



INSTITUTO  
UNIVERSITÁRIO  
DE LISBOA

---

## Modelação e Simulação Computacional de Exercícios de Evacuação da Escola Secundária Rainha Dona Leonor, Lisboa

Omar Alexandre Lucas

Mestrado em Engenharia Informática

Orientador:

Doutor Nuno Manuel Mendes Cruz David, Professor Associado,  
ISCTE-IUL

Co-Orientadora:

Doutora Ângela Cristina Carvalho Silva Santos, Investigadora,  
IGOT-UL

janeiro, 2024



Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Modelação e Simulação Computacional de Exercícios de  
Evacuação da Escola Secundária Rainha Dona Leonor, Lisboa

Omar Alexandre Lucas

Mestrado em Engenharia Informática

Orientador:

Doutor Nuno Manuel Mendes Cruz David, Professor Associado,  
Associado,  
ISCTE-IUL

Co-Orientadora:

Doutora Ângela Cristina Carvalho Silva Santos, Investigadora,  
IGOT-UL

janeiro, 2024



## Agradecimentos

A realização desta dissertação é um marco muito importante no meu percurso académico. Desde já agradeço a todas as pessoas que me ajudaram neste caminho com o seu apoio e perseverança. Individualizo os meus agradecimentos sem qualquer ordem de importância.

Agradeço ao professor Nuno David, meu docente na cadeira de Simulação de Sistemas Sociais, e orientador da minha dissertação de mestrado, pela sua ajuda e disponibilidade assim como pelo pragmatismo e fortes orientações com que sempre me brindou e serviram de fio condutor para não me desviar dos pontos essenciais.

Agradeço à professora Ângela Santos, minha orientadora na tese de mestrado, pela sua enorme disponibilidade, enorme interesse no trabalho que fui desenvolvendo desde o seu início, e pelo seu acompanhamento constante quer em idas ao terreno, quer na disponibilização de informação que me possibilitasse evoluir nos trabalhos.

Agradeço ao professor Ricardo Pereira, meu docente na cadeira de Profissão, Ética e Sociedade pelo acompanhamento durante a fase introdutória da dissertação.

Agradeço ao professor Pedro Santana, meu docente nas cadeiras de programação 3D, realidade mista e programação e geração de mundos virtuais, por ter sido uma fonte de inspiração, não diretamente nesta dissertação, mas durante todo o meu mestrado no ISCTE.

Por fim agradeço à minha mulher e minha filha que me deram todas as condições para que pudesse encerrar este capítulo tendo muitas vezes se privado da minha companhia em prejuízo próprio.

Um muito obrigado a todos.

---



## Resumo

A importância da tecnologia é transversal a inúmeros domínios da sociedade. O acesso à informação e a ferramentas tecnológicas contribui para um leque cada vez mais alargado de possibilidades de desenho de sistemas com vista à resolução de problemas. Com esta tese de dissertação pretende-se implementar uma simulação baseada em agentes com recurso à linguagem Python. Considera-se que para além do contributo para a comunidade académica, tal invenção poderá ter utilidade prática no planeamento de sistemas de evacuação de edifícios.

Este trabalho apresenta um modelo computacional capaz de reproduzir a evacuação feita pelos alunos da secundária Rainha D. Leonor durante um exercício de simulacro. Os dados obtidos através do modelo permitiram comparar visualmente a simulação e o exercício real através da criação de uma animação por computador. A análise de métricas relacionadas com tempos de evacuação e distâncias percorridas permitiram criar estatísticas que nos ajudaram a perceber as dinâmicas de evacuação entre os estudantes no espaço físico. O trabalho de análise consistiu em validar ou refutar as perguntas de investigação com a fundamentação dos dados recolhidos pelo modelo.

Para a implementação da simulação foi utilizada uma modelação baseada em agentes juntamente com um algoritmo de aprendizagem por reforço. Foi utilizado o algoritmo de força social em combinação com sistemas de informação geográficos para gerir as interações dos alunos no espaço físico. Por fim foi utilizado um algoritmo de aprendizagem automática não supervisionada para descobrir padrões estatísticos nos dados.

Palavras-chave: Python, aprendizagem automática, simulação, modelos baseados em agentes, sistemas de informação geográficos, bibliotecas





## Abstract

*The importance of technology spreads across all domains of society. Access to free information and technological tools often contributes to an increasingly wide range of possibilities for designing systems that solve problems. With this dissertation thesis we intend to implement an agent-based simulation using the Python language. We believe that such construct can be useful in the design of evacuation systems for buildings, as well as providing practical measures of evacuation in various scenarios.*

*This computational model goal is to replicate the evacuation process undertaken by the students of Rainha D. Leonor Secondary School in Lisbon during a simulated drill. The data collected facilitated a comparative analysis between the simulation and the real-life exercise, involving the creation of a computer-generated animation and the assessment of various metrics like evacuation times and distances covered.*

*For the simulation's implementation, an agent-based modeling approach was employed to delineate the individual behaviors of students. A reinforcement learning algorithm was utilized to instruct the agents in navigating the school through the quickest evacuation route. Additionally, the social force algorithm, in conjunction with geographic information systems, was employed to regulate students interactions within the spatial environment. Lastly, we used a unsupervised machine learning algorithm to discern statistical patterns in the generated data, facilitating the formulation of conclusions for the study.*

*Keywords: python, machine learning, simulation, agent-based models, geographical information systems, libraries*



# Índice

<b>RESUMO.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Perguntas de investigação.....	4
1.4. Metodologia de investigação .....	4
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
<b>3. DESCRIÇÃO TEÓRICA DO MODELO .....</b>	<b>11</b>
3.1. Modelação baseada em agentes.....	11
3.1.1. Ambiente e espaço.....	12
3.1.2. Tempo .....	16
3.1.3. População.....	17
3.1.4. Regras físicas.....	17
3.2. Aprendizagem por reforço .....	17
3.3. Sistemas de Informação Geográficos.....	21
3.4. Algoritmo de força social.....	24
<b>4. IMPLEMENTAÇÃO.....</b>	<b>27</b>
4.1. Camada de criação .....	28
4.2. Camada de gravação.....	28
4.3. Camada de visualização.....	29
<b>5. EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
5.1. Resultados relativos à velocidade de deslocação e tempos de evacuação.....	35
5.2. Aglomeração de alunos .....	39
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO A – MANUAL DE INSTALAÇÃO .....</b>	<b>47</b>

## Índice de Figuras

Figura 1.1 Ciclo de desenvolvimento DSR .....	5
Figura 2.1 Fluxo de evacuação utilizado no IGOT (2018).....	7
Figura 3.1 Sala de aula do piso 1 .....	13
Figura 3.2 Corredor de acesso às salas de aula.....	13
Figura 3.3 Sinalização para acesso à escadaria.....	14
Figura 3.4 Escadaria de acesso à galeria.....	14
Figura 3.5 Porta de acesso ao exterior do edifício.....	14
Figura 3.6 Corredor de ponto de encontro.....	15
Figura 3.7 Rota de evacuação.....	16
Figura 3.8 Aplicação do algoritmo de aprendizagem por reforço .....	19
Figura 3.9 Planta do edifício no piso 1 editada com camadas no QGIS .....	23
Figura 3.10 Exemplo de interação do Modelo de força social.....	25
Figura 4.1 – A aplicação integra 3 camadas que permitem gerar, correr e visualizar a simulação .....	27
Figura 4.2 Sistema de transformação de coordenadas Imagem retirada de [19, p. Figura 5.3] .....	29
Figura 4.3 Sistema de referência geográfico .....	30
Figura 4.4 Captura de animação gerada pela camada de visualização Os círculos representam alunos de 2 turmas divididas pelas cores vermelho e azul.....	31
Figura 5.1 Localização do ponto de Encontro definido O círculo verde representa a saída do edifício, as áreas a azul e vermelho representam respetivamente os pontos de encontro 1 e 2 .....	33
Figura 5.2 Amostra exemplificativa de dados em bruto de simulações.....	34
Figura 5.3 Tempo observado na experiência E1 versus a simulação S2.....	36
Figura 5.4 Velocidade Média por Simulação em Função do Número de Alunos.....	39
Figura 5.5 Classificação k-means para o piso 1 O resultado é virtualmente igual para todas as simulações em todos os cenários .....	40
Figura 5.6 Classificação k-means para o piso 0 .....	41

## Índice de Quadros

Quadro 1.1 Resumo dos exercícios executados.....	3
Quadro 3.1 Matriz de recompensa .....	20
Quadro 3.2 Composição das camadas e seus objetos.....	23
Quadro 5.1 Descrição das experiências e tempos de execução.....	32
Quadro 5.2 Velocidade Média dos Alunos Agrupada por Cenário e Experiência.....	35
Quadro 5.3 Velocidade e distância por Simulação e Piso.....	37
Quadro 5.4 Estatística descritiva para a velocidade média por agente.....	38

## Lista de abreviaturas

AI – Inteligência Artificial  
APSEI – Associação Portuguesa de Segurança  
SCG – Sistema de Coordenadas Geográficas  
DSR – *Design Science Research*  
HTML – *Hypertext Markup Language*  
JS – *Javascript*  
LM – *Landmark*  
ABM – Modelação Baseada em Agentes  
POO – Programação Orientada a Objetos  
RAM – *Read Access Memory*  
SHP – *Shapefiles*  
SIG – Sistema de Informação Geográficos  
TD – Diferença Temporal

---

## 1. Introdução

A presente dissertação tem como objetivo fazer a simulação por computador de um exercício de evacuação de um edifício escolar. A evacuação ocorre num modelo da escola secundária Rainha Dona Leonor em Lisboa e é executada por agentes artificiais que pretendem simular o comportamento de alunos e pessoal docente durante a referida evacuação. O objetivo dos agentes pedestres é o de evacuar as salas de aulas e pisos da escola de uma forma ordeira e cooperativa para, de seguida, se reunirem no exterior do edifício.

No processo de desenho e projeção de um edifício, um dos aspetos que um arquiteto deverá ter em conta consiste na implementação de rotas de evacuação e de saídas de emergência. As considerações que motivam as escolhas arquitetónicas com maior potencial de eficácia e segurança, no que diz respeito a planos de evacuação, são normalmente feitas a partir de dados estatísticos retirados de exercícios de treino real. Embora seja um procedimento de grande utilidade, implica uma grande mobilização de tempo e meios humanos. O desenvolvimento de um sistema de simulação informático como uma alternativa aos simulacros tem diversas vantagens, tais como:

- Reduzir o esforço humano de implementação.
- Testar vários cenários com diferentes configurações e diferente número de agentes e rotas de evacuação.
- Manipular as condições do ambiente de acordo com as necessidades do observador.

Uma vez que os agentes deste tipo de exercícios são seres humanos, importa referir que o seu comportamento não é determinista. Os agentes não se comportam todos da mesma forma, não se movem à mesma velocidade e não obedecem de forma idêntica aos protocolos de evacuação implementados. Esta heterogeneidade ao nível do comportamento individual deve ser reproduzida nas experiências. Deverá ser possível a partir do produto das interações dos agentes, visualizar padrões emergentes à larga escala. Para implementar esta dinâmica irá ser utilizada uma metodologia de modelação baseada em agentes (ABM). Nos capítulos seguintes irá ser explicado o conceito de ABM e de que forma irá ser implementado durante as várias fases do processo. Será também explicada em que medida esta dissertação é inovadora em relação a outros trabalhos semelhantes e porque, ao longo da implementação do modelo, foram escolhidos determinados algoritmos e linguagens de programação em detrimento de outros. O trabalho está dividido em 6 capítulos:

- O presente capítulo que introduz e contextualiza o trabalho desenvolvido. São apresentados os objetivos, metodologias e perguntas de investigação.

- O capítulo de revisão da literatura, onde é aprofundada a problemática dos exercícios e simulações de evacuação, o trabalho de outros autores, e metodologias utilizadas para sua resolução.
- O capítulo de descrição teórica e desenvolvimento do modelo onde se referem as suas principais características e os métodos e técnicas utilizadas para o desenvolvimento da simulação. São explicados os algoritmos implementados e feita a demonstração de como foram estendidos de modo a produzir mais-valia para o projeto.
- O capítulo de implementação que aborda a componente de engenharia de software. São apresentadas as funcionalidades implementadas e é feita a descrição de como se integram com as várias bibliotecas utilizadas.
- O capítulo de experiências e resultados onde são exibidas as análises e métricas resultantes das simulações feitas.
- O capítulo de conclusões onde são validadas as hipóteses formuladas.

## **1.1. Enquadramento**

Os edifícios institucionais de maior ou menor dimensão, para estarem em conformidade com a lei, deverão contemplar medidas de contingência de forma a responder a situações de catástrofe tais como atentados terroristas, incêndios ou sismos. Uma vez que tais desastres não podem ser previstos, todos os intervenientes deverão conhecer os protocolos de segurança e sua aplicação, de forma a garantir a eficiência e eficácia dos procedimentos. Estas instituições podem ser escolas, escritórios, tribunais, espaços comerciais, entres outros. Os exercícios de simulação, são uma rotina fundamental para reciclar e solidificar o conhecimento dos agentes sobre o plano de evacuação específico a cada espaço. Apesar de importantes, estes exercícios têm vários constrangimentos que limitam a sua real efetividade:

- Por uma questão de custos e mobilização de pessoas, a periodicidade deste tipo de exercícios é normalmente baixa. A APSEI (Associação Portuguesa de Segurança) recomenda que seja feito um simulacro a cada seis meses, sendo que “a periodicidade associada à realização de simulacros, quando aplicável, é na maioria dos casos de dois anos e em alguns casos anual. A não realização de simulacros nos prazos previstos é punível com coima de 275€ até 2750€” [1].
- A baixa frequência de simulacros e formações de segurança reduz os bons hábitos e provoca o esquecimento das medidas de autoproteção.



