso de incêndio, que resultou na publicação e apresentação em conferência do artigo “*An Ontology for Fire Building Evacuation*” (Neto et al., 2022a).

- Criação de um modelo ontológico para recomendação de percursos de evacuação de edifícios em caso de incêndio, desenvolvido a partir da ontologia referida anteriormente e que serviu de suporte ao desenvolvimento da solução de recomendação multiagente proposta na presente tese. Deu origem ao artigo “*An Ontological Model for Fire Evacuation Route Recommendation in Buildings*”, que foi apresentada em conferência e aguarda publicação, na série *Lecture Notes in Networks and Systems*.
- Desenvolvimento de um modelo para assegurar a interoperabilidade dos diferentes dispositivos IoT com o sistema de recomendação, recorrendo ao paradigma dos sistemas multiagente. Foi desenvolvido a partir do modelo ontológico referido anteriormente.
- Desenvolvimento de um modelo para atualização em tempo real do grafo representativo do edifício, que foi usado para suportar a abordagem de recomendação proposta na presente tese. O modelo considera que a atualização do grafo é feita através de uma matriz de fatores contextuais, cujos valores refletem os constrangimentos nos troços dos percursos de evacuação, devido ao congestionamento e ao perigo decorrente da deflagração do incêndio. Recorrendo ao conhecimento existente na área da evacuação de edifício em caso de incêndio, foram desenvolvidos modelos de cálculo para cada um dos tipos de constrangimento referidos.

Os contributos referidos suportaram o desenvolvimento do protótipo SiMARPEE, que foi submetido a testes e avaliação no âmbito do nosso estudo. No entanto, considera-se que são contributos que valem por si, no sentido em que podem ser usados para suportar o desenvolvimento de outras soluções, contribuindo assim para o reforço do conhecimento nas áreas de investigação objeto do estudo, designadamente no que se refere aos sistemas de recomendação multiagente e à evacuação de edifícios em caso de incêndio. O contributo para a área da evacuação de edifícios assume particular relevo no domínio de investigação relacionado com a orientação em tempo real dos ocupantes de um edifício numa emergência de incêndio.

4 LIMITAÇÕES

As principais limitações do estudo prendem-se com o conjunto de pressupostos assumidos, quer no desenvolvimento do protótipo do sistema de recomendação, quer no que se refere aos testes a que foi submetido.

Relativamente ao desenvolvimento do protótipo e a limitações da plataforma Web de simulação, consideraram-se dois tipos de fatores contextuais genéricos, congestionamento e perigo, sem ter em conta que em ambiente real são necessários diferentes tipos de sensores para uma correta representação do ambiente do edifício. Assim, assumiu-se o seguinte:

- no caso do congestionamento, considerou-se um sensor hipotético que deteta o número de ocupantes num determinado troço.
- no caso do que designámos por fator perigo, considerou-se um sensor de risco hipotético, capaz de agregar os efeitos do incêndio (fumo, temperatura e gases tóxicos) passíveis de provocar constrangimentos nos percursos de evacuação, de modo a ser compatível com o modelo simplificado de progressão do perigo, apresentado na III-3.2, em vez incorporar dados provenientes de simuladores usados, como é o caso de já referido CFAST.

No entanto, importa realçar que a simplificação referida não prejudica os objetivos pretendidos com o protótipo, criar constrangimentos nos percursos de evacuação, simulando a alteração de contexto no edifício.

No que respeita aos cenários de experimentação e estratégias adotadas nos casos simulados, há que referir as seguintes limitações:

- apesar de terem sido realizados testes preliminares para edifícios de menor dimensão, considerou-se que para avaliar o cumprimento dos objetivos do estudo seria de focar os testes num edifício de média dimensão, com elevada densidade de pessoas e que tipicamente fosse usado por pessoas não familiarizadas com o espaço.
- presumiu-se a não existência de qualquer contacto entre os ocupantes, cada um seguindo o seu caminho como se o outro não existisse. Por exemplo, se um ocupante

inverte a marcha porque vê um percurso interrompido, não avisa os ocupantes próximos;

- ao contrário do pressuposto assumido na simulação, na realidade, salvo raras exceções, não existe total desconhecimento do espaço, os ocupantes em geral registam por onde entram no edifício, pelo que tendem a conhecer pelo menos esse percurso de regresso.

5 TRABALHO FUTURO

Ainda que se considere que os principais objetivos da tese tenham sido alcançados, quer as limitações referidas, quer a necessidade de aprofundar o estudo, permitem identificar algumas linhas de desenvolvimento que podem ser seguidas, como, por exemplo:

- Considerar a incorporação de dados de incêndio provenientes de simuladores de incêndio externos, como é o caso do CFAST ou outros geralmente usados por investigadores e especialistas da área da segurança contra incêndios, que disponibilizem dados de incêndio próximos do real.
- Testar outras tipologias de edifício, no que respeita à funcionalidade, à dimensão, à área ou à lotação.
- Aprofundar o estudo dos modelos dos fatores contextuais, de modo a considerar outros tipos de perigo e as suas implicações no constrangimento dos percursos e nas recomendações geradas pelo sistema de recomendação, com o objetivo de conduzir a uma maior otimização dos trajetos escolhidos.
- Incorporar no simulador a possibilidade de o próprio ocupante contribuir com dados para a geração das recomendações.
- Numa perspetiva de uma futura implementação de um sistema como o proposto, considera-se de interesse estudar se as pessoas estariam recetivas a um sistema deste tipo e em que medida são condicionadas por ele, pelo que será fundamental a sua monitorização e posterior tratamento dos dados obtidos.

