

Universidade Federal Fluminense

YURI DA SILVA FERREIRA

**Um estudo investigativo sobre a comunicação em  
simulações de emergência e evacuação**

NITERÓI  
2009

Universidade Federal Fluminense

YURI DA SILVA FERREIRA

**Um estudo investigativo sobre a comunicação em  
simulações de emergência e evacuação**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Otimização Combinatória e Inteligência Artificial.

Orientador: Prof. Ana Cristina Bicharra Garcia

Co-Orientador: Prof. Adriana Santarosa Vivacqua

NITERÓI  
2009

Um estudo investigativo sobre a comunicação em simulações de emergência e evacuação

Yuri da Silva Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Otimização Combinatória e Inteligência Artificial.

Aprovada por:

---

Prof. Ana Cristina Garcia Bicharra / IC – UFF (Presidente)

---

Prof. Adriana Santarosa Vivacqua / DCT – UFF

---

Prof. Viviane Torres da Silva / IC – UFF

---

Prof. José Orlando Gomes / UFRJ

---

Prof. Jaime Simão Sichman / USP

Niterói – 2009

*“Filho, você vai conseguir, nós acreditamos em você!”*  
**Meus pais.**

À minha família, pela união, pelo amor, e pelo apoio incondicional.

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer as minhas orientadoras Prof. Ana Cristina e Prof. Adriana, por acreditarem, pelas críticas e incentivos, e acima de tudo pela oportunidade e confiança que me foi passada, desde o primeiro encontro, até os dias de hoje. Gostaria de agradecer pelos fins de semanas perdidos com correções, emails e discussões sobre meu trabalho.

A toda equipe do ADDLABS, companheiros diários de trabalho, e em especial a equipe do Bombeio, Fabiana, Frederico e Bruno, pela compreensão e pelas palavras de incentivo. As secretárias, Tânia e Adriana, que cuidaram de mim quase como mães, na ausência da minha família.

Aos amigos conquistados durante o mestrado Allisson, Daniel, Marcelo e Raphael, pelos momentos de descontração, apoio, e amizade. Ao Toca “Warley”, pela recepção em Niterói.

Aos amigos de infância, Bruno e Edinho, por me mostrarem que na vida podemos estudar e se divertir ao mesmo tempo. Que nunca se esqueceram de telefonar e me visitar, me tratando até hoje como se eu tivesse ido apenas ali à esquina de casa

Ao meu amor, Camila, por me fazer uma pessoa melhor, um homem melhor, mais honesto, compreensivo e “sentimental”. Você me ouviu com toda a paciência do mundo, me entendeu como só meus pais sabem me entender, e me amou como só você sabe me amar.

A todos que um dia, de alguma forma, me desejaram um bom estudo ou boas energias ao longo destes anos.

A Deus, que acredito e confio todos os dias de minha vida.

## Resumo

Um dos focos existentes na construção de simulações de emergência e evacuação está relacionado às análises sobre os comportamentos individuais e que emergem no grupo durante a evacuação do ambiente [40]. Os trabalhos de Pelechano et al. [31][32] apresentam o MACES, um sistema multiagente para simulações de emergência e evacuação, que combina a navegação baseada no modelo de forças sociais [18], com a busca por uma saída, através da exploração do ambiente ou da comunicação entre os agentes. Para desenvolver uma investigação comparativa sobre os efeitos da comunicação nos comportamentos dos agentes em cenários de emergência, nós desenvolvemos o MACES-D, uma extensão do MACES para ambientes dinâmicos, que não é previsto no MACES original. Através da investigação experimental sobre a comunicação, nós apresentaremos as co-relações existentes entre a comunicação, as capacidades dos agentes, a condições do ambiente e a taxa de sobrevivência da população nestes incidentes. Para validar a análise experimental, nós desenvolvemos uma estratégia de comunicação seletiva para os agentes, acreditando que a sua utilização pode aumentar a taxa de sobrevivência de uma população nestas situações. Os resultados apresentados ao longo da análise experimental mostraram padrões interessantes sobre a comunicação.

**Palavras-chave:** simulações de emergência e evacuação, comportamentos de agentes em situações de emergência, comunicação entre agentes em situações de emergência

## Abstract

One traditional focus of emergency simulations is related to analysis of individual and group behaviors that emerge during an evacuation [40]. Pelechano et al. [31][32] present the MACES, a multiagent system for Evacuation Simulation to combine local motion driven by a social forces model with high-level wayfinding using interagent communication and varied agent roles. To develop a comparative research on the effects of communication in the escape of agents in emergency scenarios, we developed MACES-D, an extension of MACES for dynamic environments, which is not considered in the original MACES model. Through this experimental research on communication, we present the co-relation between communication and agent behaviors, their capabilities, the environment conditions and the survival rate of the population in these situations. To validate the experimental analysis, we develop a selective communication strategy for agents, showing that with selective communication, the chances of agents survivors rate increase in emergency situations. The results presented throughout the experimental analysis showed interesting patterns of communication.

**Keywords:** evacuation simulation, agents behaviour in emergence situation, agents communication in emergence situation

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>9</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>12</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>13</b>
1.1. Motivação .....	15
1.2. Objetivos .....	17
1.3. Metodologia .....	18
1.4. Organização do trabalho .....	20
<b>2. Referencial teórico .....</b>	<b>21</b>
2.1. Agentes Inteligentes .....	21
2.2. Arquiteturas de agentes .....	24
2.3. Sistemas multiagentes .....	29
2.4. Comunicação entre agentes .....	29
<b>3. As simulações e emergência e evacuação .....</b>	<b>34</b>
3.1. Modelos Computacionais (Trabalhos correlatos) .....	35
3.2. Comportamento individual dos agentes .....	40
3.3. MACES – A Comunicação em situações de emergência [14][15] .....	42
<b>4. Maces-D: Sistema multiagente para simulações de emergência em ambientes dinâmicos</b>	<b>46</b>
4.1. Modelo do ambiente .....	47
4.2. Dinamicidade do Ambiente .....	48
4.3. Modelo do agente .....	52
4.4. Comportamento dos agentes no fogo .....	54
4.5. Comportamento individual dos agentes .....	56
<b>5. Análise sistemática da comunicação em ambientes dinâmicos .....</b>	<b>65</b>
5.1. Aplicação desenvolvida .....	65
5.2. Arquitetura de implementação .....	67
5.3. Configuração das simulações .....	69
5.4. Desempenho geral dos agentes .....	72
5.5. Análise sobre o tamanho da população .....	76
5.6. Análise sobre o número de focos de incêndio .....	82
5.7. Análise sobre o número de salas do ambiente .....	86
5.8. Análise da comunicação em populações heterogêneas .....	88
5.9. Quadro geral de análises .....	91
<b>6. A comunicação seletiva no Maces .....</b>	<b>97</b>

6.1.	Criação da função utilidade.....	98
6.2.	Discussões sobre a comunicação seletiva .....	103
6.3.	Comparativo entre o MACES e o MACES-D.....	109
<b>7.</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros.....</b>	<b>112</b>
7.1.	Considerações finais sobre a pesquisa .....	112
7.2.	Contribuições, Limitações e Trabalhos futuros.....	114

# Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Exemplo básico de uma arquitetura reativa. ....	26
<b>Figura 2:</b> Esquema genérico de uma arquitetura deliberativa. ....	27
<b>Figura 3:</b> Arquitetura híbrida hierárquica extraída de [32]. ....	28
<b>Figura 4:</b> Arquitetura híbrida horizontal extraída de [32]. ....	28
<b>Figura 5:</b> Exemplo de comunicação direta entre agentes. ....	31
<b>Figura 6:</b> Exemplo da comunicação indireta entre agentes. ....	32
<b>Figura 7:</b> Simulação publicada por Helbing et al. [21], com agentes buscando fugir de uma sala, com fogo (vermelho) se propagando pela mesma em um curto espaço de tempo. ....	38
<b>Figura 8:</b> Caracterização do ambiente em contexto[2]. ....	39
<b>Figura 9:</b> Seqüência de uma simulação com a emergência se expandindo pelo ambiente [2]. ...	40
<b>Figura 10:</b> Imagem do ambiente de simulação no Maces [15]. ....	43
<b>Figura 11:</b> Modelo de iteração entre os agentes no Maces [15]. ....	44
<b>Figura 12:</b> Imagem do ambiente, identificando os atributos que o compõem. ....	48
<b>Figura 13:</b> A figura (a) apresenta o modelo de células do trabalho [26] com suas direções possíveis de propagação do fogo a partir de uma célula qualquer. A figura (b) apresenta a adaptação feita para o nosso modelo, onde o fogo pode se propagar pelas salas, através das células, que são os pontos (x, y) do ambiente. ....	49
<b>Figura 14:</b> A imagem a esquerda foi extraída de Ntaimo [25], que mostra a propagação do fogo em um ambiente. A imagem à direita foi extraída de uma simulação realizada neste trabalho. Em vermelho são representadas as células que ainda possuem vizinhas não queimadas no ambiente. ....	52
<b>Figura 15:</b> Agentes enfrentando o fogo, na tentativa de encontrar uma saída. ....	55
<b>Figura 16:</b> Fluxograma do comportamento de pânico para situações de emergência, baseado no comportamento dos agentes seguidores do MACES. ....	58

<b>Figura 17:</b> O fluxograma apresenta o comportamento individual do agente líder no ambiente.	60
<b>Figura 18:</b> O fluxograma apresenta o comportamento individual do agente treinado na simulação.	62
<b>Figura 19:</b> Aplicação desenvolvido no NetLogo.	67
<b>Figura 20:</b> Arquitetura de implementação do Maces-D, para simular o comportamento dos agentes seguindo a descrição do MACES [14] [15].	68
<b>Figura 21:</b> Imagem de dois cenários de simulação, o primeiro com 196 salas e o segundo com 16 salas.	70
<b>Figura 22:</b> Desempenho geral dos agentes em simulações com populações homogêneas.	72
<b>Figura 23:</b> Formação de congestionamentos por grupos de agentes em pânico.	73
<b>Figura 24:</b> Desempenho geral dos agentes em simulações com populações heterogêneas.	74
<b>Figura 25:</b> Desempenho dos comportamentos em relação ao tamanho da população.	77
<b>Figura 26:</b> Comparativo entre simulações com agentes em pânico, com e sem comunicação.	79
<b>Figura 27:</b> Gasto excessivo com a comunicação entre agentes líderes.	81
<b>Figura 28:</b> Desempenho dos comportamentos em relação ao tamanho da população, em um ambiente com 7 focos de incêndio.	82
<b>Figura 29:</b> Variação dos focos de incêndio, nos testes efetuados com 200 agentes.	84
<b>Figura 30:</b> Expansão do fogo em ambientes com tamanhos de salas diferentes.	85
<b>Figura 31:</b> Desempenho geral dos agentes em função do número de salas do ambiente.	86
<b>Figura 32:</b> Diferença entre o desempenho de uma população de 20 agentes e uma população de 260 agentes, em relação ao número de salas do ambiente.	88
<b>Figura 33:</b> Comparação entre uma simulação com grupos homogêneos (50 agentes) e com grupos heterogêneos (140 agentes), ambas sem comunicação. Simulação com 4 focos de incêndio, em cenário com 10x10 salas.	89
<b>Figura 34:</b> Taxa de sobrevivência dos agentes em populações heterogêneas.	90
<b>Figura 35:</b> Congestionamentos formados pelos agentes seguidores. Agentes CT (branco), agentes CL (verde) e agentes CP (azul).	90

<b>Figura 36:</b> Os pontos em preto representam os limites escolhidos para os agentes em relação ao número de salas do ambiente. ....	100
<b>Figura 37:</b> Os pontos em preto representam exemplos de limites escolhidos para os agentes em relação aos focos de incêndio. ....	101
<b>Figura 38:</b> Exemplo de limites selecionados em uma determinada simulação, com o comportamento CT possuindo apenas limite inferior. ....	103
<b>Figura 39:</b> Comparativo entre a comunicação para grupos homogêneos de agentes. ....	105
<b>Figura 40:</b> Comparativo entre a comunicação para grupos heterogêneos de agentes. ....	106
<b>Figura 41:</b> Comparativo entre os mecanismos de navegação e a comunicação seletiva. ....	107
<b>Figura 42:</b> Desempenho dos comportamentos em relação ao tamanho da população. ....	108
<b>Figura 43:</b> Média de comunicações efetuadas pelos agentes CL. ....	109
<b>Figura 44:</b> Média de comunicações efetuadas pelos agentes CT. ....	109
<b>Figura 45:</b> Simulação com 200 agentes em salas 6x6. ....	110
<b>Figura 46:</b> Percentual dos sobreviventes ao longo do tempo de fuga do último agente a sobreviver na simulação. Simulação com 300 agentes (100 agentes para cada comportamento – pânico, liderança e treinamento). Cenário: 8x8 salas, 4 focos de incêndio. ....	111
<b>Figura 47:</b> Formação de arcos. Imagem a esquerda foi retirada do sítio que hospeda vídeos com as simulações produzidas a partir do trabalho de Helbing et al. [21]. Imagem a direita extraída de uma simulação realizada com o MACES-D. ....	115

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Resumo da taxonomia dos agentes, segundo [33]. .....	23
<b>Tabela 2:</b> Quadro geral com os cenários de comunicação entre os agentes. ....	63
<b>Tabela 3:</b> Tabela comparativa com os resultados gerais de todos os comportamentos nas simulações realizadas. Em negrito os resultados com grupos homogêneos e heterogêneos sem comunicação. ....	75
<b>Tabela 4:</b> Regras extraídas da análise sistemática sobre a comunicação em cenários de emergência. ....	91
<b>Tabela 5:</b> Teste de hipótese para as regras da variável número de salas. ....	93
<b>Tabela 6:</b> Teste de hipótese para as regras da variável Tamanho da população.....	94
Tabela 7: Teste de hipótese para as regras da variável focos de incêndio. ....	94
<b>Tabela 9:</b> Regras extraídas para o número de salas. ....	99
<b>Tabela 8:</b> Número médio de salas trafegadas pelos agentes sobreviventes nas simulações. ....	100
<b>Tabela 10:</b> Valores para a variável do fogo, em ambientes com 4x4 salas. ....	102
<b>Tabela 11:</b> Regras extraídas para os focos de incêndio. ....	102

# 1.Introdução

Eventos químicos, nucleares, biológicos e explosivos, causados por acidentes ou por ações terroristas, crescem ano a ano nos grandes centros urbanos, afetando milhões de pessoas [1]. Diante destes fatos, vê-se a necessidade da construção de sistemas que simulem situações reais, para avaliação e entendimento destes ambientes e cenários de emergência, com o objetivo de melhor projetar ambientes e treinamentos, que maximizem as chances de sobrevivência de indivíduos em grupo, nestas situações. A recente popularização do entretenimento digital, com novas aplicações, que simulam o comportamento humano em jogos ou filmes, oferece um meio simples para realização de experimentos não-massivos que permitam estudar o comportamento de agentes em ambientes hostis [2]. De acordo com Anastassakis et al. [3], Rickel et al. [4], e Gratch et al. [5], as aplicações potenciais destes ambientes podem ser empregadas em diversas áreas, relacionadas principalmente com treinamento, entretenimento e educação.

Uma das técnicas utilizadas para a construção destas simulações são os sistemas multiagentes (SMA). Os SMA são uma subárea da Inteligência Artificial Distribuída (IAD), que tem foco na análise do comportamento social através das ações e interações das entidades que compõem o sistema [6]. Conhecidos como agentes computacionais, estas entidades são dotadas de certa autonomia e devem ser capazes de perceber, raciocinar, decidir e, eventualmente, aprender em um ambiente comum [7].

A construção de um SMA para simulações de emergência é feita através de uma estratégia *bottom-up*, que simula as pessoas como agentes virtuais, criando comportamentos emergentes das regras operacionais que governam as interações entre os agentes [8]. Segundo Shendarkar et al. [9], os SMA produzem uma forma de experimentação que se aproxima das situações reais. Xiaoping et. al. [10] citam que, apesar de ser uma técnica computacionalmente

mais cara em relação às outras,<sup>1</sup> comumente usadas, a construção individual dos agentes com um comportamento único, facilita a criação de populações heterogêneas, percebendo-se com isto uma crescente utilização de SMA para a construção de multidões em situações reais ou de emergência [11].

Um dos focos existentes na construção de simulações de emergência e evacuação está relacionado às análises sobre os comportamentos individuais, que emergem no grupo durante a evacuação do ambiente [11]. O trabalho de Pan et al. [12] aponta que, em sua grande maioria, o motivo principal da emergência (explosões, fogo, gás) não é o responsável pelas vítimas destas situações. Os principais responsáveis estão relacionados ao comportamento não-adaptativo das pessoas nestas situações, comumente, conhecido como “pânico”, causado pelo tempo crítico e aumento do stress, resultando em ações destrutivas, que podem levar à morte, como por exemplo, navegar sem direção definida, atropelar outras pessoas na fuga ou causar congestionamentos em portas.

Os trabalhos de Silverman et al. [6] [13] apresentam como um dos desafios das simulações computacionais com pessoas, mostrar, realisticamente, como a comunicação afeta o comportamento individual de cada agente e como o modelo psicológico de cada agente pode reforçar os comportamentos que emergem em uma população.

Em nossas pesquisas sobre comportamentos de agentes em situações de emergência, os únicos trabalhos que utilizam a comunicação entre os agentes, como forma de auxílio na fuga, são os de Pelechano et al. [14] [15], fato que pode estar associado à não utilização de ambientes desconhecidos durante a fuga. Normalmente, os trabalhos da área servem-se de ambientes pequenos e familiares para os agentes, atacando problemas como a seleção da saída, para evitar congestionamentos [16] [17], a formação dos comportamentos emergentes no grupo [12] ou o

---

<sup>1</sup> Autômatos celulares [128], forças sociais [21], dinâmica de fluidos [129], modelos baseados em teoria dos jogos [17], dentre outros.

impacto da modelagem do ambiente nos comportamentos dos agentes [18]. Com um foco na comunicação em situações de emergência, nosso trabalho ataca o problema da baixa taxa de sobrevivência de pessoas reunidas em multidões na fuga de ambientes confinados, desconhecidos e dinâmicos, através de simulações de evacuação em incêndios. Sendo a utilização de ambientes dinâmicos, o diferencial em relação aos trabalhos de Pelechano et al. [14] [15]. A dinamicidade do ambiente referenciada aqui, esta relacionada apenas a propagação do evento causador da emergência pelo ambiente, neste caso o fogo.

### **1.1.Motivação**

Um das primeiras propostas de simulação de comportamento de grupos foi feita por Reynolds [19], que obteve resultados realísticos, através de regras simples associadas aos agentes, como evitar colisões e manter a velocidade, em função dos vizinhos, simulando pássaros virtuais. Nesta linha de raciocínio, Terzopoulos et al. [20] criaram simulações de peixes virtuais, bastante realísticas, dotando-os de visão local, poder de locomoção e comportamento, baseados em variáveis como fome e medo. .

Helbing et al. [21] simularam pedestres em pânico, utilizando um modelo de forças físicas sociais, baseado na equação de Newton, na qual a velocidade e a posição individual do agente resultam das forças de repulsão e interação entre os indivíduos e os obstáculos do ambiente. Apesar de muito aceito na literatura, por conseguir reproduzir comportamentos reais de multidões em situações de evacuação, o trabalho de Helbing se limita a um modelo com agentes homogêneos, sem levar em consideração as individualidades de cada pessoa, o que poderia dar mais realismo às simulações. Os trabalhos de Braun et al. [22] [2] apresentam um SMA baseado no modelo de forças sociais de Helbing, adicionando-lhe outros atributos físicos e cognitivos, possibilitando a criação de agentes e grupos heterogêneos, para atuar em ambientes de emergência dinâmicos.

Os trabalhos de Pelechano et al. [14] [15] apresentam o MACES<sup>2</sup> (*Multi-Agent Communication for Evacuation Simulation*), um SMA que combina o modelo de forças sociais proposto por Helbing, e a comunicação entre os agentes, para criar simulações de incêndio em ambientes desconhecidos. No MACES, a comunicação é utilizada como etapa de aquisição de conhecimento durante a exploração do ambiente em busca de uma saída. O MACES conseguiu, através de um modelo simples, reproduzir vários comportamentos, comuns às pessoas em situações de emergência, analisando a influência de comportamentos que envolvam liderança, altruísmo e pânico.

Além da utilização da comunicação, outra característica importante do MACES é o uso de ambientes desconhecidos para pessoas em fuga. Em sua maioria, os trabalhos relacionados à fuga de pessoas em ambientes de emergência, servem-se de cenários conhecidos pelos agentes. Não obstante, o trabalho de Sime [23] aponta que, comumente, as situações de emergência ocorrem em ambientes dos quais as pessoas têm um conhecimento parcial ou nenhum. Sime ainda cita que, quando o ambiente é conhecido, a tendência é ignorar as saídas de emergência. Neste caso, se as saídas principais estiverem bloqueadas, as pessoas terão a sensação de não saberem se encontrar. O trabalho de Waldau [24] cita que níveis crescentes de stress têm o efeito de diminuir o pleno funcionamento dos sentidos, o que leva a uma redução geral de sensibilização, diminuindo a capacidade de orientação rápida nas salas e áreas circunvizinhas às que a pessoa se encontra.

Assim, devido à utilização do modelo de forças sociais para a navegação dos agentes, da comunicação entre eles, e da utilização de ambientes desconhecidos, consideramos o MACES um bom ponto de partida para nossas pesquisas. No MACES, as simulações de emergência ocorrem em ambientes onde o fogo não se propaga, isto é, o ambiente de emergência onde os agentes atuam é estáticos, e nós acreditamos que utilizar os agentes ali criados, em ambientes

---

<sup>2</sup> Sistema Multiagente com comunicação para simulações de evacuação.

dinâmicos, diminuirá ainda mais a taxa de sobrevivência dos agentes, pois os agentes do MACES, não estão preparados para enfrentar situações onde o fogo se propaga pelo ambiente. Além disso, o ambiente estático não permite a criação de um estudo mais detalhado sobre a comunicação e sua influência na sobrevivência dos agentes.

Nossa motivação neste trabalho é estender o modelo MACES para ambientes dinâmicos, e estudar os efeitos da comunicação entre agentes, em cenários de emergência, de forma a maximizar a sobrevivência da população na fuga. Nós acreditamos que a utilização da comunicação verbal, de forma organizada e seletiva, pode aumentar a taxa de sobrevivência de uma multidão nestas situações, uma vez que no MACES, os agentes utilizam a comunicação sempre que encontram outros agentes pelo ambiente, perdendo muito tempo com esta ação.

## **1.2.Objetivos**

Nosso objetivo é apresentar uma investigação comparativa sobre os efeitos da comunicação em cenários de emergência. Através desta investigação, apresentaremos as correlações entre a comunicação, as capacidades dos agentes, as condições do ambiente e a taxa de sobrevivência da população nestes incidentes.

Para a realização das simulações utilizadas na investigação proposta, construímos uma extensão do MACES para ambientes dinâmicos (simulações de incêndio). Esta extensão, o MACES-D, foi realizada, tanto em função do ambiente, propagação do fogo, como em função dos agentes, o que corresponde a habilitá-los para atuar sobre cenários dinâmicos, o que não está previsto no MACES original.

O MACES utiliza um ambiente estático, e por isso sua métrica foi o tempo total de fuga dos agentes, uma vez que eles não “morrem”, pois o fogo não se propaga pelo ambiente, e ao encontrarem o fogo, os agentes apenas buscam outro caminho, não indo em direção ao mesmo. Neste trabalho, a métrica utilizada será a da taxa de sobrevivência dos agentes, comumente usada em outros trabalhos da área [2] [21]. A métrica original do MACES também será utilizada no trabalho, para comparações entre este e o MACES-D.

Em linhas gerais, e de acordo com o objetivo principal do trabalho, alguns objetivos secundários foram especificados:

- Estender o modelo MACES para atuação em ambientes dinâmicos, em que, numa situação de perigo, o agente pode fugir ou correr o risco de navegar na sala com fogo.
- Criar uma análise sistemática sobre as condições do ambiente e capacidades dos agentes, extraíndo correlações entre estas variáveis, a comunicação e a taxa de sobrevivência da população.
- Com as correlações sobre a comunicação, extraídas da investigação, criar uma estratégia de comunicação seletiva e adicioná-la ao modelo MACES-D, de forma a aumentar a sobrevivência dos agentes.

### **1.3. Metodologia**

Para alcançar os objetivos apresentados na seção anterior, este estudo foi dividido em três etapas.

A primeira constituiu-se na construção do MACES-D. Para essa construção, primeiramente foi desenvolvido um ambiente de simulação, análogo ao utilizado nos trabalhos do modelo MACES (baseado nos artigos que o apresentam), porém com a extensão da dinamicidade do ambiente, criada através da propagação dos focos de incêndio. A propagação do fogo pelo ambiente foi feita com base no trabalho de Ntamo et al. [25], De forma objetiva, o modelo-base de propagação do fogo foi resumido para atender às expectativas propostas neste estudo. O ambiente produzido servirá como base para nossa investigação. Após o desenvolvimento do ambiente, descreveu-se, de forma mais detalhada o modelo do agente e os comportamentos individuais que cada um pode ter nas simulações. Estas descrições são similares às do MACES, com o diferencial da atuação sobre ambientes com propagação do fogo. Para isso, a forma como o agente age quando encontra fogo no ambiente foi modificada, para que, além de fugir, possa explorar a sala, mesmo que haja fogo.

A segunda etapa consistiu-se em uma investigação experimental da influência da comunicação na sobrevivência dos agentes, nas mais diversas condições do ambiente. A variável

dependente (métrica) utilizada foi a taxa de sobrevivência da população de agentes, e as independentes foram:

- Tamanho da população de agentes
- Comportamento do agente
- Número inicial de focos de incêndio
- Número de cômodos do ambiente.

As variáveis relacionadas à atuação e construção dos agentes (velocidade, custo de execução das ações, aceleração, tamanho) e do ambiente (taxa de propagação do fogo), foram consideradas variáveis de controle, por estarem relacionadas a padrões comuns, a pessoas ou ambiente e, de alguma forma, porque já foram descritas em outros trabalhos, e não serão modificadas nas simulações. Os resultados extraídos destas simulações elucidaram as mais diversas correlações entre a comunicação, os comportamentos dos agentes, as condições do ambiente e a taxa de sobrevivência da população.

A terceira etapa do trabalho consistiu na criação de um processo simples de comunicação seletiva para os agentes do MACES-D, que proporciona o aumento da taxa de sobrevivência dos mesmos. Este processo foi construído com base nos resultados da análise experimental da etapa anterior, na qual constatou-se que, em diversas situações, a comunicação entre os agentes era responsável pela diminuição da taxa de sobrevivência da população. Assim, um processo de decisão sobre a comunicação foi acoplado ao modelo MACES-D, para que os agentes decidam, através de *limites* pré-estabelecidos, se vale a pena comunicar-se ou não. Estes *limites* foram definidos com base em uma análise quantitativa dos dados sobre a sobrevivência dos agentes nas simulações. O objetivo deste novo processo não é criar um novo modelo para ensinar às pessoas como agir nas situações de emergência, mas apenas validar os resultados da investigação, mostrando a importância dos estudos da comunicação em cenários de emergência.

Ainda nesta etapa, foram realizadas diversas simulações, com dois objetivos distintos:

1. validar o modelo de decisão sobre a comunicação, mostrando que ele aumenta a sobrevivência dos agentes;

2. efetuar comparações entre o MACES e o MACES-D. As etapas dois e três buscaram também mostrar, através de imagens da simulação, os comportamentos emergentes na população durante a fuga.

## **1.4. Organização do trabalho**

Além deste capítulo de introdução, o trabalho tem mais cinco capítulos, descritos a seguir.

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão da literatura estudada, envolvendo basicamente agentes, sistemas multiagentes e comunicação entre agentes

O capítulo 3 apresenta uma revisão sobre as simulações de emergência, expondo os modelos computacionais existentes e os comportamentos comuns às pessoas em fuga e em emergências. Serão apresentados também, o MACES, assim como alguns trabalhos relacionados ao tema deste trabalho.

O capítulo 4 apresenta a extensão do Maces para ambientes dinâmicos (MACES-D), e o modelo dos comportamentos utilizado nas simulações: comportamento de pânico, comportamento de liderança, e os agentes que se comportam como pessoas treinadas, que já conhecem o ambiente.

O capítulo 5 apresenta a investigação experimental desenvolvida, analisando as relações entre a comunicação, os comportamentos dos agentes e as condições do ambiente, na taxa de sobrevivência da população.

O capítulo 6 apresenta o modelo de comunicação seletiva, os resultados realizados para validar este modelo, e as análises comparativas entre o MACES e o MACES-D.

Por último, o capítulo 7 traz as conclusões do trabalho, contribuições e possíveis trabalhos futuros.

## 2.Referencial teórico

Neste capítulo serão abordados, de forma concisa, os principais aspectos da área de sistemas multiagentes e de simulações de evacuação e emergência, de forma a contextualizar o trabalho proposto. Inicialmente, apresentam-se os principais conceitos relacionados ao termo *agente*. A seção 2.2 traz os conceitos dos *sistemas multiagentes* e a seção 2.3, uma breve descrição dos conceitos relacionados à *comunicação* entre agentes.

### 2.1.Agentes Inteligentes

As pesquisas nas áreas de *agentes* e *sistemas multiagentes* trazem uma vasta linha de definições para o termo “agentes computacionais”. No entanto, a grande maioria concentra as definições nos trabalhos de um pequeno grupo de autores [26] [27][7] [28]. Estes trabalhos buscam não só responder à pergunta “O que é um agente computacional?”, como também, descrever sua capacidade de atuação, propriedades e abrangência. Nós consideramos completa a definição de [29], extraída do trabalho [30], onde um agente é considerado:

*"Uma entidade física ou virtual capaz de interagir em um ambiente; capaz de se comunicar com outros agentes; movida por um conjunto de intenções; que possui recursos próprios; capaz de perceber o ambiente em que estão imersos; possuindo competências e oferecendo serviços; cujo comportamento tende a atingir seus objetivos utilizando suas competências e os recursos que dispõe, levando em conta sua percepção, suas representações internas e as comunicações que recebe".*

O trabalho de Jennings [31] apresentou uma série de características para definir um agente computacional. Segundo o autor, tais características devem estar implícitas nas definições do termo agente:

- entidades de resolução de problemas claramente identificáveis e com interfaces e limites bem definidos;

- situados em um ambiente em particular, recebem entradas relacionadas ao estado deste ambiente e agem sobre ele através de atuadores;
- projetados com um propósito específico, de forma que tenham objetivos próprios a alcançar;
- autônomos, na medida em que têm controle sobre o seu estado interno e seu comportamento;
- capazes de exibir comportamento flexível na resolução de problemas, quando tentam atingir seus objetivos.

Além de definir os agentes como “uma peça de hardware ou um sistema computacional baseado em software”, o trabalho de [32] caracteriza um agente com as seguintes propriedades:

- autonomia: operar sem intervenção direta de humanos ou de outros agentes, e controlar suas ações e estados internos;
- reatividade: responder de forma rápida às mudanças do ambiente;
- pró-atividade: exibir comportamentos direcionados aos objetivos;
- habilidade social: interagir com outros agentes.