- 
- O baixo número de catástrofes naturais, desastres e de atentados terroristas na realidade Portuguesa é motivo de relaxamento e desvalorização deste tipo de fenómenos.

Na sequência dos constrangimentos apresentados, entende-se necessário adotar medidas com vista a melhorar os processos. Estas melhorias podem ser, por exemplo, criar mais e melhor acessibilidade nos locais de evacuação, mais meios de combate ao fogo e melhor sinalização de saídas de emergência e perigos. A motivação desta dissertação surge no seguimento da problemática referida. Surge a necessidade de modelar o problema recorrendo a sistemas informáticos uma vez que conseguem resolver os constrangimentos já referidos e permitem extrair informação para análise, implementação e reelaboração de planos de emergência alternativos de forma rápida e com custos baixos.

O estudo desta dissertação centra-se na escola Secundária Rainha D. Leonor, localizada em Lisboa. A escola tem cerca de 1350 estudantes sendo que o estudo utilizou aproximadamente 20% dos alunos (275), distribuídos por 11 turmas de 25 alunos. O trabalho realizado pretende recriar um conjunto de exercícios de evacuação realizados nesta escola. Como mostra o Quadro 1.1, foram observados 3 exercícios com características distintas aos quais chamamos de E1, E2 e E3.

#### Quadro 1.1

##### Resumo dos exercícios executados

Exercício	Ano	Descritivo
E1	2018	Ponto de encontro não organizado
E2	2019	Ponto de encontro organizado em quadrados para turmas
E3	2022	Ponto de encontro organizado em filas para as turmas

O exercício E1 que ocorreu em 17 de janeiro de 2018 foi registado por observação direta em vídeo e fotos para ajudar a estudar o processo da evacuação. Este exercício demorou cerca de 4 minutos, a evacuação foi visivelmente desordenada, e a deslocação final dos alunos no pátio (Ponto de Encontro) mostrou-se caótica. Alguns alunos ficaram junto ao prédio e outros colocaram-se em cima dos bancos por falta de espaço. Em 2019 foi realizado o exercício E2 com uma reformulação do plano de evacuação. Foram pintados quadrados no pátio para definir os limites que as turmas deveriam ocupar de forma a conseguir uma melhor organização do espaço. Houve uma ligeira redução de tempo de evacuação, para 3 minutos e 54 segundos e a evacuação de forma geral foi mais ordenada. Em 2022 no exercício E3 foi melhorada a arrumação

das turmas no Ponto de Encontro, com a pintura dos lugares das turmas ao longo do muro a toda a largura do pátio. Assim, as turmas arrumam-se ordenadamente em filas paralelas, o que facilita muito a conferência dos presentes no final do exercício, apesar de o tempo de evacuação não ter ganhos significativos.

## **1.2. Objetivos**

Foram definidos como objetivos principais desta dissertação:

- Criar um sistema que simule a evacuação de alunos na Escola Secundária Rainha Dona Leonor em Lisboa para os exercícios referidos.
- Conferir ao sistema inteligência que tente simular o comportamento humano.
- Fazer a análise dos dados produzidos pela simulação.

Os requisitos de implementação do modelo são os seguintes:

- O modelo deverá ser um ABM.
- A linguagem de programação para implementação do modelo deverá ser Python.
- O modelo deverá integrar sistemas de informação geográficos (SIG).

## **1.3. Perguntas de investigação**

A validação do modelo está intrinsecamente ligada às hipóteses levantadas. A forma de validação das experiências faz-se através da comparação da simulação com o exercício real. Visualizando a simulação é possível aferir se o modelo é capaz de reproduzir a realidade através do comportamento individual dos agentes, do comportamento da biomassa (que é composta pela população de alunos em movimento) e do tempo total de evacuação. No seguimento do exposto definem-se como hipóteses:

H1: O modelo implementado é capaz de reproduzir um exercício de simulação real.

H2: O modelo implementado tem tempos de evacuação inferiores aos exercícios reais.

H3: A velocidade da evacuação é dependente do número total de alunos.

H4: A concentração de alunos em determinada área pode ser medida analisando a velocidade a que se movem.

## **1.4. Metodologia de investigação**

A metodologia de pesquisa científica utilizada para a elaboração desta dissertação é o Design Science Research (DSR). O DSR é um paradigma de resolução de problemas orientado à criação

---

de artefactos. Estes artefactos visam criar soluções inovadoras para problemas do mundo real e são representados por modelos, métodos, instanciações e construções [2]. Na Figura 1.1 é esquematizado um ciclo do DSR como sendo um processo iterativo com várias fases. Os quadrados pintados a amarelo representam as fases iniciais do DSR que definem a fase exploratória do trabalho de pesquisa científica. Este ciclo pode ser iterado tantas vezes quantas forem necessárias.

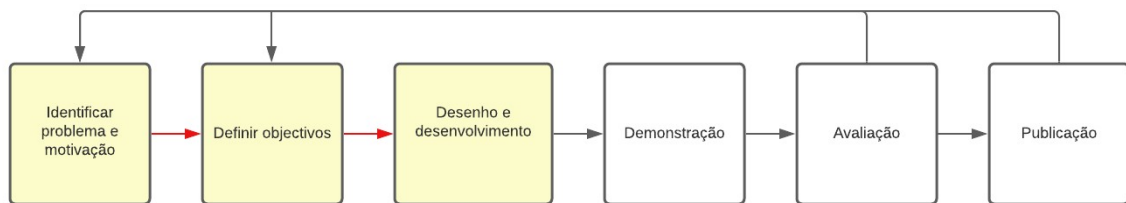


Figura 1.1  
Ciclo de desenvolvimento DSR

- Fase 1: Identificação do problema e motivação: fase em que é identificado o problema e surge a motivação para a sua resolução.
- Fase 2: Definição de objetivos: fase em que surgem objetivos específicos que visam a solução. Por esta altura são definidas metas muito claras. Nesta fase são idealizadas as funcionalidades dos artefactos e como eles irão produzir mais-valias na resolução de problemas
  - Fase 3: Desenho e desenvolvimento: fase em que surgem versões do artefacto. São criadas funcionalidades.
  - Fase 4: Demonstração: fase em que são demonstradas as funcionalidades do artefacto e é possível produzir métricas.
  - Fase 5: Avaliação: fase em que podemos avaliar quanto à eficácia e eficiência o resultado que foi produzido na fase da demonstração. A partir desta fase, o modelo pode voltar à fase de definição de objetivos ou desenho e desenvolvimento.
  - Fase 6: Comunicação: nesta fase irá ser publicada a invenção, as suas funcionalidades e a mais-valia que poderá gerar ao resolver problemas reais. Não é um trabalho fechado, é passível de voltar à fase 2 ou 3 caso exista uma nova necessidade ou uma alteração do contexto inicial. O DSR aplica-se a esta dissertação na medida em que foi identificado um problema real, existe uma clara motivação para o resolver, não foi encontrada na pesquisa bibliográfica uma solução tecnológica em tudo semelhante à que se pretende implementar, mais concretamente

um ABM implementada em Python e suportada por um SIG. Espera-se criar mais-valia que contribua para a melhoria dos procedimentos de evacuação em escolas e universidades.

## 2. Revisão da literatura

No artigo científico escrito por [3] foi executada uma simulação de evacuação de 3 turmas de alunos no instituto de geografia e ordenamento do território (IGOT). Os alunos foram informados de procedimentos de segurança a adotar em situações de sismo. Tais procedimentos implicam o conhecimento de rotas de evacuação, seguir os sinais de identificação e manusear equipamentos de segurança.

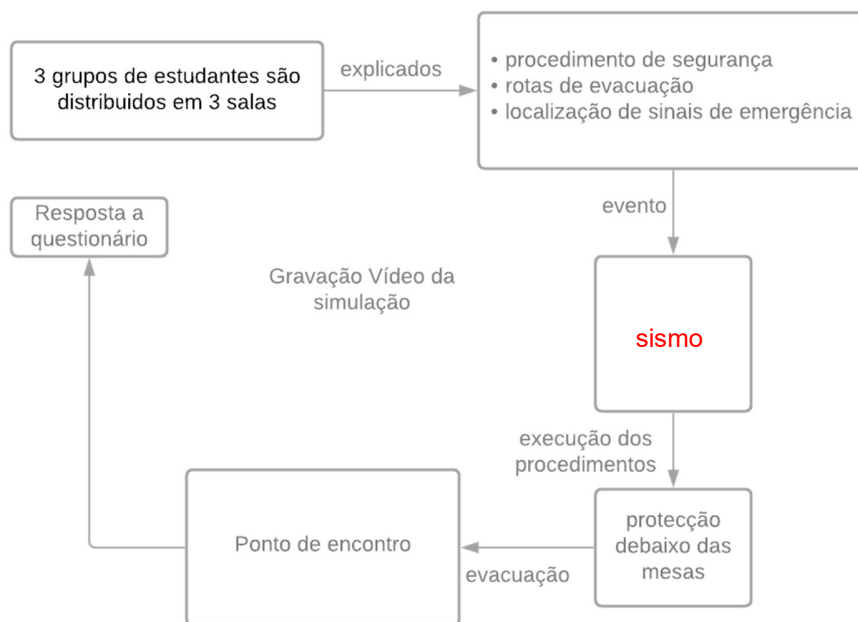


Figura 2.1

Fluxo de evacuação utilizado no IGOT (2018)

Na Figura 2.1 é ilustrado um fluxo que corresponde a um treino de evacuação. A todos os alunos são explicados os procedimentos de segurança, a rota de evacuação a seguir e o posicionamento dos equipamentos e sinais de emergência (extintores e placas de sinalização). Os alunos deverão cumprir estas diretrizes em um exercício de simulação de um sismo fictício. Os estudantes seguem o protocolo de segurança, que consiste em posicionar-se debaixo das mesas para depois fazer a evacuação em grupo de uma forma ordeira. Dirigem-se para as escadas do piso e depois para o ponto de encontro localizado no pátio externo da escola. No fim do exercício cada aluno responde a um questionário, terminando assim a sequência de ações. São utilizadas câmaras para gravar vídeos com a evacuação. Estes vídeos irão permitir mais tarde analisar os comportamentos individuais e coletivos. Alternativamente, é recolhida uma vasta

quantidade de informação através de respostas a questionários. Com esta informação é possível criar estatísticas que possam permitir conhecer a tipologia da população tal como género, peso, altura, apurando assim possíveis limitações físicas que possam comprometer a mobilidade do pedestre. Também é possível perceber se o interveniente sabe manusear um extintor, se conhece um número de emergência em que possa contactar uma autoridade de saúde e ou de segurança, se sabe identificar um sinal de emergência ou até mesmo conhecer a sua posição através de uma planta que esteja afixada na parede do edifício. Tendo acesso a estes dados é possível estabelecer uma base de informação que torne possível segmentar os alunos por classes para, desta forma, melhorar a modelação do seu comportamento. É também possível perceber a percentagem de alunos que seguem as rotas estipuladas de forma correta. A experiência foi concretizada e originou um conjunto de resultados. Como complemento foi utilizado software para correr um ABM que pudesse reproduzir esta mesma experiência [3, p. 27]. Na ABM os agentes são unidades pedestres e deslocam-se para as saídas através de um algoritmo que calcula a distância mais curta para determinado ponto. Este ponto pode ser uma porta, um corredor ou uma escada. Foi utilizado um algoritmo de força social para representar as interações entre os agentes e os obstáculos do ambiente. As principais conclusões obtidas pelos autores da experiência centram-se nas diferenças entre o exercício e a simulação por computador [3, p. 33]. Na simulação, a movimentação dos agentes é contínua durante o percurso em direção às saídas, existindo apenas desaceleração nos locais de maior constrangimento. Esta condição acontece devido ao condicionamento de estruturas físicas tais como mesas e cadeiras. No exercício a continuidade é menos evidente. Os alunos acabam por parar e muitas vezes até se movimentam em sentidos opostos ao esperado. Apenas um aluno, por si só, pode gerar uma elevada entropia, por exemplo se obstruir uma porta e não permitir que os restantes colegas possam circular. Relativamente aos tempos totais de evacuação, eles são semelhantes para 70% dos agentes entre a experiência real e a simulação. Os restantes 30% apresentam valores inferiores na experiência real. Este facto reforça a problemática de que nos exercícios reais existem fatores imprevisíveis que atrasam a velocidade de evacuação relativamente à simulação por computador. Os autores referem a dificuldade de simular tais fatores do comportamento humano no modelo de simulação e remetem para trabalho futuro a integração de frameworks que possibilitem a sua reprodução e tornem as simulações mais realistas e precisas [3, p. 34].

Um dos algoritmos mais utilizados na simulação de agentes pedestres em grupo é inspirado na teoria de Boids [4]. Este modelo é utilizado amplamente em simulações computacionais, animações gráficas e jogos de computador uma vez que devido à sua simplicidade é facilmente extensível. O autor [5, p. 71] explica que “o seu comportamento é baseado em 3 simples regras

---

de movimentação: a separação, coesão, e o alinhamento”. O objetivo é que os agentes estejam alinhados em fila (alinhamento), tenham interesse em estar próximos entre eles (coesão) mas não demasiado próximos (separação). Se a distância entre eles for menor que um limiar eles vão se separar e tentar alinhar-se novamente. O resultado deste efeito é o de criar uma massa de indivíduos que se movem em grupo de uma forma ordeira e harmoniosa. Este modelo pode ser considerado um modelo de força social na medida em que computa interações de força entre agentes e faz emergir uma dinâmica de grupo através da criação de aglomerações.