6 PUBLICAÇÕES

Uma das atividades previstas na metodologia DSR é a difusão e comunicação do conhecimento e contributos produzidos ao longo do desenvolvimento da presente tese. Apresenta-se de seguida o trabalho desenvolvido na divulgação do trabalho de investigação que se foi realizado.

Em 2019 foi elaborado o artigo "*A multi-agent system for recommending fire evacuation routes in buildings, based on context and IoT*" para o *Doctoral Consortium* da **17th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 19)**. Foi apresentado na conferência e publicado em: "*Highlights of Practical Applications of Complex Multi-Agent Systems - International Workshops of PAAMS 2019*" (Neto et al., 2019).

Em 2020 foi elaborado o artigo "*A importância da modelação das condições de segurança ao incêndio na reabilitação de edifício*", para a conferência *ENCORE 2020* publicado em "*Livro de Atas do ENCORE 2020 - 4º Encontro de Conservação e Reabilitação de Edifícios*"(Coelho & Neto, 2020).

Em 2021 foi elaborado o artigo "*An Ontology for Fire Building Evacuation*". Foi apresentado no *6th International Congress on Information and Communication Technology*, e publicado em "*Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology: ICICT 2021, London, Volume 3*"(Neto et al., 2022a).

Em 2021 foi elaborado o artigo "*Multi-Agent-Based Recommender Systems: A Literature Review*". Foi apresentado no *6th International Congress on Information and Communication Technology*, e publicado em "*Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology: ICICT 2021, London, Volume 3*"(Neto et al., 2022b).

Em 2022 foi elaborado o artigo "*Geometric and Physical Building Representation and Occupant's Movement Models for Fire Building Evacuation Simulation*". Foi apresentado no *7th International Congress on Information and Communication Technology*, e

publicado em “*Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology: ICICT 2022, London, Volume 2*”(Neto et al., 2023a).

Em 2022 foi elaborado o artigo “*An Ontological Model for Fire Evacuation Route Recommendation in Buildings*”. Foi apresentado no *7th International Congress on Information and Communication Technology*, e publicado em “*Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology: ICICT 2022, London, Volume 3*”(Neto et al., 2023b).

Em 2022 foi elaborado o artigo “*Context-Based Multi-Agent Recommender System, Supported on IoT, for Guiding the Occupants of a Building in Case of a Fire*”. Foi publicado no jornal *Electronics Special Issue "Recommender Systems: Approaches, Challenges and Applications (Volume II)"* (Neto et al., 2022c)

BIBLIOGRAFIA

- Adomavicius, G., Mobasher, B., Ricci, F., & Tuzhilin, A. (2011). Context-aware recommender systems. *AI Magazine*, 32(3), 67–80.
<https://doi.org/10.1609/aimag.v32i3.2364>
- Adomavicius, G., Sankaranarayanan, R., Sen, S., & Tuzhilin, A. (2005). Incorporating contextual information in recommender systems using a multidimensional approach. *ACM Transactions on Information Systems*, 23(1), 103–145.
<https://doi.org/10.1145/1055709.1055714>
- Adomavicius, G., & Tuzhilin, A. (2005). Toward the Next Generation of Recommender Systems: a Survey of the State of the Art and Possible Extensions. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 17(6), 734–749.
<https://doi.org/10.1109/TKDE.2005.99>
- Akhtar, N., & Agarwal, D. (2015). A Literature Review of Empirical Studies of Recommendation Systems. *International Journal of Applied Information Systems*, 10(2), 6–14. <https://doi.org/10.5120/ijais2015451467>
- Altulyan, M., Yao, L., Wang, X., Huang, C., Kanhere, S. S., & Sheng, Q. Z. (2020). *Recommender Systems for the Internet of Things: A Survey*.
<https://doi.org/10.48550/arxiv.2007.06758>
- Ashton, K. (2009). That “Internet of Things” Thing. *RFID Journal*, 22, 97–114.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Bajaj, G., Agarwal, R., Singh, P., Georgantas, N., & Issarny, V. (2017). A study of existing Ontologies in the IoT-domain. *CoRR*, abs/1707.0.
- Balabanović, M., & Shoham, Y. (1997). Fab: content-based, collaborative recommendation. *Communications of the ACM*, 40(3), 66–72. <https://doi.org/10.1145/245108.245124>
- Batet, M., Moreno, A., Sánchez, D., Isern, D., & Valls, A. (2012). Turist@: Agent-based personalised recommendation of tourist activities. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 7319–7329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.086>
- Bazire, M., & Brézillon, P. (2005). Understanding context before using it. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3554 LNAI, 29–40.
https://doi.org/10.1007/11508373_3
- Beel, J., Gipp, B., Langer, S., & Breitinger, C. (2016). Research-paper recommender systems: a literature survey. *International Journal on Digital Libraries*, 17(4), 305–338.
<https://doi.org/10.1007/s00799-015-0156-0>
- Bi, H., & Gelenbe, E. (2019). A Survey of Algorithms and Systems for Evacuating People in Confined Spaces. *Electronics*, 8(6), 711. <https://doi.org/10.3390/electronics8060711>
- Birukov, A., Blanzieri, E., & Giorgini, P. (2005). Implicit: An Agent-based Recommendation System for Web Search. *Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 618–624.
<https://doi.org/10.1145/1082473.1082567>
- Bitencourt, K., Durão, F., Mendonça, M., & Santana, L. (2018). An Ontological Model for Fire Emergency Situations. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E101.D, 108–115. <https://doi.org/10.1587/transinf.2017SWP0003>
- Bobadilla, J., Ortega, F., Hernando, A., & Gutiérrez, A. (2013). Recommender systems survey. *Knowledge-Based Systems*, 46, 109–132.
<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.03.012>

