

Eduardo Gabriel Reis Miranda

Simulação de Evacuação de Ambientes com Quantidade Massiva de Pedestres

Formiga - MG

2019

Eduardo Gabriel Reis Miranda

Simulação de Evacuação de Ambientes com Quantidade Massiva de Pedestres

Monografia do trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal Minas Gerais - Campus Formiga, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

Campus Formiga

Ciência da Computação

Orientador: Diego Mello da Silva

Formiga - MG

2019

Miranda, Eduardo Gabriel Reis
M672s Simulação de Evacuação de Ambientes com Quantidade Massiva
de Pedestres / Eduardo Gabriel Reis Miranda -- Formiga : IFMG, 2019.
97p. : il.

Orientador: Prof. MSc. Diego Mello da Silva
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Evacuação de Multidões. 2. Simulação. 3. Sistemas Complexos.
4. Autômatos Celulares. 5. Python. I. Silva, Diego Mello da. II. Título.

CDD 004

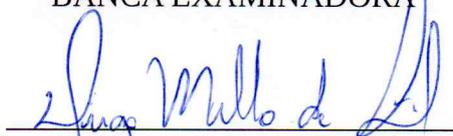
EDUARDO GABRIEL REIS MIRANDA

**SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO DE AMBIENTES COM
QUANTIDADE MASSIVA DE PEDESTRES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto Federal de Minas Gerais-Campus
Formiga, como Requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Ciência da Computação.

Aprovado em: 29 de Novembro de 2019.

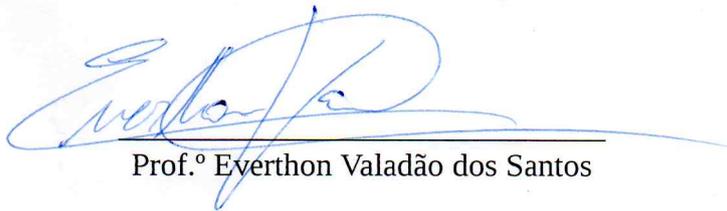
BANCA EXAMINADORA



Prof.º Diego Mello da Silva



Prof.º Wallace de Almeida Rodrigues



Prof.º Everthon Valadão dos Santos



Prof.º Mário Luiz Rodrigues Oliveira

Dedico este trabalho aos meus pais Patrícia Miranda e Luiz Francisco, aos meus irmãos Isadora e Matheus e ao meu orientador Diego Mello, pessoas que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e tornaram possível esta conquista.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Patrícia e Luiz, por me motivarem na busca de maior conhecimento e sabedoria. Em especial minha mãe, que não mediu esforços para que eu conseguisse prosseguir nesta caminhada até o fim.

Agradeço aos meus irmãos Matheus e Isadora que sempre me apoiaram e contribuíram de forma significativa para minha formação.

Agradeço profundamente ao meu orientador Diego Mello da Silva, por ter sido bem mais do que um orientador, sempre tendo paciência ajudando-me nos momentos de dúvidas, por todo o conhecimento passado, pelas conversas e experiências transmitidas.

Agradeço também ao tenente Matheus Campos Cunha do quinto Pelotão do Corpo de Bombeiros de Formiga, pela ideia inicial do projeto de pesquisa que deu origem a este trabalho de conclusão de curso.

Aos meus companheiros de república que fizeram os meus dias mais felizes ajudando-me a aliviar o peso do dia a dia.

Aos amigos que fiz durante o tempo que estive aqui, que sempre me motivaram a prosseguir. Agradeço por terem tornado essa jornada menos árdua através de seus conselhos, amizade e momentos de descontração.

Enfim, a todos que passaram pela minha vida e deixaram algo de bom para ser lembrado, o meu muito obrigado.

“O verdadeiro mestre é um eterno aprendiz.” (Master Yi)

Resumo

O estudo sobre evacuações de multidões tem grande importância pois as situações de emergência exigem estratégias eficientes de evacuação para evitar vítimas e reduzir o número de pessoas feridas. Este trabalho apresentará uma investigação experimental de como indivíduos comportam-se durante a evacuação de multidões em ambientes com quantidade massiva de pedestres. O principal objetivo do trabalho consiste em simular e analisar o comportamento de multidões sob diferentes situações, em cenários que representam ambientes reais, ambientes hipotéticos e ambiente da literatura especializada. Para tal utilizou-se da simulação usando autômatos celulares com *Floor Field* para definir a probabilidade de transição para as células vizinhas. A experimentação mediu o desempenho da evacuação da multidão através do número de iterações necessárias para evacuar o ambiente por completo, número médio de movimentos feitos por iteração, quantidade média de iterações em espera dentre outros. Cada ambiente foi replicado 100 vezes, com resultados analisados que sugerem que a quantidade de saídas disponíveis nos ambientes impacta diretamente nos tempos de evacuação da multidão e indicadores relacionados, mesmo quando a caracterização da multidão é heterogênea em termos de gênero, idade, conhecimento do ambiente e mobilidade.

Palavras-chave: Evacuação de Multidões, Simulação, Sistemas Complexos

Abstract

The study of crowd evacuations is of great importance as emergency situations require effective evacuation strategies to prevent casualties and reduce the number of injured people. This paper will present an experimental investigation of how individuals behave while evacuating crowds in crowded pedestrian environments. The main objective of this work is to simulate and analyze the behavior of crowds under different situations, in scenarios that represent real environments, hypothetical environments and specialized literature environment. For this we used the simulation using floor field cellular automata to define the probability of transition to neighboring cells. Experimentation measured crowd evacuation performance by the number of iterations required to completely evacuate the environment, the average number of moves made per iteration, the average number of waiting iterations, and so on. Each environment has been replicated 100 times, with results analyzed suggesting that the number of exits available in the environments directly impacts crowd evacuation times and related indicators, even when crowd characterization is heterogeneous in terms of gender, age, environmental knowledge, and mobility.

Keywords: Crowd Evacuation, Simulation, Complex Systems

Lista de ilustrações

Figura 1 – Funcionamento dos Indivíduos Utilizando <i>Lattice Gas</i> . Adaptado de Itoh e Nagatani (2002)	19
Figura 2 – Exemplificação de um Ambiente Utilizando a Abordagem de Forças Sociais. Adaptado de Parisi e Dorso (2007)	20
Figura 3 – Exemplificação do Funcionamento de um Agente Inteligente. Adaptado de Machado (2014)	21
Figura 4 – Campo Estático. Adaptado de CARNEIRO (2012)	24
Figura 5 – Exemplificação de um Mapa Dinâmico. Fonte:Autor	25
Figura 6 – Exemplificação do Efeito de Repulsão de Paredes. Adaptado de Nishinari et al. (2004)	26
Figura 7 – Planta Baixa e Modelagem da Escola Secundária	33
Figura 8 – Planta Baixa e Modelagem da Igreja	34
Figura 9 – Ambiente da Igreja da Nossa Senhora da Expectação (Icó/CE)	35
Figura 10 – Ambiente do Centro de Convivência em Culto	35
Figura 11 – Planta Baixa do Centro de Convivência	36
Figura 12 – Modelagem do Centro de Convivência em Ambiente de Culto	37
Figura 13 – Modelagem do Centro de Convivência em Ambiente de Formatura	38
Figura 14 – Ambiente do Centro de Convivência em Formatura	38
Figura 15 – Planta e Modelagem do Cinema	39
Figura 16 – Planta e Modelagem do Experimento de Nishinari	40
Figura 17 – Execução do Simulador	42
Figura 18 – Diagramas de Classe Logs e Dados	43
Figura 19 – Diagrama de Classe Principal	43
Figura 20 – Diagramas de Classe Util e Mapa	44
Figura 21 – Diagramas de Classe Simulação e Indivíduo	45
Figura 22 – Execução do Gerador de Mapas	46
Figura 23 – Mapa Exemplo	47
Figura 24 – Campo Estático da Escola e Mapa de Indivíduos	52
Figura 25 – Boxplots Resultados da Escola	54
Figura 26 – Gráficos da Experimentação Número 19	55
Figura 27 – Demonstração da Evacuação da Escola ao Longo das Iterações da Simulação	56
Figura 28 – Campo Estático da Igreja e Mapa de Indivíduos	57
Figura 29 – Boxplots Resultados da Igreja	59
Figura 30 – Gráficos da Experimentação Número 7	60
Figura 31 – Demonstração da Evacuação da Igreja ao Longo das Iterações da Simulação	61

Figura 32 – Campo Estático do Centro em Ambiente de Culto e Mapa de Indivíduos	62
Figura 33 – Boxplots Resultados do Centro em Ambiente de Culto	64
Figura 34 – Gráficos da Experimentação Número 54	65
Figura 35 – Demonstração da Evacuação do Centro de Convivência em Culto ao Longo das Iterações da Simulação	66
Figura 36 – Campo Estático do Centro em Ambiente de Formatura e Mapa de Indivíduos	67
Figura 37 – Boxplots Resultados do Centro em Ambiente de Formatura	68
Figura 38 – Gráficos da Experimentação Número 79	69
Figura 39 – Demonstração da Evacuação do Centro de Convivência em Formatura ao Longo das Iterações da Simulação	70
Figura 40 – Campo Estático do Cinema e Mapa de Indivíduos	71
Figura 41 – Boxplots Resultados do Cinema	72
Figura 42 – Gráficos da Experimentação Número 33	73
Figura 43 – Demonstração da Evacuação do Cinema ao Longo das Iterações da Simulação	74
Figura 44 – Campo Estático do Experimento do Nishinari	75
Figura 45 – Boxplot da Quantidade de Iterações Gastas para Evacuar o Ambiente do Experimento do Nishinari para Cada KW Experimentado	76
Figura 46 – Boxplots Média de Espera e Movimentos do Experimento do Nishinari	77
Figura 47 – Demonstração do Fator KW na Evacuação	78
Figura 48 – Visão do Pastor e Eclesiásticos	95

Lista de tabelas

Tabela 1 – Representação dos valores do campo inercial de acordo com a direção anterior movida pelo indivíduo equivalendo à direita. Produzido pelo autor.	25
Tabela 2 – Fatores Comportamentais. Adaptado de Cunha (2016)	26
Tabela 3 – Tradução Feita Pelo Conversor	47
Tabela 4 – Caracterização dos Indivíduos do Escola Secundária	48
Tabela 5 – Caracterização dos Indivíduos do Igreja	49
Tabela 6 – Caracterização dos Indivíduos do Centro de Convivência em Culto	49
Tabela 7 – Caracterização dos Indivíduos do Centro de Convivência em Formatura	50
Tabela 8 – Caracterização dos Indivíduos do Cinema	51
Tabela 9 – Caracterização dos Indivíduos do Experimento de Nishinari	51
Tabela 10 – Resultados do Experimento da Escola Secundária	53
Tabela 11 – Resultados do Experimento da Igreja	58

Tabela 12 – Resultados do Experimento do Centro em Ambiente de Culto	63
Tabela 13 – Resultados do Experimento do Centro em Ambiente de Formatura . .	67
Tabela 14 – Resultados do Experimento do Cinema	71
Tabela 15 – Trabalhos relacionados sobre Teoria de Jogos, adaptado de (ZHENG et al., 2009)	87
Tabela 16 – Trabalhos relacionados sobre Autômatos Celulares, adaptado de (ZHENG et al., 2009)	88
Tabela 17 – Trabalhos relacionados sobre <i>Lattice Gas</i> , adaptado de (ZHENG et al., 2009)	89
Tabela 18 – Trabalhos relacionados sobre Forças Sociais, adaptado de (ZHENG et al., 2009)	90
Tabela 19 – Trabalhos relacionados sobre Fluidos Dinâmicos, adaptado de (ZHENG et al., 2009)	91
Tabela 20 – Trabalhos relacionados Baseado em Agentes, adaptado de (ZHENG et al., 2009)	92
Tabela 21 – Trabalhos relacionados sobre Experimentos com animais, adaptado de (ZHENG et al., 2009)	93
Tabela 22 – Resultados da Calibragem de Parâmetros	96

Lista de abreviaturas e siglas

CA	<i>Celular Automata</i> (Autômato celular)
KD	Constante de Sensibilidade do Mapa Dinâmico
KS	Constante de Sensibilidade do Mapa Estático
KI	Constante de Sensibilidade do Fator Inercial
KW	Constante de Sensibilidade do Mapa Repulsivo das Paredes
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
PNG	<i>Portable Network Graphics</i>
CV	Coefficiente de Variação
DP	Desvio Padrão

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Evacuação de Multidões	18
3.2	Modelos de evacuação	18
3.2.1	<i>Lattice Gas</i>	18
3.2.2	Abordagem de Forças Sociais	19
3.2.3	Agentes Inteligentes	20
3.2.4	Modelos Fluidos Dinâmicos	21
3.2.5	Abordagem da Teoria de Jogos	22
3.2.6	Abordagem Baseada em Experimento com Animais	22
3.3	Autômatos Celulares	22
3.3.1	Autômatos Celulares	23
3.3.2	Autômatos Celulares com <i>Floor Field</i>	23
3.3.3	Autômatos Celulares com <i>Floor Field</i> e Efeito Inercial e Campo Dinâmico	24
3.3.4	Autômatos Celulares com <i>Floor Field</i> e Efeito de Repulsão de Paredes	25
3.3.5	Autômatos Celulares com <i>Floor Field</i> e Efeito de Fogo e Fumaça	26
3.4	Fatores Comportamentais Considerados	26
3.5	Sistemas Complexos e Emergência	29
3.6	Trabalhos Relacionados	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	Materiais	32
4.1.1	<i>Hardware</i>	32
4.1.2	<i>Software</i>	32
4.1.3	Instâncias	32
4.1.3.1	Escola Secundária	32
4.1.3.2	Igreja da Nossa Senhora da Expectação (Icó/CE)	33
4.1.3.3	Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Culto	35
4.1.3.4	Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Formatura	37
4.1.3.5	Cinema Hipotético	39
4.1.3.6	Instância da Literatura: (NISHINARI et al., 2004)	40

4.2	Metodologia	40
5	DESENVOLVIMENTO	41
5.1	Simulador	41
5.1.1	Entrada	41
5.1.2	Gráficos gerados	42
5.1.3	Utilização	42
5.1.4	Diagramas de classe	43
5.2	Gerador de Mapas	45
5.2.1	Utilização	46
5.2.2	Exemplificação do Gerador de Mapas	46
5.3	Caracterização de Parâmetros	47
5.4	Experimentos Realizados	48
5.4.1	Experimento: Escola Secundária	48
5.4.2	Experimento: Igreja da Nossa Senhora da Expectação (Icó/CE)	48
5.4.3	Experimento: Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Culto	49
5.4.4	Experimento: Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Formatura	50
5.4.5	Experimento: Cinema Hipotético	50
5.4.6	Experimento da Literatura: (NISHINARI et al., 2004)	51
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
6.1	Experimento: Escola Secundária	52
6.2	Experimento: Igreja da Nossa Senhora da Expectação (Icó/CE)	56
6.3	Experimento: Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambien- te de Culto	62
6.4	Experimento: Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambien- te de Formatura	66
6.5	Experimento: Cinema Hipotético	70
6.6	Experimento da Literatura: (NISHINARI et al., 2004)	75
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
8	TRABALHOS FUTUROS	80
	REFERÊNCIAS	81
9	ANEXOS	87
	APÊNDICE A – VISÃO DO PASTOR E ECLESIÁSTICOS	95

APÊNDICE B – CALIBRAGEM DE PARÂMETROS	96
--	-----------

1 Introdução

O estudo sobre evacuações de multidões tem grande importância pois as situações de emergência exigem estratégias eficientes de evacuação para evitar vítimas e reduzir o número de pessoas feridas (SCHADSCHNEIDER *et al.*, 2009). Todavia, planejar e executar experimentos de evacuação em ambientes reais ocupados por multidões de seres humanos envolve uma série de dificuldades que tornam esse tipo de estudo impraticável. CARNEIRO (2012) aponta alguns dos fatores que contribuem para essa dificuldade, como por exemplo, os custos de executar experimentos práticos, a dificuldade de captar os dados, as questões éticas e até mesmo legais envolvendo experimentos com seres humanos. Estes e outros aspectos relacionados podem, em conjunto, impedir a viabilidade de tais de experimentos.

Um dos contextos no qual o estudo de evacuação de multidões é de grande utilidade é aquele ligado ao *layout* de ambientes. Em situações de emergência, tais como evacuação de navios de passageiros ou edifícios, pedestres devem ser evacuados em curto período de tempo em situação de stress. A simulação pode, neste caso, ser usada para ajudar a determinar bons *layouts* que facilitem a evacuação do pessoal (KLUEPFEL, 2012).