Na experiência realizada por [6], o autor desenhou um ABM de evacuação para situações de emergência que incorporam fatores físicos e psicológicos na sua modelação. O tempo de evacuação e o desconforto físico individual são as variáveis que são avaliadas durante a simulação. Uma vez que se estão a modelar agentes de forma individual, e sendo cada agente capaz de alterar o ambiente que o rodeia, significa que as alterações nos seus padrões comportamentais também poderão alterar os mesmos padrões dos seus vizinhos. Este efeito em cadeia vai ele próprio modificar o ambiente afetando o tempo total de evacuação do sistema. O conceito principal deste tipo de abordagens é a de que o agente é modelado individualmente, mas, sendo ele competitivo, tem a capacidade de influenciar e ser influenciado tanto por outros agentes como pelo próprio ambiente.

Uma das formas que um agente tem de se relacionar com o seu meio é por um sistema de regras. Imagine-se que construímos um grafo com vários nós em que cada nó pode, por exemplo, representar uma porta, ou uma entrada mais estreita, ou uma escada. Uma das possibilidades seria implementar uma lógica em que ao aproximar-se de uma porta o agente temporariamente reduziria a sua velocidade, pois não sabendo o que existe do outro lado da porta seria uma forma de ele próprio se proteger ou ganhar tempo para conseguir sondar a próxima secção do cenário. Outra aplicação seria por exemplo ao se aproximar de uma escada, reduzir a sua velocidade, na medida em que naturalmente um ser humano é mais lento a descer uma escada do que a andar em piso nivelado. Outra possibilidade seria de o próprio agente aumentar a sua velocidade ao aproximar-se do seu destino final ou mudar de direção em função de determinada recompensa. Os exemplos referidos são possíveis implementações de regras. O autor introduz um conjunto de variáveis de grande importância para modelar o comportamento individual dos agentes [6, p. 4], dos quais destacamos:

- Pânico – parâmetro que varia de acordo com a distância do agente para o seu objetivo (quanto menor for a distância também menor será o seu grau de pânico) e a velocidade que os agentes vizinhos se movem (maior velocidade geral gera pânico generalizado).

- Coesão, Separação, Alinhamento – são as variáveis que irão ser utilizadas no algoritmo de simulação de movimento em grupo dos agentes.
- Desconforto físico - variável que mede proximidade em relação aos vizinhos.
- Visibilidade - o agente tem um limite de visibilidade; se a saída não é visível os níveis de pânico aumentam.

Durante as simulações, os níveis de pânico foram monitorizados e existiram evidências que mostram que nas situações de engarrafamento, quando os agentes não conseguem alcançar uma saída, o desconforto físico aumenta e o pânico é propagado para os agentes vizinhos. A principal conclusão que o autor retira da experiência é a de que os níveis de pânico crescem muito rapidamente com o aumento da pressão física entre os intervenientes. À semelhança do que é proposto nesta dissertação, o trabalho aborda as vantagens de combinar ABM com outros algoritmos de simulação comportamental ou de navegação no espaço físico. Os elementos físicos e psicológicos dos pedestres devem, portanto, ser incorporados em modelos de evacuação de multidões, pois permitem simular a dinâmica global resultante das interações entre agentes que competem pelo seu espaço.

No trabalho realizado por [7] é introduzida uma clara noção de dicotomia entre agente treinado e não treinados. Independentemente do seu conhecimento, todo o agente reage em dois tempos: primeiro analisa o ambiente e depois toma a decisão. O agente treinado é aquele que conhece os procedimentos de evacuação e desta forma maximiza o valor das suas decisões em função da sua experiência. A sua estratégia é a de se deslocar pelas rotas que lhe permitem atingir a maior recompensa. O agente sem treino age de forma diferente. Ele também analisa o ambiente e toma uma decisão, mas como não sabe se a decisão é ótima, tendencialmente escolhe a melhor recompensa sem avaliar os agentes que o rodeiam e o impacto que a sua decisão provoca no ambiente. A conclusão a que este estudo chega é a de que a eficácia da evacuação depende essencialmente do bom planeamento de rotas e do conhecimento dos agentes das práticas de evacuação.

Os trabalhos relacionados introduzem propostas de modelos que pretendem simular fenómenos de evacuação de agentes pedestres. Estes trabalhos serviram de fonte de inspiração para o modelo que vai ser desenvolvido pelo uso que fazem do ABM em combinação com algoritmos sociais. O modelo de força social mostrou ser uma solução muito robusta pois consegue abstrair a complexidade de reproduzir o comportamento humano em situação de evacuação. As criações de regras de comportamento também são úteis como forma de complemento do algoritmo de força social pois permitem adaptar o modelo a uma realidade mais



---

específica. Nos próximos capítulos irão ser abordadas em detalhe as tecnologias utilizadas na implementação da solução.

### **3. Descrição teórica do modelo**

O capítulo presente introduz os métodos, tecnologias e algoritmos que foram utilizados. É feita uma descrição pormenorizada sobre como foram aplicados e de que forma contribuíram para o desenvolvimento do modelo de simulação proposto.

#### **3.1. Modelação baseada em agentes**

O ABM tem sido recorrentemente utilizado para executar simulações em diferentes domínios. No cinema, por exemplo, foi utilizada em filmes tais como World War Z [8], Spectre [9] e Dawn of the Planet of the Apes [10] para construir cenas com enormes multidões de personagens [11, p. 14]. Este tipo de simulação permite que cada indivíduo ou agente possua o seu conjunto próprio de atributos e inteligência. Na obra de [12] é feito um estudo introdutório muito completo sobre o ABM e de que forma contribuí para a resolução de problemas complexos de larga escala. O grande poder do ABM surge quando criamos um ambiente, que pode representar um espaço físico, e instanciamos vários agentes de forma a permitir interação entre os mesmos no papel de observador (sem intervenção). Da interação entre agentes resulta um conjunto de relações que podem ser por exemplo relações de poder, de submissão, de cooperação e até mesmo de hostilidade. Também é possível visualizar padrões que muitas vezes partem de hipóteses formuladas antecipadamente. Opostamente também poderão acontecer eventos inesperados, quer sejam eles desejados ou não. Um dos papéis chave do ABM é a de mostrar como as interações que ocorrem ao nível micro contribuem para a criação de macroestruturas semelhantes a sistemas orgânicos com a sua dinâmica própria.

No contexto do tema desta dissertação, definimos um sistema de agentes pedestres que são: entidades autónomas e racionais porque tomam decisões de forma individual; heterogéneas pois possuem atributos distintos; que percecionam o ambiente; que são móveis pois conseguem deslocar-se no seu espaço físico; adaptativas pois conseguem aprender e memorizar interações e moldar o seu comportamento de acordo com os seus interesses. Para concretizar a modelação existem várias dimensões de um ABM que devem ser consideradas e que definem a estrutura de dados. De seguida vão ser enumeradas e explicada a forma como são utilizadas na implementação do trabalho

### **3.1.1. Ambiente e espaço**

O ambiente do sistema consiste no conjunto de barreiras físicas e de todas as regras que definem comportamentos dentro do mesmo. Para a simulação pretende-se recriar o cenário da escola Rainha Dona Leonor composto por salas de aulas com cadeiras, mesas e portas. As salas estão distribuídas por vários pisos e cada sala vai ser ocupada por um conjunto de alunos. A escola é composta por galerias, corredores, paredes e pátios. As salas têm cerca de trinta e seis metros quadrados e durante uma aula estão presentes cerca de 25 alunos.



Figura 3.1  
Sala de aula do piso 1



Figura 3.2  
Corredor de acesso às salas de aula

Note-se na Figura 3.1 que o espaço entre as carteiras é bastante limitado, o que pode ser um obstáculo em situações de evacuação. Os corredores que dão acesso às escadarias são relativamente amplos, o que permite fluidez durante a sua passagem, como mostra a Figura 3.2. Na Figura 3.3 é possível observar o local de acesso da escadaria e sinalização de emergência.



Figura 3.3

Sinalização para acesso à escadaria



Figura 3.4

Escadaria de acesso à galeria

As escadarias têm um diâmetro de cerca de 1,3 metros, permitindo que 3 alunos alinhados lado a lado transitem de forma simultânea, como mostra a Figura 3.4. Importa referir que existe um piso térreo, 1º andar e 2º andar.

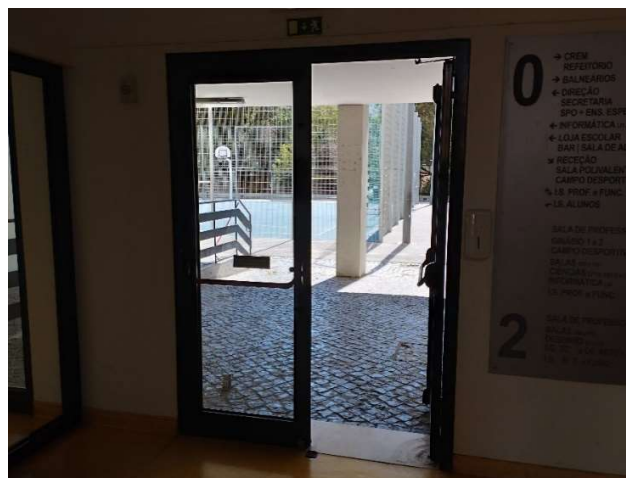


Figura 3.5

Porta de acesso ao exterior do edifício

No final das escadas existe uma porta estreita que é o local único de passagem dos alunos para o exterior do pátio, como mostra a Figura 3.5. Apesar de na imagem a porta ter um dos lados trancado, ela pode ser aberta na totalidade em situações de evacuação. Ainda assim o seu diâmetro permite a passagem simultânea de apenas 2 alunos. Na parte exterior do edifício

---

encontra-se o local do ponto de encontro. Os alunos deverão distribuir-se ao longo desta zona devidamente agrupados por turmas.



Figura 3.6  
Corredor de ponto de encontro



Figura 3.7

Rota de evacuação

A Figura 3.6 mostra a extensão da zona que onde os alunos se deverão concentrar. Na Figura 3.7 é possível perceber através da seta vermelha o local por onde os alunos podem sair a partir do interior da escola, e o trilho que devem seguir para a zona de segurança.

### 3.1.2. Tempo

A variável tempo representa o estado da simulação em determinado instante. Na terminologia de um ABM, um passo é uma instrução que indica o avanço de todo o sistema em uma unidade de tempo. Durante esta instrução, o sistema irá processar toda as regras que foram implementadas. Todos os agentes de forma individual irão tomar uma ação de acordo com as suas próprias regras.

No modelo desta dissertação um passo é uma instrução para que todos os agentes se movimentem uma determinada distância em direção a determinado objetivo. Cada passo permite obter o estado instantâneo da simulação através da recolha de todas as variáveis geográficas. Os dados são guardados em base de dados ou memória RAM para posterior utilização. Do ponto de vista do utilizador, é de extrema importância ter acesso à informação de forma visual e não meramente numérica. Para tal, foi criada uma interface gráfica que projeta os passos ou estados do sistema no ecrã a uma velocidade suficiente grande para criar a ilusão de movimento. Esta camada de visualização será detalhada no capítulo da implementação.

---

### **3.1.3. População**

A população consiste no conjunto de alunos (275 alunos) que estão nas salas de aulas e que vão fazer a evacuação. A definição da simulação prevê que os alunos estejam distribuídos pelos pisos, salas de aulas e carteiras no momento que antecede o início da evacuação. Os restantes objetos físicos também fazem parte da população da simulação uma vez que condicionam o movimento dos alunos. Estamos a falar de portas, paredes, mesas e carteiras.

### **3.1.4. Regras físicas**

À semelhança do que acontece no mundo real, um agente não deverá conseguir atravessar obstáculos físicos tais como paredes, mesas, secretárias e outros agentes pedestres. A velocidade dos alunos é definida em metros por segundo (m/s). A velocidade pode ser alterada durante a simulação em função de zonas específicas (escadas, entradas e saídas) e das interações físicas com outros agentes e obstáculos do ambiente. Foram realizados vários testes de velocidade que são apresentados no capítulo de resultados.

## **3.2. *Aprendizagem por reforço***

A necessidade de os agentes encontrarem um caminho de evacuação é a única forma de completarem o seu objetivo. Para tal é necessário implementar um algoritmo de busca que seja eficaz e eficiente computacionalmente. Foram considerados na pesquisa bibliográfica famílias de algoritmos de pesquisa heurística tais como o A\* e o D\*. O algoritmo A\* “tenta escolher a cada instante o melhor caminho passando pelo nó  $n$ , utilizando para tal a função  $f(n) = g(n) + h(n)$ ” [13] em que  $g(n)$  é o custo acumulado para chegar ao estado atual  $n$  a partir do estado inicial e  $h(n)$  é a estimativa do custo restante do estado  $n$  até o objetivo. Esta função permite encontrar uma solução eficiente, mas não é ótimo quando é necessário utilizar cenários novos, ou seja, quando não há um conhecimento prévio total do ambiente [13].

