



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

# **UMA ABORDAGEM MULTIAGENTE PARA SIMULAÇÕES DE MOVIMENTAÇÃO DE MULTIDÕES E DE EVACUAÇÃO**

**VICTOR GERALDO GOMES**

Orientador: Gray Farias Moita

CEFET-MG

BELO HORIZONTE

JUNHO DE 2019

**VICTOR GERALDO GOMES**

**UMA ABORDAGEM MULTIAGENTE PARA  
SIMULAÇÕES DE MOVIMENTAÇÃO DE  
MULTIDÕES E DE EVACUAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática e Computacional.

Área de concentração: Modelagem Matemática e Computacional

Linha de pesquisa: Sistemas Inteligentes

Orientador: Gray Farias Moita  
CEFET-MG

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL  
BELO HORIZONTE  
JUNHO DE 2019

Gomes, Victor Geraldo

G633a Uma abordagem multiagente para simulações de movimentação de multidões e de evacuação / Victor Geraldo Gomes. – 2019.  
127 f.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional.

Orientador: Gray Farias Moita.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Controle de tumultos – Teses. 2. Agentes inteligentes (Software) – Teses. 3. Sistemas inteligentes de controle – Teses. 4. Java (Linguagem de programação) – Teses. 5. Estrutura de dados (Computação) – Teses. I. Moita, Gray Farias. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 001.535



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

**“UMA ABORDAGEM MULTIAGENTE PARA SIMULAÇÕES DE  
MOVIMENTAÇÃO DE MULTIDÕES E DE EVACUAÇÃO”**

Dissertação de Mestrado apresentada por Victor Geraldo Gomes, em 28 de junho de 2019,  
ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-  
MG, e aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Gray Farias Moita (Orientador)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Henrique Costa Braga

Prof. Dr. Henrique Elias Borges  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Alisson Marques da Silva  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Visto e permitida a impressão,

Prof. Dr. Thiago de Souza Rodrigues  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Modelagem Matemática e Computacional

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por me proporcionar saúde física, mental e espiritual durante todo o período de estudo. Não foi fácil conciliar empresa, família e filho com o curso, mas Ele sempre esteve do meu lado garantindo minha paz, e só isso bastava.

Um abraço especial à minha esposa Maisa, ela foi a primeira e maior incentivadora. Dedico esse trabalho ao nosso filho Joaquim, nossa fonte de energia e alegria. Obrigado também à minha mãe pelo olhar cheio de amor e sabedoria. Um grande beijo à minha madrinha Marli, que sempre está com os braços abertos para me acolher em qualquer situação.

E não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Professor Gray Farias Moita, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que sempre me orientou neste trabalho e em outros durante o mestrado. Gray conseguiu ultrapassar o papel formal de um orientador, esteve sempre incentivando e dando conselhos em projetos acadêmicos, profissionais e pessoais. Sempre lembrarei das nossas reuniões, pequenos momentos que estão eternizados na minha memória. Muito obrigado pelo carinho e por entender meu perfil de estudo e trabalho.

Um agradecimento sincero ao CEFET MG, ao programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, funcionários e toda equipe. É muito bonito ver, nesse país, que é possível oferecer ensino de alta qualidade aos alunos.

Aos meus amigos e todos que colaboraram para esse trabalho, por apoiarem minhas escolhas e me ajudarem nos momentos necessários.

# Resumo

Ambientes com aglomerações podem ser responsáveis por problemas na eficiência de projetos referentes à evasão de multidões. A falta de fiscalização também favorece o acontecimento de enormes tragédias em locais com grande circulação de pessoas. Assim sendo, o controle de multidões pode ser considerado como o planejamento sistemático para evitar problemas em aglomerações de pessoas. Um modelo via elaboração conceitual baseado em multiagentes para o fenômeno de pânico de multidão foi abordado. Para a construção deste modelo computacional utilizou-se modelos matemáticos e simulações multiagentes. Assim, um modelo computacional capaz de simular movimentação de multidões e, conseqüentemente sua análise, foi desenvolvido. O *framework* JADE foi utilizado para a comunicação entre os agentes. O JADE provê mecanismos que facilitam o desenvolvimento de sistemas multiagentes, é desenvolvido, assim como o simulador, em Java. Os resultados mostraram que quanto maior a quantidade de pessoas no ambiente maior é o tempo de evacuação e menor é o tempo de comunicação entre os agentes. As simulações aqui apresentadas mostram que é possível realizar estudos sobre a segurança e fluidez de ambientes e, dessa maneira, podem auxiliar nos projetos de ambientes com uma melhor resposta em casos de evacuação de emergência.

**Palavras-chave:** Evacuação de pessoas. Agentes. Multiagentes. Java. JADE.

# Abstract

Environments with agglomerations may be responsible for problems in the efficiency of multi crowd avoidance projects. Lack of supervision also favors major tragedies in places where there is great movement of people. Thus crowd control can be considered as systematic planning to avoid problems in crowds. A model via multiagent conceptual elaboration for the crowd panic phenomenon was addressed. For the construction of this computational model mathematical models and multiagent simulations were used. Thus, a computational model able to simulate crowd movement and, consequently, its analysis was developed. The JADE framework was used for communication between agents. JADE provides mechanisms that facilitate the development of multiagent systems, in addition to being developed in Java as well as the simulator. Results showed that the greater the amount of people in the environment the smaller the evacuation time and the shorter the time of communication between the agents. The simulations presented here show that it is possible to carry out studies on the safety and fluidity of environments and, in this way, it can aid in the design of environments with a better response in case of emergency.

**Keywords:** Evacuation of persons. Agents. Multiagent. Java. JADE.

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Estágios do Comportamento Coletivo de Blumer.....	31
Figura 2.2 – Determinantes do comportamento coletivo no processo de valor agregado. ....	41
Figura 2.3 – Inteligência Artificial.....	48
Figura 2.4 – Classificação de Modelos de Simulação Multiagentes. ....	58
Figura 2.5 – Visão de um Sistema Multiagente .....	63
Figura 2.6 – Modelo de plataforma do padrão FIPA.....	70
Figura 2.7 – Arquitetura do JADE.....	72
Figura 3.1 – Plotando as paredes e porta .....	77
Figura 3.2 – Posição no plano cartesiano e pixels ocupados pelo agente .....	78
Figura 3.3 – Objeto Pessoa herdando classe <i>Agent</i> do JADE .....	79
Figura 3.4 – Opções de movimentação do agente.....	80
Figura 3.5 – Fluxo de distribuição dos agentes .....	86
Figura 3.6 – Etapas do simulador.....	87
Figura 3.7 – Comunicação direta entre agentes.....	88
Figura 4.1 – Classificação esquemática dos dados de diversos processos de evasão.....	91
Figura 4.2 – Representação dos agentes (em preto) posicionados a diversas distâncias da saída (em laranja) em uma sala de 50 m de largura e 50 m de comprimento.....	93
Figura 4.3 – Representação dos agentes (em preto) posicionados a diversas distâncias da saída (em laranja) sobre a diagonal do ambiente (à esquerda), ou a 22,5° no ambiente (à direita), em salão quadrado com 2500 m <sup>2</sup> de área.....	95
Figura 3.4 – Imagens de 6 simulações.....	98
Figura 5.1 – Planta baixa do Pavilhão de Segurança do Trabalho do IFMG Campus Ouro Preto.....	101
Figura 5.2 – Cenário I, um agente que sabe a rota de saída .....	103
Figura 5.3 – Cenário II, dois agentes que sabem a rota de saída .....	104

Figura 5.4 – Cenário III, 64 agentes sendo 32 que sabem a rota de fuga e 32 agentes não sabem a rota de fuga. ....	105
Figura 5.5 – Cenário IV, ambiente com 288 pessoas sendo que 144 sabem a rota de saída e outros 144 não sabem. ....	107

# Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após a simulação de abandono dos ambientes da Figura 4.2 .....	94
Tabela 4.2 – Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após a simulação de abandono do ambiente da Figura 4.3 .....	96
Tabela 4.3 – Distância percorrida e tempo total de evasão do agente posicionado à 11,25° e 33,75° da porta. ....	97
Tabela 5.1 – Cenários simulados .....	100
Tabela 5.2 – Tempo total de evasão com 64 agentes considerando a comunicação entre as pessoas .....	106
Tabela 5.3 – Tempo total de evasão com 288 agentes e comunicação entre as pessoas .....	108
Tabela 5.4 – Tempo máximo para troca de informações .....	110
Tabela 5.5 – Tempo total de evasão com 288 agentes com possibilidade de pânico .....	113
Tabela 5.6 – Tempo total de evasão com 288 agentes com comportamento de pré-movimento .....	114

# Lista de Quadros

Quadro 2.1 - Efeitos da densidade no fluxo de pedestres.....	35
Quadro 2.2 - Comparação entre Modelo Tradicional e Baseado em Agentes. ....	57

# Lista de Algoritmos

Algoritmo 1 – Tomador de decisão da direção .....	81
Algoritmo 2 – Cálculo do Delta_time .....	82
Algoritmo 3 – Criação das <i>threads</i> .....	83

# Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>AC</b>	Autômatos Celulares
<b>ACC</b>	Agent Communication Channel
<b>AMS</b>	Agent Management System
<b>DF</b>	Directory Facilitator
<b>FIPA</b>	Foundation for Intelligent Physical Agents
<b>IA</b>	Inteligência Artificial
<b>IAD</b>	Inteligência Artificial Distribuída
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>JADE</b>	Java Agent Development Framework
<b>JVM</b>	Java Virtual Machine
<b>MABS</b>	Multi-Agent Based Simulation
<b>MWC</b>	Multiply with Carry
<b>RAD</b>	Rapid Application Development
<b>SAT</b>	Space and Time
<b>SIG</b>	Sistema de Informações Geográficas
<b>SMA</b>	Sistema Multiagente
<b>TALARM</b>	Detecção e o alarme ao fogo
<b>TESC</b>	Tempo para Escape Completo
<b>TIS</b>	Período-limite de sustentabilidade da vida
<b>TMOV</b>	Evacuação Completa
<b>TPRE</b>	Início do abandono

# Sumário

Introdução.....	16
1.1 Apresentação do tema.....	18
1.2 Motivação do Estudo.....	19
1.3 Justificativa .....	22
1.4 Objetivos.....	25
1.4.1 Objetivo geral .....	25
1.4.2 Objetivos específicos.....	25
1.5 Organização do trabalho.....	26
Fundamentação Teórica.....	28
2.1 Evasão de Multidão .....	28
2.1.1 Fenômenos típicos no comportamento de multidões .....	37
2.1.2 Comunicação entre as pessoas .....	43
2.1.3 Pânico .....	44
2.1.4 Tempo de pré-movimento .....	46
2.2 Inteligência Computacional.....	47
2.3 Sistemas Complexos .....	51
2.4 Sistemas Multiagentes.....	52
2.4.1 Desenvolvimento de um Sistema Multiagentes (SMA).....	61
2.4.2 Verificação e Validação em Sistema Multiagentes.....	66
2.5 JADE.....	69
2.5.1 FIPA .....	69
2.5.2 O framework JADE.....	70
Desenvolvimento.....	75
3.1 Sistema Multiagente para simular evasão de ambientes em situação de emergência .....	75

3.2 Representação do espaço e construção do ambiente .....	76
3.3 Agentes .....	78
3.4 A movimentação .....	80
3.5 Os Laços .....	82
3.6 Colocando pessoas no ambiente .....	85
3.7 Etapas da simulação .....	86
3.8 Interação entre os agentes .....	87
3.9 Saída total do ambiente .....	89
Verificação e Validação .....	90
4.1 Fundamentação .....	90
4.2 Ensaio .....	92
4.2.1 Velocidade Fixa Linear .....	92
4.2.2 Velocidade Fixa Angular .....	94
4.2.3 Efetiva Rota de Movimentação .....	97
Resultados e discussão .....	99
5.1 Aspectos Técnicos .....	99
5.2 Base de testes e cenários .....	100
5.3 Evasão de pessoas sem interação entre agentes .....	102
5.4 Evasão de pessoas com interação entre agentes .....	104
5.5 Evasão de pessoas com possibilidade de pânico e tempo de pré-movimento .....	111
5.6 Considerações a respeito dos resultados .....	115
Considerações finais e trabalhos futuros .....	116
6.1 Trabalhos Futuros .....	118
Referências .....	120

# Capítulo 1

## Introdução

De acordo com Saboia (2010), entende-se multidão como um grande grupo de indivíduos em um mesmo ambiente físico, compartilhando um objetivo comum e podendo agir diferentemente do que quando estão sozinhos. Compreender a movimentação destas multidões é de vital importância para o planejamento e a melhoria dos locais públicos, não só no sentido de facilitar e agilizar o deslocamento dos cidadãos, mas também garantir-lhes segurança, especialmente em condições de perigo iminente, onde possa haver a necessidade de evasão de tais locais. Para evitar situações catastróficas, a modelagem e o estudo empírico do comportamento da multidão em condições de emergência são fundamentais para apoiar os planejadores e gestores na análise e avaliação das condições de segurança para essas situações.

No século XIX, uma nova linha de pesquisa começou a ser estudada: o Comportamento Coletivo. O Comportamento Coletivo ocupa-se do comportamento não institucionalizado e socialmente construído durante eventos como incêndios, desastres naturais ou grandes evasões em geral. Dentre os precursores desses estudos, cita-se Durkheim (1987), Tarde (1890) e LeBon (1981)<sup>1</sup>. Empregando várias abordagens - como a ideia de uma mente coletiva e a de imitação - esses autores desenvolveram novas teorias sociais tendo como base o estudo e a observação de

---

<sup>1</sup> LEBON, GUSTAVE. *La Psychologie des Foules*. Presses Universitaires de France, Paris, 1981 (Original de 1895).

dados empíricos relacionados com os assuntos por eles estudados (criminalística, psicologia, dentre outros).

No início do século XX, diversos estudos contribuíram com o debate sobre o comportamento coletivo. Pesquisadores como Turner e Killian (1957), Smelser (1962) e Blumer (1969) agregaram teorias e conceitos ao tema.

O comportamento coletivo se desenvolve seguindo certas etapas básicas. A princípio, um evento inesperado ocorre e acaba desencadeando uma sensação de incerteza e de falta de segurança nos indivíduos. Em seguida, eles trocam sensações sobre o evento, apresentando comunicação verbal e/ou não verbal em um processo denominado *milling*. A coletividade busca certo consenso sobre a situação, compartilhando ideias e sensações. Essas ideias e sensações são amplificadas na medida em que indivíduos observam que outros também sentem e pensam de forma similar, formando uma reação circular. Quanto mais pessoas dividem dessas sensações e ideias, outras mais são motivadas a fazer parte da coletividade (contágio social).

Com as ideias coletivamente estabelecidas, ações são escolhidas e executadas (TURNER; KILLIAN, 1957). Essas etapas podem ser observadas em vários fenômenos de comportamento coletivo. O pânico em multidões apresenta-se, especificamente, como o tipo de comportamento mais instintivo e que aparenta a maior irracionalidade. Esse aspecto irracional derivou da análise psicológica das multidões, realizada em grande parte por LeBon (1981). Além da linha psicológica, há também uma linha interacionista proposta por Killian e Turner (1957) e Blumer (1969), apresentada na teoria da norma emergente. Nessa proposta, ideias, imagens comuns e normas transientes emergem como resultado da interação entre os indivíduos da coletividade.

As abordagens citadas anteriormente entendem o comportamento coletivo do tipo pânico como interações entre indivíduos desencadeadas por um evento como um desastre natural ou incêndio e, com base nessas interações, torna-se possível uma mudança social, uma institucionalização. Portanto, é um processo do micro-para-macro.

Outra linha de estudo e análise do comportamento coletivo adota uma abordagem diametralmente oposta à das abordagens mencionadas anteriormente. Proposta por Parsons (1937) e Smelser (1962) essa linha observa inicialmente as estruturas sociais e, com base na perturbação nessas estruturas, descreve o comportamento dos indivíduos em face dessa perturbação. Em outras palavras, essa linha aborda a relação macro-para-micro, a formação de uma crença generalizada e a tensão social como elementos formadores do comportamento coletivo, estudando como as transformações sociais são desencadeadas da estrutura social (do macro) para os indivíduos (o micro) (PARSONS, 1937; SMELSER, 1962).

As duas abordagens - estruturalista e interacionista - possuem carências. Por um lado, a abordagem interacionista se preocupa meramente com as interações entre indivíduos, assumindo que não há influência do entorno nesse processo, tampouco que cada indivíduo constitui uma unidade social e que o agrupamento de indivíduos pode formar novas unidades sociais caracterizadas pelas redes sociais pré-existentes e formadas durante o processo coletivo. Por outro lado, a abordagem estruturalista dedica-se aos elementos estruturais da sociedade, tais como valores, normas e instituições. A ação dos indivíduos é uma consequência de uma perturbação nessas estruturas, não sendo, portanto, influenciada pelos próprios indivíduos e suas experiências, tampouco pelo processo como um todo. Uma terceira abordagem, a construtivista, pode lidar com estas carências inserindo um novo elemento na análise do fenômeno do comportamento coletivo: os sistemas sociais (LUHMANN, 1996).

## **1.1 Apresentação do tema**

Este trabalho sugere uma análise através da elaboração de um modelo conceitual baseado em multiagentes para evasão de ambientes (locais) em situação de emergência, além de uma simulação computacional. Esses agentes possuem alguns comportamentos humanos e realizam algumas ações como: comunicação (troca de informações), possibilidade de entrar em pânico e tempo de reação para iniciar o movimento (tempo de pré-movimento). Modelos matemáticos, como exemplo, equações diferenciais ou modelos cognitivos (simulações baseadas em multiagentes) são utilizados para executar um modelo computacional. A aplicação de modelos

matemáticos e uma análise quantitativa dos resultados podem ser válidos se o foco da análise estiver nos resultados, e não especificamente nos passos necessários para se chegar a tais resultados (CALIRI; WALTHAM, 2000).

Uma infraestrutura apropriada para modelar e compreender processos complexos e os fenômenos ligados às ciências sociais é oferecida pela simulação multiagentes. Esses complexos fenômenos são: coordenação, formação de coalizões e grupos, relacionamento micro-macro, evolução de convenções e normas, intencionalidade, livre arbítrio, resolução de conflito, entre outros.

Considerando sistemas sociais como sistemas complexos, compreende-se que são redes de objetos que interagem entre si e que apresentam um procedimento dinâmico e agregado. Apenas durante o comportamento coletivo é quando as propriedades desses sistemas podem ser reconhecidas, devido ao seu comportamento sistêmico. Portanto, há possibilidade de aparecimento de propriedades coletivas emergentes, qualitativamente novas, e que não podem ser identificadas individualmente em cada elemento. Devido a isso, não é adequada a abordagem analítica ou reducionista para modelar sistemas complexos, pois costuma-se dizer de um sistema complexo que o todo é mais que a soma das partes e que ele pode ser compreendido analisando cada uma de suas partes (LUHMANN, 1996).

## **1.2 Motivação do Estudo**

O item motivador desta dissertação são as crescentes pesquisas em evasão de ambientes e sistemas multiagentes. Há várias possibilidades de abordagens na evasão de um ambiente em situação de emergência, como por exemplo, analisar o número de pessoas e tempo total para sair do ambiente, comportamento humano durante um incêndio entre outros. Um questionamento importante decorrente dos estudos do comportamento coletivo seria a possibilidade de estabelecer uma métrica relacionada com a transição da coletividade de um estado de normalidade para uma situação de pânico. Assim, pode ser possível definir quando e de que modo o pânico é instalado.

Alguns pesquisadores, tanto da sociologia como de outras áreas - como arquitetura, psicologia, engenharia, entre outros - buscaram entender o comportamento dos indivíduos em uma situação de emergência, obtendo resultados variados e direcionados para as suas necessidades. Neste processo de estudo do fenômeno alguns questionamentos surgem, tais como:

- Quais comportamentos comuns (coletivos) surgem a partir das interações entre pessoas em uma situação de emergência?
- Como o fenômeno da emergência se desenvolve sob a abordagem interacionista?
- Como é o desenvolvimento da mente coletiva ao longo do fenômeno de evasão de ambientes?

De modo a esclarecer e buscando uma maior compreensão desses questionamentos, é necessária uma análise da dinâmica desse comportamento coletivo. Segundo Zheng *et al.* (2009), para a análise do comportamento coletivo, são apresentadas sete abordagens metodológicas: autômato celular, *lattice gas*, forças sociais, dinâmica dos fluidos, baseada em agentes, teoria dos jogos e experimentos com animais. Os autores discutem as vantagens e as desvantagens de cada uma delas no processo de evasão de edifícios. Objetivando a classificação, essas abordagens tiveram como referência principal seis características, sendo elas: abordagem, indivíduos/grupos, escala, espaço e tempo (*space and time* – SAT), situações e fenômenos típicos. Abaixo, segundo Zheng *et al.* (2009), tais abordagens são descritas:

- Autômatos celulares (AC) são considerados sistemas dinâmicos discretos que estão em uma malha regular de células. A cada passo de tempo discreto ocorre uma evolução das mesmas, onde o valor da variável em uma célula é determinado pelos valores das variáveis nas células próximas. Acontece uma mudança das variáveis em cada célula tendo como base os valores das variáveis da sua vizinhança, no passo de tempo anterior e de acordo com um conjunto de regras locais. A principal aplicação de modelos baseados em autômatos celulares tem sido para descrever a dinâmica de transeuntes no período das evasões;

- Lattice gas pode ser considerado um caso especial de autômatos celulares. Nesse tipo de modelo, cada pedestre é considerado como uma partícula ativa na grade. Essa abordagem é utilizada com frequência no estudo das características de uma multidão de transeuntes, por meio de probabilidade e estatística;
- O uso de modelos de forças sociais tem ocorrido, geralmente, nas simulações de situações de pânico. No caso dessas simulações, o movimento dos transeuntes é determinado pela aplicação de forças que resultam nos seguintes efeitos: i) os transeuntes desejam chegar a um determinado destino; ii) certa distância é mantida em relação aos outros transeuntes e as fronteiras dos obstáculos no ambiente (paredes, por exemplo); e, ainda, iii) pode ocorrer a sua atração por outros transeuntes (amigos, por exemplo) ou por objetos (vitrines, por exemplo);
- Nos modelos de dinâmica dos fluidos são utilizadas propriedades dos fluidos para descrever as multidões de transeuntes. Essas simulações descrevem como densidade e velocidade se alteram com o tempo através da utilização de equações diferenciais parciais. Modelos de dinâmica dos fluidos podem ser utilizados com a finalidade de tentar compreender a mecânica do movimento de multidões, por exemplo;
- Modelos computacionais baseados em agentes têm características de criar as estruturas sociais de modo “*bottom up*”, simulando indivíduos como agentes virtuais, além de produzir organizações emergentes das regras que comandam as interações entre os agentes. Portanto, podem ser utilizados para simular comportamento humano;
- A abordagem de teoria dos jogos pode ser adotada para modelar situações em que o processo de decisão interativo das pessoas que evadiram é racional. O comportamento competitivo em uma saída de emergência pode ser simulado através de modelos de teoria dos jogos;
- Abordagens baseadas em experimentos com animais surgem como uma alternativa para a modelagem do sistema de evasão em situações de pânico

genuíno, já que seria bem difícil realizar esse tipo de experimento com seres humanos, por haverem preocupações éticas e até mesmo legais.

As abordagens metodológicas acima visam simular realisticamente a evasão de multidões e, por isso, são utilizadas no desenvolvimento e aprendizagem de diversos modelos.

Zheng et al. (2009) destacam que os modelos baseados em *lattice gas* e autômatos celulares são tipicamente utilizados em modelagem de evasão. Esses modelos são discretos nas variáveis de espaço, tempo e estado, o que os torna modelos idealmente adequados para simulações de computador em grande escala. Além disso, modelos de autômatos celulares têm grande poder expressivo para simular comportamentos complexos envolvendo um conjunto de regras simples (WOLFRAM, 1983), bem como comportamentos individuais e coletivos observados na dinâmica de transeuntes (VARAS *et al.*, 2007).

### **1.3 Justificativa**

Ambientes com grandes aglomerações, falhas de segurança devido às restrições físicas ao longo do percurso de saída do recinto e comportamento humano individualizado podem ser responsáveis por problemas na eficiência de projetos referentes à evasão de multidões. De modo paralelo, a falta de fiscalização dos órgãos responsáveis pode contribuir também para ocorrência de grandes tragédias, caso aconteça alguma situação de emergência em locais de grande circulação de pessoas.

O controle de multidões pode ser considerado como o planejamento sistemático para um movimento ordenado em reunião de pessoas. São precauções que devem ser tomadas com o objetivo de restringir ou limitar o comportamento desordenado de grupo. O controle de multidões também considera avaliações dos níveis de ocupação do projeto, da adequação das portas de entrada e portas e saídas do local em questão e dos procedimentos de controle.

Podemos citar como exemplo de tragédia em evasão de ambientes o incêndio no Edifício Joelma no centro da cidade de São Paulo. Nesse incêndio, 187 pessoas

morreram e deixou mais de 300 feridos<sup>2</sup>. Outro exemplo mais recente foi o incêndio na boate Kiss. Essa tragédia matou 242 pessoas e feriu 680 numa boate da cidade de Santa Maria (RS). A tragédia ocorreu na madrugada do dia 27 de janeiro de 2013 e foi provocada pela imprudência e pelas más condições de segurança no local<sup>3</sup>.

Entende-se que ocorrem dois grandes fatores contribuindo para a ocorrência de desastres em espaços com grande público: o comportamento inerente das multidões e o projeto do local onde as pessoas são reunidas. O comportamento das multidões raramente pode ser alterado, pois englobam aspectos psicológicos que caracterizam a própria natureza humana. Porém, o projeto dos locais que receberão a multidão pode ser adequada pelos engenheiros, arquitetos e planejadores de transportes.

Realizar pesquisa sobre a dinâmica das multidões é um requisito essencial para projetos em diversas áreas, tais como: arquitetura, engenharia, gestão de eventos, gestão de transportes, logística, entre outros. Princípios gerais galgados pela experiência e por normas técnicas aplicados de maneira pertinente são a estrutura para o planejamento satisfatório dos lugares de reunião para grandes multidões e para ordenamento do fluxo de pessoas, tanto no decorrer de situações de normalidade quanto em situações emergenciais. Estes estudos, planejamento e adequação contribuem para impedir possíveis lesões ou mortes, caso ocorram situações imprevistas.

Neste sentido, nota-se que uma grande parte dos estudos nessa área refere-se à utilização de simulações para prognosticar o comportamento de multidões. Pelo uso de recursos computacionais devidamente desenhados para demonstrar os problemas, como, por exemplo, os sistemas multiagentes (SMA), é possível realizar estas simulações. Essa técnica faz parte de uma subárea da Inteligência Artificial

---

<sup>2</sup> Disponível em <<http://memoriaglobo.globo.com/programas/jornalismo/coberturas/incendio-no-joelma/incendio-no-joelma-imagem-forte.htm>>. Acesso em: 10 jan 2019.

<sup>3</sup> Disponível em <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2015-01/incendio-que-matou-242-pessoas-na-boate-kiss-completa-dois-anos>>. Acesso em: 08 jan 2019.

Distribuída (IAD) e, atualmente, é muito utilizada quando se deseja recriar, em ambiente virtual, uma situação do mundo real em que cada agente tem a capacidade de buscar seus objetivos de forma automática, isto é, sem comandos e eventos externos. O SMA caracteriza-se também pela capacidade de cada pessoa envolvida no processo examinar o ambiente e tomar decisões enquanto esse mesmo ambiente se modifica.

Embora existiam algumas pesquisas nessa área, a realização dessas simulações é muito difícil. Atualmente, apesar de engenheiros e arquitetos já dispensarem atenção especial aos projetos de dimensionamento do espaço e rotas de saída de emergências, ainda fica complicado conseguir calcular variáveis relacionadas ao comportamento das pessoas no momento de pânico de forma extremamente assertiva. Além de aspectos físicos da construção e a obrigatoriedade de cumprimento das leis municipais, estaduais e/ou federais relacionadas à segurança, há também vários fatores relacionados ao comportamento humano em situações de emergência que devem ser considerados para que o projeto seja realmente eficaz e funcione no momento crucial.

Uma grande quantidade de estudos relacionados a pesquisas de investigação do fenômeno de evasão de multidões em situações emergenciais tem sido desenvolvida nos últimos tempos, provocando diversas novas iniciativas e estudos com o objetivo de demonstrar, através de diversas circunstâncias, que a evasão se torna essencial e primordial. A modelagem criada com base nessas abordagens ou nas suas combinações pode possuir várias formas de classificação em virtude das suas características.

Serão apontados a seguir determinados comportamentos e fenômenos que podem ser notados no decorrer de uma evasão. Devido à dificuldade de se obter dados reais em uma evasão, descreve-se de forma empírica uma parte desses comportamentos.

Vale ressaltar que realizar simulações de questões humanas em circunstâncias normais não é uma tarefa simples; mais difícil ainda é realizar essas simulações em situações de emergência. Isso porque muitos fenômenos e leis gerados pelas interações entre pessoas, construção e ambiente são obtidos através de modelagem, devido à escassez de dados de uma evasão real (YANG *et al.*, 2005). É possível que

essa dificuldade seja responsável pela lentidão das pesquisas referentes ao comportamento humano. Porém, ao mesmo tempo, tal dificuldade pode ser desafiadora para pesquisadores, conquistando esforços e trabalho para esse ramo de estudo.