Isto posto, a simulação computacional de comportamento de evacuação de multidões torna-se uma alternativa viável de grande importância. Visando evitar casos trágicos como o da Boate Kiss (SARTOR; BOICZUK, 2017), o caso da boate *The Station* nos Estados Unidos (UCHOA, 2013), ou possíveis incidentes em ambientes com grande quantidade de pessoas como o Ramadã... (2014), saídas de estádios de futebol e cinemas entre outros ambientes, é preciso investir na pesquisa e desenvolvimento de ferramental computacional que torne factível este tipo de análise. Para contribuir com desenvolvimento de pesquisas e tecnologias que deem suporte para este tipo de análise, o presente projeto propõe a experimentação e análise em ambientes com saídas limitadas e grande quantidade de indivíduos para prever e compreender comportamentos de futuras evacuações em ambientes desta categoria.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Simular e analisar o comportamento de multidões sob diferentes situações, em cenários da literatura e que representam ambientes de larga escala tais como igrejas, cinemas, estádios de futebol, clubes, catedrais e outros.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o modelo de autômato celular com *floor field* estático e variantes, mais especificamente, com uso de *floor field* dinâmico, potencial inercial e potencial de paredes;
- Modelar ambientes de larga escala de trabalhos da literatura e outros propostos pelo autor deste trabalho;
- Implementar modelo de simulação e KPIs (*key performance indicators*) para medir desempenho da evacuação;
- Ajustar parâmetros do modelo de simulação, em especial aqueles que constituem parâmetros de sensibilidade dos campos de piso e potenciais mencionados;
- Experimentar o modelo em diferentes situações, reproduzindo algumas descritas na literatura e novas situações modeladas pelo autor considerando ambientes de larga escala com grande quantidade de indivíduos;
- Discutir os resultados encontrados.

3 Referencial Teórico

3.1 Evacuação de Multidões

A definição de evacuação de acordo com o [Dicionário... \(2019\)](#) seria "a saída ou retirada dos indivíduos presentes em determinado espaço". O estudo sobre evacuações de multidões tem grande importância pois as situações de emergência exigem estratégias eficientes de evacuação para evitar vítimas e reduzir o número de pessoas feridas ([SCHADSCHNEIDER et al., 2009](#)).

[Kluepfel \(2012\)](#) comenta que grandes instalações, como parques temáticos e *shopping centers*, são populados por grande número de pessoas que formam multidões de grande densidade que podem, em situações de emergência, criar ‘alta pressão’ colocando risco à integridade física das pessoas que ocupam este espaço. Desta forma, pesquisas científicas conduzidas neste contexto contribuem para gerar este conhecimento e permitir que este seja usado para canalizar o fluxo de pessoas (torná-los mais homogêneos), reduzir problemas de orientação que aumentam a capacidade da evacuação e outras decisões para gerenciar a multidão e evitar a formação de picos no fluxo de áreas críticas.

3.2 Modelos de evacuação

Há sete modelos de evacuação principais, que foram apresentados por [Zheng et al. \(2009\)](#) em seu trabalho. As próximas subseções apresentam os exemplos de cada modelagem descrita por esse autor.

3.2.1 *Lattice Gas*

O modelo de *lattice gas* é um caso especial de autômato celular. Nesse tipo de modelo, segundo [Zheng et al. \(2009\)](#), cada pedestre é considerado como uma partícula ativa na grade. Essa abordagem é utilizada com frequência no estudo das características de uma multidão de pedestres, por meio de probabilidade e estatística.

Modelos de *lattice gas* de caminhantes aleatórios tendenciosos foram propostos para simular o fluxo do canal de pedestres em um gargalo por [Tajima et al. \(2001\)](#), para simular o fluxo de pedestres no canal em forma de T por [Tajima e Nagatani \(2002\)](#), para simular o deslocamento da plateia em uma sala através de um portão ([ITOH; NAGATANI, 2002](#)) e para simular o processo de evacuação de uma sala de aula ([HELBING et al., 2003](#)).

Na [Figura 1](#) há duas salas cuja dimensão da primeira é $L_e x L$ e da segunda $L_s x L$. Ambas as salas estão conectadas por uma porta que contém uma largura W . Nesta imagem

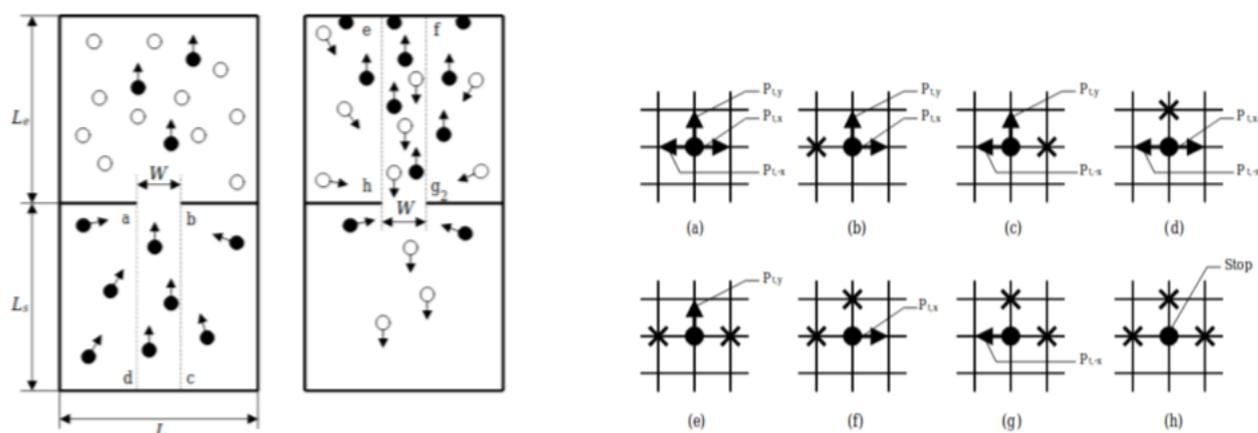


Figura 1 – Funcionamento dos Indivíduos Utilizando *Lattice Gas*. Adaptado de Itoh e Nagatani (2002)

os pedestres da sala inferior querem ir para a sala superior enquanto os da sala superior querem ir para a sala inferior. Cada pedestre contém uma seta representando a direção que ele prefere seguir.

Já na imagem a direita da Figura 1 são mostradas as 8 configurações possíveis de movimento de um pedestre da sala inferior que nunca moverão para baixo. Na configuração (a) ele possui 33,3% de chance de ir para qualquer uma das direções das setas. Na configuração (b) ele possui 50% de chance de ir para cima e 50% de chance de ir para a direita, na configuração (e) ele possui 100% de chance de ir para cima e, assim, segue a lógica para as outras configurações.

3.2.2 Abordagem de Forças Sociais

Segundo CARNEIRO (2012), os modelos de forças sociais têm sido usados na simulação de situações de pânico, entre outras. Nesses modelos o movimento dos pedestres é determinado pela aplicação de forças que resultam: das metas dos pedestres de alcançarem determinados destinos; da definição de distâncias regulamentares entre pedestres e dos pedestres com os obstáculos do ambiente (paredes, por exemplo); e ainda, do estabelecimento de laços sociais entre pedestres (gerando forças de atração entre amigos, por exemplo) ou do estabelecimento de tipos de interesse (gerando forças de atração ligando pedestres a vitrines, por exemplo).

Os modelos de força social atraíram a atenção de alguns pesquisadores que estudaram a evacuação de multidões utilizando esta ferramenta. Zheng et al. (2002) apresentaram um modelo construído pela combinação do modelo de força social de Helbing e Molnar (1995) e rede neural, para simular comportamentos coletivos pedestres em várias situações. Seyfried et al. (2006) introduziram um modelo de força social modificado também baseado no modelo de Helbing para simular dinâmica dos pedestres e analisar qualitativamente a

influência de várias abordagens para a interação entre os pedestres na relação velocidade-densidade resultante. Parisi e Dorso (2005) aplicaram o modelo de força social seguindo o modelo de Helbing e Molnar (1995) para estudar a evacuação da sala com uma saída; depois eles modificaram levemente o modelo de força social para simular a evacuação de pedestres em estado de pânico de uma sala com uma saída (PARISI; DORSO, 2007).

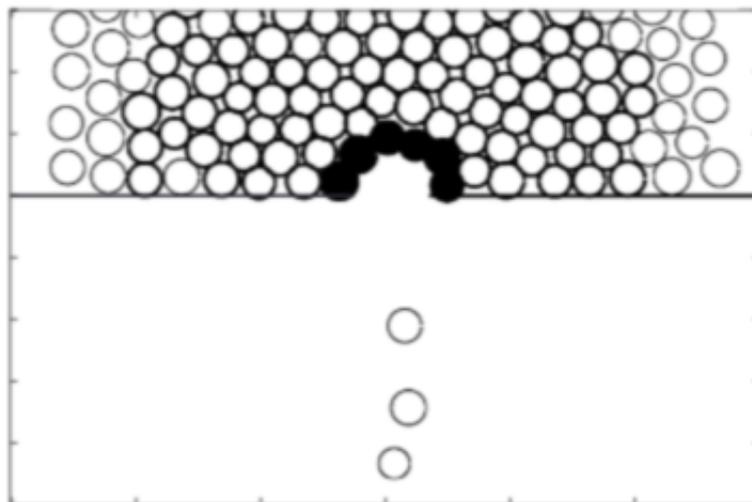


Figura 2 – Exemplificação de um Ambiente Utilizando a Abordagem de Forças Sociais. Adaptado de Parisi e Dorso (2007)

Na Figura 2 cada bolinha corresponde a um pedestre, o grupo das bolinhas em preto são nomeadas pelo autor de grupo de bloqueio, este é definido como o subconjunto de partículas agrupadas mais próximas da porta cujas primeiras e últimas partículas de componentes estão em contato com as paredes dos dois lados da porta, já as demais bolinhas são pedestres que não tem a possibilidade de sair do ambiente ainda, ou que já estão fora dele.

3.2.3 Agentes Inteligentes

De acordo com Almeida et al. (2013), no modelo de agentes inteligentes os indivíduos humanos são modelados como agentes autônomos que interagem com um ambiente virtual e outros agentes de acordo com as características do indivíduo (que podem variar de pessoa para pessoa) usando regras globais derivadas do mundo em que o sistema é criado. Cada agente tem uma visão limitada do mundo. O objetivo é observar a dinâmica entre os indivíduos (agentes) no ambiente de simulação.

Para simular processos cognitivos humanos, os agentes percebem e avaliam continuamente o ambiente ao redor, tomando decisões com base em seu próprio modelo de decisão. Os comportamentos sociais da multidão são observados coletivamente como fenômenos emergentes. Alguns trabalhos que utilizaram agentes inteligentes como base para evacuação: Pan et al. (2007a) criaram um *Frame Work* para que seja feita a simulação

de um ambiente modelado pelo AutoCAD utilizando agentes inteligentes; já [Cherif \(2006\)](#) implementou duas formas de inteligência nos agentes, uma autônoma e outra guia e com essas duas diferentes formas demonstrou que na maioria das vezes quando se utiliza o método guiado o tempo médio de evacuação diminui e conseqüentemente aumentam as chances de sobrevivência; por fim [Murakami et al. \(2002\)](#) simularam um experimento feito por [Sugiman e Misumi \(1988\)](#) utilizando agentes inteligentes para tentar fazer com que o comportamento dos agentes seja como o de uma pessoa.

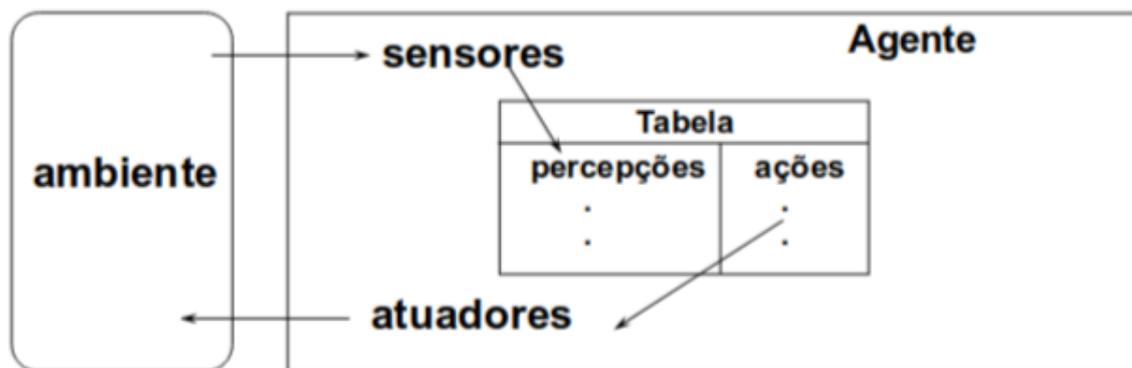


Figura 3 – Exemplificação do Funcionamento de um Agente Inteligente. Adaptado de [Machado \(2014\)](#)

Na Figura 3 há o ambiente e o agente, cada agente funciona como uma máquina de estados. Ela possui entradas que são os sensores que captam sinais do ambiente como distância até as saídas, quantidade de indivíduos próximos e quaisquer informações necessárias para a modelagem do agente. Cada combinação de sensores resulta em uma percepção do ambiente do agente e para cada percepção o agente irá realizar uma ação. Nesta ação será ativado um ou mais atuadores, no exemplo andar para frente os atuadores seriam as pernas do agente que fariam os movimentos para se locomover.

3.2.4 Modelos Fluidos Dinâmicos

Neste tipo de modelagem a multidão tem seu comportamento modelado de uma forma que se comporte como gases ou fluidos. [Henderson \(1971\)](#) conjecturou que as fileiras de pedestres se comportam de maneira semelhante a gases ou fluidos. [Helbing et al. \(2002\)](#) resumiram que, em médias e altas densidades o movimento das multidões de pedestres mostra algumas analogias impressionantes com o movimento de fluidos. Por exemplo, as pegadas de pedestres na neve são semelhantes às linhas de fluxo de fluidos ou, novamente, os fluxos de pedestres através de multidões são análogos aos leitos de rios.

Modelos dinâmicos-fluidos descrevem como a densidade e a velocidade mudam ao longo do tempo com o uso de equações diferenciais parciais. [Hughes \(2000\)](#) estudou a escolha do caminho usando um modelo contínuo baseado em observações bem definidas do comportamento dos pedestres. Para entender a mecânica do movimento de multidões

de pedestres em multidões especialmente grandes, [Hughes \(2002\)](#) continuou seu estudo e derivou as equações de movimento que governam o fluxo bidimensional de pedestres. Além disso, [Colombo e Rosini \(2005\)](#) apresentaram um modelo contínuo de fluxo de pedestres para descrever características típicas desse tipo de fluxo, como alguns efeitos do pânico. Em particular, este modelo descreve as possíveis supercompressões em uma multidão e a queda na vazão através de uma porta do congestionamento em pânico na multidão.

3.2.5 Abordagem da Teoria de Jogos

Esta abordagem de acordo com [Zheng et al. \(2009\)](#), [CARNEIRO \(2012\)](#) e [Lo et al. \(2006\)](#) pode ser adotada para modelar situações em que o processo de decisão interativo dos evacuados é racional. Modelos de teoria dos jogos podem ser utilizados, por exemplo, para simular o comportamento competitivo em uma saída de emergência. [Lo et al. \(2006\)](#) estabeleceram um modelo de teoria dos jogos não cooperativo para o processo de seleção dinâmica de saída dos evacuados. O modelo examina como o comportamento racional de interação dos evacuados afetará os padrões de evacuação.

3.2.6 Abordagem Baseada em Experimento com Animais

Segundo [Saloma et al. \(2003\)](#) experimentos com pânico de fuga genuíno são difíceis, especialmente com seres humanos por causa de possíveis preocupações éticas e até legais. E a dinâmica do pânico de fuga não é totalmente compreendida porque os estudos foram amplamente confinados a simulações numéricas.

Neste estudo foi observada a dinâmica do pânico de escape em ratos que escapam de uma piscina de água para uma plataforma seca através de uma porta de saída. Foi mostrado que, para um intervalo crítico de amostragem, seus comportamentos de escape concordaram com as distribuições de frequência exponencial e de potência elétrica previstas numericamente do tamanho da rajada de saída, mesmo por curtos períodos de tempo

Enquanto isto [Altshuler et al. \(2005\)](#) utilizaram formigas para seu estudo notou que um dos fenômenos previstos no artigo de [Helbing et al. \(2000\)](#) aconteceu. Quando os indivíduos em pânico tentam escapar de uma sala com duas saídas simetricamente localizadas, uma delas é mais utilizada que a outra.

3.3 Autômatos Celulares

O sétimo modelo apresentado por [Zheng et al. \(2009\)](#) foi o de autômatos celulares que é comumente mais utilizado e também escolhido pelo autor.

3.3.1 Autômatos Celulares

Segundo [Wolfram \(1983\)](#) autômatos celulares foram propostos pela primeira vez por John Von Neumann. Autômatos celulares são sistemas dinâmicos discretos que consistem em uma grade regular de células. O valor de cada célula da grade é atualizado simultaneamente com base nos valores das variáveis em sua vizinhança no passo anterior e de acordo com um conjunto de regras locais.

3.3.2 Autômatos Celulares com *Floor Field*

O uso de autômatos celulares com *Floor Field* para evacuar multidões tem seu início na década de 2000, com os trabalhos de [Schadschneider \(2001\)](#) e [Burstedde et al. \(2001\)](#). Mas a forma de calcular o campo de piso estático (*static floor field*) foi apresentada pela primeira vez por [Varas et al. \(2007\)](#). De acordo com seu modelo cada célula do autômato admite um valor que representa o quão distante cada indivíduo está de uma saída. No modelo, as saídas representam um campo de atração estático que é calculado pela distância de uma célula (i,j) do *grid* do autômato em relação à uma célula de saídas. Um exemplo de campo de pisos estático para ambiente simples, com saída única é apresentado na Figura 4, adaptado de [CARNEIRO \(2012\)](#). Nele, exceto pelas células que representam paredes, as demais células podem ser ocupadas por pedestres. O valor contido na célula (i,j) representa, portanto, a menor distância em número de células horizontais, verticais ou na diagonal que (i,j) se encontra da saída mais próxima.