Para solucionar este problema foi necessário procurar uma alternativa mais flexível. Após ter sido feito um estudo exploratório bibliográfico foi identificado um algoritmo que cumpre com os requisitos da nossa implementação, o Q-learning. Trata-se de um algoritmo de aprendizagem por reforço que tem como pressuposto que o agente aprende ao tomar decisões interagindo com o ambiente e tenta maximizar, de forma cumulativa, a recompensa que as suas ações produzem. Este algoritmo, enquadrado na nossa implementação, permite descobrir o caminho mais curto entre dois pontos espaciais. As vantagens evidentes do Q-learning são: poder ser treinado previamente e utilizado durante a simulação sem qualquer peso computacional acrescido; ser

mais flexível pois está mais adaptado a cenários em que não existe um conhecimento prévio do ambiente. Segundo [14] os sete tópicos que constituem os fundamentos do Q-learning são:

- É um modelo de aprendizagem por reforço
- Funciona com entradas (estados) e saídas (ações)
- Funciona através de um ambiente predefinido em que são criados estados, ações e recompensas
- É um processo de decisão de Markov. Na obra de [15], é explicado que são processos que têm como objetivo maximizar a recompensa dos agentes com o pressuposto matemático de que o estado e recompensa futura apenas depende do estado atual e da ação realizada. Os estados passados (histórico), não são considerados nos processos de decisão de Markov, o que em algumas aplicações é uma limitação.
- É um modelo que precisa de ser treinado, os parâmetros são afinados por um processo de inferência.
- O número de estados é finito
- O número de ações é finito

Os estados e transições são conceitos abstratos pelo que para o nosso modelo vamos considerar estado como uma coordenada geográfica e transição como um vetor de deslocação entre o estado atual e o próximo estado. Quer isto dizer que estados são landmarks (LM) (ou coordenadas geográficas) e ações são transições entre LM. Estes conceitos são aprofundados no capítulo 3.3.



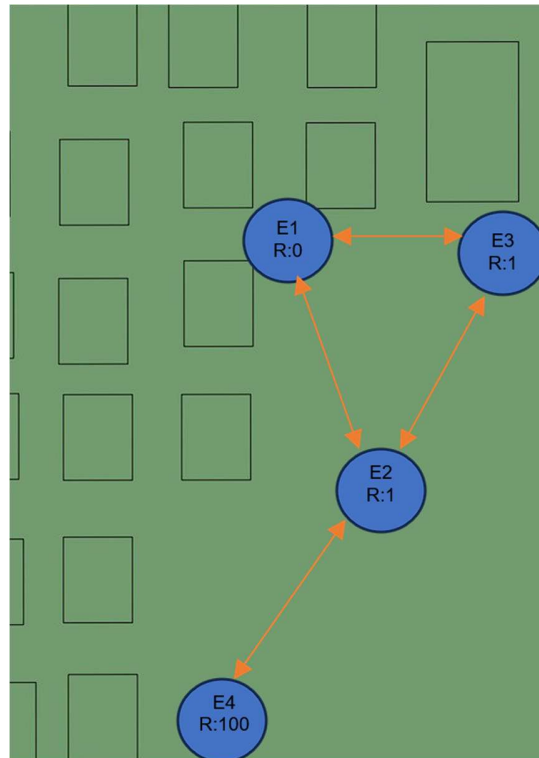


Figura 3.8

Aplicação do algoritmo de aprendizagem por reforço

Na Figura 3.8, está representada uma simplificação da nossa simulação em que numa sala de aulas existem quatro posições arbitrárias que correspondem a 4 estados. O objetivo deste exemplo é tentar ilustrar o funcionamento do Q-Learning. A primeira operação a realizar é a de definir o ambiente. São definidos 4 estados com as suas respetivas recompensas. Note-se que a recompensa é representada pela letra R o seu valor representada por um número. Definimos recompensa 1 como recompensa padrão para os estados transitáveis e 100 para o estado que queremos alcançar e que, portanto, recebe maior recompensa:

- Estado 1 com recompensa 0: E1 -> R:0
- Estado 2 com recompensa 1: E2 -> R:1
- Estado 3 com recompensa 1: E3 -> R:1
- Estado 4 com recompensa 100: E4-> R:100

Cada estado corresponde a um possível posicionamento do agente. Ele pode executar ações que consistem em transitar para outro estado. Para representar estados e transições matematicamente, vamos criar uma matriz em que os índices correspondem aos estados e os

valores correspondem à recompensa. A matriz designa-se por matriz de recompensa ou matriz R e está representada no Quadro 3.1

Quadro 3.1  
Matriz de recompensa

	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>	<i>E4</i>
<i>E1</i>	1	1	1	0
<i>E2</i>	1	1	1	1
<i>E3</i>	1	1	1	0
<i>E4</i>	0	1	0	100

Através da leitura da matriz R é possível representar ações possíveis (que são escolhas de transição de estados). Voltando à Figura 3.8, definimos através das setas vermelhas a forma como podemos navegar, de uma forma visual. A leitura da tabela é feita da seguinte forma: Cada linha corresponde a um estado e através da coluna obtemos, caso o valor seja maior que 0, as ações possíveis. Por exemplo na 1ª linha os estados E2, E3, E4 têm recompensa maior que 0, isto quer dizer que o agente se pode deslocar para uma dessas posições ( na realidade qualquer estado é transitável mas uma vez que não existe recompensa a IA nunca vai selecionar estes estados). Na 2ª linha o agente poderá executar as ações E1, E3, E2 e E4. Na 3ª linha o agente poderá executar as ações E1, E2, E3. Na 4ª linha o agente poderá executar a ação E2 e E4.

Após ter sido criada a matriz R, o ambiente está inicializado e dá-se o início do treino da IA. É necessário nesta fase introduzir a matriz Q e os seus valores. Os valores Q são a atualização dos valores da matriz R acumulados no tempo.

O processo iterativo para o cálculo dos valores Q é executado da seguinte forma:

1. É selecionado um estado aleatoriamente entre os possíveis estados.
2. Do estado escolhido vamos escolher aleatoriamente uma ação que permita transitar para um estado seguinte com uma recompensa positiva.
3. Ao transitar para o estado seguinte é capturada a recompensa.

$$TD_t(s_t, a_t) = R(s_t, a_t) + \lambda \max(Q_{(s_{t+1}, a)}) - Q(s_t, a_t)$$

(1)

- 
4. Vamos computar a diferença temporal (TD) do estado através da Equação (1), em que “s” corresponde ao estado, “a” corresponde à ação, R é a matriz recompensa,  $\lambda$  é um parâmetro que define a velocidade de convergência do algoritmo e Q é a matriz de qualidade. A Equação (1) tem como objetivo maximizar a recompensa, mas à medida que repete as iterações ao longo do tempo vai aplicar um fator de desvalorização fazendo com que os valores da matriz Q tendam a convergir para um limiar.
  5. Atualizamos os valores da matriz Q através da equação de Bellman, mostrada na Equação (2).

$$Q_t(s_t, a_t) = Q_{t-1}(s_t, a_t) + \alpha TD_t(st, at) \quad (2)$$

Como é explicado em [14, p. 86], após executar várias iterações, o modelo vai convergir e é obtida a nova matriz Q em que conseguimos precisar qual a melhor sequência de ações para atingir o estado desejado.

Em resumo, através deste método, implementou-se uma inteligência artificial que permite conhecer o caminho mais curto para determinado objetivo para o qual foi treinado. A vantagem deste algoritmo é poder ser treinado de forma prévia à simulação. Na altura em que o agente precisa de se deslocar ele tem acesso imediato à sua memória local e de forma instantânea toma a decisão da ação mapeada pelos valores da matriz Q.

### **3.3. Sistemas de Informação Geográficos**

Os Sistemas de Informação Geográficos (SIG) são um conjunto de ferramentas de trabalho que permitem manipular e processar grandes quantidades de informação geográfica. Apesar de muito robustos, estes sistemas não são dinâmicos e utilizam apenas dados estáticos. Para suprir esta limitação a abordagem foi a de combinar SIG com ABM para criar um sistema dinâmico devidamente referenciado em um espaço geográfico [11].

Os exemplos clássicos de ABM são quase sempre definidos num espaço a 2 dimensões dividido numa grelha de quadrados. Por sua vez, os SIG utilizam coordenadas GPS num espaço contínuo definido por um sistema de coordenadas geográficas (SCG) ou datum (sistema de referência que permite fazer uma melhor aproximação à geografia do planeta Terra). O SCG utilizado nesta tese de dissertação é o TM06 que corresponde à zona geográfica de Portugal continental.

Os SIG têm uma particularidade que é de extrema importância para uma simulação com este tipo de características. Eles permitem definir um ambiente com camadas com diferentes funcionalidades físicas e lógicas. A simulação está dividida em três pisos e em cada piso existe uma hierarquia de camadas que é composta por LM, zonas de desaceleração, obstáculos e agentes:

1. LM – Nós da tipologia que definem os pontos objetivo que os agentes pretendem alcançar. O agente quando se está a movimentar, dirige-se sempre para a direção de um LM e assim que está suficientemente perto, ele muda a sua direção para o LM seguinte, e assim por diante até chegar ao LM final. De forma resumida um LM é uma coordenada GPS que serve como guia de movimentação para os agentes da simulação.
2. Zonas de desaceleração – As zonas de desaceleração existem para simular espaços físicos onde o agente deve abrandar a sua velocidade. Por exemplo em escadas é natural que um humano abrande a velocidade para evitar cair. Nas portas também é natural que haja mais cuidado a transitar, uma vez que poderá não existir visibilidade total para o outro lado da porta ou até mesmo para ceder a passagem para um agente mais próximo. A zona de desaceleração é um polígono que demarca um espaço específico.
3. Obstáculos – Os obstáculos são todo o tipo de objetos que não podem ser transpostos e terão de ser contornados. Os obstáculos que existem na simulação são secretárias, cadeiras, portas e paredes.
4. Agentes – Os agentes são alunos e caracterizam-se por ser entidades móveis. À semelhança dos obstáculos, não poderão ser transpostos. Os agentes têm a particularidade de se poder movimentar entre pisos e transitar entre camadas de pisos.

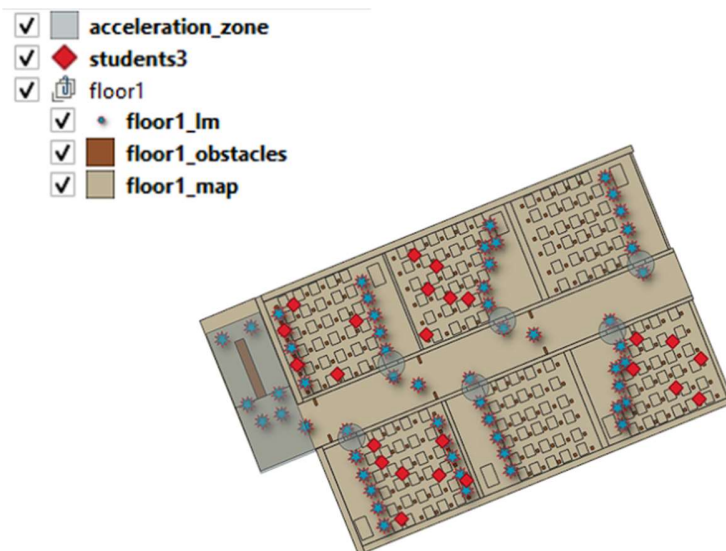


Figura 3.9

Planta do edifício no piso 1 editada com camadas no QGIS

### Quadro 3.2

Composição das camadas e seus objetos

Nome da Camada	Descrição da camada
floor1_map	Planta do piso
floor1_obstacles	Composto por mesas e carteiras
floor1_lm	Pontos de referência de navegação
students3	Alunos
acceleration_zone	Zonas especiais (escadas e portas)

O ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) utilizado para a simulação foi o QGIS. É uma ferramenta gratuita de código aberto com uma vasta comunidade de desenvolvedores. Na Figura 3.9 é possível visualizar o conjunto de transformações aplicado ao mapa original da Escola Rainha Dona Leonor, de forma a produzir a base de dados espacial. Como se mostra no Quadro 3.2, a camada base é composta pelo mapa (*floor1\_map*) que foi retirado do ficheiro de plantas originais da escola. A 2ª camada (*floor1\_obstacles*) é uma camada de obstáculos constituída por mesas e carteiras que age como barreira física para os alunos. A 3ª camada (*floor1\_lm*) é a camada dos LM que são os pontos de referência para os alunos se movimentarem. A 4ª camada (*students3*) é a camada de agentes que se podem movimentar. A 5ª camada (*acceleration\_zone*)

é uma camada que implementa zonas onde os alunos deverão alterar a sua velocidade. Esta configuração por camadas permite que a implementação do código dentro do ABM seja feita de uma forma mais intuitiva e organizada fazendo recurso a um paradigma de programação orientada a objetos (POO).

### **3.4. Algoritmo de força social**

Nesta fase da dissertação já foi explicado como é composto o ambiente físico. Também foi demonstrado que os agentes possuem uma IA que lhes permite, independentemente da posição geográfica onde se encontram, saber qual o caminho mais curto para evacuar as salas e dirigir-se ao local de segurança. Mas ainda falta uma componente decisiva para a simulação funcionar que é a forma como interagem entre eles tendo em conta que não são unidades estáticas e estão em constante movimento. Nesta ótica é necessário resolver o problema de colisões de agentes com obstáculos e com outros agentes. O primeiro tipo de colisão é relativamente trivial, o agente visualiza o obstáculo e tenta contorná-lo. O segundo tipo de colisão é mais complexo pois implica o agente prever em que momento no tempo ele vai colidir com um agente vizinho e para onde se deve movimentar de forma a evitar a colisão. A questão ainda se torna mais complexa se se pensar que existem centenas de agentes a fazer cálculos simultâneos em que devem ter em conta todo o universo de colisões que podem acontecer. As primeiras abordagens para solucionar esta problemática foram inspiradas nos modelos de ABM de simulações de tráfego de automóveis [16]. As regras para estes modelos são simples. Se a viatura não visualiza nenhuma outra viatura à sua frente na faixa de rodagem numa distância de algumas dezenas de metros ela acelera, caso contrário ela desacelera. Desta forma evitam-se colisões. No caso da simulação da escola, a grande diferença é que o grau de liberdade do agente é muito maior, ele pode se deslocar em qualquer direção. Resulta então que as colisões podem ser laterais, frontais e diagonais. As limitações do modelo de colisão baseado no trânsito automóvel são as seguintes:

- Era necessário criar um número elevado de regras e ainda assim surgia sempre uma exceção que implicava criar mais regras. O resultado prático era a criação de uma cascata de regras ingeríveis.
- Devido ao número elevado de instruções que os agentes implementavam, o peso de computação por cada passo do ABM era demasiado elevado.
- Ocorria pontualmente a situação em que o agente ao evitar outro agente ficava preso em um mínimo local. São espaços físicos em que o agente nunca poderá em circunstância alguma voltar a uma rota de evacuação válida e fica a vagar eternamente naquele ponto.