A pesquisa apresentada neste trabalho não tem a pretensão de fornecer soluções definitivas, mas sim contribuir com uma parte do conhecimento sobre evasão de ambientes, por meio de utilização da tecnologia baseada em sistemas multiagentes, tentando assim fornecer subsídios para o apoio na elaboração de estratégias de melhoria em projetos, por exemplo, de incêndios.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um *software* utilizando a linguagem Java e *framework* JADE e realizar simulações para ambiente em situações de emergência. As simulações foram realizadas considerando a evasão de um ambiente com e sem a comunicação entre as pessoas.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

Diante do contexto apresentado, como objetivos específicos deste trabalho destacam-se:

- Apresentar uma sucinta revisão sobre sistemas multiagentes;
- Mostrar alguns modelos já estudados de simulações de evasão de multidões;
- Realizar a modelagem e simulações de evasões;
- Relacionar o número de pessoas com o tempo total de evasão;
- Definir algumas características humanas para o agente como comunicação, possibilidade de entrar em pânico e tempo inicial de reação depois do início da ocorrência de uma situação de emergência;

- Fazer um paralelo entre o tempo de evasão do ambiente quando existe comunicação entre as pessoas e quando elas não interagem;
- Desenvolver uma aplicação em 2D simulando a desocupação do ambiente;
- Comparar resultados com outras simulações computacionais onde não foram empregados os conceitos de sistemas baseado em multiagentes;
- Realizar testes computacionais para validação dos resultados obtidos.

### **1.5 Organização do trabalho**

A sistematização da pesquisa está organizada em 6 capítulos. O capítulo introdutório apresenta o objeto de estudo, trabalhos relacionados, os objetivos, a justificativa, os resultados esperados e a organização do trabalho.

O segundo expõe a fundamentação teórica, utilizando para isso uma pesquisa bibliográfica do assunto, contextualizando o tema e apresentando os principais conceitos relacionados a ele. Para tal, a área de estudo foi subdividida abordando evasão de multidão, a inteligência computacional aplicada ao tema em questão e sistemas multiagentes e sistemas complexos, assim como analisa o comportamento emergente e suas implicações, abordando os fenômenos típicos no comportamento das multidões. Em seguida, o estudo trata do modelo de multiagentes, como o desenvolvimento de um sistema multiagente (SMA), a verificação e validação em sistemas multiagentes e o desenvolvimento SMA com o *framework* JADE.

O terceiro capítulo, intitulado de Desenvolvimento, explica como foi criado o *software* (simulador), representação do espaço, como são criadas as paredes e portas de um ambiente, as características de um agente, exibe alguns algoritmos e tomadores de decisão, como o agente se movimenta e a interação entre as pessoas durante a caminhada dentro das salas. O capítulo quarto objetiva verificar e validar os resultados produzidos pelo simulador. Para tal, são realizados ensaios com velocidade fixa linear e angular a certas distâncias da porta de saída e exibe possíveis rotas efetivas de movimentação.

No quinto capítulo são apresentados os resultados da pesquisa e das simulações realizadas. São analisados os aspectos técnicos, a escolha de parâmetros e cenários, os testes preliminares de evasão de pessoas com e sem interação entre agentes, análise dos efeitos comportamentais sobre o resultado e, por fim, a comparação com estudos similares.

O sexto capítulo, de cunho conclusivo, aponta as principais conclusões às quais a pesquisa chegou e indica os possíveis desdobramentos para próximos trabalhos e pesquisa. Foi realizado um comparativo entre os objetivos previstos dessa pesquisa e os resultados alcançados, dificuldades encontradas para a realização de simulações, comparativo com outras pesquisas relacionadas e análise dos resultados encontrados nas simulações.

## Capítulo 2

### Fundamentação Teórica

Nas próximas seções serão abordados aspectos da evasão de multidão, pânico, tempo inicial para começar a reagir depois da situação de emergência, fenômenos típicos no comportamento das multidões, inteligência computacional, sistemas multiagente, sistemas complexos, *framework* JADE, conceitos de modelos de multiagentes e será realizada uma revisão de literatura para fundamentação teórica do trabalho.

#### 2.1 Evasão de Multidão

Em uma determinada circunstância de emergência, o comportamento de uma pessoa, que já é bastante complexo de ser analisado, pode prejudicar a escolha do caminho de fuga, o tempo para deslocamento e a eficiência de toda uma desocupação do local. O processamento da fuga se torna também mais complexo em relação ao indicador, no qual as relações sociais entre os cidadãos presentes naquela ocorrência são consideradas (YANG et al., 2005).

De acordo com Zheng et al. (2009), mais que a ocorrência em si que motivou a necessidade de saída ágil dos indivíduos de certo espaço, o próprio comportamento da multidão ao longo deste processo, se não comedido e orientado, pode provocar lesões e até mortes, como exemplo, em que todos, apressadamente, correm ao mesmo instante em direção às saídas, ocasionando conflitos físicos, empurrões, choques ou esmagamentos. Muitas pesquisas relacionadas ao assunto constataam que o estresse afeta não somente a tomada das decisões características ao fato, como também o próprio comportamento das multidões em momentos relativos a situações emergenciais, como evasões de espaços públicos.

Segundo Souza (2007), uma das maneiras mais desastrosas do comportamento humano de fuga é de debandada da pessoa induzida pelo susto, várias vezes conduzindo à mortes e ferimentos graves, com indivíduos sendo esmagadas ou pisoteados. Em condições normais, o indivíduo se move com confiança, escolhendo o caminho alicerçado em elementos relativos ao seu ambiente e às peculiaridades do local. Em situações de susto, o comportamento humano é completamente distinto, os indivíduos ficam mais nervosos, movimentam-se de forma mais acelerada que o comum e, sendo movidas por um instinto de sobrevivência, várias vezes ignoram regras sociais de respeito ao outro, tornando as interações dentro daquele espaço mais frequentes e imprevisíveis.

O comportamento conjunto das pessoas engloba alguns tipos, dentre eles a massa, que se refere à várias pessoas juntas comportando-se de uma determinada forma ao mesmo instante em um espaço físico; o público, que é um grupo de indivíduos separados; e, a multidão que necessita de uma adjacência física entre seus indivíduos e uma atuação mais coordenada diante de um propósito definido ao longo do processamento social.

Há muitas abordagens ao longo da evolução das pesquisas do comportamento de multidão. Estas diferem pela intenção e pelo ambiente histórico e civil que influenciaram no seu progresso.

Para Durkheim (1987), o comportamento coletivo difere do comportamento das pessoas, já que esse não é a simples soma do comportamento característico em um grupo. Ou seja, o abarcamento do comportamento coletivo não acontece estudando somente o comportamento dos cidadãos em si.

Durkheim (1987), em suas pesquisas, era influenciado por LeBon (1981), primeiro a aceitar a acepção do acúmulo de pessoas como um acontecimento social e antecessor das pesquisas sobre o comportamento coletivo. De acordo com LeBon (1981), quando uma pessoa faz parte de um grande grupo, ela se torna anônima e os indivíduos almejam um propósito comum de maneira coletiva. O anonimato inibe a sensatez característica das pessoas, com isto a responsabilidade única pessoal é transmitida para o grupo. Os indivíduos não acham os resultados ao se disporem a se dedicar em qualquer atuação. Por isso, para LeBon (1981), o acúmulo de pessoas

tem uma personalidade com qualidades próprias, com uma mente coletiva distinta das mentalidades individuais de seus componentes.

Como relatado anteriormente, a insatisfação das pessoas é a base do comportamento coletivo devido a incapacidade de agradar seus impulsos e desejos. No momento em que essa insatisfação está atrelada a uma reação circular, tornando-se contagiosa, resulta em uma agitação social (*social unrest*). Dessa maneira, de acordo com Blumer (1969), as pessoas são instigadas a se mover erraticamente, sem direção, deixando de funcionar as rotinas normais. Desse modo, e por causa disso, aparecem novas linhas de ação organizada (MUUKKONEN, 2008).

O processo de *milling* vem em seguida. Este permite que os indivíduos se mantenham mais sensibilizados e compreensivos, tornando-se mais preocupados uns com os outros. Os indivíduos respondem aos demais de forma ágil, direta e inconsistente, devido ao foco maior uns com os outros, predeterminando a formação de um humor comum. Um objeto comum de atenção é reencontrado pelo grupo, neste terceiro momento, através do *milling*, de forma que o humor, o imaginário e os sentimentos dessas pessoas passam a estarem focados (BLUMER, 1969).

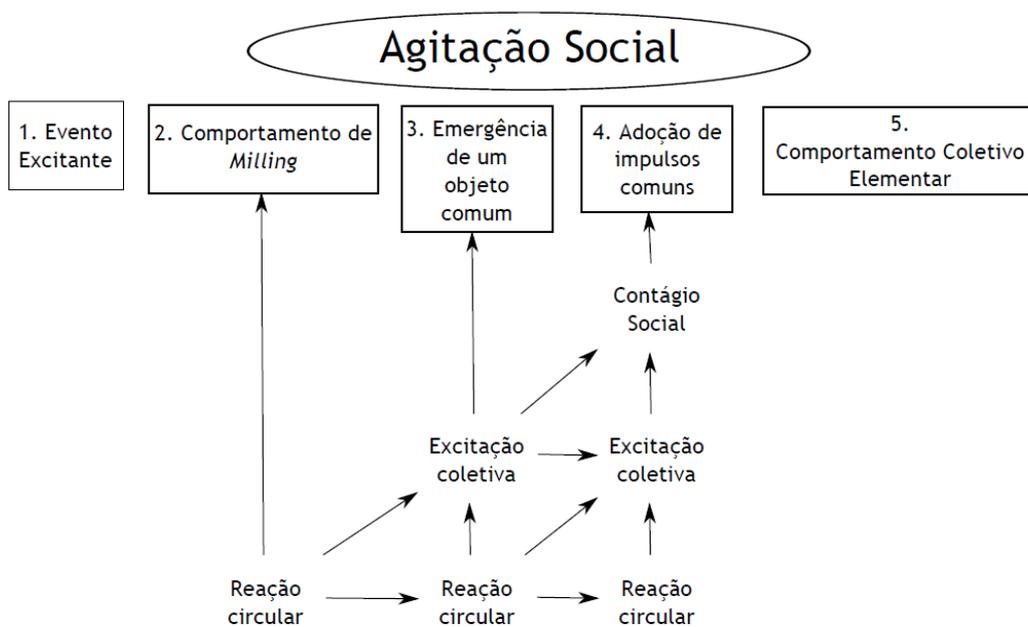
Chegando a uma quarta etapa, pelo entendimento da situação através do foco adquirido, aparece uma excitação coletiva que Blumer (1969) classificou como uma forma mais intensa de *milling* e uma reação circular pura. O comportamento excitado se envolve no processo de imaginário direcionado.

A excitação coletiva interfere negativamente, diminuindo a capacidade de usar a linguagem ou imaginário para produzir diferentes imagens formadas pela coletividade. Assim, ele pode ter uma conduta que não permitiria conceber, e muito menos executar. Somente se auto excluindo do quadro onde ocorre a ação, ou direcionando sua atenção para outro objeto com ajuda de algumas fórmulas verbais, o indivíduo conseguirá ignorar esse comportamento excitado. Por exemplo, alguns indivíduos começam a orar ou maldizer o destino pela condição não desejada, quando está em circunstância de emergência, portanto, age diferente daqueles que buscam sair do ambiente (BLUMER, 1969). Lidar com o comportamento excitado e buscar algum interesse nele é tendência natural dos indivíduos. Nessa situação, tende a guiar-se mais pelas emoções do que pela razão. É possível reorganizar de forma significativa

os seus sentimentos, costumes e traços de personalidade em condições de estresse. O contágio social surge a partir da excitação coletiva, em um quinto momento, que é uma forma intensa de *milling* e excitação coletiva e, portanto, é uma forma avançada de reação circular.

O contágio social é a propagação rápida e irracional de humor, impulso ou forma de conduta que ocorre, por exemplo, nos surtos coletivos, nas manias, nas modas passageiras. Em situações extremas, o contágio social se manifesta de maneira epidêmica, como a histeria da guerra ou pânico no mercado financeiro. Atrair e infectar os indivíduos que geralmente estão afastados da ação social, como espectadores e passantes, essa é a característica mais importante do contágio social. O indivíduo pode estar apenas curioso, ou levemente interessado nesse comportamento. Na medida em que se contagiam e prestam mais atenção a esse comportamento os indivíduos estão mais propícios a segui-lo. Finalmente, após o contágio social forma-se o comportamento coletivo elementar (BLUMER, 1969). Na Figura 2.1 há uma visão geral desses estágios.

Figura 2.1 – Estágios do Comportamento Coletivo de Blumer.



Fonte: MCPHAIL, 1989.

Os incidentes envolvendo multidões similarmente ocorrem por causa de distintos tipos de impulso do grupo. Assim, em alguns casos, há uma simples parada no tráfego por uma razão qualquer, o que pode ocasionar uma pressão pelas pessoas que vêm da parte posterior, aumentando a condensação até o ponto crítico. Em outras situações, o incidente pode ser causado por vários elementos, tais como ameaças naturais (chuvas torrenciais súbitas, raios, terremotos e outros), ameaças provocadas pelo ser humano (problemas estruturais, excesso de carga, atentados terroristas, vandalismo e outros). Várias vezes, o incidente é acionado em situações de perigo de vida, tais como incêndios ou desabamentos, em algumas situações, tumultos são capazes de aparecer normalmente sem razão, como ao longo de uma disputa para conquistar assentos livres, ou para ganhar um donativo.

Por isso, de acordo com que observaram Helbing et al. (2002), em ocorrências emergenciais, o comportamento humano é completamente distinto do que acontece em situação de normalidade e, como dito anteriormente, são capazes de aparecerem às seguintes situações:

- Geralmente, os indivíduos levam um tempo longo para iniciar a atitude de evadir do local depois que percebem conscientemente que aconteceu algum incidente grave. Isto é, os indivíduos não reagem de imediato aos alarmes.
- Os indivíduos ficam mais nervosos e, normalmente, andam consideravelmente mais rápido do que o normal.
- Os indivíduos, normalmente, movimentam-se numa mesma direção e sentido. Porém, pode ser que algumas pessoas tentem avançar em sentido contrário a corrente de evasão, onde se pode citar casos em que desejam achar suas famílias ou tentar salvar pertences ou até mesmo para informar e ajudar outros indivíduos.
- Os indivíduos iniciam empurrões e as interações e toques interpessoais tornam-se normais.
- Próximo de saídas, há a propensão dos indivíduos se acumularem e se empurrarem, obstruindo esta passagem ou a saída de emergência. De acordo com Braga (2019), há situações que podem levar à ocorrência de acidentes por colisões entre pessoas, esmagamento, pisoteamento ou a ocorrência do

empacotamento, quando o fluxo humano é interrompido pelas próprias pessoas.

- A saída pode ser retardada por indivíduos caídos ou feridos e por mais obstáculos.
- Opções de rotas são muitas vezes esquecidas ou não usadas eficientemente.
- Ocorre o acontecimento de seguir com a multidão. Similarmente chamado de comportamento de manada ou o acontecimento de rebanho, esta situação é definida pelo fato de o indivíduo abandonar o seu próprio pensamento para seguir as ações que se fazem na maior parte do seu entorno. Este acontecimento é constantemente observado em um processo de evasão normal. Ao longo de uma evasão, os indivíduos são capazes de ficarem muito nervosos e de perderem a localização de saídas seguras (especialmente em caso de incêndio, no qual a visibilidade é crítica e buscam seguir outras pessoas, acreditando que elas saibam a localização das saídas). Os indivíduos que possuem uma propensão severa de ir com a multidão são capazes de ser facilmente afetados por outros indivíduos nas suas proximidades.
- Ocorre o acontecimento de reunião, em que os indivíduos se caracterizam pela prevenção, ou seja, acreditam que conseguem se proteger, psicologicamente, negando situações desagradáveis. Têm a tendência de se encontrarem nas proximidades de uma multidão em uma emergência, o que pode ocasionar o recolhimento dos ocupantes no interior do edifício. Também pode se dizer que os indivíduos frequentemente se movem em agrupamentos e o fato de reunir-se pode diminuir as suas ansiedades. O efeito das pessoas se auxiliarem de forma mútua em situações de emergência é chamado de efeito de grupo.
- Surge o comportamento de parentesco que é um comportamento bastante comum em emergências. É definido pelo fato de que familiares tendem a se unir ao longo uma fuga emergencial, ou até inclusive retornar ao local de ameaça, para buscar um membro da família.
- Acontece o arqueamento, que é uma ocorrência normal em locais estreitos, como em portas ou portões. É ocasionado em situações em que todos os

pedestres se movem no sentido da saída, causando um gargalo no fluxo de pedestres, também chamado de arco de fuga.

- Surge o acontecimento “mais rápido é mais lento”, caracterizado pelo fato de que quanto mais rápido as pessoas desejam se mover mais alta se torna a densidade e mais lenta pode se tornar a evasão;
- Ocorre o efeito não aventureiro, em que a maioria das pessoas costuma usar a porta por onde entrou para sair de um ambiente que não lhe é muito familiar.
- Ocorrência de pânico, explicado em virtude de uma reação psicológica na qual a pessoa perde a normalidade resultando um estado alto de ansiedade ou comportamento de aceitação da situação de emergência. A resposta psicológica ocasionada na emergência ambiental é capaz de diminuir rapidamente a capacidade de adaptação e de resposta do indivíduo.

Além de todos os efeitos acima descritos, o agente essencial de crescimento do perigo de acidente em grandes aglomerações de pessoas, além do estresse diante de uma situação inesperada, é o nível de condensação da multidão, isto é, a quantidade de indivíduos que ocupam cada metro quadrado. De acordo com Fruin (1993), um indivíduo em pé ocupa de 0,20 a 0,25 m<sup>2</sup>. Este setor representa o plano do corpo humano, similarmente denominada de elipse do corpo. Para que se sinta minimamente confortável, com aceitável folga, sem abalar os demais indivíduos, são necessários por volta de 0,50 m<sup>2</sup>. O Quadro 2.1 mostra os efeitos da condensação no movimento de pedestres.

Então, pode-se observar no Quadro 2.1 que se a densidade ultrapassa a duas pessoas/m<sup>2</sup> os indivíduos já se tornam inquietos. Chegando a quatro pessoas/m<sup>2</sup>, que é a chamada densidade limite, a velocidade de deslocamento cai drasticamente, os indivíduos começam a se tocar e o perigo de incidente aumenta muito. Quando a densidade multidão atinge cinco pessoas/m<sup>2</sup>, o controle individual é perdido e o indivíduo se torna uma parte involuntária da massa. Numa ocupação de cerca de sete pessoas/m<sup>2</sup>, a multidão é considerada um tipo de fluido (HELBING; JOHANSSON, 2010).

Quadro 2.1 - Efeitos da densidade no fluxo de pedestres.

Densidade	Efeito
Menos que 0,3 pessoa/m <sup>2</sup>	Tráfego livre e tranquilo. Os indivíduos podem até parar por algum motivo e não ocorre interrupção do fluxo.
0,3 a 0,4 pessoa/m <sup>2</sup>	Tráfego médio, ultrapassagens são possíveis, não ocorrem conflitos com o tráfego no sentido oposto.
0,4 a 0,7 pessoa/m <sup>2</sup>	Ultrapassagens possíveis, mas já surgem conflitos com o tráfego no sentido oposto.
0,7 a 1,0 pessoa/m <sup>2</sup>	tráfego denso, escoamento prejudicado, ultrapassagem dificultada.
1,0 a 2,0 pessoas/m <sup>2</sup>	Tráfego muito denso, escoamento prejudicado, ultrapassagem dificultada.
Mais que 2,0 pessoas/m <sup>2</sup>	Tráfego muito denso, velocidade de fluxo reduzida, efeito multidão.
Mais que 4,0 pessoas/m <sup>2</sup>	Velocidade quase nula, frequentes toques entre os indivíduos, muito grande possibilidade de incidentes.

Fonte: Helbing e Johansson (2010).

É complicado descrever as pressões psicológicas e fisiológicas dentro de multidões com condensação máxima. A impaciência exacerbada pela percepção de ameaça e a grande compressão dos corpos torna bastante complicado a postura de respirar. Além do mais, o calor dos corpos no entorno e o abandono térmico enfraquece os indivíduos e vários desmaiam. O acesso até aqueles que caem é aproximadamente improvável. A retirada de indivíduos em ameaça apenas pode ser conseguida levantando-as e passando-as por cima para o exterior do grupo (DYNES; QUARANTELLI, 1975).

De acordo com Fruin (1993), as forças da multidão são capazes de alcançar graus que são improváveis de resistir ou moderar. A grande maioria das mortes numa multidão atordoada são por causa de asfixia por compressão e não por atropelamento ou pisoteamento como popularmente se imagina. O comportamento de empurrões e o resultado dominó dos indivíduos inclinando-se uns sobre os outros ocasionam forças que são capazes de ultrapassar a 450 kgf. A asfixia por compressão acontece nos indivíduos que vão sendo empilhados verticalmente, uns por cima dos outros, ou esmagadas horizontalmente, pela atuação de empurrões e inclinações. Os indivíduos

se conduzem umas em oposição das outras no esforço de conquistar um espaço para respirar.

É válido observar a solução de rebanho dos indivíduos na escolha de saída, ressaltando-se que esta é uma das decisões mais essenciais a serem tomadas ao longo as evasões. O resultado de rebanho acontece constantemente em situações em que os indivíduos se comportam como um grupo análogo, colocando de lado a sua personalidade e comportamento individual. No ambiente de escolha da saída, o resultado de rebanho significa que a pessoa escolhe a saída mais congestionada apenas porque viu que essa é a escolha dos demais cidadãos, ao invés adotar uma saída com poucos indivíduos que poderia garantir um tempo de abandono inferior. Esse comportamento é de modo direto influenciado pelas influências sociais que ocorrem ao longo das evasões (OSARAGI, 2004).

A pesquisa empírica do comportamento de transeuntes em casos de emergência elabora uma ferramenta valiosa para auxiliar os projetistas de espaço de reuniões de grande público para conferir e analisar os cuidados de segurança para esses espaços. Existe a necessidade de sistemas empíricos alternativos para atender a falta de dados e a necessidade de absorver elementos sociopsicológicos nos modelos de abandono emergencial.

Muitos modelos foram criados para detalhamento e avaliação do comportamento e movimento dos pedestres. No entanto, também não há um modelo único que tenha possível aplicação, tenha precisão e possa ser abundantemente empregado. O resultado da agitação de agrupamentos de itens que tenham qualquer correlação entre si pode acabar em fenômenos de aglomeração e comportamento coletivo. São exemplos o engarrafamento de tráfego, as ovelhas no campo, as formigas buscando alimento, as revoadas de pássaros, o desenvolvimento de bactérias e a agitação de pedestres.

Assim, também é um desafio compreender o que leva os pedestres a escolherem certa saída, ou também, uma calçada ou outra. O comportamento humano é baseado em um processamento de tomada de decisões. Ao desenvolver um modelo desse comportamento, considera-se que as atitudes dos pedestres apresentam certas regularidades.

Há vários tipos de representações possíveis para estudar os pedestres, sua agitação e o local no qual ocorrem. Dentre estes, de acordo com Zampieri (2010), grande quantidade de modelos vem sendo produzidos, os quais buscam explicação para os fenômenos em uma ampla diversidade de suposições e teorias, que são capazes de ser agrupados em:

- Modelos de simulação;
- Modelos de base física;
- Modelos de nível de serviço;
- Modelos de força social;
- Modelos de multiagentes;
- Modelos de autômatos celulares.

Os modelos de simulação buscam demonstrar as escolhas dos pedestres, de modo a exagerar os ganhos na compilação da rota, tendo, como exemplo, minimizar o caminho trilhado.

### **2.1.1 Fenômenos típicos no comportamento de multidões**

Sendo a proposta desta investigação modelar o movimento de multidões tendo em consideração o realismo de questões de comportamento, intenciona-se que o modelo proposto mostre resultados plausíveis com os acontecimentos reais. Conseqüentemente, estabelece-se que é necessária a compreensão da maneira de como os indivíduos se comportam em grandes agrupamentos e que características naturais são apresentadas pela multidão em diversas situações.

Entende-se multidão como um grande grupo de indivíduos em um mesmo ambiente físico, compartilhando um objetivo comum e podendo agir diferentemente do que quando estão sozinhos (ROLOFF, 1981). O movimento de multidões engloba muitos indivíduos se deslocando em um ambiente compartilhado, com a intenção de se dirigir para posições específicas. Padrões de comportamento em multidões são decorrentes das interações e das influências que o indivíduo estabelece com o meio (ROLOFF, 1981).

Segundo Smelser (1962), a área do comportamento coletivo investiga os comportamentos sociais atípicos, procurando explicar e modelar os comportamentos sociais que não condizem com os padrões e/ou critérios socialmente institucionalizados. Especificamente relacionado à teoria da ação, Parsons (1937) define que uma situação é um conjunto de condições sob a qual um ator é submetido no decorrer do tempo, e é analisada sob dois aspectos: uma situação sob o qual o ator não possui controle, portanto esta não é passível de ser alterada por ele tendo em vista o seu fim, e aquelas que o ator possui tal controle. Sendo assim, o escopo de análise do comportamento coletivo do arcabouço de Smelser (1962) baseia-se em situações sobre as quais o ator não possui controle por meio da especificação da estrutura social. Sendo assim, nesta visão uma ação pode ser considerada como estruturada ou não-estruturada que, respectivamente, ou trata-se de uma ação legitimada pela especificação organizacional ou uma ação não especificada.

A classificação proposta por Blumer (1969) inclui tipos de comportamentos coletivos socialmente construídos que estão de acordo com os padrões e critérios institucionais. Como exemplo, tem-se as torcidas organizadas e pessoas em um comício.

Objetivando analisar a natureza do comportamento coletivo, Smelser (1962) procura responder à seguinte questão: o que é comportamento coletivo? Esta questão pode ser dividida em duas partes. A primeira refere-se a quais critérios são usados para definir quando um comportamento é do tipo coletivo. E os principais tipos de comportamento coletivo referem-se à segunda parte. Para direcionar seus estudos, Smelser (1962, p.8) define que “comportamento coletivo é uma mobilização com base em crenças que redefine a ação social”.

Segundo Smelser (1962) e Muukkonen (2008), são três características básicas que qualificam um comportamento social como instância do comportamento coletivo. O primeiro critério são as crenças nas quais o comportamento coletivo está baseado, denominadas por Smelser (1962) de crenças generalizadas (SMELSER, 1962, p.8-9). Essas crenças são caracterizadas por possuir duas propriedades marcantes, uma força extraordinária e uma consequência extraordinária. A força extraordinária diz respeito à existência de uma ameaça às instituições sociais vigentes, caracterizando-se como grandes ameaças. Como exemplos desse tipo de força pode-se citar:

- Conspirações: fraude em uma eleição, golpe militar, reformas de valores sociais arraigados (como socialismo em oposição ao livre-mercado), etc.
- Grandes ameaças de ordem natural, ou não: terremotos, incêndios, ataques terroristas, colapso econômico, invasão territorial etc.

As consequências extraordinárias envolvem a expectativa relacionada à atuação da força extraordinária: mortes e desemprego em massa, destruição e miséria generalizada, colapso de instituições sociais (como família e/ou a igreja), etc. A crença nessas consequências é a segunda característica para definir um comportamento coletivo.

E, finalmente, a terceira característica diz respeito ao comportamento não-institucionalizado do grupo. Tais comportamentos estão fora das regras, ou padrões, socialmente estabelecidos.

Esses critérios podem ser formais ou informais, como exemplo, o sistema jurídico estabelece critérios formais e a etiqueta social estabelece condutas socialmente aceitas. Tendo estabelecido esses três critérios que determinam as fronteiras entre comportamentos coletivos ou não, o segundo passo é estabelecer quais são os tipos de comportamento coletivo.

Para Smelser (1962), uma instância do comportamento coletivo surge diante de situações desestruturadas onde as formas convencionais de ação social não são adequadas (SMELSER, 1962; HOWARD, 1994). Contudo, tanto o comportamento convencional quanto o coletivo têm por intuito lidar com as exigências impostas pela vida social. Para lidar com uma situação desestruturada, por meio da ação social, um tipo de comportamento coletivo redefine um componente da ação social (SMELSER, 1962; HOWARD, 1994, p.23-25). Smelser (1962) estabelece quatro componentes da ação social, que estão organizados em função do nível de abstração, a saber:

1. Valores, que definem guias amplos para o comportamento social.
2. Normas, que governam a busca dos valores.
3. Mobilização para a ação, que determina como indivíduos motivados são organizados em papéis e organizações.

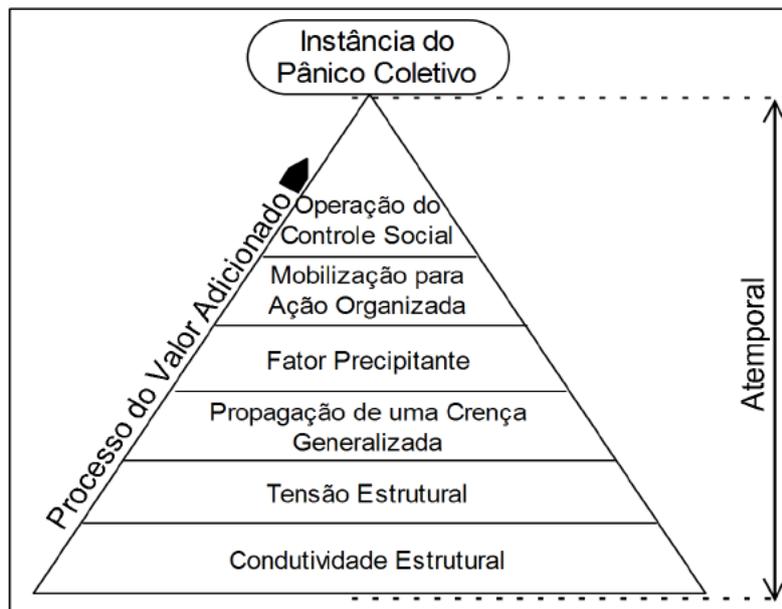
4. Facilidades situacionais, que o ator utiliza como meio. Como exemplo tem-se: conhecimento sobre o ambiente, predição das consequências da ação, ferramentas e habilidades.