Este comportamento é a primeira contribuição da equação do modelo utilizado pelo autor deste trabalho $\exp(-K_s S_{ij})$, onde S_{ij} é o valor da célula correspondente do mapa estático vide Figura 4 e o valor de K_s é uma constante utilizada para regular quão impactante o campo estático será.

Além da contribuição com o mapa estático, algo que é comum nas modelagens utilizando *Floor Field* é que cada célula pode ser ocupada por somente um pedestre por vez. [Nishinari et al. \(2004\)](#) modelaram isto da seguinte forma: Sempre que dois ou mais pedestres tentam se mover para a mesma célula-alvo, o movimento de todas as partículas envolvidas é negado com probabilidade $\mu \in [0, 1]$, ou seja, todos os pedestres permanecem em seu local. Isso significa que, com probabilidade $1 - \mu$, um dos indivíduos se move para a célula desejada. Qual é permitido mover é decidido usando um método probabilístico. A fórmula de Nishihari foi adaptada ao nosso modelo como $(N_{ij} - 1)$ onde N_{ij} é um outro mapa que representa a existência de um indivíduo na célula (i,j) . Caso haja um indivíduo na célula o valor da célula será 1 e o valor da expressão como todo será 0, como a fórmula geral é um produtório o resultado final também será 0 e o indivíduo ficará sem se mover.

500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
500	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	500	500
500	6.5	7	7.5	8	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	500	500
500	5.5	6	6.5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	500	500
500	4.5	5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	500	500
500	3.5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	500	500
500	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	500	500
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	500	500
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	500	500
500	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	500	500
500	3.5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	500	500
500	4.5	5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	500	500
500	5.5	6	6.5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	500	500
500	6.5	7	7.5	8	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	500	500
500	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500

Figura 4 – Campo Estático. Adaptado de CARNEIRO (2012)

3.3.3 Autômatos Celulares com *Floor Field* e Efeito Inercial e Campo Dinâmico

O modelo utilizado por Schadschneider (2001) já possuía traços do campo dinâmico que consiste em deixar um rastro a cada vez que algum pedestre passa em determinada célula para que os outros possam seguir por este mesmo caminho. Yuan e Tan (2007), Nishinari et al. (2004) e Yang et al. (2005) implementaram e formalizaram o campo dinâmico, todavia incrementaram este modelo acrescentando o efeito de inércia onde o indivíduo tende a seguir na mesma direção.

Nishinari et al. (2004) explicam que o cálculo do campo dinâmico é feito da seguinte forma: Cada célula do campo dinâmico é iniciada com o valor 0, a cada iteração da simulação é verificado para cada célula se algum pedestre passou por ela, caso tenha passado incrementa-se o valor desta célula em uma unidade. Além disto este campo tem uma dinâmica própria que é a de *diffusion and decay* (difusão e decaimento): para cada iteração da simulação cada célula do campo dinâmico decai com uma probabilidade δ e difunde com probabilidade α para uma de suas células vizinhas. Este comportamento pode ser visto na Figura 5 na qual pode ser visto as células em rosa que ilustram onde a maior parte dos indivíduos estão passando.

As contribuições deixadas pelos autores previamente citados foram $\exp(K_d D_{ij})$ referente ao campo dinâmico, onde D_{ij} representa uma célula do campo dinâmico e K_d é

uma constante utilizada para regular quão impactante o campo dinâmico será. Quanto ao efeito inercial foi $exp(P_i(i, j))$, onde a fórmula representa o potencial de seguir a mesma direção para a célula vizinha (i,j) em questão. Somente uma das oito direções possíveis de movimento do pedestre vai receber um valor, sendo esta a mesma da direção em que o pedestre se locomoveu; enquanto isso as demais receberão o valor 1 como pode ser visto na Tabela 1.

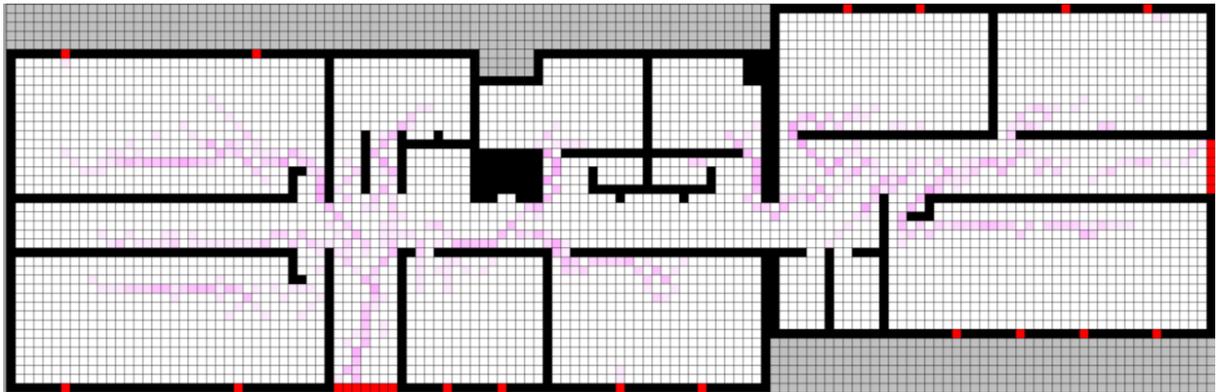


Figura 5 – Exemplificação de um Mapa Dinâmico. Fonte:Autor

1	1	1
1	\Rightarrow	$exp(K_i)$
1	1	1

Tabela 1 – Representação dos valores do campo inercial de acordo com a direção anterior movida pelo indivíduo equivalendo à direita. Produzido pelo autor.

3.3.4 Autômatos Celulares com *Floor Field* e Efeito de Repulsão de Paredes

Além dos efeitos acima Nishinari et al. (2004) fizeram um estudo onde os indivíduos evitam células próximas a paredes e objetos por ser mais perigoso ou menos eficiente para evacuação. O mapa de paredes proposto é calculado da seguinte forma: Para cada célula na posição (i,j) será incrementado em uma unidade recursivamente até que se alcance uma parede ou uma saída. Este cálculo é feito para cada uma das direções sendo elas esquerda, direita, baixo e cima. Após realizado o calculo para cada uma das direções o resultado da célula (i,j) será o menor entre os quatro.

Deste trabalho a última parte da equação retirada que é referente ao potencial repulsivo das paredes foi P_w que é transcrito como $exp(K_w * min(D_{max}, d))$. Onde K_w representa uma constante de sensibilidade que definirá o quão impactante o campo de paredes será, D_{max} é a restrição do alcance do efeito das paredes e d é a distância mínima de todas as paredes. O efeito do campo repulsivo das paredes pode ser visto na Figura 6 onde em (a) o campo está desabilitado e em (b) habilitado.

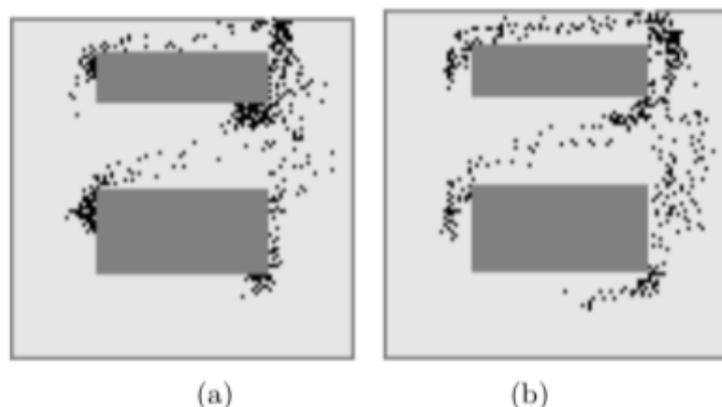


Figura 6 – Exemplificação do Efeito de Repulsão de Paredes. Adaptado de [Nishinari et al. \(2004\)](#)

3.3.5 Autômatos Celulares com *Floor Field* e Efeito de Fogo e Fumaça

Já [Yang et al. \(2002\)](#), [Tissera et al. \(2007\)](#) e [Zheng et al. \(2011\)](#) simularam o efeito do fogo e/ou fumaça como fator de confusão ou decisão para os indivíduos se movimentarem.

3.4 Fatores Comportamentais Considerados

De acordo com o estudo feito por [Cunha \(2016\)](#) há diversos fatores comportamentais dos indivíduos que podem ser considerados durante uma evacuação, estes fatores podem ser vistos na Tabela 2.

Dos 12 fatores citados por [Cunha \(2016\)](#) foram considerados 4 pra modelagem dos indivíduos sendo estes: sexo, idade, grau de escolaridade e velocidade de deslocamento. Os demais fatores como apego à propriedade apesar de serem importantes não foram considerados pela limitação de representação do nosso modelo atual que não permite considerar este efeito, embora tenha sido considerado importante por [Cunha \(2016\)](#). Além dos fatores mencionados foram também considerados para a caracterização dos indivíduos o conhecimento prévio do local e a tendência de seguir a multidão mostrados no trabalho de [Nishinari et al. \(2004\)](#).

Tabela 2 – Fatores Comportamentais. Adaptado de [Cunha \(2016\)](#)

ORD. Comportamento/ Característica	Descrição	Referência pes- quisada por Cunha (2016)

1	Sexo	O tempo gasto na evacuação é menor para mulheres, em relação aos homens, visto que as mulheres perdem menos tempo tomando decisão e não estão propensas a enfrentar o perigo. Além disso, os homens tem maior predisposição para enfrentar o perigo	(BRYAN, 2002 apud. FAHY, PROULX, LATA, 2009); (KULIGOWSKI, 2011)
2	Idade	Pessoas adultas mais velhas (principalmente com mais de 45 anos), geralmente perdem mais tempo tentando interpretar os sinais do incidente e na tomada de decisão.	(KULIGOWSKI, HOSKINS, 2010)
3	Grau de Escolaridade	Pessoas com maior grau de instrução tem tendência a tentar levantar um maior número de informações sobre o evento, tais como origem, magnitude, dentre outras.	(ZHAO et al, 2009).
4	Experiência Anterior	Caso a pessoa já tenha passado por uma situação semelhante, seu comportamento inicial pode ser diferente das demais pessoas. Por exemplo, as pessoas são menos propensas a sair se elas tiveram contato com um incêndio anteriormente.	(WOOD, 1972 apud TONG, CANTER, 1985).
5	Treinamento Comportamental	A transmissão de conhecimento, teórico ou prático sobre como se comportar em uma situação de emergencial pode influenciar no processo de evacuação.	(KINATEDER et al., 2014).
6	Conhecimento sobre perigo	Refere-se ao conhecimento de que qualquer pessoa se relacionou com tipos específicos de perigos associados a um incidente, incluindo as conseqüências do perigo e respostas apropriadas.	(KINATEDER et al., 2014).
7	Apego à propriedade	A literatura traz que em alguns casos, as pessoas, durante o processo de evacuação, tendem a retornar para buscar algum objeto ou propriedade.	(KINATEDER et al., 2014).

8	Fatores médicos	Fatores médicos podem afetar na percepção dos sinais e no processamento da informação. A ingestão de álcool, por exemplo, distorce a percepção de risco, no sentido que modula a excitação e pode levar a comportamentos mais arriscados.	(KINATEDER et al., 2014)
9	Comportamento de ajuda mútua	É comum que, em situações de desastre que as pessoas ajudem umas as outras. Este cooperativismo pode retardar a evacuação, visto que as algumas pessoas tendem a voltar para ajudar as outras.	(JOHNSON e FEINBERG, 1997); (PERRY,1985 apud DRURY; COCKING, 2007);
10	Comportamento de acordo com normas pré estabelecidas	É comum que as pessoas sigam comportamentos de acordo com normas pré estabelecidas. Essas normas seguem os costumes da sociedade em que está inserida, tais como, formação de filas, presença de prevalência hierárquica (ex. professores tem autoridade sobre os alunos)	EMPTAGE; DAVIS, 2009 apud SHARBINI; BADE, 2009).
11	Comportamento Afiliativo	O comportamento por afinidade remete a ideia de vinculação, identificação ou afiliação dos envolvidos em uma situação de evacuação emergência. Neste contexto, as pessoas tendem a buscar o que é familiar em vez de simplesmente imprimirem fuga. Por exemplo, geralmente as pessoas fogem pela mesmo local que adentraram ou que tem costume de adentrar, mesmo que existam outras saídas	(JOHNSON, FEINBERG 1997); (ARAÚJO, 2013, apud. OLIVEIRA, 2014); (BEST, 1977 apud TONG; CANTER, 1985)

12	Velocidade do deslocamento	A literatura traz que as pessoas deslocam de maneira diferente quando em situação de emergência. De uma maneira geral, em superfícies horizontais a velocidade é de 1,4 m/s e 0,8 m/s para pessoas sem dificuldade de locomoção e com dificuldade de locomoção, respectivamente. No caso de escadas, as velocidades são de 0,70 m/s e 0,38 m/s (a subir) e 0,70 m/s e 0,33 m/s (à descer), respectivamente para pessoas sem dificuldade e com dificuldade de locomoção. Esta velocidade pode variar em função da quantidade e da distância das pessoas.	(MATIAS, 2013)
----	----------------------------	---	----------------

3.5 Sistemas Complexos e Emergência

De acordo com [Bar-Yam \(2002\)](#), sistemas complexos é uma nova abordagem da ciência que estuda como as relações entre as partes dão origem aos comportamentos coletivos de um sistema e como o sistema interage e forma relações com seu ambiente. Sistemas sociais formados (em parte) a partir de relacionamentos entre pessoas, o cérebro formado a partir de neurônios, moléculas formadas a partir de átomos, o clima formado a partir de microclimas são exemplos de sistemas complexos. O estudo de sistemas complexos abrange toda a ciência, além de engenharia, gerenciamento e medicina. Também é relevante para arte, história, literatura e outras áreas. Ele se concentra em certas questões sobre relacionamentos e como elas transformam partes em conjuntos.

No caso específico de evacuação de multidões, o comportamento do sistema segue o modelo de sistemas complexos, onde cada indivíduo possui suas próprias regras de decisão, mas quando colocados para interagir em um ambiente, novos comportamentos não descritos pelas regras emergem. O comportamento individual de uma pessoa é algo muito complexo, sendo que ela pode afetar a escolha de rota, o tempo e a eficiência de uma evacuação. O processo de evacuação com múltiplos indivíduos se torna mais complexo a medida que as relações sociais são consideradas ([YANG et al., 2005](#)). A literatura especializada já documentou vários tipos de comportamentos emergentes, onde alguns dos mais importantes serão brevemente apresentados a seguir:

- **Fenômeno de ir com a multidão.** Também conhecido como comportamento

de pastoreio, esse fenômeno é caracterizado pelo fato de alguém desistir de seu próprio raciocínio para seguir as ações da maioria a sua volta. Esse fenômeno é frequentemente observado em um processo de evacuação de ambiente real. Durante uma evacuação as pessoas podem perder a calma e a noção da localização de saídas seguras (principalmente em caso de incêndio em que a visibilidade é baixa) e tendem a seguir outras na esperança de que elas conheçam a localização das saídas. As pessoas que têm uma tendência maior de ir com a multidão podem ser facilmente afetadas por outras pessoas ao seu redor de acordo com [Kirchner e Schadschneider \(2002\)](#) e [Yang et al. \(2005\)](#).

- **Fenômeno de reunião.** Nesse fenômeno, as pessoas apresentam a característica de prevenção (ou seja, sentem que podem se proteger, psicologicamente, negando situações desagradáveis) e estão dispostas a permanecer na multidão em uma emergência, o que pode resultar em recolhimento dos ocupantes no interior do edifício. Além disso, os ocupantes de um edifício frequentemente evacuam em grupos, pois manterem-se reunidos pode aliviar a ansiedade ([YANG et al., 2005](#)). O efeito das pessoas se ajudarem em casos de emergência é conhecido como efeito de grupo ([ZHENG et al., 2009](#)).
- **Fenômeno de arqueamento.** Esse fenômeno ocorre nas saídas e é causado pelo fato de todos os pedestres se moverem em direção à saída, formando um gargalo no fluxo de pedestres ([WEI-GUO et al., 2006](#)).
- **Fenômeno de mais rápido é mais lento.** Esse fenômeno caracteriza-se pelo aumento do tempo de evacuação causado pela tentativa de aumento da velocidade de deslocamento individual dos pedestres ([ZHENG et al., 2009](#)).
- **Comportamento de pânico.** O pânico é uma reação psicológica na qual o indivíduo fica em um estado anormal de ansiedade ou em um estado comportamental de aceitação do desastre. A reação psicológica causada no desastre ambiental pode fazer a capacidade adaptativa e a capacidade de resposta ao ambiente diminuírem em pouco tempo. No pior caso, os indivíduos irão perder seus sentidos e perder a capacidade de fugir ([LI-JUN; JIN-CHANG; WEI-JIE, 2009](#)).

3.6 Trabalhos Relacionados

De acordo com [Bellomo et al. \(2012\)](#) modelos de evacuação podem ser divididos em duas categorias: os modelos macroscópicos e os modelos microscópicos.

No modelo macroscópico, o modelo de evacuação de ambientes que melhor representa é de fluidos dinâmicos apresentados nos trabalhos de [Henderson \(1971\)](#) e [Hughes \(2002\)](#).

Nesse tipo de modelo, os pedestres são descritos com atributos fluidos, sendo geralmente aplicado a uma grande multidão desconsiderando o comportamento individual.