### 2.1.1. Taxonomia de agentes

O trabalho de Garcia e Sichman [33] propôs uma taxonomia para os agentes, apresentando-os como um tipo especial de sistema computacional, classificando-os de acordo com alguns eixos<sup>3</sup>:

- eixo de atuação: O agente pode atuar isoladamente ou interagindo com outros agentes de forma social;
- eixo cognitivo: O agente pode ter um modelo racional de decisão (cognitivo), ou apenas agir reagindo aos estímulos provocados pelo ambiente (reativo). Ele pode ter também um modelo de representação interna do ambiente e de outros agentes;
- eixo de foco: O agente pode possuir similaridades físicas ou comportamentais dos humanos.

A Tabela 1 apresenta, de forma resumida, esta taxonomia de agentes.

**Tabela 1:** Resumo da taxonomia dos agentes, segundo [33].

Foco	Taxonomia de agentes					
Atuação	Social			Isolada		
Cognitivo	Reativo		Cognitivo		Cognitivo	
Foco	Física	Comportamental	Física	Comportamental	Física	Comportamental

Os agentes utilizados neste trabalho utilizam o eixo cognitivo, com foco nas similaridades comportamentais, atuando de forma social.

---

<sup>3</sup> Aqui, são apresentados apenas os eixos utilizados neste trabalho.

## 2.2.Arquiteturas de agentes

Uma arquitetura de agentes indica um modelo para a implementação da cognição e processo de decisão destes. Ela é responsável por definir como um agente se comporta durante sua interação com o ambiente e/ou outros agentes [34]. Uma arquitetura só pode ser definida após conhecidas as tarefas que o agente irá realizar e quais seus papéis no ambiente. O trabalho de Mowbray [35] cita, como características importantes, na criação ou na escolha de uma arquitetura para agentes, a simplicidade, a funcionalidade, a expansibilidade e o isolamento ou portabilidade. Na Inteligência Artificial (IA) há várias classificações para as arquiteturas de agentes. Uma das mais aceitas é a de Wooldridge e Jennings [27], que apresenta uma descrição mais geral das arquiteturas de agentes, baseando-se na forma de construção dos agentes para dividi-las em reativas, deliberativas e híbridas. Estas arquiteturas serão descritas nas subseções seguintes.

Uma arquitetura de particular destaque na literatura é a arquitetura BDI<sup>4</sup>, criada por Rao e Georgeff [36]. Ela é considerada como um tipo específico de arquitetura deliberativa, onde os agentes têm estados internos que interagem com os do ambiente, no qual estes estados correspondem aos estados mentais humanos, aproximando assim a forma de raciocínio do agente à forma de raciocínio dos seres humanos. O modelo BDI é, essencialmente, uma transposição computacional do modelo de raciocínio proposto por Bratman [37] [38] [39], baseado na utilização de crenças (estados conhecidos do ambiente), desejos (estados objetivos do ambiente) e intenções (mecanismos para atingir os desejos), como estados mentais fundamentais e necessários na descrição do raciocínio do agente. O trabalho de Shendarkar et al. [9] apresenta simulações de emergência, com agentes modelados através da arquitetura BDI, os autores apresentam alguns pontos como vantagens na sua utilização: (1) a modelagem baseada em estados mentais, facilitando a construção de agentes que simulam o comportamento humano

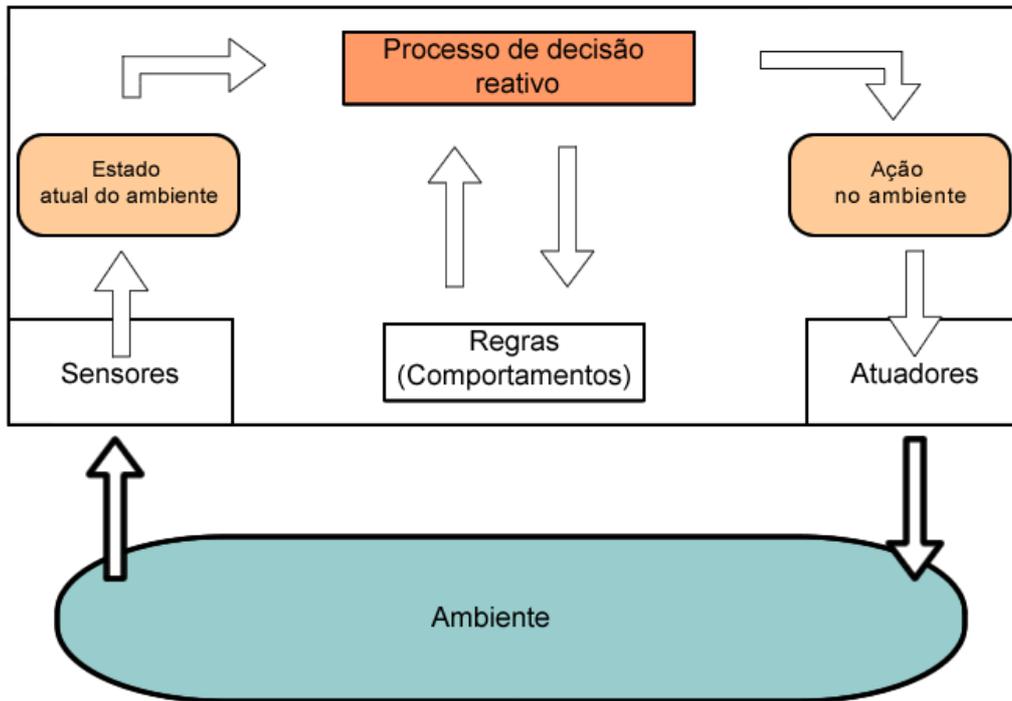
---

<sup>4</sup> Do inglês: Belief, Desires and Intentions (Crenças, Desejos e Intenções)

[40], (2) além de ser uma arquitetura já consolidada com muitos trabalhos e softwares desenvolvidos a partir de sua estrutura.

### **2.2.1. Arquiteturas reativas**

As arquiteturas reativas surgiram com a ideia de que problemas complexos podem ser resolvidos a partir de comportamentos simples. Basicamente, uma arquitetura reativa possui um conjunto de regras pré-estabelecidas, no qual a ação do agente se baseia apenas no estado atual do ambiente para escolher a regra de atuação (Figura 1). Os agentes modelados em uma arquitetura reativa são conhecidos como reativos ou não-deliberativos. São entidades simples, que não têm capacidade de raciocínio ou planejamento, considerados também incapazes de raciocinar sobre ações passadas para realizar ações futuras. Wooldridge e Jennings [27] citam a simplicidade, o desempenho computacional e a grande tolerância a falhas, como vantagens de sua utilização na concepção de SMA. Como desvantagens, Reis [41] cita as decisões baseadas unicamente nas informações da percepção atual, a hierarquia de comportamentos pré-fixada e a incapacidade de realizar ações que impliquem a execução de planos de longo prazo. Um bom exemplo de arquitetura reativa é a proposta por Brooks [42], chamada de arquitetura de subordinação, que tem como principal característica a ativação simultânea dos comportamentos (regras de atuação do agente), que são organizados em níveis, criando a ideia de uma hierarquia entre os comportamentos.



**Figura 1:** Exemplo básico de uma arquitetura reativa.

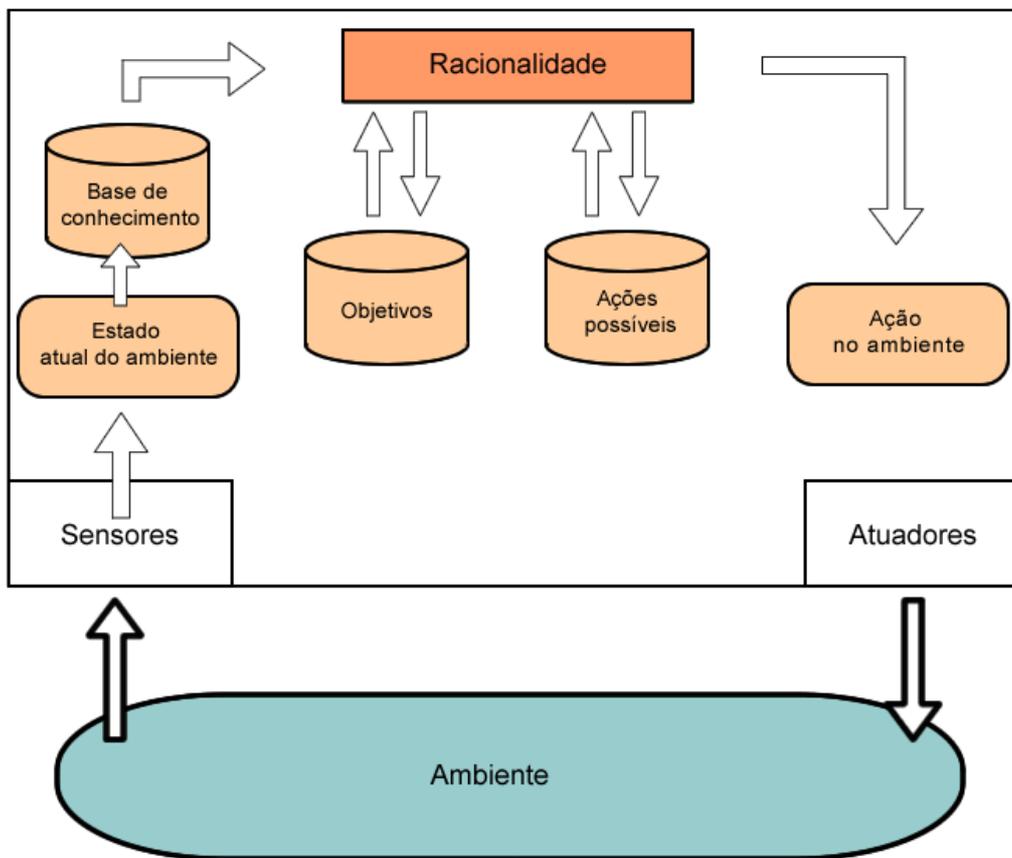
### 2.2.2. Arquiteturas deliberativas

Nas arquiteturas deliberativas, os agentes podem manter informações sobre os estados conhecidos do ambiente e sobre os outros agentes, como seus estados ou capacidades, por exemplo. Essa arquitetura se caracteriza pela complexidade dos agentes, que normalmente apresentam mecanismos de inferência de decisão robustos e interações mais sofisticadas (Figura 2).

Segundo Reis [41], as arquiteturas deliberativas seguem a abordagem clássica da IA, na qual os agentes atuam com pouca autonomia e têm modelos simbólicos explícitos dos seus ambientes. Estas arquiteturas interpretam, em grande parte, os agentes como parte de um sistema baseado em conhecimento.

Os agentes modelados a partir de uma arquitetura cognitiva são denominados cognitivos ou deliberativos. Eles raciocinam e decidem sobre a escolha dos objetivos, podem criar planos de

longa e curta duração, escolhendo como agir de acordo com o estado atual do ambiente e de experiências passadas. Uma das dificuldades encontradas nas arquiteturas deliberativas está na tradução do ambiente para a descrição simbólica utilizada pelo agente. Ambientes mais complexos exigem um nível de percepção do agente mais elaborado, para que eles consigam atualizar seu modelo simbólico do ambiente utilizado no seu raciocínio.



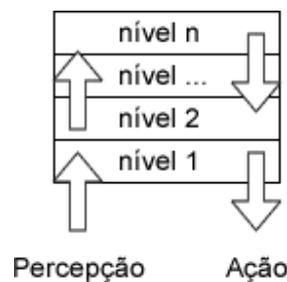
**Figura 2:** Esquema genérico de uma arquitetura deliberativa.

### 2.2.3. Arquiteturas híbridas

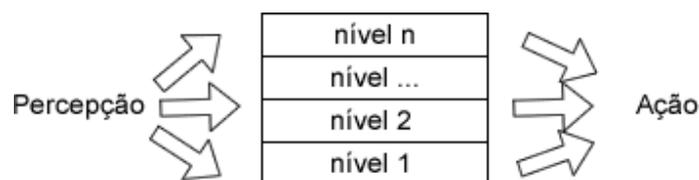
Considera-se uma arquitetura híbrida quando existe combinação de características relacionadas às arquiteturas cognitivas e reativas. Esta união acontece devido às limitações das

arquitecturas reativas na decisão sobre situações mais complexas, e à alta complexidade e tempo de resposta das arquitecturas deliberativas em situações que exigem respostas rápidas no ambiente.

Em sua maioria, as arquitecturas híbridas categorizam as funcionalidades do agente em camadas com nível hierárquico, no qual as camadas reativas normalmente têm prioridade sobre as deliberativas (Figura 3), permitindo ações rápidas em determinados estados do ambiente. Podem também ter um modelo de atuação horizontal, no qual todas as funcionalidades dos agentes estão dispostas no mesmo nível de atuação (Figura 4).



**Figura 3:** Arquitetura híbrida hierárquica extraída de [32].



**Figura 4:** Arquitetura híbrida horizontal extraída de [32].

A arquitetura utilizada na construção dos agentes deste estudo foi a deliberativa, devido à natureza dos comportamentos dos agentes, que busca simular as características humanas de raciocínio, visto que a arquitetura reativa limitaria as ações planejadas dos agentes nestas situações. Ela foi construída, a partir da arquitetura original do maces, e será descrita no capítulo 4.

### **2.3.Sistemas multiagentes**

Os SMA são uma subdivisão da Inteligência Artificial Distribuída (IAD), que buscam estudar o comportamento inteligente em uma coleção de agentes inteligentes autônomos, que trabalham para um objetivo global único ou para objetivos individuais, podendo interagir entre si para alcançá-los [43]. Em [32], Wooldridge conceitua um SMA como sistemas compostos de múltiplos elementos de computação, que são agentes computacionais que interagem entre si.

Para Reis [41], as duas características fundamentais dos agentes de um SMA são: serem capazes de agir de forma autônoma, tomando decisões, levando à satisfação dos seus objetivos; serem capazes de interagir com outros agentes, utilizando protocolos de interação social inspirados nos humanos e incluindo, pelo menos, algumas das seguintes funcionalidades: coordenação, cooperação, competição ou negociação.

Em SMA, a existência do agente precede e independe da existência de um problema global. Embora participe de uma comunidade, o agente é visto como uma entidade autônoma, direcionada por motivações e objetivos locais próprios [44]. Esse comportamento pode ser cooperativo ou competitivo, dependendo do modelo de racionalidade do agente e dos estados possíveis do ambiente.

Para Jennings [31], a garantia para um pleno funcionamento de um ambiente multiagente, faz com que os agentes sejam capazes de atuar com autonomia e troquem informações para alcançar seu objetivo, ou o do grupo no qual está inserido. Ele fala ainda da necessidade da existência de um mecanismo de comunicação, para que os agentes coordenem suas ações e comportamentos.

### **2.4.Comunicação entre agentes**

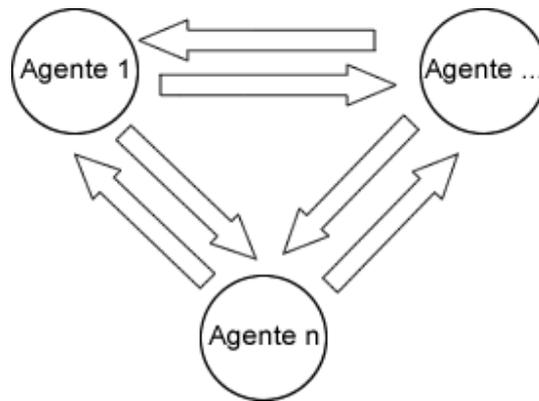
Nos SMA a comunicação é tratada de forma a tentar aproximar a comunicação entre as entidades computacionais da comunicação falada humana. Isso acontece não só em relação à linguagem utilizada, semântica ou vocabulário, mas também em relação a sua utilização, isto é, utilizar a comunicação de forma a trazer benefícios para os agentes, como a cooperação ou a

formação de coalizões, que podem evitar gastos excessivos, economizando tempo e otimizando resultados.

Como já citado na seção 2.1 deste capítulo, os agentes têm capacidade de perceber o ambiente e interagir com outros agentes. Reis [41] afirma que é usual incluir, no modelo do agente, receptores para a percepção da comunicação e um módulo para controlar a comunicação do agente. Este módulo deve ter um canal direto com o núcleo de racionalidade do agente, uma vez que as decisões de comunicar, quando e para quem, devem ser tomadas pelo processo de decisão das ações do agente.

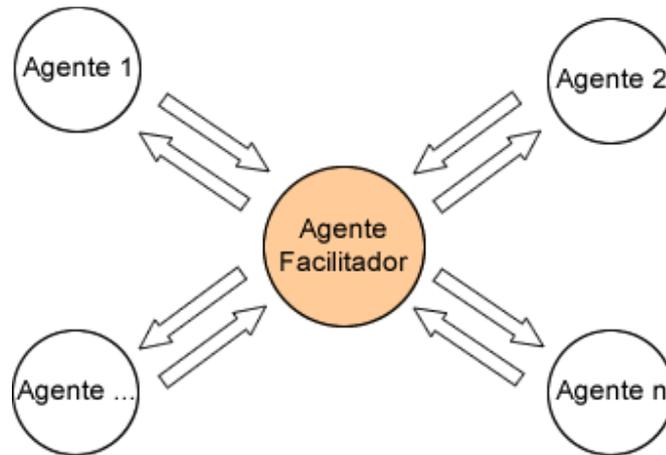
O trabalho feito por Huhns e Stephens [45] foi um dos primeiros a classificar as possíveis formas de dispor os relacionamentos entre os agentes, denotando suas arquiteturas básicas de comunicação em apenas duas, e a partir delas, outras topologias podem ser criadas:

- **Comunicação direta:** também conhecida como comunicação em nível, na qual cada agente pode se comunicar diretamente com qualquer outro (Figura 5). Desta forma, eles podem criar estruturas de maneira dinâmica, para realizar uma tarefa específica, compartilhando especificações, conhecimento, capacidades ou necessidades, de forma que cada agente possa tomar as decisões relativas aos seus objetivos. A falta de um elemento coordenador na comunicação pode gerar problemas para esta arquitetura e, dependendo da forma como o SMA foi projetado, pode originar o bloqueio do sistema se, por exemplo, todos os agentes decidirem enviar mensagens ao mesmo tempo.



**Figura 5:** Exemplo de comunicação direta entre agentes.

- **Comunicação hierárquica:** também conhecida como comunicação assistida, na qual os agentes fazem a comunicação através de um agente "facilitador" (Figura 6). Nestes casos, existe um sistema hierárquico, no qual os agentes "facilitadores" controlam a comunicação de seus grupos, respectivamente, e a comunicação entre grupos se faz através do agente "facilitador". Essa estrutura tem como vantagens: (i) dispensar mecanismos para localização de agentes e (ii) reduzir, significativamente, a quantidade de comunicação no sistema. Assim, se um agente  $i$  desejar enviar uma mensagem para um agente  $j$ , terá primeiro que enviar para o "agente facilitador", que se encarregará de encaminhar ao destinatário. Como desvantagem, aponta-se que a existência do "agente facilitador" pode gerar um gargalo na comunicação, ou por exemplo, caso ele não funcione, o sistema pode parar.



**Figura 6:** Exemplo da comunicação indireta entre agentes.

Outra maneira de viabilizar a comunicação entre agentes é disponibilizar um repositório de dados compartilhados, nos quais informações podem ser postadas e recuperadas. A ideia é ter um espaço de memória acessível a todos os agentes (quadro-negro), onde cada um, ao perceber no ambiente alguma informação nova, coloca-a neste espaço, para que todos os outros agentes possam ver. Geralmente, o tipo de comunicação mais utilizado entre agentes é o envio de mensagens diretas, devido à privacidade e à rapidez desta forma de comunicação, enquanto que a comunicação via quadro-negro obriga à implementação de metodologias de sincronização de acesso ao mesmo. No entanto, a escolha do modelo de comunicação a ser utilizado em um sistema vai depender das características particulares do mesmo, como objetivo do sistema, nível de troca de mensagens, e volume de mensagens que irão trafegar pelo sistema, dentre outras.

A comunicação entre agentes tem dois fins principais: compartilhamento de conhecimento, informações, crenças ou planos e a coordenação das atividades dos agentes. Não obstante, para se ter uma comunicação aceitável, a sintaxe, a semântica e o vocabulário das mensagens devem estar bem definidos pela aplicação [41]. No trabalho feito por Reis, o autor analisa alguns pontos que devem ser questionados:

- **O que comunicar?** Independentemente do fim a que se destinam (por exemplo, compartilhar conhecimento ou melhorar a coordenação entre agentes), as mensagens enviadas não podem conter toda a informação que o agente emissor possui. Este

agente, considerando as características do canal de comunicação e o fim a que esta se destina, tem que raciocinar sobre a informação que seria mais importante incluir nas mensagens.

- **Quando comunicar?** Sobretudo em domínios com reduzida largura de banda, ou tempo crítico disponível para operações de comunicação, é muito importante decidir corretamente o momento temporal em que será efetuada a comunicação. Por vezes, se a informação a comunicar não for muito importante, é preferível não realizá-la, deixando desta forma, a largura de banda do canal de comunicação disponível para outros agentes presentes no sistema, ou realizando outras ações mais úteis, no momento.
- **A quem comunicar?** As mensagens podem ser enviadas para um, vários ou todos os agentes. A decisão do remetente da mensagem assume particular importância nos casos de comunicação direta entre dois agentes.

A comunicação utilizada pelos agentes, neste estudo, busca simular um modelo de comunicação entre as pessoas nas situações de emergência, por isso podemos classificá-las como uma comunicação verbal direta, em que um agente, quando quer falar com outro, se dirige a este último, sem intermediários. Os modelos de comunicação entre os agentes na emergência, serão descritos no capítulo 4.

### **3.As simulações e emergência e evacuação**

Acidentes de natureza grave, como os causados por incêndios, ameaças de bombas, liberação de gases tóxicos, necessitam da evacuação imediata do local da ocorrência. Estas evacuações, normalmente, têm sérias restrições de ordem temporal e de ordem física [11], e a sua não completação pode gerar danos catastróficos ao evento, incluindo-se perda de vidas humanas. Pan et al. [12] afirmam que os responsáveis pelo fracasso das evacuações são em sua maioria, além do ambiente mal projetado, os comportamentos emergentes da multidão (congestionamento em saídas causados pelo pânico, atropelamentos, falta de organização). A motivação na reprodução de tais situações, através de simulações computacionais, se dá principalmente pela não eficiência das simulações com seres humanos, uma vez que vários fatores devem ser desconsiderados, para garantir a segurança das pessoas envolvidas nestes tipos de simulações [2].

O foco dos estudos nas simulações de emergência deve ser direcionado para três tipos de análise: do ambiente (topologia, condições de fuga, disposição das saídas, largura das portas, obstáculos); do gerenciamento da situação (resgate, processos de salvamento, controles de evacuação); das características psicológicas, sociais e comportamentais de cada pessoa e dos grupos participantes da evacuação. As pesquisas iniciais se concentraram, em sua maioria, nas duas primeiras análises, porém vem mostrando grandes progressos nos estudos voltados para a área comportamental das pessoas nas evacuações [46]. Santos e Aguirre [11] apontam como fatores responsáveis por essa concentração inicial apenas nas duas primeiras áreas, a dificuldade de entender as propriedades de uma multidão, devido à grande variedade de indivíduos e ao grande número de características individuais que devem ser consideradas para se obter um comportamento realístico. Para isso, Braun et al. [2] consideram que é crucial determinar as simplificações adequadas, tornando viáveis estes sistemas com os níveis de liberdade que garantam que as simulações atinjam os objetivos pretendidos. Vários estudos comprovaram a necessidade e a importância da realização de treinamento e monitoramento destas situações [46] [11], que além de evitar desastres maiores, podem servir para explicar o comportamento das pessoas durante a emergência. Este entendimento deve ser a base para a construção de soluções que aumentem a segurança das pessoas durante as evacuações.

### **3.1. Modelos Computacionais (Trabalhos correlatos)**

O modelo computacional utilizado na construção das simulações é a chave para uma reprodução mais realística destas situações, e deve, por sua vez, possuir ligação direta com estudos da área de ciências sociais, com o objetivo de garantir comportamentos individuais e emergentes em grupos, fiéis às situações reais. Várias abordagens vêm sendo usadas para a construção dos modelos computacionais das simulações de emergência. Algumas podem ser utilizadas em conjunto, a fim de proporcionar simulações mais realísticas, de acordo com os objetivos propostos de cada estudo. O trabalho de Xiaoping et al. [10] apresentou uma revisão sobre as principais abordagens empregadas na construção de simulações de emergência, dentre as quais, destacam-se os autômatos celulares [47] [48], os sistemas baseados em agentes e os modelos de partículas baseados na física.

Os autômatos celulares foram propostos, inicialmente, por Von Neumann, utilizando a biologia e a Teoria dos Autômatos. Eles são considerados um sistema dinâmico discreto, criado sobre uma grade, dividido em células idênticas. Cada célula tem seu valor sobre o sistema, que evolui no tempo, de acordo com os valores das células vizinhas e das regras especificadas para o sistema. Xiaoping et. al. [10] citam que uma das vantagens da utilização de autômatos na produção de simulações de emergência é a baixa carga computacional usada, além da facilidade de utilização em união com outros modelos. Apesar da baixa complexidade computacional apresentada pelos autômatos celulares, os SMA são o modelo computacional mais utilizado nas simulações de emergência [10]. Isso acontece devido a sua facilidade de implementação e adaptação, para uma reprodução mais realística dos comportamentos humanos. Nas simulações com SMA, cada agente pode ser considerado uma pessoa, o que facilita a construção de características individuais aos agentes, permitindo a criação de populações totalmente heterogêneas.

Os modelos baseados em partículas físicas receberam ampla atenção, após os resultados apresentados por Helbing et al. [21], mostrando a sua capacidade de descrever realisticamente as formações dinâmicas comuns às fugas de pessoas. Nestes modelos, as pessoas são representadas por partículas, e seu movimento é determinado por meio de equações, resolvidas numericamente,

de acordo com as posições atuais de cada partícula, e os estados em que cada uma se encontra, a cada instante de tempo [49]. A dificuldade encontrada em sua utilização diz respeito ao custo computacional da resolução dessas equações, principalmente para simulações com um grande número de partículas, o que muitas vezes resulta em simplificações necessárias à utilização do modelo.

A seguir são apresentados alguns trabalhos correlatos que serviram de base para a construção deste trabalho.

### 3.1.1. Helbing et al. [21]

Helbing et al. [21] apresenta um modelo de forças físicas e sociopsicológicas, a fim de descrever o comportamento de multidões humanas em situações de pânico. Esse modelo utiliza um sistema de partículas para representar os indivíduos, no qual cada partícula  $i$  de massa  $m_i$  tem um valor de velocidade desejado  $v_i^0$ , em uma direção indicada por um vetor unitário  $\vec{e}_i^0$ , tendendo a adaptar sua velocidade instantânea  $v_i$  a essas condições desejadas, dentro de certo intervalo de tempo  $\tau_i$ . Simultaneamente, as partículas tendem a manter uma distância dependente da velocidade em relação às outras partículas  $j$  e paredes  $w$ , usando forças de interação  $\vec{f}_{ij}$  e  $\vec{f}_{iw}$ . A mudança da velocidade no tempo  $t$  é dada pela equação dinâmica:

$$m_i \frac{d\vec{v}^i}{dt} = m_i \frac{\vec{v}_i^0(t)\vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} \vec{f}_{ij} + \sum_w \vec{f}_{iw}$$

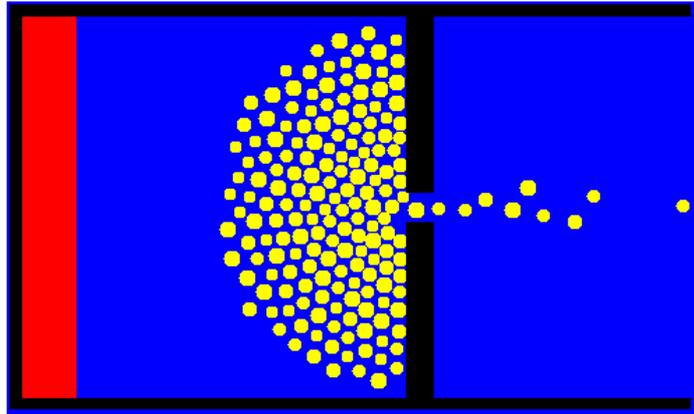
Nesta equação,  $\frac{d\vec{v}^i}{dt}$  representa a aceleração da  $i$ -ésima partícula e os termos no lado direito representam a força resultante atuando sobre ela, representando a segunda Lei de Newton ( $\vec{F}_r = m * \vec{a}$ ) para corpos com massa constante. A força de interação entre as partículas  $\vec{f}_{ij}$

representa a tendência psicológica de existir uma força de repulsão entre as partículas, calculada pela fórmula:

$$A_i \exp[r_{ij} - d_{ij}/B_i] n_{ij}$$

sendo  $A_i$  e  $B_i$  constantes,  $d_{ij}$  a distância entre as partículas,  $r_{ij}$  a soma dos raios de cada partícula e  $n_{ij}$  o vetor normalizado entre as posições das partículas  $i$  e  $j$ . Helbing et al. consideraram que esta força será ativada sempre que as partículas estiverem a uma distância mínima de dois metros. O mesmo é aplicado para a força entre partículas e muros ou partículas e obstáculos.

O modelo de Helbing gerou vários resultados, considerados comuns em cenários reais, como a formação de arcos (Figura 7) ou o aumento no tempo de evacuação com o aumento na velocidade das partículas. Porém, vários autores citam como limitação deste trabalho, que a utilização de populações homogêneas não reflete as situações reais de evacuação, em que as pessoas têm características físicas e comportamentais que fazem com que seu comportamento seja diferente dos demais. As características físicas e cognitivas influenciam em seu movimento e podem ser decisivas no processo de evacuação. Em virtude disso, os trabalhos de Braun et. al. [22][2] propuseram a consideração de outros parâmetros no modelo de Helbing, para garantir que os agentes não terão comportamentos iguais. O modelo de Helbing foi utilizado neste trabalho como base para a navegação dos agentes pelo ambiente.



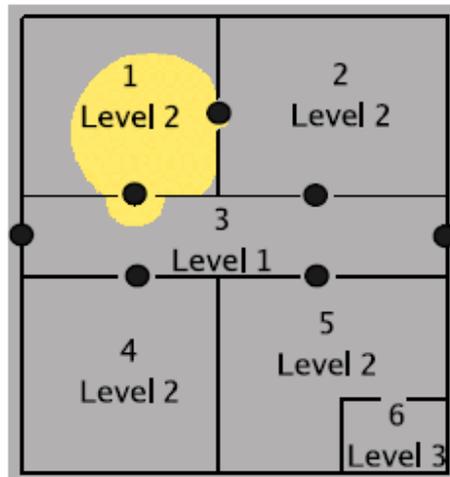
**Figura 7:** Simulação publicada por Helbing et al. [21], com agentes buscando fugir de uma sala, com fogo (vermelho) se propagando pela mesma em um curto espaço de tempo.

### 3.1.2. Braun et. al. [22][2]

Os trabalhos de Braun et. al. [22][2] apresentaram a hipótese de que a adição de atributos cognitivos, em cada agente, cria simulações mais realistas, por possibilitar a construção de populações heterogêneas. Os autores incorporam, ao modelo de forças sociais de Helbing, um processo de decisão individual para os agentes, levando em consideração atributos cognitivos individuais e a percepção do perigo de cada agente, no ambiente. Um dos atributos cognitivos levado em consideração no processo de decisão é a família do agente. O autor dividiu os agentes em famílias e caso grupos de agentes da mesma família estejam reunidos, a decisão de como fugir é tomada em conjunto, através da comunicação, que só é utilizada neste ponto do trabalho. Outro atributo é o índice de altruísmo do agente, que representa a tendência de um agente ajudar os outros a saírem do ambiente.