Smelser (1962) também define que combinações de determinantes, sistematizadas no conceito do valor adicionado, potencializam um processo que poderá gerar comportamentos coletivos, como, por exemplo, o pânico em multidão (FREEMAN, 1972). O arcabouço teórico de Smelser (1962), conforme Figura 2.2, define seis determinantes do comportamento coletivo: condutividade estrutural, tensão estrutural, propagação de uma crença generalizada, fator precipitante, mobilização para ação organizada e operação do controle social.

Esses determinantes são organizados por meio do conceito adicionado proveniente da Economia (SMELSER, 1962; FREEMAN, 1972). Aqui, cada estágio no processo do valor adicionado é uma condição necessária para uma específica condição de valor no próximo estágio (FREEMAN, 1972). Uma vez que o grupo tenha passado por um estágio, não terá condições estruturais de retornar ao estado anterior. A condição suficiente para a produção final é a combinação de cada condição necessária, de acordo com um padrão definido. Conforme os determinantes são combinados a definição do tipo de episódio em questão torna-se fortemente específica, e comportamentos alternativos são descartados (FREEMAN, 1972).

A condutividade estrutural diz respeito às características estruturais que podem oferecer condições para que ocorra o comportamento coletivo (FREEMAN, 1972). Smelser (1962) assume que pessoas submetidas a certas situações sociais estão mais sugestionáveis que outras. Em um contexto de pânico, um ambiente físico que impeça a fuga das pessoas diante de um perigo eminente se constitui como um estado de condutividade estrutural. Isto porque o ambiente restringe a possibilidade de o sistema social lidar com seu objetivo: a fuga. Outra propriedade que pode ser caracterizada como condutividade estrutural é a aparência degradada do ambiente físico. No caso de uma conjuntura econômica, um país que seja reconhecido por não oferecer garantias e solidez sobre o pagamento de papéis da dívida pública possui uma condição estrutural de condutividade para o desencadeamento de pânico no mercado de capitais.

Figura 2.2 – Determinantes do comportamento coletivo no processo de valor agregado.



Fonte: FREEMAN, 1972.

Segundo Smelser (1962), o essencial para a determinante tensão estrutural é a percepção de: (i) situações ambíguas, (ii) privações em potencial ou reais, (iii) conflitos ou discrepâncias.

Smelser (1962) considera que a tensão estrutural percebida pelos indivíduos no nível social excita sentimentos de ansiedade, fantasia, hostilidade, etc. Vale ressaltar que essa tensão no nível social deve ocorrer de forma a explorar a condutividade estrutural, o determinante anterior. Não há uma ordem nessa relação, qualquer um dos determinantes pode constituir um estado independente do outro, inclusive simultaneamente (FREEMAN, 1972).

Em se tratando do pânico de multidões, a tensão estrutural pode ser caracterizada pela percepção (potencial ou real) de confinamento. Essa possível escassez do número de saídas pode incitar sentimento de impossibilidade de fuga nos membros da multidão. Essa ideia se configura como uma tensão estrutural em potencial, que pode incitar sentimentos de hostilidade, ansiedade, fantasia, medo, etc.

Neste ponto do processo, para que a instanciação do comportamento coletivo continue, faz-se necessária a propagação de uma crença generalizada entre os membros do grupo social (FREEMAN, 1972). Essa crença é propagada por um canal de comunicação, por exemplo, a crença pode ser comunicada por gestos ou sinais, por rumor face-a-face, por mídia de massa etc. Tal crença identifica a fonte de tensão, atribui características para essa fonte e determina as respostas apropriadas ou possíveis em relação à tensão (SMELSER, 1962; FREEMAN, 1972). Tal operação da crença ocorre no nível cognitivo dos membros de um grupo, ou seja, é por meio de uma crença que cada membro altera seu foco de atenção para a fonte de tensão, um nível de especificação de um componente da ação social, e de acordo com a natureza dessa crença estabelece tais repostas. No caso do pânico em multidão, a crença é do tipo crença histórica generalizada (SMELSER, 1962).

O fator precipitante é um evento capaz de direcionar os indivíduos para um episódio de comportamento coletivo (SMELSER, 1962; FREEMAN, 1972). Um fator precipitante é um evento que pode iniciar ou exagerar uma condição de tensão; ou pode redefinir as condições de condutividade. Em qualquer caso, o fator precipitante dá força imediata e concreta às crenças generalizadas. Dando sequência ao exemplo sobre o mercado financeiro, um golpe militar é um exemplo deste tipo de fator. Outro exemplo pode ser a notícia da falência de um grande banco privado ou estatal do país.

No caso do pânico coletivo um grito, o nervosismo aparente do funcionário da brigada de incêndio, o aparecimento de fumaça, um cheiro forte de queimado, um alarme de incêndio ou ainda uma sirene na rua são exemplos de fatores precipitantes.

A mobilização para a ação organizada é o determinante responsável por encorajar e organizar os membros do sistema para um comportamento coletivo; coloca efetivamente os membros em ação (SMELSER, 1962; FREEMAN, 1972). Neste determinante é fundamental o papel de lideranças do grupo, sejam estas formais ou informais. Aqui, assume-se que indivíduos que possuem uma crença generalizada respondem mais facilmente a líderes.

De acordo com Costa e Pinheiro (2019), o comportamento humano é um fenômeno complexo e sua análise pode ocorrer a partir de três estratégias distintas: com foco no indivíduo; analisando as interações entre os indivíduos dentro de um determinado

grupo; e, estudando as interações dos grupos em uma sociedade. Ao longo dos anos, diversos autores vêm se dedicando a uma vertente desses estudos, o comportamento humano em multidões.

Verifica-se comportamentos de multidões através de duas diferentes abordagens, uma que considera as grandezas macroscópicas, como médias de velocidades, densidade, fluxo e pressão, e outra abordando grandezas microscópicas, como a exata posição e velocidade de cada pedestre em um determinado momento. Microscopicamente, a maneira como acontecem as interações entre indivíduos afeta as grandezas macroscópicas. Desta forma, existem duas filosofias fundamentalmente distintas para modelagem do movimento de multidões, de acordo com as escalas de descrição citadas: abordagem macroscópica e microscópica. O modelo de multiagentes está incluído na abordagem microscópica e será desenvolvido no próximo capítulo.

### **2.1.2 Comunicação entre as pessoas**

Dynes e Quarantelli (1975) afirmam que na maior parte dos incidentes com multidões, normalmente não há comunicação entre os indivíduos que estão na frente da massa e os que estão atrás. Entretanto, como dito anteriormente, uma das propostas deste trabalho é explorar as vantagens quando há comunicação entre as pessoas durante uma situação de emergência e evasão de ambiente. Este trabalho também buscou mostrar a diferença do tempo total de saída do ambiente quando não há essa comunicação e troca de informação entre as pessoas.

Ainda segundo Dynes e Quarantelli (1975), os indivíduos na parte traseira apenas pressionam a multidão para frente visto que desejam sair o mais acelerado possível, enquanto aqueles que estão no interior ou na ante guarda são apertados e se submetem a uma grande ameaça de esmagamento ou pisoteamento. Isso ocorre em parte por devido ao próprio processamento de movimento. As densidades mais leves na parte traseira permitem o movimento mais aberto, enquanto os cidadãos da frente são imobilizados e submetidos à grande pressão. O colapso das fileiras frontais ocasiona uma adulterada apreensão de movimento para frente. Em certos casos, os encarregados pela segurança tentam moderar a multidão através da parte da frente,

pedindo aos indivíduos para não cometerem empurrões. Entretanto, essa forma de atuação é ineficaz ao longo de uma situação grave em andamento, visto que os que estão na frente geralmente não possuem controle de seus movimentos.

### **2.1.3 Pânico**

Segundo Veiga e Cadete Pires (2019), empiricamente, as teorias de pânico sugerem a perda de controle comportamental, e daí o egoísmo e a desordem em emergência. No entanto, estudos de casos e revisões de emergências mostram que a cooperação é relativamente comum no comportamento de multidões. Desta forma, uma das maiores contradições das multidões é que as pessoas podem ficar em pânico.

Blumer (1969) também relata sobre a formação das multidões como um comportamento circular. Primeiro acontece um evento escapista ou excitante (geralmente alusivo com o abalo social), chamando a atenção da pessoa e a pressionando a um comportamento rápido. Os cidadãos se submetem ao ocorrido, e inicia-se o progresso de uma multidão ativa.

Esse acúmulo de pessoas pode desencadear o pânico. Neste tipo de ocorrência sempre ocorre uma situação de risco iminente e um sentimento de urgência em fazer algo por parte das pessoas. Para Alves (2011), o pânico em multidões é um tipo de comportamento coletivo. Para este, deve-se levar alguns fatores em consideração:

- Em situações de pânico, as pessoas geralmente percebem que sua sobrevivência é produto de tomadas de decisões rápidas;
- A personalidade individual é enfraquecida. Desta maneira, há uma alteração dos sistemas de valores e uma diminuição da responsabilidade, o que acarreta o comportamento imitativo, presente nos grupos;
- Pode haver a presença de palavras de ordem, emblemas, uniformes, manifestações sonoras ou rítmicas que reforçam a identidade grupal, em detrimento da individual. As pessoas manifestam um alto grau de irracionalidade, preocupando-se com a ideia de fugir e não considerando as consequências de seus atos.

O pânico ocorre devido ao surgimento da interação social emergente entre membros de uma multidão. LeBon (1981) compactua com as teorias do comportamento coletivo que afirmam que o indivíduo se inclina a agir de maneira irracional e instintiva. Entretanto, Dynes e Quarantelli (1975) contradizem essa ideia. Para os autores, diante das crises o comportamento humano não se revela impulsivo, e sim controlado, aproveitando-se de meios adequados para alcançar seus objetivos de forma organizada e funcional.

Mesmo que o indivíduo esteja frente às situações perigosas e com medo, se ele tem experiência e conhecimento, isso pode contribuir em situações de pânico, ocasionando o controle das emoções. Embora isso não descarte o comportamento irracional, mas sua presença é menor, destacando, portanto, a racionalidade e a sociabilidade.

A formação de uma multidão é descrita em estágios, conforme explica Blumer (1969). Primeiramente, surge a situação de um acontecimento escapista ou excitante (geralmente devido a agitação social), que desperta o indivíduo e o obriga a agir. Dessa forma, os integrantes da coletividade desviam sua atenção para o acontecimento. Ainda de acordo com Blumer (1969), os indivíduos se sujeitam ao evento, então, começa-se o desenvolvimento de uma multidão ativa.

Existe uma ideia comum entre o público e alguns profissionais da área de emergência de que uma população exposta à uma situação de emergência ou desastre irá obrigatoriamente entrar em pânico. Para Mawson (2005), o termo pânico refere-se ao medo e/ou fuga inapropriados (ou excessivos) e ao medo e/ou fuga altamente intensos.

Estudos têm demonstrado que o pânico da multidão ou pânico em massa é uma ocorrência incomum diante de vários tipos de situação de emergência ou ameaça. Quarantelli (1954) concluiu que para a existência de pânico são necessárias três condições: as pessoas devem ter a sensação que estão aprisionadas, devem ter uma grande sensação de impotência e profundo isolamento. Com a presença desses três elementos, o surgimento do pânico é uma possibilidade que deve ser levada em conta. Enquanto que para Paola (2007), em uma crise de pânico, o sujeito pode sair correndo sem direção alguma.

#### 2.1.4 Tempo de pré-movimento

Outros estudos mostram que a primeira reação instintiva da sequência é a paralisia, também chamada de hipervigilância. Conforme Bracha (2004), essa resposta inicial de paralisia é a tendência de ação de parar, olhar e ouvir.

Esse tempo para escape completo (*TESC*) da população de uma edificação é composto pelo somatório dos tempos decorridos do início da ignição até a detecção e o alarme ao fogo (*TALARM*), acrescido do tempo de pré-movimento, os quais incluem os tempos de reconhecimento da existência do evento e da reação ao alarme para o início do abandono (*TPRE*), e o tempo da efetiva movimentação até a evacuação completa (*TMOV*)<sup>4</sup> conforme equação abaixo:

$$TESC = TALARM + TPRE + TMOV$$

O tempo-limite, em que as condições de calor, chama, fumaça e insuficiência de oxigênio tornem a manutenção da vida humana insustentável, é o período-limite de sustentabilidade da vida (TIS). Assim sendo, o TESC deve ser inferior ao TIS.

O tempo de pré-movimento deve receber atenção, pois as pessoas, normalmente, não reagem prontamente a um alarme sonoro de incêndio, pois ele suscita dúvida, e os usuários gastam um tempo precioso para reconhecimento desse alarme e para uma tomada de atitude, até decidir a abandonar o ambiente. Mesmo sabendo que, segundo Braga (2019), o comportamento humano em treinamento pode ser bem diferente do comportamento em uma situação real, essa demora deve ser evitada com treinamentos frequentes de abandono de local. Uma prática salutar em locais hospedagens é divulgar que o sistema de alarme de incêndio é testado periodicamente, em dia de semana e horário marcado para que os usuários possam

---

<sup>4</sup> Curso de Formação de Brigadistas Profissionais. Disponível em <<https://cb.es.gov.br/Media/CBMES/PDF's/CEIB/SCE/Material%20Didatico/CFBP-SALVAMENTO%20TERRESTRE%20-%202016.pdf>>. Acesso em: 15 abr 2018.

identificá-lo e, de forma automática, associá-lo aos procedimentos para evacuação do local. As pessoas com alguma dificuldade de locomoção devem avisar a recepção para receberem atenção especial no caso de incêndio real.

## 2.2 Inteligência Computacional

Segundo Serrão (2003), Inteligência Computacional (IC) é uma área da inteligência artificial (IA) que estuda a teoria e aplicação de técnicas inspiradas na Natureza, como Redes Neurais, Lógica *Fuzzy*, Computação Evolucionária e Inteligência Artificial. É utilizada em diversas áreas como:

- Setor Elétrico: previsão de carga elétrica, otimização da alocação de capacitores, reconhecimento de descargas elétricas entre outros;
- Setor Financeiro: gerência de carteira de investimentos (Risco x Retorno), previsão de indicadores financeiros, planejamento de fluxo de caixa entre outros;
- Setor Industrial: otimização e planejamento de produção, controle e navegação de robôs entre outros;
- Setor Petroquímico: otimização da distribuição de combustíveis entre outros.

Como pode ser observado, a utilização desta técnica é muito vasta. As definições de Inteligência Artificial variam ao longo de duas dimensões principais (RUSSELL; NORVIG, 2004):

- As que se baseiam em pensamento e raciocínio, onde o objetivo é desenvolver sistemas que pensam como seres humanos ou que pensam racionalmente;
- A que se baseia em comportamento, onde o objetivo é desenvolver sistemas que atuam como seres humanos ou que atuam racionalmente.

A seguir estão listadas algumas definições de Inteligência Computacional que podem ser encontradas na literatura. As quatro primeiras definições se enquadram melhor na primeira dimensão, as outras na segunda.

- “O novo e interessante esforço para fazer os computadores pensarem... máquinas com mentes, no sentido total e literal” (HAUGELAND, 1985).

- “[Automatização de] atividades que se associam ao pensamento humano, atividades como a tomada de decisões, a resolução de problemas, o aprendizado...” (BELLMAN, 1956).
- “O estudo das faculdades mentais pelo uso de modelos computacionais” (CHARNIAK; MCDERMOTT, 1985).
- “O estudo das computações que tornam possível perceber, raciocinar e agir” (WINSTON, 1992).
- “O estudo sobre como fazer computadores realizarem coisas nas quais, no momento, as pessoas sejam melhores” (RICH; KNIGHT, 1992).
- “A Inteligência Artificial pode ser definida como o ramo da Ciência da Computação que se ocupa da automação do comportamento inteligente” (LUGER, 2004).

Figura 2.3 – Inteligência Artificial.



Fonte: <http://www.icaart.org>, 2019.

A nuvem de palavras da Figura 2.3 apresenta os principais paradigmas da Inteligência Computacional.

Segundo Goldschmidt (2010), é feita uma breve descrição de alguns elementos da taxonomia da Inteligência Computacional mostradas na Figura 2.3 acima:

- **Lógica Nebulosa** – Do inglês *Fuzzy Logic*, este paradigma tem por objetivo modelar o modo aproximado de raciocínio humano, visando criar métodos computacionais capazes de tomar decisões racionais em ambientes de incerteza, subjetividade e imprecisão. A Lógica Nebulosa fornece mecanismos para manipular informações imprecisas e subjetivas, tais como os conceitos: muito, pouco, pequeno, alto, bom, quente, frio etc., fornecendo uma resposta aproximada para questões baseada em conhecimentos inexatos, incompletos ou não totalmente confiáveis (GOLDSCHMIDT, 2010).
- **Redes Neurais** – São modelos computacionais não lineares, inspirados na estrutura e no funcionamento do cérebro, que procuram reproduzir características humanas, tais como: aprendizado, associação, generalização e abstração. Devido à sua estrutura, as Redes Neurais Artificiais são bastante efetivas no aprendizado de padrões a partir de dados históricos não lineares, incompletos, com ruído e até compostos de exemplos contraditórios (GOLDSCHMIDT, 2010).
- **Computação Evolucionária** – É uma área de pesquisa interdisciplinar que compreende diversos paradigmas inspirados no princípio da evolução natural das espécies proposto por Charles Darwin e na recombinação genética. Desdobra-se nas seguintes especialidades (GOLDSCHMIDT, 2010):
- **Algoritmos Genéticos** – Fornecem um mecanismo de busca adaptativa que se baseia no princípio da sobrevivência dos mais aptos. Isto é obtido a partir de uma população de indivíduos (soluções), representados por cromossomas (palavras binárias), cada um associado a uma aptidão (avaliação da solução frente ao problema), que são submetidos a um processo de evolução (seleção e reprodução) por vários ciclos.

- Programação Genética – É uma técnica automática de programação que propicia a evolução de programas de computadores que resolvem problemas de maneira exata ou aproximada.
- Hardware Evolucionário – É uma extensão do modelo genético de aprendizado no espaço de estruturas complexas como circuitos eletrônicos. Utiliza conceitos dos sistemas evolucionários naturais no projeto automático de circuitos, hardware auto reparáveis, projeto de robôs e projeto de circuitos VLSI. Esta área vem ganhando cada vez mais aplicabilidade em função dos avanços em nanotecnologia.
- Inteligência Artificial (IA) – Restringe-se ao processamento simbólico do conhecimento, criando programas que fazem os computadores parecerem inteligentes. As soluções dos problemas são heurísticas e respostas satisfatórias são aceitas. A IA é constituída de técnicas próprias para a solução de problemas, com destaque para os chamados sistemas especialistas, que são programas computacionais destinados a solucionar problemas em campos especializados do conhecimento humano. Usam técnicas de IA, bases de conhecimento e raciocínio inferencial (GOLDSCHMIDT, 2010).

Vale ressaltar que vários esforços na área de IC procuram integrar diversas técnicas dos paradigmas já mencionados buscando construir os chamados Sistemas Híbridos. Espera-se que, pela combinação de técnicas, sejam supridas as deficiências individuais destas, adquirindo modelos mais desenvolvidos e completos.

No caso deste trabalho, foi feita uma simulação computacional baseada em inteligência computacional a fim de modelar um conjunto de pessoas evadindo de ambientes em situações de emergência utilizando métodos diferentes dos citados acima. Neste caso, foi utilizado sistemas baseados em multiagentes (SMA), descritos na próxima seção.

## 2.3 Sistemas Complexos

Em primeiro lugar, faz-se necessário definir o que é “complexo”, pois tal definição pode provocar interpretações que, à luz deste trabalho, podem ser equivocadas. A palavra “complexidade” é baseada em duas palavras latinas: “complexus”, que significa “totalidade” e “completare”, que significa “abarcado, adotar” (ERIKSEN et al. 2006).

Pode-se dizer que um sistema complexo é composto por dois ou mais elementos interligados em forma de rede de objetos que, ao interagirem entre si, produzem um comportamento agregado e dinâmico.

Não se deve confundir complexo com complicado. Um sistema complicado possui elementos com um grande número de comportamentos e ações, e tais elementos são de difícil construção. No entanto, após construídos, podem representar claramente o sistema em questão.

Por sua vez, um sistema complexo possui um grande número de elementos simples em termos de comportamentos e ações, mas que tornam o sistema complexo no momento em que ocorrem interações entre esses elementos e as ações podem afetar toda a rede de objetos em uma reação em cadeia, levando ao termo conhecido como “o todo é maior que a soma de suas partes”. Por conta disto, somente é possível observar as características de um sistema complexo por esse comportamento coletivo, e não pela análise dos seus elementos fundamentais. Como exemplo, pode-se citar o fenômeno de evasão em caso de incêndio descrito em Helbing et al. (2002).

Para esses tipos de problema é possível adotar o conceito de autômato celular (CA), como o encontrado na simulação de pedestres descrita em Adler e Blue (1998).

Com a simulação de sistemas complexos é possível: propor novas estruturas para lidar com sistemas sociais, estudá-los e entender as suas operações; adquirir um melhor entendimento dos processos sociais, psicológicos, antropológicos; aproveitar modelos teóricos comprovados efetivamente em processos sociais; aplicar um sistema complexo para um determinado problema; e, aproveitar as conclusões obtidas para construir modelos adequados para outros problemas análogos.

## 2.4 Sistemas Multiagentes

De um modo geral, a ideia de um simulador é a da construção de um modelo que, ao ser implementado, seja capaz de imitar as características operacionais e dinâmicas de um sistema real, o que permitiria um estudo desse sistema dentro de um contexto isolado e controlado (FREITAS FILHO, 2008).

Isto se faz necessário, pois, em muitos casos, torna-se inviável a análise de fenômenos ou atividades no decorrer de sua execução. A utilização de agentes dentro de um contexto sócio comunicativo é uma abordagem muito comum para simulações, ou seja, a criação de agentes capazes de interagir (relacionar-se) uns com os outros e a possibilidade de observar tanto os agentes de forma isolada, como as interações realizadas entre eles e os comportamentos emergentes decorridos dessas simulações.

A tomada de decisões de um agente pode ocorrer de várias maneiras. Uma possibilidade é definir uma ação de acordo com critérios definidos. A maneira como essa ação é escolhida depende da avaliação de variáveis de estado. Essa avaliação pode empregar a lógica clássica, que não admite outras possibilidades que não sejam “sim/não” ou “verdadeiro/falso”. Outra possibilidade de avaliação pode empregar uma lógica menos “booleana” e tratar de possibilidades de escolha, o que enriquece a capacidade decisória do agente.

Existem várias maneiras de se definir agentes devido aos diferentes pontos de vista e às abordagens adotadas em diversas pesquisas. Segundo Demazeau (1995), é possível decompor um sistema segundo uma metodologia de Inteligência Artificial Distribuída (IAD), por meio dos conceitos definidos a seguir.

Pode-se chamar “agente” cada uma das entidades ativas de um determinado sistema. E pelo termo ambiente, as entidades passivas. Informações são recebidas por um agente, que raciocina sobre o ambiente e os demais agentes e determina quais ações deve fazer e quais objetivos seguir. Portanto, esse indivíduo trata-se de uma entidade ativa, isto é, capaz de dominar suas ações, diferentemente ao das noções estáticas, tais como módulos, conjunto de regras e bases de conhecimentos.

Para Ferber e Gasser (1991), uma possível definição é proposta por considerar o agente uma entidade, real ou abstrata, que é capaz de agir sobre ela mesma e sobre seu ambiente, que dispõe de uma representação parcial deste ambiente que, em um universo multiagente, pode comunicar-se com outros agentes, e cujo comportamento é consequência de suas observações, de seu conhecimento e das interações com outros agentes.

Portando, um agente pode ser entendido como uma entidade computacional de comportamento autônomo que lhe permite escolher suas próprias ações. É definida pelo agente qual ação deverá ser realizada, levando em consideração as mudanças sucedidas no ambiente em que ele atua e o desejo de alcançar seus objetivos.

A troca de informações entre agentes ou entre agente/ambiente chama-se interação, que pode ser praticada de forma direta (comunicação explícita) ou indireta (emissão de sinais através do ambiente). Uma organização determina todas as restrições empregues aos agentes que pertencem a uma determinada sociedade, ou seja, os meios pelos quais o projetista do sistema pode assegurar que cada agente desejará e produzirá a resolução dos problemas propostos.

Cresceu muito rapidamente, nos últimos anos, o desenvolvimento de sistemas multiagentes (SMA). Devido a fatores de risco, ocorrem situações em que os agentes são submetidos a condições em que não há viabilidade de interferência humana, isso em aplicações da robótica. Dentre tais condições, destaca-se, por exemplo, a necessidade de locomoção de agentes em ambientes nocivos ou em locais de grande extensão contendo infraestruturas e/ou recursos críticos que devem ser protegidos (MENDONÇA; ARRUDA; NEVES-Jr., 2014).

Com a consolidação do paradigma multiagentes na computação, as simulações multiagentes ganharam importância em vários ramos do saber científico. A semelhança entre as tecnologias baseadas em agentes e modelos reais de sistemas sociais criou um grande esforço interdisciplinar que abriu novos campos de pesquisa dentro do contexto de um novo ramo científico, o da Simulação Multiagentes (do Inglês *Multi-Agent Based Simulation* - MABS) (COHEN; FELSON, 1979).

Trata-se, portanto, do resultado de um esforço coletivo para uma maior integração entre diversas áreas científicas e da aplicação de técnicas computacionais

desenvolvidas originalmente com outras finalidades, como as redes de computadores. A finalidade dos pesquisadores da área de MABS é construir e estudar modelos computacionais de simulação, levando em consideração a infraestrutura técnica e teórica da Inteligência Artificial Distribuída.

As simulações em geral e as simulações multiagentes em particular ganharam relevância a tal ponto que alguns estudiosos consideram que estas são uma “terceira forma de fazer ciência”, junto com a indução e a dedução (AXELROD, 1998). Isto pode ser comprovado pela maneira como as simulações multiagentes lidam com seus objetivos e a maneira como são desenvolvidas.

Em princípio, as simulações partem de premissas explícitas (tal como no processo dedutivo), mas sem recorrer a teoremas comprobatórios. Por sua vez, as simulações produzem resultados adequados para uma análise indutiva fundamentada em ideias iniciais nitidamente determinadas. Pode-se dizer que as simulações reúnem aspectos das duas linhas científicas clássicas, empregando o melhor dos dois mundos de modo a atingir a sua finalidade de forma plena, mantendo uma coerência calcada na lógica.

Com base nessa perspectiva, um modelo computacional de simulação é um modelo que representa um sistema-alvo específico. No entanto, o que diferencia um modelo de simulação tradicional com um modelo de simulação multiagentes é a possibilidade de (i) observar e estudar o comportamento global do sistema modelado, sob certos critérios, e (ii) analisar as consequências das mudanças nos componentes internos do sistema (GILBERT; TERNA, 2000).

Isto implica que uma das possibilidades das MABSs está na detecção de padrões emergentes e na maneira como as mudanças interferem no comportamento dos agentes. De modo a relacionar o modelo de simulação construído e o sistema-alvo utilizado como base, dois processos são empregados. Um dos processos é a verificação, que consiste em estabelecer se a simulação implementada corresponde ao modelo computacional inicialmente proposto. A maior dificuldade que pode ser encontrada nesse processo está na passagem do modelo conceitual para a implementação, que pode desencadear pesquisas de novas técnicas computacionais necessárias para o atendimento completo do modelo conceitual. A verificação deve garantir que a implementação computacional da simulação seja condizente com o

modelo proposto. Caso isto se verifique, torna-se possível aplicar o segundo processo de validação, que efetivamente determina se o modelo de simulação proposto e implementado confere com o sistema-alvo. Em outras palavras, a validação define o quanto a simulação corresponde ao sistema-alvo (FREITAS FILHO, 2008).

De acordo com Eriksen et al. (2006), a ideia central de um modelo de simulação multiagentes é simular um mundo artificial composto por entidades interativas computacionais.

Em outras palavras, o modelo deve descrever o mundo em questão e a estrutura fundamental das entidades interativas, e como é a interação entre essas entidades. A simulação é obtida pela transposição das entidades (ou grupos de entidades) presentes no sistema-alvo para o mundo artificial correspondente. Além disso, os agentes podem ser de diferentes tipos e agrupamentos, tais como robôs, seres humanos, organizações, grupos sociais, moléculas, entre outros.

Em uma MABS, a maneira pelo qual os agentes interagem pode ser descrita de várias maneiras, desde abordagens reativas que se referem a uma resposta básica a alguns estímulos externos, até abordagens decisórias fundamentadas nas decisões que o agente irá tomar conforme as informações externas, conhecimento prévio ou adquirido e o objetivo do agente. Em ambas as abordagens, os agentes devem ser autônomos nas suas ações, e essas ações devem ocorrer de forma sincronizada por um elemento escalonador de tempo baseado em eventos. Isso significa que é necessário um elemento observador da simulação responsável por controlar o tempo e os passos da simulação junto com os agentes. Na literatura, encontram-se outras formas de classificar agentes, que podem ser de acordo com o ambiente de execução (local ou em rede), com a atuação (isolada ou social), o foco (estrutural ou comportamento), entre outros (LUCK et al., 2003).