Já o modelo microscópico pode ser dividido em dois grupos: Modelo contínuo com um representante da força social (SF) apresentados nos trabalhos de Helbing et al. (2000) e Hou et al. (2014) e modelo discreto representado pelo modelo de autômato celular (CA) que pode ser visto nos trabalhos de Burstedde et al. (2001) e Liao et al. (2014). O modelo de campo de chão (FF) é um dos modelos de CA amplamente utilizados em emergências evacuação de ambientes e foi proposto pela primeira vez por Burstedde et al. (2001).

Para mais informações sobre trabalhos relacionados verificar a seção 9 onde contém sete tabelas apresentando para cada abordagem vista nas subseções 3.2 e 3.3 um resumo contendo a configuração e resultados para cada trabalho apresentado.

4 Materiais e métodos

4.1 Materiais

4.1.1 *Hardware*

- Intel Core I5 6500U
- RAM: 8GB DDR4 2400 MHz
- HDD: 500 GB 5400 RPM
- SSD: WD Green 120 GB

4.1.2 *Software*

- SO: Linux Mint 18.3
- SO: Windows 10
- Python: 3.7

4.1.3 Instâncias

4.1.3.1 Escola Secundária

A planta baixa da escola foi obtida a partir de: ¹ . Como a planta da escola é fictícia e não possuía as medidas de tamanho, a tradução foi feita seguindo as medidas das portas como referência. Como cada porta tipicamente mede em torno de 80cm utilizamos tal como fato base para se medir o ambiente como um todo.

¹ <<https://www.edrawsoft.com/evacuation-plan-excel.php>>

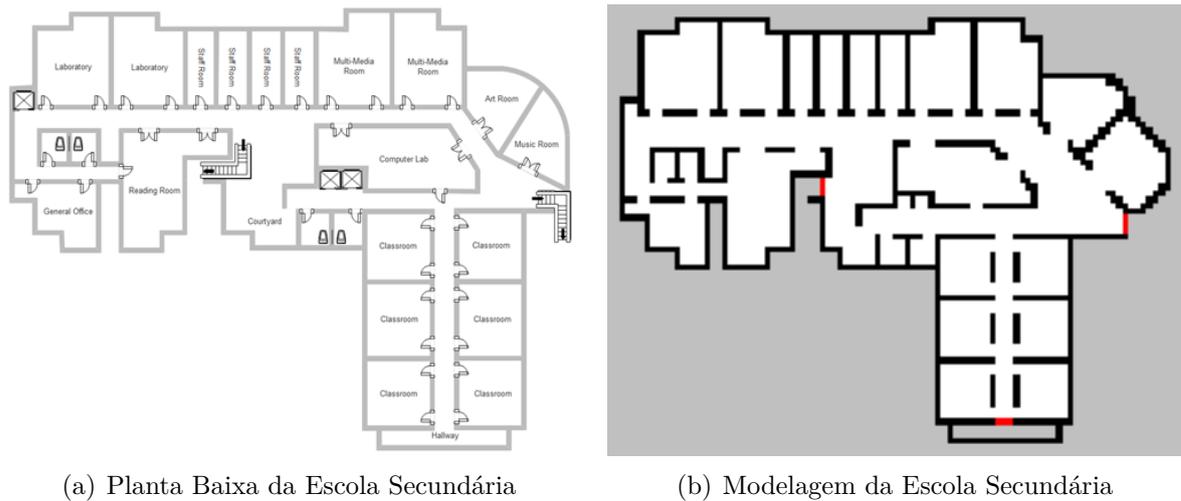
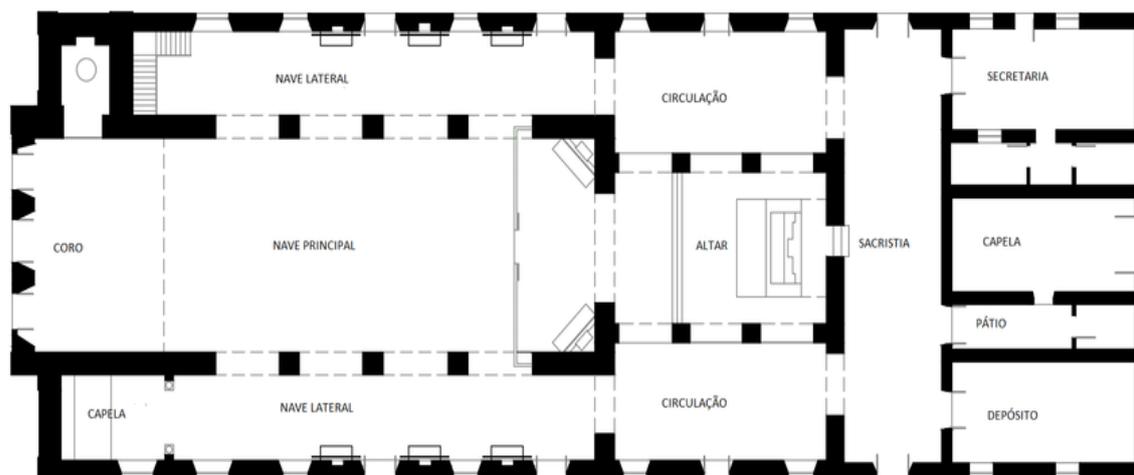


Figura 7 – Planta Baixa e Modelagem da Escola Secundária

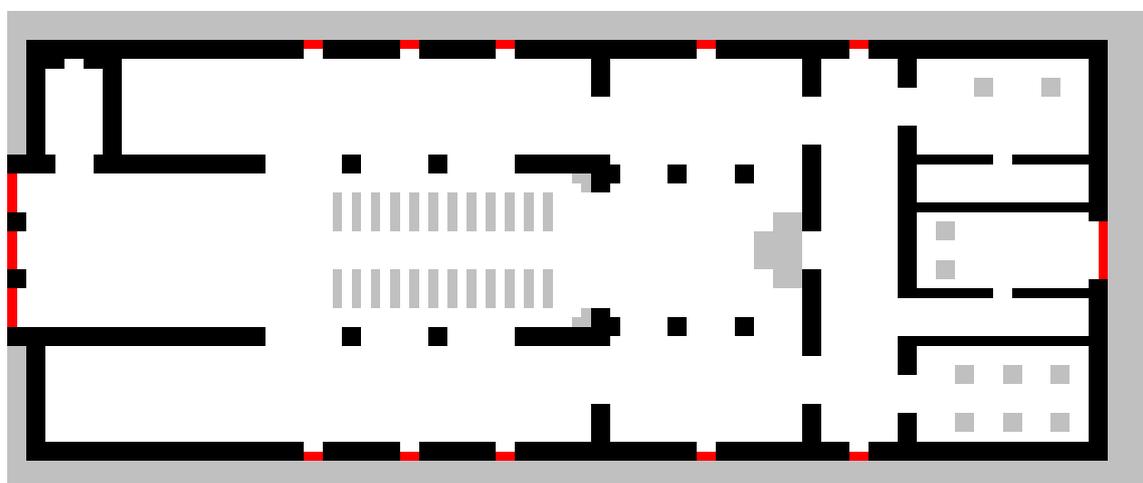
4.1.3.2 Igreja da Nossa Senhora da Expectação (Icó/CE)

A planta baixa da igreja apresentada na Figura 8 foi obtida a partir do site researchgate². Para obtenção das medidas da igreja foi utilizada o instrumento de medir distâncias do google maps. Foram obtidas as seguintes medidas aproximadas: 44,43m de largura (equivalente a 111 pixels na nossa modelagem) e 16,98m de comprimento (equivalente a 43 pixels).

² Disponível em - <https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Planta-baixa-da-igreja-adaptado-IPHAN_fig1_328842112> Acessado em Setembro 2019



(a) Planta baixa da igreja



(b) Modelagem feita do ambiente da igreja

Figura 8 – Planta Baixa e Modelagem da Igreja

A foto do interior apresentada na Figura 9 (a) foi obtida do site mapio³. E a foto da parte externa da igreja apresentada na parte (b) da Figura 9 foi obtida a partir do *street view* do google.

³ Disponível em - <<https://mapio.net/wiki/Q1807902-pt/>> Acessado em Setembro 2019



(a) Igreja internamente



(b) Igreja externamente

Figura 9 – Ambiente da Igreja da Nossa Senhora da Expectação (Icó/CE)

4.1.3.3 Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Culto

As fotos do interior e exterior do ambiente apresentadas na Figura 10 foram obtidas de moradores da cidade.



(a) Centro de Convivência Visão Interna em Ambiente de Culto



(b) Centro de Convivência Visão Externa

Figura 10 – Ambiente do Centro de Convivência em Culto

A planta baixa do centro de convivência foi disponibilizada pela prefeitura municipal de Vargem Bonita. Para a modelagem do mapa foram seguidas as medidas dispostas na Figura 11.

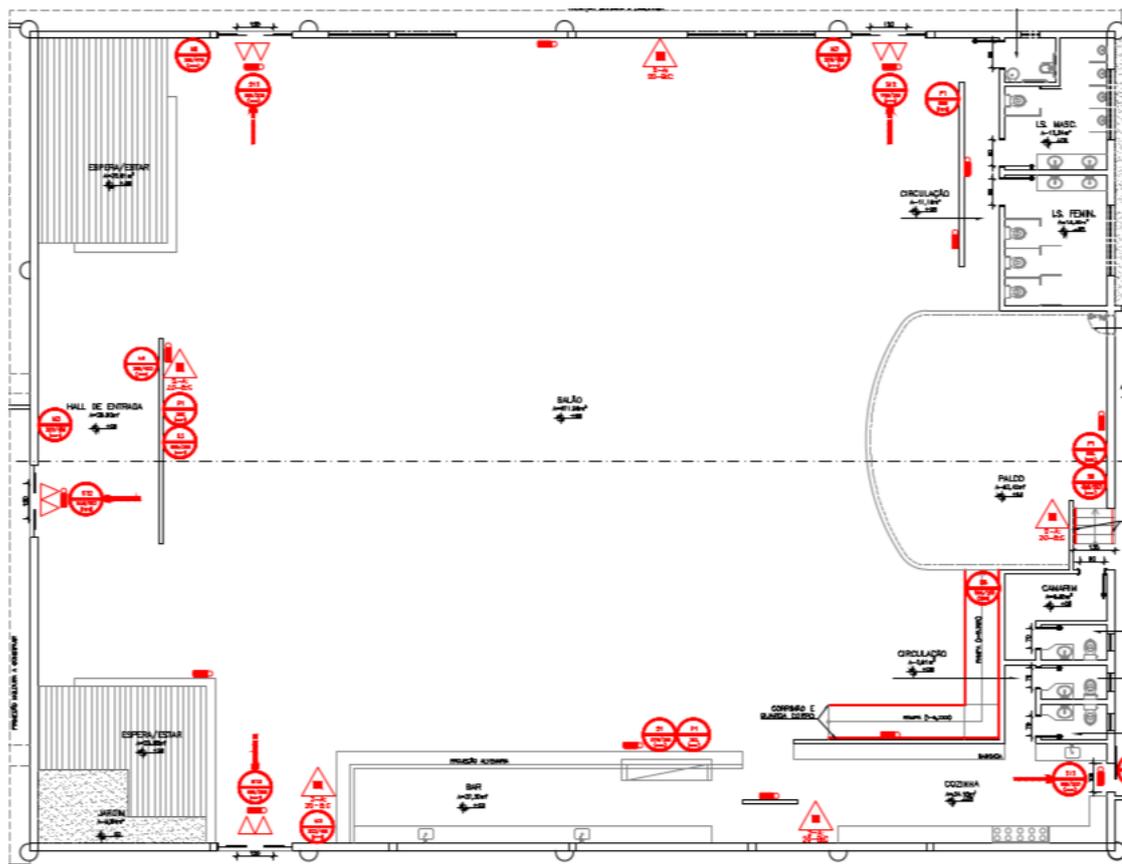


Figura 11 – Planta Baixa do Centro de Convivência

A modelagem feita utilizou 88px por 77px, que seria transformado em 35,2m por 30,8m enquanto a planta real possui 36m por 28m. A modelagem ficou levemente diferente das dimensões da planta real, todavia isto ocorreu pois como o modelo é discreto foi preciso arredondar algumas medidas nos banheiros e cozinha. Foi considerado que cada cadeira presente no ambiente tenha 40x40cm, assim resultando em uma célula inocupável por cadeira.

As áreas em laranja no canto esquerdo da Figura 12 são para demonstrar locais que possuem uma pequena elevação quanto ao piso. Já no canto direito estas partes são para demonstrar a escada e o palco que possui uma altura de aproximadamente um metro, logo é plausível a transição do piso para o palco.

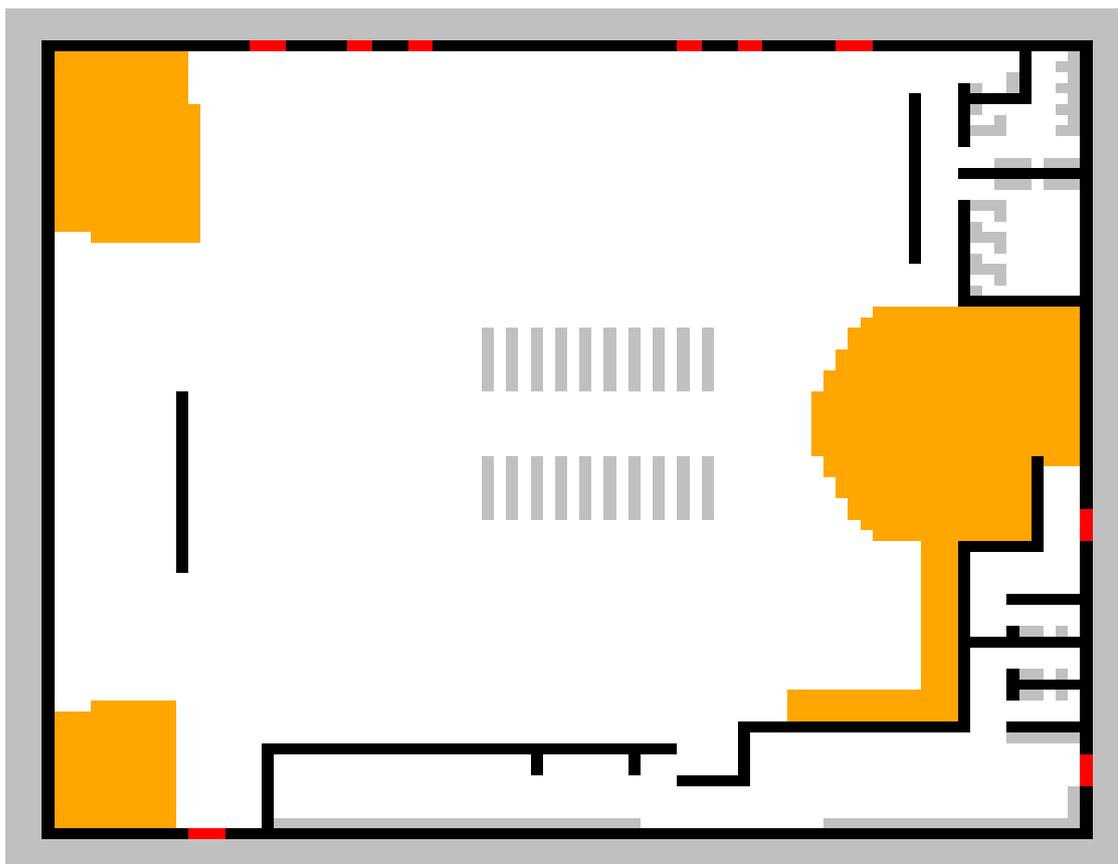


Figura 12 – Modelagem do Centro de Convivência em Ambiente de Culto

4.1.3.4 Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Formatura

Para a modelagem do mapa da Figura 13 também foram seguidas as medidas dispostas na planta baixa da Figura 11. As mesas de plástico comuns de acordo com o site proplast⁴ possuem dimensão de 70cm por 70cm. Como nosso modelo é discreto e cada célula mede 40cm do ambiente real, foi arredondado como se a mesa tivesse 80x80cm e assim ocupando 4 células por mesa. Para as cadeiras foram seguidas as mesmas medidas utilizadas anteriormente de 40x40cm ocupando então uma célula por cadeira.

Além das mesas e cadeiras, a única diferença desta planta é o tapete que está desenhado em laranja entre as mesas e a existência da porta do lado esquerdo do mapa, que no ambiente de culto está completamente bloqueada com madeira como pôde ser observado na Figura 10.