- Borràs, J., Moreno, A., & Valls, A. (2014). Intelligent tourism recommender systems: A survey. *Expert Systems with Applications*, 41(16), 7370–7389. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2014.06.007>
- British Standards Institution. (2019). *PD 7974-6:2019 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings Human factors. Life safety strategies. Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6) - European Standards*. <https://www.en-standard.eu/pd-7974-6-2019-application-of-fire-safety-engineering-principles-to-the-design-of-buildings-human-factors-life>
<https://shop.bsigroup.com/products/application-of-fire-safety-engineering-principles-to-the-design-of-buildings-human-factors-life>
- Burke, R. (2002). Hybrid Recommender Systems: Survey and Experiments. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 12(4), 331–370. <https://doi.org/10.1023/A:1021240730564>
- Burke, R. (2007). Hybrid web recommender systems. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4321 LNCS, 377–408. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72079-9_12
- Casado, R., Rubiera, E., Sacristan, M., Schütte, F., & Peters, R. (2015). Data interoperability software solution for emergency reaction in the Europe Union. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(7), 1563–1576. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1563-2015>
- Cha, S., Ruiz, M. P., Wachowicz, M., Tran, L. H., Cao, H., & Maduako, I. (2017). The role of an IoT platform in the design of real-time recommender systems. *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2016*, 448–453. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2016.7845469>
- Cho, J., Lee, G., & Lee, S. (2015). An automated direction setting algorithm for a smart exit sign. *Automation in Construction*, 59, 139–148. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2015.05.004>
- Cisek, M., & Kapalka, M. (2014). Evacuation Route Assessment Model for Optimization of Evacuation in Buildings with Active Dynamic Signage System. *Transportation Research Procedia*, 2, 541–549. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2014.09.094>
- Coelho, A. L. (1997). *Modelação matemática da evacuação de edifícios sujeitos à acção de um incêndio (Tese de Doutoramento)* [FEUP]. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12585>
- Coelho, A. L., & Neto, J. (2020). A importância da modelação das condições de segurança ao incêndio na reabilitação de edifício. In M. Menezes, M. R. Veiga, A. Santos Silva, L. Nunes, & J. Saporiti Machado (Eds.), *Livro de Atas do ENCORE 2020 - 4º Encontro de Conservação e Reabilitação de Edifícios* (pp. 345–356). LNEC. <https://doi.org/10.34638/yzys-hn57>
- Cordeiro, E. (2022). *Modelação do Comportamento Humano em Caso de Incêndio (Tese de Doutoramento)* [Universidade da Beira Interior]. <https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/12259>
- Cordeiro, E., Leça Coelho, A., Rossetti, R. J. F., & Almeida, J. E. (2011). Human Behavior Under Fire Situations – Portuguese Population. *Fire and Evacuation Modeling Technical Conference*.
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., & Rivest, R. L. (1990). THE Floyd-Warshall Algorithm. In *Introduction to Algorithms* (1st ed., pp. 558–565). MIT Press and McGraw-Hill.
- Desmet, A., & Gelenbe, E. (2014). Capacity based evacuation with dynamic exit signs. *2014 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication*