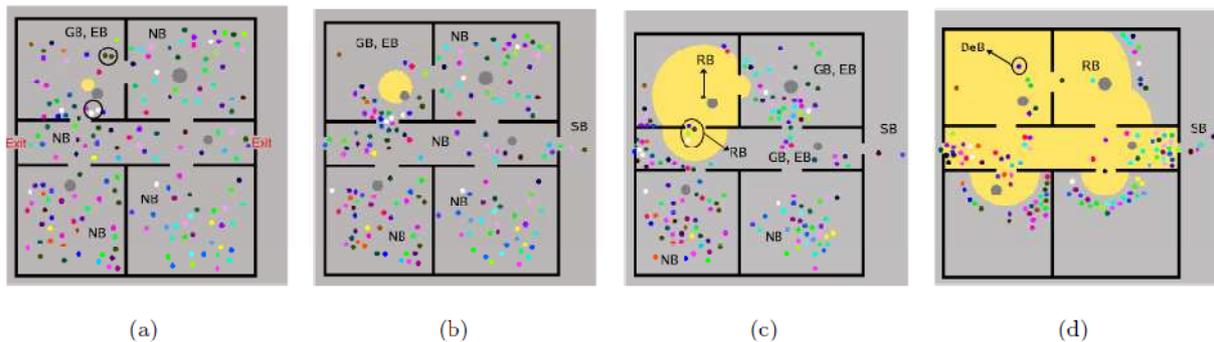
Um dos diferenciais deste trabalho é a modelagem do ambiente, que diferente dos modelos tradicionais, tem um modelo baseado em contextos (Figura 8). O autor atribui a sua utilização à reprodução mais realística do ambiente. Cada contexto é identificado por atributos, como o nível da sala e os seus pontos de interesse que são conhecidos pelos agentes. Um deles é o nível do contexto, que representa a proximidade do contexto da saída do ambiente, e os pontos

de interesse representam os objetivos de cada agente dentro do cômodo. Assim, os agentes conseguem situar-se no ambiente, sabendo a que portas devem se dirigir para chegar à saída.



**Figura 8:** Caracterização do ambiente em contexto[2].

Os agentes percebem apenas as informações locais do contexto em que estão introduzidos. O modelo de decisão do agente é baseado em uma máquina de estados finitos, onde o agente escolhe que comportamento deve seguir. Se ele estiver com agentes do mesmo grupo a decisão é tomada em conjunto. Caso contrário, de acordo com o grau de risco da área o agente tenta ou não, trafegar nela, em busca da saída. Neste caso as áreas atingidas pelo fogo são ainda trafegáveis, porém à medida que o agente navega por ela, sua variável de mobilidade vai diminuindo até chegar a zero, quando o agente morre. Nos testes os autores buscaram analisar os resultados em função da complexidade do ambiente (número de contextos). Outros resultados analisados foram em relação à forma como os agentes percebem o alerta de que precisam evacuar o ambiente. Os resultados mostram que quando o ambiente possui um sinal de alerta geral, mais agentes se salvam, que quando o agente só conhece o incidente caso o veja em seu contexto ou caso veja outro agente fugindo do ambiente. A Figura 9 mostra cenários das simulações efetuadas no trabalho de Braun et al. [2].



**Figura 9:** Seqüência de uma simulação com a emergência se expandindo pelo ambiente [2].

Neste trabalho o MACES-D, utilizou o modelo de implementação do ambiente de acordo com o trabalho de Braun et al. [2].

### 3.2. Comportamento individual dos agentes

Na perspectiva social humana, o comportamento individual é resultado de suas interações com o ambiente, escolhidas através de seu processo de decisão. As pessoas no geral, quando inseridas em uma população, seus comportamento, suas aspirações e metas se dissolvem em meio ao comportamento do todo. Dois fatores principais levam as pessoas à mudança de comportamento em situações de emergência: o tempo crítico e a incerteza da situação. Estes fatores são considerados devido à dinamicidade do ambiente que, rapidamente, pode transformar estados desejáveis em indesejáveis. Os estudos voltados para a área comportamental das pessoas em simulações de emergência começaram bem antes do uso de computadores na criação de simulações computacionais para as situações de emergência.

Desde os anos 50, vários autores da área de psicologia comportamental pesquisam sobre comportamentos de agentes em simulações de emergência. Os primeiros estudos de Mintz [50] mostraram que em situações de pânico os agentes tendem a ser não-cooperativos. Em 1982, Keating [51] apresentou uma proposta, que vai totalmente contra o senso comum, afirmando que, em sua grande maioria, as vítimas de grandes catástrofes não entram em pânico, e agem de forma bastante altruísta. Os estudos de Johnson também chegaram a esta conclusão, ao avaliar situações que potencialmente provocariam pânico. Em 2003, um grupo da Universidade de

Berkeley [52] apresentou investigações sobre fugas em emergências, revelando interessantes formatos dinâmicos na população, reações inesperadas das pessoas, formação de filas e congestionamentos. No entanto, ainda se vê com grande dificuldade a comprovação destes experimentos, devido à não realidade da simulações com humanos que comprovaram estas teorias, pois nas simulações com pessoas reais, é difícil fazer com que elas apresentem comportamentos com a mesma natureza dos vistos nas situações de emergência.

Em geral, as teorias sobre comportamento de multidões em situações de emergência podem ser classificadas em dois comportamentos básicos [12]:

- **Pânico (Comportamento não-adaptativo):** a premissa básica desta teoria é que, ao perceber o pânico, as pessoas usualmente substituem sua personalidade consciente por um estado de inconsciência, que as leva a agir irracionalmente, a não ser que haja influência de uma força social positiva no ambiente, como um líder. Alguns trabalhos apontam a utilização dos instintos reativos por parte das pessoas, isto é, ao se encontrar em situação de pânico, as pessoas seguem apenas os instintos básicos de sobrevivência, sendo capazes de brigar, empurrar, ou seguir em direções que as afastem da saída.
- **Racionalidade limitada:** afirma que algumas pessoas, em situações de stress, são capazes de raciocinar e decidir (ainda que de forma limitada), tomando boas decisões para sair da situação. Estas pessoas possuem a capacidade de cooperar com outras, esperando que isso seja bom para a sobrevivência do grupo. Por outro lado, dependendo da criticidade da emergência, ao se sentirem ameaçadas, podem adotar comportamentos competitivos, com o objetivo de maximizar suas chances de sobrevivência. Para tomar decisões, as pessoas costumam seguir experiências já adquiridas durante a emergência, evitando ir para regiões perigosas, afastando-se do fogo e seguindo alguma heurística, estabelecida por uma pessoa ou por um grupo, para atingir a saída e garantir sua sobrevivência.

Estas classificações se completam e se transpõem no sentido de que em uma situação, elas podem ser observadas em conjunto, no mesmo comportamento, ou separadas, em

comportamentos distintos, dependendo da forma como a situação é analisada. Até hoje, muitos estudos ainda apontam como incompletas e confusas as teorias sobre comportamentos de grupo em situações de emergência [12].

### **3.2.1. Influência social na emergência**

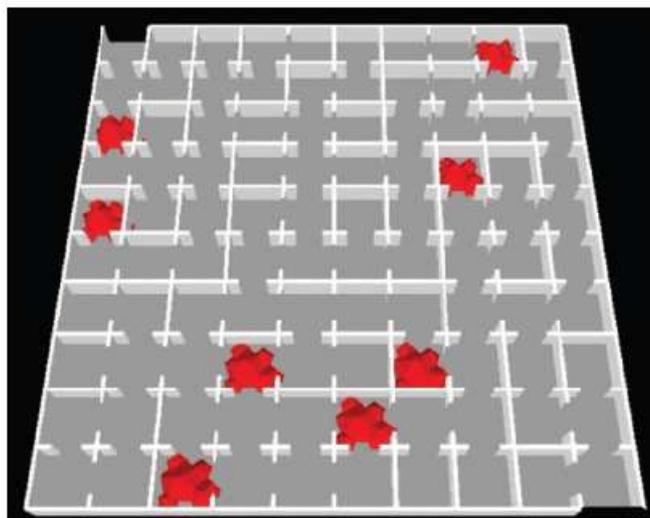
A teoria proposta por Smelser [53], acerca do comportamento coletivo, afirma que as pessoas tendem a se unir ao entrarem em pânico. Esta união acontece para garantir que alguma coisa está sendo feita para resolver o problema. Smelser define o pânico como “um delírio coletivo”, causado pelos níveis de stress e sofrimento da população. Pan et al. [12] afirmam que é comum as pessoas agirem de forma diferente, quando estão em grupo ou quando estão sozinhas. A influência social é um fator relevante nas interações entre agentes, e acontece sempre que um agente, em uma situação desconhecida, encontra outros no ambiente, e este encontro faz com que o agente seja influenciado pelas decisões dos outros.

### **3.3. MACES – A Comunicação em situações de emergência [14][15]**

Em nossas pesquisas, os trabalhos produzidos por Pelechano et. al. [14][15] foram os únicos com foco na comunicação direta entre os agentes em ambientes desconhecidos. A fuga em ambientes desconhecidos requer um grau maior de racionalidade para os agentes, que precisam explorar o ambiente em busca da saída. Além de ajudá-los na aquisição de conhecimento sobre o ambiente, a comunicação ajuda a produzir simulações mais realísticas, sendo capaz de criar uma interação maior entre os agentes, fazendo emergir diversos comportamentos na população.

O SMA apresentado nos trabalhos de Pelechano chama-se MACES (*Multi-agent communication evacuation simulation*). É um sistema multiagente, que combina o modelo de forças sociais produzido por Helbing et al. [21], com a busca por uma saída, utilizando a navegação pelas salas, ou a comunicação com outros agentes. O MACES usa regras de interação, para produzir os comportamentos individuais de cada agente no ambiente. O ambiente utilizado é um cenário estático, composto por salas ligadas por portas. As salas podem estar completamente

queimadas. O fogo não se propaga pelo ambiente, portanto o cenário é estático. Os agentes navegam pelas salas através do modelo de Helbing et al. [21] e escolhem que portas explorar, de acordo com seu comportamento no ambiente; gravam as informações sobre cada sala visitada na forma de um grafo, e a utilizam como ajuda, no processo de decisão de como fugir e encontrar uma saída.



**Figura 10:** Imagem do ambiente de simulação no Maces [15].

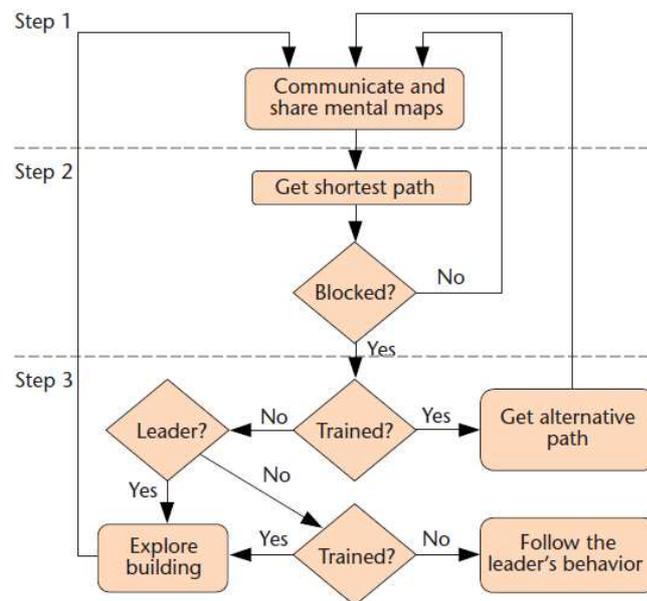
Os comportamentos utilizados no MACES buscam reproduzir as ações comuns às pessoas em situações de emergência, e são classificados em três grupos:

**Agentes líderes e treinados** - agentes que conhecem todo o ambiente, e ajudam os outros durante o processo de evacuação. Eles calculam a menor rota até uma saída e caso encontrem fogo, recalculam uma nova rota, automaticamente, seguindo até a mesma.

**Agentes líderes e não-treinados** - pessoas que não conhecem o ambiente, mas reagem bem ao stress, ajudando os outros a fugir, e explorando novos caminhos pelo ambiente, em busca da saída, utilizando uma busca em profundidade, como heurística para navegar. Caso encontrem outros agentes líderes e não treinados, trocam informações sobre seus subgrafos, já visitados, totalmente no ambiente. Ao encontrarem agentes treinados no ambiente, seguem-no, para sair de forma mais rápida.

**Agentes não-líderes e não-treinados (seguidores)** - agentes que não conhecem o ambiente e não sabem como agir na situação. Pode-se fazer uma analogia ao comportamento de pânico. Incapazes de tomar boas decisões nestas situações, andam aleatoriamente pelo ambiente, e ao se encontrarem, formam grupos para navegarem juntos. Ao encontrarem agentes líderes no ambiente, seguem-no, para sair do ambiente.

Todos estes processos de iteração dos comportamentos são feitos simulando formas simples de comunicação, como: siga-me, eu conheço a saída, ou naveguei por este caminho e não encontrei nenhuma saída, por exemplo. O diagrama da figura abaixo apresenta o modelo de iteração do MACES e de como eles agem no ambiente.



**Figura 11:** Modelo de iteração entre os agentes no Maces [15].

Como limitação, fica claro que a utilização de um ambiente estático faz com que o MACES deixe de reproduzir diversos cenários e limita uma análise mais detalhada sobre cada comportamento e a comunicação, uma vez que comumente nestas situações o ambiente é dinâmico, o que aumenta a criticidade do tempo para sair e sobreviver. Além disso, no MACES os agentes sempre se comunicam, o que contraria algumas teorias aqui apresentadas, que apontam que os agentes podem em determinados momentos ser egoístas, tomando decisões

individuais, sem levar em consideração o grupo que está inserido, para tentar garantir sua sobrevivência.

## **4. Maces-D: Sistema multiagente para simulações de emergência em ambientes dinâmicos**

Neste capítulo apresentamos o sistema desenvolvido para a realização da investigação experimental deste trabalho. Ele é uma extensão do MACES, que como já explicado na seção 3.3, é um SMA, que combina o modelo de forças sociais de Helbing, com a busca por uma saída, utilizando a navegação pelas salas ou a comunicação com outros agentes. O MACES foi escolhido como ponto de partida para nossa pesquisa, devido à combinação de seus três principais elementos: (1) apresenta uma estrutura de comunicação pré-estabelecida entre os agentes, criando modelos de interação que remetem aos comportamentos das pessoas nestas situações; (2) utiliza o modelo de forças sociais, para a movimentação dos agentes, dentro das salas do ambiente; (3) utiliza cenários de fuga desconhecidos para os agentes, deixando os processos de escolha pela saída e comunicação ainda mais importantes para uma fuga com êxito dos agentes.

Assim como o MACES, o MACES-D representa virtualmente pessoas (agentes) imersas em um local desconhecido e em chamas, onde há sempre, pelo menos uma saída para os agentes. Nas simulações, os agentes podem iniciar a fuga com conhecimento sobre o estado inicial do ambiente (sem as informações sobre os focos de incêndio), ou sem conhecimento sobre o ambiente, e à medida que o exploram através da navegação ou da comunicação com outros agentes, constroem seu mapa mental interno, para ser utilizado nas decisões. A escolha sobre que ação executar, determina seu comportamento na situação, o que pode levá-lo a (1) seguir outros agentes, (2) navegar em busca da saída, ou (3) comunicar-se com outros agentes para adquirir informações que ajudem na sua fuga. O tempo nas simulações é medido em número de rodadas, e todas as ações executadas pelo agente têm um custo de tempo associado. Na comunicação, todos os agentes sempre falam a verdade. As simulações apresentadas podem ser consideradas como um jogo iterativo, não competitivo, onde todos os agentes podem ganhar.

Nas próximas seções, serão apresentadas as descrições formais do ambiente, do modelo dos agentes e os comportamentos para a investigação comparativa sobre a comunicação.

#### 4.1. Modelo do ambiente

O ambiente foi construído a partir de um modelo geométrico bidimensional, constituído por retas e polígonos, que formam os cômodos do ambiente, aqui chamados de salas. Para a construção das salas, foram utilizados os conceitos apresentados em [2], em que cada sala do ambiente pode ser considerada um *contexto*, que representa um ambiente geométrico limitado por paredes e portas. Cada contexto conterá os seguintes atributos:

- **Grupo de paredes que delimitam a sala** - cada parede é composta por dois pontos  $(x, y)$  do ambiente.
- **Pontos de interesse da sala (PI)** - definem os locais que os agentes desejam atingir dentro de uma sala, neste caso, as portas da sala. Em outras palavras, representa o desejo do agente de navegar entre as salas para encontrar uma saída [49]. A escolha do ponto de interesse é feita pelo processo de decisão do agente.
- **Foco de incêndio (Fogo)** - representa o fogo que se alastra pelo ambiente, motivo da fuga dos agentes. Cada foco de incêndio é constituído por uma lista de pontos do ambiente, e aumenta à medida que o fogo se propaga. Cada foco tem o tamanho inicial igual a um ponto  $(x, y)$  do ambiente.

Cada sala poderá conter de uma a quatro portas, de tamanhos fixo. As saídas do ambiente são portas com o indicativo de saída. A Figura 12 apresenta o modelo geométrico do ambiente, identificando cada item descrito, como atributo do contexto que representa uma sala.

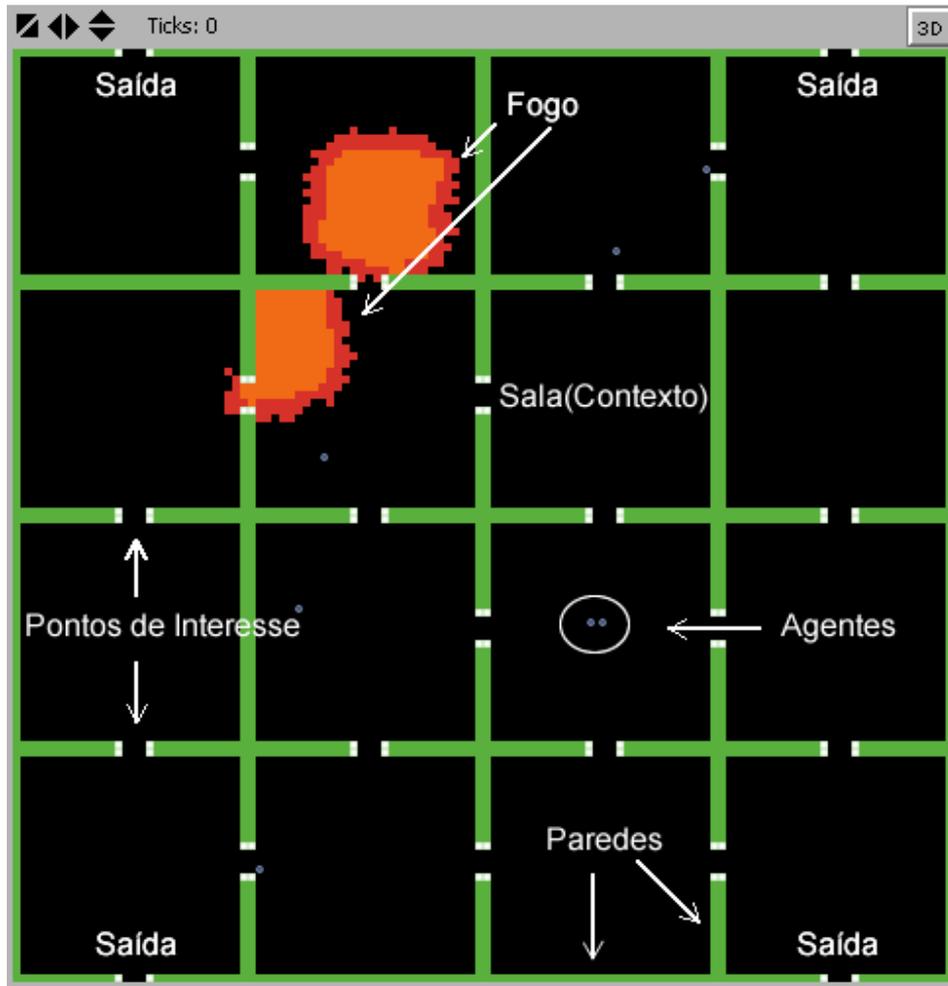


Figura 12: Imagem do ambiente, identificando os atributos que o compõem.

## 4.2. Dinamicidade do Ambiente

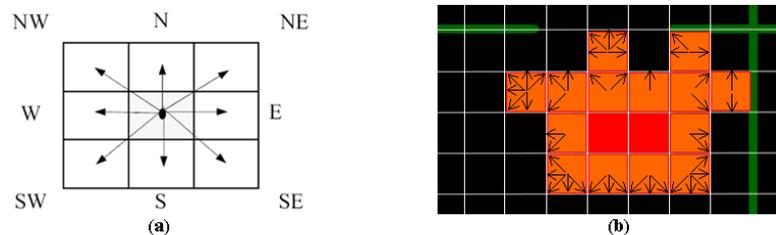
No MACES, o fogo preenche completamente uma sala do ambiente, assim não há possibilidade de navegação em salas com fogo. No MACES-D, o fogo se propaga pelo ambiente em função do tempo, levando um determinado intervalo de tempo para preencher completamente uma sala, sendo este intervalo de tempo diferente para cada tamanho de sala.

A dinamicidade do ambiente no MACES-D é dada pela propagação dos focos de incêndio pelas salas do ambiente, e foi criada com base no trabalho de Ntaimo et al. [25]. A

descrição desta propagação será dividida em três etapas: descrição das células, intensidade do fogo, e regras de propagação do fogo.

#### 4.2.1. Descrição das células

No trabalho Ntaimo et al. [25], o ambiente é criado sobre uma *grid*, onde cada célula deste *grid* é considerada um espaço independente, podendo atualizar seu estado para *queimado* ou *não queimado*, de acordo com a intensidade de calor existente na célula. As direções em que cada célula pode propagar seu fogo são dadas pelos pontos cardeais<sup>5</sup> e colaterais<sup>6</sup>, totalizando oito direções possíveis. Em nosso modelo, consideramos que cada ponto  $(x, y)$  do ambiente é uma célula, e as direções dos pontos cardeais e colaterais serão utilizadas como possíveis caminhos de propagação do fogo. Os muros que dividem as salas também limitam as direções das células que os cercam, isto é, o fogo não os ultrapassa, propagando-se entre as salas através de suas portas. É importante lembrar que a divisão do cenário em células se restringe aos focos de incêndio, sendo imperceptível aos agentes que navegam sobre o ambiente. A Figura 13 apresenta o modelo original e o utilizado neste trabalho.



**Figura 13:** A figura (a) apresenta o modelo de células do trabalho [26] com suas direções possíveis de propagação do fogo a partir de uma célula qualquer. A figura (b) apresenta a adaptação feita para o nosso modelo, onde o fogo pode se propagar pelas salas, através das células, que são os pontos  $(x, y)$  do ambiente.

---

<sup>5</sup> Pontos cardeais: N – norte, S – sul, L – leste, O – oeste.

<sup>6</sup> Pontos colaterais: NE – nordeste, SE – sudeste, NO – noroeste, SO – sudoeste.

#### 4.2.2. Intensidade do fogo

A intensidade do fogo  $I$  é a variável que determina se uma célula do ambiente será queimada; sendo calculada pelo produto do calor de combustão<sup>7</sup> na célula com o nível de propagação do fogo. No modelo original, variáveis como tipo do combustível, clima e características do ambiente, são consideradas no cálculo da intensidade do fogo. Porém, serão desconsideradas aqui, pois não é de interesse deste trabalho atacar estes pontos, sendo importante apenas reproduzir um cenário com focos de incêndio se propagando pelo ambiente. Para que uma célula *queime*, o valor medido de  $I$  deve ser maior que um limite proposto para o ambiente. Este trabalho considerou o *limite* mínimo como 0,99. Assim, todas as células com intensidade do fogo igual a um irão *queimar*. De uma forma simplificada, a intensidade do fogo  $I$  de uma célula  $c$  é dada pela fórmula:

$$I_c = h_c w R$$

onde  $h_c$  é a produção de calor da célula em  $kJ/kg$ ,  $w$  é o consumo de combustível em  $kg/m^2$  e  $R$  é a faixa de propagação do fogo, em metros por rodada. O valor de  $h_c$  é individual de cada célula,  $w$  e  $R$  são constantes, tendo  $w$  valor único igual a 1. Em relação à propagação do fogo pelo ambiente, a intensidade do fogo  $I$  pode ser considerada uma variável dependente, sendo  $h_c$ , a variável independente que modificará o valor de  $I$ , de acordo com a variável de controle  $R$ , e com as regras de propagação descritas na próxima subseção. Assim, as variáveis que irão influenciar na queima de uma célula serão o calor produzido  $h$  e a faixa de propagação  $R$ . Todas as células têm zero como valor inicial de  $h$ , e  $R$  deverá ser definida como parâmetro de entrada da simulação.

---

<sup>7</sup> A quantidade de calor que uma substância libera em sua combustão.

### 4.2.3. Regras de propagação do fogo no ambiente

O fogo se propaga pelo ambiente através das células de acordo com as seguintes regras:

- **Queima da célula:** a cada rodada, cada célula recalcula o seu valor de  $I$ , e caso este seja maior que o limite definido, ela é queimada.
- **Propagação do fogo:** a cada rodada, as células queimadas enviam seu valor de  $h$  (produção de calor da célula) para uma determinada quantidade de células vizinhas, escolhidas de acordo com a direção do fogo. A quantidade de células vizinhas que irão receber  $h$  é determinada pela fórmula  $qtd = I/\Delta t$ , sendo  $\Delta t$  uma variável de controle que determina o tempo necessário para  $h$  atingir as células vizinhas.
- **Direção do fogo:** a cada rodada, as células queimadas escolhem, aleatoriamente, a direção de propagação do fogo entre as direções possíveis de propagação, o que já foi explicado na seção 4.2.1 deste capítulo. Não há restrição quanto à repetição das direções de propagação do fogo.

De uma forma resumida, a propagação do fogo ocorre porque as células queimadas enviam seu calor às células vizinhas, que queimam e repetem o processo de propagação. Para que o fogo comece a se alastrar pelo ambiente, no início de cada simulação, pelo menos uma célula deve estar queimada, isto é, ela deve ter o seu valor de  $I$  maior que o limite de 0,99. Para que isso aconteça, seu valor de  $h$  é ajustado, automaticamente, pelo sistema, de acordo com o valor de  $R$  estabelecido. O número de células queimadas antes do início da simulação é considerado uma variável independente do estudo experimental deste trabalho. A Figura 14, a seguir, mostra uma imagem extraída do trabalho original, e a propagação do fogo desenvolvida para esse trabalho. Em vermelho, são representadas as células que ainda tenham vizinhas não queimadas no ambiente.



**Figura 14:** A imagem a esquerda foi extraída de Ntaimo [25], que mostra a propagação do fogo em um ambiente. A imagem à direita foi extraída de uma simulação realizada neste trabalho. Em vermelho são representadas as células que ainda possuem vizinhas não queimadas no ambiente.

### 4.3. Modelo do agente

O modelo do agente utilizado segue as especificações do MACES, com as devidas adaptações aos ambientes dinâmicos, que estão relacionadas à forma como o agente reage ao encontrar fogo pelo ambiente. Uma vez inserido no ambiente, um agente se utiliza de seu modelo de decisão para executar suas ações e encontrar uma saída, que é o objetivo de todos os agentes da simulação. Inicialmente, os agentes são desconhecidos entre si, assim não há utilidade em morrer para garantir a sobrevivência de outros. As simulações realizadas por Braun [2] propõem a divisão dos agentes em famílias pré-estabelecidas, que buscam sempre a cooperação entre si, para chegar a uma saída. Neste trabalho, este ponto não será considerado, podendo ser acrescido em trabalhos futuros.

Os agentes guardam as informações que adquirem do ambiente em sua memória. Esta memória  $M$  é representada por um grafo, que contém as salas do ambiente já visitadas, ou conhecidas através da comunicação. As arestas do grafo representam as portas que ligam cada sala. Em cada vértice (sala do ambiente), o agente consegue ainda guardar as informações sobre:

- Presença de fogo na sala.
- Sala já visitada, ou conhecida através da comunicação.
- Sala pertencente a uma rota, caso o agente tenha uma rota de fuga e a sala esteja presente nela.

Cada agente tem duas formas de tentar aumentar seu conhecimento sobre o ambiente: (1) através da percepção visual e da (2) comunicação com outros agentes. Tanto a visão quanto a comunicação atuam apenas na sala em que o agente está inserido, isto é, o agente só vê a sala em que se encontra, e só se comunica com os agentes que estão na mesma sala. O trabalho de Waldau [24] cita que é comum em emergências, devido aos crescentes níveis de stress, uma redução geral de sensibilização, diminuindo a capacidade de orientação rápida nas salas e áreas circunvizinhas a que a pessoa se encontra, limitando sua capacidade de atuação apenas à área em que está inserida no momento. A única exceção ocorre quando um agente está trafegando por uma porta; neste caso, ele deve considerar também os agentes presentes na sala vizinha, para evitar colisões e inconsistência na navegação. Enquanto os agentes estão passando por uma porta, não há comunicação entre os mesmos. O número máximo de agentes por sala é determinado pelo tamanho da sala e o diâmetro dos agentes, uma vez que dois agentes não podem ocupar o mesmo espaço ao mesmo tempo.

Quando os agentes estão em uma determinada sala, eles podem se comunicar uns com os outros. Na comunicação, são trocadas informações da memória do agente, e o conteúdo destas informações depende do comportamento do agente, que será explicado ao longo deste capítulo. Após a comunicação, o agente atualiza sua memória, de acordo com as informações trocadas, adicionando a cada vértice do grafo (sala), uma informação temporal, registrando o momento em que aquela informação foi adquirida, evitando assim que ele substitua informações novas por mais antigas.

A navegação do agente pelo ambiente pode ser vista de duas formas: em nível macroscópico, no qual os agentes guardam informações sobre as salas onde trafegam, na forma de um grafo (seu mapa mental), que permite calcular distâncias e situar-se no ambiente; em nível microscópico, que representa a forma como os agentes se locomovem dentro das salas do

ambiente. Esta locomoção é feita através do modelo de forças sociais, que já foi apresentado na seção 3.1 deste trabalho.

#### **4.4. Comportamento dos agentes no fogo**

No modelo original do MACES, ao encontrar uma sala com fogo, o agente guarda a informação e volta para a sala anterior, pois as salas com fogo são intrafegáveis. No MACES-D, o fogo se propaga ao longo do tempo pelas salas, e os agentes podem percebê-lo em duas situações distintas: (1) o agente entra em uma sala, e percebe visualmente a presença de fogo; (2) devido a sua propagação, o fogo entra em uma sala em que o agente está.