⁴ Disponível em - <<https://proplast.com.br/mesa-plastica-quadrada-modena/>> Acessado em Setembro 2019

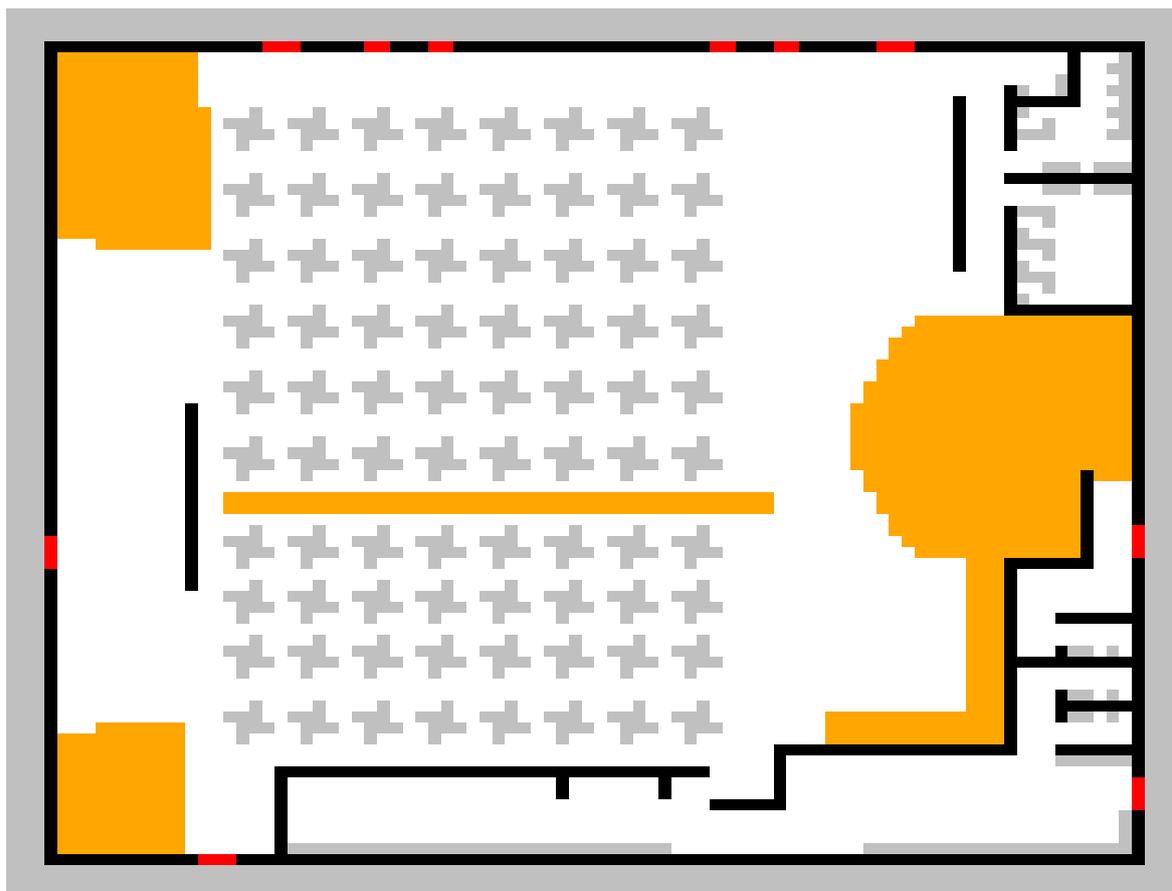


Figura 13 – Modelagem do Centro de Convivência em Ambiente de Formatura

Na Figura 14 pode ser visto a acomodação das mesas no ambiente. A foto interna do ambiente foi disponibilizada também por moradores da cidade.



Figura 14 – Ambiente do Centro de Convivência em Formatura

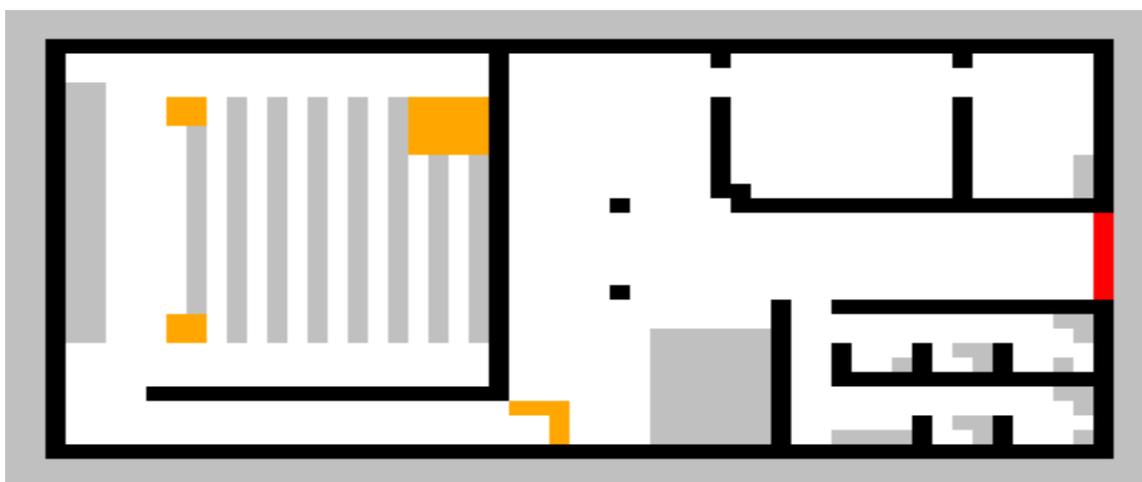
4.1.3.5 Cinema Hipotético

Na Figura 15 (a) pode se ver a planta baixa do cinema. A área total da planta é de 13,7m por 21m totalizando para o nosso modelo 29px por 53px.

A modelagem do cinema disposta na parte (b) da Figura 15, foi feita seguindo as medidas dispostas na planta e utilizando o AutoCAD para achar distâncias não disponibilizadas. As medidas das cadeiras foram colocadas no modelo, tendo seu tamanho como 40x40cm. Essa mesma medida foi utilizada entre uma cadeira e outra. As áreas em laranja próximas as cadeiras são para a demonstração da existência de áreas destinadas para deficientes e a área em laranja da entrada da sala de transmissão são cortinas confeccionadas com material que limita a propagação de chamas e emissão de fumaça. A área em cinza a direita da cortina é uma escada para o segundo piso. Todavia como o objetivo é evacuar e dificilmente as pessoas iriam subir para o pavimento superior, então estas células foram consideradas como inocupáveis.



(a) Planta Baixa do Cinema Fictício



(b) Modelagem Feita do Cinema

Figura 15 – Planta e Modelagem do Cinema

4.1.3.6 Instância da Literatura: (NISHINARI et al., 2004)

A Figura 16 (a) apresenta o experimento feito por Nishinari et al. (2004) e nossa modelagem referente ao dele é ilustrada na Figura 16 (b). O tamanho da planta de Nishinari é de 100x100 pixels, que quando transformado seria 40x40 metros. Esta planta foi modelada para que possa ser observado também o potencial repulsivo de paredes em nosso modelo.

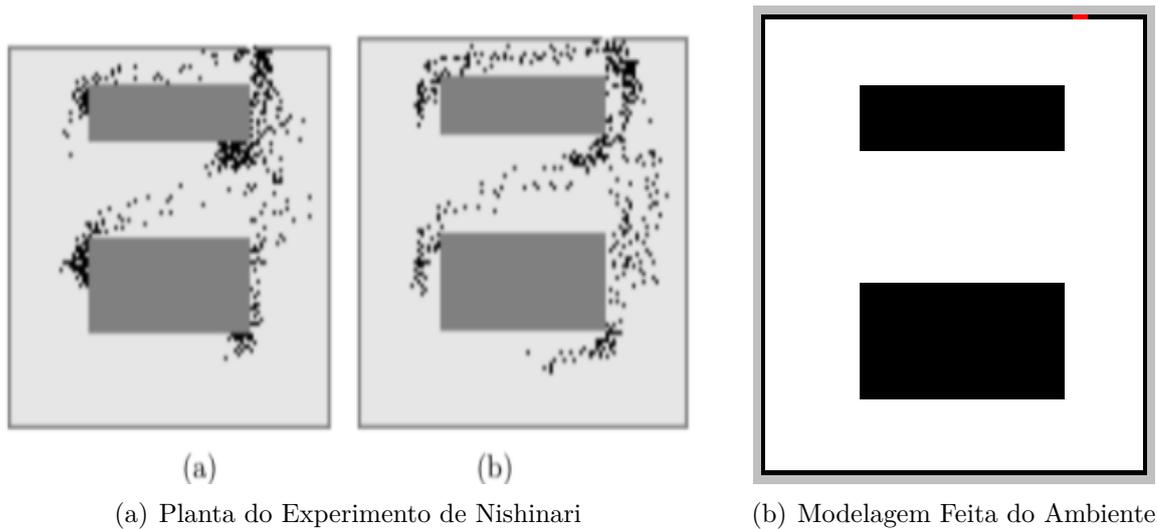


Figura 16 – Planta e Modelagem do Experimento de Nishinari

4.2 Metodologia

A primeira etapa do processo se deu pelo estudo sobre os autômatos celulares e outros métodos de evacuação. A segunda etapa foi a aquisição das plantas baixas dos ambientes e modelagem das mesmas. Dando início então a parte de desenvolvimento na qual foi feito o conversor de mapas. Após todos os mapas estarem prontos, foi feita a caracterização dos indivíduos de cada ambiente para que pudesse ser feita a experimentação e enfim a análise dos resultados obtidos.

5 Desenvolvimento

5.1 Simulador

O simulador teve seu início de desenvolvimento em Março de 2017 como projeto de pesquisa nomeado por Modelagem e Simulação Computacional de Evacuação em Instituições de Ensino Baseado em Características Comportamentais dos Indivíduos referente ao Edital 104/2016. O autor deste TCC assumiu a continuação do projeto no final de 2018, desde então tem contribuído com o desenvolvimento do simulador e resolveu seguir uma vertente diferente do projeto de pesquisa para o trabalho de conclusão de curso que consiste na simulação em outros ambientes que não fossem o Campus Formiga do IFMG. O Pseudo Código do simulador pode ser visto no Algoritmo 1.

Algorithm 1 Simulação Multidão Autômato Celular

```

1: Carrega o mapa em forma de grid
2: Calcula o floor field estático do grid
3: Gera indivíduos aleatoriamente, distribuído entre o grid
4: while  $\exists$  indivíduos não evacuados do
5:   Ordena os indivíduos de cada grid por distância da saída segundo o floor field
     estático
6:   for all indivíduos que ainda não evacuaram do grid do
7:     for all célula na vizinhança deste indivíduo do
8:       Calcula  $p_{ij} = N * \exp(-K_s S_{ij}) * \exp(K_D D_{ij}) * p_I * p_W * (n_{ij} - 1)$ 
9:     end for
10:    Move indivíduo para célula da vizinhança não ocupada com probabilidade  $p_{ij}$ 
11:    Incrementa o floor field dinâmico da célula antes ocupada em 1 unidade
12:    if célula escolhida corresponde à uma porta then
13:      Transfere o indivíduo para a saída
14:    end if
15:  end for
16:  for all célula do grid do
17:    Atualiza floor field dinâmico  $D_{ij}$  em termos de difusão e decaimento
18:  end for
19: end while

```

5.1.1 Entrada

O simulador tem como entrada 5 arquivos. O primeiro arquivo possui a extensão .ind e contem a caracterização dos indivíduos da simulação, estas caracterizações poderão ser vistas na seção 5.4. Cada arquivo deste possui para cada classe de indivíduos os seguintes atributos: Nome da classe, quantidade de indivíduos, constantes de sensibilidade, quantidade de turnos e RGB.

O segundo deles é o mapa do ambiente que possui a extensão `.map`. Ele pode ser produzido à mão configurando as constantes do mapa ou utilizando o conversor de mapas que será apresentado na Seção 5.2, desde que haja um arquivo com a extensão `.png` representando o mapa.

Outros dois arquivos que são necessários também possuem a extensão `.map`, um arquivo representa o mapa de fogo e o outro representa o mapa de vento. Todavia o mapa lógico que estes dois arquivos produzem não são considerados caso a *flag* de fogo esteja desabilitada no arquivo de configurações que será apresentado a seguir.

O último arquivo possui a extensão `.ini` e contém todas as configurações da simulação. Estas configurações incluem o caminho para os arquivos `.map` que foram citados, o arquivo de indivíduos, *flags* de ativação do fogo entre outros parâmetros.

5.1.2 Gráficos gerados

Para cada execução do programa 4 gráficos são gerados e exemplos deles podem ser observados na seção 6 nas Figuras 26, 30, 34, 38 e 42:

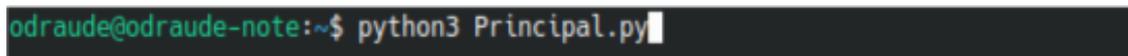
O primeiro gráfico mostra a quantidade acumulada de indivíduos que evacuaram o ambiente ao longo do tempo. O segundo mostra esta mesma quantidade acumulada, mas para cada classe separadamente ao invés do cumulativo global. O terceiro mostra a distância média entre a multidão e a saída mais próxima e o último mostra esta mesma distância média até as saídas, porém para cada classe.

5.1.3 Utilização

A forma geral de se utilizar o simulador é:

```
python3 Principal.py <numero-repeticoes>
```

Um exemplo de execução do programa pode ser visto na Figura 17. Quando o valor de repetições não é informado o *default* é um.

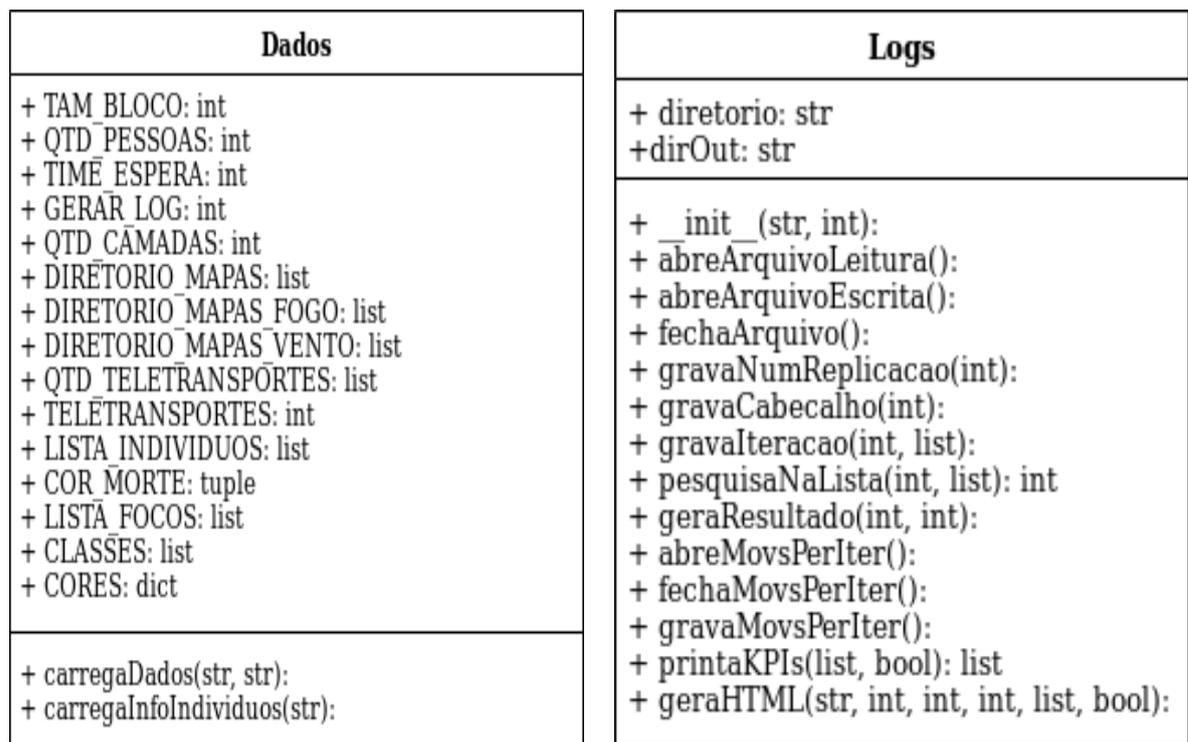


```
odraude@odraude-note:~$ python3 Principal.py
```

Figura 17 – Execução do Simulador

5.1.4 Diagramas de classe

Na Figura 18 (a) será apresentado o diagrama de classe Dados que contém as informações básicas que serão utilizadas na simulação. Já na parte (b) está o diagrama de classe Logs, esta classe faz as operações de escrita nos arquivos de saída e calcula os valores dos KPIs.



(a) Diagrama da Classe Dados

(b) Diagrama da Classe Logs

Figura 18 – Diagramas de Classe Logs e Dados

Na Figura 19 será apresentado o diagrama de classe Principal, esta classe é responsável por iniciar a simulação.