- Workshops (PERCOM WORKSHOPS)*, 332–337.
<https://doi.org/10.1109/PerComW.2014.6815227>
- Dey, A. K. (2001). Understanding and Using Context. *Personal and Ubiquitous Computing*, 5(1), 4–7. <https://doi.org/10.1007/s007790170019>
- Dhamala, T. N. (2014). A survey on models and algorithms for discrete evacuation planning network problems. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 11(1), 265–289. <https://doi.org/10.3934/jimo.2015.11.265>
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik 1959 1:1*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Di Martino, S., & Rossi, S. (2016). An Architecture for a Mobility Recommender System in Smart Cities. *Procedia Computer Science*, 98, 425–430.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.066>
- Dorri, A., Kanhere, S., & Jurdak, R. (2018). Multi-Agent Systems: A survey. *IEEE Access*, 6, 28573–28593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831228>
- Dourish, P. (2004). What we talk about when we talk about context. *Personal and Ubiquitous Computing*, 8(1), 19–30. <https://doi.org/10.1007/s00779-003-0253-8>
- Feng, Z., González, V. A., Amor, R., Lovreglio, R., & Cabrera, G. (2018). Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: A systematic literature review. *Computers & Education*, 127, 252–266.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPEDU.2018.09.002>
- Fernández-López, M., Gomez-Perez, A., & Juristo, N. (1997). METHONTOLOGY: from ontological art towards ontological engineering. *Engineering Workshop on Ontological Engineering (AAAI97)*.
- Filippoupolitis, A., Gorbil, G., & Gelenbe, E. (2011). Autonomous navigation systems for emergency management in buildings. *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 1056–1061. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2011.6162338>
- Forestiero, A. (2017). Multi-Agent Recommendation System in Internet of Things. *2017 17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID)*, 772–775. <https://doi.org/10.1109/CCGRID.2017.123>
- Forouzandeh, S., Aghdam, A. R., Barkhordari, M., Fahimi, S. A., Vayqan, M. karzari, Forouzandeh, S., & Khani, E. ghasem. (2017). Recommender system for Users of Internet of Things (IOT). *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 17(8), 46–51.
- Franklin, S., & Graesser, A. (1996). Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. *Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*, 21–36.
- Franklin, S., & Graesser, A. (2015). Is it an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1193, 21–35.
<https://doi.org/10.1007/bfb0013570>
- Garijo, D. (2017). WIDOCO: A wizard for documenting ontologies. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10588 LNCS, 94–102. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68204-4_9
- Georgoudas, I. G., Sirakoulis, G. Ch., & Andreadis, I. Th. (2011). An Anticipative Crowd Management System Preventing Clogging in Exits During Pedestrian Evacuation Processes. *IEEE Systems Journal*, 5(1), 129–141.
<https://doi.org/10.1109/JSYST.2010.2090400>

- Gilbert, D., Aparicio, M., Atkinson, B., Brady, S., Ciccarino, J., Grosz, B., O'Connor, P., Osisek, D., Pritko, S., Spagna, R., & Wilson, L. (1995). *IBM Intelligent Agent Strategy, White Paper*.
- Gokceli, S., Zhmurov, N., Kurt, G. K., & Ors, B. (2017). IoT in Action: Design and Implementation of a Building Evacuation Service. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/8595404>
- Gomez-Perez, A. (1995). Some ideas and examples to evaluate ontologies. *Proceedings the 11th Conference on Artificial Intelligence for Applications, CAIA 1995*, 299–305. <https://doi.org/10.1109/CAIA.1995.378808>
- Gómez-Pérez, A., Fernández-López, M., & Corcho, O. (2004). *Ontological engineering : with examples from the areas of knowledge management, e-commerce and the Semantic Web*. Springer.
- Gruber, T. (1995). Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal of Human - Computer Studies*, 43(5–6), 907–928. <https://doi.org/10.1006/ijhc.1995.1081>
- Gruber, T. (2009). Ontology. In L. LIU & M. T. ÖZSU (Eds.), *Encyclopedia of Database Systems* (pp. 1963–1965). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_1318
- Grüninger, M., & Fox, M. S. (1995). *Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies*.
- Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (1999). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment*, 34(6), 741–749. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00057-2)
- Gyrard, A., Bonnet, C., Boudaoud, K., & Serrano, M. (2016). LOV4IoT: A second life for ontology-based domain knowledge to build semantic web of things applications. *Proceedings - 2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud, FiCloud 2016*, 254–261. <https://doi.org/10.1109/FiCloud.2016.44>
- Hajibabai, L., Delavar, M. R., Malek, M. R., & Frank, A. U. (2007). Agent-Based Simulation of Spatial Cognition and Wayfinding in Building Fire Emergency Evacuation. In *Geomatics Solutions for Disaster Management* (pp. 255–270). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72108-6_17
- Hamacher, H. W., & Tjandra, S. A. (2001). *Mathematical Modelling of Evacuation Problems: A State of Art*. <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/docId/1477>
- Han, L. D., Yuan, F., & Urbanik, T. (2007). What Is an Effective Evacuation Operation? *Journal of Urban Planning and Development*, 133(1), 3–8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2007\)133:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2007)133:1(3))
- Han, Y., Liu, H., & Moore, P. (2017). Extended route choice model based on available evacuation route set and its application in crowd evacuation simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 75, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.03.010>
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100–107. <https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>
- Haruna, K., Akmar Ismail, M., Suhendroyono, S., Damiasih, D., Pierewan, A. C., Chiroma, H., & Herawan, T. (2017). Context-Aware Recommender System: A Review of Recent Developmental Process and Future Research Direction. *Applied Sciences*, 7(12).
- Hevner, A. (2007). A Three Cycle View of Design Science Research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19(2, Art. 4).