Caso ocorra uma das duas situações, os agentes poderão escolher entre: (1) navegar para a porta mais próxima ou (2) continuar trafegando pela sala com fogo. A segunda opção será escolhida, caso o agente, ao perceber o fogo, saiba que na porta mais próxima, não há caminhos para saída, isto é, caso ele saiba que já explorou todas as salas possíveis a partir daquela porta. Ao optar pela segunda ele buscará atingir a próxima porta mais perto de sua posição, e caso esta também seja conhecida, e o agente saiba que não tem saída, buscará a próxima porta, até que todas as opções se esgotem, e ele volte à primeira opção. Caso não restem opções para os agentes (todas as portas já bloqueadas ou visitadas), eles continuarão a fugir do fogo, seguindo a primeira opção, porém inevitavelmente, morrerão queimados. A decisão sobre qual ação executar ao encontrar o fogo, tem um custo temporal  $\Delta t$ , que será considerado uma variável de controle, definido nas configurações da simulação (seção 4.3).

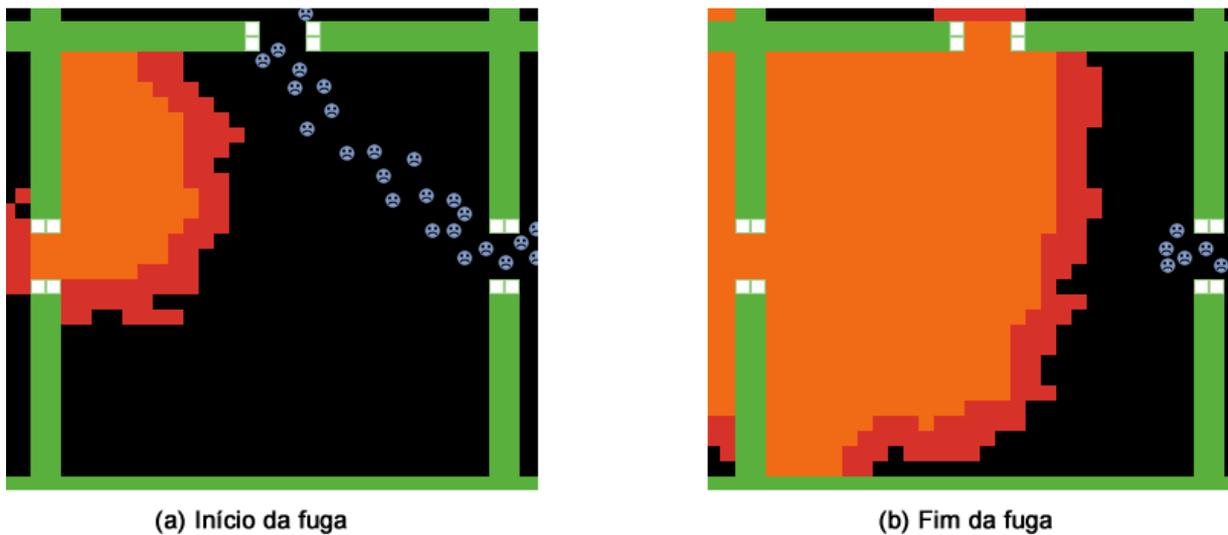
Ao trafegar por uma sala com fogo, uma nova variável será adicionada ao modelo de navegação, baseado em forças sociais do agente, que corresponde à força de repulsão  $\vec{f}_{if}$  do agente sobre cada ponto do fogo na sala. Esta força é idêntica às já utilizadas no modelo em relação às outras pessoas e aos muros da sala. A adição da força de repulsão com fogo, no modelo de Helbing, já foi feita no trabalho de Braun [2], porém ele considerou pequenas diferenças, já que no seu trabalho, os agentes são capazes de enfrentar o fogo (passar por dentro dele). No MACES-D, caso o agente entre em contato com o fogo, morre, automaticamente.

Assim, a nova fórmula de navegação dos agentes dentro das salas com fogo é descrita da seguinte forma:

$$m_i \frac{d\vec{v}^i}{dt} = F_i^{(H)} + 2 \sum_f \vec{f}_{if}$$

Sendo  $F_i^{(H)}$  a fórmula da navegação do agente já apresentada na seção 3.1 deste trabalho. Nós decidimos duplicar a força de repulsão ao fogo, em relação às outras forças do modelo (pessoas e muros), para que a contribuição desta força seja mais decisiva que a influência de muros ou outros agentes, em sua navegação por salas com fogo. A distância mínima para que esta força de repulsão do fogo aja sobre os agentes, foi a mesma utilizada para as forças de repulsão com os outros agentes, e com os muros da sala atual do agente, extraída de [21].

Caso um agente esteja seguindo outro agente em uma sala com fogo, ele só não continuará seguindo-o, caso a força de repulsão aja de tal forma que o impeça de navegar na direção do outro agente, ou caso ele deixe de ver o outro agente devido ao fogo. A Figura 15 (a e b) apresenta um grupo de agentes enfrentando o fogo para atingir uma sala do ambiente.



**Figura 15:** Agentes enfrentando o fogo, na tentativa de encontrar uma saída.

## **4.5. Comportamento individual dos agentes**

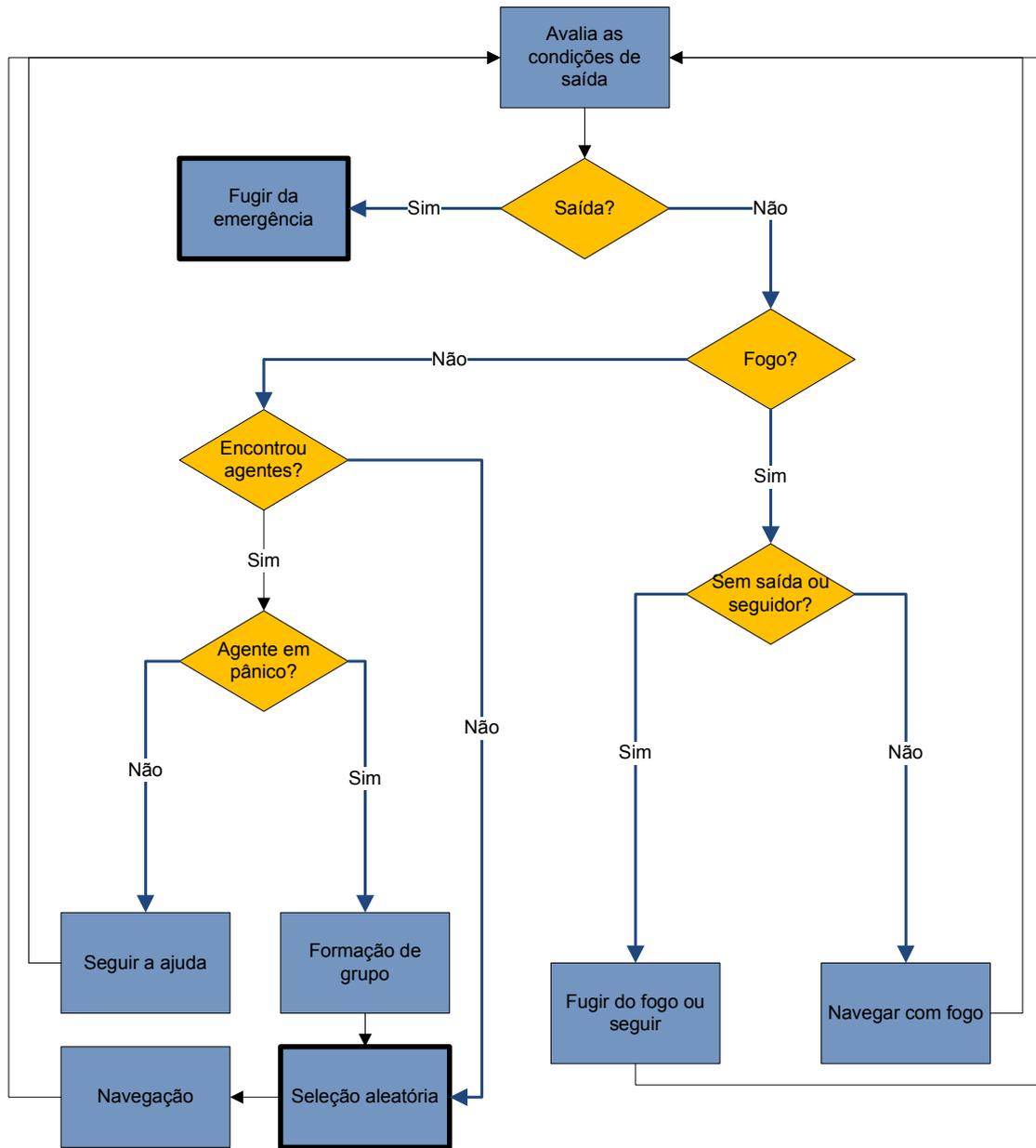
O comportamento individual do agente define a forma como ele interage com o ambiente para atingir seus objetivos. Os comportamentos descritos nesta seção remetem a comportamentos comuns que uma pessoa pode apresentar em situações reais de perigo, e são similares aos comportamentos descritos no MACES, porém, aqui serão apresentados fluxogramas individuais de cada comportamento, descritos de forma mais detalhada. Todos os comportamentos possuem um processo de decisão sobre a comunicação, e ele é executado sempre que os agentes se encontram em uma sala do ambiente com outros agentes. Neste ponto, a diferença entre os comportamentos está na forma como o agente escolhe a porta que será seu ponto de interesse na sala, e na forma como ele reage, ao encontrar outros agentes durante a fuga. Durante esta escolha, que tem um custo temporal  $\Delta t$ , o agente não se movimenta pelo ambiente. Este custo será considerado uma variável de controle, definido nas configurações da simulação (seção 4.3). Em todas as rodadas de tempo, enquanto um agente navega dentro de uma sala em direção ao seu ponto de interesse escolhido, ele reavalia as condições da sala, verificando a presença de fogo, ou a entrada de novos agentes, para efetuar uma nova comunicação. Os comportamentos possíveis dos agentes remetem a pessoas em pânico, pessoas líderes, e pessoas líderes e treinadas, que serão mais bem descritos nas subseções seguintes.

### **4.5.1. Comportamento de Pânico (CP)**

O comportamento de pânico remete a pessoas que, em situações de perigo, devido ao alto nível de stress, não conseguem raciocinar logicamente, seguindo apenas seus instintos de sobrevivência. Como não há um processo de raciocínio lógico sobre a fuga pelo ambiente, os agentes em pânico podem ser representados pela navegação aleatoriamente, o que representa uma exploração desordenada, e na maioria das vezes, pode levar o agente à morte. Cada vez que um agente em pânico entra em uma sala, ele escolhe aleatoriamente entre uma das portas, navegando até ela. No MACES, os agentes são conhecidos como seguidores, não líderes e não treinados, eles iniciam a simulação sem nenhum conhecimento prévio sobre a emergência.

Sempre que um agente em pânico encontra outros agentes no mesmo estado, formam grupos para navegação, através da comunicação. Ao entrar em uma sala, o agente em pânico informa sua situação (“**Estou em pânico, não sei o que fazer!**”), assim os outros que também estejam em pânico na sala, se unem para a formação do grupo. Para que a navegação em grupo ocorra, um dos agentes em pânico é escolhido aleatoriamente, e este seleciona a próxima sala a ser explorada pelo grupo. Cada vez que eles entram em uma nova sala, um novo agente é escolhido aleatoriamente, para selecionar a nova sala. Quando um agente ou um grupo em pânico entra em uma sala, e pela comunicação, identifica outro, que não está em pânico (agentes com outros comportamentos), aguarda as instruções para tentar fugir do incêndio. Neste caso, qualquer informação ou ajuda é importante para garantir a sobrevivência. No modelo apresentado neste trabalho, as informações vindas de outros agentes serão de ajuda, e os agentes em pânico sempre utilizam a ajuda oferecida, que será descrita nos próximos comportamentos.

Em relação ao fogo, o agente em pânico nunca decide enfrentá-lo, pois não raciocina sobre salas que já navegou, não verificando a possibilidade de não haver saídas. Ele só navega nas salas com fogo se estiver seguindo um agente que escolheu navegar pela sala com fogo. A Figura 16 mostra o fluxograma dos agentes com comportamento em pânico. A caixa laranja descreve o momento em que o agente decide a que porta irá navegar na sala, que neste caso, é uma decisão aleatória do agente.



**Figura 16:** Fluxograma do comportamento de pânico para situações de emergência, baseado no comportamento dos agentes seguidores do MACES.

#### 4.5.2. Comportamento de liderança (CL)

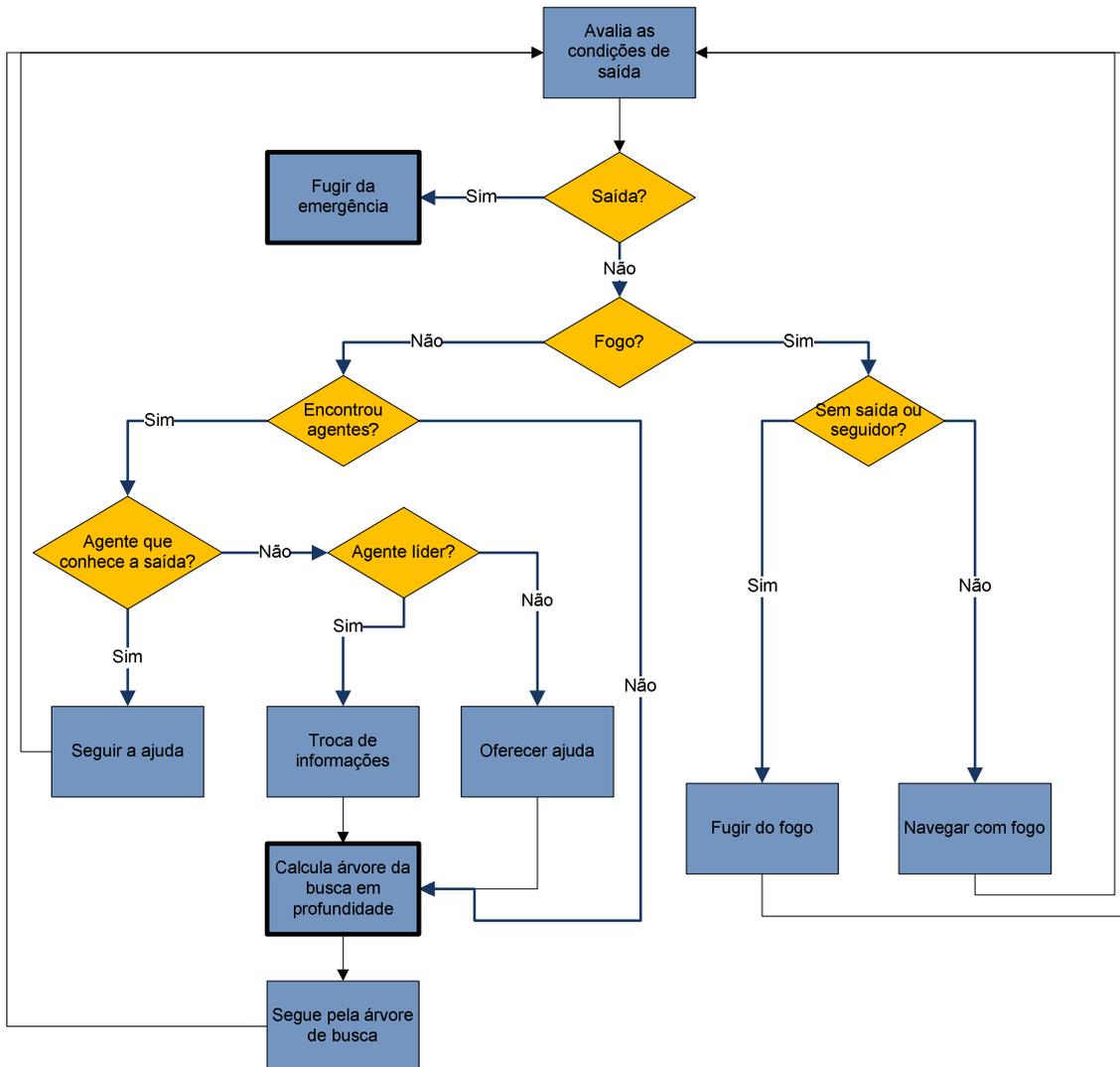
Os agentes com comportamento de liderança tentam sempre encontrar uma solução para sair da emergência, e se diferenciam dos agentes em pânico, por conseguirem reagir bem ao

stress causado pela emergência, utilizando experiências já adquiridas na situação, e raciocinando logicamente, para encontrar uma saída rapidamente. Eles guardam informações das salas já trafegadas, e ao escolher para que sala se locomover, procuram sempre seguir alguma heurística para explorar o ambiente. Neste trabalho, a heurística utilizada será uma busca em profundidade, feita em tempo de execução, de acordo com as salas já conhecidas pelo agente líder.

Ao encontrar outros agentes pelo ambiente, um agente líder pode se comportar de três formas diferentes:

- Caso os outros agentes informem que estão em pânico oferece ajuda, pedindo para ser seguido: **“Sigam-me, estou procurando a saída”**.
- Ao encontrar outros agentes líderes no ambiente (**“Sou líder, estou navegando em busca da saída.”**), trocam informações sobre as salas com fogo conhecidas, e suas subárvores, já trafegadas totalmente, em que não foram encontradas saídas. Eles não navegam em grupos.
- Caso encontrem algum agente que lhes diga que conhece a saída (**“Conheço a saída”**), enviam as informações sobre suas subárvores e buscam segui-lo até a saída.

A Figura 17 apresenta o fluxo do comportamento dos agentes líderes, mostrando como eles se comportam, em todas as possíveis situações do ambiente, inclusive as de fogo.



**Figura 17:** O fluxograma apresenta o comportamento individual do agente líder no ambiente.

#### 4.5.3. Comportamento de treinamento (CT)

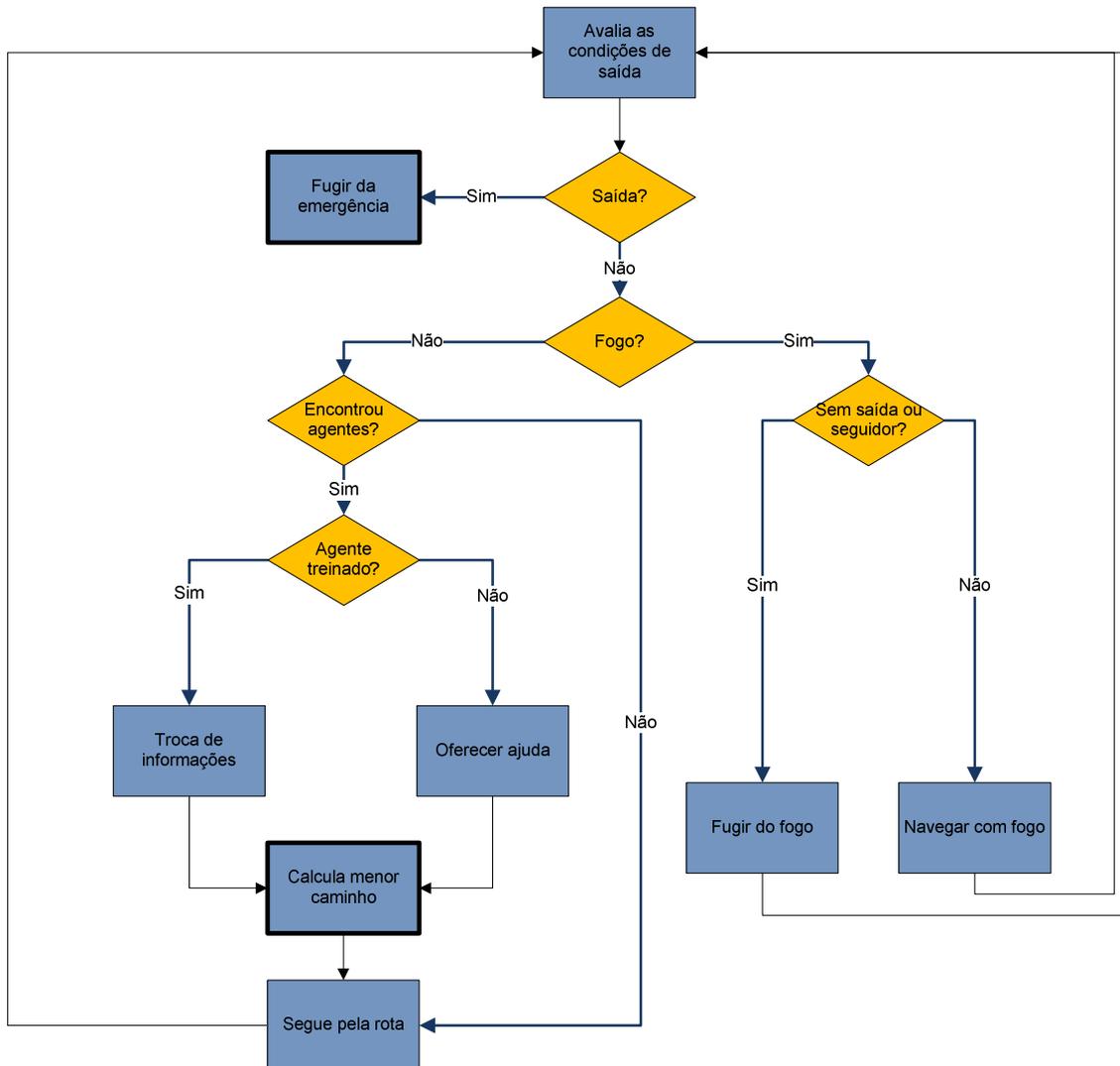
Os agentes treinados são agentes diferenciados. Além de líderes, têm o conhecimento inicial de todo o ambiente, não precisando efetuar a busca em profundidade, para encontrar uma saída. Para sair do ambiente, calculam o menor caminho até a saída mais próxima, através do algoritmo Dijkstra [54]. Caso encontrem um foco de incêndio, enquanto navegam até uma saída, recalculam sua rota, e seguem pelo novo caminho. Eles podem ser considerados seguranças ou

bombeiros no ambiente, pessoas que conhecem o local e sabem lidar com a situação de emergência.

Quando um agente treinado encontra outros agentes no ambiente, informa que conhece a saída (“**Conheço a saída**”), e caso os outros agentes não conheçam, pede para ser seguido. Ao se encontrar com outros agentes, que também conhecem a saída (outros agentes treinados), ele troca informações sobre o caminho mais curto até a saída e sobre os caminhos conhecidos, já bloqueados pelo fogo. A Figura 18 apresenta o fluxo de navegação do comportamento de treinamento. Diferentemente dos outros agentes, eles têm a capacidade de calcular o menor caminho até uma saída, por conhecerem todo o ambiente.

Caso um agente em pânico encontre dois os mais agentes líderes ou treinados, em uma sala do ambiente, escolhe, aleatoriamente, o agente que irá seguir, o mesmo acontecendo com os agentes líderes, ao encontrarem agentes treinados durante a navegação.

A utilização destes tipos de interação social tem o objetivo de produzir comportamentos realísticos na população de agentes, como a navegação em grupos, desorientação no ambiente e altruísmo. Nos resultados e testes dos capítulos 4 e 5, serão apresentadas imagens que comprovam o surgimento destes comportamentos na população de agentes, durante as simulações.



**Figura 18:** O fluxograma apresenta o comportamento individual do agente treinado na simulação.

#### 4.5.4. Cenários de comunicação entre os agentes

Diante das regras e formas de comunicação apresentadas em cada comportamento, nós produzimos um quadro (Tabela 2) que mostra os possíveis tipos e cenários de comunicação que serão utilizados nas simulações. A variável  $\Delta t$  representa o custo temporal para a realização da comunicação. Durante a ação de comunicação o agente não se movimenta pelo ambiente.

Tabela 2: Quadro geral com os cenários de comunicação entre os agentes.

Cenário 1		Agentes em pânico se encontram no ambiente		
Tempo	Agente <i>a</i>	Comunicação ou ação	Agente <i>b</i>	Comunicação ou ação
$\Delta t$	CP	Estou em pânico	CP	Estou em pânico
$\Delta t$	CP	Formação do grupo	CP	Formação do grupo
$\Delta t$	Voltam a navegar			
Cenário 2		Agentes em pânico se encontram com agentes líderes ou treinados		
Tempo	Agente <i>a</i>	Comunicação ou ação	Agente <i>b</i>	Comunicação ou ação
$\Delta t$	CP	Estou em pânico	CL ou CT	Estou procurando a saída ou Conheço a saída
$\Delta t$			CL ou CT	Sigam-me
$\Delta t$	Voltam a navegar			
Cenário 3		Agentes líderes não-treinados se encontram		
Tempo	Agente <i>a</i>	Comunicação ou ação	Agente <i>b</i>	Comunicação ou ação
$\Delta t$	CL	Estou procurando a saída	CL	Estou procurando a saída
$\Delta t$	CL	Envia informações sobre suas subárvores	CL	Envia informações sobre suas subárvores
$\Delta t$	Voltam a navegar			
Cenário 4		Agentes líderes não-treinados se encontram com agentes treinados		
Tempo	Agente <i>a</i>	Comunicação ou ação	Agente <i>b</i>	Comunicação ou ação
$\Delta t$	CL	Estou procurando a saída	CT	Conheço a saída
$\Delta t$	CL	Envia informações sobre suas subárvores	CT	Sigam-me
$\Delta t$	Voltam a navegar			
Cenário 5		Agentes treinados se encontram com agentes treinados		
Tempo	Agente <i>a</i>	Comunicação ou ação	Agente <i>b</i>	Comunicação ou ação
$\Delta t$	CT	Conheço a saída	CT	Conheço a saída
$\Delta t$	CT	Envia informações sobre rotas	CT	Envia informações sobre rotas
$\Delta t$	Voltam a navegar			

Neste capítulo, uma extensão do modelo MACES foi apresentada, o MACES-D. O MACES-D segue a mesma descrição do MACES, porém ele possibilita os agentes de atuarem em ambientes dinâmicos. Esta atuação corresponde à escolha do caminho a seguir pelo agente ao

encontrar o fogo, e a adição de uma força de repulsão com o fogo na força social que proporciona a navegação do agente dentro da sala, para que ele consiga se movimentar evitando a morte pelo fogo. Nós esperamos que este modelo seja capaz de habilitar os agentes para atuarem em situações dinâmicas, permitindo novos experimentos da influência da comunicação na sobrevivência dos agentes.

# 5. Análise sistemática da comunicação em ambientes dinâmicos

Neste capítulo são apresentadas as simulações computacionais feitas com o MACES-D, realizadas para analisar a influência da comunicação na sobrevivência de agentes em simulações de emergência e evacuação. Esta investigação experimental foi construída através de uma análise sistemática sobre diferentes comportamentos de pessoas nestas situações em relação a quatro variáveis independentes do ambiente: (1) tamanho da população de agentes; (2) tamanho do ambiente; (3) número de salas do ambiente; (4) número de focos de incêndio no ambiente. A métrica utilizada será a taxa de sobrevivência da população, que representa o número de agentes que consegue chegar a uma saída, antes que o fogo se propague por todo o ambiente.

## 5.1. Aplicação desenvolvida

As simulações foram desenvolvidas utilizando a linguagem de programação NetLogo<sup>8</sup>. O NetLogo é uma linguagem de programação para SMA, ideal para o desenvolvimento de simulações que envolvem fenômenos sociais. Ele possui interface e linguagem amigável, que possibilita a sua utilização mesmo por pessoas que não se consideram *experts* em programação. Sua programação é feita através da criação de instruções para agentes ou grupos de agentes, que operam concorrentemente no SMA. Sua origem é baseada na linguagem Lisp.

A escolha do NetLogo ocorreu devido a facilidade de implementação da interface visual, a geração de gráficos no próprio ambiente a partir das saídas da simulação. Outro fator relevante

---

<sup>8</sup> <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

foi a boa escalabilidade que o sistema apresentou nos testes com grandes população de agentes (300 agentes). A Figura 19 apresenta uma tela da aplicação desenvolvida, que possui os seguintes controles:

- Botões de controle geral (criar, executar, ou carregar simulações pré-configuradas, debug).
- Botões de controle dos comportamentos.
- Botões para controle do ambiente.
- Informações sobre agentes vivos, mortos e número de rodadas.
- Geração de históricos das simulações, para análises posteriores.

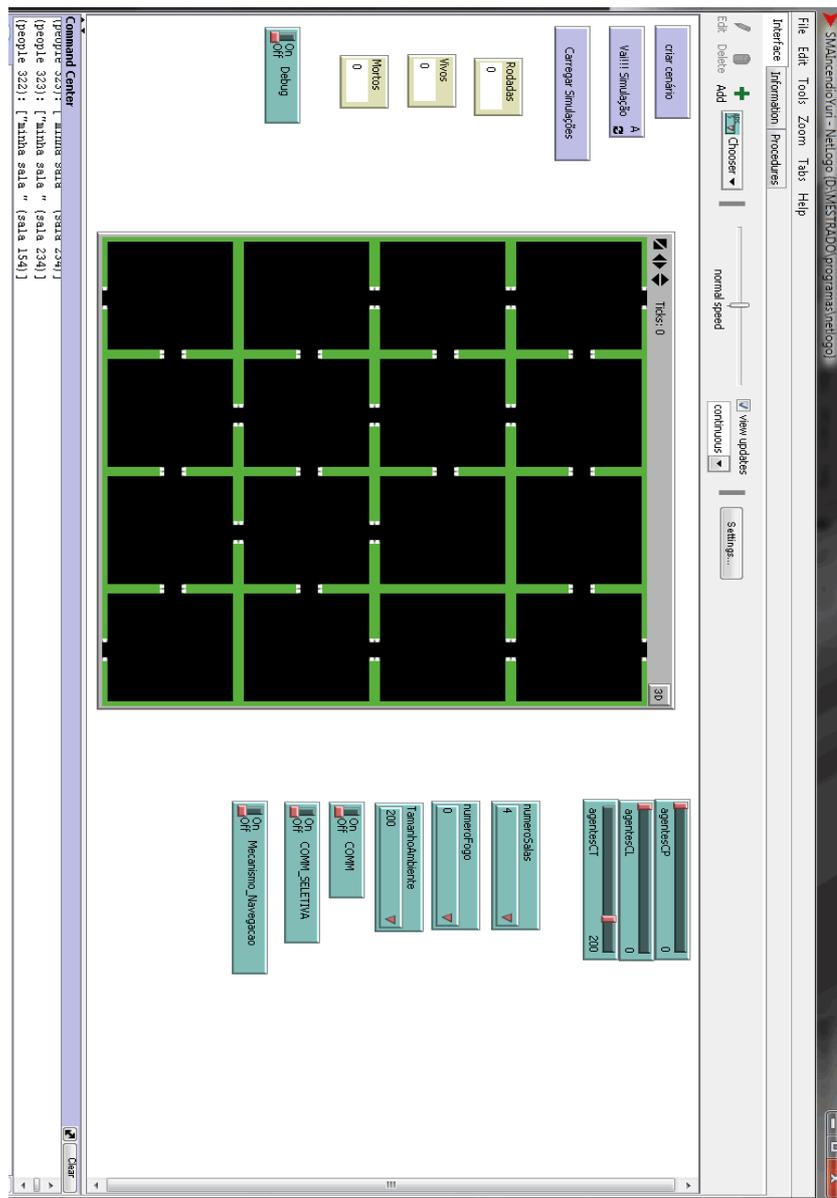
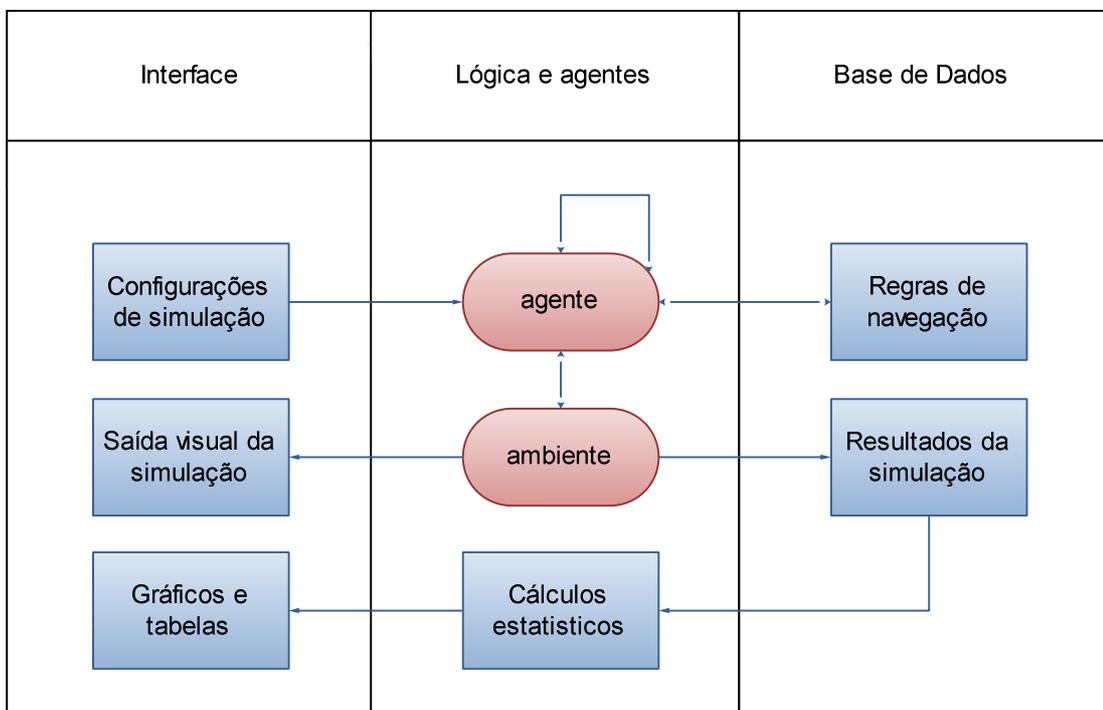


Figura 19: Aplicação desenvolvido no NetLogo.