O comportamento dos agentes pode ocorrer de forma síncrona ou discreta, isto é, ocorrendo no intervalo de um passo da simulação, ou de forma assíncrona ou contínua, cujo escalonamento é gerenciado por outras ações do agente ou por um segundo escalonador de tempo (SILVA et al., 2008).

Assim, é fundamental no processo de modelar simulações determinar qual opção é a mais adequada, conforme as características do sistema-alvo e das necessidades referentes ao acompanhamento da simulação e das ações dos agentes.

As simulações baseadas em multiagentes trazem consigo uma infraestrutura adequada para modelar, estudar e compreender os processos relativos às interações sociais complexas tais como coordenação, colaboração, formação de grupos, resolução de conflitos, entre outros. Isso é possível devido à natureza multidisciplinar da formação e utilização das ferramentas utilizadas em simulações multiagentes, que passaram por uma evolução para atender as necessidades criadas no decorrer da modelagem dos sistemas-alvo.

Portanto, a análise da simulação refere-se a investigar o ambiente onde os agentes estão localizados, as decisões realizadas pelos agentes, como essas decisões afetam o ambiente e os outros agentes e como os grupos de agentes podem afetar os atributos internos dos agentes.

Para construir simulações multiagente, é preciso produzir modelos multiagentes que procuram representar sistemas complexos reais com sistemas de interação e tomada de decisões autônomos denominados agentes. Esses modelos multiagentes são um contraponto a uma abordagem analítica tradicional que, muitas vezes, não é capaz de lidar com fenômenos complexos de difícil rastreamento, normalmente baseados em relacionamentos não-lineares cuja complexidade não está nos elementos isolados, mas na interação entre esses elementos (GILBERT; TERNA, 2000).

Um modelo multiagentes é constituído de agentes heterogêneos que representam entidades localizadas no sistema-alvo. Das interações entre agentes e dos agentes com o ambiente, emergem padrões agregados e um sistema social. Em várias áreas essa característica emergente é importante, como nas ciências sociais, onde há uma aura de imprevisibilidade e de complexidade inerentes do estudo dos seres humanos, sendo que tais complexidades não podem ser trivialmente descritas apenas com modelos analíticos. O princípio essencial dos modelos multiagentes é o aparecimento de sistemas sociais e grupos de comportamento gerados da interação entre indivíduos.

Quadro 2.2 - Comparação entre Modelo Tradicional e Baseado em Agentes.

	Característica	Tradicional	Baseado em Agentes
1	Tempo	Contínuo	Discreto
2	Modelo	Funções e expressões matemáticas	Descritivo
3	Granularidade	Por agregações	Individual
4	Abordagem	<i>Top-down</i> (macro para micro)	Ascendente (bottom-up ou micro para macro)
5	Comportamento	Pré-estabelecido	Emergente
6	Controle	Globalizado	Localizado

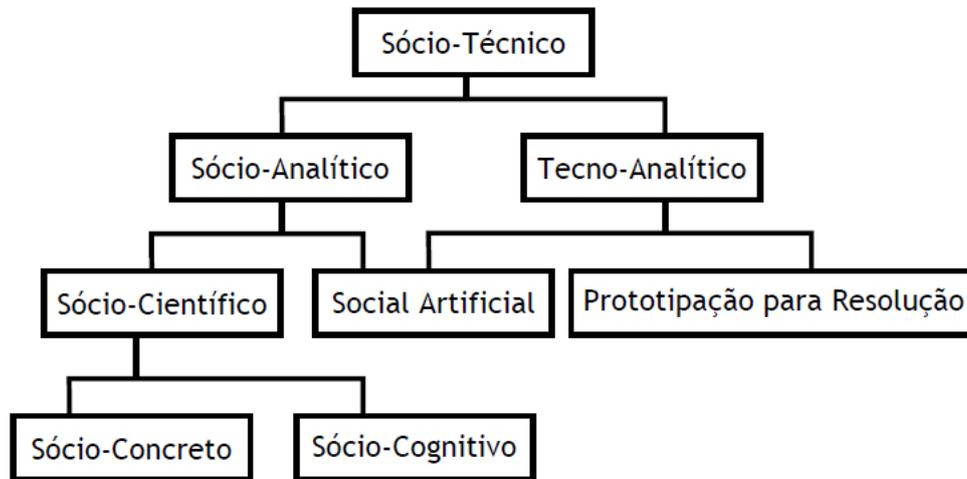
Fonte: Autor, 2019.

Esses agentes irão atuar em ambientes virtuais e de acordo com regras específicas que são válidas somente se as limitações de memória e de processamento forem levadas em consideração.

Por essa razão, os agentes também são tratados como programas, que possuem as mesmas limitações e características, embora sejam distintos quanto ao ambiente de execução e a finalidade. O Quadro 2.2 apresenta uma comparação entre a modelagem tradicional e a baseada em agentes.

Uma proposta para classificar modelos de simulação baseada em agentes foi proposta em David et al. (2004). Nesta classificação os modelos da área de MABS dividem-se nas seguintes classes, conforme ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Classificação de Modelos de Simulação Multiagentes.



Fonte: DAVID et al., 2004.

Ainda segundo David et al. (2004), especificando os modelos da Figura 2.4, têm-se:

- Modelo Social Artificial: Esta classe abrange simulações onde sua relação com um mundo real é deliberadamente inexistente, ou muito fraca;
- Modelo Sócio Cognitivo: Este tipo de classe de simulação possui o propósito de conferir a consistência de, ou refinar, teorias sócio cognitivas;
- Modelo Sócio Concreto: Estes modelos estabelecem relações significativas entre a simulação e o alvo, requerendo modelagem em base participativa e pesquisa empírica dirigida a dados no alvo;
- Modelo de Prototipação para Resolução: Neste modelo SMA são utilizados para a prototipação de sistemas;
- Modelo Sócio Científico: Este modelo é uma integração linear dos modelos sócio cognitivo e sócio concreto;
- Modelo Sócio Analítico: Esta classe combina modelos sócio científicos com o caráter exploratório de modelos sociais artificiais;
- Modelo Tecnológico-Analítico: Esta classe aumenta a extensão da prototipação para resolução com a influência exploratória de modelos sociais artificiais. O caráter abstrato alto e a validação estrutural-fraca de sociedades artificiais dão

lugar a níveis intermediários de abstração com validação estrutural-forte aos modelos;

- Modelo Sócio Técnico: Esta classe deve somar o caráter exploratório de simulações tecnológico-analíticas com o caráter exploratório e metafórico mais forte de simulações sócio analíticas.

Existem algumas características comuns nos modelos de simulações multiagentes. Esses modelos são compostos por agentes heterogêneos e autônomos, ou seja, que não respondem a uma autoridade central. Isto é possível porque os agentes são construídos de modo a serem auto organizados e com regras locais de interação. Tais agentes atuam em um ambiente que propicia a interação entre os agentes e o principal objetivo do modelo é permitir a emergência de fenômenos oriundos dessas interações entre agentes e esse ambiente. Deve-se destacar a importância do conceito de comportamento emergente e fenômenos emergentes desencadeados por essas interações. Isto, por si só, faz com que as simulações de sistemas multiagentes assemelhem-se à um aspecto de sistema complexo, o que será abordado posteriormente.

Uma definição específica de agente o descreve como uma entidade discreta com objetivos e comportamentos próprios, assim como estados internos e regras de comportamento que permite a interação com os demais agentes e o ambiente onde ele está inserido. Outra definição de agente pode ser encontrada em (RUSSELL; NORVIG, 2004), e estabelece que “um agente é todo aquele capaz de perceber o ambiente por meio de sensores e agir sobre o ambiente por meio de atuadores”. Mais uma vez, há a ênfase no agente, no ambiente e na interação entre eles.

Como mencionado anteriormente, os agentes são autônomos e possuem iniciativa. Além disso, são construídos de modo que suas ações dependam o mínimo possível de entidades externas, como pessoas ou outros agentes computacionais. Agentes podem ser pessoas, grupos, sociedades de insetos, robôs, e assim por diante. Qualquer entidade que deve ser pensada na simulação por sua autonomia, independência na tomada de decisões e na capacidade de interagir e atuar no ambiente pode ser encarada como um agente da simulação.

Os agentes presentes em modelos baseados em agentes possuem regras simples para definir seus comportamentos. Com a interação entre agentes originam estruturas coletivas, numa perspectiva ascendente. Isto contrasta com uma perspectiva descendente em que ocorre o processo inverso, ou seja, as estruturas em nível macro são inicialmente modeladas e são utilizadas para explicar as interações em nível micro dos seus elementos.

Devido à própria natureza dos sistemas complexos, torna-se muito complicado modelá-los segundo uma abordagem descendente porque o comportamento de um sistema complexo é derivado do grande número de interações que ocorrem no nível micro. Em alguns casos, a abordagem analítica também não é adequada, pois assume que o comportamento do sistema pode ser inteiramente descrito tomando as suas partes isoladamente, e descrevendo-as integralmente, sem se preocupar com a interação entre essas partes. Portanto, um modelo ascendente ou *bottom-up* é mais adequado para esse tipo de sistema, que pode ser encontrado em simulações de vida artificial, onde o foco está nas regras simples e na interação entre os agentes e o ambiente. Desta forma, a simulação passa a ser escalável, isto é, pode-se ampliar o número de agentes participantes e, em caso de necessidade, ampliar os recursos computacionais existentes para a execução da simulação, permitindo a observação e o estudo dos padrões emergentes. Nas outras abordagens, o incremento da simulação pode se tornar impraticável, pois pode desencadear um crescimento exponencial na capacidade computacional necessária para a execução da simulação.

Por exemplo, um modelo ascendente para a proliferação de um vírus, como o da gripe, descreveria os vírus e os indivíduos em uma escala micro, relacionando seus comportamentos (forma de movimentação, como os vírus contaminam as pessoas etc.) e quais as interações entre indivíduos. É possível observar o comportamento emergente das colônias de vírus e das pessoas utilizando uma ferramenta de simulação.

### **2.4.1 Desenvolvimento de um Sistema Multiagentes (SMA)**

Wooldridge (1995) considera um agente como sendo uma entidade com capacidade de resolver problemas encapsulados. Dentro deste conceito, define o agente possuindo as seguintes propriedades:

- Autonomia - executam a maior parte daquilo que fazem sem interferência direta de agentes humanos ou de agentes computacionais, possuindo controle completo sobre aquilo que se faz e seu estado interno.
- Habilidade social - personalidade para comunicar seus requisitos aos demais e um mecanismo de decisão interna que defina no momento em que as interações são apropriadas.
- Capacidade de reação - percebem e reagem às modificações no ambiente em que estiverem inseridos.
- Capacidade proativa - agentes, do tipo deliberativo, além de adicionar respostas às modificações que acontecem em seu ambiente, demonstram um comportamento direcionado a objetivos, tendo iniciativas quando julgarem adequado.

Agentes tem comportamento operacional e ocorrem em um local, que pode incluir ou não mais agentes. Em algumas situações, agentes são capazes de cumprir trabalhos por si próprios, porém, em outras, abrangem a necessidade de complementação de mais agentes. Isto ocorre a toda hora na atualidade, uma vez que quando indivíduo possui a necessidade de solucionar uma dificuldade que envolva um entendimento ou agilidade que não possua, precisa a ajuda de outro indivíduo apto a fazê-lo.

Conforme Jennings (1999), algumas das características de agentes são:

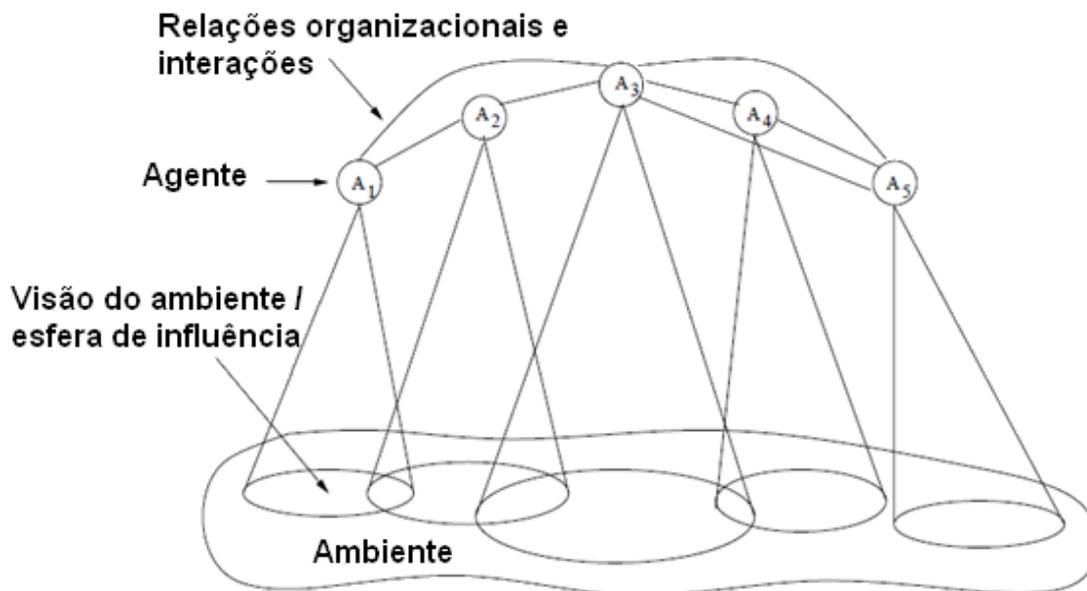
- Entidades de que resolvem questões claramente identificáveis com limites e interfaces bem definidos.
- Entidades localizadas em um ambiente específico no qual recebem inserções que correspondem ao estado deste e sobre o qual geram interferência através de atuadores.

- Projetados para ter um comportamento específico, contendo objetivos particulares a alcançar.
- Autônomos que controlam o seu estado interno e a sua própria atividade comportamental.
- Capazes de demonstrar um comportamento flexível para a solução de problemas, para os quais precisam possuir reações (responder imediatamente às alterações do ambiente) e serem proativos (para se comportar de forma a alcançar os seus objetivos).

Segundo Juchem e Bastos (2001), ao considerar uma visão de situações orientadas a agentes (vide Figura 2.5), nota-se que um único agente não é suficiente para solucionar grande parte dos problemas. Logo, nestas situações, integram-se múltiplos agentes no processo de solução do problema para que seja representada sua natureza descentralizada, as variadas perspectivas do ambiente ou os interesses em conflito. Além disso, agentes necessitam de interação com outros para alcançar seus objetivos individuais ou a acessibilidade aos recursos do ambiente. Duas importantes observações precisam ser feitas:

- Ocorrem estas interações devido à uma linguagem de alto-nível (declarativa) e, assim sendo, geralmente são conduzidas ao nível de conhecimento.
- É em um ambiente em que os agentes possuem controle. Compreende-se que interação social entre agentes significa a probabilidade de evolução dos relacionamentos existentes e construção de novos relacionamentos.

Figura 2.5 – Visão de um Sistema Multiagente



Fonte: JENNINGS, 1999.

Ainda segundo Juchem e Bastos (2001), analisando-se os pontos acima descritos de forma conjunta, é possível perceber que adaptar uma concepção direcionada a agentes para a solução de um conflito significa dividi-lo em vários componentes autônomos com metas próprias e que se interagem. Desta forma, pode-se enumerar as 3 palavras-chave desta abordagem: agentes, interações e organizações.

Por causa do crescente uso de computadores em redes - e pode-se considerar a Internet como um fundamental exemplo deste acontecimento -, no qual a informação está distribuída por meio de vários nodos que a compõe, situações no qual um ente computacional tem todo o entendimento preciso para solucionar complicações sem a ajuda de outras estão ficando escassas. Complicações como crescimento de sistemas complexos e a necessidade de tratamento de grandes massas de dados para a solução de problemas têm feito com que cientistas busquem técnicas baseadas em arquiteturas distribuídas. Isto tem ocorrido em virtude de que as arquiteturas distribuídas vêm se demonstrado bastante benéficas para a solução de complicações no qual a própria classe é distribuída. Em consequência, a distribuição pode ocasionar o desenvolvimento de algoritmos computacionais que provavelmente não poderiam

ter sido desenvolvidos através de uma abordagem centralizada (HUHNS; STEPHENS, 1999).

Considerando um agente como um ente que encapsula conhecimento sobre alguma tarefa, surge naturalmente a ideia de agrupamento de agentes que tenham parte do conhecimento englobado em estratégias de solução de um problema e que, a partir disso, ocorra a interação com a intenção de complementarem suas habilidades. Considerando que no mundo real existam organizações com indivíduos que possuem diversas habilidades e que ao utilizá-las, ocorre o desenvolvimento das atividades que são precisas para o processo produtivo, é possível formar uma sociedade de agentes onde para cada um deles seja acomodado em um subconjunto das habilidades necessárias pela estratégia de resolução, sendo designado, para cada um, parte das atividades a serem cumpridas, conforme sua disponibilidade de recursos (computacionais, materiais, tempo entre outros).

É possível distinguir duas principais classes de sistemas com múltiplos agentes (ZAMBONELLI et al., 2000):

- Sistemas de Resolução Distribuída de Problemas, nos quais os agentes cooperam entre si para atingir um objetivo comum, todos os agentes se conhecem e confiam uns nos outros;
- Sistemas Abertos, nos quais os agentes não são especificamente projetados para que alcancem um objetivo comum, sendo possível o ingresso e a saída do sistema dinamicamente. Nesta situação, a chegada dinâmica de agentes desconhecidos necessita ser considerada, assim como a possibilidade de existência de comportamento não benéfico no decorrer das interações.

Os Sistemas Multiagentes estão dentro da segunda classificação. Ocorre nesse sistema a investigação do comportamento de um conjunto de agentes autônomos, muitas vezes já existentes, onde acontece sua interação com a resolução do objetivo do problema em questão, o que não se conseguiria com um único indivíduo (MOULIN; CHAIB-DRAA, 1996).

Deste modo, tem-se que o comportamento de forma global advém quando os agentes participantes do sistema interagem. Almeja-se a funcionalidade neste sistema que

possibilita estes agentes coordenar seus conhecimentos, objetivos, habilidades e planos individuais de uma forma simultânea, em benefício da execução de uma ação ou da resolução de algum problema onde se faça necessária a cooperação entre os agentes. Nestes casos, diz-se que o agente exibe um comportamento social (ZAMBONELLI et al., 2000).

Moulin e Chaib-Draa (1996) evidenciam as características que constituem vantagens significativas dos SMA sobre um solucionador de problemas monolítico, dentre elas:

- Maior rapidez na resolução de problemas através do aproveitamento do paralelismo.
- Diminuição da comunicação por transmitir somente soluções parciais, em alto nível, para outros agentes ao invés de dados brutos para um lugar central.
- Mais flexibilidade por ter agentes de diferentes habilidades que são dinamicamente agrupados para resolver problemas.
- Aumento da segurança, pela possibilidade de agentes assumirem responsabilidades daqueles que falham.

Considerando as características de uma abordagem multiagentes, devem ser impostas necessidades que precisam ser viabilizadas para que o sistema possa ter eficiência. Em um SMA, critérios que permitem e asseguram a coerência das ações dos agentes devem ser considerados, com o propósito de atingir de maneira efetiva os objetivos do SMA.

Assim, Moulin e Chaib-Draa (1996) fazem a proposta de um *framework* que considera uma estrutura de análise e classifica a maioria das atividades de pesquisa em Sistemas Multiagentes. Assim é possível se considerar duas perspectivas:

- a do agente que engloba elementos para caracterização do agente inserido em um SMA, podendo citar categorias de agente, estrutura e manutenção do conhecimento, habilidades lógicas, adaptativas e de aprendizagem, e arquiteturas de agente;

- e a de grupo que faz a reunião de aspectos grupais, citando: a forma de se organizar, de se coordenar, cooperar, negociar, coerência de comportamento, planejamento, habilidades comunicativas e de interação.

Permite-se definir três grandes grupos de aspectos a serem considerados no projeto de um SMA, considerando a perspectiva de grupo:

- Aspectos fundamentais – fazem a definição de características que precisam ser viabilizadas para que as ações dos agentes que compõe o SMA sejam compatíveis.
- Aspectos arquiteturais – fazem a definição de características que devem ser englobadas pela arquitetura a ser adotada para viabilizar os aspectos principais inseridos no SMA.
- Aspectos ambientais – fazem a definição das características ambientais onde os agentes do SMA estarão inseridos, com o objetivo da determinação de quais técnicas de percepção devem ser usadas por estes agentes.

#### **2.4.2 Verificação e Validação em Sistema Multiagentes**

A confiabilidade de um modelo conceitual modelado computacionalmente é atestada através de duas metodologias: a verificação e a validação. Verificação é definida por Arthur e Nance (1997) em termos de Engenharia de *Software*, atestando a qualidade do *software* implementado. Já a validação atesta o resultado final do trabalho, avaliando a sua correspondência com os resultados esperados e/ou objeto de estudo.

Caughlin (2000) define a verificação como um processo que determina se a implementação do modelo feita pelo desenvolvedor representa com precisão a descrição conceitual e suas especificações. O processo de verificação é tratado pela teoria como um ou mais passos no processo de Engenharia de Software, assim como o levantamento de requisitos, análise, modelagem, dentre outros. A metodologia utilizada segue as mesmas diretrizes dos diversos modelos de processos de desenvolvimento, como cascata, evolucionar, prototipação, espiral, RAD (*Rapid Application Development*).

Nesta fase, o objetivo é aplicar sobre o modelo computacional implementado conjuntos de testes de software, como os testes de caixa-branca, que trabalham diretamente sobre o código fonte, e testes de caixa-preta, que por sua vez avaliam o comportamento externo do software, desconsiderando o comportamento interno. Tais procedimentos da Engenharia de Software no âmbito da simulação multiagentes visam a busca por erros. Erros aparecem quando o modelo computacional não está em consonância com as especificações de requisitos impostas pelo próprio programador (GALÁN et al., 2009). Ou seja, não se trata de erros relacionados à tradução do modelo conceitual para o modelo computacional, trata-se de erros de programação ou relacionados à plataforma de hardware ou software utilizada para programação e execução do modelo implementado. Cita-se como exemplo de um erro, um bloco de código cujo objetivo seria obter todos os agentes da vizinhança, mas na verdade obtém apenas um subconjunto deles.

Além do processo de Engenharia de Software envolvido no desenvolvimento, a linguagem de programação utilizada pode ser considerada como um fator de incremento na possibilidade de erros de verificação. O uso de linguagens específicas na simulação em oposição às linguagens de programação de alto nível diminui consideravelmente a quantidade de erros nesta fase do processo. Em geral, para Sargent (1999), o processo de verificação pode ser dividido em duas abordagens:

- Testes Estáticos: depuração de erros utilizando técnicas como *walk-throughs*, teste de mesa, testes de caixa branca e outros.
- Testes Dinâmicos: instâncias dos dados são fornecidas ao software e os resultados obtidos são examinados durante todo o processo de execução. As técnicas utilizadas são de *cross validation*, relação de entrada/saída, traces dentre outras.

O grande número de variáveis presentes nas simulações pode dificultar o processo de verificação, sendo necessário mais esforço nesta fase de desenvolvimento.

Uma abordagem interessante pode ser a escolha de variáveis-chave no processo de verificação. O sucesso neste processo é crucial para a validação do modelo conceitual, atestando que a teoria foi corretamente aplicada na modelagem do agente.

Arthur e Nance (1997) definem a validação como um processo que comprove se o comportamento de um modelo ou software está em conformidade com os requisitos especificados. No domínio das modelagens e simulações, tais requisitos são derivados dos objetos de estudo da simulação. Esta abordagem mostra uma tendência em validar um modelo utilizando as mesmas técnicas de Engenharia de Software, onde os requisitos são confrontados com os dados obtidos de forma rigorosa, o que requer uma especificação de requisitos também rigorosa. Em (CAUGHLIN, 2000), a validação é determinada pelo grau que o modelo representa do mundo real ou do objeto de estudo. Esta abordagem é mais abrangente, já que engloba modelos onde os requisitos não são definidos e, portanto, não podem ser confrontados no processo de validação.

Ao contrário da fase de verificação, a fase de validação possui um viés mais subjetivo, principalmente em se tratando de uma simulação social. Tal viés é inerente à natureza exploratória de uma simulação social multiagentes de modo que existe uma incerteza sobre o que o modelo deve produzir como resultante de sua execução (GALÁN et al., 2009).

Para minimizar esse aspecto inesperado ou subjetivo da exploração de um modelo pela simulação multiagentes, é preciso que se tenha um levantamento teórico rigoroso, e que se busque relacionar essa teoria com as abstrações do modelo conceitual. No presente trabalho, esse papel é desempenhado pela fase da meta-arquitetura, que procura sintetizar o levantamento teórico dando a possibilidade do rastreamento entre o modelo computacional, o modelo conceitual e o levantamento teórico.

A validação pode ser estática e dinâmica. A validação estática objetiva analisar se as teorias sobre o modelo são válidas e as relações de causa e efeito são apropriadas ao propósito da simulação. Nesta fase, as técnicas de validação de face, análise matemática, estatística, técnicas de indução lógica e outras são aplicadas ao modelo conceitual para verificar a correta relação destes efeitos com os dados do sistema real. Esta série de métodos e técnicas é aplicada em cada um dos submodelos que compõe a simulação até que o modelo global seja atingido.

A modelagem errada ou incompleta implica na revisão de todo o modelo, já que o modelo conceitual é a base de toda a simulação. Na validação dinâmica/comportamental, a preocupação está em avaliar o comportamento do modelo em produção, observando a precisão do mesmo em relação à finalidade e aplicabilidade pretendida. Este é o ponto de encontro entre todas as abordagens de validação, incluindo o processo de verificação. O fracasso neste ponto pode ser devido a um modelo conceitual incorreto, erros de programação, precisão numérica ou dados inválidos e o modelo é realizado novamente.

## **2.5 JADE**

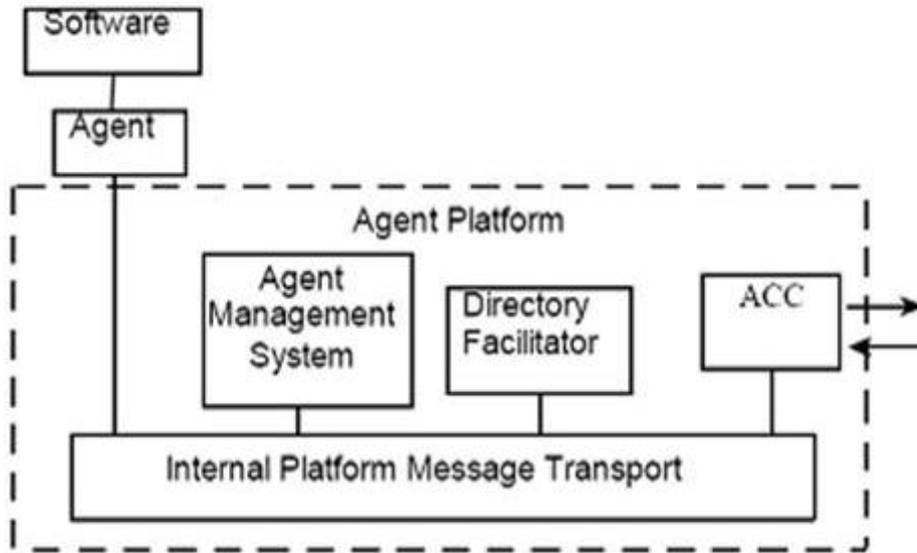
### **2.5.1 FIPA**

A FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) é uma associação internacional sem fins lucrativos de companhias e organizações que compartilham esforços a fim de produzir especificações para tecnologias de agentes e sistemas multiagentes e possibilitar a interoperabilidade dos seus padrões com outras tecnologias. Em 2005, ela foi aceita como um dos comitês que compõem o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). A FIPA fornece e promove um conjunto de tecnologias para várias áreas de aplicação que os desenvolvedores podem integrar para construir sistemas complexos com um alto grau de interoperabilidade.

A FIPA foi originalmente criada e sediada na Suíça em 1996 para produzir especificações de padrões de software baseados em agentes. Desde a sua fundação, a FIPA tem desempenhado um papel crucial no desenvolvimento de padrões de agentes e promoveu uma série de iniciativas e eventos que contribuíram para o desenvolvimento e a adoção da tecnologia de agentes. Além disso, muitas das ideias originadas e desenvolvidas na FIPA estão agora entrando em foco nas novas gerações de tecnologia Web e especificações relacionadas.

A Figura 2.6 representa o modelo de comunicação definido pela FIPA e adotado por JADE, como também os relacionamentos existentes entre os elementos que compõe este modelo.

Figura 2.6 – Modelo de plataforma do padrão FIPA



Fonte: Teixeira, [s.d.].

### 2.5.2 O framework JADE

A plataforma JADE (*Java Agent Development Framework*), conforme Bellifemine et al. (2017), é um framework para desenvolvimento de SMA, completamente implementado em Java, cujo objetivo principal é facilitar o desenvolvimento de sistemas orientados a agentes.

O desenvolvimento de software orientado a agentes satisfaz adequadamente às necessidades de muitas áreas de aplicação, incluindo ferramentas inteligentes, simuladores e sistemas de negócio distribuídos. Embora ainda seja um paradigma recente, já tem demonstrado que pode ser bem aplicado para resolução de vários tipos de problemas, tais como gerenciamento de tráfego aéreo e simulações de combate (LUCK, 2003). Devido à sua capacidade de oferecer uma solução elegante e modular para muitos embaraços que envolvem processamento em tempo real e com muitas mudanças organizacionais, a programação orientada a agentes apresenta-se adequada para esses sistemas.