- Hevner, A., & Chatterjee, S. (2010). Design Science Research in Information Systems. In *Design Research in Information Systems: Theory and Practice* (pp. 9–22). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5653-8_2
- Hevner, A., March, S., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Q.*, 28(1), 75–105.
- Hristoskova, A., Ongenae, F., & De Turck, F. (2013). Semantic reasoning for intelligent emergency response applications. *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 547–554. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2013.6622943>
- Hsu, H. P., Yu, K. M., Chine, S. T., Cheng, S. T., Lei, M. Y., & Tsai, N. (2014). Emergency Evacuation Base on Intelligent Digital Signage Systems. *2014 7th International Conference on Ubi-Media Computing and Workshops*, 243–247. <https://doi.org/10.1109/U-MEDIA.2014.31>
- Huang, L., Dai, L., Wei, Y., & Huang, M. (2008). A Personalized Recommendation System Based on Multi-agent. *2008 Second International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*, 223–226. <https://doi.org/10.1109/WGEC.2008.45>
- Ibrahim, A. M., Venkat, I., Subramanian, K. G., Khader, A. T., & Wilde, P. de. (2016). Intelligent Evacuation Management Systems: A Review. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, 7(3), 36:1--36:27. <https://doi.org/10.1145/2842630>
- Inoue, Y., Sashima, A., Ikeda, T., & Kurumatani, K. (2008). Indoor Emergency Evacuation Service on Autonomous Navigation System using Mobile Phone. *2008 Second International Symposium on Universal Communication*, 79–85. <https://doi.org/10.1109/ISUC.2008.49>
- Jannach, D., Zanker, M., Felfernig, A., & Friedrich, G. (2011). Recommender systems: an introduction. In *Cambridge University Press* (Vol. 40). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511763113>
- Jennings, N. R. (2000). On agent-based software engineering. *Artificial Intelligence*, 117(2), 277–296. [https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(99\)00107-1](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(99)00107-1)
- Jennings, N. R. (2001). An Agent-based Approach for Building Complex Software Systems. *Commun. ACM*, 44(4), 35–41. <https://doi.org/10.1145/367211.367250>
- Kasereka, S., Kasoro, N., Kyamakya, K., Goufo, E.-F. D., Chokki, A. P., & Yengo, M. V. (2018). Agent-Based Modelling and Simulation for evacuation of people from a building in case of fire. *Procedia Computer Science*, 130, 10–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.006>
- Klašnja-Milićević, A., Ivanović, M., & Nanopoulos, A. (2015). Recommender systems in e-learning environments: a survey of the state-of-the-art and possible extensions. *Artificial Intelligence Review*, 44(4), 571–604. <https://doi.org/10.1007/s10462-015-9440-z>
- Kobes, M., Helsloot, I., de Vries, B., & Post, J. G. (2010). Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*, 45(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2009.08.005>
- Kruger, C. P., Hancke, G. P., & Bhatt, D. V. (2012). Wireless sensor network for building evacuation. *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 2572–2577. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2012.6229656>
- Kuligowski, E. D., & Peacock, R. D. (2005). A Review of Building Evacuation Models | NIST. *Technical Note (NIST TN) - 1633*. <https://www.nist.gov/publications/review-building-evacuation-models-1>