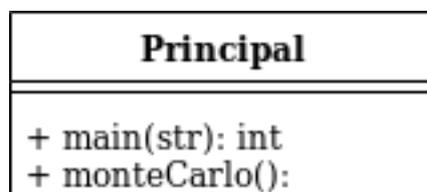
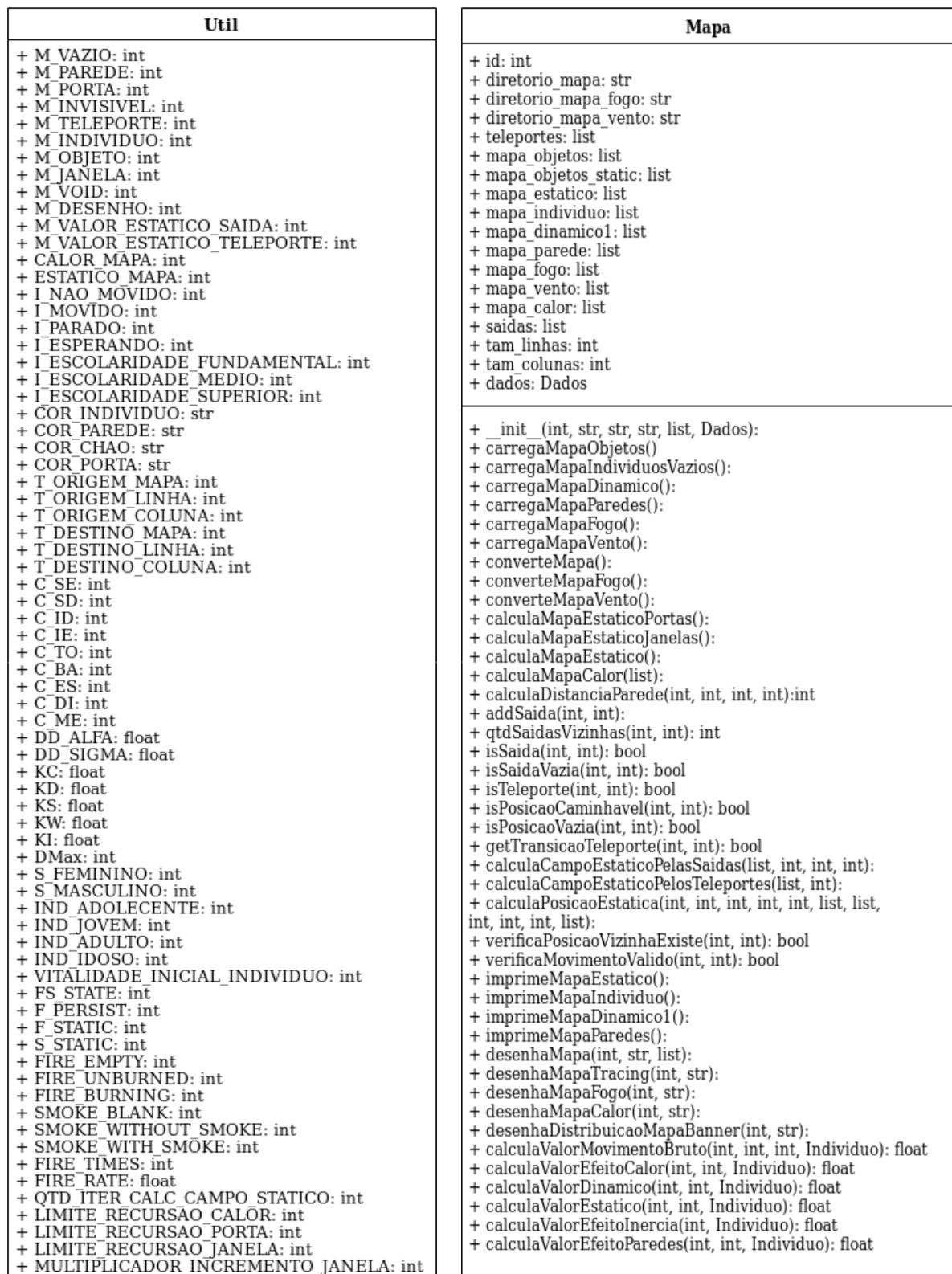


Figura 19 – Diagrama de Classe Principal

Na Figura 20 (a) será apresentado o diagrama de classe Util que contém as constantes utilizadas na simulação. Já na parte (b) da Figura 20 está o diagrama de classe Mapa que possui as constantes e funções para manipulação do ambiente.



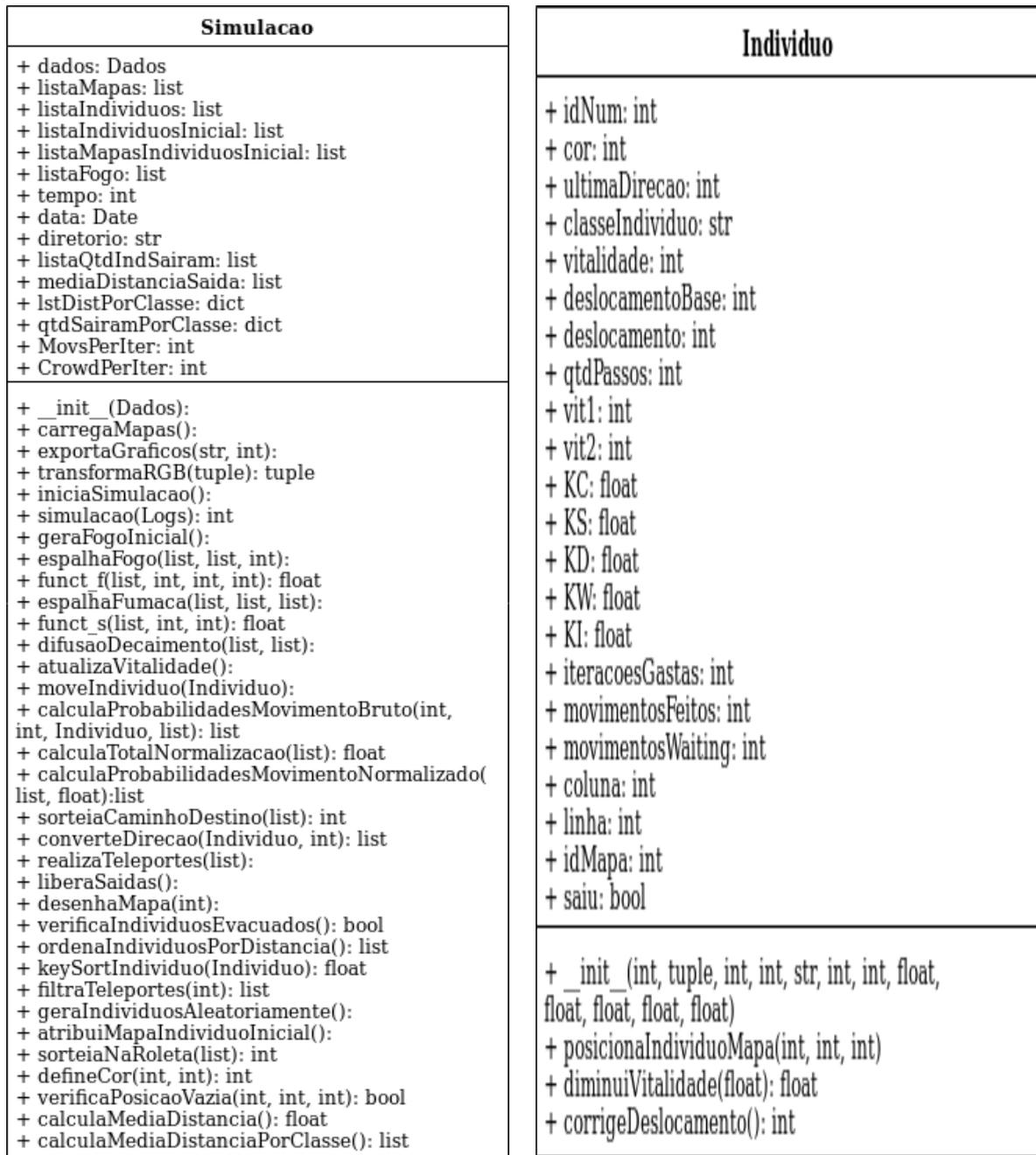
(a) Diagrama da Classe Util

(b) Diagrama da Classe Mapa

Figura 20 – Diagramas de Classe Util e Mapa

Na Figura 21 (a) será apresentado o diagrama de classe Simulacao que contém as variáveis e funções para controlar a simulação. Já na parte (b) 21 da Figura temos todas

as variáveis de um indivíduo, além de funções auxiliares para caso o fogo esteja habilitado.



(a) Diagrama de Classe Simulacao

(b) Diagrama de Classe Individuo

Figura 21 – Diagramas de Classe Simulação e Indivíduo

5.2 Gerador de Mapas

Para que o uso do simulador fosse mais simples, tanto para o autor quanto para algum futuro pesquisador, foi feito um gerador de mapas que, a partir de um arquivo com a extensão .png faz a tradução necessária para o mapa de objetos que o simulador utiliza. O pseudo-código do conversor pode ser visto no Algoritmo 2.

Algorithm 2 Conversor de Mapas

Ensure: conversorMapa(arquivoEntrada.png, arquivoSaida)

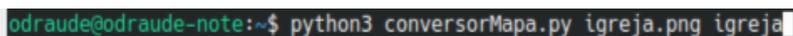
```
1: imagem ← arquivoEntrada.png
2: for all pixel in imagem do
3:   if pixel = (0,0,0) then
4:     escreva CONST-PAREDE no arquivoSaida
5:   else if pixel = (255,255,255) then
6:     escreva CONST-VAZIO no arquivoSaida
7:   else if pixel = (255,165,0) then
8:     escreva CONST-DESENHO no arquivoSaida
9:   else
10:    escreva CONST-INOCUPAVEL no arquivoSaida
11:  end if
12: end for
```

5.2.1 Utilização

A forma geral de se utilizar o conversor de mapas é:

```
python3 conversorMapa.py <arquivo-entrada.png> <arquivo-saida>
```

Um exemplo de execução do programa pode ser visto na Figura 22.



```
odraude@odraude-note:~$ python3 conversorMapa.py igreja.png igreja
```

Figura 22 – Execução do Gerador de Mapas

5.2.2 Exemplificação do Gerador de Mapas

Foi feito um pequeno mapa para exemplificar o funcionamento do gerador de mapas, conforme pode ser visto na Figura 23. Este mapa possui as dimensões 12px por 12px que representa 4 pequenas salas, cada uma com: uma janela e uma porta frontal (pintadas em vermelho), um tapete que percorre todo o corredor desde a porta frontal (pintado em laranja), as paredes das salas (pintadas em preto), o chão das salas (pintado em branco) e o espaço inocupável utilizado para completar o mapa (pintado em cinza). A tradução deste mapa pode ser vista na Tabela 3, na qual cada célula possui o número e cor relativos a tradução do mapa, excluindo-se a parte do chão pois não ficaria visível.

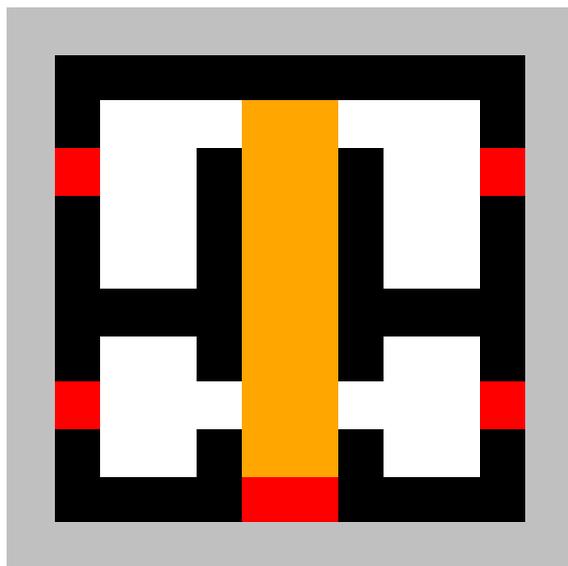


Figura 23 – Mapa Exemplo

8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
8	2	0	0	0	9	9	0	0	0	2	8
8	1	0	0	1	9	9	1	0	0	1	8
8	1	0	0	1	9	9	1	0	0	1	8
8	1	0	0	1	9	9	1	0	0	1	8
8	1	1	1	1	9	9	1	1	1	1	8
8	1	0	0	1	9	9	1	0	0	1	8
8	2	0	0	0	9	9	0	0	0	2	8
8	1	0	0	1	9	9	1	0	0	1	8
8	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	8
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

Tabela 3 – Tradução Feita Pelo Conversor

5.3 Caracterização de Parâmetros

Para que fosse feita a calibragem dos parâmetros uma experimentação combinatória foi feita. Para cada parâmetro de sensibilidade foram experimentados 3 valores sendo eles: 0.5, 1.0 e 1.5. Cada configuração foi rodada 3 vezes para tentar retirar a subjetividade da experimentação.

Como tentativa de não enviesar os parâmetros escolhidos, foi decidido pelo autor escolher a combinação de parâmetros que é a mediana entre todos os resultados obtidos. Excluindo-se aqueles iguais a 1200, devido ao fato destes terem alcançado o limite imposto do tempo máximo de simulação e não representarem uma situação realística de evacuação de ambiente. A configuração para o ser humano médio obtida seguindo a metodologia acima foi: $KD=0.5$ $KS=1.0$ $KW=1.0$ $KI=1.0$, como pode ser observado na tabela 22 presente no Apêndice B. Todavia o autor não considerou esta uma configuração viável para qualquer tipo de ambiente. Isto devido ao fato dos campos dinâmico e estático estarem pouco significantes enquanto o campo repulsivo das paredes estar muito forte quando comparado com os parâmetros utilizados pela literatura.

Dito isto, para nossa escolha de parâmetros primários foi escolhido utilizar a configuração proposta por Nishinari et al. (2004) que é: $KD=1.0$ $KS=2.0$ $KI=0.2$ $KW=0.5$, com uma modificação no KI que escolhemos o valor igual a um e uma pequena modificação no KW que escolhemos o valor igual a 0.3 para tentar deixar a modelagem mais realista.

5.4 Experimentos Realizados

5.4.1 Experimento: Escola Secundária

Para a caracterização dos indivíduos apresentados na Tabela 4, foram considerados 30 alunos por sala de aula comum, 10 alunos nas salas de arte e de música, 20 alunos por laboratório, 15 alunos em cada sala de multimídia, 20 alunos no laboratório de computadores, 2 servidores por sala de funcionários, 10 alunos na sala de leitura e 6 servidores no escritório geral, além de um professor por sala, totalizando 300 alunos, 13 professores e 14 servidores.

Para a classe dos Alunos foi escolhido deixar o KD mais forte pela falta de conhecimento das pessoas mais novas, sendo então mais propensas a seguirem a multidão, um KS mais baixo devido a um conhecimento menor do local e um KI mais alto devido ao fator de inocência dos indivíduos mais jovens. Para a classe dos Professores e Servidores utilizou-se os parâmetros básicos com exceção do KS que foi deixado com um valor maior devido a um provável conhecimento prévio do local.

Tabela 4 – Caracterização dos Indivíduos do Escola Secundária

Categorias	Quantidade	K_d	K_s	K_w	K_i	Turnos	Hexadecimal
Alunos	300	1.2	1.7	0.3	1.5	1	90EE90
Professores	13	1	2.1	0.3	1	1	ADD8E6
Servidores	14	1	2.2	0.3	1	1	006400

5.4.2 Experimento: Igreja da Nossa Senhora da Expectação (Icó/CE)

Para a caracterização dos indivíduos apresentados na Tabela 5, foi considerado que há 24 bancos e analisando a foto da igreja internamente pode-se concluir que cabem 6 pessoas por banco, totalizando 144 pessoas sentadas. Consideramos também que haverá em torno de 10% de pessoas de pé o que acrescentará 14 pessoas no total. Foi também considerado um padre, 6 ministros e 8 pessoas do coral, totalizando então 172 pessoas no ambiente.

Para as classes Crianças e Jovens foi optado por KD mais forte pela falta de conhecimento das pessoas mais novas, sendo então mais propensas a seguirem a multidão, um KS mais baixo devido a um conhecimento menor do local e um KI mais alto devido ao fator de inocência dos indivíduos mais jovens e como são jovens e possuem muita energia foi deixado a quantidade de turnos igual a um. A classe Adultos já possui o KD igual ao parâmetro base, um KS um pouco menor por frequentar menos a igreja que os idosos, um KI um pouco mais tendencioso do que o normal e a quantidade de turnos também igual a um. A classe Idosos tem um KS alto pela alta frequência ao ambiente e os demais parâmetros seguem os primários, todavia gastam 3 turnos para se locomoverem devido a

alta idade. As classes Padre e Ministro seguem a mesma linha de raciocínio para escolha dos parâmetros, porém o Padre gasta quatro turnos para se locomover devido a batina que restringe seus movimentos. Já a classe do Coral tem uma boa parametrização por conhecer bem o local e tem a quantidade de turnos igual a dois devido a já estarem perto das saídas.

Tabela 5 – Caracterização dos Indivíduos do Igreja

Categorias	Quantidade	K_d	K_s	K_w	K_i	Turnos	Hexadecimal
Crianças	16	1.5	1.5	0.3	1.5	1	6A5ACD
Jovens	24	1.2	1.6	0.3	1.5	1	87CEEB
Adultos	32	1	1.8	0.3	1.1	1	006400
Idosos	87	1	2.1	0.3	1	3	ADFF2F
Padre	1	0.9	2.2	0.3	0.9	4	ADD8E6
Ministro	4	0.9	2.5	0.3	0.9	3	DAA520
Coral	8	0.9	2.3	0.3	0.9	2	4B0082

5.4.3 Experimento: Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Culto

Para a caracterização dos indivíduos apresentados na Tabela 6, foi considerado 20 fileiras de bancos, em cada uma há seis cadeiras dispostas totalizando então 120 pessoas sentadas. Consideramos também o adicional de 10% de pessoas de pé que acrescentou 12 pessoas totais. Será considerado um pastor, 5 ministros e 5 pessoas do coral. Estes valores são aproximados considerando as imagens disponibilizadas na Figura 10 da seção 4.1.3.3 e da Figura 48 disposta no Apêndice A.

A escolha de parâmetros para a caracterização dos indivíduos no ambiente de culto segue a mesma linha de pensamento utilizado na igreja que pode ser visto na seção 5.4.2. A maior diferença que são os turnos é justificada devido ao ambiente ser mais amplo e possuir menos obstáculos para a evacuação, devido a isso a quantidade de turnos das classes foram reduzidas.