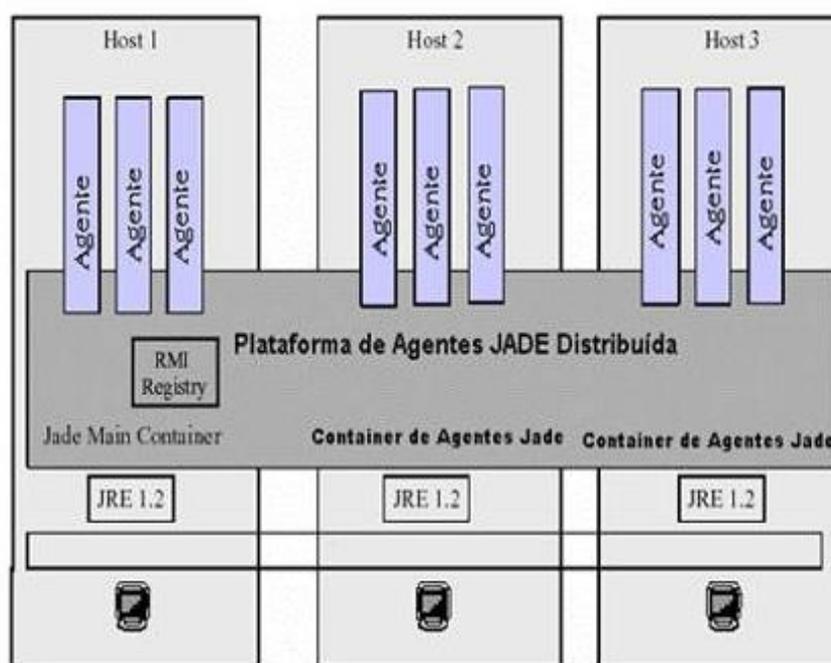
Segundo Silva (2005), JADE provê tecnologias de agentes padronizadas e oferece para o desenvolvedor algumas características com o intuito de simplificar o processo de desenvolvimento. Dentre elas, pode-se citar:

- Fornece um ambiente de agentes compatível com as especificações da FIPA, que inclui o sistema gerenciador de agentes (AMS - Agent Management System), o facilitador de diretórios (DF - Directory Facilitator) e o canal de comunicação de agentes (ACC - Agent Communication Channel). Esses componentes são automaticamente iniciados quando o ambiente de desenvolvimento é executado.
- Possui uma interface visual que dá suporte ao gerenciamento de vários agentes e conjuntos de agentes, inclusive remotamente.
- Oferece ferramentas que auxiliam o desenvolvimento e a depuração de aplicações multiagentes implementadas em JADE.
- Dá suporte a execuções múltiplas, paralelas ou concorrentes de atividades de agentes, através dos modelos de comportamentos disponíveis na sua API.
- Dispõe de uma biblioteca de protocolos da FIPA para interação entre agentes pronta para ser usada.
- Automatiza no AMS os registros e cancelamento de registros dos agentes na plataforma, permitindo que o registro dos agentes seja transparente para o desenvolvedor.
- Realiza o transporte de mensagens no formato FIPA-ACL dentro da mesma plataforma de agentes.
- Possui um serviço de nomes em conformidade aos padrões FIPA, permitindo que os agentes recebam um identificador único na sua inicialização válido para todo ambiente.
- Oferece mecanismos que tornam possível a sua integração com aplicações externas que executem agentes de JADE.

JADE foi desenvolvido em Java devido a características próprias da linguagem, particularmente pela programação orientada a objetos em ambientes distribuídos

heterogêneos (BELLIFEMINE et al., 2017), como por exemplo, em uma rede com várias máquinas possuindo hardware e sistema operacional diferentes. Foram desenvolvidos tanto pacotes Java com funcionalidades prontas para uso, quanto interfaces abstratas para serem adaptadas conforme as funcionalidades requeridas para determinada aplicação de agentes. Ou seja, JADE oferece uma API para desenvolvimento de agentes em Java e uma plataforma distribuída de agentes em conformidade com a FIPA. Toda comunicação entre agentes em JADE é feita através de trocas de mensagens.

Figura 2.7 – Arquitetura do JADE



Fonte: Teixeira, [s.d.].

Outra característica de JADE é que sua plataforma de agentes pode ser distribuída por vários hosts (Figura 2.7), cada um deles executando apenas uma JVM (*Java Virtual Machine*). Os agentes são implementados como threads Java e inseridos dentro de repositórios de agentes chamados de containers, que provêm todo o suporte para a execução do agente e representam o ambiente de execução das aplicações de agentes. O conjunto de todos os containers é chamado de plataforma (BELLIFEMINE et al., 2017), a qual provê uma camada homogênea que encapsula

para os agentes, bem como para os desenvolvedores de aplicações, a complexidade e a diversidade de características, tais quais: hardware, sistemas operacionais, tipos de redes ou JVMs.

Sistemas baseados em agentes possuem intrinsecamente uma arquitetura peer-to-peer, onde cada agente é um software executando em um nó da rede. Os agentes necessitam iniciar comunicação com outros agentes, sendo capazes de prover serviços a eles. Isso torna o papel da comunicação em sistemas baseados em agentes muito importante.

O modelo de comunicação em JADE é fundamentado em três características principais (BELLIFEMINE et al., 2017):

- Agentes são entidades ativas, elas podem responder “não” e são fracamente acopladas. O grau de dependência entre os agentes é minimizado porque a plataforma permite que o agente escolha, de modo flexível, os destinatários das mensagens que deseja enviar. Além do mais, cada agente decide que mensagens ele quer interpretar ou descartar, também podendo, por exemplo, controlar o seu ciclo de execução para aguardar respostas para as mensagens que enviou.
- Agentes realizam ações e a comunicação é considerada como apenas mais um tipo de ação. Isso quer dizer que os agentes tanto podem realizar ações físicas quanto ações comunicativas e, com respeito a essas ações, também é possível ter o planejamento da comunicação. Tornar possível este planejamento traz à tona a necessidade de definir claramente efeitos e pré-condições associados a cada comunicação possível.
- A comunicação traz consigo um significado semântico. Quando determinado agente é objeto de uma ação comunicativa, recebendo uma mensagem, ele deve ser capaz de compreender o significado desta ação e qual a intenção comunicativa do agente que enviou a mensagem. Por isso, existe a necessidade de uma semântica universal e a necessidade de um padrão de comunicação.

Para Silva (2005), na comunicação entre agentes na plataforma JADE, os agentes se comunicam enviando mensagens individuais uns para os outros através de passagem assíncrona (enviando em qualquer ordem, cabendo ao receptor interpretar e organizar a informação) de mensagens ACL. Os agentes interpretam as mensagens como atos de fala (AUSTIN, 1962), e não como chamadas, bem como JADE codifica as mensagens trocadas pelos agentes de forma transparente para o desenvolvedor. O padrão FIPA define que somente mensagens ACL são transportadas na plataforma, porém não define nenhum padrão para o conteúdo das mensagens.

Para que um agente envie mensagens a outros, o desenvolvedor deve instanciar um objeto da classe *ACLMessage*, preencher a mensagem com as informações necessárias em cada campo correspondente e chamar o método *send()* da classe *Agent*. Quando o agente quiser receber as mensagens, deve chamar o método *receive()* ou *blockingReceive()* da classe *Agent*.

Outra maneira de enviar ou receber mensagens em JADE é através do uso das classes de comportamentos próprios para ações comunicativas: *SenderBehaviour* e *ReceiveBehaviour*. O uso dessas duas classes torna possível que as trocas de mensagens possam ser escalonadas como atividades independentes (SILVA, 2005).

Portanto, este capítulo abordou algumas teorias de evasão de multidões, comportamento de multidões, sistemas multiagentes, sistemas complexos e uso do *framework* JADE para desenvolvimento de SMA. A seguir, no terceiro capítulo, será tratada a metodologia do presente trabalho, evidenciando as bases de testes e validação, como o sistema multiagente é capaz de simular evasão de ambientes em situação de emergência e descrevendo suas características, além de apresentar sua representação do espaço (ou seja, características de tamanho do ambiente e planta baixa), obstáculos e agente (pessoa), como o agente se movimenta e é calculado o tempo, dentre outros.

## Capítulo 3

### Desenvolvimento

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para a criação do simulador para evasão de ambientes. Na primeira seção, apresenta-se o simulador, o comportamento estático de cada agente e suas características, a definição da linguagem de programação e o *framework*. Em seguida, são descritos os métodos e funcionalidades da dinâmica da simulação, a construção e as particularidades do ambiente, como o agente se move e algoritmos relacionados.

#### 3.1 Sistema Multiagente para simular evasão de ambientes em situação de emergência

O processo de construção de um modelo baseado em agentes inicia-se com a criação de um modelo conceitual em que os requisitos básicos são identificados. Após a definição dos agentes, o próximo passo é especificar o comportamento deles. Pode-se começar com um comportamento genérico e, de forma gradativa, os ajustes poderão ser realizados para tornar o comportamento do agente mais aderente à realidade (MACAL; NORTH, 2009).

Neste trabalho foi utilizada a linguagem de programação Java (SUN, 2011) e, de forma simplificada, o *framework* JADE. Conforme dito na seção anterior, os mecanismos de comunicação e protocolos existentes no JADE ajudaram e facilitaram a construção, a execução e o controle das simulações realizadas neste trabalho.

O *software* desenvolvido para este trabalho será denominado aqui apenas por simulador. A pessoa é o agente do simulador. A pessoa tem a tarefa de sair do ambiente, depois de se iniciar uma situação de emergência (um incêndio, por exemplo), no menor tempo possível. Cada agente se desloca até a porta de saída da

sala atual e, ao acessar a próxima sala, continua o movimento saindo de porta em porta até a evasão total do ambiente.

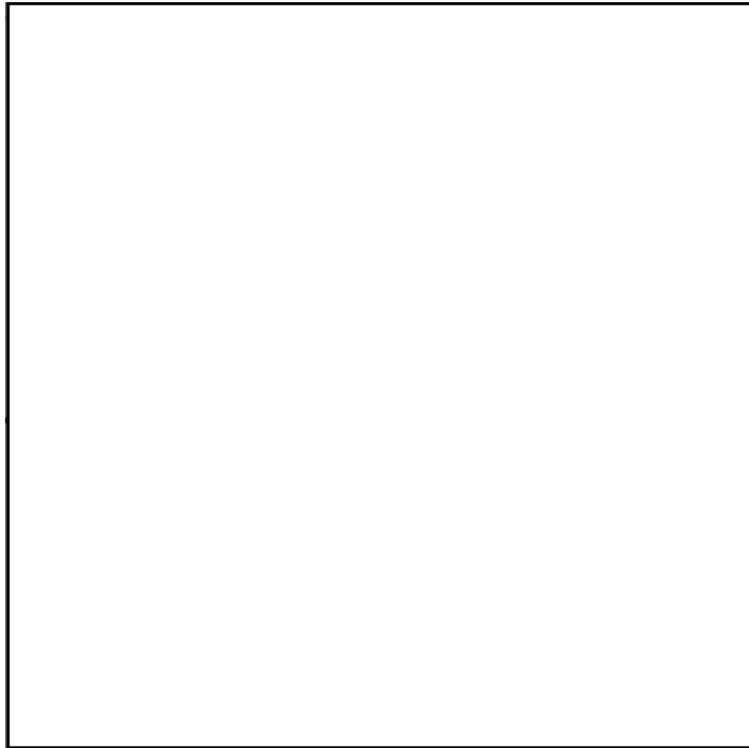
### **3.2 Representação do espaço e construção do ambiente**

O simulador exibe, na sua interface, a planta baixa do imóvel que será realizada a simulação de movimentação de pessoas, com uma visão de cima dessa planta. No simulador cada pixel da imagem da tela equivale sempre à uma área de 10 x 10 cm no mundo real. Os ambientes são apresentados em uma vista de topo. Nas simulações são considerados quatro elementos: os obstáculos (paredes), a área livre para movimentação, as saídas e os agentes. Todas portas do ambiente terão largura de 9 pixels (90 cm) e cada parede 1 pixel (10 cm).

Cada obstáculo (parede), área livre, porta ou agente possui uma localização compreendida pelos pontos cartesianos x,y (latitude, longitude) dentro da interface do *software*. E são facilmente visualizados respectivamente pelas cores preta (parede), branca (área de circulação), laranja (portas das salas intermediárias), verde (porta de saída final do ambiente) e azul ou vermelho (pessoas). Para o modelo proposto, depois que se inicia a simulação, não está sendo considerada a possibilidade de uma nova obstrução do caminho durante a caminhada do agente.

O simulador, antes de iniciar a simulação propriamente dita, ou seja, a movimentação dos agentes, ele plota na interface as paredes de cada sala, portas e os agentes. A área simulada é convertida em uma grade bidimensional de pixels. Para criar cada parede, é necessário informar: posição x, posição y, largura e altura. Com esses dados, através da função *drawRect* do Java, a parede (que se trata de uma figura retangular) é plotada na interface do *software*. De forma similar, as portas também são plotadas na interface utilizando a função *drawRect* e sendo necessários os mesmos parâmetros da parede. Enquanto as paredes possuem a cor preta, as portas são criadas com a cor laranja. A Figura 3.1 ilustra a plotagem de como fica o ambiente depois de plotarmos as paredes e porta.

Figura 3.1 – Plotando as paredes e porta



Fonte: Autor, 2019.

Para a parede da esquerda, por exemplo, o *software* chama o método *drawRect* passando os seguintes parâmetros:

```
drawRect(1, 1, 2, 150);
```

```
setColor(Color.BLACK);
```

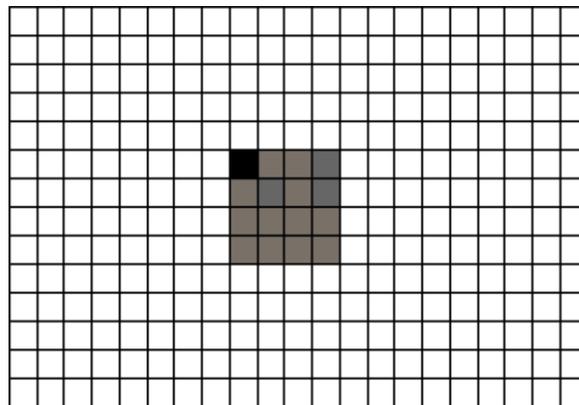
Os parâmetros 1, 1, 2 e 150 referem-se, respectivamente, à posição x inicial do retângulo no ambiente (interface do *software*), posição y inicial, largura e altura. A função *setColor* é utilizada para definir a cor do retângulo. Usando outros parâmetros, as outras 3 paredes são plotadas na interface do programa de forma similar. E, por último, a porta é plotada na parede da direita com a cor laranja.

### 3.3 Agentes

Cada agente que está dentro do ambiente estudado possui uma referência no espaço que indica onde ele está localizado em determinado instante no cenário de simulação. Assim como as paredes, área livres e portas, uma localização do agente no simulador será compreendida pela combinação dos dois pontos cartesianos x, y (latitude, longitude) dentro da grade bidimensional.

A Figura 3.2 ilustra os pixels ocupados por um agente. Cada agente ocupará sempre a área de 4 x 4 pixels (16 pixels) e, convertendo para unidade de medida, cada pessoa ocupa 0,16 m<sup>2</sup>. Essa dimensão é compatível com o tamanho médio de uma pessoa adulta (STILL, 2000). Nota-se que na Figura 3.2 a localização do agente (pixel referência) é destacada pela cor preta e a sua área total equivale a, vista do topo, 4 pixels à leste e mais 4 pixels para o sul incluindo esse ponto com o tom cinza.

Figura 3.2 – Posição no plano cartesiano e pixels ocupados pelo agente



Fonte: Autor, 2019.

O simulador utiliza a função *fillOval* do Java para plotar o agente na interface do *software*. Para o agente da Figura 3.2, por exemplo, o *software* chama o método *fillOval* passando os seguintes parâmetros:

```
fillOval(14, 10, 4, 4);  
setColor(Color.GREEN);
```

Os parâmetros 14, 10, 4 e 4 referem-se, respectivamente, à posição x do objeto no ambiente (interface do *software*), posição y no ambiente, largura e altura do objeto. A função *setColor* é utilizada para definir a cor do objeto.

O posicionamento inicial dos agentes pode ser determinístico, aleatório ou a mistura dos dois. Quando a escolha é pelo método aleatório, utilizamos o comando *Random* do Java. Cada agente é posicionado dentro do ambiente (interface do *software*) atribuindo uma posição inicial com coordenadas x e y. Ao longo da simulação, cada agente se move alterando seu posicionamento momentâneo. A porta, considerada aqui como posição objetiva, possui também coordenadas x, y. O agente tem o objetivo de se deslocar da sua posição atual até essa posição objetivo.

Será também atribuído para cada agente uma velocidade normal de movimentação para ele, que poderá também ser aleatória ou determinística. Cucci Neto (2000) realizou observações experimentais durante a travessia de pistas objetivando levantar velocidades de caminhada de acordo com a idade, gênero e outros. Para este trabalho, baseado nesses experimentos, iremos usar as seguintes velocidades iniciais para os agentes: 0 (quando o agente tiver parado), 1,3, 1,4, 1,5 ou 1,7 m/s. Para definir a velocidade para cada agente, quando aleatória, também será usado a função *Random* do Java. Assim sendo, cada agente, até o presente momento, possui: seu posicionamento inicial, a localização objetivo e uma velocidade normal de movimentação.

Figura 3.3 – Objeto Pessoa herdando classe *Agent* do JADE

```
public class Pessoa extends Agent {  
    int id;  
    int Posicao_x;  
    int Posicao_y;  
}
```

Fonte: Autor, 2019.

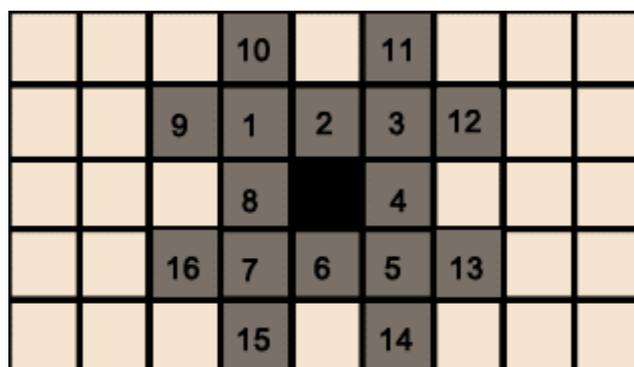
Para que um objeto Java se torna um agente, basta herdar a classe *Agent* do JADE, isso pode ser visto na Figura 3.3. Essa simplicidade é outra vantagem considerável

do uso do *framework* JADE. A partir desse momento, todas as comunicações entre os agentes poderão, também, ser monitoradas pela interface gráfica do JADE.

### 3.4 A movimentação

O movimento do agente ocorre dentro de um *loop* (método de repetição). Esse loop é iniciado junto com a simulação e é executado até que o agente saia do ambiente. A cada *loop*, o agente se movimenta, pixel a pixel, ocupando sempre 4 pixels horizontalmente e 4 pixels verticalmente pelo ambiente e cada agente terá sua velocidade.

Figura 3.4 – Opções de movimentação do agente



Fonte: Autor, 2019.

O agente poderá movimentar-se, pixel a pixel, em dezesseis direções conforme Figura 3.4. Para se mover para o pixel 2, 4, 6 ou 8 é realizado um movimento linear (horizontal ou vertical), para o pixel 1, 3, 5 ou 7 é um movimento diagonal (45°) e, por último, movendo para o pixel 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 ou 16 é realizado um deslocamento a 22,5°. Antes de cada movimento, o agente verifica a posição da porta da sala e calcula qual das 16 posições da imagem abaixo terá menor distância até essa porta. De acordo com o retorno, ele se movimenta, caso os 16 pixels que o agente pretende ocupar não tenha outro agente, 1 pixel para uma dessas 16 posições. O Algoritmo 1 mostra um trecho de como é definida a direção que o agente deverá se mover. Para o modelo proposto, não está sendo considerada a possibilidade de uma nova obstrução do caminho durante a caminhada do agente.

## Algoritmo 1 – Tomador de decisão da direção

### Definição da direção que se moverá

Para cada agente:

```
Calcula distância da porta até a posição 1.
Caso distância seja menor que todas as outras e não haja outro agente
ocupando os 16 pixels que se pretende ir:
  Mover diagonalmente para a posição 1.

  Delta_time = distância / velocidade.

  Distância que deverá percorrer = distância x tamanho do pixel em
  metros.

Calcula distância da porta até a posição 2.
Caso distância seja menor que todas as outras e não haja outro agente
ocupando os 16 pixels que se pretende ir:
  Mover verticalmente para a posição 2.

  Delta_time = distância / velocidade.

  Distância que deverá percorrer = distância x tamanho do pixel em
  metros.

...

Calcula distância da porta até a posição 16.
Caso distância seja menor que todas as outras e não haja outro agente
ocupando os 16 pixels que se pretende ir:
  Mover a 22,5° para a posição 16.

  Delta_time = distância / velocidade.

  Distância que deverá percorrer = distância x tamanho do pixel em
  metros.
```

Fonte: Autor, 2019.

Cada agente estará associado a um Delta\_time, definido como o tempo que o agente precisa para percorrer da posição atual até umas das 16 células da Figura 3.4 e é calculado de acordo com a velocidade normal de movimentação e a posição que irá se mover. O Algoritmo 2 mostra como é feito o cálculo.

## Algoritmo 2 – Cálculo do Delta\_time

### Cálculo do Delta\_time

Para cada movimento de um agente:

Calcula distância da posição atual até a posição que se pretende mover.

Delta\_time = distância / velocidade.

Fonte: Autor, 2019.

De acordo com a velocidade, o agente percorrerá um número específico de pixels. Como exemplo, uma pessoa com a velocidade de 1 m/s, movendo horizontalmente ou verticalmente, percorrerá, a cada segundo, 10 pixels (lembrando que cada pixel equivale à uma área 0,10 x 0,10 m). Como todos os objetos estão sobre um plano cartesiano, para calcular a distância percorrida por cada agente pixel a pixel, utiliza-se a fórmula abaixo baseada no Teorema de Pitágoras:

$$d(A, B) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Essa fórmula é aplicada para movimento em qualquer uma das 16 posições possíveis de deslocamento.

### 3.5 Os Laços

Cada agente refere-se, de acordo com uma linguagem orientada à objetos, à um objeto com atributos (características) e métodos (funções que ele realizará). Cada agente possuirá os seguintes atributos:

- Id – identificador numérico do agente
- Posição inicial x no ambiente
- Posição inicial y no ambiente
- Posição momentânea x no ambiente
- Posição momentânea y no ambiente
- Velocidade normal de movimentação

- Distância percorrida
- Tempo total de evasão

Para conseguir que o simulador tenha o comportamento baseado em um sistema multiagente, principalmente no que respeita à cada agente ter atributos (velocidade, posição, escolha da direção que irá se mover e outros) e comportamentos diferentes sem depender da interferência externa ou controle central, é criada uma *thread* para cada agente. *Threads* permitem que múltiplas execuções ocorram no mesmo ambiente do aplicativo com um grande grau de independência uma da outra, portanto, se temos muitas *threads* executando em paralelo no sistema é análogo a múltiplos aplicativos executando em paralelo em um computador. O objetivo do uso da *thread* é iniciar o movimento de todos os agentes ao mesmo tempo e de forma independente. O Algoritmo 3 ilustra como são criadas e iniciadas as *threads*.

### Algoritmo 3 – Criação das *threads*

#### **Criação de *threads***

```

Percorrer lista de todos agentes criados:
  Criar thread[id do agente] que fará:
    Enquanto o agente não tiver evadido:
      Mover agente.

      Tempo total de evasão = Tempo total de evasão + Delta_time.

      Distância percorrida = Distância percorrida + Distância que
      deverá percorrer.

Percorrer lista de todos agentes criados:
  Inicia a thread[id do agente].

```

Fonte: Autor, 2019.

As *threads* são criadas uma a uma e, para garantir certo processamento simultâneo na movimentação de todos os agentes, todas as *threads* são iniciadas no mesmo tempo e executam em paralelo (simultaneamente). Perceba também que há *loop* para movimentar o agente até que o mesmo saia do ambiente. E, enquanto o agente não

tenha concluído e evasão total do ambiente, a cada *loop*, o tempo de evasão e a distância percorrida são incrementados.

O simulador contabiliza o tempo de movimentação de cada agente em segundos. Essa unidade de tempo funciona como um índice temporal para a execução das ações agendadas no simulador. E, como dito anteriormente, cada agente tem, individualmente, uma velocidade definida no início da simulação e seu tempo total de evasão é contabilizado desde o início da simulação até a saída total do ambiente. Como é criada uma *thread* para cada agente, ela contabiliza o tempo de movimentação e distância percorrida de forma independente.

Como falado anteriormente, cada vez que executa o *loop* (laço de repetição) de um agente e de acordo com a posição momentânea dele e a posição do seu objetivo, ele se move para uma direção específica. Então, a cada *loop*, uma variável contabiliza a distância total percorrida somando a distância já percorrida com a nova distância que deverá percorrer.

De forma similar à distância, o tempo total de movimentação de cada agente é incrementado também a cada *loop* (laço de repetição). Como pode-se perceber, uma outra variável incrementa ao tempo total de movimentação do agente, a cada *loop*, o tempo necessário para cada movimento retornado pelo método descrito acima.

Como sabemos, cada agente possui sua posição instantânea através das coordenadas x e y e se movimenta até seu objetivo, também representado por coordenadas x e y. E o objetivo de cada agente é sair do ambiente, ou seja, passar por esse objetivo (entende-se aqui como uma porta de saída). No modelo proposto e como ilustrado na Figura 3.1, uma porta de saída só poderá estar localizada em parede superior, inferior, à esquerda ou à direita (visão do topo da planta). Seguindo essa premissa, considera-se que um agente evadiu do ambiente quando:

- Porta situada na parede direita da sala – quando a posição x do agente for maior que a posição x da porta e sua posição y do agente esteja entre a posição y da porta e sua largura.

- Porta situada na parede inferior da sala – quando a posição x do agente estiver entre a posição x da porta e sua largura e a posição y do agente seja maior que a posição y da porta.
- Porta situada na parede esquerda da sala – quando a posição x do agente for menor que a posição x da porta e sua posição y do agente esteja entre a posição y da porta e sua largura.
- Porta situada na parede superior da sala – quando a posição x do agente estiver entre a posição x da porta e sua largura e a posição y do agente seja menor que a posição y da porta.

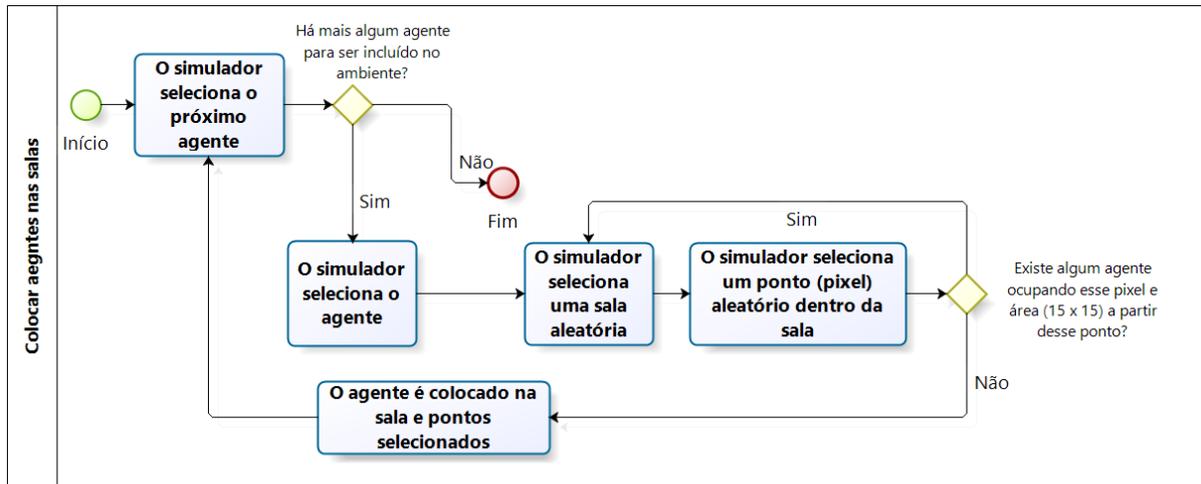
Quando o agente atinge uma das posições acima, considera-se que o mesmo evadiu da sala que está atualmente. Como cada porta tem a largura de 90 cm (9 pixels) e cada agente tem a largura de 40 cm (4 pixels), o modelo permite que o agente saia em um dos dois extremos da porta. Assim, tendo como exemplo uma porta no lado direito da sala e sua posição inicial (x,y) seja (20,10), o agente irá se deslocar até a porta e escolherá a seguinte posição para passar por ela:

- Caso a posição y do agente seja menor ou igual a 14, ele irá passar pela porta na posição da posição (20,10) até a posição (20,13) (4 pixels de largura).
- Caso a posição y do agente seja maior 14, ele irá passar pela porta na posição da posição (20,15) até a posição (20,18) (4 pixels de largura).

### **3.6 Colocando pessoas no ambiente**

A geração dos agentes é realizada a partir das configurações iniciais feitas na interface do simulador. Antes de iniciar o simulador, o usuário configura na interface da aplicação os seguintes valores: jovens que sabem a rota de saída, jovens que não sabem a rota de saída, idosos que sabem a rota de saída e idosos que não sabem a rota de saída. A distribuição dos agentes nas salas do ambiente é feita de forma aleatória. Depois de ser definido o número de agentes, o simulador segue o fluxo da Figura 3.5.

Figura 3.5 – Fluxo de distribuição dos agentes



Fonte: Autor, 2019.