## 5.2.Arquitetura de implementação do MACES-D

A Figura 20 traz a arquitetura de implementação utilizada no MACES-D para a criação das simulações. Ela tenta reproduzir a descrição de implementação do MACES, apresentada em [14] [15]. As partes que compõem a arquitetura são:

- Interface: representa as configurações para realizar um grupo de simulações, a visualização do processo de fuga dos agentes e a exibição dos resultados de uma simulação no formato de gráficos e tabelas.
- Lógica e agentes: parte central da aplicação, onde estão os agentes que fogem do fogo, o agente que controla o ambiente, além de um módulo que efetua os cálculos estatísticos sobre os resultados da simulação.
- Base de dados: base do sistema, onde estão guardadas as regras de navegação que os agentes utilizam para buscar saída pelo ambiente, e os resultados da simulação sem um tratamento visual ou estatístico.



**Figura 20:** Arquitetura de implementação do Maces-D, para simular o comportamento dos agentes seguindo a descrição do MACES [14] [15].

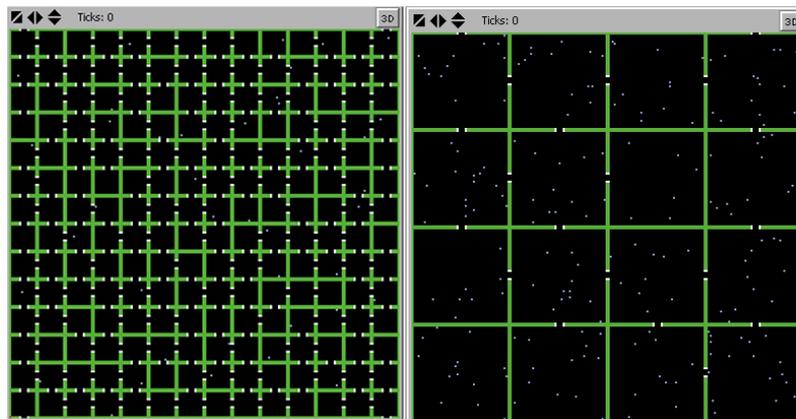
### 5.3. Configuração das simulações

As simulações foram criadas para representar diferentes cenários, que permitissem a análise dos comportamentos dos agentes nos mais diversos tipos de situações de emergência. A variável dependente e métrica utilizada será a taxa de sobrevivência da população. Cada variável independente recebeu um universo de valores, que em conjunto com as outras variáveis independentes, sejam capazes de reproduzir simulações, que vão de cenários mais simples (tempo aceitável, facilidade de navegação, rápido acesso à saída), a cenários mais críticos (tempo curto, formação de congestionamentos, dificuldades de acesso à saída). Os valores escolhidos para cada variável foram em sua maioria baseados em dados experimentais. Isso foi feito, devido à escassez de trabalhos relacionados com experimentos e objetivos similares aos deste trabalho. As variações foram:

- **Tamanho da população:** A população de agentes variou entre 20 a 260 agentes, em intervalos de 30 agentes. Os valores são similares aos utilizados no trabalho original do MACES, que utilizou uma população entre 20 e 200 agentes. A extensão até 260 agentes ocorreu para se ter mais pontos de avaliação no tamanho da população.
- **Número de salas:** O ambiente de simulação é composto por salas de tamanhos iguais que variaram entre 16 a 196 salas, dispostas em formato de grade. Elas serão descritas pela quantidade de *linhas x colunas* da sala. Foram construídos cenários de 4x4 até 14x14 salas, aumentando em intervalos de duas *linhas x colunas*. A Figura 21 apresenta dois cenários com 14x14 e 4x4 salas. Apesar do MACES utilizar apenas um cenário com 10x10 salas, nós consideramos que a variação das salas pode representar situações onde os agentes têm um fácil e rápido acesso as saídas (ambientes com um menor número de salas) e ambientes onde os agentes terão maior dificuldade de encontrar a saída (ambientes com um maior número de salas). As escolhas dos valores ocorreram de forma experimental durante a construção das simulações. O valor mínimo escolhido foi 4x4 salas, pois em salas menores os agentes, ou estão em uma sala com saída, ou estão em salas vizinhas a saída, praticamente não existindo diferenças entre os tempos de fugas dos agentes, independente das outras configurações do ambiente. O tamanho de 14x14 salas foi escolhido como limite

máximo de número de salas, para que este número não fuja muito do número de variações utilizadas nas outras variáveis (entre 6 e 9 valores possíveis).

- **Focos de incêndio (Fogo):** Foram utilizados cenários possuindo entre 1 e 8 focos iniciais de incêndio. Um foco inicial de incêndio tem dimensão de um metro quadrado. A escolha dos valores relacionados a esta variável foi feita de forma experimental, pois no trabalho original o fogo não se propaga. A idéia é variar o tempo de fuga dos agentes para analisar como os comportamentos são influenciados pelas situações de tempo crítico. Da mesma forma que o número de salas foi escolhido, o número de focos de incêndio foi escolhido, evitando discrepâncias entre o número de variações para cada variável.
- **Comportamentos dos agentes:** Foram utilizados todos os comportamentos descritos no MACES-D (pânico, liderança e treinamento). Estes são os mesmos extraídos do trabalho original do MACES.



**Figura 21:** Imagem de dois cenários de simulação, o primeiro com 196 salas e o segundo com 16 salas.

A dimensão do ambiente foi medida em metros. Assim a distância entre cada ponto (x,y) do ambiente será de um metro. O tamanho do ambiente utilizado foi de 200 metros (MACES). Qualquer porta do ambiente pode ser considerada uma saída, porém em nosso estudo experimental, ela será considerada uma variável de controle, com seus pontos fixados nas quatro portas dos cantos superiores e inferiores do ambiente. No MACES, as saídas também foram utilizadas com essa disposição. Apesar de intuitivamente as salas com tamanho maior,

normalmente terem portas maiores, neste trabalho elas terão um tamanho fixo (3 metros) e não serão analisadas como variável independente.

As demais variáveis que compõem a construção e implementação dos agentes, de acordo com o modelo de força social, e para a construção do ambiente, foram consideradas variáveis de controle e não sofreram modificações ao longo dos testes. A velocidade que o agente pode atingir na navegação é, no máximo, de 5 metros/rodada, e o diâmetro dos agentes foi de 0.7 metros. A distância mínima para a influência de muros, de outros agentes e do fogo é de 2 metros. O  $\Delta t$  para os agentes decidirem que porta navegar é de uma rodada, assim como uma ação de comunicação tem o custo de uma rodada. Até o momento não foram encontradas pesquisas que motivassem uma análise sobre os custos associados ao tempo de comunicação entre os agentes.

O trabalho de Helbing et al. [21] mostrou, através de simulações, que uma das formas de se evitar congestionamentos, é diminuir a velocidade máxima do agente. Assim, iremos assumir que quando um agente está em um grupo, a velocidade máxima que ele poderá atingir é de 3,5 metros por rodada, ainda considerada uma velocidade comum entre pessoas em pânico. Esta configuração foi realizada, porque em simulações experimentais, percebeu-se que em diversos momentos os agentes que estavam seguindo algum líder na fuga, se perdiam, pois o líder não enfrentava os congestionamentos nas portas, por passar primeiro por elas, o que ocorria apenas com os agentes que estavam seguindo a o líder.

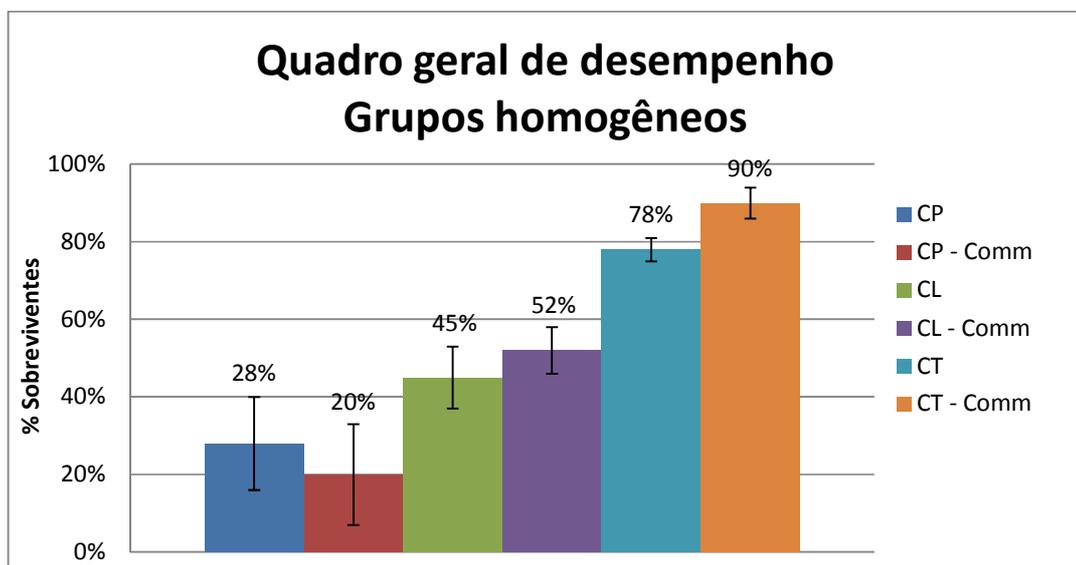
As primeiras simulações efetuadas foram feitas com grupos homogêneos de agentes. No total foram realizadas 432 simulações diferentes para cada comportamento isoladamente, que é a combinação de todo o universo das variáveis independentes. Cada simulação foi executada 100 vezes, com os agentes iniciando em posições aleatórias do cenário. As simulações com grupos homogêneos nos permitiram conduzir uma análise isolada sobre a comunicação em cada comportamento. Foram produzidas ainda simulações com grupos heterogêneos de agente, isto é, agentes com comportamentos diferentes, na mesma simulação. Nestas simulações, os comportamentos foram distribuídos em quantidades iguais pela população de agentes. As

simulações com populações heterogêneas nos permitiram conduzir análises sobre a influência da comunicação entre agentes com comportamentos diferentes.

O custo de tempo da navegação dos agentes é coberto pelo modelo de forças sociais utilizado no MACES-D. Todas as ações que não envolvam navegação (decisão de qual portas seguir, qual agente seguir ou decisão de comunicação, e a comunicação com outros agentes) foram consideradas tendo o custo temporal de uma rodada para a sua execução completa, e durante a execução destas ações, os agentes não se movimentam pelo ambiente.

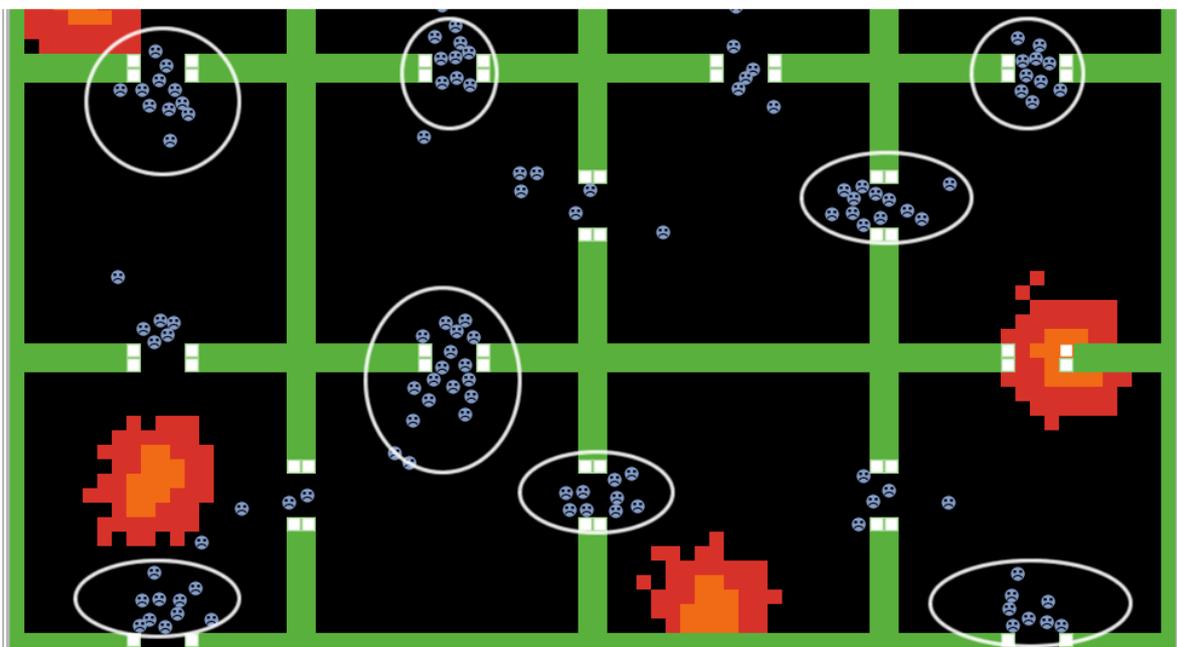
#### 5.4. Desempenho geral dos agentes

A média do desempenho global dos comportamentos, para todos os cenários simulados com populações homogêneas, é apresentada na Figura 22. Estes resultados representam o percentual médio de sobrevivência de cada comportamento, em todas as simulações. Eles mostram que o comportamento CT sobrevive mais que os outros, isso já era esperado, uma vez que os agentes treinados conhecem as saídas do ambiente, e seguem diretamente até elas.



**Figura 22:** Desempenho geral dos agentes em simulações com populações homogêneas.

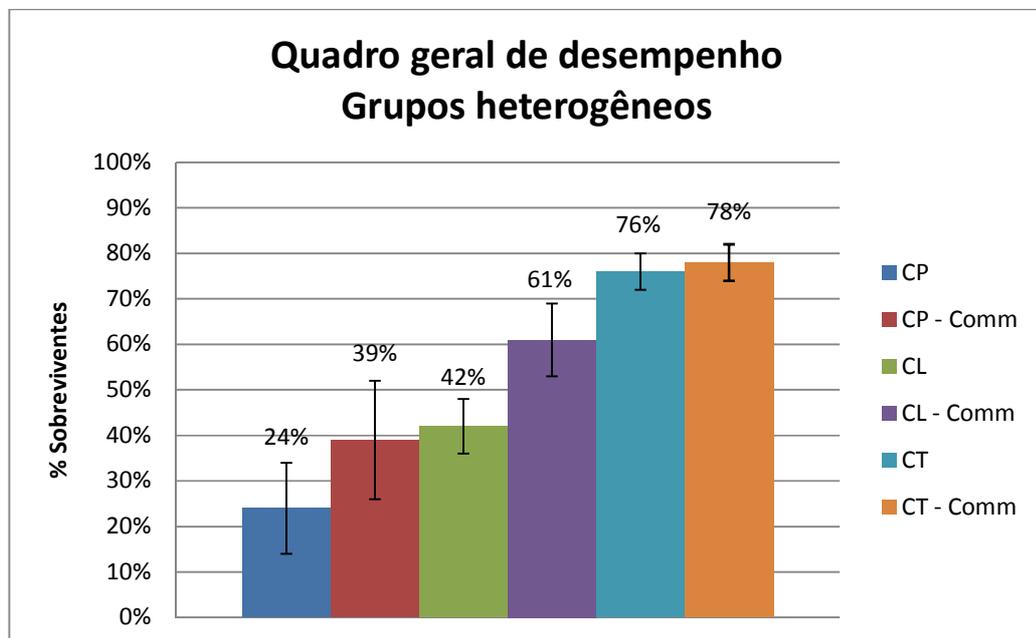
Com este gráfico, constatou-se que a comunicação influencia de forma diferente em cada comportamento. Nos comportamentos CT, a diferença entre os resultados com e sem comunicação (12%) é maior que nos outros, isto acontece porque os agentes CT são capazes de aproveitar melhor as informações trocadas entre eles, a partir das quais, eles apenas recalculam suas rotas, podendo ou não seguir por outro caminho. Nos agentes CL, a diferença de 7% mostra que eles conseguem ainda, tirar bom proveito das comunicações efetuadas, pois as informações obtidas na comunicação ajudam na construção de suas árvores de busca, evitando a visita a caminhos sem saída. Já os agentes CP, que utilizam a comunicação apenas para a formação de grupos, tiveram prejuízos com a utilização da comunicação (7%). Nós acreditamos que isso acontece por dois motivos: (1) o tempo gasto com a comunicação limita ainda mais seu tempo de navegação (os agentes não raciocinam sobre a comunicação, efetuando-as sempre que possível), (2) a geração de congestionamentos nas portas das salas causados pela navegação em grupo, que acontece principalmente em ambientes menores, como mostra a Figura 23 que representa a imagem de uma simulação com 260 agentes CP, em um ambiente com 4x4 salas e 6 focos de incêndio. Os pontos circulados mostram congestionamentos formados nas portas das salas pelos grupos de agentes CP que navegam em busca da saída



**Figura 23:** Formação de congestionamentos por grupos de agentes em pânico.

Em sua maioria, os congestionamentos acontecem quando vários agentes tentam trafegar pela mesma porta, ao mesmo tempo. Outra forma de gerar congestionamentos ocorre quando grupos de agentes tentam trafegar pela mesma porta em sentidos contrários, nestas situações os congestionamentos são ainda mais demorados, pois se cria uma disputa competitiva para chegar à sala oposta.

O gráfico apresentado na Figura 24 mostra o desempenho geral dos agentes, nos cenários com populações heterogêneas. Nas simulações com grupos de agentes heterogêneos, a comunicação gerou resultados diferentes. Primeiramente, quando foram utilizados grupos heterogêneos sem comunicação, os resultados obtidos não apresentaram surpresas, sendo parecidos com os das simulações com grupos homogêneos, seguindo as devidas proporções relacionadas ao tamanho da população, como mostra a Tabela 3, que apresenta em negrito os resultados sem comunicação das simulações. Esta similaridade ocorre por que nas simulações heterogêneas sem comunicação, os agentes não sofrem a influência dos outros agentes, e a única diferença para uma simulação homogênea sem comunicação é na quantidade de agentes, o que gera somente uma pequena diferença no percentual de sobreviventes.



**Figura 24:** Desempenho geral dos agentes em simulações com populações heterogêneas.

**Tabela 3:** Tabela comparativa com os resultados gerais de todos os comportamentos nas simulações realizadas. Em negrito os resultados com grupos homogêneos e heterogêneos sem comunicação.

	Homogêneos	Homogêneos - Comm	Heterogêneos	Heterogêneos - Comm
Pânico - CP	<b>28%</b>	20%	<b>24%</b>	39%
Liderança - CL	<b>45%</b>	52%	<b>42%</b>	61%
Treinamento - CT	<b>78%</b>	90%	<b>76%</b>	78%

As análises sobre a comunicação no gráfico da Figura 24, serão apresentadas por tipo de comportamento:

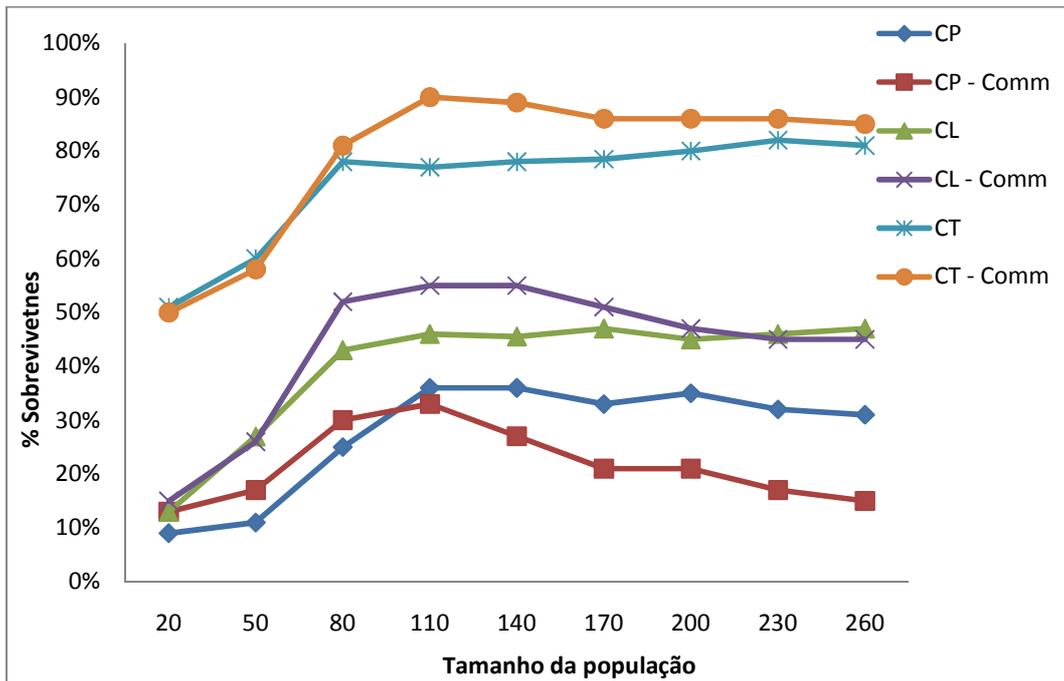
- **Agentes treinados (CT)** – em grupos heterogêneos a comunicação prejudica os agentes CT, uma vez que eles sempre param sua navegação e oferecem ajuda aos outros agentes, informando que conhecem a saída. Esta navegação em grupo, além de facilitar o aparecimento de congestionamentos perto das saídas, atrasa a fuga dos agentes (velocidade da navegação em grupo é menor que a velocidade da navegação individual), podendo levá-los à morte por causa do fogo que se alastra no ambiente. Em populações homogêneas, como todos os agentes já conhecem a saída, o número de congestionamentos diminui, obtendo a comunicação, melhores resultados.
- **Agentes líderes (CL)** - diferentemente dos agentes CT, os agentes CL aumentaram consideravelmente seu desempenho com a comunicação em cenários heterogêneos, aproximadamente em 19%. Apesar de terem que ajudar os agentes em pânico CP do ambiente, o fato de se comunicarem com os agentes treinados que conhecem a saída, impulsionou um aumento considerável de seus resultados. Ao encontrarem os agentes CT no ambiente, os agentes líderes se transformam em simples seguidores dos agentes CT, que os levam diretamente a uma saída.
- **Agentes de pânico (CP)** - a utilização da comunicação teve um impacto positivo na sobrevivência dos agentes CP. Em grupos heterogêneos, os agentes em pânico sempre são beneficiados, pois qualquer um com comportamento altruísta vai ajudar a buscar uma saída. Diante deste fato, os resultados dos agentes CP com

comunicação igualaram-se aos resultados dos agentes CL sem comunicação, conseguindo um ganho de 15% com a introdução da comunicação.

Todos os resultados apresentados até o momento remetem ao desempenho médio de todos os comportamentos, em todos os cenários. Ao fazer análises específicas, em determinados cenários de maior ou menor criticidade, comprovamos que em várias situações a comunicação prejudicou o desempenho dos agentes. A seguir, são apresentados os resultados de forma individual de cada variável independente nas simulações com populações homogêneas (seção 5.4 a 5.7), já a seção 5.8 traz os resultados de todas as variáveis em conjunto dos testes com populações heterogêneas.

### **5.5. Análise sobre o tamanho da população**

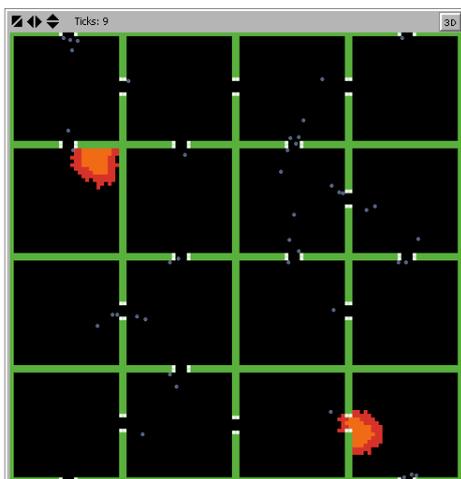
Nas simulações apresentadas, a população variou de 20 a 260 agentes, em incrementos de 30. O gráfico da Figura 25 apresenta a variação do percentual médio de sobrevivência dos agentes em relação ao tamanho da população, em um cenário com populações homogêneas, com 4 focos iniciais de incêndio, em um ambiente com 10x10 salas. No gráfico, vemos claramente situações em que a comunicação pode ajudar e prejudicar os agentes.



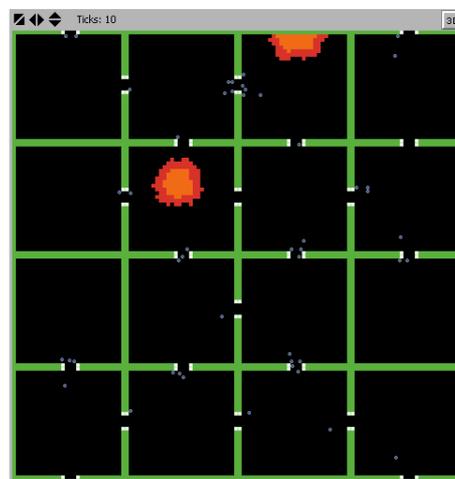
**Figura 25:** Desempenho dos comportamentos em relação ao tamanho da população.

Os pontos analisados neste gráfico serão: crescimento da população e influência da comunicação. À medida que a população cresce, o percentual de sobrevivência dos agentes tende a crescer. Isso acontece, principalmente, nas populações entre 30 e 110 agentes. A partir das simulações com 110 agentes, este percentual tende a se estabilizar. Outros estudos relacionados à exploração de ambientes, por populações de agentes [55][56], apontam também o crescimento do percentual de resultado, vinculado ao tamanho da população, que depois de certo tamanho tende a se estabilizar. É claro que cada cenário tem suas particularidades, e não estamos aqui querendo comparar tais resultados, estamos apenas mostrando que os resultados apresentados sobre o crescimento inicial em função do tamanho da população, já eram esperados. A taxa de sobrevivência da população não é influenciada apenas pelo seu crescimento, a comunicação também contribui, não só para o crescimento, como também para a queda desta taxa, em determinadas condições. Para os agentes CP, a influência da comunicação é bastante clara, e acontece positivamente, até às simulações com 80 agentes. A partir destas simulações, à medida que a população cresce, os resultados sem comunicação superam e aumentam continuamente a diferença, para os resultados com comunicação. Acreditamos que isso acontece devido à

formação de grupos gerada pela comunicação entre os agentes em pânico, já mencionada na seção 5.4 deste capítulo. Para fortalecer o argumento de que a formação dos grupos gerados pela comunicação cria congestionamentos nas portas do ambiente, a Figura 26 traz a imagem de quatro simulações que mostram como a formação de grupos pela comunicação gera congestionamentos nas portas e saídas do ambiente. As imagens C e D apresentam uma simulação com 260 agentes, sem e com comunicação, respectivamente. É claramente perceptível a diferença entre as formações de congestionamentos, causadas pelos agentes que andam em grupo. Para populações pequenas, estes congestionamentos não acontecem (imagens A e B), independentemente da utilização da comunicação (imagem A) ou não (imagem B), pois os poucos grupos que se formam, não comprometem a navegação pelas portas do ambiente. As imagens da Figura 26 foram retiradas de momentos equivalentes de uma simulação.