- Laghari, A. A., Wu, K., Laghari, R. A., Ali, M., & Khan, A. A. (2021). A Review and State of Art of Internet of Things (IoT). *Archives of Computational Methods in Engineering* 2021 29:3, 29(3), 1395–1413. <https://doi.org/10.1007/S11831-021-09622-6>
- Lee, D., Kim, D., Lee, J., Lee, S., Hwang, H., Mariappan, V., Lee, M., & Cha, J. (2017). Environment Adaptive Emergency Evacuation Route GUIDE through Digital Signage Systems. *International Journal of Advanced Culture Technology*, 5(1), 90–97. <https://doi.org/10.17703/IJACT.2017.5.1.90>
- Lee, W.-P., LIU, C., & LU, C. (2002). Intelligent agent-based systems for personalized recommendations in Internet commerce. *Expert Systems with Applications*, 22(4), 275–284. [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(02\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00015-5)
- Li, J. J., & Zhu, H. Y. (2018). A Risk-based Model of Evacuation Route Optimization under Fire. *Procedia Engineering*, 211, 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.024>
- Liu, G., Xu, B., Tu, Q., Sha, Y., & Xu, Z. (2011). Towards building ontology for community-based fire management. *Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering, TMEE 2011*, 1366–1369. <https://doi.org/10.1109/TMEE.2011.6199460>
- Liu, J., Rojas-Cessa, R., & Dong, Z. (2016). Sensing, calculating, and disseminating evacuating routes during an indoor fire using a sensor and diffusion network. *2016 IEEE 13th International Conference on Networking, Sensing, and Control (ICNSC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2016.7479014>
- Lops, P., de Gemmis, M., & Semeraro, G. (2011). Content-based Recommender Systems: State of the Art and Trends. In F. Ricci, L. Rokach, B. Shapira, & P. B. Kantor (Eds.), *Recommender Systems Handbook* (pp. 73–105). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3_3
- Lujak, M., Giordani, S., & Ossowski, S. (2016). An architecture for safe evacuation route recommendation in smart spaces. *CEUR Workshop Proceedings*, 1678.
- Lujak, M., & Ossowski, S. (2017). Evacuation route optimization architecture considering human factor. *AI Communications*, 30(1), 53–66.
- Lu, J., Wu, D., Mao, M., Wang, W., & Zhang, G. (2015). Recommender system application developments: A survey. *Decision Support Systems*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2015.03.008>
- Maes, P. (1991). The agent network architecture (ANA). *ACM SIGART Bulletin*, 2(4), 115–120. <https://doi.org/10.1145/122344.122367>
- Malizia, A., Onorati, T., Diaz, P., Aedo, I., & Astorga-Paliza, F. (2010). SEMA4A: An ontology for emergency notification systems accessibility. *Expert Systems with Applications*, 37(4), 3380–3391. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2009.10.010>
- Miao, C., Yang, Q., Fang, H., & Goh, A. (2007). A cognitive approach for agent-based personalized recommendation. *Knowledge-Based Systems*, 20(4), 397–405. <https://doi.org/10.1016/J.KNOSYS.2006.06.006>
- Miranda, J., Mäkitalo, N., Garcia-Alonso, J., Berrocal, J., Mikkonen, T., Canal, C., & Murillo, J. M. (2015). From the Internet of Things to the Internet of People. *IEEE Internet Computing*, 19(2), 40–47. <https://doi.org/10.1109/MIC.2015.24>
- Moin, S., Muhamamd, A., & Martinez-Enriquez, A. M. (2014). Agent based mobile recommender system. *2014 11th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2014.6978332>

- Morais, A. J. (2009). A Multi-agent Approach for Web Adaptation. In Y. Demazeau, J. Pavón, J. M. Corchado, & J. Bajo (Eds.), *7th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 2009)* (pp. 349–355). Springer Berlin Heidelberg.
- Morais, A. J., Oliveira, E., & Jorge, A. M. (2012). A multi-agent recommender system. *Advances in Intelligent and Soft Computing, 151 AISC*, 281–288. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28765-7_33
- Musen, M. A. (2015). The protégé project: A look back and a look forward. *AI Matters, 1*(4), 4–12. <https://doi.org/10.1145/2757001.2757003>
- Neto, J., & Morais, A. J. (2014). Multi-agent web recommendations. *Advances in Intelligent Systems and Computing, 290*, 235–242. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07593-8_28
- Neto, J., Morais, A. J., Gonçalves, R., & Coelho, A. L. (2019). A Multi-agent System for Recommending Fire Evacuation Routes in Buildings, Based on Context and IoT. In *Communications in Computer and Information Science* (pp. 343–347). https://doi.org/10.1007/978-3-030-24299-2_34
- Neto, J., Morais, A. J., Gonçalves, R., & Coelho, A. L. (2022a). An Ontology for Fire Building Evacuation. In X.S. Yang, S. Sherratt, N. Dey, & A. Joshi (Eds.), *Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 216, pp. 975–985). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1781-2_84
- Neto, J., Morais, A. J., Gonçalves, R., & Coelho, A. L. (2022b). Multi-Agent-Based Recommender Systems: A Literature Review. In X.-S. Yang, S. Sherratt, N. Dey, & A. Joshi (Eds.), *Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and System* (Vol. 235, pp. 543–555). Springer Singapore.
- Neto, J., Morais, A. J., Gonçalves, R., & Coelho, A. L. (2022c). Context-Based Multi-Agent Recommender System, Supported on IoT, for Guiding the Occupants of a Building in Case of a Fire. *Electronics, 11*(21), 3466. <https://doi.org/10.3390/electronics11213466>
- Neto, J., Morais, A. J., Gonçalves, R., & Coelho, A. L. (2023a). Geometric and Physical Building Representation and Occupant’s Movement Models for Fire Building Evacuation Simulation. In X.-S. Yan, S. Sherratt, N. Dey, & A. Joshi (Eds.), *Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems*, (Vol. 448, pp. 761–772). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1610-6_67
- Neto, J., Morais, A. J., Gonçalves, R., & Coelho, A. L. (2023b). An Ontological Model for Fire Evacuation Route Recommendation in Buildings. In X.-S. Yan, S. Sherratt, N. Dey, & A. Joshi (Eds.), *Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology: ICICT 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 464* (Vol. 3, pp. 109–119). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2394-4_10
- Noy, N., & McGuinness, D. (2001). Ontology development 101: A guide to creating your first ontology. *Protege, 32*, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2004.01.014>
- Onorati, T., Malizia, A., Diaz, P., & Aedo, I. (2014). Modeling an ontology on accessible evacuation routes for emergencies. *Expert Systems with Applications, 41*(16), 7124–7134. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.039>
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems, 24*(3), 45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>