O método aleatório é utilizado para selecionar tanto a sala quanto para selecionar o ponto (pixel) dentro da sala que ficará cada agente é o *Random* genuíno do Java. Depois de escolher aleatoriamente a sala e suas informações de posição e área dentro do ambiente, o simulador irá definir, também de maneira randômica, um ponto dentro dessa mesma sala como posição inicial do agente.

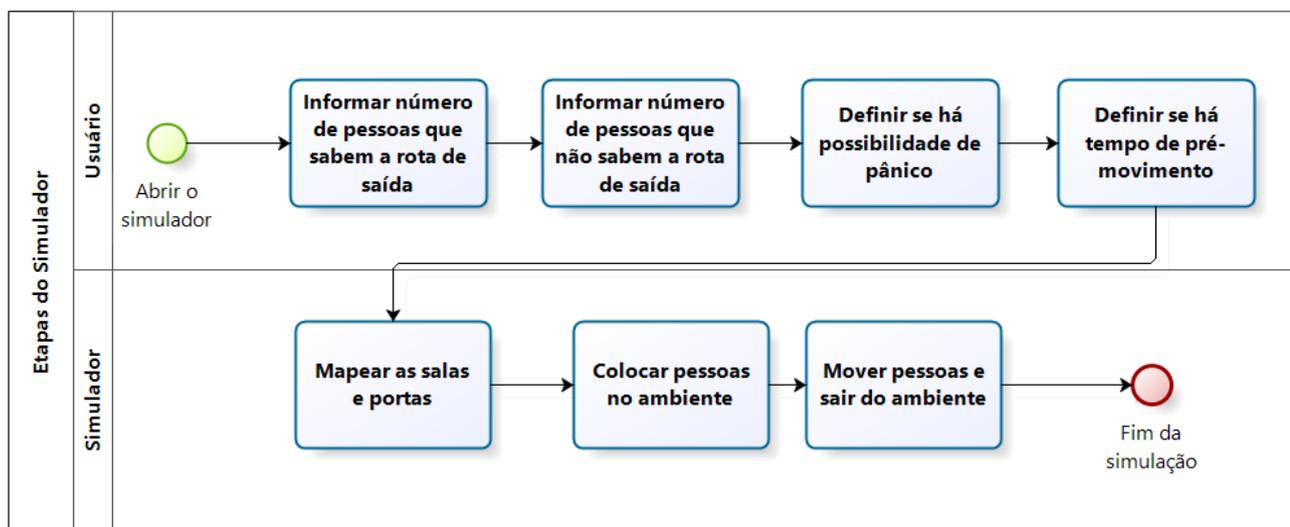
O comportamento do agente (pessoa) dentro do ambiente (espaço) é definido de acordo com os parâmetros informados na interface do simulador, ou seja, uma vez definidos, esses atributos seguirão inalterados até a finalização da simulação. Antes de iniciar a simulação propriamente dita, ou seja, no momento que cada agente estiver sendo incluído na planta do ambiente, cada pessoa terá como atributo: id (identificador numérico), velocidade, posição inicial e se sabe o local de saída.

### 3.7 Etapas da simulação

Baseado em uma situação real, como por exemplo um incêndio, o início da simulação ocorre quando há o disparo da sirene de emergência. Antes de iniciar nosso simulador computacional, a primeira ação realizada foi definir o número de pessoas e seus perfis para ocupar o ambiente que se deseja simular, ou seja, informou-se o número de pessoas que sabem ou não a rota de fuga, se há possibilidades de pessoas entrarem em pânico e se teremos tempo de pré-movimento. Depois disso, o simulador mapeia

as salas, coloca as pessoas no ambiente e elas começam a se movimentar até as portas de saída do ambiente. A Figura 3.6 resume as ações aplicadas pelo simulador.

Figura 3.6 – Etapas do simulador



Fonte: Autor, 2019.

Ao se definir o número de pessoas, o simulador atribui:

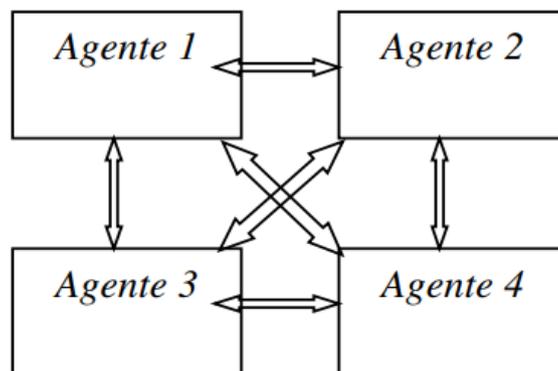
- Uma velocidade aleatória (1,3, 1,4, 1,5 ou 1,7 m/s) usando o método *Random* do Java para quem sabe a rota de saída.
- A velocidade 1,0 m/s para quem não sabe a rota de saída.

### 3.8 Interação entre os agentes

A interação entre agentes ou entre agente/ambiente pode ser explicada como uma troca informações, que pode acontecer de modo direto (comunicação explícita) ou de forma indireta (emissão de sinais através do ambiente). Um agente envia uma determinada mensagem em um momento e de acordo com um certo objetivo ou contexto. Nessa linha, é interessante que as mensagens sejam interpretadas de acordo com o contexto em que são enviadas ou recebidas. No simulador proposto, cada pessoa poderá trocar informação com outra de modo direto (Figura 3.7), onde

cada agente comunica diretamente com qualquer outro agente sem qualquer intermediário. A informação a ser compartilhada entre os agentes é a rota de fuga.

Figura 3.7 – Comunicação direta entre agentes



Fonte: Autor, 2019.

Na codificação do simulador construído em Java, a troca de mensagem ocorrerá por meio de métodos próprios do *framework* JADE e com o uso de instâncias da classe *ACLMessage*. Assim, um agente que pretenda enviar uma mensagem deve instanciar um objeto da classe *ACLMessage*, preenchê-los com as informações necessárias e chamar o método *send()* da classe *Agent*. Caso for receber mensagens, o método *receive()* ou *blockingReceive()* da classe *Agent* deve ser chamado. Um ponto positivo da interface do JADE é que ela permite o monitoramento das interações entre os agentes e esse foi um dos motivos da escolha desse *framework*. Havia a possibilidade de se usar apenas a comunicação direta entre os objetos apenas pela linguagem Java, ou seja, trocando valores de variáveis, mas a facilidade do uso do *framework* e a possibilidade de monitorar a comunicação em uma interface fora do Java foram elementos motivadores para a escolha do JADE.

Um agente que sabe da rota de fuga passará essa informação (via método JADE) quando algum outro estiver a menos de 2 metros, ou seja, o agente enviará a mensagem contendo a rota de saída. Esse parâmetro de 2 metros pode ser ajustado a cada nova simulação ou necessidade. Como dito anteriormente, a rota de saída trata-se da posição de cada porta da sala e qual a próxima sala que deve seguir ao sair de cada uma (de acordo com a localização).

Como dito anteriormente, os agentes que não sabem a rota de saída possuem velocidades iniciais de 1,0 m/s. Ao receber a informação com a rota de fuga, cada agente irá receber aleatoriamente, uma nova velocidade conforme detalhado na Seção 3.7.

### **3.9 Saída total do ambiente**

Em um sistema multiagente, cada agente tem ações e/ou objetivos que ele pode realizar. Na simulação proposta neste trabalho, esperou-se que cada agente conseguisse sair do ambiente (espaço) no menor tempo possível e com uma rota de menor custo ocasionada pela interação e troca de informações entre os agentes através do JADE.

Como se sabe, antes do início das simulações, o simulador cria o ambiente, as salas com suas portas e a porta de saída final do ambiente (evasão realizada), podendo, inclusive, ter mais de uma saída final para o mesmo ambiente ou saídas intermediárias. Cada saída final corresponderá, do mesmo modo que as saídas intermediárias das salas, a uma ou mais células. Quando uma pessoa chegar até uma dessas células da porta final, considera-se que esse agente conseguiu cumprir sua tarefa e evadiu-se do ambiente. Assim como em outras, nessa simulação de evasão de um ambiente confinado, o objetivo final é que todas as pessoas consigam evadir desse espaço.

# Capítulo 4

## Verificação e Validação

### 4.1 Fundamentação

Segundo RONCHI et al. (2013), a verificação e validação do modelo e sua implementação são fatores essenciais para se determinar a confiabilidade dos resultados produzidos por simulações. Quando falamos de prevenção de incêndios, a verificação é definida como sendo “o processo de determinar que a implementação do método de cálculo representa com precisão a descrição conceitual do desenvolvedor do método de cálculo e a solução para o método de cálculo”, e validação como sendo “o processo de determinar o grau em que um método de cálculo é uma representação precisa do mundo real a partir da perspectiva das utilizações previstas para o método de cálculo” (ISO, 2008)<sup>5</sup>.

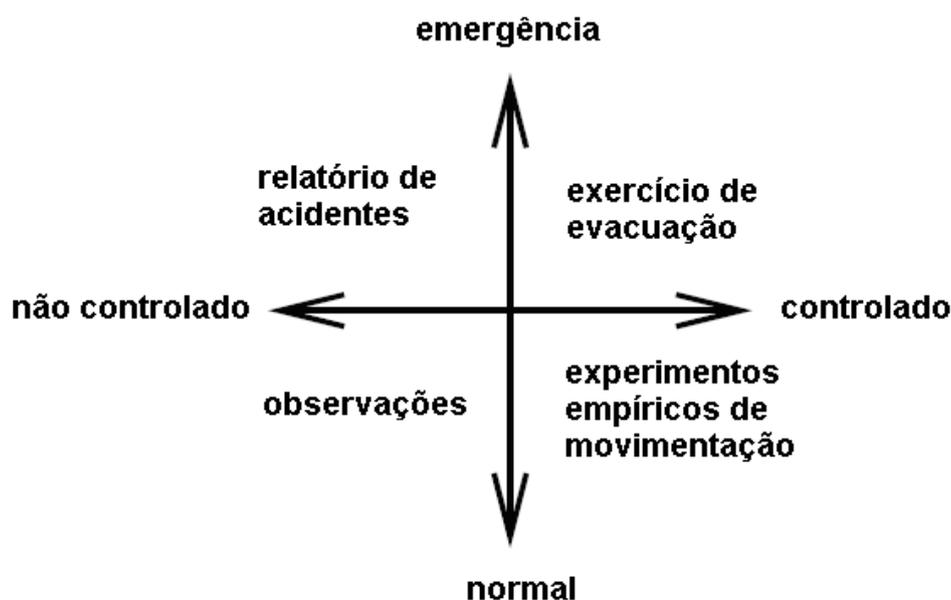
Há certa dificuldade em verificar e validar dados de simulações comparando com situações reais, apesar do alto valor intrínseco, é muito complexo de ser realizado. Dessa forma, muitas validações são feitas com dados obtidos ou de situações de normalidade ou de exercícios de evasões (OLSSON; REGAN, 2001; KO et al., 2007; SCHADSCHNEIDER et al., 2009; IBRAHIM et al., 2019). Alguns sistemas computacionais foram desenvolvidos para facilitar estas análises (JACQUES JUNIOR et al., 2010; ZHANG; SEYFRIED, 2014). É de grande relevância estas comparações e dados obtidos, entretanto o comportamento humano em simulações de treinamento

---

<sup>5</sup> Traduções livres.

são bem diferente quando se comparados com uma situação real (Figura 4.1), além de poderem gerar variabilidade nos resultados devida à falta, ou dificuldade, de padronização.

Figura 4.1 – Classificação esquemática dos dados de diversos processos de evasão.



Fonte: adaptado de Schadschneider et al. (2009).

Além do mais, muitos autores utilizam alguns modelos de outros pesquisadores que já possuem estudos bem estabelecidos para comparação (SCHADSCHNEIDER et al., 2009; BRAGA, 2012). Mas é bem provável que ocorra certa divergência entre as modelagens e a razão destas variações não é de fácil identificação, já que muitos modelos possuem pontos específicos e, geralmente, não muito claros na sua configuração (ROGSCH et al., 2009).

Para esse trabalho, a verificação e a validação do modelo desenvolvido são realizadas por meio de algumas simulações. Foram realizados alguns ensaios padronizados para se analisar o efetivo comportamento dos algoritmos, pela comparação com resultados de simulações fornecidas na literatura para outros modelos.

## 4.2 Ensaio

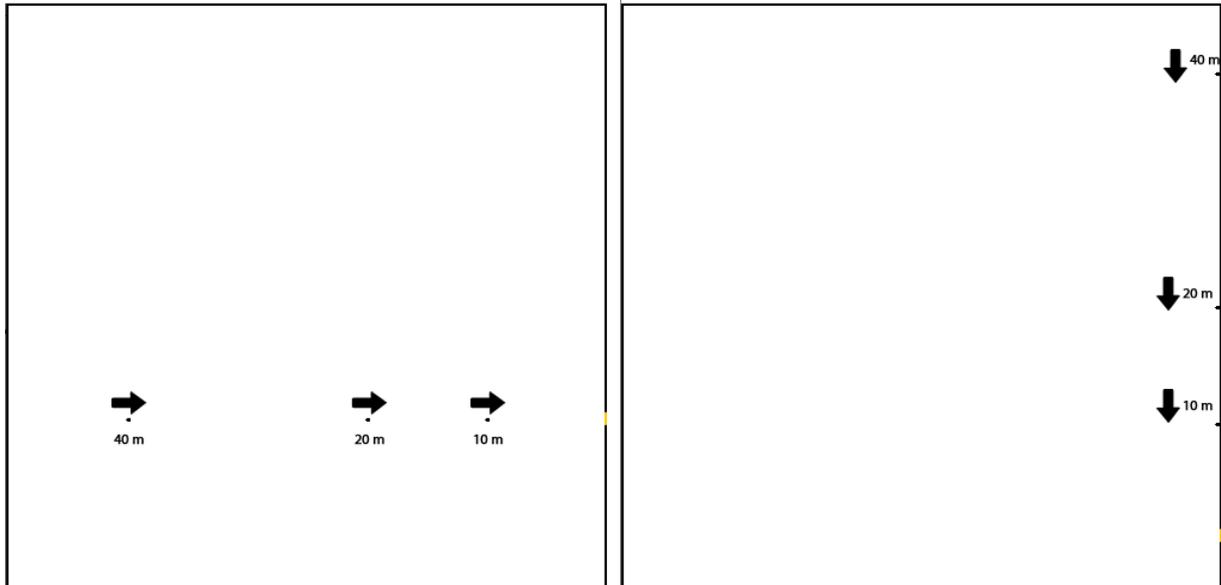
### 4.2.1 Velocidade Fixa Linear

Para a validação de modelos criados, faz-se necessário realização de alguns ensaios. Alguns ensaios são mais simples, entretanto não menos importante para testar e aferir seu modelo. O primeiro teste tem o objetivo de verificar se a velocidade linear de deslocamento especificada é igual à velocidade efetivamente calculada em uma simulação e a distância realmente percorrida pelo agente da sua posição inicial até a porta de saída. O cálculo da velocidade efetiva é realizado pela razão entre a distância percorrida em linha reta por um único agente até a saída e o tempo total transcorrido, fornecido pela simulação, para que esse agente abandone o ambiente.

Inicialmente, serão consideradas dois deslocamentos: uma linha reta no ambiente cuja rota ideal de deslocamento também se comporta como linha reta no ambiente movendo, considerando uma visão de cima, da esquerda para direita (movimento horizontal) e outra simulação sendo também uma linha reta no ambiente onde o agente se move de cima para baixo (movimento vertical). No movimento horizontal somente se altera a posição da coluna do agente, enquanto no movimento vertical se altera a altura até que o agente esteja na mesma altura da porta de saída e, uma vez estando, ele se moverá horizontalmente para sair do ambiente. Para isso, um agente sozinho em uma sala e sem obstruções internas (para se evitar a influência de outros agentes ou obstáculos fixos) de 50 m de largura e 50 m de comprimento vai se deslocar até a saída. São realizadas simulações com os agentes estando a uma distância da saída de 10 m, 20 m e 40 m da saída.

A velocidade de deslocamento do agente foi previamente especificada antes de cada simulação, sendo mantida fixa ao longo da mesma. Foram realizadas simulações com as velocidades de deslocamento de 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s. Na Figura 4.2 está a representação da sala e na Tabela 4.1 os resultados encontrados.

Figura 4.2 – Representação dos agentes (em preto) posicionados a diversas distâncias da saída (em laranja) em uma sala de 50 m de largura e 50 m de comprimento.



Fonte: Autor, 2019.

Os resultados da Tabela 4.1 indicam que não há erro no cálculo da velocidade na movimentação em linha reta. Assim sendo, considerando a distância percorrida em relação ao tempo, teremos o valor exato da velocidade configurada inicialmente para cada agente. Percebe-se que cada agente percorre, além da distância inicial que ele estava da porta, 0,1 m. Isso ocorre porque considera-se evasão do ambiente depois que o agente faz toda a transposição da porta, ou seja, ele percorre, por exemplo, 40 m até a porta e mais 0,1 m para estar totalmente fora do ambiente. Outro ponto importante é que não há aparecimento de erro, analisando aqui só a velocidade, com a variação da distância.

Tabela 4.1 – Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após a simulação de abandono dos ambientes da Figura 4.2

### Distância e tempo total - deslocamento horizontal

Velocidade (m/s)	Distância inicial da porta (m)								
	10		Tempo de evasão ideal	20			40		
	Distância percorrida	Tempo de evasão		Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal
0,5	10,1	20,2	20,2	20,1	40,2	40,2	40,1	80,2	80,2
1,0	10,1	10,1	10,1	20,1	20,1	20,1	40,1	40,1	40,1
1,5	10,1	6,73	6,73	20,1	13,4	13,4	40,1	26,73	26,73
2,0	10,1	5,05	5,05	20,1	10,05	10,05	40,1	20,05	20,05

### Distância e tempo total - deslocamento vertical

Velocidade (m/s)	Distância inicial da porta (m)								
	10		Tempo de evasão ideal	20			40		
	Distância percorrida	Tempo de evasão		Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal
0,5	10,1	20,2	20,2	20,1	40,2	40,2	40,1	80,2	80,2
1,0	10,1	10,1	10,1	20,1	20,1	20,1	40,1	40,1	40,1
1,5	10,1	6,73	6,73	20,1	13,4	13,4	40,1	26,73	26,73
2,0	10,1	5,05	5,05	20,1	10,05	10,05	40,1	20,05	20,05

Fonte: Autor, 2019.

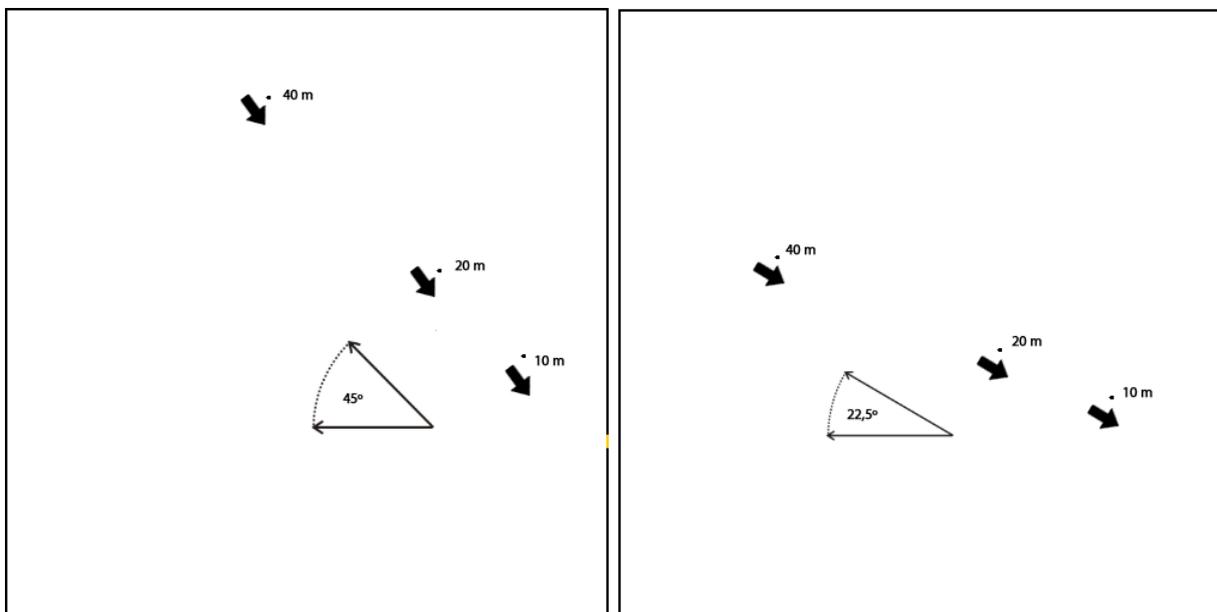
#### 4.2.2 Velocidade Fixa Angular

Depois de realizar ensaios com movimentos horizontais e verticais, torna-se agora necessário a verificação do erro da velocidade e distância percorrida também considerando uma movimentação de uma posição angular (considerando a localização inicial do agente e a porta). Esse é um teste importante para se verificar o efeito causado pelo posicionamento do agente sobre o ambiente.

Para isso, um agente sozinho em um ambiente na forma de um quadrado de 2500 m<sup>2</sup> de área e sem obstruções internas vai se deslocar até a saída. A saída do ambiente está posicionada em uma das paredes. O agente estará sempre posicionado sobre a diagonal do quadrado que passa pela saída (45°), ou sobre a semi-diagonal (22,5°). São realizadas simulações com os agentes estando a uma distância da saída de 10

m, 20 m, 40 m (para ambas as inclinações). Como feito anteriormente, a velocidade de deslocamento do agente também foi previamente estabelecida, sendo mantida fixa ao longo de cada simulação, com as velocidades de deslocamento de 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s. Na Figura 4.3 está a representação do ambiente e na Tabela 4.2 os resultados encontrados.

Figura 4.3 – Representação dos agentes (em preto) posicionados a diversas distâncias da saída (em laranja) sobre a diagonal do ambiente (à esquerda), ou a  $22,5^\circ$  no ambiente (à direita), em salão quadrado com  $2500 \text{ m}^2$  de área.



Fonte: Autor, 2019.

Tabela 4.2 – Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após a simulação de abandono do ambiente da Figura 4.3

**Distância e tempo total - posição inicial em relação à porta => 45°**

Velocidade (m/s)	Distância inicial da porta (m)								
	10			20			40		
	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal
0,5	10,38	20,75	20,2	20,27	40,55	40,2	40,36	80,71	80,2
1,0	10,38	10,38	10,1	20,27	20,27	20,1	40,36	40,36	40,1
1,5	10,38	6,92	6,73	20,27	13,52	13,4	40,36	26,9	26,73
2,0	10,38	5,19	5,05	20,27	10,14	10,05	40,36	20,18	20,05

**Distância e tempo total - posição inicial em relação à porta => 22,5°**

Velocidade (m/s)	Distância inicial da porta (m)								
	10			20			40		
	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal
0,5	10,87	21,75	20,2	21,79	43,58	40,2	43,44	86,87	80,2
1,0	10,87	10,87	10,1	21,79	21,79	20,1	43,44	43,44	40,1
1,5	10,87	7,25	6,73	21,79	14,53	13,4	43,44	28,96	26,73
2,0	10,87	5,44	5,05	21,79	10,89	10,05	43,44	21,72	20,05

Fonte: Autor, 2019.

Assim como ocorre nos movimentos horizontais e verticais, esses resultados da Tabela 4.2 indicam que não há erro no cálculo da velocidade levando em consideração o quociente da divisão entre distância percorrida e o tempo total de deslocamento. Levando em consideração a distância entre a posição inicial do agente e a porta, o agente percorre uma distância maior nas angulações de 45° e 22,5°. Posicionado à 45°, no pior caso (distância de 10 m), o agente percorre 3,8% à mais (10,38 m), e no melhor caso (distância de 40 m), o a distância percorrida foi maior em 0,9% (40,36 m). Essas distâncias percorridas são superiores aos encontrados na Tabela 4.1. Apesar de não ser significativa a diferença entre as distâncias percorridas nas duas inclinações verificadas, o percurso a 22,5° apresentou um erro sistematicamente um pouco maior ao apresentado pela inclinação de 45°.

Tabela 4.3 – Distância percorrida e tempo total de evasão do agente posicionado à 11,25° e 33,75° da porta.

**Distância e tempo total - posição inicial em relação à porta => 11,25°**

Velocidade (m/s)	Distância inicial da porta (m)								
	10		Tempo de evasão ideal	20			40		
	Distância percorrida	Tempo de evasão		Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal
0,5	11,16	22,33	20,2	21,99	43,98	40,2	43,01	86,01	80,2
1,0	11,16	11,16	10,1	21,99	21,99	20,1	43,01	43,01	40,1
1,5	11,16	7,44	6,73	21,99	14,66	13,4	43,01	28,67	26,73
2,0	11,16	5,58	5,05	21,99	11	10,05	43,01	21,5	20,05

**Distância e tempo total - posição inicial em relação à porta => 33,75°**

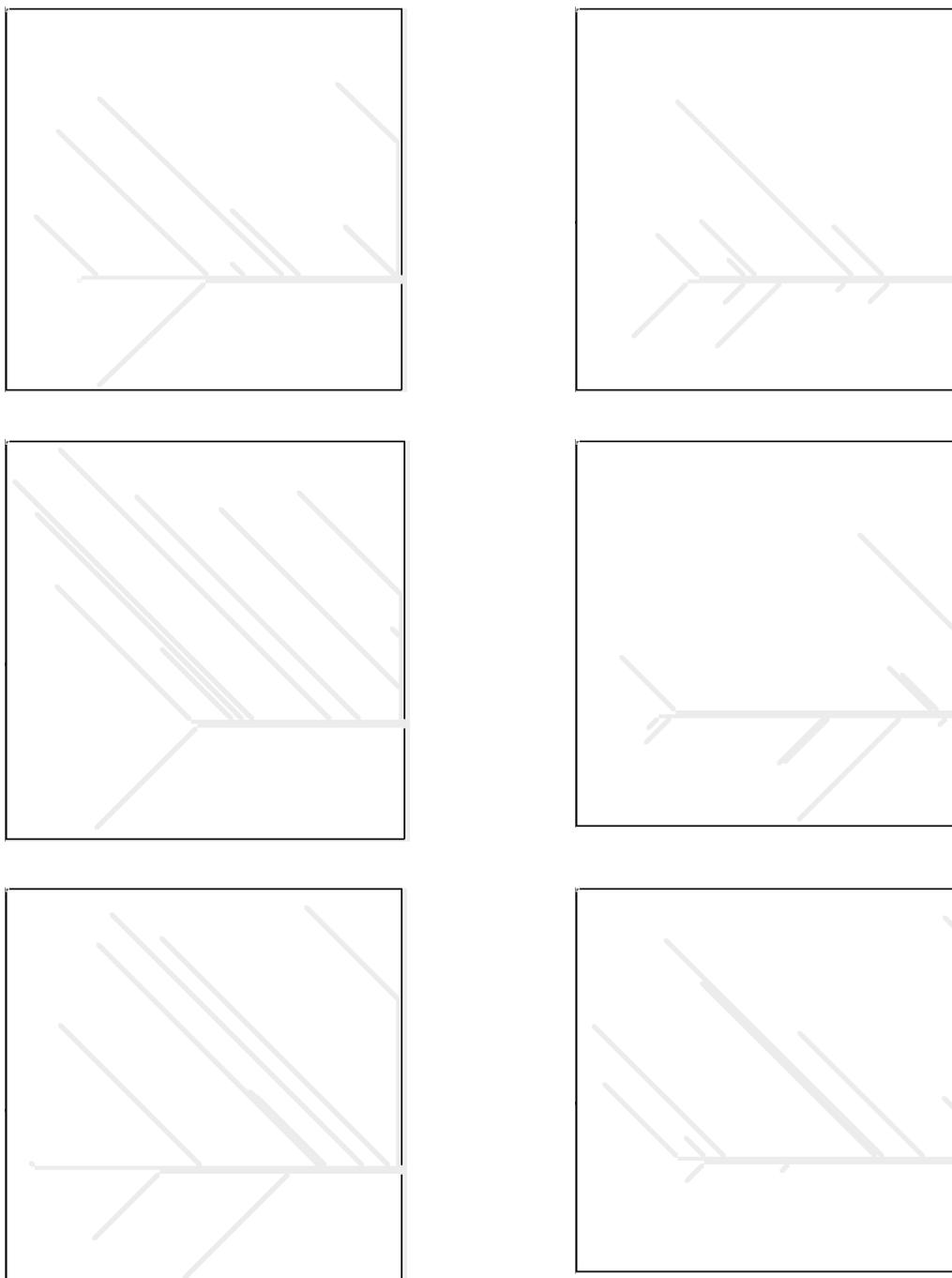
Velocidade (m/s)	Distância inicial da porta (m)								
	10		Tempo de evasão ideal	20			40		
	Distância percorrida	Tempo de evasão		Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal	Distância percorrida	Tempo de evasão	Tempo de evasão ideal
0,5	11,2	22,39	20,2	21,67	43,35	40,2	42,87	85,74	80,2
1,0	11,2	11,2	10,1	21,67	21,67	20,1	42,87	42,87	40,1
1,5	11,2	7,46	6,73	21,67	14,45	13,4	42,87	28,58	26,73
2,0	11,2	5,6	5,05	21,67	10,84	10,05	42,87	21,44	20,05

Fonte: Autor, 2019.

#### 4.2.3 Efetiva Rota de Movimentação

Para se visualizar a efetiva rota de movimentação, realizou-se simulações com 10 agentes, cujo caminho efetivamente usado até a saída foi identificado pela cor cinza. Na Figura 3 tem-se imagens de várias dessas simulações.

Figura 3.4 – Imagens de 6 simulações



Fonte: Autor, 2019.

Nota-se que o percurso escolhido se assemelha a uma espinha de peixe.