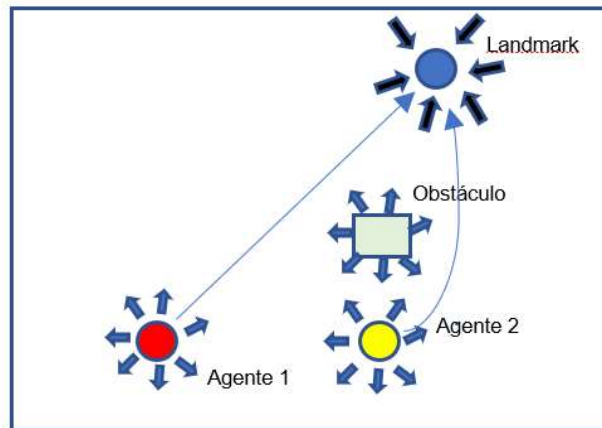


Figura 3.10

Exemplo de interação do Modelo de força social

O algoritmo utilizado para lidar com esta problemática foi uma implementação do modelo de força social de [17]. O modelo é inspirado na física computacional e segue um conjunto de pressupostos na adaptação à simulação do nosso modelo:

- Os LM funcionam como polos atrativos. Eles têm a capacidade de atrair outros agentes independentemente da distância a que se encontram. Eles têm um poder de magnetismo ilimitado, mas o agente tem a capacidade de decidir se quer ser ou não atraído pelo LM. Os LM não são afetados por nenhum tipo de energia.
- Os agentes têm um pequeno campo de energia repulsiva. Esta energia apenas pode afetar outros agentes e é de curta distância, mas suficiente para alterar a rota dos vizinhos e impedir o contacto direto entre ambos. O agente tem o poder de decidir se quer ser atraído por um LM, sendo a sua IA responsável por determinar a tomada de decisão.
- Os obstáculos funcionam como polos repulsivos de curta distância, mas com muita energia. O seu campo de energia não pode ser penetrado sendo que afetam todos os agentes que passem suficientemente perto deles. Os obstáculos são imóveis e não são afetados por qualquer tipo de energia.

Na Figura 3.10 é feita uma ilustração do funcionamento do modelo de força social. Consegue-se visualizar o agente vermelho a ser atraído pelo LM azul. O agente amarelo também é atraído pelo LM azul, mas é forçado a contornar o campo de energia do obstáculo uma vez que passa suficientemente perto dele. O modelo de força social tem a capacidade de fazer a representação

das interações sociais entre agentes pedestres e obstáculos. No seu repositório, [18, N. <https://github.com/yuxiang-gao/PySocialForce/blob/master/LICENSE>] disponibiliza um módulo em Python em que cria uma extensão ao modelo de força social original. Este módulo foi readaptado para integrar com o ABM desta dissertação de forma a reproduzir a componente teórica de física computacional que foi descrita. O módulo disponibiliza um ficheiro de texto com extensão “.toml” que permite de uma forma simples ajustar os parâmetros que determinam as forças que cada entidade exerce sobre as restantes.

O presente capítulo teve como objetivo explicar a escolha de métodos, tecnologias e algoritmos utilizados no desenvolvimento do modelo de simulação. Foram apresentados os conceitos chave para definir o ABM e foram explicados os algoritmos de suporte à implementação.



## 4. Implementação

O objetivo do presente capítulo é o de apresentar a implementação da arquitetura do sistema assim como a componente de engenharia de software e de paradigmas de programação utilizados. De forma a melhor organizar o sistema, existiu a necessidade de criar três camadas principais. A camada de criação que define a estrutura dos dados, a camada de gravação onde está todo o código Python que controla o ABM e a camada de visualização que gera a animação da simulação.

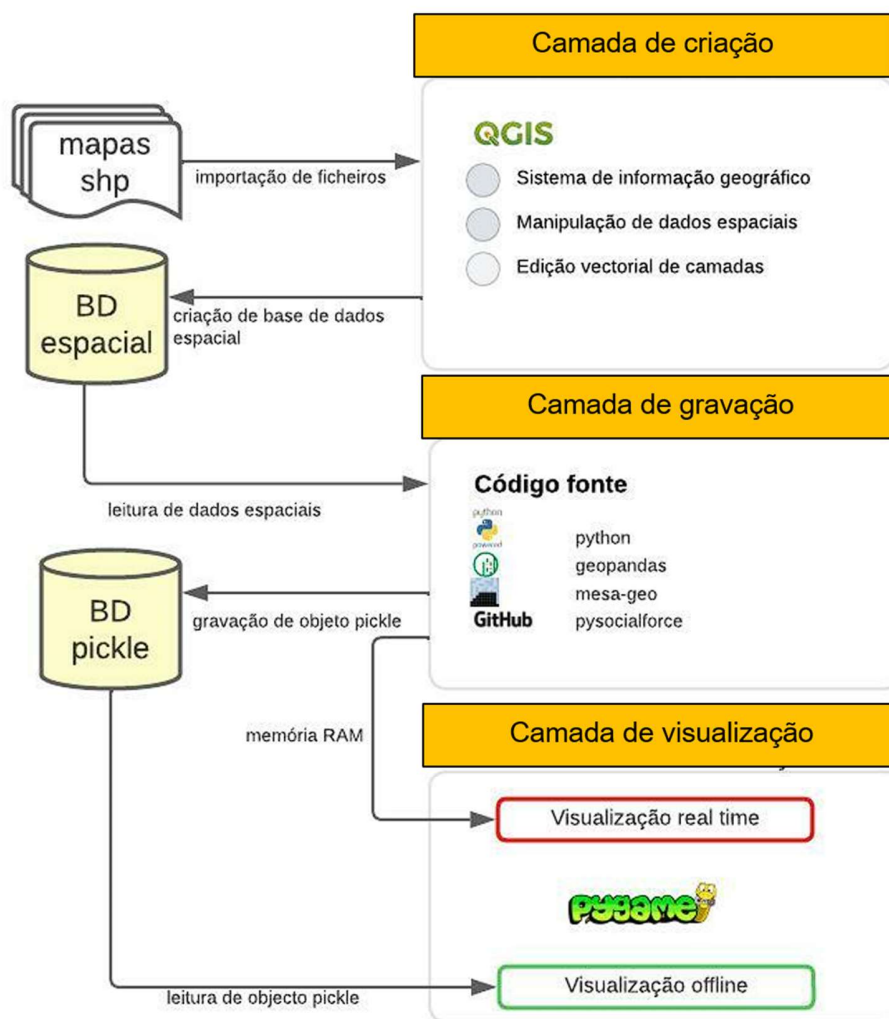


Figura 4.1 – A aplicação integra 3 camadas que permitem gerar, correr e visualizar a simulação

A Figura 4.1 representa o esquema da arquitetura desenvolvida assim como todos os módulos e componentes que foram utilizados para gerar a simulação, e que são descritos seguidamente.

## **4.1. Camada de criação**

A camada de criação é o início de todo o processo de simulação. Os ficheiros com a informação geográfica são importados para dentro da aplicação. É feito um processamento manual para incorporar as alterações que se pretende fazer. Depois de finalizar o processo, os dados são gravados em uma base de dados espacial. O trabalho de preparação dos dados é sempre executado nesta camada. Qualquer alteração espacial prepara a simulação para a nova realidade, não havendo necessidade de fazer qualquer recompilação do código. Concretizando com um exemplo prático, imagine-se que se queria retirar todos os obstáculos de determinada sala. Através do SIG era aplicada a alteração pretendida, a base de dados era posteriormente atualizada e a simulação poderia ser novamente criada.

## **4.2. Camada de gravação<sup>1</sup>**

A camada de gravação é a componente do sistema mais complexa. Aqui são agregados vários módulos de software. É importante referir as componentes desta camada de forma individual para explicar o seu funcionamento:

- Python: É uma linguagem de programação orientada a objetos de alto nível. É amplamente utilizada, à data de escrita desta dissertação, e tem uma enorme comunidade com uma vasta lista de bibliotecas disponíveis. Tem uma ótima integração com o QGIS pois também este é desenvolvido em Python.
- Geopandas: É uma biblioteca escrita em Python que permite facilitar as operações sobre bases de dados espaciais. É através desta biblioteca que é feita a leitura dos ficheiros produzidos na camada de modelação. O geopandas tem a vantagem de aumentar a produtividade do desenvolvedor uma vez que possui métodos que permitem fazer cálculos espaciais complexos tais como interseções, junções e medições de distâncias.
- Mesa+Mesa-Geo: Para explicar o que é o mesa e qual a sua utilidade para o projeto é importante explicar as suas alternativas. Nos ABM historicamente a plataforma de desenvolvimento mais utilizada pelos investigadores é o Netlogo. Estes sistemas permitem criar um ABM de uma forma muito rápida e com menor necessidade de criar código extenso, uma vez que já possuem uma série de painéis e customizações gráficas que permitem manipular intuitivamente os parâmetros e os agentes da simulação. A sintaxe da linguagem é de alto nível aproximando-se mais da linguagem natural que o próprio Python. A mesa é um projeto relativamente recente e ainda em estado de

---

<sup>1</sup> Consultar mesa em <https://mesa.readthedocs.io/en/stable/#>

desenvolvimento precoce, mas uma vez que decidimos implementar o sistema em Python, foi a biblioteca mais robusta encontrada à data deste trabalho. O mesa-geo é uma extensão do mesa que lhe confere a faculdade de processar dados geográficos.

- Pysocialforce: Esta biblioteca, abordada no capítulo 3.4, é o módulo responsável por fazer o cálculo de força social.

### 4.3. Camada de visualização

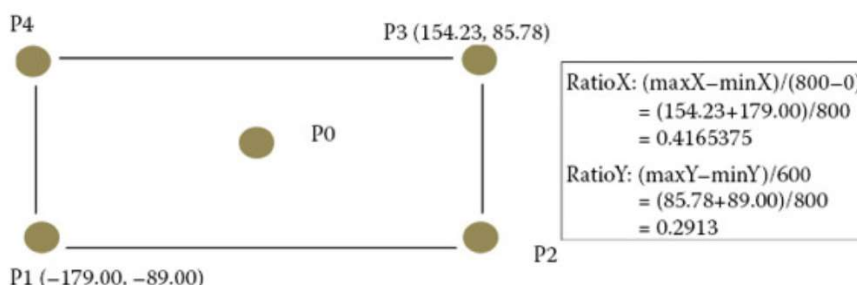


Figura 4.2

Sistema de transformação de coordenadas

Imagem retirada de [19, p. Figura 5.3]

O pygame é um motor gráfico direcionado para o desenvolvimento de jogos 2D (2 dimensões). O sistema de coordenadas do pygame é diferente do sistema de coordenadas geográfico. De forma a poder ultrapassar esta questão, foi necessário criar um sistema de transformação de coordenadas que fizesse a tradução das coordenadas GPS para coordenadas píxeis. Um píxel não é mais do que uma coordenada representada no monitor por um computador. Se se estiver a utilizar uma resolução de 800 píxeis de comprimento por 600 píxeis de altura, quer dizer que estamos a utilizar uma grelha de 480 000 píxeis. Na Figura 4.2 é exemplificado o processo de transformação de sistema de coordenadas GPS para pixel. “Considerando uma área do SIG com limites de longitude de (-179.00, -154.23) e latitude (-89.00, 85.78), então conseguimos calcular o rácio de X e o rácio de Y em função de um ecrã com resolução 800 por 600”[19].

Após ser aplicado este sistema de transformação de coordenadas existe sempre a possibilidade de inverter a operação. Com isto consegue-se ter dois sistemas funcionais, um geográfico e outro cartesiano, devidamente mapeados e integrados. Esta técnica é utilizada na camada de visualização e faz a tradução imediata das coordenadas GPS para píxel. Note-se que

todas as operações estão a ser feitas no referencial GPS, mas o que vemos é a projeção no ecrã em coordenadas píxel.



Figura 4.3

#### Sistema de referência geográfico

Por questões de visualização humana é aplicada uma rotação de  $22^\circ$  para o edifício ficar devidamente alinhado com a vista do observador, como mostra a Figura 4.3. Do lado esquerdo é exibida a projeção GPS com a imagem de satélite e do lado direito a primeira imagem à esquerda mostra a projeção GPS alinhada com o referencial original. A imagem direita mostra a transformação após ser aplicada a rotação de alinhamento com o referencial da visão humana.