(A) 50 agentes - CP



(B) 50 agentes - CP - comm



(C) 260 agentes - CP



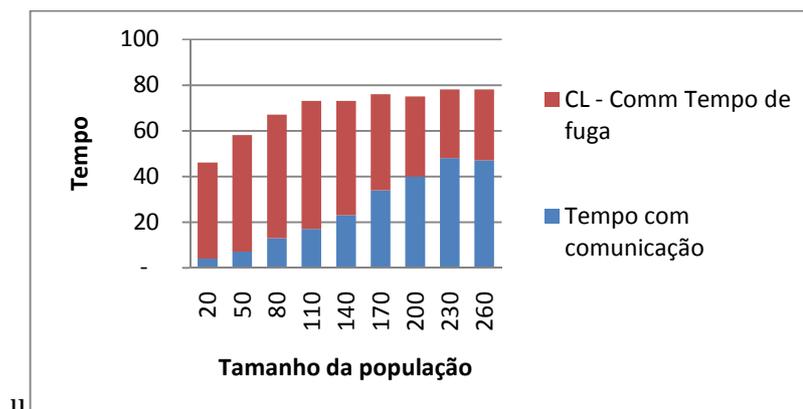
(D) 260 agentes - CP - comm

**Figura 26:** Comparativo entre simulações com agentes em pânico, com e sem comunicação.

Ainda no gráfico da Figura 25, constatamos que nos agentes CL e CT, a comunicação causa outros tipos de impacto na taxa de sobrevivência da população. Com poucos agentes no ambiente, o número de troca de informações é pequeno, pois os agentes quase não se encontram no ambiente, devido à baixa densidade de agentes por sala. Assim, como poucas comunicações são efetuadas, elas não influenciam na navegação dos agentes, o que acontece, principalmente,

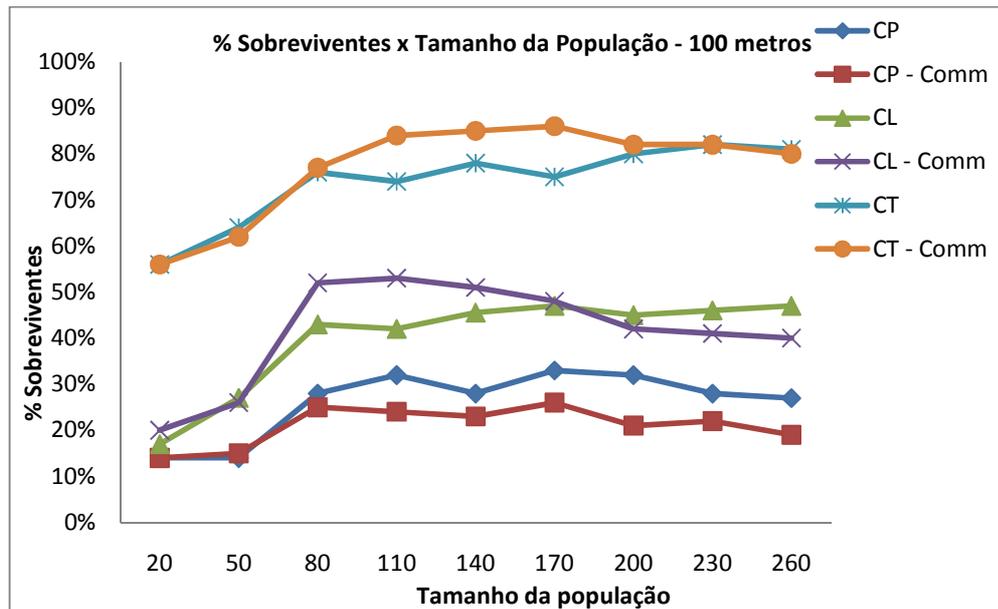
em ambiente com maior número de salas (ver seção 5.7), pois à medida que a salas aumentam, a densidade de agentes por sala cai, em função da quantidade de salas no ambiente. Já a partir de 80 agentes, os comportamentos CL e CT, têm uma acentuada melhora nos resultados dos comportamentos com comunicação. Este aumento é mais acentuado para os agentes CT que, como já citado, sabem aproveitar melhor a comunicação. Assim, mais agentes no ambiente significam mais comunicações e, conseqüentemente, o aumento da taxa de sobrevivência.

A partir de 200 agentes, os resultados dos comportamentos comunicativos passam a diminuir, praticamente se igualando aos resultados sem comunicação. Isto se dá, devido à quantidade de comunicações efetuadas pelos agentes. A comunicação, que para populações médias, tem influência positiva, passa a prejudicar a fuga dos agentes em populações maiores, pois estes perdem muito tempo se comunicando. Estas comunicações, efetuadas quase a todo instante, em sua maioria são redundantes, e não acrescentam novas informações aos mapas mentais dos agentes. Assim, nós atribuímos ao uso da excessiva comunicação, o motivo da queda da taxa de sobrevivência dos agentes. Quando eles se comunicam mais, muitas vezes recebem informações que já conhecem, de áreas que já visitaram, sendo nulo o ganho de informação com a comunicação. Essa troca de informações traz perda de tempo, que poderia ser utilizado na navegação pelas salas. O gráfico da Figura 27, mostra o tempo gasto com comunicação em um conjunto de simulações com agentes CL, variando o tamanho da população, em um ambiente com 8x8 salas e 4 focos de incêndio. Nos resultados, podemos observar o gasto excessivo com comunicação, a partir dos testes com 170 agentes, que chegam a usar mais de 50% do tempo total com esta finalidade. Estes resultados comprovam que os gastos excessivos com comunicação, causados pelo aumento da população, prejudicam a sobrevivência dos agentes.



**Figura 27:** Gasto excessivo com a comunicação entre agentes líderes.

Em simulações com ambientes mais críticos (com mais focos de incêndio e de tamanho menor), onde o tempo de fuga é menor, este gasto com comunicação é ainda maior. O gráfico da Figura 28 mostra o mesmo cenário do gráfico da Figura 25, porém em um ambiente com 7 focos de incêndio. Neste, já conseguimos perceber melhor a influência negativa que a comunicação traz para grandes populações. O momento em que a comunicação passa a influenciar negativamente os agentes CL e CT é antecipado para as simulações com 170 agentes. Além da comunicação, em ambientes menores, a densidade da população se torna ainda maior, e os congestionamentos mais comuns nas portas das salas.



**Figura 28:** Desempenho dos comportamentos em relação ao tamanho da população, em um ambiente com 7 focos de incêndio.

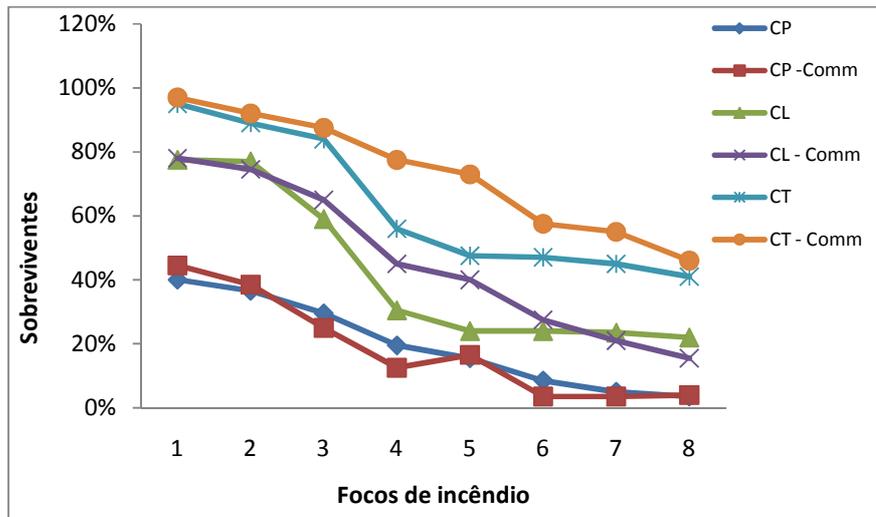
Com base nas observações feitas nesta seção, as principais análises sobre a comunicação foram:

- A comunicação influencia positivamente na taxa de sobrevivência das populações de tamanho médio (a partir de 80 agentes) para agentes CT e CL.
- A comunicação pode ser prejudicial na taxa de sobrevivência de populações de tamanho grande (200 agentes) para agentes CT e CL.
- Agentes em pânico sofrem influência negativa na taxa de sobrevivência da população a partir de populações médias (maior que 80 agentes), devido à formação de grupos causada pela comunicação.

## 5.6. Análise sobre o número de focos de incêndio

Os focos de incêndio são responsáveis por ditar o tempo máximo de fuga dos agentes. Assim como as outras variáveis independentes analisadas, o fogo também tem influência direta na sobrevivência dos agentes. As análises sobre esses focos foram as que apresentaram resultados mais padronizados, em relação a todos os cenários possíveis. O gráfico da Figura 29

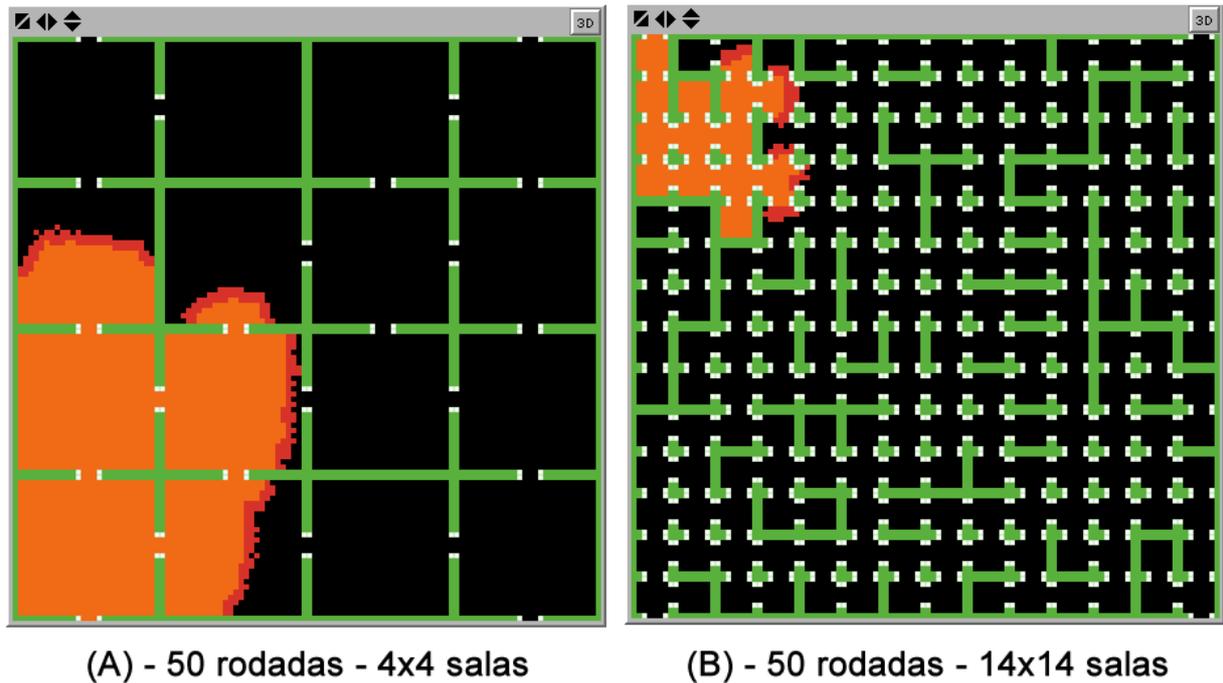
mostra o resultado de uma simulação com 200 agentes homogêneos, em um ambiente com 12x12 salas, variando o número de focos de incêndio. Através deste gráfico, constata-se que com poucos focos de incêndio não há diferença entre comunicar ou não, uma vez que os agentes têm mais tempo para encontrar uma saída, e a comunicação deixa de ter tanta importância, pois os que não se comunicam também conseguem chegar às saídas. Quando os focos de incêndio começam a aumentar, a comunicação evita uma queda mais acentuada da taxa de sobrevivência, mostrando a sua importância na ajuda da fuga dos agentes. Isso acontece nas simulações a partir de 2 ou 3 focos de incêndio, dependendo do comportamento. Este aumento ocorre porque os agentes, na comunicação, trocam informações sobre locais em chamas, e acabam evitando navegar por lugares com fogo. Este ganho com informações sobre o fogo é maior que os custos associados ao tempo gasto com a comunicação. A partir de seis focos de incêndio, o ambiente fica muito crítico, a área de navegação diminui, mais encontros ocorrem no ambiente, e as ajudas efetuadas pela comunicação passam a não ser tão valiosas. Com o excesso de comunicações, a taxa de sobrevivência, nas simulações com comunicação, acaba igualando-se aos resultados sem comunicação. Este fato só não acontece com os agentes CT, que conseguem ter os resultados com comunicação ainda melhores que os sem comunicação. Os agentes CP não apresentaram um padrão definido para o número de focos de incêndio.



**Figura 29:** Variação dos focos de incêndio, nos testes efetuados com 200 agentes.

Assim, constatamos que a comunicação não é importante em situações nas quais o tempo não é crítico, e naquelas em que o tempo é extremamente crítico, sendo importante em ambientes com um tempo razoável para a fuga.

Outro fator que tem influência sobre o fogo é o número de salas do ambiente. As imagens da Figura 30 mostram duas simulações, com número de salas diferentes (4x4 e 14x14). Na imagem (a), com 50 rodadas, o fogo queimou seis das 16 salas do ambiente (37,5 %), e na (b), com 50 rodadas, 14 das 196 salas (8 %).



**Figura 30:** Expansão do fogo em ambientes com tamanhos de salas diferentes.

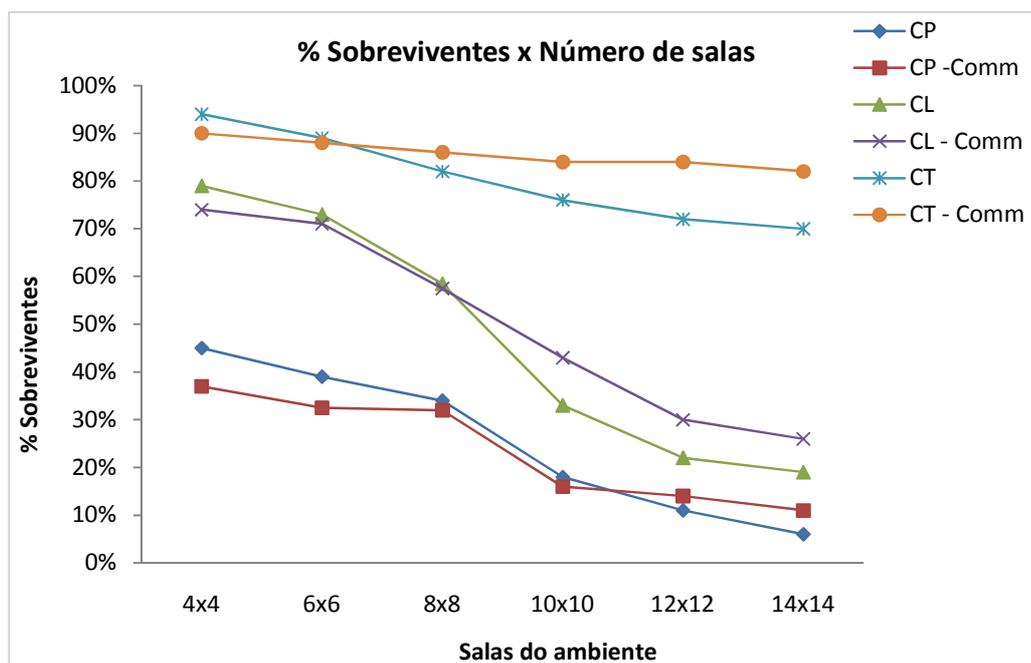
Devido a esta diferença, causada pelo número de salas, a taxa de sobrevivência da população apresenta comportamentos diferentes, em relação ao número de focos de incêndio. Quanto maior for o número de salas, mais tempo os agentes terão para sair do ambiente, o que pode ser bom para a comunicação. Esta análise será apresentada na próxima seção do trabalho.

As principais características apresentadas pela análise da sobrevivência dos agentes em função dos focos de incêndio foram:

- Os focos de incêndio não influenciaram na diferenciação dos resultados dos agentes CP com e sem comunicação.
- Para os agentes CL e CT, a comunicação foi positiva, nos testes entre 3 e 6 focos de incêndio, que são os valores centrais da variação dos focos.
- Para os agentes CL e CT, a comunicação levou a uma queda na taxa de sobrevivência, nos testes com muitos focos de incêndio (acima de 6 focos).

## 5.7. Análise sobre o número de salas do ambiente

A Figura 31 mostra um gráfico com o desempenho geral dos agentes, em função do número de salas. Os cenários com mais salas, têm cômodos de tamanho menor, e nesta circunstância, o agente precisa raciocinar mais, em seu curso de navegação, para alcançar uma saída, pois trafega por mais salas. Particularmente, os agentes CT sofrem uma influência menor com a variação das salas, por já conhecerem o ambiente. Entre os agentes CP e CL, os CL sentem muito mais a variação do ambiente, por utilizarem um raciocínio lógico de navegação, aumentando consideravelmente sua árvore de busca. Com poucas salas, os resultados dos agentes CL e dos CT aproximam-se, e a diferença fica menor que 15% nas simulações com ambiente de 4x4 salas. Isso mostra que o comportamento que sofre maiores alterações em relação ao número de salas é o dos agentes CL, que conseguem resultados expressivos, em situações de poucas salas e resultados ruins, em situações de muitas salas.



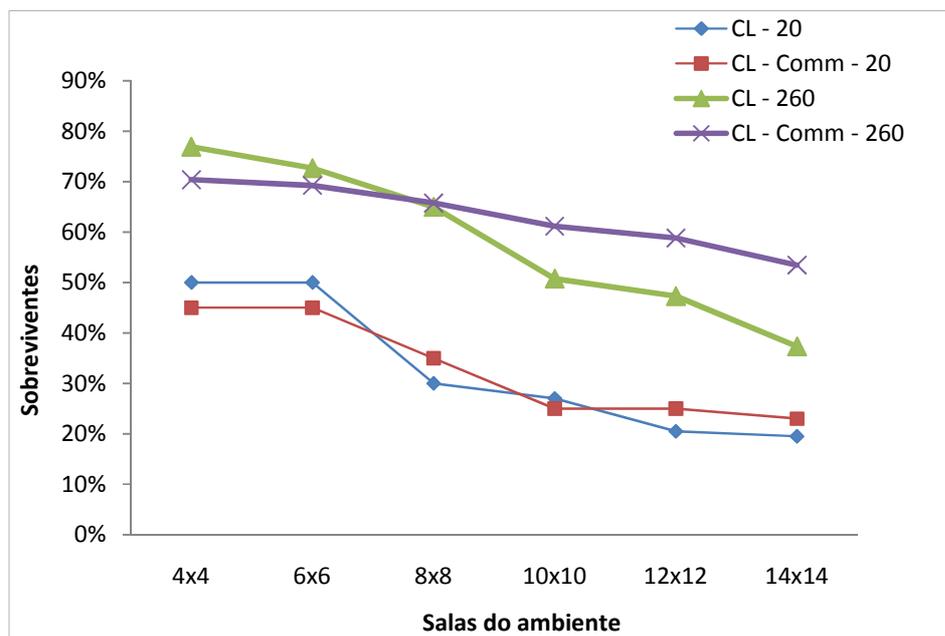
**Figura 31:** Desempenho geral dos agentes em função do número de salas do ambiente.

Neste gráfico podemos constatar também, que a comunicação é mais importante nos testes com maior número de salas, pois facilita a navegação dos agentes. Um fato interessante,

extraído da seção 5.5: ao analisar a variação da população, percebeu-se que o demasiado aumento da mesma fez com que o número de comunicações aumentasse, prejudicando os agentes. Quando há muitas salas no ambiente, esta influência é bem menor, pois o número de comunicações não aumenta, mesmo com o aumento do número de agentes. Isso acontece porque havendo mais salas, os encontros entre os agentes acabam sendo mais difíceis, e quando ocorrem, agregam mais informações, pois os agentes navegam por mais salas e têm mais informações a serem compartilhadas. Por exemplo, nas simulações com 260 agentes em ambientes com 4x4 salas, a densidade média inicial de agentes por sala é de 16,25. Já para testes com 14x14 salas, esta densidade cai para 1,32 agentes por sala. À medida que o tempo passa, estas densidades caem consideravelmente, em função dos agentes que atingem a saída e dos que morrem queimados pelo fogo.

Outra observação que pode ser feita, sobre a comunicação, é do momento em que os comportamentos com comunicação ultrapassam os sem comunicação, na taxa de sobrevivência da população. Gradativamente, esta mudança ocorre, primeiro nos agentes CT (que sabem utilizar melhor a comunicação) e depois nos CL. Para os agentes CP, esta variação ocorre já nas simulações com 10x10 salas. Como os agentes quase não se encontram, os grupos formados são pequenos, não prejudicando a fuga dos agentes.

Estas observações sobre como a comunicação se comporta em relação ao número de salas, podem ser comprovadas apenas nos testes com muitos agentes, naqueles com poucos agentes, praticamente não há o encontro destes no ambiente, e a comunicação tem resultados praticamente iguais aos resultados sem comunicação, como mostra o gráfico da Figura 32, que apresenta duas simulações com agentes CL, uma com 20, e a outra com 260. Para a simulação com 20 agentes, os resultados não mostram nenhum padrão da influência da comunicação. Já na simulação com 260 agentes, a comunicação é ruim, em ambientes com 4x4 e 6x6 salas, e a partir das simulações com 8x8 salas, é sempre melhor que a sua não utilização.



**Figura 32:** Diferença entre o desempenho de uma população de 20 agentes e uma população de 260 agentes, em relação ao número de salas do ambiente.

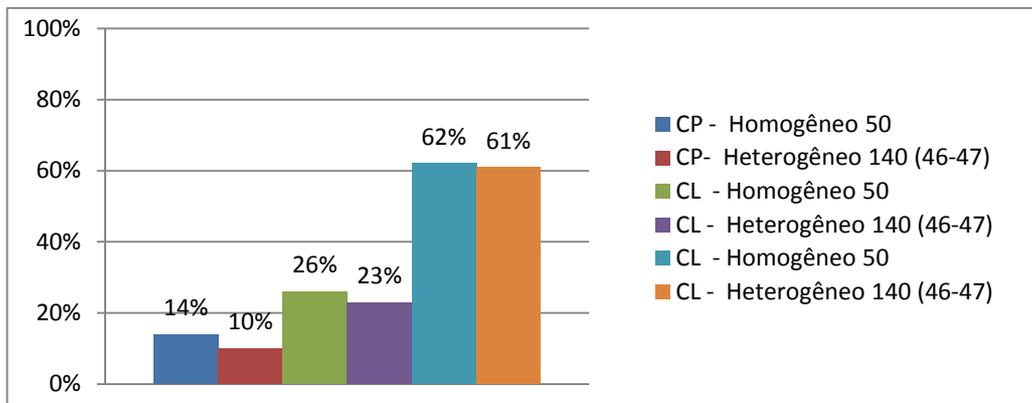
Uma observação interessante, sobre a variação das salas, é que nos testes com poucas salas e muitos agentes, criam-se, quase sempre, pequenos congestionamentos, principalmente perto das saídas, o que independe da utilização da comunicação. Assim, podemos constatar que em relação a esta variável, quanto maior o número de salas, maiores serão os ganhos com a comunicação, para todos os comportamentos.

Em síntese, na medida em que as salas aumentam, a comunicação passa a ser positiva para os agentes, porém em momentos diferentes para cada comportamento, podemos dizer então que para cada comportamento a um ponto de transição onde o número de salas passa a influenciar positivamente na comunicação.

### 5.8. Análise da comunicação em populações heterogêneas

Os testes em grupos heterogêneos sem comunicação apresentaram padrões e resultados parecidos com os testes em grupos homogêneos sem comunicação. Este fato já era esperado, pois a taxa de sobrevivência de um determinado comportamento em um grupo de agentes

heterogêneos, que não se comunicam, deverá ser semelhante à de simulações com agentes homogêneos com a mesma quantidade de agentes de cada comportamento. A única diferença é que, por haver mais agentes no ambiente, a probabilidade de congestionamento aumenta, o que pode diminuir ligeiramente a taxa de sobrevivência das simulações com populações heterogêneas. A Figura 33 mostra um comparativo entre grupos heterogêneos com 140 agentes, sendo 47 para cada comportamento (um comportamento com 46 agentes) e grupos homogêneos com 50 agentes.

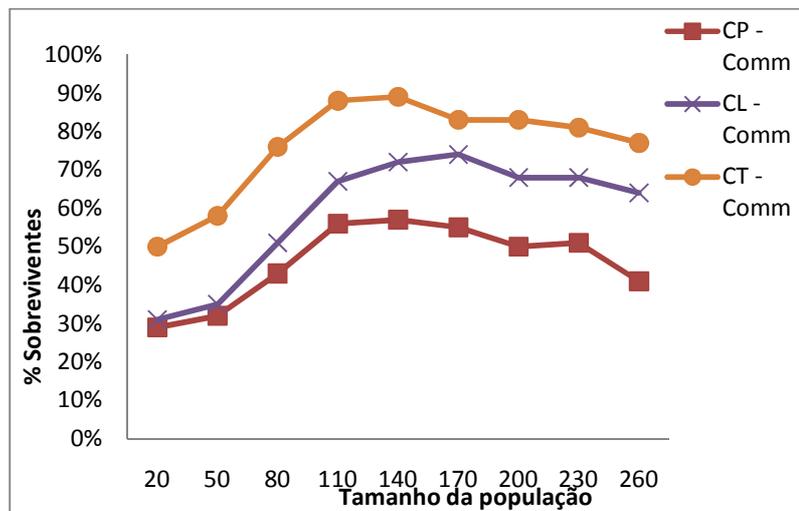


**Figura 33:** Comparação entre uma simulação com grupos homogêneos (50 agentes) e com grupos heterogêneos (140 agentes), ambas sem comunicação. Simulação com 4 focos de incêndio, em cenário com 10x10 salas.

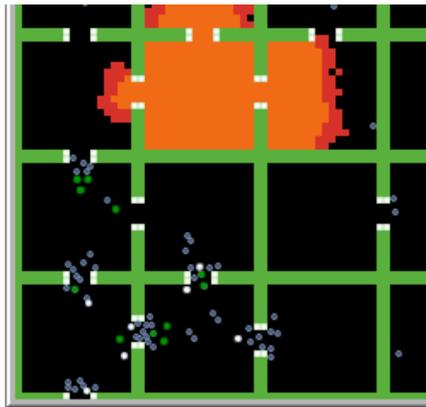
As simulações com populações heterogêneas com comunicação, produziram resultados diferentes em relação aos das populações homogêneas. Os agentes CP aumentaram sua taxa de sobrevivência em relação aos testes homogêneos. Isso acontece porque, ao encontrarem agentes líderes ou treinados no ambiente, deixam de andar aleatoriamente, e passam a seguir outro agente. E caso este agente, que ofereceu ajuda, chegue a uma saída, suas chances de sair aumentam consideravelmente, dependendo apenas dos congestionamentos que se formam nas portas da saída, para que o fogo lhe atinja.

O gráfico da Figura 34 representa a taxa de sobrevivência, em uma simulação com 2 focos de incêndio, em ambiente com 8x8 salas. Nesta simulação, percebemos que nas populações a partir de 140 agentes, a taxa de sobrevivência começa a ter crescimento negativo, o que acontece, principalmente, nos comportamentos CT e CL. A principal causa desta queda são os congestionamentos, que ocorrem quando vários grupos (líder e seus seguidores) tentam navegar

pela mesma porta (Figura 35). Estes congestionamentos retardam a navegação dos agentes e provocam a perda de vários seguidores do grupo, que não conseguem alcançar os agentes líderes, mesmo que estes estejam navegando mais devagar. Os congestionamentos acontecem, principalmente, nos cantos do ambiente, quando vários grupos começam a se encontrar, tentando atingir a mesma saída.



**Figura 34:** Taxa de sobrevivência dos agentes em populações heterogêneas.



**Figura 35:** Congestionamentos formados pelos agentes seguidores. Agentes CT (branco), agentes CL (verde) e agentes CP (azul).

## 5.9. Quadro geral de análises

Com os resultados extraídos na análise experimental foi construído um quadro geral com os padrões encontrados. As sínteses destes resultados estão expostas no final da apresentação dos gráficos de cada variável independente analisada. Diante do grande número de simulações executadas, cada variável independente foi analisada de forma separada, para que fosse possível capturar os padrões mais gerais relacionados a cada uma. O quadro geral da Tabela 4 contém as regras mais gerais encontradas nas simulações e descritas neste capítulo. Além de apresentar os padrões comuns à comunicação na taxa de sobrevivência da população, este quadro será utilizado pelos agentes no processo de comunicação seletiva apresentado no próximo capítulo.

**Tabela 4:** Regras extraídas da análise sistemática sobre a comunicação em cenários de emergência.

Variável	Valor	Comp.	Regra	Nº
Número de salas	Poucas salas	Todos	A comunicação influencia de forma negativa.	1
Número de salas	Muitas salas	Todos	A comunicação influencia de forma positiva.	2
Tamanho da população	População pequena	CP	A comunicação influencia de forma positiva.	3
Tamanho da população	População média e grande	CP	A comunicação influencia de forma negativa.	4
Tamanho da população	População média	CL e CT	A comunicação influencia de forma positiva.	5
Tamanho da população	População grande	CL e CT	A comunicação influencia de forma negativa.	6
Focos de incêndio	Número médio de focos	CL e CT	A comunicação influencia de forma positiva.	7
Focos de incêndio	Muitos focos	CL e CT	A comunicação influencia de forma negativa.	8

A Tabela 4 apresenta quatro regras relacionadas a variável tamanho da população, duas regras para a variável fogo e duas para a variável número de salas do ambiente. Estas foram validadas através de uma análise estatística feita sobre os dados, que será apresentada na seção a seguir.

### 5.9.1. Validação estatística das regras

A validação das regras pré-estabelecidas nesta seção foi construída através de testes de hipótese para os valores utilizados como limites de cada variável. Um teste de hipótese é uma regra de decisão utilizada para aceitar ou rejeitar um dado estatístico com base em elementos amostrais de uma população, ele pode ser definido também como uma afirmação sobre a

distribuição de uma variável aleatória. O que se espera com este tratamento estatístico é validar as regras extraídas das análises dos resultados das simulações.

O primeiro passo para realizar os testes de hipótese sobre as regras é estabelecer as hipóteses nula ( $H_0$ ) e alternativas ( $H_1$ ). Geralmente a hipótese alternativa ( $H_1$ ) representa a suposição que o pesquisador quer provar, sendo a hipótese nula ( $H_0$ ) formulada com o exposto propósito de ser rejeitada. Caso  $H_0$  seja rejeitada, a hipótese alternativa terá de ser aceita, conseguindo então o pesquisador provar o que queria. Para que uma regra seja considerada aceita, o teste de hipótese deve ou validar a hipótese alternativa, ou negar a hipótese nula.

A validação de uma hipótese pode ser feita através da fórmula:

$$Z_{calc} = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Sendo,  $\mu$  o valor da hipótese,  $S$  o desvio padrão da população e  $\bar{X}$  a média da amostra. O valor  $Z_{calc}$  calculado a partir da amostra será usado na validação da hipótese. Uma maneira de tomar a decisão de rejeição ou aceitação de uma hipótese é comparar o valor de  $Z_{calc}$  com o valor tabelado  $Z_{tab}$  extraído da tabela de distribuição normal. Para a extração deste valor, foi determinado um nível de significância  $\alpha$  de 5% no testes. A tabela de distribuição normal foi escolhida em função do número de simulações aleatórias utilizadas (100 simulações).

### 5.9.2. Validação das regras

Cada regra foi submetida a testes de hipótese que valide suas afirmações, sendo estas consideradas as hipóteses alternativas do teste, e cada hipótese nula a negação da afirmação correspondente.

As regras construídas seguem o princípio que a partir de um determinado cenário, a comunicação passará a influenciar na sobrevivência dos agentes. Por exemplo: a regra 2, afirma que a comunicação influencia de forma positiva todos os tipos de agentes em ambientes com muitas salas. O termo “muitas salas”, foi utilizado para discretizar a variável número de salas, e cada comportamento tem um valor associado. Para os agentes CL um ambiente com muitas salas significa um ambiente com mais de 8x8 salas, que é o valor suposto para a comunicação passar a

influenciar positivamente na sobrevivência dos agentes líderes. Assim a hipótese nula é que a comunicação não irá influenciar de forma positiva nestes cenários, sendo a hipótese alternativa a própria regra (A comunicação influencia de forma positiva). A média de sobrevivência dos agentes CL sem comunicação em ambientes com mais de 8x8 salas é de 33% de sobrevivência, já nos testes do agente CL com comunicação esta média cresce para 37%. Assim  $H_0$  é que  $\mu = 0,33$  e  $H_1$  é que  $\mu > 0,33$  (Teste unilateral a direita). Sendo o desvio padrão  $S$  igual a 0,14, o  $Z_{cal}$  será igual a 2,85 que é maior que o  $Z_{tab}$  de 1,64 para  $\alpha = 0,05$ . Diante desta afirmação podemos rejeitar  $H_0$  e confirmar  $H_1$ , sendo assim a regra número dois está confirmada para os agentes CL, isto é: “A comunicação influencia de forma positiva na sobrevivência dos agentes CL, nas simulações com um número de salas maior ou igual a 8x8 salas” (linha em cinza na tabela 5).