# Capítulo 5

## Resultados e discussão

Conforme apresentado no Capítulo 1, a proposta deste trabalho foi desenvolver um simulador capaz de realizar evasão de pessoas em um ambiente em emergência através de conceitos de multiagentes, principalmente no que tange a comunicação e troca de informações entre esses agentes. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento de cada pessoa no ambiente simulado e comparar os resultados com dados da literatura.

Este capítulo visa apresentar e analisar os resultados das simulações deste sistema. O conteúdo aqui está organizado da seguinte maneira: a Seção 5.1 descreve a configuração do computador utilizado nas simulações, a Seção 5.2 exibe a planta baixa utilizada como referência para as simulações e os cenários propostos, a Seção 5.3 mostra o resultado de simulação com apenas um agente e outra com dois agentes sem interação entre eles, enquanto a Seção 5.4 trata simulações com interação entre os agentes e a Seção 5.5 exibe o resultado de simulações com possibilidade de pânico ou tempo de pré-movimento. Por fim, a Seção 5.6 apresenta uma discussão sobre os resultados e sua relação com dados da literatura.

### 5.1 Aspectos Técnicos

Os testes desenvolvidos para a análise do modelo proposto por este trabalho foram executados em um computador com 2.00 GHz Intel Core i7, 16 GB de RAM e placa de vídeo AMD Radeon HD 7570M (512 MB de RAM). O algoritmo foi implementado em Java e utilizando *framework* JADE.

## 5.2 Base de testes e cenários

Nesse trabalho, todas as simulações de evasões realizadas usaram o mesmo ambiente (planta), no caso, o Pavilhão de Segurança do Trabalho do IFMG Campus Ouro Preto. A planta baixa desse ambiente está ilustrada na Figura 5.1.

Esse ambiente foi escolhido por possuir certa complexidade e número de salas e por haver estudos relacionados para este ambiente (SOUZA, 2007; BRAGA, 2012). De acordo com Souza (2007), neste local há duas possibilidades de ocupação máxima do pavilhão: 288 pessoas, se fosse utilizado como um ambiente educacional e, hipoteticamente, 64 pessoas, se a finalidade correspondesse à um escritório ou hotel. Foram avaliados os cenários descritos na Tabela 5.1.

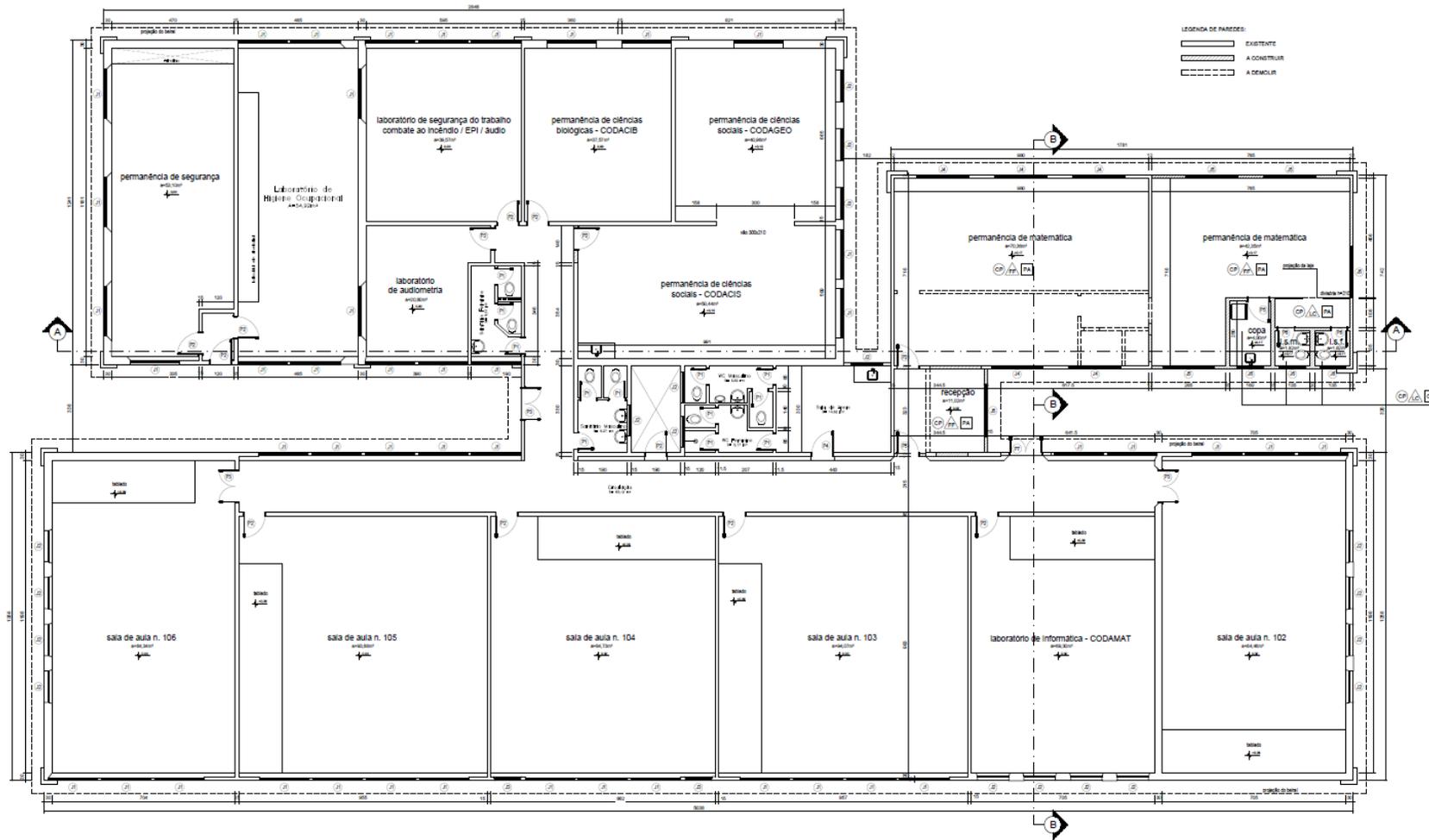
Tabela 5.1 – Cenários simulados

<b>Cenário</b>	<b>Sabem rota de fuga</b>	<b>Não sabem rota de fuga</b>	<b>Total</b>	<b>Possibilidade de Pânico</b>	<b>Variação de tempo de reação</b>	<b>Simulações</b>
<b>1</b>	1	0	1	Não	Não	1
<b>2</b>	2	0	2	Não	Não	1
<b>3</b>	32	32	64	Não	Não	25
<b>4</b>	144	144	288	Não	Não	25
<b>5</b>	144	144	288	Sim	Não	25
<b>6</b>	144	144	288	Não	Sim	25

Fonte: Autor, 2019.

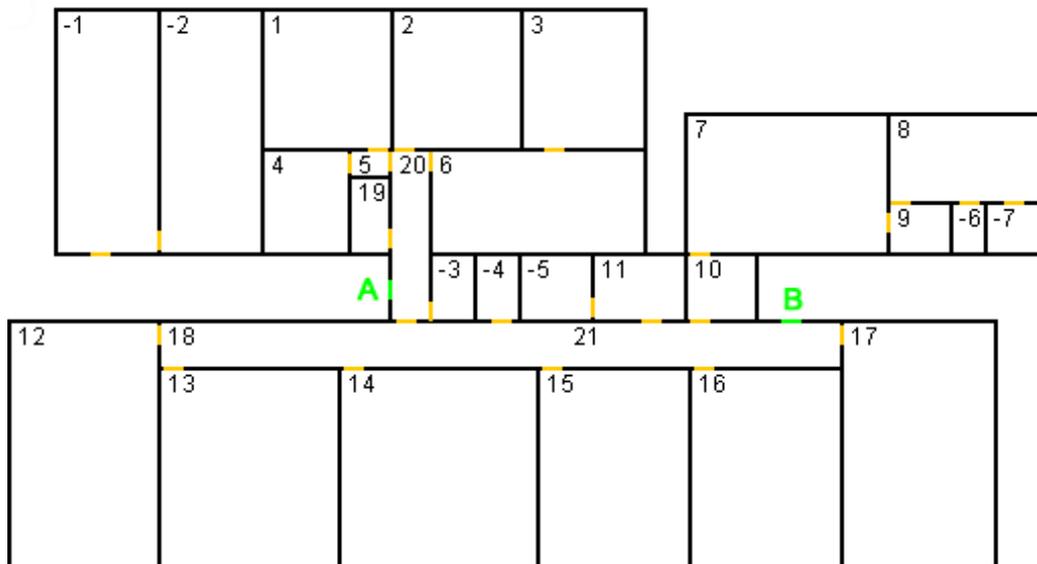
A área total do ambiente simulado (Pavilhão de Segurança) é de 1.179,33 m<sup>2</sup>. Como dito na seção anterior, para o funcionamento do simulador, cada área e posição da sala, portas de saídas intermediárias (portas das salas na cor laranja) e as duas portas de saída final do pavilhão (na cor verde) foram convertidas em pixel. O layout da planta plotada no simulador pode ser vista na Figura 5.2 abaixo. As portas de saída final estão rotuladas com as letras A e B.

Figura 5.1 – Planta baixa do Pavilhão de Segurança do Trabalho do IFMG Campus Ouro Preto



Fonte: Souza (2007).

Figura 5.2 – Layout da planta do Pavilhão de Segurança plotada na interface do simulador



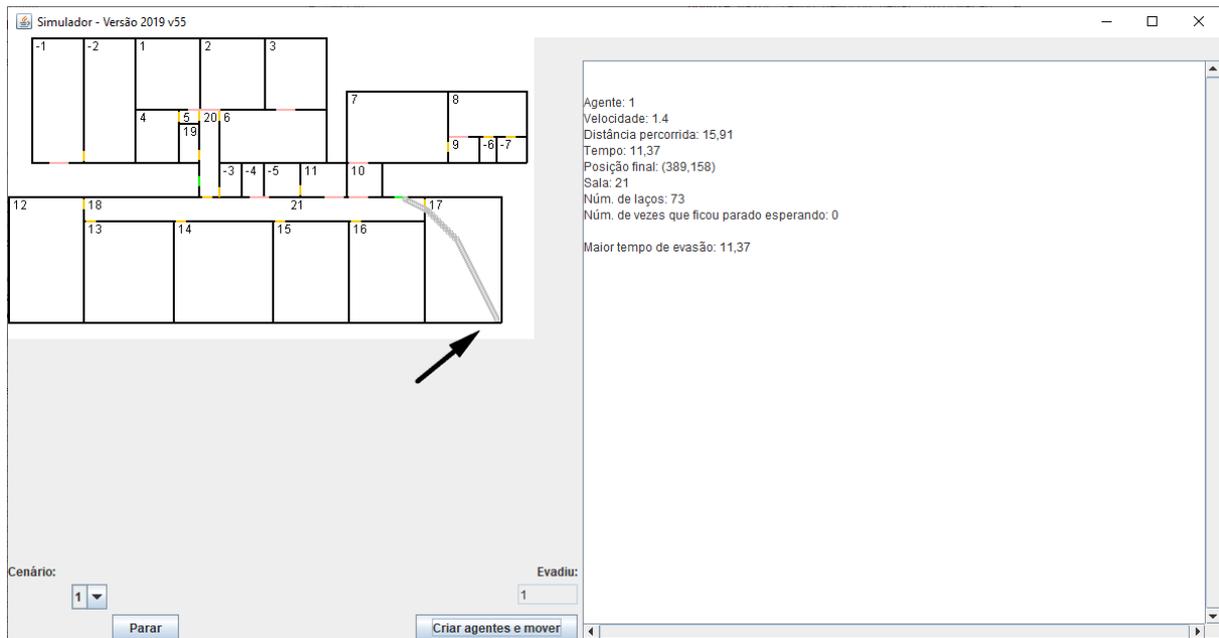
Fonte: Autor, 2019.

Nessas simulações não foram considerados os efeitos como comportamento de parentesco, o fenômeno de ir com a multidão e novos obstáculos que possam surgir durante a movimentação das pessoas.

### 5.3 Evasão de pessoas sem interação entre agentes

A fim de verificar o tempo de evasão de um agente jovem que sabe a rota de fuga do ambiente em estudo, foi realizada 1 simulação onde o agente foi colocado no extremo da sala 17. A Figura 5.2 mostra a posição inicial do agente na planta do pavilhão (sinalizada com a seta preta) e a rota de deslocamento cinza até a porta de saída. Na simulação com 2 agentes, a posição de cada pessoa foi o extremo das salas 12 e 17. Esse posicionamento no extremo de cada sala foi para deixá-los consideravelmente longe (o que pode ser percebido visualmente na Figura 5.2) das portas de saída. A partir dessa posição inicial, o agente irá se deslocar até a porta da sala. Tanto no Cenário I quanto no Cenário II, a velocidade constante do agente foi de 1.4 m/s.

Figura 5.2 – Cenário I, um agente que sabe a rota de saída



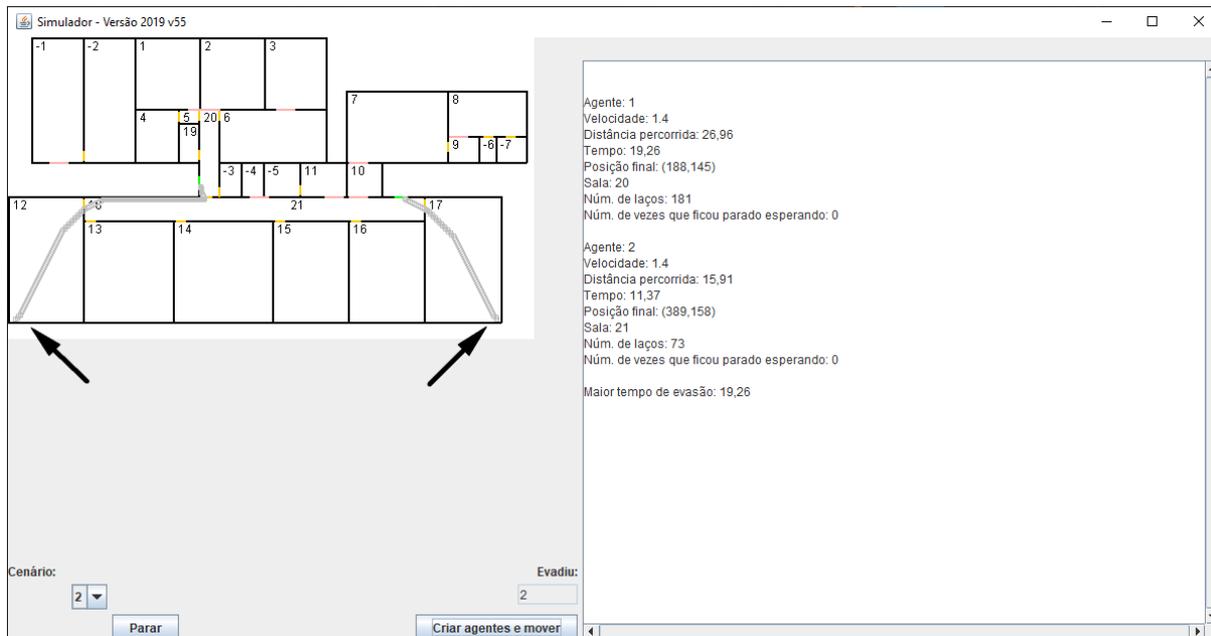
Fonte: Autor, 2019.

O agente no ambiente simulado levou um tempo médio de 11,37 s para a evasão total, percorrendo 15,91 metros até a saída total do pavilhão com velocidade constante de 1.4 m/s.

As mesmas condições utilizadas no Cenário I foram utilizadas no Cenário II, porém foram colocados 2 agentes jovens que sabem a rota de saída no ambiente. A Figura 5.3 mostra o posicionamento dos dois agentes no pavilhão.

A simulação resultou em um tempo de evasão de 19,26 s, que é maior do que o observado para o ambiente contendo apenas uma pessoa. Ambos os cenários 1 e 2 apresentam complexidade similar, porém, mesmo assim, na presença de mais de um agente o tempo total de evasão aumentou.

Figura 5.3 – Cenário II, dois agentes que sabem a rota de saída



Fonte: Autor, 2019.

Esses resultados mostraram também que a evasão em ambientes com poucos obstáculos e sem aglomeração de pessoas é rápida no local de estudo escolhido. Comparando com os testes preliminares, onde também não ocorrem interações entre os agentes, o tempo de evasão é menor já que uma menor quantidade de obstáculos e outros agentes são encontrados no caminho.

#### 5.4 Evasão de pessoas com interação entre agentes

A interação entre os agentes dentro do ambiente foi uma das principais características exploradas no simulador apresentado. O resultado ilustrado no item anterior não considerou, além dessa interação e troca de informações entre os agentes, algumas outras características como as pessoas (agentes) não saberem a rota de fuga e velocidade única para cada agente.

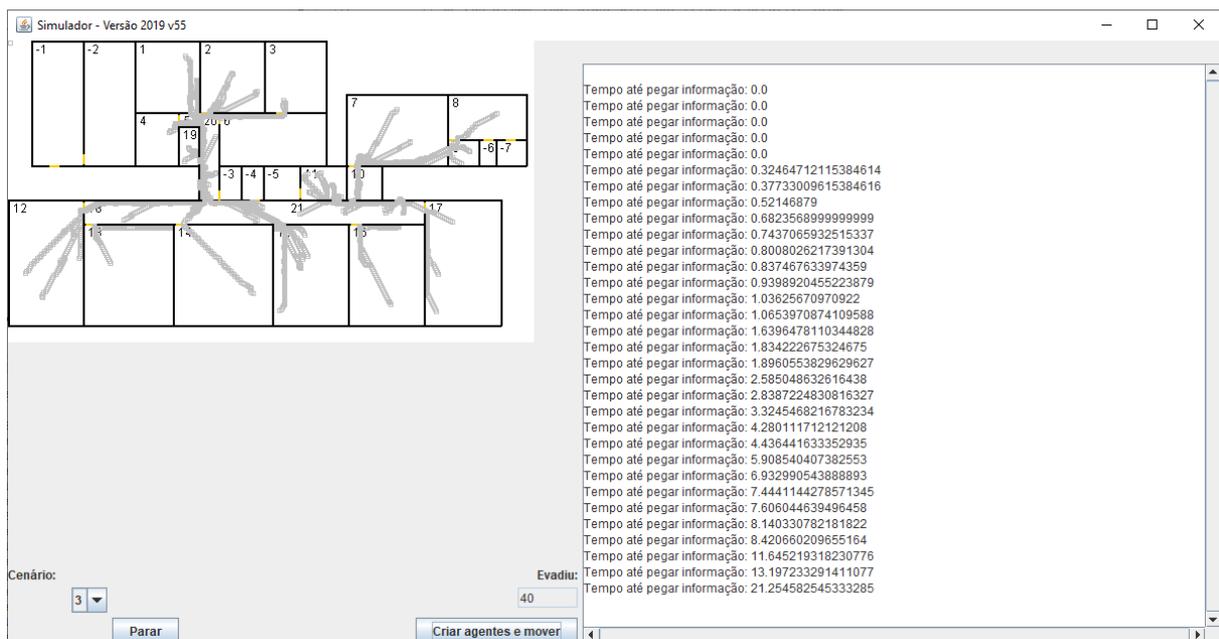
O algoritmo utilizado nessas simulações considerou os seguintes fatores:

- Número variado de agentes (pessoas).

- Pessoas, aleatoriamente, sabendo ou não o local da saída.
- Velocidade variando de acordo para cada pessoa.

A Figura 5.4 mostra o Cenário III considerado para um total de 64 agentes, sendo 32 sabem a rota de fuga e 32 que não sabem, posicionados de maneira aleatória no local estudado. Nesse caso, quem não sabia a rota de fuga se deslocaram com velocidade inicial de 1,0 m/s e, ao encontrar outro que sabiam a rota de fuga, recebeu essa informação e uma nova velocidade dentro da faixa já explicada no capítulo anterior.

Figura 5.4 – Cenário III, 64 agentes sendo 32 que sabem a rota de fuga e 32 agentes não sabem a rota de fuga.



Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados das simulações feitas com 64 agentes posicionados conforme apresentado na Figura 5.4. Foram realizadas 25 simulações o que resultou em um tempo de evasão médio de 24,5 s. Comparado aos resultados anteriores, o tempo de evasão aqui obtido é menor do que quando um ou dois agentes estão presentes porque as velocidades foram, na média, maiores. Observa-se que a

comunicação entre as pessoas no ambiente simulado melhora o tempo de evasão já que um agente pode informar outro sobre as rotas de saída e assim por diante.

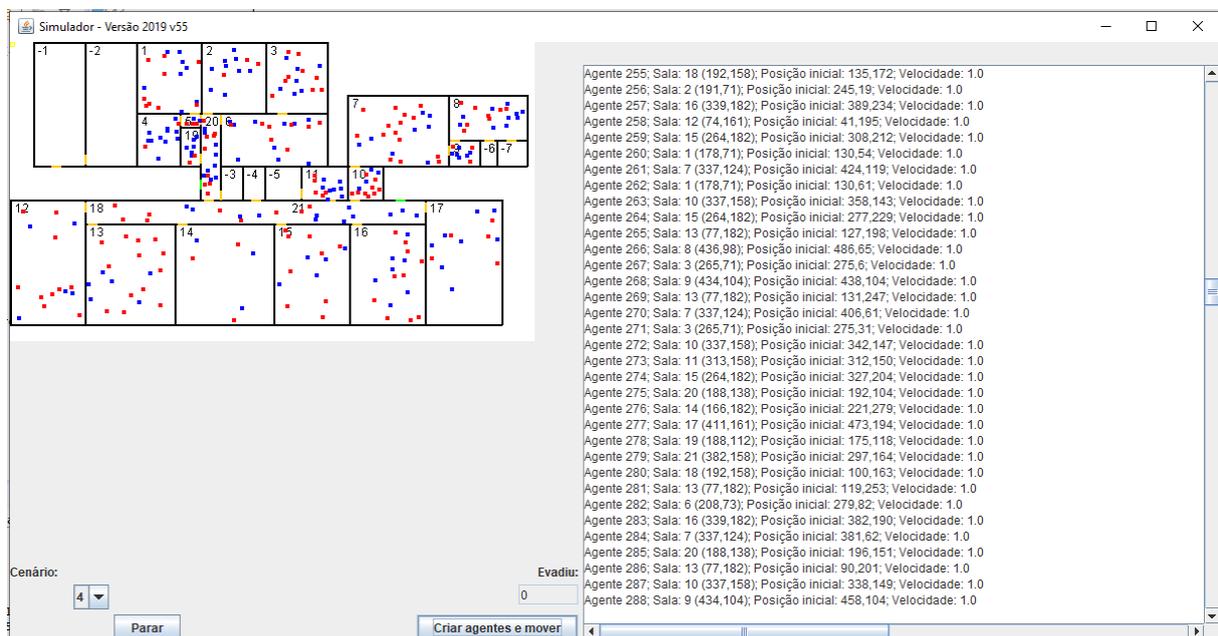
Tabela 5.2 – Tempo total de evasão com 64 agentes considerando a comunicação entre as pessoas

<b>Simulação</b>	<b>Tempo para saída (s)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
1	26,63	24,5	1,48
2	23,56	24,5	1,48
3	25,61	24,5	1,48
4	23,60	24,5	1,48
5	25,25	24,5	1,48
6	24,02	24,5	1,48
7	25,83	24,5	1,48
8	22,59	24,5	1,48
9	25,62	24,5	1,48
10	22,92	24,5	1,48
11	25,57	24,5	1,48
12	23,17	24,5	1,48
13	25,00	24,5	1,48
14	25,35	24,5	1,48
15	25,41	24,5	1,48
16	21,62	24,5	1,48
17	20,77	24,5	1,48
18	24,27	24,5	1,48
19	25,45	24,5	1,48
20	24,21	24,5	1,48
21	24,79	24,5	1,48
22	27,14	24,5	1,48
23	25,05	24,5	1,48
24	25,21	24,5	1,48
25	23,13	24,5	1,48

Fonte: Autor, 2019.

A Figura 5.5 mostra o cenário de simulação quando 288 pessoas foram inseridas no ambiente de maneira aleatória. Foram consideradas pessoas que sabem a rota de saída (144) e outras que não sabem a rota de saída (144). Dessa maneira, esse cenário é o que mais se aproxima de uma situação real com total lotação do ambiente.

Figura 5.5 – Cenário IV, ambiente com 288 pessoas sendo que 144 sabem a rota de saída e outros 144 não sabem.



Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da simulação realizada no cenário IV. O tempo médio de evasão total do prédio foi de 41,4 s. O tempo de evasão total com um maior número de agentes é maior do que o obtido nas outras simulações, o que era esperado já que a complexidade do ambiente é maior. Nesse cenário com alta taxa de ocupação do ambiente, o que corresponde a densidade limite de pessoas no pavilhão, a velocidade de deslocamento cai quando comparado com uma densidade de pessoas menor, aumentando assim o perigo de acidentes (HELBING; JOHANSSON, 2010).

Tabela 5.3 – Tempo total de evasão com 288 agentes e comunicação entre as pessoas

<b>Simulação</b>	<b>Tempo para saída (s)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
1	43,15	41,4	3,44
2	44,07	41,4	3,44
3	39,29	41,4	3,44
4	42,73	41,4	3,44
5	40,79	41,4	3,44
6	51,86	41,4	3,44
7	38,97	41,4	3,44
8	43,02	41,4	3,44
9	40,66	41,4	3,44
10	39,82	41,4	3,44
11	39,74	41,4	3,44
12	40,96	41,4	3,44
13	38,39	41,4	3,44
14	37,75	41,4	3,44
15	37,18	41,4	3,44
16	42,96	41,4	3,44
17	50,62	41,4	3,44
18	40,64	41,4	3,44
19	37,61	41,4	3,44
20	39,68	41,4	3,44
21	41,75	41,4	3,44
22	39,27	41,4	3,44
23	41,75	41,4	3,44
24	39,27	41,4	3,44
25	42,15	41,4	3,44

Fonte: Autor, 2019.

Uma questão importante nos *layouts* de ambientes é a posição das saídas. No ambiente de estudo deste trabalho existem duas saídas. Segundo Braga (2012), a

saída mais a direita é mais segura para o escape devido a menor possibilidade de colisões nesse ambiente. De acordo com o mesmo autor, quando as duas portas são usadas, o tempo de evasão cai, além de diminuir também a possibilidade de colisões. No entanto, em uma situação real isso nem sempre seria verdade já que existem fatores que podem fazer com que os indivíduos se concentrem apenas em uma saída, como relatado na revisão de literatura, onde a pessoa que não sabe a saída tende a ir com a multidão, por exemplo.

O simulador registra, desde o início da simulação, o tempo que cada agente que não sabia a rota de saída demorou para receber a informação de outro agente que conhecia o caminho de evasão do ambiente. A Tabela 5.4 mostra, dentre todos os agentes que pegaram a informação de rota de saída, o tempo máximo, ou seja, o maior tempo, a partir do início da movimentação, para receber os dados da rota de saída. Foram realizadas simulações com 64 e 288 pessoas. Os resultados das 25 simulações mostraram um tempo máximo de troca de informações de 13,5 s e 17,4 s para simulações envolvendo 64 e 288 agentes, respectivamente. Esses resultados mostram que quanto mais pessoas no ambiente, menor é o tempo necessário para a troca de informação entre os agentes. Vale ressaltar que, em algumas simulações, um ou mais agentes não conseguiram se aproximar de outro agente para pega a informação da rota de saída.

No entanto, apesar de existir uma maior velocidade na comunicação em um ambiente com maior quantidade de pessoas, o risco de pisoteamentos ou esmagamentos é maior. Segundo Dynes e Quarantelli (1975), em aglomerações, existe uma falta de comunicação entre os indivíduos que estão na frente da massa com os que estão atrás, o que pode ocasionar esmagamentos ou pisoteamentos dos indivíduos que estão no meio. Conseqüentemente, é essencial avaliar as interações entre as pessoas em situações de emergência, já que este é um dos principais fatores determinantes no tempo de evasão.

Tabela 5.4 – Tempo máximo para troca de informações

<b>Simulação</b>	<b>Momento última troca de informações - 64 agentes</b>	<b>Momento última troca de informações - 288 agentes</b>
1	9,40	25,32
2	10,87	16,76
3	13,58	16,98
4	14,46	15,33
5	14,68	28,3
6	16,81	16,75
7	13,25	11,58
8	11,55	13,86
9	15,40	10,98
10	13,00	14,96
11	13,94	22,56
12	17,07	19,26
13	15,73	16,4
14	12,38	13,73
15	12,83	16,97
16	11,96	17,23
17	12,27	13,93
18	12,71	17,57
19	9,67	17,29
20	13,49	18,2
21	14,13	18,43
22	10,74	12,34
23	13,92	24,1
24	18,76	18,89
25	14,84	17,79

Fonte: Autor, 2019.

O modelo desenvolvido neste trabalho pode ser adaptado para diversos edifícios e com diferentes cenários, o que pode auxiliar na prevenção de acidentes em locais com uma concentração grande de pessoas. Simulando o comportamento coletivo,

pode-se calcular a quantidade máxima de pessoas permitida em um local sem que haja problemas na evasão do mesmo em situação de emergência.