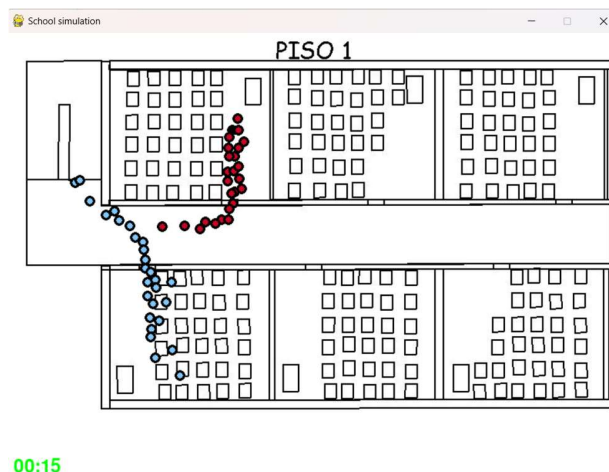


Figura 4.4  
Captura de animação gerada pela camada de visualização

Como foi dito anteriormente o sistema consegue criar uma animação da simulação. Na Figura 4.4 é mostrada uma captura de uma simulação a decorrer. Os círculos na imagem correspondem aos estudantes. Estão representadas 2 turmas, a turma azul e a turma vermelha. Cada turma está a fazer a evacuação da sua sala em direção à escadaria. No canto inferior esquerdo é mostrado um cronómetro com o tempo de simulação decorrido (15 segundos). Uma vez que o visualizador apenas funciona em 2D e existem 3 pisos, foi implementado um conjunto de botões que permitem escolher que piso o leitor quer estar a visualizar. A simulação está sempre a correr no fundo, mas apenas é possível visualizar um piso em simultâneo.

## 5. *Experiências e resultados*

Neste capítulo vão ser apresentados os resultados da simulação. Foram considerados 3 exercícios reais como casos de estudo. As condições dos exercícios são replicadas nas simulações, ou seja, o sistema é sempre inicializado com o mesmo número de agentes e respeita os procedimentos de evacuação do exercício real. Apresentamos de seguida uma breve contextualização para cada experiência.

O modelo considera 20% da população escolar (275 alunos) e é composto por 3 pisos com 5 salas no 2º andar e 6 salas no 1º andar. Foram pintados no chão do recinto 11 quadrados para acomodar as 11 turmas. Também foram pintadas 11 linhas em outro ponto do recinto como alternativa aos quadrados. Os alunos sabem qual é o quadrado ou linha da turma que lhes pertence sendo o seu ponto de referência para terminar a evacuação. No Quadro 5.1 é feita uma

esquematização dos exercícios e das simulações realizadas com respectivos tempos de duração. Uma vez que nos foram fornecidos dados históricos sobre exercícios de evacuação reais na escola, foi feita a comparação direta com os tempos de simulações executadas e, verifica-se que são sempre inferiores. Registou-se uma diferença de menos 24 segundos entre E2 e S2, menos 42 segundos entre E2.2 e S2 e menos 34 segundos entre E3 e S3. O exercício E1 não foi mencionado neste quadro uma vez que consiste numa evacuação com menor grau de organização em que os agentes se distribuem aleatoriamente na área do ponto de encontro. O exercício E2.2 é uma variante de E2 mas com uma utilização de menor número de alunos.

#### Quadro 5.1

Descrição das experiências e tempos de execução

Nota. Os quadrados e linhas são locais de referência para as turmas se concentrarem

<b>Exercício</b>	<b>Simulação</b>	<b>Descrição do Exercício</b>	<b>Tempo do Exercício</b>	<b>Tempo da Simulação</b>
E2	S2	As 11 turmas saíram pela mesma porta e deslocaram-se para os “quadrados”: total de 275 alunos	4:00	3:36
E2.2	S2.2	Igual a E2, mas com menos 2 turmas: total de 225 alunos	3:54	3:12
E3	S3	11 turmas saíram pela mesma porta e deslocaram-se para as “linhas”: total de 275 alunos	3:54	3:20

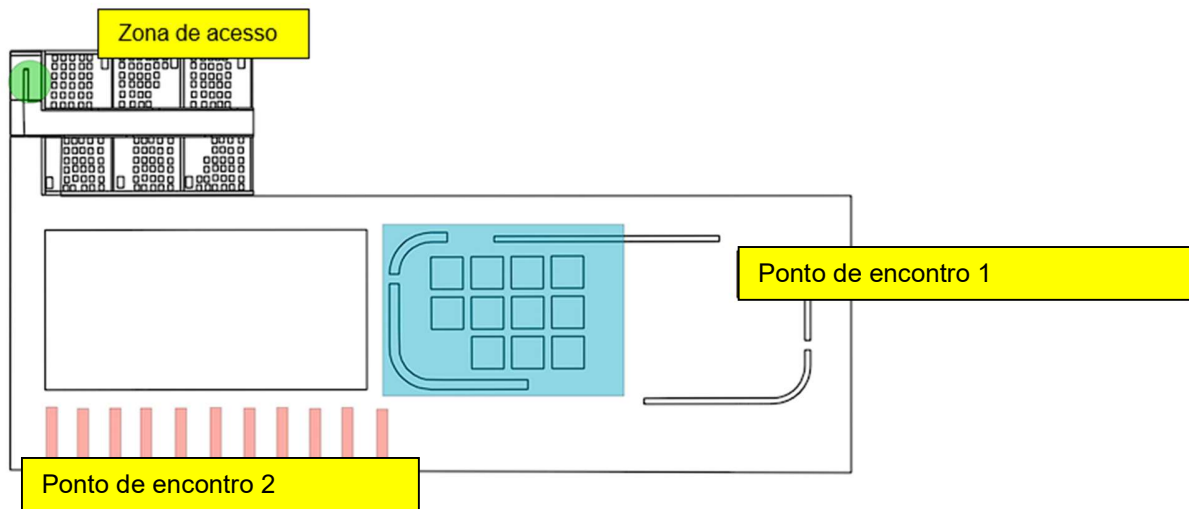


Figura 5.1

Localização do ponto de Encontro definido

Nota. O círculo verde representa a saída do edifício, as áreas a azul e vermelho representam respectivamente os pontos de encontro 1 e 2

Na Figura 5.1 é apresentada a planta da escola. O círculo verde representa o local onde os agentes descem a escadaria a partir das salas de aulas para ter acesso ao exterior do recinto. A zona marcada a azul é o local de ponto de encontro 1 que é composto pelos 11 quadrados. Na zona marcada a vermelho estão representadas as linhas que cada turma deve ocupar para o ponto de encontro 2. Para fazer a demonstração de que as experiências não são deterministas foi utilizado o método de simulação de Monte Carlo. Este método consiste em executar um número suficiente de repetições de determinada experiência de forma a obter uma evidência estatística que confira significância aos resultados. Para o nosso cenário foram feitas 3 repetições para cada experiência.

Results	Messages	xp_id	agent_id	step	floor	longitude_TM06	latitude_TM06	longitude_wgs84	latitude_wgs84	seconds	time	Partial_Distance	Cum_Distance
1	1	0	1	1	1	-87654.4959454953	-101314.987970611	38,7513221591652	-9,14144496485094	0,0625	1899-12-30 00:00:00	0	0
2	1	0	2	1	1	-87654.4336445138	-101314.921997969	38,7513225794107	-9,14144425409799	0,125	1899-12-30 00:00:00	0,0774267144608526	0,0774267144608526
3	1	0	3	1	1	-87654.3689884776	-101314.881582098	38,7513229498415	-9,14144351555334	0,1875	1899-12-30 00:00:00	0,0762485780109395	0,153675292471792
4	1	0	4	1	1	-87654.3023915174	-101314.8435634	38,7513232988742	-9,14144275438065	0,25	1899-12-30 00:00:00	0,0766849167886372	0,230360209260429
5	1	0	5	1	1	-87654.2346112675	-101314.808304963	38,7513236231634	-9,14144197924813	0,3125	1899-12-30 00:00:00	0,0764023538093509	0,30676256306978
6	1	0	6	1	1	-87654.1644750507	-101314.774280274	38,7513239365742	-9,14144117686122	0,375	1899-12-30 00:00:00	0,0779536297642819	0,384716192834062
7	1	0	7	1	1	-87654.0933744739	-101314.74231973	38,7513242314896	-9,14144036312079	0,4375	1899-12-30 00:00:00	0,0779536297536326	0,462669822587695
8	1	0	8	1	1	-87654.021335769	-101314.712533938	38,7513245069106	-9,14143953831454	0,5	1899-12-30 00:00:00	0,0779536297612209	0,540623452348916
9	1	0	9	1	1	-87653.948719267	-101314.684185887	38,7513247694395	-9,14143870668035	0,5625	1899-12-30 00:00:00	0,0779536297630897	0,618577082112005
10	1	0	10	1	1	-87653.8753936079	-101314.657726179	38,751325015031	-9,14143786665023	0,625	1899-12-30 00:00:00	0,0779536297600345	0,69653071187204
11	1	0	11	1	1	-87653.8250763057	-101314.686396768	38,7513247617953	-9,14143728427365	0,6875	1899-12-30 00:00:00	0,0579122920614691	0,754443003933509
12	1	0	12	1	1	-87653.7760540028	-101314.711542453	38,751324504179	-9,14143671723866	0,75	1899-12-30 00:00:00	0,0550952962181272	0,809538300151636
13	1	0	13	1	1	-87653.7281895043	-101314.732770173	38,7513243537359	-9,14143616401706	0,8125	1899-12-30 00:00:00	0,0523605416008821	0,861898841752518
14	1	0	14	1	1	-87653.6798326435	-101314.752896741	38,7513241772594	-9,14143560527191	0,875	1899-12-30 00:00:00	0,0523780938448196	0,914276935597338
15	1	0	15	1	1	-87653.6300357994	-101314.773465686	38,7513239969414	-9,14143502990818	0,9375	1899-12-30 00:00:00	0,0538777057825036	0,968154641379842
16	1	0	16	1	1	-87653.5787487051	-101314.795695694	38,7513238018105	-9,1414344371933	1	1899-12-30 00:01:00	0,0558975783284283	1,02405221970827
17	1	0	17	1	1	-87653.5270214734	-101314.821347292	38,751323575906	-9,14143383898245	1,0625	1899-12-30 00:01:00	0,0577382976932388	1,08179051740151
18	1	0	18	1	1	-87653.4749790297	-101314.8507068	38,7513233166365	-9,14143323667623	1,125	1899-12-30 00:01:00	0,05975279630889	1,1415433137104
19	1	0	19	1	1	-87653.4237711711	-101314.884251137	38,7513230195925	-9,14143264343904	1,1875	1899-12-30 00:01:00	0,0612165606375404	1,20275987434794
20	1	0	20	1	1	-87653.3744709514	-101314.921854716	38,7513226857988	-9,14143207162892	1,25	1899-12-30 00:01:00	0,0620043611053577	1,2647642354533

Query executed successfully. (local) (16.0 RTM) omar (73) Utils 00:00:00 1 000 rows

Figura 5.2

Amostra exemplificativa de dados em bruto de simulações

Na Figura 5.2 mostramos um excerto da informação em bruto que o sistema nos permite extrair. Importa realçar que uma linha é composta pela informação geográfica de cada agente e para cada passo através dos campos de latitude e longitude. Através deste conjunto de registos é possível mostrar uma fotografia da simulação para qualquer momento da série temporal. É possível através das distâncias parciais perceber qual foi a deslocação de um agente no tempo, que não é mais do que a sua velocidade instantânea. A designação dos campos é a seguinte:

- xp\_id: identificador único da experiência.
- agent\_id: identificador único de um agente.
- step: número do passo do sistema
- longitude\_TM06, latitude\_TM06: coordenadas geográficas expressas no sistema de coordenadas português
- longitude\_wgs84, latitude\_wgs84: coordenadas geográficas expressas no sistema de coordenadas mundial
- seconds: valor acumulado de segundos
- time: valor acumulado de segundos formatado em data/tempo
- Partial\_Distance: valor relativo em metros que o agente se moveu desde o passo anterior
- Cum\_Distance: valor acumulado em metros que o agente se moveu desde o passo anterior



---

## 5.1. Resultados relativos à velocidade de deslocação e tempos de evacuação

O conceito de velocidade, no âmbito desta dissertação, pode ser definido como a deslocação em metros de um agente por unidade de tempo em segundos, sabendo que o seu objetivo específico é deslocar-se da sua posição inicial para o destino durante um conjunto finito de passos do modelo.

Foi necessário definir uma velocidade padrão para inicializar os agentes da simulação. A velocidade padrão é uma velocidade teórica em que o agente não tem obstáculos à sua frente e desloca-se numa velocidade constante. Para tentar estimar um valor razoável, poderemos partir do valor médio que um indivíduo se desloca na rua. Para “grupos etários não determinados, 85% dos pedestres andam a uma velocidade superior a 1,26 m/s e 50% anda a uma velocidade menor ou igual a 1,45 m/s” [20]. Foi feita uma experiência no terreno em que fizemos o trajeto de uma sala de aulas para o ponto de encontro tentando manter uma velocidade constante. Registámos o tempo que demorámos a fazer o percurso e calculando o rácio de metros por segundo da experiência chegámos ao valor de 1,6 m/s. Todos os agentes foram inicializados com uma velocidade inicial que segue uma distribuição normal de 1,6 m/s e com um desvio padrão de 0,2 m/s. O valor do desvio padrão não tem uma explicação científica evidente, foi um valor que achámos razoável para criar alguma diferenciação entre os agentes baseado no nosso conhecimento empírico. A velocidade teórica é o ponto de partida dos agentes sendo que em cada passo do modelo ela vai ser recalculada em função das alterações no ambiente. Quando há maior densidade de agentes a velocidade vai ser menor, quando há menor densidade ela vai aumentar até atingir novamente o valor padrão.