Seguindo este padrão os testes de hipótese foram construídos para todas as regras separadamente para cada comportamento. As tabelas 5, 6 e 7, mostram os testes de hipótese feitos com todas as regras extraídas das simulações realizadas para as variáveis número de salas, tamanho da população e focos de incêndio, respectivamente.

**Tabela 5:** Teste de hipótese para as regras da variável número de salas. Em cinza a linha que foi detalhada na seção 5.2.

Teste de Hipótese – Número de salas									
Comp.	Nº	$H_1$	$H_0$	Valor	Limite	Tipo	$Z_{calc}$	$Z_{tab}$	$H_1$
CP	1	A comunicação influencia de forma negativa.	A comunicação não influencia de forma negativa.	Poucas salas	salas < 10x10	Unilateral a esquerda	-3,44	-1,64	aceita
CP	2	A comunicação influencia de forma positiva.	A comunicação não influencia de forma positiva.	Muitas salas	salas > 10x10	Unilateral a direita	3,59	1,64	aceita
CL	1	A comunicação influencia de forma negativa.	A comunicação não influencia de forma negativa.	Poucas salas	salas < 8x8	Unilateral a esquerda	-2,72	-1,64	aceita
CL	2	A comunicação influencia de forma positiva.	A comunicação não influencia de forma positiva.	Muitas salas	salas > 8x8	Unilateral a direita	2,85	1,64	aceita
CT	1	A comunicação influencia de forma negativa.	A comunicação não influencia de forma negativa.	Poucas salas	salas < 6x6	Unilateral a esquerda	-2,12	-1,64	aceita
CT	2	A comunicação influencia de forma positiva.	A comunicação não influencia de forma positiva.	Muitas salas	salas > 6x6	Unilateral a direita	1,99	1,64	aceita

**Tabela 6:** Teste de hipótese para as regras da variável Tamanho da população.

Teste de Hipótese – Tamanho da população									
Comp.	Nº	H <sub>1</sub>	H <sub>0</sub>	Valor	Limite	Tipo	Zcalc	Ztab	H <sub>1</sub>
CP	3	A comunicação influência de forma positiva.	A comunicação não influencia de forma positiva.	População pequena	População < 110	Unilateral a direita	1,41	1,64	rejeitada
CP	4	A comunicação influência de forma negativa.	A comunicação não influencia de forma negativa.	População média e grande	População > 110	Unilateral a esquerda	-1,99	-1,64	aceita
CL	5	A comunicação influencia de forma positiva.	A comunicação não influencia de forma positiva.	População média	População > 50	Unilateral a direita	2,32	1,64	aceita
CL	6	A comunicação influencia de forma negativa.	A comunicação não influencia de forma negativa.	População grande	População < 200	Unilateral a esquerda	-2,14	-1,64	aceita
CT	5	A comunicação influencia de forma positiva.	A comunicação não influencia de forma positiva.	População média	População > 80	Unilateral a direita	2,01	1,64	aceita
CT	6	A comunicação influencia de forma negativa.	A comunicação não influencia de forma negativa.	População grande	População < 230	Unilateral a esquerda	-1,51	-1,64	rejeitada

**Tabela 7:** Teste de hipótese para as regras da variável focos de incêndio.

Teste de Hipótese – Focos de incêndio									
Comp.	Nº	H <sub>1</sub>	H <sub>0</sub>	Valor	Limite	Tipo	Zcalc	Ztab	H <sub>1</sub>
CL	7	A comunicação influencia de forma positiva.	A comunicação não influencia de forma positiva.	População média	Fogo > 3	Unilateral a direita	1,89	1,64	aceita
CL	8	A comunicação influencia de forma negativa.	A comunicação não influencia de forma negativa.	População grande	Fogo < 6	Unilateral a esquerda	-1,84	-1,64	aceita
CT	7	A comunicação influencia de forma positiva.	A comunicação não influencia de forma positiva.	População média	Fogo > 3	Unilateral a direita	1,98	1,64	aceita
CT	8	A comunicação influencia de forma negativa.	A comunicação não influencia de forma negativa.	População grande	Fogo < 7	Unilateral a esquerda	-1,60	-1,64	rejeitada

As regras rejeitadas foram descartadas para a utilização na comunicação seletiva que será apresentada no próximo capítulo.

### 5.9.3. Estratégias de navegação

Um dos problemas encontrados nas simulações foi a formação de congestionamentos causados pelos agentes, principalmente nas simulações heterogêneas. Isso aconteceu principalmente devido aos diversos grupos de seguidores que comumente se encontram nas

portas próximas a saída, competindo e congestionando as passagens para a fuga. Para evitar tais congestionamentos, nós criamos dois mecanismos de organização da navegação. Eles têm o objetivo de minimizar os congestionamentos e aumentar a taxa de sobrevivência dos agentes, atuando em conjunto com a comunicação seletiva que será apresentada no próximo capítulo. São eles:

- **Divisão de seguidores:** sempre que os agentes líderes se encontram pelo ambiente, dividem seus seguidores, para se formarem grupos iguais, o que pode diminuir o congestionamento entre as portas, uma vez que grupos menores vão trafegar por elas.
- **Criação de rota alternativa:** após dividirem os grupos de seguidores, e caso os agentes líderes decidam seguir pela mesma porta, aleatoriamente, um dos líderes pode optar por seguir um caminho alternativo, eliminando a hipótese de os grupos divididos, enfrentarem congestionamentos por trafegar por uma mesma porta. Para os agentes treinados (CT), a criação de rota alternativa acontece somente se o agente tiver um caminho com duas salas a mais, no máximo, para chegar à saída, o que evita a navegação por um caminho muito maior para chegar a uma saída. Para os agentes apenas líderes (CL), a criação de uma rota alternativa significa explorar outra subárvore da sala atual, deixando a que seria explorada no momento, para uma próxima etapa. Porém, isso só ocorrerá se o agente líder tiver outra subárvore da sala atual para explorar.

Estes dois mecanismos de navegação só poderão ser utilizados em populações heterogêneas, caso ambos os agentes líderes ou treinados decidam se comunicar. As regras apresentadas nesta seção foram produzidas em função da taxa de sobrevivência dos agentes. A utilização de outra métrica, como o tempo de fuga, não se aplica às análises da Tabela 4, e sua utilização poderia gerar resultados totalmente distintos dos apresentados neste trabalho.

Diante das considerações vistas no decorrer do capítulo, consideramos satisfatórios os resultados da investigação experimental. Apesar de muitas das análises apresentadas serem esperadas, face à natureza da situação, a extração dos padrões relacionados às variáveis independentes, nos dá a possibilidade de demonstrar a importância da comunicação nas situações

de emergência, e de criar bases concretas sobre as análises, permitindo elucidar a expansão das investigações, de acordo com os resultados já apresentados.

## 6.A comunicação seletiva no Maces

De acordo com os gráficos e análises apresentados no capítulo anterior, a comunicação é de extrema importância para a sobrevivência dos agentes, porém, em algumas situações, pode prejudicá-los, levando-os à morte. No trabalho que apresenta o MACES, estas situações não foram levadas em consideração, pois o fogo não se propagava pelo ambiente, sendo fixado em pontos estáticos, o que facilitava a fuga dos agentes. Em um ambiente dinâmico, a comunicação deve ser analisada de forma diferente, pois a sua utilização em excesso poderá produzir resultados catastróficos para os agentes. Este capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados de simulações, em que adicionamos um processo de comunicação seletivo no MACES-D. O objetivo principal da nova estratégia para a comunicação é validar os estudos deste trabalho, mostrando resultados melhores do que aqueles alcançados com a utilização da comunicação não seletiva (feita sempre que possível). No novo modelo de comportamento os agentes utilizam heurísticas baseadas nos resultados das análises do capítulo anterior para tomar suas decisões sobre comunicar ou não. Como o ambiente é desconhecido, estas heurísticas tentam evitar o gasto excessivo do tempo com a comunicação, uma vez que esta foi apontada como um dos motivos do aumento do número de morte dos agentes em diversas situações. Este capítulo traz ainda comparações entre o MACES e o MACES-D.

Para que os agentes sejam capazes de tomar decisões sobre a comunicação, eles guardam informações sobre sua navegação, estimando os possíveis estados das variáveis independentes descritas no capítulo anterior. A decisão de comunicar ou não, foi construída através dos passos descritos abaixo, e será executada em todas as rodadas da simulação pelos agentes:

### **1) Atualizar o valor das variáveis independentes que influenciam na comunicação.**

O agente guardará em sua memória valores relacionados às variáveis: tamanho da população, número de focos de incêndio, número de salas do ambiente. A cada rodada da simulação, estes valores serão atualizados, de acordo com os novos estados apresentados pelo ambiente.

- 2) **Verificar que regras são acionadas pelas variáveis.** O agente guardará em sua memória um conjunto de regras extraídas das análises sobre a comunicação, utilizando-as, para escolher que decisão tomar.
- 3) **Calcular a utilidade da comunicação.** As regras suportadas pelas variáveis serão utilizadas em uma função, para verificar a utilidade da comunicação.
- 4) **Comunicar ou ignorar os outros agentes, e seguir em direção ao próximo ponto de interesse.** Caso a utilidade da comunicação seja maior que zero, o agente optará pela sua realização, caso contrário, não efetua, ou ignora as informações comunicadas pelos outros agentes.

Para que a comunicação seletiva funcione, uma adaptação teve que ser feita sobre o MACES-D. No modelo inicial, os agentes se comunicam sempre que se encontram no ambiente, e a comunicação é interrompida apenas pelo fogo. Com a comunicação seletiva, um agente pode se identificar a outro agente e não receber respostas, pois o outro agente pode não querer comunicar e seguir navegando pelo ambiente. No MACES-D, com comunicação seletiva, um agente espera por uma resposta dos outros agentes, o mesmo tempo gasto com a ação de comunicação, e caso ela não aconteça, ele continua navegando, desistindo da ação de comunicação com aquele agente.

## 6.1.Criação da função utilidade

A criação da função utilidade que informará se vale a pena comunicar ou não, foi feita com no quadro de regras construído no capítulo anterior. À medida que o agente navega pelo ambiente, ele vai guardando as informações visuais captadas, para aplicar no mapeamento das variáveis independentes. Após mapear as regras que se encaixam dentro do estado atual do agente, ele calcula a utilidade das regras e com seu resultado verifica o quão vale a pena comunicar com outros agentes, naquele determinado instante.

Uma de nossas preocupações, na construção das regras e mapeamento da discretização das variáveis independentes, foi criar modelos simples, com a utilização de, no máximo, duas variáveis independentes por regra, sendo cada variável com três valores possíveis. O mapeamento do valor de cada variável será feito pelo agente, em tempo de execução, a cada

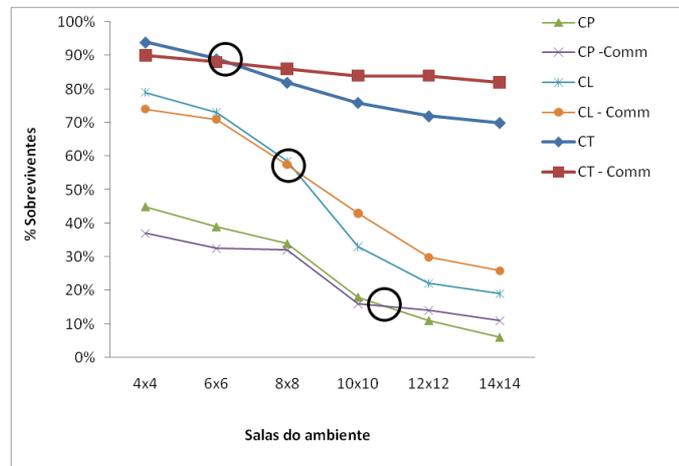
rodada da simulação. Ele é feito de forma individual, através da análise do estado atual do cenário. Mapeando o valor de cada variável, através dos limites estabelecidos antes da simulação, extraídos das análises sobre a comunicação.

### 6.1.1. Mapeamento do número de salas do ambiente

Para esta variável, as regras mostram que a partir de um determinado número de salas, a comunicação passa a contribuir de forma positiva para a sobrevivência dos agentes, ver Tabela 8. Assim, teremos dois valores discretos para o número de salas: poucas e muitas salas. Para que o agente perceba qual o estado atual desta variável, ele calcula o número de salas que já trafegou pelo ambiente, e comparará a uma tabela que contém a quantidade média de salas trafegadas pelos agentes sobreviventes, em todas as simulações, em função do número de salas (ver Tabela 9). Nesta tabela, os valores em vermelho indicam o momento em que a comunicação passa a influenciar positivamente a sobrevivência dos agentes. Por exemplo, na Figura 36, a partir dos testes com salas 6x6, a comunicação passa a influenciar positivamente, no comportamento CT. Nas simulações com salas 6x6, os agentes CT andam em média sete salas para chegar à saída, então, enquanto os agentes CT não tiverem navegado por 7 salas, acharão que estão em um ambiente com número menor de salas, ativando a regra 9, pois a comunicação é prejudicial em ambiente com poucas salas. Quando este número de 7 salas for atingido, o agente achará que está em um ambiente com 6x6 salas ou mais, e ativará a regra 10, avaliando a comunicação como positiva.

**Tabela 8:** Regras extraídas para o número de salas.

Variável	Valor	Comp.	Regra	Nº
Número de salas	Poucas salas	Todos	A comunicação influencia de forma negativa.	1
Número de salas	Muitas salas	Todos	A comunicação influencia de forma positiva.	2



**Figura 36:** Os pontos em preto representam os limites escolhidos para os agentes em relação ao número de salas do ambiente.

**Tabela 9:** Número médio de salas trafegadas pelos agentes sobreviventes nas simulações.

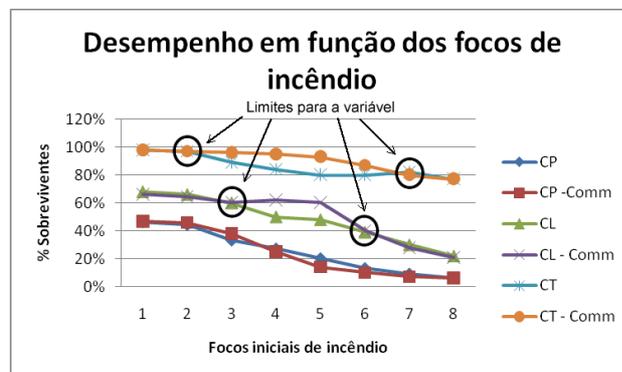
	4x4	6x6	8x8	10x10	12x12	14x14
CP	5	10	17	25	34	42
CL	5	9	15	21	28	36
CT	4	7	9	11	14	19

Vale lembrar que para alguns comportamentos e algumas variáveis, não a ativação de regras, uma vez que elas não foram aceitas nas análises estatísticas. Para a variável número de salas, todos os comportamentos tiveram suas regras aceitas.

### 6.1.2. Mapeamento do número de focos iniciais de incêndio

A quantidade de focos iniciais de incêndio no ambiente é responsável por determinar o tempo máximo de fuga dos agentes. Assim, para mapear a variável do fogo, os agentes utilizarão o tempo de fuga da simulação. Através deste valor, o agente classifica como ele acha que o ambiente está configurado em relação ao fogo. Os três valores possíveis para o fogo são: pouco, médio e muito. A discretização destas variáveis foi feita com a seguinte estratégia: foram mapeados os intervalos nos quais a comunicação tem influência positiva na taxa de sobrevivência da população, avaliando os resultados em função do número de focos iniciais de incêndio. O número simulado de focos de incêndio mais próximo dos limites deste intervalo será

o responsável pelo mapeamento dos valores discretos da variável focos de incêndio. Caso este intervalo seja aberto, o valor atribuído será o do maior ou menor número de focos de incêndio utilizado, neste caso, 1 ou 8 focos. O intervalo de cada comportamento será o responsável pela classificação do valor dos focos de incêndio (poucos, médios ou muitos). Caso o valor esteja entre o limite inferior e o limite superior proposto para esta variável, o agente ativa as regras que avaliam a comunicação como positiva. A Figura 37 traz um exemplo de simulação com os limites estabelecidos para a variável do fogo, mostrando os limites superiores e inferiores que definem os momentos em que a comunicação passa a ter influência positiva para os agentes.



**Figura 37:** Os pontos em preto representam exemplos de limites escolhidos para os agentes em relação aos focos de incêndio.

Foi adicionada à memória do agente, uma tabela que contém a média do tempo de fuga dos agentes sobreviventes, em cada configuração de número de focos de incêndio, para cada configuração do número de salas simuladas. Assim, para o agente classificar o número de focos de incêndio em que ele acha que se encontra, utiliza dois parâmetros de entrada para escolher o valor correspondente na tabela: (1) seu tempo total de simulação e o (2) número de salas que acha que o ambiente possui. A primeira variável é guardada pelo próprio agente, para a segunda, ele deve utilizar o valor escolhido para a variável número de salas do ambiente, já explicado na subseção anterior. A Tabela 10 traz os valores utilizados pelos agentes CL, para ambientes de

4x4 salas; os valores em vermelho apontam os limites que indicam o intervalo que ativa as regras (ver Tabela 11) da comunicação para o agente. Não há regras para a variável do fogo para os agentes CP, pois não foram encontrados padrões claros da influência da comunicação na sobrevivência dos agentes.

**Tabela 10:** Valores para a variável do fogo, em ambientes com 4x4 salas.

Simulações com 4x4 salas - Agente CL								
	1	2	3	4	5	6	7	8
Tempo	17	16	14	12	12	11	9	9

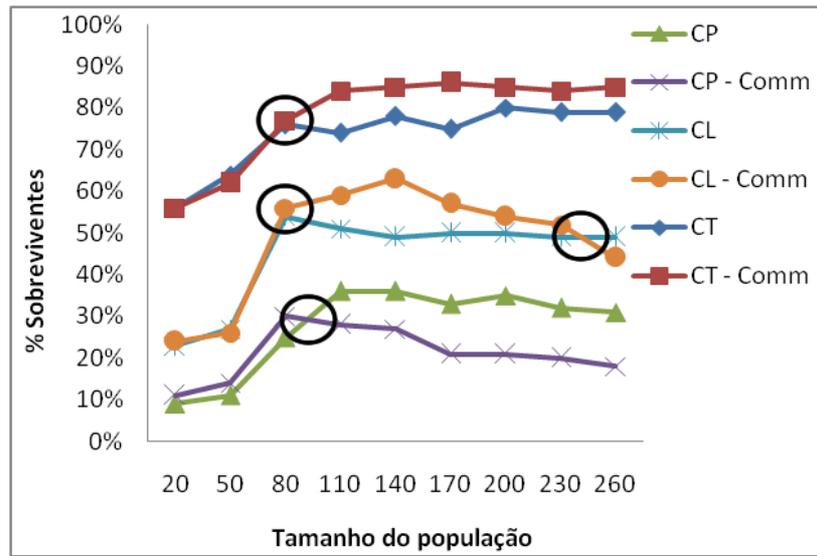
**Tabela 11:** Regras extraídas para os focos de incêndio.

Variável	Valor	Comp.	Regra	Nº
Focos de incêndio	Número médio de focos	CL e CT	A comunicação influencia de forma positiva.	7
Focos de incêndio	Muitos focos	CL e CT	A comunicação influencia de forma negativa.	8

### 6.1.3. Mapeamento do tamanho da população

O valor utilizado para o tamanho da população será a quantidade de pessoas que o agente encontra por sala, enquanto navega pelo ambiente. Através desta quantidade, o agente vai classificar como acha que o ambiente está configurado, em relação ao tamanho da população. Os três valores possíveis para a população são: pequeno, médio e grande. A discretização desta variável seguiu a mesma estratégia da variável focos de incêndio, utilizando, no lugar do tempo de navegação, a quantidade de pessoas que o agente encontra por sala, enquanto navega pelo ambiente. Assim, o valor de população simulado, mais próximo dos limites deste intervalo será o responsável pelo mapeamento dos limites entre os valores discretos da variável tamanho da população (ver Figura 38). Caso este intervalo seja aberto, o valor atribuído será o da maior ou menor população utilizada, neste caso, 260 ou 30 agentes. O intervalo de cada comportamento será o responsável pela classificação do valor da população (pequena, média ou grande). A Figura 38 apresenta a imagem de uma simulação que tem os intervalos marcados para cada comportamento, com os agentes CP e CT apresentando intervalos abertos, sem limite superior.

Para um agente CL classificar sua população como média, sua média de encontros, por sala na simulação, deverá ser maior que a média de encontros dos agentes, nas simulações classificadas como limite inferior da população, que são as populações com 80 agentes.



**Figura 38:** Exemplo de limites selecionados em uma determinada simulação, com o comportamento CT possuindo apenas limite inferior.

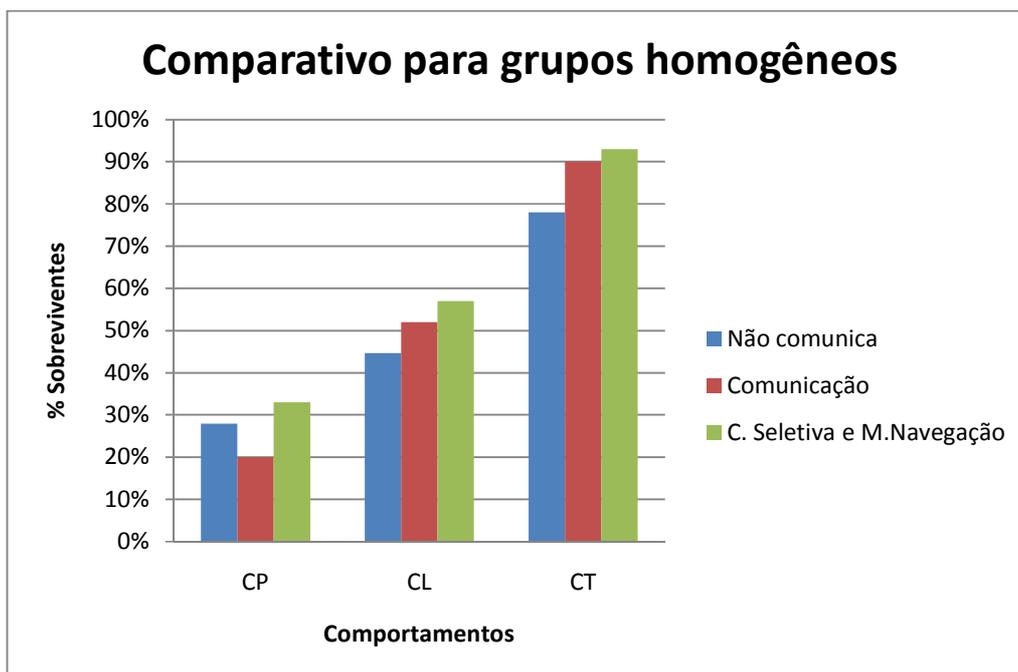
A cada rodada de tempo da simulação, o agente atualiza o valor das variáveis e calcula suas utilidades através das regras escolhidas que classificam a comunicação, com os valores -1 (influência negativa), 0 (neutro) ou 1 (influência positiva), dependendo da faixa em que a variável foi localizada. Com as utilidades calculadas, o agente as soma e, caso o valor somado seja maior que zero, efetua a comunicação; caso contrário ignora os agentes da sala, seguindo para seu próximo ponto de interesse.

## 6.2. Discussões sobre a comunicação seletiva

A validação do novo modelo de comunicação seletiva ocorreu com o desenvolvimento dos mesmos testes apresentados na seção anterior, porém, com um comportamento a mais, o comportamento com comunicação seletiva e mecanismos de navegação (S-Comm). Com os

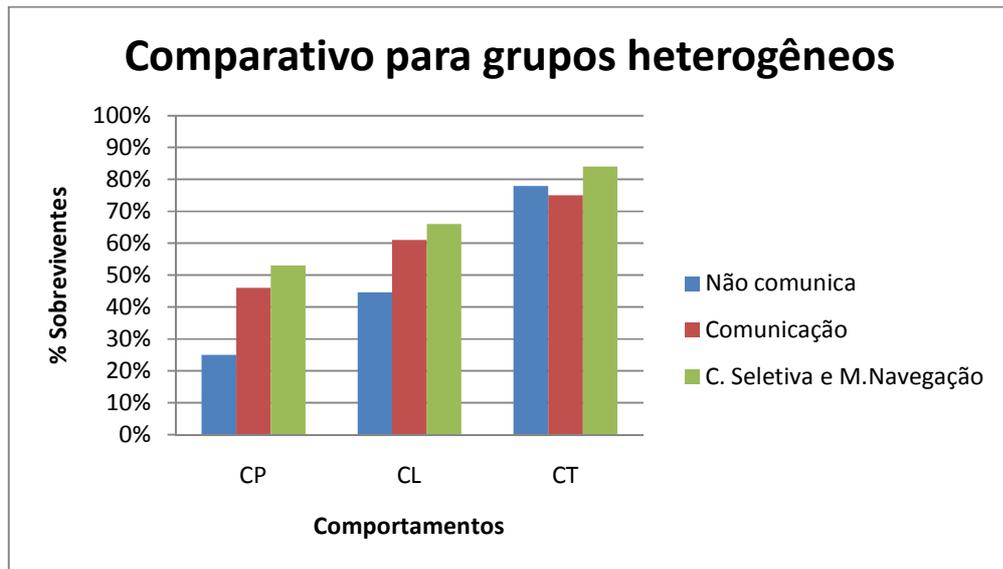
resultados, esperamos mostrar não só a importância dos estudos voltados para a comunicação entre agentes em cenários de emergência, como também situações em que o egoísmo (não comunicar) e a competitividade entre os agentes trazem resultados favoráveis à população de agentes. A comunicação seletiva pode ser vista como um comportamento egoísta, que emerge no agente durante a busca por sua sobrevivência. A combinação de atitudes altruístas e egoístas nas situações de emergência pode gerar resultados interessantes para os agentes, neste caso, o aumento da sua taxa de sobrevivência.

O gráfico da Figura 39, apresentado a seguir, corresponde ao desempenho geral dos agentes com comunicação seletiva, para cada tipo de comportamento nas simulações com grupos homogêneos. Em uma visão geral, todos os comportamentos foram beneficiados pela comunicação seletiva, porém os agentes CP, obtiveram o maior lucro. Isto aconteceu, porque a comunicação gerava a formação de muitos congestionamentos, uma vez que os agentes CP sempre se reúnem em grupos para navegar, o que aumenta o número de congestionamentos nas portas do ambiente. Com a comunicação seletiva, os poucos grupos que se formaram eram pequenos, não gerando congestionamentos, facilitando a navegação dos agentes e, conseqüentemente, melhorando seus resultados. O menor lucro foi obtido pelos agentes CT, isso aconteceu, devido a grande quantidade de sobreviventes deste tipo de comportamento, atingindo mais de 90% de sobreviventes.



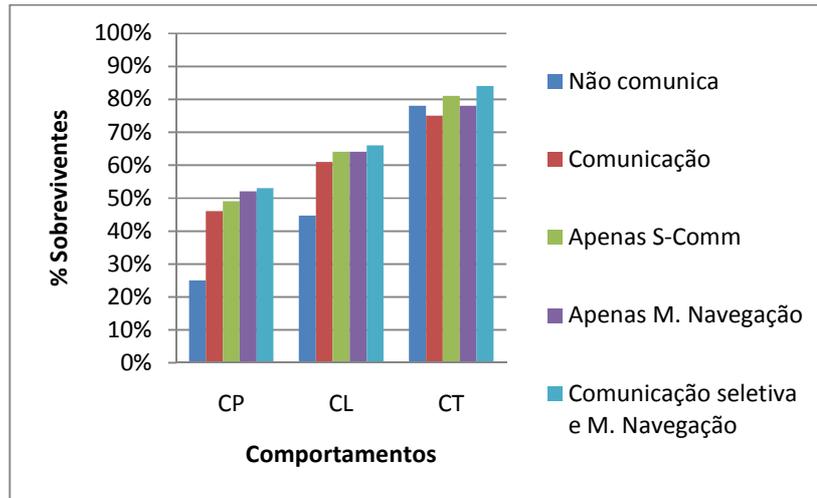
**Figura 39:** Comparativo entre a comunicação para grupos homogêneos de agentes.

Para grupos heterogêneos, a comunicação seletiva apresentou resultados mais significativos. O gráfico da Figura 40 mostra o comparativo entre os desempenhos gerais de cada comportamento, em ambientes com populações heterogêneas. Assim como nos testes com populações homogêneas, os agentes CT apresentaram pouco ganho com a comunicação seletiva, porém este pequeno ganho foi suficiente para superar os resultados sem comunicação. Para os comportamentos CL e CP, a comunicação seletiva e os mecanismos de navegação proporcionaram aumentos consideráveis na taxa de sobrevivência da população, principalmente para os agentes CP, que deixaram de criar congestionamentos, quando se transformaram em agentes seguidores. Estes resultados mostraram que a comunicação seletiva e os mecanismos organizacionais, promovidos pela comunicação (divisão de seguidores, criação de rota alternativa), são capazes de trazer benefícios para as fugas dos agentes em situações de emergência.



**Figura 40:** Comparativo entre a comunicação para grupos heterogêneos de agentes.

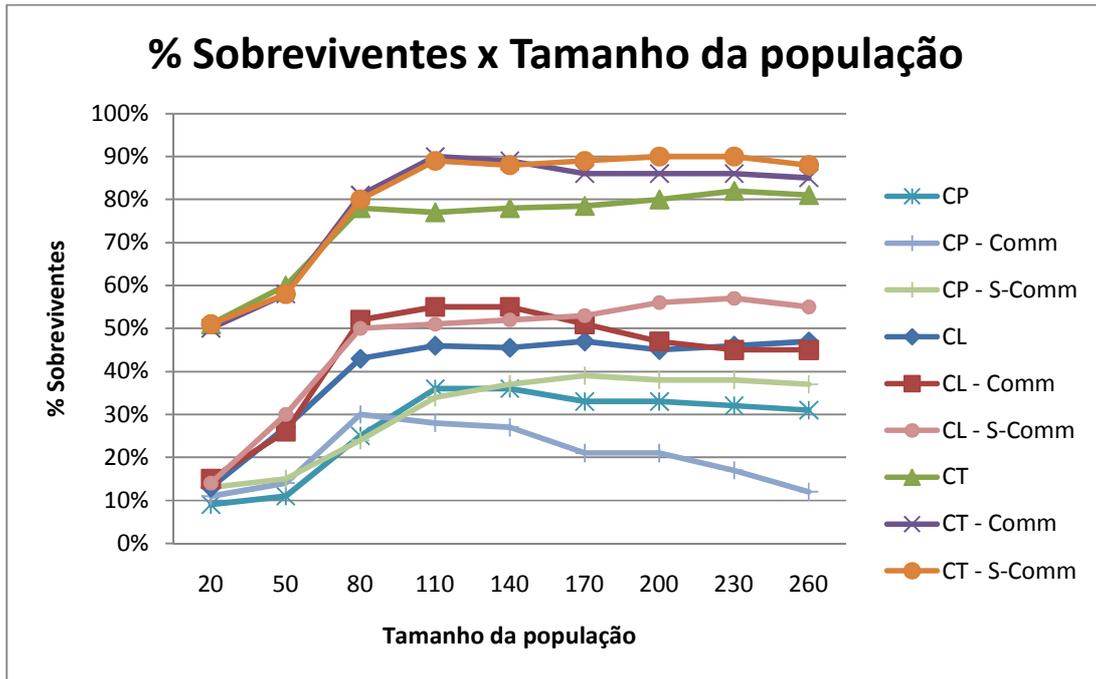
Outra comparação que foi realizada foi a análise individual dos mecanismos de navegação e da comunicação seletiva, para verificar como cada um contribuiu na taxa de sobrevivência da população. O gráfico da Figura 41 mostra os desempenhos de forma separada, apresentando a comunicação seletiva com uma pequena melhora que os resultados dos mecanismos de navegação. A conclusão que podemos chegar com os resultados do gráfico é que nas simulações desenvolvidas neste trabalho, é mais importante formar grupos de tamanho menor (comunicação seletiva), do que ter que reorganizá-los após suas formações (mecanismos de navegação).