### **5.5 Evasão de pessoas com possibilidade de pânico e tempo de pré-movimento**

Este trabalho também propõe outras duas possibilidades de simulação:

1. A primeira onde 10% das pessoas irão entrar em pânico<sup>6</sup> e, durante 10 segundos<sup>7</sup>, se movimentarão aleatoriamente pelo ambiente como velocidade inicial de 1 m/s. Tanto o parâmetro do percentual de pessoas que entrarão em pânico quanto o tempo que ficarão nessa situação, são parametrizáveis permitindo inúmeras combinações de simulação.
2. A segunda refere-se ao tempo de pré-movimento. Como falado anteriormente, esse tempo de pré-movimento refere-se ao tempo desde o início da situação de emergência (exemplo: início de um incêndio) até o momento que a pessoa iniciará o movimento. Assim como na simulação anterior, foram realizadas simulações onde 10% apresentaram esse comportamento durante 10 segundos. E esses parâmetros também são parametrizáveis.

As Tabela 5.5 e 5.6 mostram, respectivamente, os Cenários V e VI considerado para um total de 288 agentes, sendo 144 sabem a rota de fuga e 144 que não sabem, posicionados de maneira aleatória no local estudado. No Cenário V há 28 pessoas que entraram em pânico e no Cenário VI temos 28 pessoas com o

---

<sup>6</sup> De maneira simplista, para o presente simulador, entrar em pânico significa que, durante 10 segundos, as pessoas se movimentarão aleatoriamente pelo ambiente como velocidade inicial de 1 m/s.

<sup>7</sup> O valor de 10 segundos foi arbitrado, mas pode ser ajustado com diferentes dados obtidos na literatura.

comportamento de pré-movimento. Nesses casos quando não sabia a rota de fuga e entrou em pânico, depois dos 10 s, caso esteja à menos de 2 metros de outro que saiba a rota de saída, pegará a informação e terá uma nova velocidade atribuída. Logo em seguida todos irão se movimentar em direção às portas até a evasão total do ambiente. Para a situação dos agentes com pré-movimento, depois desse tempo de 10 s, o agente iniciará o movimento com a velocidade inicial de 1 m/s. E, caso esse agente esteja à menos de 2 metros de outro que saiba a rota de saída, este primeiro pegará a informação e terá uma nova velocidade atribuída.

Tabela 5.5 – Tempo total de evasão com 288 agentes com possibilidade de pânico

<b>Simulação</b>	<b>Tempo para saída (s)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Tempo saída sem pânico (s)</b>
1	47,97	43,9	2,19	41,4
2	45,79	43,9	2,19	41,4
3	44,11	43,9	2,19	41,4
4	43,16	43,9	2,19	41,4
5	42,87	43,9	2,19	41,4
6	47,15	43,9	2,19	41,4
7	43,2	43,9	2,19	41,4
8	41,56	43,9	2,19	41,4
9	43,82	43,9	2,19	41,4
10	44,11	43,9	2,19	41,4
11	45,34	43,9	2,19	41,4
12	42,9	43,9	2,19	41,4
13	45,76	43,9	2,19	41,4
14	41,86	43,9	2,19	41,4
15	41,98	43,9	2,19	41,4
16	39,09	43,9	2,19	41,4
17	47,8	43,9	2,19	41,4
18	44,92	43,9	2,19	41,4
19	42,9	43,9	2,19	41,4
20	43,29	43,9	2,19	41,4
21	42,71	43,9	2,19	41,4
22	47,77	43,9	2,19	41,4
23	44,05	43,9	2,19	41,4
24	40,67	43,9	2,19	41,4
25	43,87	43,9	2,19	41,4

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 5.6 – Tempo total de evasão com 288 agentes com comportamento de pré-movimento

<b>Simulação</b>	<b>Tempo para saída (s)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Tempo saída sem pânico (s)</b>
1	42,16	45,6	3,25	41,4
2	56,19	45,6	3,25	41,4
3	45,1	45,6	3,25	41,4
4	46,07	45,6	3,25	41,4
5	52,76	45,6	3,25	41,4
6	44,89	45,6	3,25	41,4
7	49,12	45,6	3,25	41,4
8	47,41	45,6	3,25	41,4
9	45,77	45,6	3,25	41,4
10	45,5	45,6	3,25	41,4
11	42,35	45,6	3,25	41,4
12	46,52	45,6	3,25	41,4
13	44,2	45,6	3,25	41,4
14	45,43	45,6	3,25	41,4
15	41,19	45,6	3,25	41,4
16	47,87	45,6	3,25	41,4
17	43,23	45,6	3,25	41,4
18	42,66	45,6	3,25	41,4
19	42,42	45,6	3,25	41,4
20	44,47	45,6	3,25	41,4
21	44,45	45,6	3,25	41,4
22	47,34	45,6	3,25	41,4
23	43,76	45,6	3,25	41,4
24	44,61	45,6	3,25	41,4
25	45,41	45,6	3,25	41,4

Fonte: Autor, 2019.

## 5.6 Considerações a respeito dos resultados

Foi evidenciado, seja pela variação dos valores finais (tais como do tempo para escape total do ambiente), seja pela rota de fuga efetiva realizada por cada um dos agentes que tais resultados são de certa maneira coerentes com a natureza do estudo realizado. Um fator de elevada influência na variabilidade dos resultados desta investigação é o posicionamento inicial dos agentes, que na maioria das simulações foi aleatório.

Braga (2012) apontou que um aspecto que precisava ser mais bem investigado na Lógica *Fuzzy* está relacionado com a sua velocidade de processamento. Tal fato se devia a velocidade computacional ser satisfatória para sua utilização convencional em sistemas de controle, no entanto uma simulação multiagente, ainda que de pequeno porte, seria capaz de requisitar a realização de milhares de análises *Fuzzy* completas a cada interação, o que pode inibir seu uso. Esse problema foi parcialmente resolvido em Braga (2019).

Este estudo buscou, por meio da abordagem empregando um sistema baseado em multiagente no qual a pessoa poderia ou não saber a rota de saída e, a cada simulação, podendo estar em qualquer posição inicial antes do início do movimento, aproximar de uma simulação real de evasão de ambientes em situações de emergência.

Percebe-se que, mesmo cada pessoa estando aleatoriamente posicionada a cada nova simulação, o tempo total das evasões do ambiente (pavilhão) se manteve dentro de uma faixa mínima e máxima. Como exemplo, podemos citar as 25 simulações com 288 agentes que tiveram o tempo total de evasão entre 37 e 51 segundos, não tendo, portanto, alguma simulação que extrapolasse essas faixas.

Portanto, neste capítulo foram abordados os aspectos técnicos, a determinação de parâmetros, a definição da planta do Pavilhão de Segurança como ambiente a ser simulado, a realização de testes preliminares, a evasão de pessoas com e sem interação entre agentes, a validação dos resultados e a análise da variação dos resultados.

## Capítulo 6

### Considerações finais e trabalhos futuros

O presente trabalho buscou realizar uma revisão bibliográfica de comportamento de indivíduos em multidões e durante uma situação de emergência, bem como uma abordagem teórica sucinta de sistemas multiagentes e JADE. Esta pesquisa também mostrou alguns estudos que tratam da evasão de pessoas de ambientes.

Como objetivo principal, esse trabalho abordou o desenvolvimento de um simulador, por meio do *software* em linguagem Java e comunicação pelo *framework* JADE, utilizando o conceito de multiagentes para possibilitar a evasão de multidões. O desafio no desenvolvimento do simulador se deu devido à necessidade de se definir parâmetros precisos de distância mínima de movimentação, tamanho do agente, velocidade de deslocamento, posição das portas das salas entre outros. O *software* realizou simulações capazes de serem validadas, como por exemplo, confrontando o tempo de evasão de cada agente, velocidade desse agente e a distância percorrida. A estratégia de se escolher a criação de um simulador 2D facilitou, por exemplo, pela possibilidade de se poder acompanhar visualmente a movimentação do agente até as portas de saída ou a verificação que um agente não iria sobrepor outro. Após as simulações, o estudo apresentou os resultados do tempo total para todos saírem do pavilhão, bem como os métodos utilizados, as regras de locomoção e as limitações do modelo.

Este trabalho apresentou um estudo comparativo de alguns resultados já estudados, além da proposta de comunicação entre os agentes. Quando se fala de sistema multiagente, espera-se que as simulações busquem estar o mais próximo possível da realidade. Com essa intenção, este trabalhou, de forma relativamente simplista, tentou adotar o agente com os seguintes comportamentos: comunicação entre as pessoas, possibilidade de entrar em pânico e tempo de pré-movimento.

Como dito no capítulo anterior, outro ponto observado durante as simulações foi a pouca variação no tempo total de evasão das pessoas (considerando a última pessoa saindo do ambiente). Isso ocorreu porque a faixa de velocidade atribuída para as pessoas foi muito pequena. Para comprovar essa afirmação, durante a calibração e testes iniciais do simulador, foram atribuídas velocidades abaixo de 0,8 m/s para os agentes ocasionando aumento considerável no tempo final de evasão, principalmente quando havia agentes que não conheciam a rota de fuga.

A utilização do *framework* JADE facilitou, através da sua interface gráfica, o acompanhamento da criação dos agentes e troca de mensagens.

Quando foram realizadas simulações com possibilidade de pânico com o total de 288 pessoas, observou que o tempo total de evasão aumentou cerca de 6,2%. Esse aumento é totalmente explicável porque, quando o simulador atribui comportamento de movimento aleatório durante 10 segundos para esses 28 agentes, estes dificilmente iriam se deslocar para a porta. Outra situação simulada foi a possibilidade do pré-movimento onde 28 pessoas ficaram paradas desde o início da simulação durante 10 segundos. Depois dos 10 segundos, essas pessoas começaram a se movimentar. Para esse caso, o tempo total de evasão aumentou 10,3% se comparado com a situação onde não houve esse comportamento.

O tempo de resposta (TR), ou seja, o estímulo do sistema sensorial antes do início da resposta motora, influencia fortemente no tempo total de evasão de um ambiente. No entanto, segundo Barbanti (2010), é possível aprimorar o TR com o treinamento. Sob a ótica da atividade física, quanto mais vigilante o praticante estiver para cumprir a atividade, mais veloz é o TR (HELENE; XAVIER, 2003). Ademais, existem diversos aspectos que influenciam na velocidade do TR e, por sua vez, na velocidade da resposta motora, como o nível cognitivo (os mais inteligentes possuem o TR mais breve) (RIBEIRO; ALMEIDA, 2005), o nível de cansaço do indivíduo (quanto mais cansado mais lento é o TR) (SANTOS et al., 2006), o condicionamento físico (quanto mais treinado menor o TR) (HASCELIK et al., 1989; BRUZI, 2013) e outros.

Dessa maneira, treinamentos envolvendo a evasão de prédios e o monitoramento do tempo de evasão nessas situações auxilia no melhor preparo do pessoal que comumente ocupa um ambiente frente a situações de risco. As simulações com a

finalidade de monitorar o tempo de evasão podem auxiliar no desenvolvimento de um plano de evasão pelos engenheiros e arquitetos de um ambiente e a escolha da melhor rota de saída também pode ser testada.

Quando se pretende simular computacionalmente situações reais usando multiagente ou mesmo outras tecnologias como autômatos celulares, o responsável pelo estudo precisa desenhar o projeto do *software* e escolher, entre outros itens, se irá apresentar o resultado de forma gráfica ou simplesmente métodos em background que armazenarão os dados e informações. Para este estudo, decidiu-se que uma premissa importante a ser contemplada seria a parte gráfica em 2D. Apesar do benefício visual de poder visualizar as pessoas (aqui representadas por círculos), isso trouxe um grande esforço na codificação.

Destaca-se que essa área de estudo de ambientes com grandes aglomerações e o processo de evasão em situações de emergência deveriam ser tratados com mais atenção por parte do Poder Público, uma vez que sua gestão precisa ser praticada observando o princípio da eficiência na administração pública.

Assim, uma maneira de alcançar tal propósito é o investimento em estudos preventivos e pesquisas para reduzir riscos e tragédias, como, por exemplo, as que vêm acontecendo nos últimos anos, incêndios de grandes proporções em prédios residenciais, boates, empresas e outros. Esses ambientes de grandes aglomerações possuem, devido à ineficiência de fiscalização e melhores padrões de segurança, problemas de eficiência nos projetos.

## **6.1 Trabalhos Futuros**

Trabalhos futuros podem ser realizados em diferentes partes do projeto. É possível que o simulador faça a leitura de qualquer planta baixa, ou seja, bastaria importar um arquivo de planta vetorizado, com a inclusão de portas, paredes, obstáculos e outros, para o simulador ler todas as medidas e posicionamentos. Como dito anteriormente, no presente estágio de desenvolvimento dessa pesquisa, a localização e tamanho das salas e portas precisam ser cadastradas manualmente antes de iniciar a simulação.

Além disso, o simulador poderia também trabalhar em edificações com vários andares, tratando a evasão utilizando escadas de emergência.

Outro grande avanço do trabalho seria a incorporação de mais comportamentos humanos para cada agente. Ele poderia, por exemplo, ser atraído pelo efeito manada, ficar próximo de alguém devido ao grau de parentesco entre outras. Além disso, pode se pensar em alterações físicas no ambiente depois do início da simulação, como novos obstáculos surgindo à medida que, por exemplo, irão ocorrer quedas devido a um incêndio. Além de novos obstáculos, a possibilidade de escurecimento do ambiente e diminuição da visibilidade.

Em relação à tecnologia escolhida principalmente no que tange o *framework* JADE, em próximos trabalhos, espera-se usar outros recursos, como por exemplo, realização de simulações distribuídas em mais de uma máquina e sendo controladas por um container centralizado do JADE.

Referente a análise de resultados, pode-se realizar novas pesquisas bibliográficas de trabalhos correlacionados e tentar realizar outras combinações entre esses estudos na área de evasão de ambientes, modificando os indicadores utilizados, a estratégia adotada para se locomover ou outros parâmetros de análise.

Por fim, como trabalho futuro seria muito interessante comparar os resultados encontrados em situações reais, por exemplo, tentando simular algum episódio de fuga em situação de emergência documentado pelo Corpo de Bombeiros e analisar os resultados encontrados.

## Referências

ADLER, J. L.; BLUE, V. J. Toward the design of intelligent traveler information systems. **Transportation Research**, v. 6, n. 3, p. 157–172, 1998.

ALVES, B. P. **Redes Sociais Formadas no Fenômeno do Pânico em Multidão: uma Análise via Simulação Multiagentes**. 2011. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Informação) - Universidade Federal do ABC, 2011.

ARTHUR, J. D.; NANCE, R. E. Verification, Validation e Accreditation: Disciplines in dialogue or can we learn from the experiences of others?. In: **Winter Simulation Conference**, Atlanta, p. 183-198, 1997.

AUSTIN, J. **How to do things with words**. Oxford: Clarendon Press, 1962. 168 p.

AXELROD, R. Advancing the art of simulation in the social sciences. **Complexity**, v. 3, n. 2, p. 16–22, Dec. 1998.

BARBANTI, V. J. **Treinamento esportivo: as capacidades motoras dos esportistas**. Barueri: Manole, 2010.

BELLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; TRUCCO, T.; RIMASSA, G. **Jade Programmer's Guide**. 2010. Disponível em: <http://jade.cselt.it>. Acesso em: 02 dez. 2017.

BELLMAN, R. **On a routing problem**. Santa Mônica: RAND Corporation, 1956. 08 p.

BLUMER, H. **Symbolic interactionism: [S.I.]: Perspective and method**, Prentice-Hall, 1969. 208 p.

BRACHA, H. Freeze, Flight, Fight, Fright, Faint: Adaptationist Perspectives on the Acute Stress Response Spectrum. **CNS Spectrums**, New York, v. 9, n. 9, set. 2004.

BRAGA, H. C. **Modelagem computacional híbrida ergonomicamente embasada da movimentação humana por agentes Fuzzy**. 2019. 191 f. Tese (Doutorado em Modelagem Matemática e Computacional) - CEFET-MG, Belo Horizonte, 2019.

BRAGA, H. C. **Simulação da movimentação de pessoas em situações de emergência com lógica fuzzy: aspectos ergonômicos e computacionais**. 2012. 193 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - CEFET-MG, Belo Horizonte, 2012.

BRUZI, A. T.; *et al.* Comparação do tempo de reação entre atletas de Basquetebol, Ginástica Artística e não atletas. **Rev. Bras. Ciênc. Esporte**, Porto Alegre, v. 35, n. 2, p. 469-480, Jun. 2013.

CALIRI, G.; WALTHAM, M. Introduction to Analytical Modeling. In: **computer Measurement group**. CMG Conference. [S.l.], v. 1, p. 31-36, 2000.

CAUGHLIN, D. An integrated approach to verification, validation, and accreditation of models and simulations. **Simulation Conference Proceedings**, v. 1, p. 872-881, 2000.

CHARNIAK, E; MCDERMOTT, D. **Introduction to Artificial Intelligence**. Addison-Wesley Publishing Company, 1985, 701 p.

COHEN, L.; FELSON, M. Social change and crime rate trends: A routine approach. **American Sociological Review**, v. 44, n. 4, p. 588-608, Aug. 1979.

COSTA, R., PINHEIRO, P., C. Emergency simulation: model for evacuation in large public places. **International Journal of Professional Business Review**, v. 4, n. 1, p. 138-146, 2019.

CUCCI, N. J. **Projeto Semafórico: Legislação, Arranjo Físico e Sinalizações Relacionadas**. São Paulo: Manual Sinalização Semafórica CET-SP, 1999.

DAVID, N., MARIETTO, M. B., SICHMAN, J.; COELHO, H. The structure and logic of interdisciplinary research in agent-based social simulation. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 7, n. 3, p. 1-31, 2004.

DEMAZEAU, Y. From Interactions to Collective Behaviour in Agent-based Systems. In: **Proceedings of the European Conference on Cognitive Science**, Saint-Malo, France, p. 117-132, 1995.

DURKHEIM, E. **As regras do método sociológico**. 13.ed. São Paulo: Nacional, 1987. 128 p.

DYNES, R. R.; QUARANTELLI, E. L. **Community conflict: its absence and presence in natural disasters**. Newport, Disaster Center Research – Preliminary Paper 18, 1975. 20 p.

ERIKSEN, H. M.; DIMITROV, V.; ROHLIN, M.; PETERSSON, K.; SVENSATER, G. The oral ecosystem: implications for education. **Eur J Dent Educ**, v. 10, n. 4, p. 192-196, 2006.

FERBER, J.; GASSER, L. Intelligence artificielle distribuée. In: **International Workshop On Expert Systems & Their Applications**, v. 10, n. 9, France: [s.n], 1991.

FREEMAN, M. Theories of revolution. **British Journal of Political Science**, v. 2, p. 340–360, 1972.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena**. Florianópolis: Visual Books, 2008. 372 p.

FRUIN, J. J. The causes and prevention of crowd disaster. In **R. A. Smith and J. F. Dickie (Eds.)**, *Engineering for Crowd Safety*, p. 99-108. Amsterdam: Elsevier, 1993.

GALÁN, J. M.; IZQUIERDO, L. R.; IZQUIERDO, S. S.; SANTOS, J. I.; OLMO, R. D; LÓPEZ-PAREDES, A.; *et al.* Errors and artefacts in agent-based modelling. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 12, n. 11, Jan. 2009.

GILBERT, N.; TERNA, P. How to build and use agent-based models in social science. **Mind & Society**, v. 1, n. 1, p. 57-72, 2000.

GOLDSCHMIDT, R. R. **Uma Introdução à Inteligência Computacional: Fundamentos, Ferramentas e Aplicações**. Rio de Janeiro: IST-Rio, 2010. 142 p.

HASCELIK, Z.; BASGÖZE, O.; TÜRKER, K.; NARMAN, S.; ÖZKER, R. The effects of physical training on physical fitness tests and auditory and visual reaction times of volleyball players. **Journal of Sports Medicine and Physical Fitness**, v. 29, n. 3, p. 234-239, sep. 1989.

HAUGELAND, J. **Artificial Intelligence: the very idea**. Massachusetts: The MIT Press, 1985. 302 p.

HELBING, D.; JOHANSSON, A. **Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics**. Hungary : Institute for Advanced Study Collegium Budapest, 2010. 21 p.

HELBING, D. I.; FARKAS, P.; MOLNÁR, T.; VICSEK, M.; SCHRECKENBERG, S. Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations. In: **Pedestrian and Evacuation Dynamics**, p. 21-58, jan. 2002.

HELENE, A.; XAVIER, G. A construção da atenção a partir da memória. **Revista Brasileira de Psiquiatria**, v. 25, n. S2, p. 12-20, 2003.

HOWARD, J. A. A social cognitive conception of social structure. **Social Psychology Quarterly**, v. 57, n. 3, p. 210–227, 1994.

HUHNS, M. N.; STEPHENS, L. M. Multiagent Systems and Societies of Agents. In: WEISS, Gerhard (Ed.). **Multiagent Systems: A modern Approach**: [S.I.], MIT Press, p.79-120, 1999.

IBRAHIM, A. M.; VENKAT, I.; WILDE, P. The Impact of Potential Crowd Behaviours on Emergency Evacuation: an evolutionary game-theoretic approach. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 22, n. 1, p. 15, 2019.

JACQUES JUNIOR, J. C. S.; MUSSE, S. R.; JUNG, C. R. Crowd analysis using computer vision techniques: a survey. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 27,n. 66, p. 66-77, 2010.

JENNINGS, N. R. Agent-Oriented Software Engineering. In: Proceedings Of the 9th european workshop on modelling autonomous Agents in a multi-agent world: multi-agent system engineering. **Anais Springer-Verlag**, Germany, v.1647, p.1–7, 1999.

JUCHEM, M; BASTOS, R.M. **Engenharia de Sistemas Multiagentes: uma Investigação sobre o Estado da Arte**. 2001. 45 p. Relatório Técnico (Curso de Informática) - Faculdade de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Grande do Sul, 2001.

KO, S., SPEARPOINT, M., TEO, A. Trial evacuation of an industrial premises and evacuation model comparison. **Fire Safety Journal**, v. 42, n. 2, p. 91-105, 2007.

LEBON, G. L. **La Psychologie des Foules**. Paris: Presses Universitaires de France, 1981. 192 p.

LUCK, M., MCBURNEY, P., PREIST, C. **Agent Technology: Enabling Next Generation Computing**. [S.I.]: AgentLink, 2003. 194 p.

LUGER, G. F. **Inteligência Artificial: estruturas e estratégias para a solução**. 4 ed., 2004. 776 p.

LUHMANN, N. **La ciencia de la sociedad**. Tradução: Silvia P. Brunhilde E. Luis F. S. 1ª. ed. Barcelona: Anthropos, 1996.

MACAL, C., NORTH, M. Agent-based modeling and simulation. In: **Winter Simulation Conference (WSC)**, Proceedings of the, p. 86-98, 2009.

MAWSON, A. R. Understanding Mass Panic and Other Collective Responses to Threat and Disaster. **Psychiatry: Interpersonal and Biological Processes**, v. 68, n. 2, p. 95-113, 2005.

MCPHAIL, C. Blumer's theory of collective behavior. *The Sociological Quarterly*, v. 30, n. 3, p. 401-423, 1989.

MENDONÇA, M.; ARRUDA, L. V. R.; NEVES-JR., F. Cooperative Autonomous Agents Based on Dynamical Fuzzy Cognitive Maps. In: Elpiniki L. Papageorgiou. (Org.). **Intelligent Systems Reference Library**. Berlin: Heidelberg, v. 54, p. 159-175, 2014.

MOULIN, B.; CHAIB-DRAA, B. An Overview of Distributed Artificial Intelligence. In: O'Hare, G.; Jennings, N. R. (Eds.). **Foundations of distributed artificial intelligence**. [S.I.]: John Wiley and Sons, 1996.

MUUKKONEN, M. Continuing validity of the collective behavior approach. **Sociology Compass**, v. 2, n. 5, p. 1553-1564, Jul. 2008.

OLSSON, P. A.; REGAN, M. A. A comparison between actual and predicted evacuation times. **Safety Science**, v. 38, n. 2, p. 139-145, 2001.

OSARAGI, T. Modeling of Pedestrian Behavior and Its Applications to Spatial Evaluation. In: **International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems**, v. 2, n. 1, p. 836-843, Jul. 2004.

PAOLA, D. Corpo e Angústia. **Revista da t.** Porto Alegre, v. 1, n. 33, p.73-79, dez. 2007.

PARSONS, T. **The Structure of Social Action**. 1a ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1937. 368 p.

QUARANTELLI, E. L. The nature and conditions of panic. **The American Journal of Sociology**, Chicago, v. 60, n. 3, p. 267–275, 1954.

RIBEIRO, R.; ALMEIDA, L. Tempo de reação e inteligência. **Avaliação Psicológica**, v. 4, n. 2, p. 95-103, 2005.

RICH, E.; KNIGHT, K. **Inteligência Artificial**. São Paulo: Makron, 1992. 35 p.

ROGSCH, C.; KLINGSCH, W.; SEYFRIED, A.; WEIGEL, H. Prediction accuracy of evacuation times for high-rise buildings and simple geometries by using different software-tools. In: **Traffic and Granular Flow**, v. 1, p. 395-400, 2009.

ROLOFF, M. E. **Interpersonal Communication: The Social Exchange Approach**. London: Sage Publications, 1981.

RONCHI, E.; KULIGOWSKI, E. D.; RENEKE, P. A.; PEACOCK, R. D.; NILSSON, D. **The process of verification and validation of building fire evacuation models**. [S.l.]: NIST Technical Note 1822, 2013. 84 p.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Inteligência Artificial**. São Paulo: Elsevier Editora Ltda., 2004. 1016 p.

SABOIA, P. C. **Simulação de multidões com agentes brownianos e modelo de forças sociais modificado**. 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SANTOS, S. B.; MARTINEZ, F.; PACHECO, A.; PACHECO, I. Efeitos da fadiga muscular induzida por exercício no tempo de reação muscular dos fibulares em indivíduos sadios. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v. 12, n. 2, p. 85-89, 2006.

SARGENT, R. G. Validation and verification of simulation models. **Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: Simulation-a bridge to the future**, v. 1, n. 1, p. 39-48, Dez. 1999.

SCHADSCHNEIDER, A.; KLINGSCH, W.; KLUPFEL, H.; KRETZ, T.; ROGSCH, C.; SEYFRIED, A. Evacuation dynamics: empirical results, modeling and applications. In: MEYERS, B. (ed.). **Encyclopedia of Complexity and System Science**. Berlim: Springer, 2009, p. 3142-3176.

SERRÃO, F. C. C. **Modelo de Previsão de Carga de Curto Prazo Utilizando Redes Neurais e Lógica Fuzzy**. 2003. 13 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)

- Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SILVA, I. G. L. **Projeto e Implementação de Sistemas Multi-Agentes: O Caso Tropos**. 2005. 126 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2005.

SILVA, J. M. C.; BAVARESCO, N.; SILVEIRA, R. A. Projeto e Desenvolvimento de um Sistema Multiagentes para Objetos Inteligentes de Aprendizagem Baseado no Padrão SCORM. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 16, n. 1, p. 19-27, 2008.

SMELSER, N. J. **Theory of Collective Behavior**. New York: Free Press of Glencoe, 1962. 436 p.

SOUZA, W. P. **Reação ao Fogo dos Materiais: uma avaliação dos métodos de projeto de saídas de emergência em edificações não industriais**. 2007. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, 2007.

STILL, G.K., **Crowd dynamics**. 2000. 280 p. Tese (Doctor of Philosophy in Mathematics) - Department of Mathematics, University of Warwick, Reino Unido, 2000.

**SUN**. 2011. Disponível em: <http://www.java.com>. Acesso em: 15 dez. 2018.

TARDE, G. **Les lois de l'imitation: Étude sociologique**. Paris: Félix Alcan, 1890. 423 p.

TEIXEIRA, F. V. **Jade: Java Agent Development framework**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2010. 6 p.

TURNER, R. H.; KILLIAN, L. M. **Collective Behavior**. New Jersey: Prentice-Hall, 1957. 547 p.

VARAS, A.; CORNEJO, M. D.; MAINEMER, D.; TOLEDO, B.; ROGAN, J.; MUÑOZ, V.; *et al.* Cellular automaton model for evacuation process with obstacles. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 382, n. 2, p. 631- 642, Aug. 2007.

VEIGA, R.; CADETE, C. P. Evacuação de Multidões em Situação de Emergência. **ISLA - Instituto Superior de Gestão e Administração de Santarém**, Pará, v. 2, n. 1, p. 12, 2019.

WINSTON, P. **Artificial Intelligence**. 3a ed. United States of America: Addison-Wesley, 1992.

WOLFRAM, S. **Cellular Automata**. 1983. Disponível em: <http://www.stephenwolfram.com/publications/articles/ca/83-cellular/2/text.html>. Acesso em: 01 ago. 2018.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. Intelligent Agents: Theory and Practice. **The Knowledge Engineering Review**, v.10, n. 2, p.115–152, 1995.

YANG, L.Z.; ZHAO D.L.; Li J.; FANG T.Y. Simulation of the kin behavior in building occupant evacuation based on cellular automaton. **Building and Environment**, v. 40, n. 3, p. 411-415, Mar. 2005.

ZAMBONELLI, F.; JENNINGS, N. R.; WOOLDRIDGE, M. Organisational Abstractions for the Analysis and Design of Multi-Agent Systems. In: **Proceedings Of The 1st International Workshop On Agent-Oriented Software Engineering**, Ireland, Anais, p.127-141, 2000.

ZAMPIERI, T. D. **Acidentes de trânsito e comportamentos ansiosos**: uma revisão da literatura. 2010. Monografia (Pós-graduação em Psicologia do Trânsito) - Centro Universitário Dr. Edmundo Ulson, Araras, 2010.

ZHANG, J.; SEYFRIED, A. Comparison of intersecting pedestrian flows based on experiments. **Physica A**, v. 405, p. 316-325, 2014.

ZHENG, X.; ZHONG, T.; LIU, M. **Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches**. **Building and Environment**, v. 44, n. 3, p. 437-445, 2009.