### Quadro 5.2

Velocidade Média dos Alunos Agrupada por Cenário e Experiência

Nº	Simulação S2	Simulação S2.2	Simulação S3
1	0,695	0,730	0,608
2	0,696	0,723	0,608
3	0,686	0,716	0,604

Nota. A velocidade é medida em metros por segundo

No Quadro 5.2 são apresentados os valores da velocidade média por aluno para 3 instâncias de cada simulações executadas. Importa realçar que os valores apresentados são agregações

de várias centenas de milhares de velocidades instantâneas de cada passo do modelo e para cada agente. Na simulação 1, com 275 alunos, a velocidade média é de 0,69 metros por segundo. Na simulação 2, com 225 alunos, a velocidade média é ligeiramente superior, cerca de 0,72 m/s. A simulação 3 apresenta a velocidade média mais baixa com um valor de 0,6 m/s. Todas as instâncias dentro de cada simulação têm valores diferentes entre si, o que nos dá confiança para afirmar que não são deterministas.

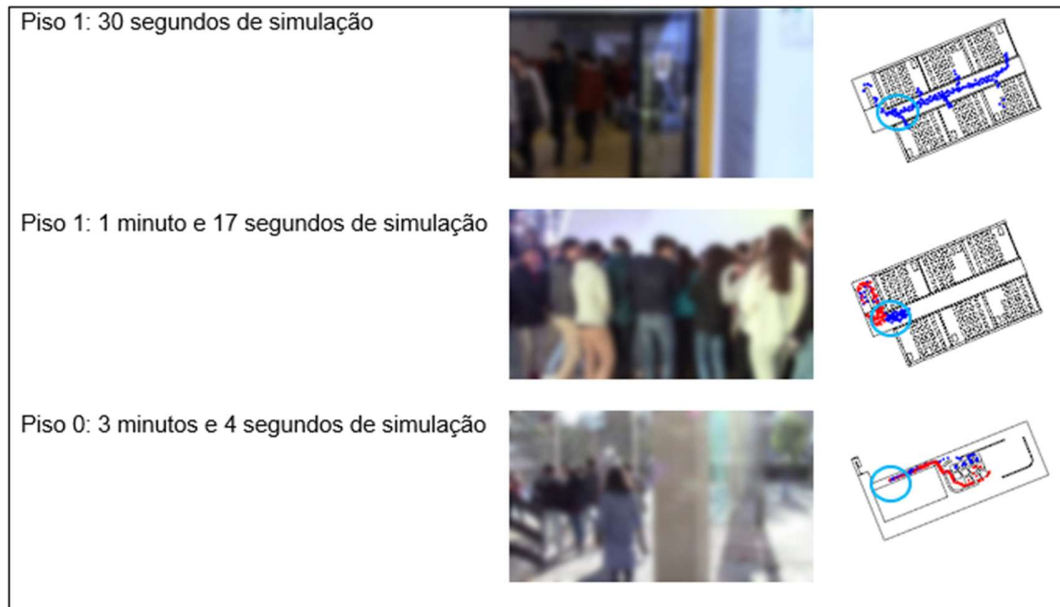


Figura 5.3

Tempo observado na experiência E1 versus a simulação S2

De forma a dar uma noção visual da experiência real vs. simulação, é apresentada na Figura 5.3 uma sequência de estados composta por: tempo decorrido, imagens captadas no vídeo, animação da simulação. Foram selecionados três momentos singulares da evacuação que correspondem às imagens. Os agentes do piso 2 estão coloridos de vermelho e os agentes do piso 1 estão coloridos de azul.

- Como mostra a primeira imagem, aos 30 segundos de evacuação os alunos já se encontram na sua maioria fora das salas de aulas e a dirigirem-se para a escadaria. Na simulação o comportamento é semelhante.
- Na segunda imagem verifica-se que já existe uma mistura dos alunos do piso 2 que descem a escadaria e misturam-se com os alunos do piso 1, criando um congestionamento. Na simulação verifica-se a mesma situação, sendo possível visualizar agentes azuis e vermelhos misturados.

- Aos 3 minutos de simulação, todos os alunos já se encontram no pátio e já se estão a deslocar para os locais de ponto de encontro. Na imagem apenas é possível visualizar a cauda do grupo o que sugere que o comportamento do treino real é aproximado ao da simulação.

### Quadro 5.3

#### Velocidade e Distância por Simulação e Piso

	Piso 2	Piso 1	Piso 0	Velocidade Média Total (m/s)
<b>Simulação S2 (275 alunos)</b>				
Velocidade média (m/s)	0,616	0,526	0,748	0,672
Distância percorrida média (metros)	51,394	72,001	182,004	
<b>Tempo total (segundos)</b>				<b>202</b>
<b>Simulação S2.2(225 alunos)</b>				
Velocidade média (m/s)	0,648	0,543	0,810	0,716
Distância percorrida média (metros)	50,626	71,299	178,010	
<b>Tempo total (segundos)</b>				<b>187</b>
<b>Simulação S3 (275 alunos)</b>				
Velocidade média (m/s)	0,625	0,497	0,622	0,585
Distância percorrida média (metros)	71,911	72,024	158,014	
<b>Tempo total (segundos)</b>				<b>192</b>

No Quadro 5.3 mostramos o resumo das médias das variáveis velocidade e distância assim como os tempos totais. Analisando os dados globalmente para as 3 simulações, verificamos que o piso 1 apresenta a velocidade média mais baixa. O fato de ser um local de interceção entre agentes do piso superior e do próprio piso, justifica-se que a velocidade seja inferior em relação aos restantes pisos. O piso 0 apresenta a velocidade média mais alta, isto porque há menos competição entre agentes pelo espaço, o que permite melhor fluidez no escoamento. A comparação entre as simulações realizadas permite-nos observar o seguinte:

- Simulação S2 (275 alunos) vs. Simulação S2.2 (225 alunos): Como é possível verificar houve um ganho de velocidade média para a S2.2 ao reduzir o número de alunos de 275 para 225. A velocidade média aumentou de 0,67 m/s para 0,71 m/s. Registou-se também uma ligeira diminuição da distância média percorrida, de 182 para 178 metros e de tempo de evacuação de 202 para 187 segundos.
- Simulação S2 vs. Simulação S3: Comparando estas 2 simulações importa realçar que a distância média percorrida desceu significativamente de 182 para 158 metros. Isto porque

a localização do novo ponto de encontro é menos distante. A velocidade média e o tempo total desceram respetivamente 14% e 5%. Podemos concluir que o tempo de simulação S3 é inferior ao de S2 ainda que a velocidade média seja mais elevada.

#### Quadro 5.4

Estatística descritiva para a velocidade média por agente

Simulação	Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Quartil	Quartil
						25	75
S2	0,7021	0,720	0,127	0,425	1,082	0,613	0,790
S2.2	0,738	0,750	0,119	0,470	1,026	0,660	0,818
S3	0,604	0,614	0,117	0,254	0,840	0,524	0,694

Nota. A velocidade é calculada em metros por segundo

No Quadro 5.4 é feito o sumário da estatística descritiva da variável velocidade média por agente. Percebe-se que as simulações S2 e S2.2 têm características semelhantes pois na verdade são o mesmo plano de evacuação, mas com diferentes números de agentes. A média e a mediana têm valores próximos o que indica uma forte simetria dos dados, como mostra o valor máximo e mínimo com a sua baixa amplitude. O facto de a média e mediana serem consideravelmente mais baixas do que a velocidade padrão, mostra que os agentes dificilmente conseguem andar a uma velocidade constantes.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> A velocidade padrão é de 1,65 m/s

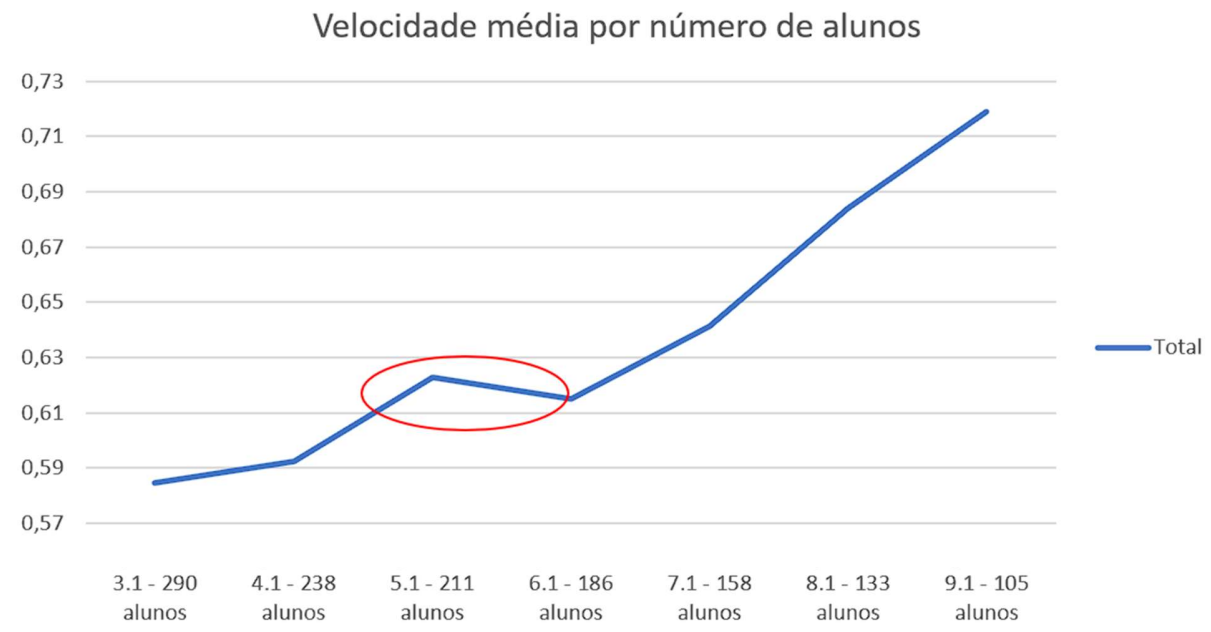


Figura 5.4

Velocidade Média por Simulação em Função do Número de Alunos

Tentámos perceber a forma como a velocidade se relaciona com o número de agentes total da simulação. Para tal foram feitas 6 novas simulações em que foi sendo reduzido parcialmente o número de alunos. No gráfico da Figura 5.4 são apresentadas 7 simulações que variam o número de alunos entre 290 e 105. Percebe-se que há uma forte correlação negativa entre o número de alunos e a velocidade média pois à medida que o número de alunos diminui, a velocidade aumenta. Esta função tem um comportamento não inteiramente linear. Visualmente percebe-se que ao diminuir o número de alunos, o ritmo de crescimento da velocidade é relativamente lento até 186 alunos. A partir deste número há um aumento mais rápido da velocidade. Esta análise sugere que existe um número ótimo que permite maximizar o número de alunos com a menor degradação de velocidade possível. Este número ótimo aparenta estar dentro de um intervalo entre 180 e 240 alunos.

## 5.2. Aglomeração de alunos

A variação da velocidade é uma consequência natural dos fatores externos a cada agente. Quando há obstáculos, o agente é forçado a reduzir a sua velocidade para evitar colisões. Se o agente não for condicionado ele vai optar por acelerar e manter a sua velocidade máxima

desejada. Paralelamente quando os obstáculos são em grande número, há uma maior probabilidade de se gerarem engarrafamentos. Através da observação dos vídeos do exercício e também das animações da nossa simulação, registaram-se vários engarrafamentos junto às passagens mais estreitas, escadarias, portas e outros acessos. Uma vez que a simulação nos fornece dados para interpretar a velocidade e a localização dos alunos, também seria interessante perceber onde ocorrem os principais bloqueios à circulação. Para realizar esta análise foi utilizado um algoritmo de aprendizagem automática não supervisionada, o k-means. Segundo [21] o k-means “é um método útil para encontrar a estrutura de agrupamento num conjunto de dados, que é caracterizado pela maior semelhança dentro do mesmo grupo e pela maior diferença entre grupos diferentes”. A aplicação prática do algoritmo ao nosso trabalho foi a de tentar encontrar grupos de pontos distintos com 3 características comuns: coordenadas GPS, distância e tempo. Foram escolhidos 3 grupos com o pressuposto teórico que deverão existir 3 zonas de velocidade em que uma primeira zona é pouco ou nada condicionada, a segunda zona moderadamente condicionada e a terceira zona fortemente condicionada.