Tabela 6 – Caracterização dos Indivíduos do Centro de Convivência em Culto

Categorias	Quantidade	K_d	K_s	K_w	K_i	Turnos	Hexadecimal
Crianças	13	1.5	1.5	0.3	1.5	1	6A5ACD
Jovens	20	1.2	1.6	0.3	1.5	1	87CEEB
Adultos	26	1	1.8	0.3	1	1	006400
Idosos	73	1	1.8	0.3	1	2	ADFF2F
Pastor	1	1	1.8	0.3	1	2	ADD8E6
Ministro	4	1	1.8	0.3	1	1	DAA520
Coral	8	1	1.8	0.3	1	1	4B0082

5.4.4 Experimento: Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Formatura

Para a caracterização dos indivíduos apresentados na Tabela 7, foi considerado que há 80 mesas dispostas, considerando que em cada mesa sentarão 4 pessoas dará um total de 320 pessoas. Consideramos também um orador da formatura, 10 pessoas da organização e 5 atendentes no bar.

Para a classe Crianças optou-se por deixar um KD mais forte para que sigam a multidão, um KS mais fraco por não conhecer o ambiente direito e um KI mais alto pela inocência. A classe Jovens está melhor caracterizada agora pois conhece o ambiente e sente-se mais independente para seguir menos o mesmo caminho e a multidão. As classes Adultos e Orador foram caracterizadas com parâmetros iguais aos parâmetros base, enquanto a classe Idosos tem um KS um pouco mais baixo por não conhecer direito o ambiente e um KI um pouco mais alto por estar desorientado com o tumulto. E por fim, as classes Organização e Atendentes ficaram melhor caracterizadas do que as demais classes devido ao alto conhecimento do local.

Tabela 7 – Caracterização dos Indivíduos do Centro de Convivência em Formatura

Categorias	Quantidade	K_d	K_s	K_w	K_i	Turnos	Hexadecimal
Crianças	32	1.5	1.5	0.3	1.5	1	6A5ACD
Jovens	128	1.2	2.2	0.3	1	1	87CEEB
Adultos	112	1	2	0.3	1	1	006400
Idosos	48	1	1.8	0.3	1.2	2	ADFF2F
Orador	1	1	2	0.3	1	1	ADD8E6
Organização	10	1	2.5	0.3	1	1	DAA520
Atendentes	5	1	2.5	0.3	1	1	4B0082

5.4.5 Experimento: Cinema Hipotético

Para a caracterização dos indivíduos apresentados na Tabela 8 foram consideradas 140 pessoas no modelo, pensando-se nas 128 cadeiras disponibilizadas no ambiente, alguns funcionários e pessoas que podem estar esperando a próxima sessão.

A classe Crianças foi caracterizada com um baixo KS pensando no baixo conhecimento sobre o ambiente e um KI acima do normal devido a inocência. Já na classe Jovens colocou-se um alto KS pelo alto conhecimento do cinema e um KI acima do normal devido ao fator confusão. Para as classes Adultos e Idosos utilizou-se o KS mais baixo por terem menos conhecimento sobre o ambiente e um KD mais alto para seguir a multidão já que não se conhece o ambiente. A classe Idosos tem seu turno maior devido ao fato da própria idade. Já a classe Crianças tem seu turno aumentado devido a dificuldade de lidar com muitos objetos no caminho, que neste caso seria as cadeiras.

Tabela 8 – Caracterização dos Indivíduos do Cinema

Categorias	Quantidade	K_d	K_s	K_w	K_i	Turnos	Hexadecimal
Crianças	28	1	1.5	0.3	1.5	2	6A5ACD
Jovens	70	1	2.5	0.3	1.5	1	006400
Adultos	28	1.2	1.7	0.3	1	1	DAA520
Idosos	14	1.2	1.4	0.3	1	3	800080

5.4.6 Experimento da Literatura: (NISHINARI et al., 2004)

Para a caracterização dos indivíduos apresentados na Tabela 9 foram considerados 300 indivíduos analisando as imagens disponibilizadas no artigo de (NISHINARI et al., 2004), já que ele não mencionou a quantidade de indivíduos utilizados.

Em seu trabalho Nishinari utilizou o KI igual a 0.2, decidimos utilizar o KI igual a um, seguindo o padrão dos outros experimentos com a finalidade de que os resultados se mantivessem consistentes. Somente o parâmetro KW foi alterado para que pudesse ser visto o efeito de repulsão das paredes que Nishinari propôs.

Tabela 9 – Caracterização dos Indivíduos do Experimento de Nishinari

Categorias	Quantidade	K_d	K_s	K_w	K_i	Turnos	Hexadecimal
Individuo 1	300	1	2	0	1	1	0000FF
Individuo 2	300	1	2	0.1	1	1	0000FF
Individuo 3	300	1	2	0.2	1	1	0000FF
Individuo 4	300	1	2	0.3	1	1	0000FF
Individuo 5	300	1	2	0.4	1	1	0000FF
Individuo 6	300	1	2	0.5	1	1	0000FF

6 Resultados e Discussão

6.1 Experimento: Escola Secundária

Pode ser visto na Figura 24 (a) que as saídas estão um pouco mal distribuídas, isto devido a toda a parte esquerda do mapa estar azul, o que significa que são os pontos mais distantes das saídas. Ainda pode ser visto na parte (b) da Figura 24 um enorme gargalo de pedestres na saída superior a esquerda. Para um melhor desempenho de evacuação esta porta deveria estar posicionada em um outro local. Com a porta em outro lugar a quantidade de tempo de espera dos pedestres provavelmente baixaria o que tornaria a planta ainda mais viável de ser construída na vida real.

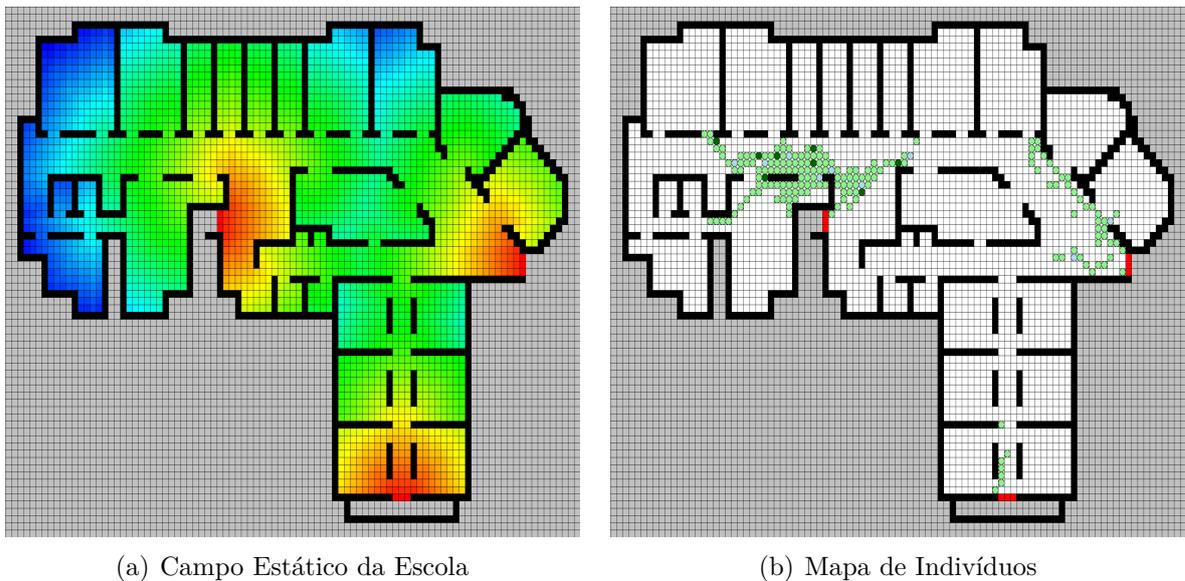


Figura 24 – Campo Estático da Escola e Mapa de Indivíduos

Na Tabela 10 são mostrados os resultados obtidos em 100 replicações da instância ‘escola’ considerando o tempo de execução (*runtime*), o número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de movimentos realizados por indivíduo e quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados. Nela pode ser analisado que o *runtime* tem um desvio padrão e coeficiente de variação baixos levando em consideração ao quão a variância da quantidade de iterações é grande o que impacta diretamente no tempo gasto de execução. Além disto é possível de ver a baixa variância, DP e CV na quantidade de movimentos feitos, estes valores são baixos devido ao gargalo que é formado em todo o experimento na porta a esquerda já que como medida para cada experimentação utilizamos a mediana da quantidade de movimentos.

Tabela 10 – Resultados do Experimento da Escola Secundária

	Min	Média	Mediana	Max	Variância	DP	CV %
<i>Runtime</i>	47.28	61.64	61.57	80.48	45.15	6.72	10.9
Iterações	150.0	197.55	198.0	252.0	451.5	21.25	10.76
Movimentos	21.0	23.26	23.0	25.0	0.71	0.84	3.63
Espera	2.0	2.52	3.0	3.0	0.25	0.5	19.93

Na Figura 25 são mostrados os resultados em forma de *boxplot* obtidos em 100 replicações da instância ‘escola’ considerando o tempo de execução (*runtime*), o número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de movimentos realizados por indivíduo e o quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados. Analisando o *boxplot* (b) observa-se que o mínimo e máximo tem uma diferença de 102 iterações o que nos diz que os parâmetros poderiam ser melhor ajustados para que essa diferença fosse diminuída e consequentemente a variância.

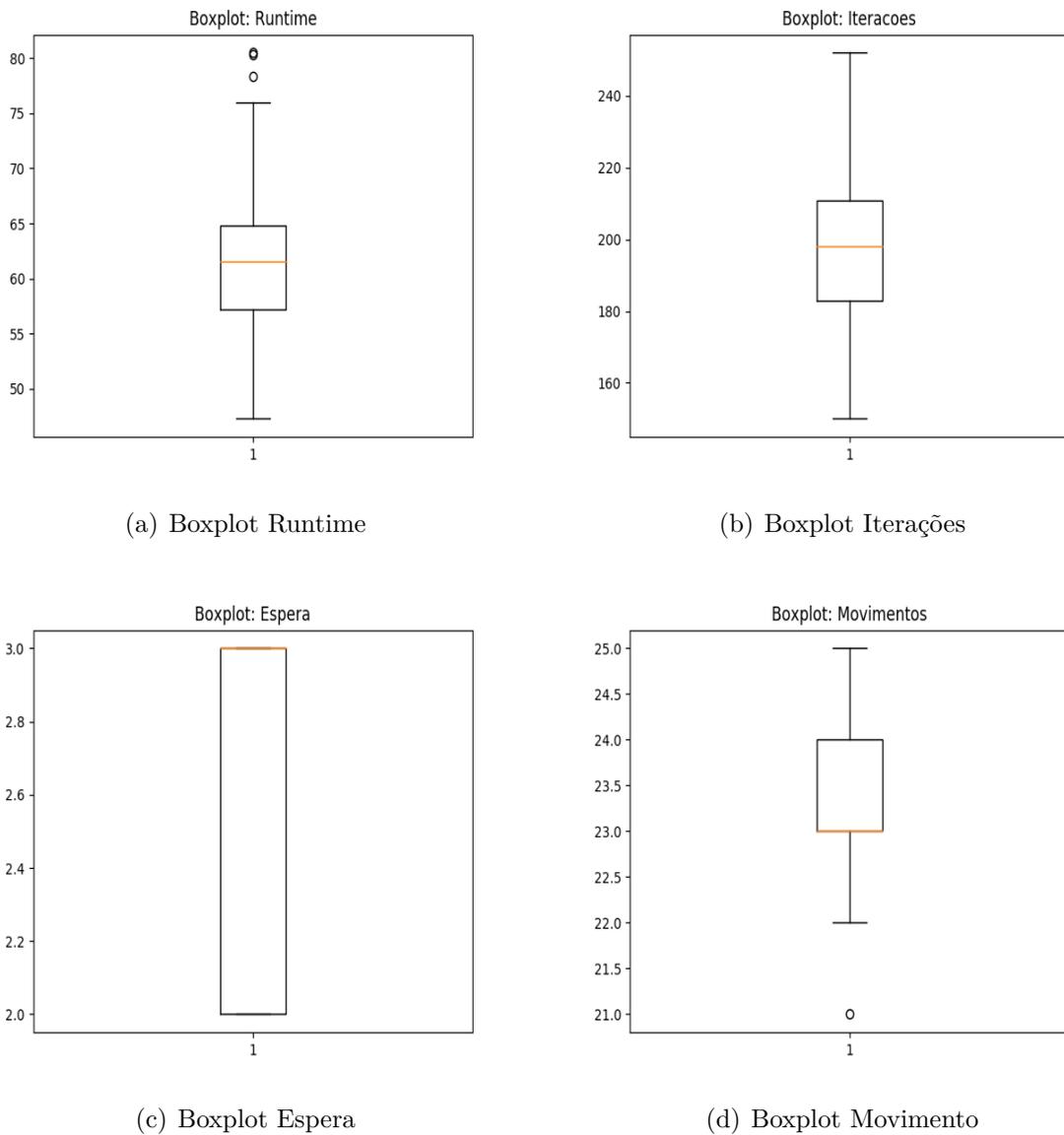
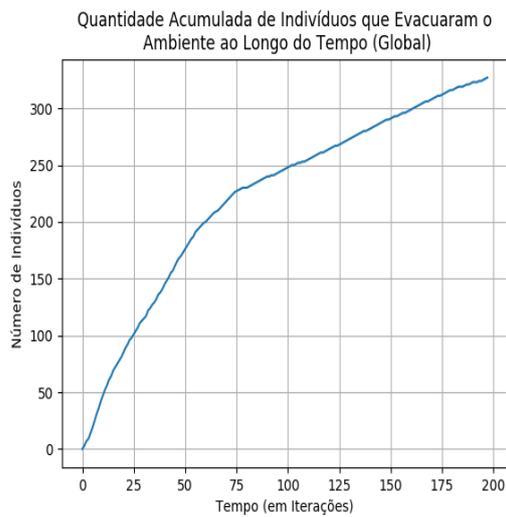
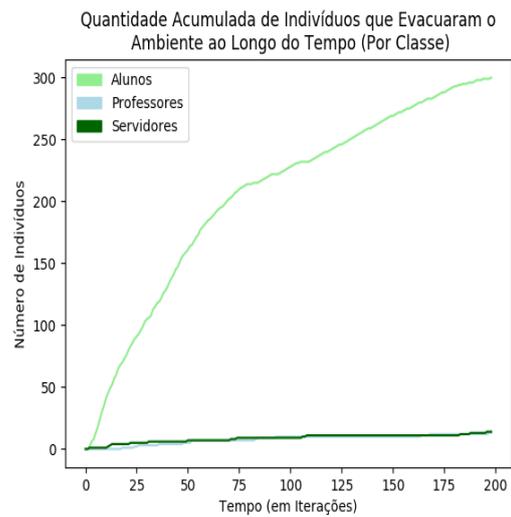


Figura 25 – Boxplots Resultados da Escola

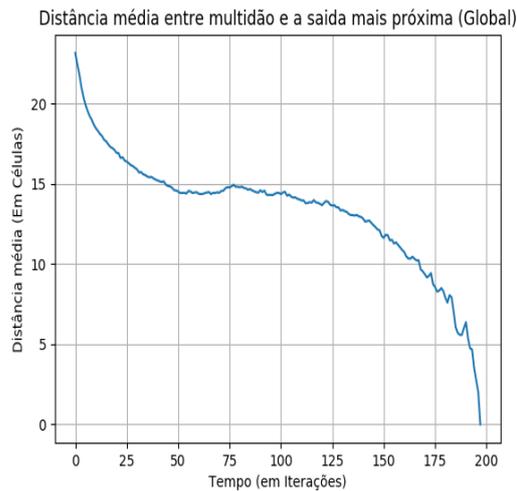
A experimentação 19 referente a Figura 26 foi escolhida devido ao fato dela ter a mesma quantidade de iterações gastas que a mediana apresentada na Tabela 10. Pode ser observado na parte (d) da figura que as 3 classes saíram sem uma grande diferença de tempo. Analisando as partes (a),(b) e (c) da Figura 26 é possível de se notar que, até aproximadamente a iteração 75 houve uma grande quantidade de indivíduos que conseguiram evacuar o ambiente, após isto os gargalos começam a se formar e a vazão diminui consideravelmente estendendo a evacuação que poderia ser mais otimizada.



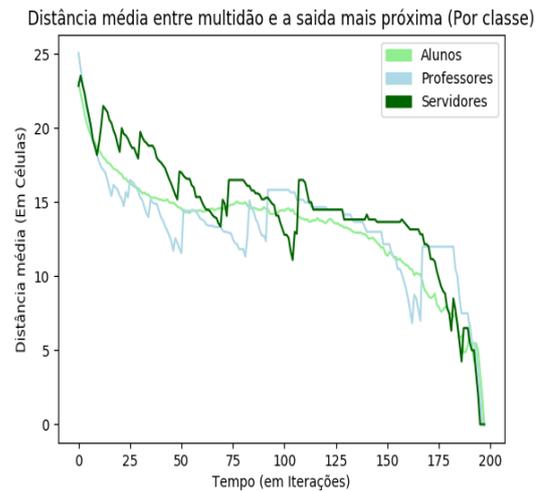
(a) Curva Cumulativa Geral



(b) Curva Cumulativa por Classe



(c) Distância Média Geral



(d) Distância Média por Classe

Figura 26 – Gráficos da Experimentação Número 19

As imagens da Figura 27 mostram o início da evacuação, os gargalos que ocorreram e o fim da evacuação. Foi feita uma estimativa grosseira de quantos indivíduos saem por iteração. Supondo que a curva acumulada de indivíduos que evacuaram o ambiente é linear, utilizou-se a fórmula $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ para obter essa aproximação. Até a iteração 75 a vazão encontrada é de 3,02 indivíduos, já da iteração 76 até o fim da evacuação a vazão de indivíduos é de 0,82 indivíduos por iteração.