- Pinheiro, J. (2012). *MEDIDAS DE AUTOPROTEÇÃO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS* (Volume 1). Autoridade Nacional de Protecção Civil.
- Pinto, H. S., & Martins, J. P. (2004). Ontologies: How can They be Built? *Knowledge and Information Systems*, 6(4), 441–464. <https://doi.org/10.1007/s10115-003-0138-1>
- Pinto, T., Faia, R., Navarro-Caceres, M., Santos, G., Corchado, J. M., & Vale, Z. (2019). Multi-agent-based CBR recommender system for intelligent energy management in buildings. *IEEE Systems Journal*, 13(1), 1084–1095. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2876933>
- Poveda-Villalón, M., Gómez-Pérez, A., & Suárez-Figueroa, M. C. (2014). OOPS! (Ontology Pitfall Scanner!): An on-line tool for ontology evaluation. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, 10(2), 7–34. <https://doi.org/10.4018/ijswis.2014040102>
- Powell, T. C. (2001). Competitive advantage: logical and philosophical considerations. *Strategic Management Journal*, 22(9), 875–888. <https://doi.org/10.1002/smj.173>
- Predtechenskii, V. M., & Milinskii, A. I. (1978). *Planning for Foot Traffic Flow in Buildings*. Amerind. <https://books.google.pt/books?id=3AZaPwAACAAJ>
- Pu, S., & Zlatanova, S. (2005). Evacuation route calculation of inner buildings. In *Geo-information for disaster management* (pp. 1143–1161). Springer.
- Rahman, M. M. (2013). Contextual Recommender Systems Using a Multidimensional Approach. *International Journal of Intelligent Information Systems*, 2(4), 55. <https://doi.org/10.11648/j.ijiis.20130204.11>
- Recker, J. (2012). The Research Process. In *Scientific Research in Information Systems* (pp. 25–43). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30048-6_3
- Resnick, P., & Varian, H. R. (1997). Recommender Systems. *Commun. ACM*, 40(3), 56–58. <https://doi.org/10.1145/245108.245121>
- Ribeiro, J., Almeida, J. E., Rossetti, R. J. F., Coelho, A., & Coelho, A. L. (2013). Towards a serious games evacuation simulator. *CoRR*, abs/1303.3.
- Ricci, F., Rokach, L., & Shapira, B. (2011). Introduction to Recommender Systems Handbook. In *Recommender Systems Handbook*. https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3_1
- Rodríguez, P., Duque, N., & Ovalle, D. A. (2015). Multi-agent System for Knowledge-Based Recommendation of Learning Objects Using Metadata Clustering. In J. Bajo, K. Hallenborg, P. Pawlewski, V. Botti, N. Sánchez-Pi, N. D. Duque Méndez, F. Lopes, & V. Julian (Eds.), *Highlights of Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Sustainability - The PAAMS Collection* (pp. 356–364). Springer International Publishing.
- Ronchi, E., & Nilsson, D. (2013). Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research. *Fire Science Reviews*, 2(1), 7. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-7>
- Ruggiero, L. (2018). *A Review of Augmented Reality Applications for Building Evacuation*. <http://arxiv.org/abs/1804.04186>
- Salazar, O. M., Ovalle, D. A., & Duque, N. D. (2015). Adaptive and Personalized Educational Ubiquitous Multi-Agent System Using Context-Awareness Services and Mobile Devices. In P. Zaphiris & A. Ioannou (Eds.), *Learning and Collaboration Technologies* (pp. 301–312). Springer International Publishing.
- Salman, Y., Abu-Issa, A., Tumar, I., & Hassouneh, Y. (2015). A Proactive Multi-type Context-Aware Recommender System in the Environment of Internet of Things. *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous*

- Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*, 351–355.
<https://doi.org/10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.50>
- Santhi Sri, T., Rajendra Prasad, J., & Vijayalakshmi, Y. (2016). A review on the state of art of Internet of Things. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(7), 189–193.
<https://doi.org/10.17148/IJARCCCE.2016.5738>
- Shikhalev, D., Khabibulin, R., Kemloh, U., & Gudim, S. (2016). Evacuation Simulation under Different Conditions using a Safest Path Routing Algorithm. *Proceedings of the 18th International Conference on Enterprise Information Systems*, 62–69.
<https://doi.org/10.5220/0005834800620069>
- Stone, P., & Veloso, M. (2000). Multiagent Systems: A Survey from a Machine Learning Perspective. *Autonomous Robots* 2000 8:3, 8(3), 345–383.
<https://doi.org/10.1023/A:1008942012299>
- Taghavi, M., Bakhtiyari, K., & Scavino, E. (2013). Agent-based Computational Investing Recommender System. *Proceedings of the 7th ACM Conference on Recommender Systems*, 455–458. <https://doi.org/10.1145/2507157.2508072>
- Taillandier, P., Gaudou, B., Grignard, A., Huynh, Q.-N., Marilleau, N., Caillou, P., Philippon, D., & Drogoul, A. (2018). Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica 2018 23:2*, 23(2), 299–322.
<https://doi.org/10.1007/S10707-018-00339-6>
- Tan, L., Hu, M., & Lin, H. (2015). Agent-based simulation of building evacuation: Combining human behavior with predictable spatial accessibility in a fire emergency. *Information Sciences*, 295, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.09.029>
- Tisue, S., Tisue, S., & Wilensky, U. (2004). Netlogo: A simple environment for modeling complexity. *IN INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPLEX SYSTEMS*, 16--21.
- Tu, M., Chang, Y.-K., & Chen, Y.-T. (2016). A Context-Aware Recommender System Framework for IoT Based Interactive Digital Signage in Urban Space. *Proceedings of the Second International Conference on IoT in Urban Space*, 39–42.
<https://doi.org/10.1145/2962735.2962736>
- Twardowski, B., & Ryzko, D. (2015). IoT and Context-Aware Mobile Recommendations Using Multi-agent Systems. *2015 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT)*, 1, 33–40.
<https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2015.120>
- Uschold, M., & King, M. (1995). *Towards a Methodology for Building Ontologies*.
- Verbert, K., Manouselis, N., Ochoa, X., Wolpers, M., Drachsler, H., Bosnic, I., & Duval, E. (2012). Context-Aware Recommender Systems for Learning: A Survey and Future Challenges. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 5(4), 318–335.
<https://doi.org/10.1109/TLT.2012.11>
- W3C. (2004). *OWL Web Ontology Language Overview*. <https://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-features-20040210/#property>
- Wagoum, A. U. K. (2013). Conception, Development, Installation and Evaluation of a Real Time Evacuation Assistant for Complex Buildings. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 728–736. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2013.11.167>
- Wang, J., Zhao, H., & Winter, S. (2015). Integrating sensing, routing and timing for indoor evacuation. *Fire Safety Journal*, 78, 111–121.
<https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2015.08.009>

- Weifang, Z., & Qiang, C. (2015). Implementation of intelligent fire evacuation route based on Internet of things. *2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 934–938. <https://doi.org/10.1109/IAEAC.2015.7428693>
- Wei, Y. A. N. Z., Moreau, L. U. C., & Jennings, N. R. (2005). *A Market-Based Approach to Recommender Systems*. 23(3), 227–266.
- Wisniewski, D., Potoniec, J., Lawrynowicz, A., & Keet, C. M. (2018). *Competency Questions and SPARQL-OWL Queries Dataset and Analysis*.
- Wooldridge, M. (2009). An Introduction to MultiAgent Systems - Second Edition by Michael Wooldridge Published May 2009 by John Wiley & Sons ISBN-10: 0470519460 ISBN-13: 978-0470519462. In *2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc.*
- Wooldridge, M., & Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents: Theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*. <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>
- Wu, C.-C., Yu, K.-M., Chine, S.-T., Cheng, S.-T., Huang, Y.-S., Lei, M.-Y., & Lin, J.-H. (2013). An intelligent active alert application on handheld devices for emergency evacuation guidance. *2013 Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 7–11. <https://doi.org/10.1109/ICUFN.2013.6614766>
- Yang, X., Guo, Y., Liu, Y., & Steck, H. (2014). A survey of collaborative filtering based social recommender systems. *Computer Communications*, 41, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.COMCOM.2013.06.009>
- Yao, L., Sheng, Q. Z., Ngu, A. H. H., Ashman, H., & Li, X. (2014). Exploring recommendations in internet of things. *Proceedings of the 37th International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval - SIGIR '14*, 855–858. <https://doi.org/10.1145/2600428.2609458>
- Ye, J., Coyle, L., Dobson, S., & Nixon, P. (2007). Ontology-based Models in Pervasive Computing Systems. *Knowl. Eng. Rev.*, 22(4), 315–347. <https://doi.org/10.1017/S0269888907001208>
- Yenumula, K., Kolmer, C., Pan, J., & Su, X. (2015). BIM-Controlled Signage System for Building Evacuation. *Procedia Engineering*, 118, 284–289. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.08.428>
- Zhou, J., Wu, C.-C., Yu, K.-M., Tsao, Y., Lei, M.-Y., Chen, C.-J., Cheng, S.-T., & Huang, Y.-S. (2012). Crowd Guidance for Emergency Fire Evacuation Based on Wireless Sensor Networks. *The 5th IET International Conference on Ubi-Media Computing (U-Media 2012)*, 303–308.