**Figura 41:** Comparativo entre os mecanismos de navegação e a comunicação seletiva.

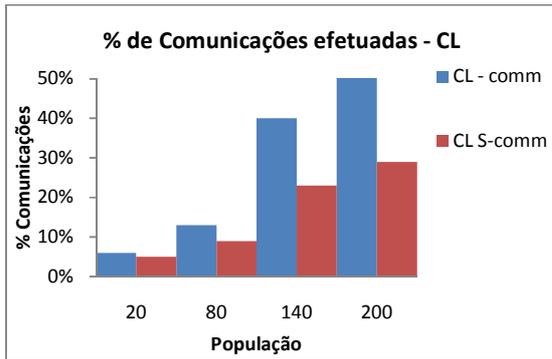
Os mecanismos de navegação são mais importantes para os agentes que dependem diretamente da ajuda de outras agentes para sair do ambiente, neste caso, os agentes CP. Para os agentes CT, parar para reorganizar os seguidores, não lhe traz tantos benefícios, sendo o fato de muitas vezes não comunicar (comunicação seletiva) ser bem mais importante na fuga, pois eles ganham tempo para navegar em até uma saída.

A Figura 42 traz a evolução da taxa de sobrevivência em relação ao tamanho da população, para todos os comportamentos em ambientes com população homogênea. Os resultados mostram que, apesar da taxa de sobrevivência na comunicação seletiva, nas populações de tamanho médio, ser um pouco menor que no comportamento que sempre comunica, ela aumenta a sobrevivência dos agentes, nas situações com populações mais elevadas, e na média geral também. Isto se dá porque nas populações maiores, a comunicação seletiva evita o excesso de comunicações que prejudica os agentes, o que já foi abordado na análise sistemática do capítulo anterior.

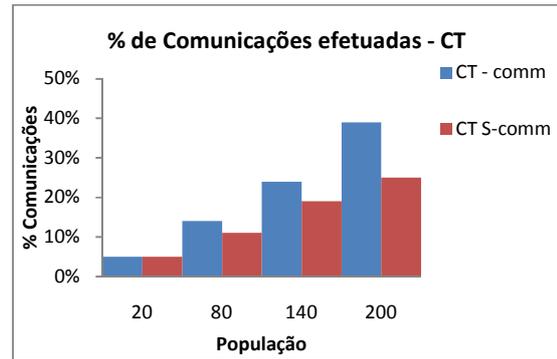


**Figura 42:** Desempenho dos comportamentos em relação ao tamanho da população.

Para mostrar o excesso de comunicações efetuadas pelos agentes, os gráficos das figuras Figura 43 e Figura 44 trazem as médias das comunicações efetuadas pelos comportamentos CL e CT, em um cenário com 8x8 salas e com 4 focos de incêndio, mostrando que o modelo com comunicação seletiva elimina várias ações de comunicação. Com poucos agentes no ambiente, quase não se percebe a diferença entre os processos de comunicação, porém ao incrementar o número de agentes, os encontros passam a acontecer a quase todo instante, como o agente CL, que nas simulações com 200 agentes utiliza 51% de seu tempo com a comunicação. Neste ponto, a comunicação seletiva elimina parte destas comunicações (22%), possibilitando que o agente dedique maior tempo à navegação pelo ambiente.



**Figura 43:** Média de comunicações efetuadas pelos agentes CL.



**Figura 44:** Média de comunicações efetuadas pelos agentes CT.

Como os gráficos mostram, os agentes CL efetuam muito mais comunicações que os agentes CT. Isso acontece porque os agentes CT saem mais rapidamente do ambiente (por conhecerem a saída), e costumam se encontrar, mais frequentemente, já nas salas vizinhas da saída, enquanto os agentes CL que sobrevivem demoram mais tempo explorando o ambiente através da busca em profundidade para atingir as saídas.

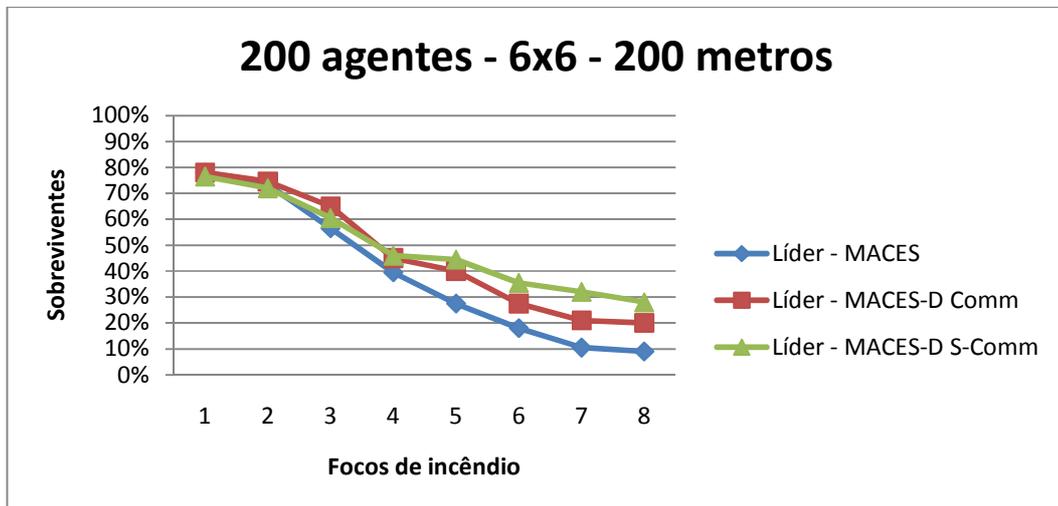
Os resultados apresentados nesta seção objetivaram a comprovação da análise experimental sobre a comunicação nos cenários de emergência, mostrando sua importância através da comunicação seletiva e dos mecanismos de navegação dos agentes.

### 6.3.Comparativo entre o MACES e o MACES-D

Para efetuar o comparativo entre o MACES e o MACES-D, nós recriamos os agentes do MACES, segundo [14][15], e colocamos os agentes para atuarem no ambiente do MACES-D, assim podemos ver agentes que não estão preparados para atuar em ambientes dinâmicos, fazendo um comparativo direto, com os agentes desenvolvidos para o MACES-D.

A primeira comparação estabelecida entre os dois SMA utilizou a métrica principal deste trabalho, que é a taxa de sobrevivência da população. No gráfico da Figura 45 comparamos o desempenho dos agentes líderes dos MACES-D, com e sem comunicação seletiva, em relação ao

agente líder do MACES (que não sabem fugir do fogo). A variável independente neste gráfico foi o número de focos iniciais de incêndio, que é o valor responsável pela dinamicidade do ambiente, e que diferencia os dois ambientes do MACES e MACES-D.

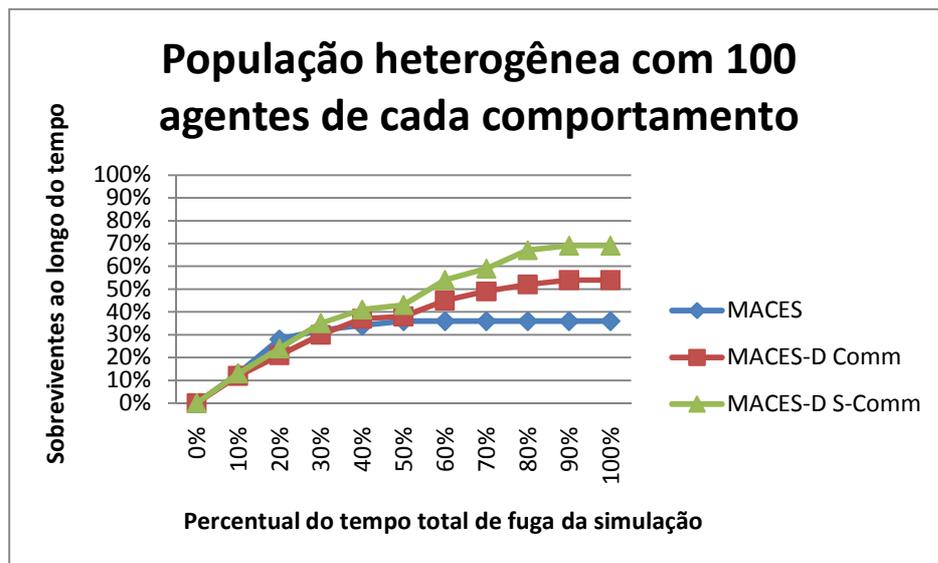


**Figura 45:** Simulação com 200 agentes em salas 6x6.

O melhor desempenho é atribuído ao agente e aos líderes do MACES-D S-Comm, com comunicação seletiva, que apesar de não superarem os outros comportamentos, nas simulações com poucos focos de incêndio, conseguem resultados sempre melhores, já a partir dos testes com 4 focos de incêndio. No caminho inverso, os agentes do MACES, só acompanham os resultados dos outros comportamentos até os testes com dois focos iniciais de incêndio. À medida que os focos aumentam, o índice de sobrevivência cai consideravelmente, pois os agentes não sabem como agir diante dos focos de incêndio que se propagam pelo ambiente.

Para comprovar de forma mais efetiva os resultados entre o MACES e o MACES-D, foram realizados testes, em que a variável observada foi o tempo total de fuga dos agentes, métrica original do MACES. A Figura 46 traz o índice de sobrevivência dos agentes ao longo do tempo máximo que um agente levou para sair do ambiente em chamas, em uma simulação com 300 agentes (100 agentes de cada comportamento). A cada rodada de tempo da simulação, foram mapeados os agentes que iam saindo do ambiente, computando a sobrevivência ao longo do tempo. Os resultados deste gráfico mostram que o MACES-D S-Comm se beneficia já no final

da simulação, quando a comunicação seletiva começa a fazer diferença, evitando várias ações de comunicação. O MACES atinge seu máximo de sobrevivência, já com 50% do tempo total de evacuação, o que indica que os agentes do MACES que sobrevivem são, normalmente, os que estão localizados perto das saídas.



**Figura 46:** Percentual dos sobreviventes ao longo do tempo de fuga do último agente a sobreviver na simulação. Simulação com 300 agentes (100 agentes para cada comportamento – pânico, liderança e treinamento). Cenário: 8x8 salas, 4 focos de incêndio.

Os resultados apresentados ao longo deste capítulo confirmaram a utilidade dos resultados extraídos na análise experimental do capítulo 4, mostrando a comunicação seletiva, como mais eficiente para a fuga dos agentes. Na comparação com o MACES, o MACES-D mostrou superioridade nos ambientes dinâmicos, e a sua comunicação seletiva obteve os melhores resultados nos ambientes estáticos, validando assim, os objetivos gerais do trabalho, de desenvolver uma extensão do modelo MACES para atuação em ambientes dinâmicos, e através deste novo modelo, provar que a utilização da comunicação não será benéfica para os agentes, em todas as situações, como apresentavam os trabalhos de Pelechano et al. [14][15].

# 7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais sobre esta pesquisa, destacando o trabalho realizado, as contribuições e as sugestões para trabalhos futuros.

## 7.1. Considerações finais sobre a pesquisa

Os estudos envolvendo simulações computacionais, como a desenvolvida neste trabalho, buscam aproximar as teorias relacionadas ao comportamento humano, de resultados mensuráveis extraídos do computador. Neste trabalho, ao analisar a comunicação em situações de emergência, o que se objetivou foi adicionar às pesquisas da área, novos estudos sobre a comunicação, que acreditamos ser essencial para a sobrevivência de pessoas nestas situações. Tais estudos podem possibilitar o aprimoramento de treinamentos, para a criação de organizações entre os agentes, que facilitem a fuga de todas as pessoas envolvidas.

Este trabalho apresentou um estudo experimental sobre a influência da comunicação entre agentes em situações de emergência. A métrica utilizada para a análise foi a taxa de sobrevivência da população. Nas pesquisas realizadas, apenas Pelechano et. al. [14][15] fizeram simulações em cenários de emergência, levando em consideração a comunicação entre os agentes e o ambiente desconhecido (MACES). No MACES, o ambiente estático limita as análises sobre a influência da comunicação, não permitindo extrair conclusões mais específicas sobre suas contribuições na fuga dos agentes. Assim, uma extensão do MACES foi produzida e apresentada no capítulo 3 (MACES-D), levando em consideração a dinamicidade do ambiente na navegação dos agentes. No MACES-D, as forças de repulsão do fogo foram consideradas na fórmula da força social que atua sobre o agente, para que o fogo passasse a influenciar nas suas navegações pelo ambiente. Além disso, os comportamentos originais do MACES sofreram modificações para lidar com a propagação do fogo, que poderia levar os agentes à morte.

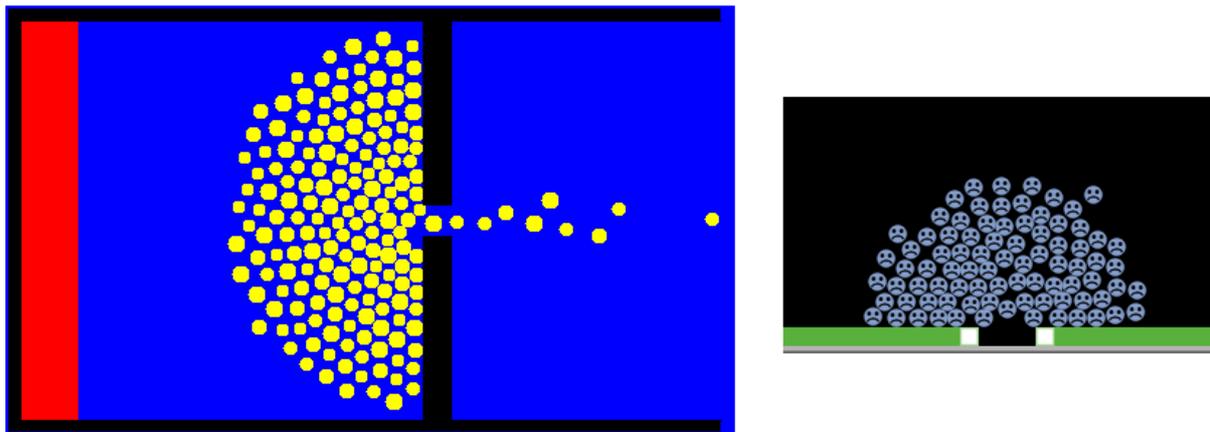
No capítulo 4, a investigação comparativa feita sobre o MACES-D em ambientes dinâmicos, mostrou relações da sobrevivência dos agentes com o tamanho da população, o número de focos de incêndio, a quantidade de salas e o tamanho do ambiente. Em nosso estudo,

a dinamicidade do ambiente criou diversas situações em que a comunicação prejudica a fuga dos agentes. Para atacar estas situações, um processo de comunicação seletiva que evita a troca de informações redundantes foi apresentado no capítulo 5. A comunicação seletiva transforma os agentes líderes e treinados que, inicialmente, são sempre altruístas, em agentes egoístas em diversos momentos. Esta transformação pode evitar formação de congestionamentos e perda de tempo excessiva com a troca de informações, enquanto o fogo se propaga pelo ambiente. Além da comunicação seletiva, dois mecanismos de navegação foram produzidos, para habilitar os agentes líderes e treinados a organizarem melhor a fuga, dividindo o número de seguidores entre eles, podendo ainda selecionar rotas alternativas de fuga, evitando assim, que dois grupos grandes de agentes tentem passar pela mesma porta. Os resultados da comunicação seletiva foram promissores, indicando que o seu uso aumenta a taxa de sobrevivência dos agentes. Isso nos leva a dizer que a influência da comunicação tem uma ligação direta com as condições do ambiente e a forma como cada comportamento a utiliza, concluindo que sua utilização deve ser melhor investigada, e a resposta sobre sua utilidade não deve estar simplesmente associada a um valor “sim” ou “não”.

O trabalho que apresenta o MACES efetuou comparações simples, mostrando a comunicação, sempre como positiva. Eles criaram simulações com os agentes, utilizando e não utilizando a comunicação, e verificaram que os agentes que comunicam saem mais rápido do ambiente. O capítulo 5 trouxe resultados que comprovam a baixa taxa de sobrevivência do MACES em ambientes dinâmicos, por seus agentes não estarem habilitados a atuar nestas condições. Para comparar melhor os resultados do MACES com o MACES-D, o mesmo capítulo 5 trouxe simulações que têm como métrica o tempo total de evacuação dos agentes (métrica do trabalho original do MACES), mostrando que os comportamentos do MACES-D, além da maior taxa de sobrevivência, conseguem sair do ambiente em tempo mais curto.

## **7.2. Contribuições, Limitações e Trabalhos futuros**

Como visto no referencial teórico, as investigações feitas sobre os comportamentos em simulações de emergência ainda não têm padrões ou conclusões concretas sobre como as pessoas agem ou devem agir nestas situações. Diante destes fatos, consideramos que os comportamentos apresentados neste trabalho conseguiram simular as principais características individuais, que emergem na população, comumente citadas nos estudos sobre comportamentos em situações de emergência: (1) o pânico relacionado aos agentes CP, e ainda a união dos agentes CP para navegação em grupo, citada por Smelser [53], como um comportamento emergente em populações com pessoas em pânico; (2) O altruísmo e o egoísmo relacionados aos agentes CL e CT, que inicialmente são altruístas, porém com a comunicação seletiva, podem ser tornar egoístas, com o objetivo de garantir sua sobrevivência. O altruísmo destes agentes se reflete também nos conceitos de influência social [12], em que os agentes CP, por não saberem o que fazer para fugir, acabam seguindo os passos dos agentes líderes e treinados quando os encontram. Neste trabalho, pudemos constatar, também, uma das formações dinâmicas emergentes nas populações em fuga [21], quando muitos agentes buscam escapar pela mesma porta. Há uma tendência na formação de arcos emergentes na população, como mostra a Figura 47 comparativa do trabalho [21] e de uma simulação feita neste trabalho.



**Figura 47:** Formação de arcos. Imagem a esquerda foi retirada do sítio que hospeda vídeos com as simulações produzidas a partir do trabalho de Helbing et al. [21]. Imagem a direita extraída de uma simulação realizada com o MACES-D.

Diante dos fatos mencionados, podemos destacar como contribuições deste trabalho:

- O MACES-D, um SMA com comunicação seletiva para atuação de agentes em ambientes dinâmicos, com capacidade de comunicação e raciocínio sobre esta comunicação.
- A investigação experimental, que apresentou as correlações da comunicação em ambientes dinâmicos, considerada uma contribuição importante, pois não foram encontrados estudos similares relacionados às situações de emergência e evacuação. Ela foi corroborada pela comunicação seletiva apresentada no capítulo 5, que conseguiu aumentar a média da taxa de sobrevivência dos comportamentos.

A grande limitação deste trabalho ainda se concentra sobre o desenvolvimento de ambientes mais realistas para as simulações de fuga no MACES-D. Ele desconsidera ainda, muitos aspectos visuais da fuga em cenários de emergência, como a utilização de mapas reais, com as sinalizações e dimensões adequadas. Nas configurações das simulações, para as análises, o caráter intuitivo dos custos associados às ações de comunicação e decisão dos agentes também deve ser considerado uma limitação. Estudos mais específicos deveriam ser realizados.

Seguindo a linha de atuação do MACES, o MACES-D busca modelar populações de agentes, do ponto de vista individual de cada um. Braun [5] tem estes objetivos, porém utiliza um único tipo de agente, que assume comportamentos diferentes, em função dos outros agentes que estão ao seu redor, e que representam sua família. Já em Pan et al. [12] a busca é por modelar comportamentos como competição, formação de filas, navegação em grupo. Porém isso é feito em ambientes pequenos e conhecidos para os agentes, sem a utilização da comunicação entre os mesmos. Henein et al. [57] citam o MACES como uma importante abordagem que conseguiu representar a heterogeneidade da população, e os comportamentos emergentes na mesma, através da modelagem das decisões individuais, em dois momentos, quando os agentes estão sozinhos, e quando em grupo.

É necessário admitir que as análises e discussões deste estudo emolduraram um número maior de perguntas do que de respostas. De qualquer forma, as reflexões aqui contidas e as observações dos casos estudados buscam elucidar uma compreensão inicial das relações da comunicação em simulações de emergência. Mas, como toda pesquisa, não esgotou o assunto e abre novas perspectivas para outros estudos.

Este estudo pode servir de ponto de partida para habilitar análises mais complexas sobre a comunicação em cenários de emergência. Estas análises podem seguir pela linha comportamental, analisando a influência da comunicação na organização de filas, que evitem os congestionamentos, ou sobre a forma como os agentes líderes conduzem e ajudam os outros agentes do ambiente, como em Murakami [58]. Além disso, se levarmos em conta algumas características e propriedades dos agentes, desconsideradas neste estudo, constatamos que elas podem causar impactos diferenciados sobre a comunicação, como a organização de pequenos grupos em famílias, ou retirar o caráter estático e determinístico das características psicológicas do agente, que pode transformar um líder em uma pessoa em pânico, modificando completamente sua ação no ambiente. Outro ponto que pode ser explorado é a comunicação visual do ambiente com as pessoas em fuga,, que diz respeito às sinalizações do ambiente, à forma como ela pode ajudar os agentes a chegarem mais rapidamente à saída. Nós acreditamos que uma extensão natural deste trabalho seria a criação de simulações, considerando outros

atributos cognitivos dos agentes, e a utilização de cenários reais, que poderiam produzir dados e resultados mais significativos sobre as variáveis independentes aqui analisadas.

# Referências

1. FERRANTI, E.; TRIGONI, N.; LEVENE, M. **Brick& Mortar**: an on-line multi-agent exploration algorithm. [S.l.]: [s.n.]. 2004.
2. BRAUN, A.; J., B. E.; MUSSE, S. R. **Simulating virtual crowds in emergency situations**. [S.l.]: ACM. 2005. p. 244-252.
3. ANASTASSAKIS, G.; RITCHINGS, T.; PANAYIOTOPOULOS, T. KI 2001: Advances in Artificial Intelligence. [S.l.]: [s.n.], 2001. Cap. Multi-agent Systems as Intelligent Virtual Environments, p. 381-395.
4. RICKEL, J. et al. Toward a New Generation of Virtual Humans for Interactive Experiences. **IEEE Intelligent Systems**, v. 17, p. 32-38, 2002.
5. GRATCH, J. et al. Creating Interactive Virtual Humans: Some Assembly Required. **IEEE Intelligent Systems**, v. 17, p. 54-63, 2002.
6. SICHMAN, J. S.; DEMAZEAU, Y.; BOISSIER, O. **When Can Knowledge-Based Systems Be Called Agents?** [S.l.]: [s.n.]. 1992. p. 172-185.
7. RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. [S.l.]: Pearson Education, 2003.
8. GOLDSTONE, R. L.; JANSSEN, M. A. Computational models of collective behavior. **Trends in Cognitive Sciences**, v. 9, p. 424-430, 2005.
9. SHENDARKAR, A. et al. Crowd simulation for emergency response using BDI agents based on immersive virtual reality. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 16, p. 1415-1429, 2008.
10. XIAOPING, Z.; TINGKUAN, Z.; MENGTING, L. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. **Building and Environment**, v. 44, p. 437-445, 2009.
11. SANTOS, G.; AGUIRRE, B. E. **Critical Review of Emergency Evacuation**

**Simulation Models.** [S.l.]: [s.n.]. 2004.

12. PAN, X. et al. Human and social behavior in computational modeling and analysis of egress. **Automation in construction**, v. 15, p. 448-461, 2006.
13. SILVERMAN, B. G. et al. Human Behavior Models for Agents in Simulators and Games: Part I: Enabling Science with PMFserv. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, v. 15, p. 139-162, 2006.
14. PELECHANO, N. et al. **Crowd Simulation Incorporating Agent Psychological Models, Roles and Communication.** [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 21-30.
15. PELECHANO, N.; BADLER, N. I. Modeling Crowd and Trained Leader Behavior during Building Evacuation. **IEEE Comput. Graph. Appl.**, v. 26, p. 80-86, 2006.
16. SCHNEIDER, V. **Modelling of human response and behaviour in complex surroundings.** [S.l.]: Interscience. 2004.
17. LO, S. M. et al. A game theory based exit selection model for evacuation. **Fire Safety Journal**, v. 41, p. 364-369, 2006.
18. GWYNNE, S. et al. An Investigation of the Aspects of Occupant Behavior Required for Evacuation Modeling. **Journal of Applied Fire Science**, v. 8, 1999.
19. REYNOLDS, C. W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. **Computer Graphics**, v. 21, p. 25-34, 1987.
20. TERZOPOULOS, D.; TU, X.; GRZESZCZUK, R. Artificial fishes: autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated physical world. **Artif. Life**, v. 1, p. 327-351, 1994.
21. HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating Dynamical Features of Escape Panic. **Nature**, v. 407, p. 487, 2000.
22. BRAUN, A. et al. **Modeling Individual Behaviors in Crowd Simulation.** [S.l.]: IEEE Computer Society. 2003. p. 143.
23. SIME, R. **Escape behavior in fire: 'Panic' or affiliation?** Department of Psychology, University of Surrey. [S.l.]. 1984.

24. WALDAU, N.; SCHRECKENBERG, M.; GATERMANN, P. **Design criteria related to orientation in buildings during high-stress situations crowd simulation models and their applications.** [S.l.]: [s.n.]. 2003.
25. NTAIMO, L. et al. Forest Fire Spread and Suppression in DEVS. **SIMULATION**, v. 80, p. 479-500, 2004.
26. Nwana, H. S.; Ndumu, D. T. A perspective on software agents research. **Knowl. Eng. Rev.**, v. 14, p. 125-142, 1999.
27. WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. **Agent theories, architectures, and languages: a survey.** [S.l.]: Springer-Verlag New York, Inc. 1995. p. 1-39.
28. MAES, P. The agent network architecture (ANA). **SIGART Bull.**, v. 2, p. 115-120, 1991.
29. FERBER, J. **Les Systèmes multi-agents: Vers une intelligence collective.** [S.l.]: InterEditions, 1995.
30. SICHMAN, J. S. **Raciocínio social e organizacional em sistemas multiagentes: avanços e perspectivas.** USP. [S.l.]. 2005.
31. JENNINGS, N. R. On Agent-Based Software Engineering. **Artificial Intelligence**, v. 117, p. 277-296, 2000.
32. WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to Multiagent Systems.** [S.l.]: John Wiley, 2002.
33. GARCIA, A. C.; SICHMAN, J. S. Agentes e Sistemas Multiagentes. In: REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações.** Barueri: Manole, 2003.
34. OSÓRIO, F. et al. **Ambientes Virtuais Interativos e Inteligentes: Fundamentos, Implementação e Aplicações Práticas.** XXIV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação UFBA - SBC 2004. [S.l.]: [s.n.]. 2004.
35. MOWBRAY, T. Essentials of Object-Oriented Architecture. **Object Magazine**, p. 28-32, 1995.
36. RAO, A. S.; GEORGEFF, M. P. Readings in Agents. [S.l.]: M. N. Huhns and

- M. P. Singh, 1998. Cap. Modeling rational agents with a BDI-architecture, p. 317-328.
37. BRATMAN, M. E. Two Faces of Intention. **The Philosophical Review**, v. 93, p. 375-405, 1984.
  38. BRATMAN, M. E.; ISRAEL, D.; POLLACK, M. E. Plans and Resource Bounded Practical Reasoning. **Computational Intelligence**, v. 4, p. 349-355, 1988.
  39. BRATMAN, M. E. **Intention, plans and practical reason**. [S.l.]: Harvard University Press, 1990.
  40. NORLING, E. **Folk Psychology for Human Modelling: Extending the BDI Paradigm**. [S.l.]: IEEE Computer Society. 2004. p. 202-209.
  41. REIS, L. P. **Coordination in Multi-Agent Systems: Applications in University Management and Robotic Soccer**. FEUP. [S.l.]. 2003.
  42. BROOKS, R. A. **A Robust Layered Control System For a Mobile Robot**. [S.l.]. 1985.
  43. GASSER, L. **Distribution and coordination of tasks among intelligent agents**. Scandinavian Conference on AI. [S.l.]: [s.n.]. 1988.
  44. SANTOS, C. S.; SICHMAN, J. S. **Significado e Representação de Organizações em Sistemas Multi-Agentes: Uma Análise Preliminar**. Encontro Nacional de Inteligência Artificial (ENIA'97). Brasília: [s.n.]. 1997.
  45. HUHNS, M. N.; STEPHENS, L. M. Multiagent systems and societies of agents, p. 79-120, 1999.
  46. OLENICK, S. M.; CARPENTER, D. J. An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke. **Journal of Fire Protection Engineering**, v. 13, 2003.
  47. DAOLIANG, Z.; LIZHONG, Y.; JIAN, L. Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 363, p. 501-511, 2006.
  48. VARAS, A. et al. Cellular automaton model for evacuation process with

- obstacles. **Physica A**, v. 382, p. 631-642, 2007.
49. MUSSE, S. R.; THALMANN, D. Hierarchical Model for Real Time Simulation of Virtual Human Crowds. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 7, p. 152-164, 2001.
  50. MINTZ, A. Non-adaptive group behavior. **The Journal of Abnormal and Normal Social Psychology**, p. 150-159, 1951.
  51. KEATING, J. P. Collective Behavior. [S.l.]: TURNER, R. H. & KILLIAN, L. M., 1987. Cap. The myth of panic.
  52. SALOMA, C. et al. **Self-organized queuing and scale-free behavior in real escape panic**. [S.l.]: [s.n.]. 2003.
  53. SMELSER, N. J. **Theory of Collective Behavior**. [S.l.]: Free Press, 1962.
  54. DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, p. 269-271, 1959.
  55. SCHERMERHORN, P.; SCHEUTZ, M. **Social coordination without communication in multi-agent territory exploration tasks**. [S.l.]: ACM. 2006. p. 654-661.
  56. SCHERMERHORN, P.; SCHEUTZ, M. Investigating the Adaptiveness of Communication in Multi-Agent Behavior Coordination. **Adaptive Behavior**, v. 15, p. 423-445, 2007.
  57. HENEIN, C. M.; WHITE, T. Lecture notes in computer science. [S.l.]: Yacoubi El. S. and Chopard B. and Bandini S., v. 4173, 2006. Cap. Information in crowds: the swarm information model, p. 703-706.
  58. MURAKAMI, Y. et al. **Multi-Agent Simulation for Crisis Management**. [S.l.]: IEEE Computer Society. 2002. p. 135.
  59. HUGHES, R. L. The Flow of Human Crowds. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 35, p. 169-182, 2003.