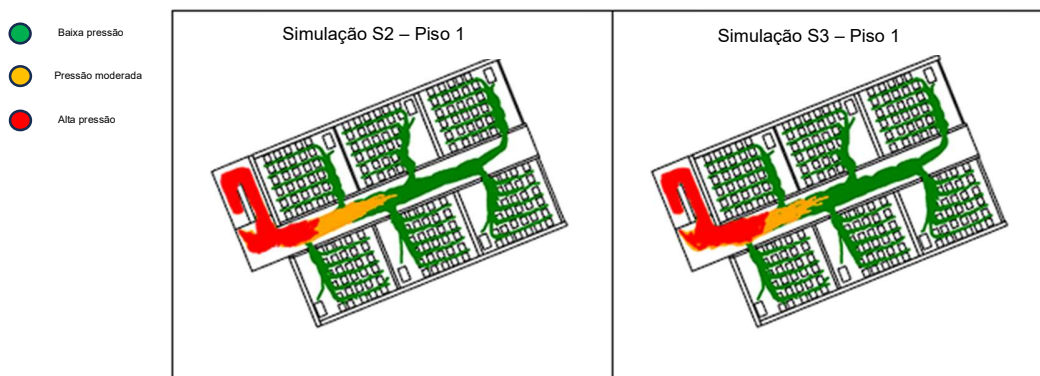


Figura 5.5

Classificação k-means para o piso 1

O resultado é virtualmente igual para S2 e S3

Analisando as imagens na Figura 5.5 relativas às simulações feitas, percebe-se que o algoritmo consegue identificar claramente as zonas que foram teorizadas. A zona verde representa a área do percurso em que os agentes têm combinações de tempos mais reduzidos e distâncias percorridas mais longas. Quer isto dizer que há maior fluidez de movimentos e menor concentração de população. A zona laranja representa uma área com uma concentração de indivíduos alta-moderada onde a circulação é feita de forma mais lenta. É nesta zona onde se começam a concentrar mais agentes pois é o local de aproximação da saída do piso. A zona

vermelha é a zona onde há maior congestionamento, distâncias percorridas menores e velocidades mais baixas. Resulta isto da maior competição entre os agentes para ocuparem um espaço de circulação cada vez menor. Esta é a zona onde os alunos do piso 1 fazem a interceção com os alunos do piso 2 e confluem para a escadaria. Esta dinâmica tem um efeito de onda que se propaga e a sua perda de intensidade explica o surgimento da zona laranja.

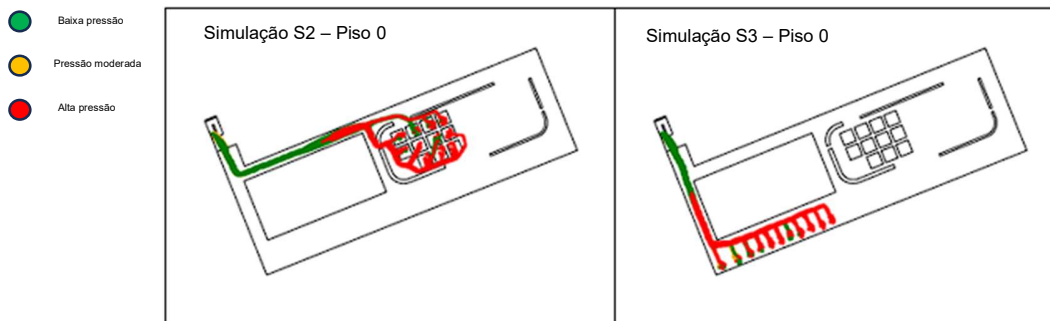


Figura 5.6

Classificação k-means para o piso 0

A Figura 5.6 mostra a classificação dos pontos para o piso 0 nas simulações S2 e S3. Para este piso o k-means também calculou uma zona verde em que há baixa pressão sobre a movimentação dos agentes e uma zona vermelha de grande pressão. A principal diferença é a de que a zona laranja é praticamente inexistente. Quer isto dizer que os agentes ou estão a andar normalmente ou estão a andar muito lentamente, não existe meio-termo. A zona dominante vermelha mostra que há medida que é feita a aproximação ao local do ponto de encontro, persiste um forte condicionamento à movimentação dos agentes. Em S2 a distância a percorrer é maior e existe maior grau de liberdade porque há 2 caminhos possíveis e, portanto, há menos quantidade de zona vermelha comparativamente. Em S3 apesar de a distância ser menor, há mais rigidez na forma como é feito o estacionamento dos alunos (disposição em fila) e menor flexibilidade na escolha de rotas de evacuação pois apenas há uma rota disponível e, portanto, maior quantidade de zona vermelha.

Antes de finalizar este capítulo importa consolidar alguns pontos e sintetizar os resultados obtidos. Ao visualizar os vídeos das simulações podemos afirmar que conseguem reproduzir as experiências de forma satisfatória. Os agentes movimentam-se de forma natural e percebe-se que são condicionados por outros agentes. Respeitam as regras físicas, ou seja, aceleram e desaceleram de forma a evitarem colisões e esperam pela sua vez quando não têm caminho livre

para circularem. Conseguem contornar obstáculos tais como mesas, carteiras, paredes e portas e inclusive conseguem, quando possível, esgueirar-se por entre outros agentes. Os tempos de evacuação das simulações são sempre inferiores aos dos exercícios pois há um menor condicionamento do comportamento humano imprevisível. Importa realçar que a medição da evacuação real é feita de forma manual pelo que é admissível que exista erro de contagem. A conjugação destes fatores faz com que o diferencial de tempo entre experiência e simulação seja expectável. As simulações por computador confirmam as principais evidências dos exercícios reais:

- A passagem dos alunos nas zonas de escadarias do 1º piso é um local onde a circulação é feita com extrema dificuldade. Os agentes chegam em certos momentos a não conseguirem progredir. Isto deve-se ao fato de ser um local de intersecção dos 2 pisos.
- Os agentes movimentam-se de forma mais lenta nos pisos e mais rápida no exterior. Esta afirmação pode ser visualizada de forma clara nos vídeos assim como nos dados provenientes das simulações e nas próprias animações.
- Ao reduzir o número de alunos consegue-se uma evacuação mais organizada e mais rápida.

Respondendo às hipóteses lançadas:

H1: O modelo implementado mostrou ser capaz de reproduzir o exercício real.

H2: O modelo implementado apresenta tempos de evacuação inferiores em todas as experiências.

H3: Ao aumentar o número de alunos constatamos que existe uma degradação da velocidade de evacuação.

H4: Ao visualizar os grupos de alunos durante a evacuação, podemos afirmar que nas zonas onde os alunos se deslocam em velocidades inferiores a sua concentração é sempre mais alta.



---

## 6. Conclusões

O modelo desenvolvido nesta dissertação permitiu reproduzir vários exercícios de evacuação na escola Rainha Dona Leonor. Foi feita a recolha e análise dos dados para perceber se eram coerentes com os dados reais. Os resultados cumpriram a expectativa pois o sistema foi capaz de reproduzir o comportamento esperado. Sabendo de antemão que é extremamente complexo reproduzir o comportamento humano, foram implementadas regras simples para cada agente, no âmbito de um paradigma de modelação baseada em agentes, que se mostraram coerentes com o que um ser humano executa numa dinâmica de evacuação. O sistema gerou várias animações por computador que reproduzem os exercícios reais. Estes entregáveis foram particularmente úteis pois permitiram perceber de forma visual os locais com maiores aglomerados de alunos onde a progressão é feita de forma mais lenta. As visualizações são importantes pois permitem identificar pontos fracos no sistema de evacuação e trabalhar em melhorias futuras recorrendo a novas simulações.

Uma das vantagens desta implementação é a sua portabilidade. Uma vez que foi utilizado um SIG, temos a garantia que o sistema é universal. Pode ser implementado para qualquer localização geográfica e em qualquer sistema de coordenadas. Outra vantagem deste sistema é o facto de ele ser modelável. Bastaria alterar a configuração da planta utilizada para correr a simulação num cenário diferente. Seria possível por exemplo alterar a localização de portas, acrescentar entradas, alterar a disposição das paredes, acrescentar ou retirar obstáculos, entre outras possibilidades.

Como trabalho futuro seria interessante estender o modelo de força social de modo a conseguir adicionar uma nova dimensão. O modelo deverá conseguir fazer cálculos a 3 dimensões o que possibilitará simular, com mais rigor, evacuações em edifícios com vários pisos e com escadas, rampas e elevadores. Seria também importante atualizar o sistema de visualização para que permita renderizar cenas a 3 dimensões.

Deixamos como proposta de novos desenvolvimentos elaborar um plano de evacuação que ainda não tenha sido experimentado em contexto real e executar uma simulação do mesmo. O objetivo seria o de tentar colocar em prática este plano em cenário real para fazer a confrontação com a simulação por computador. Desta forma teríamos um exemplo concreto de aplicabilidade do modelo desenvolvido com vista a gerar uma melhoria dos planos de evacuação da Escola Rainha Dona Leonor.

O sistema computacional assim como os dados e relatórios produzidos na tese de dissertação serão disponibilizados ao Delegado de Segurança da Escola para dar apoio a futuros exercícios.

---

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] APSEI, «Proteger», *proteger*, vol. 53, 2023, Acedido: 29 de Outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: [https://apsei.org.pt/wp-content/uploads/2023/10/P53\\_WEB.pdf](https://apsei.org.pt/wp-content/uploads/2023/10/P53_WEB.pdf)
- [2] J. vom Brocke, A. Hevner, e A. Maedche, «Introduction to Design Science Research», n. November, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-46781-4\_1.
- [3] A. Santos, M. Queirós, e G. Montecchiari, «Evacuation Exercises and Simulations Toward Improving Safety at Public Buildings», pp. 25–35, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-65687-8\_3.
- [4] C. W. Reynolds, «Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model», 1987.
- [5] N. Maruyama, D. Saito, Y. Hashimoto, e T. Ikegami, «Dynamic organization of flocking behaviors in a large-scale boids model», *J Comput Soc Sci*, vol. 2, n. 1, 2019, doi: 10.1007/s42001-019-00037-9.
- [6] A. Trivedi e S. Rao, «Agent-Based Modeling of Emergency Evacuations Considering Human Panic Behavior», *IEEE Trans Comput Soc Syst*, vol. 5, n. 1, pp. 277–288, 2018, doi: 10.1109/TCSS.2017.2783332.
- [7] R. Liu, D. Jiang, e L. Shi, «Agent-based simulation of alternative classroom evacuation scenarios», *Frontiers of Architectural Research*, vol. 5, n. 1, pp. 111–125, 2016, doi: 10.1016/j.foar.2015.12.002.
- [8] Marc Forster, *World War Z*, (2013).
- [9] Sam Mendes, *007 Spectre*, (2015).
- [10] MattReeves, *Dawn of the Planet of the Apes*, (2014).
- [11] A. Crooks, N. Malleson, E. Manley, e A. Heppenstall, «Agent-Based Modelling and Geographical Information Systems», em *Agent-Based Modelling & Geographical Information Systems: A Practical Primer*, 2022. doi: 10.4135/9781529793543.n1.
- [12] A. Crooks, N. Mallestrom, E. Manley, e Alison Heppenstall, *Agent-Based Modelling & Geographical Information Systems A Pratical Primer*. 2018.
- [13] A. S. Ernesto Costa, *Inteligência Artificial Fundamentos e Aplicações*, 2.<sup>a</sup> ed. 2008.
- [14] H. De Ponteves, *AI Crash Course : a fun and hands-on introduction to machine learning, reinforcement learning, deep learning, and artificial intelligence with Python*.
- [15] R. S. Sutton e A. G. Barto, *Reinforcement learning : an introduction*.
- [16] U. Wilensky, «NetLogo Traffic Basic model», Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. Acedido: 30 de Outubro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/TrafficBasic>
- [17] D. Helbing e P. Molnár, «Social force model for pedestrian dynamics», *Phys Rev E*, vol. 51, n. 5, pp. 4282–4286, 1995, doi: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
- [18] Yuxiang-gao, «PySocialForce». 2020.
- [19] C. Yang, *Introduction to GIS Programming and Fundamentals with Python and ArcGIS*, 1.<sup>a</sup> ed. CRC Press, 2017.
- [20] A. Forde e J. Daniel, «Pedestrian walking speed at un-signalized midblock crosswalk and its impact on urban street segment performance», *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 8, n. 1, pp. 57–69, Fev. 2021, doi: 10.1016/j.jtte.2019.03.007.
- [21] K. P. Sinaga e M. S. Yang, «Unsupervised K-means clustering algorithm», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 80716–80727, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988796.



---

## Anexo A – Manual de instalação

### Manual de instalação e guia de instruções

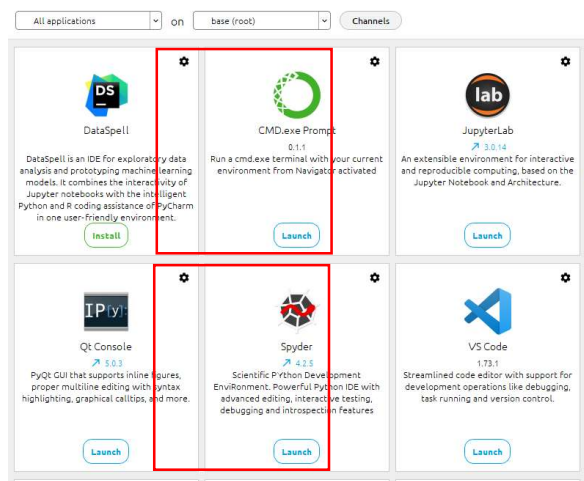
A simulação foi executada em sistema operativo Windows 10 Pro

Especificações:

- Intel® Core™ i7-4790 CPU @ 3.60 GHz
- 16.0 GB RAM

Foi descarregado e instalado o sistema de gerenciamento de pacotes Anaconda disponível em <https://www.anaconda.com/>

A partir do dashboard do Anaconda foi instalado o IDE Spyder onde todo o sistema foi implementado e executado.



A partir da consola conda que também pode ser instalada a partir do dashboard, foram instalados as seguintes bibliotecas:

- pip install Mesa-Geo
- pip install pygame
- É necessário instalar o módulo pysocialforce, no endereço github estão descritas as instruções de instalação <https://github.com/yuxiang-gao/PySocialForce>
- pip install matplotlib
- conda install –channel conda-forge geopandas

Para correr a aplicação é necessário executar o ficheiro app.py

Para alterar a simulação é necessário renomear o caminho do ficheiro de simulações \*\*por defeito está simulations/headless2.pickle

Atalho de teclas:

1 – Piso 0

2 – Piso 1

3 – Piso 2

Space – tirar screenshot

Contacto: **omar.alucas@gmail.com**