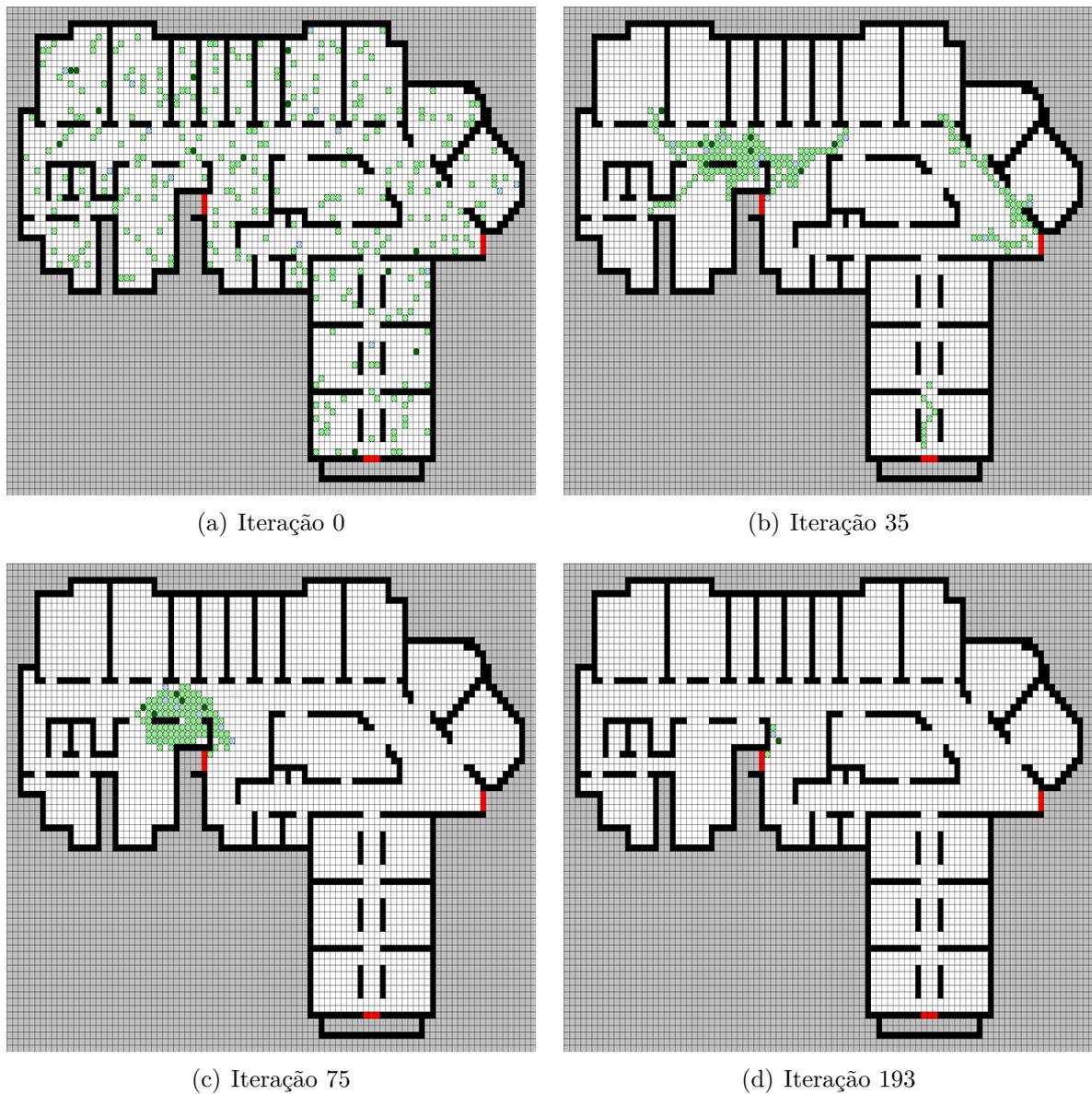
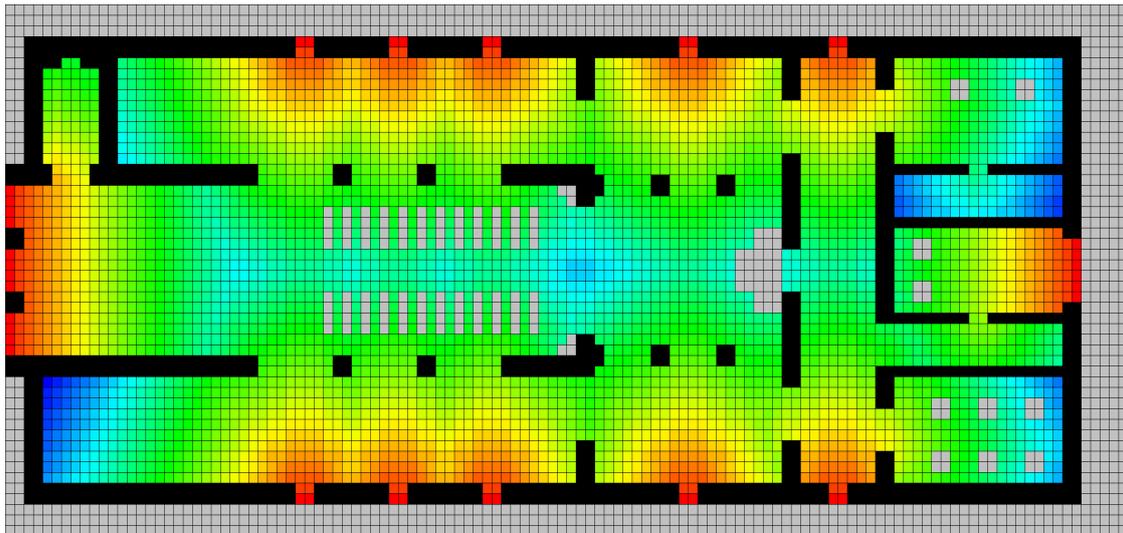


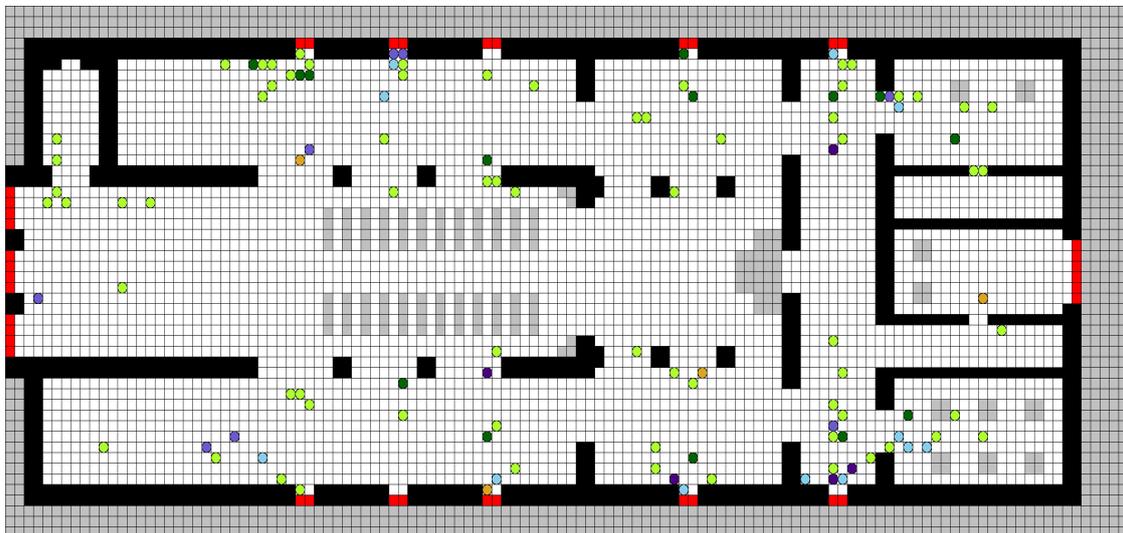
Figura 27 – Demonstração da Evacuação da Escola ao Longo das Iterações da Simulação

6.2 Experimento: Igreja da Nossa Senhora da Expectação (Icó/CE)

Pode ser visto no mapa estático da Figura 28(a) que as saídas estão muito bem distribuídas o que deixa o mapa bem uniforme, as áreas em azul do mapa normalmente não seriam ocupadas. Além do mapa estático ter obtido um bom resultado é notável também que os indivíduos se distribuem bem para a utilização das saídas como pode ser visto na parte (b) da Figura 28.



(a) Campo Estático da Igreja



(b) Mapa de Indivíduos

Figura 28 – Campo Estático da Igreja e Mapa de Indivíduos

Na Tabela 11 são mostrados os resultados obtidos em 100 replicações da instância 'igreja' considerando o tempo de execução (*runtime*), o número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de movimentos realizados por indivíduo e quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados.

Além dos bons indicativos visuais já citados temos que a média de espera é menor que um e o máximo que um indivíduo teve que esperar para se locomover foi uma iteração. Como o desvio padrão da quantidade de iterações gastas foi baixo, temos que 99,9% dos resultados esperados estarão entre 70 e 118 iterações de acordo com a métrica de 3 sigmas. Apesar do máximo ser 128 iterações gastas, este é um *outlier* assim como poderá ser visto no *boxplot* (b) da Figura 29 que será apresentado posteriormente.

E mesmo a caracterização dos indivíduos da igreja possuindo 91 indivíduos que são três vezes mais lentos que o normal a quantidade média de iterações gasta foi menos que a metade do experimento realizado na escola, o que ratifica que o ambiente está bem colocado no quesito de evacuação do ambiente em alguma situação de emergência.

Tabela 11 – Resultados do Experimento da Igreja

	Min	Média	Mediana	Max	Variância	DP	CV
<i>Runtime</i>	65.88	120.94	127.58	148.33	401.75	20.04	16.57
Iterações	81.0	93.78	93.0	128.0	61.75	7.86	8.38
Movimentos	12.0	13.61	14.0	16.0	0.72	0.85	6.24
Espera	0.0	0.46	0.0	1.0	0.24	0.49	105.44

Na Figura 29 são mostrados os resultados em forma de *boxplot* obtidos em 100 replicações da instância ‘igreja’ considerando o tempo de execução (*runtime*), o número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de movimentos realizados por indivíduo e o quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados. Como pode ser visto na parte (d) da Figura 29, a quantidade movimentos é baixa devido a caracterização dos indivíduos, isto ocorreu pois a maioria deles são idosos que gastam 3 turnos para se locomover.

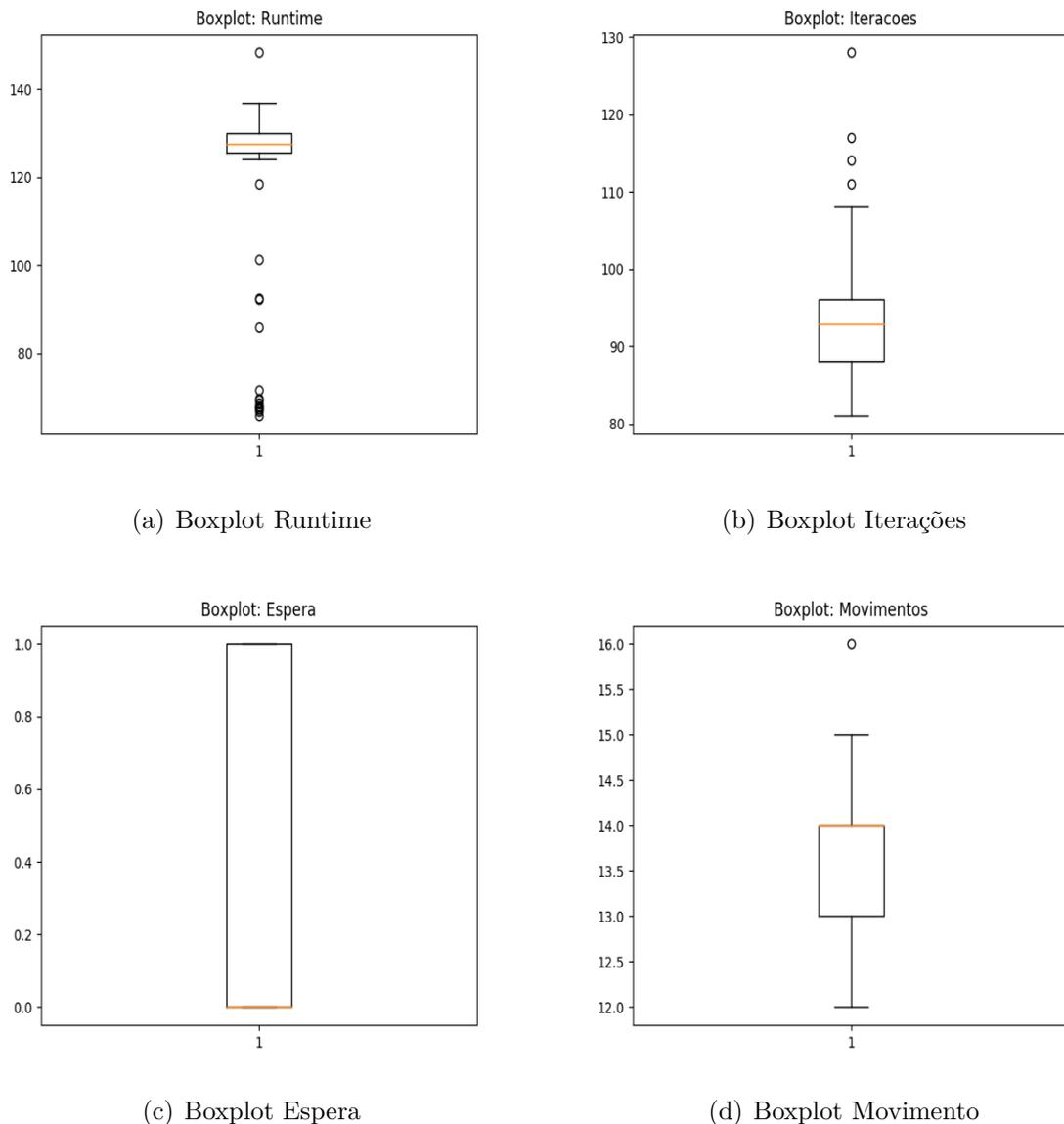
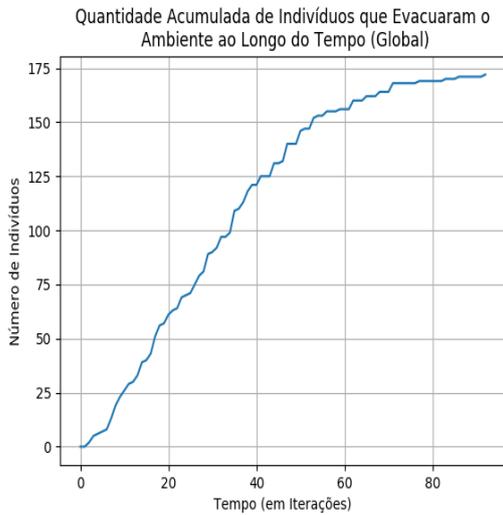


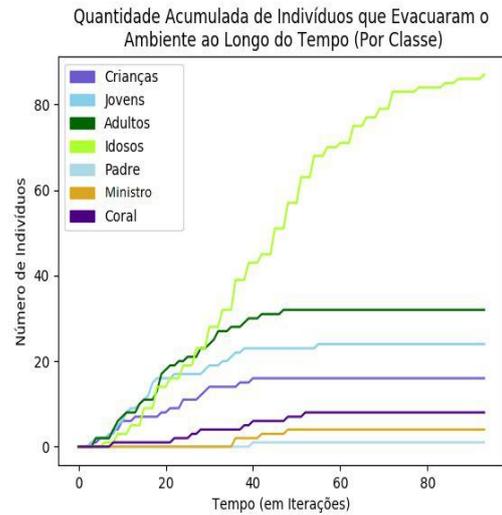
Figura 29 – Boxplots Resultados da Igreja

A experimentação 7 referente a Figura 30 foi escolhida devido ao fato dela ter a mesma quantidade de iterações gastas que a mediana apresentada na Tabela 11. Na parte (b) e (d) da figura podemos notar que a classe Crianças e a classe Padre foram as primeiras a evacuem o ambiente. Porém na simulação tem somente um padre e apesar de ele fazer um movimento a cada 4 turnos nessa execução ele saiu a somente 8 pixels de distância da saída e devido a isto ele conseguiu evacuar rapidamente. Além disto pode ser analisado os indivíduos da classe Idosos que são mais lentos levaram cerca de 135% de tempo a mais para sair do mesmo ambiente que os mais velozes que são da classe Crianças. Pode ser observado também na parte (a) da Figura que perto da iteração 54 a curva se estabiliza pois neste momento da evacuação todas as classes exceto os Idosos já evacuaram do ambiente, enquanto na parte (c) se tem uma subida abrupta da curva mostrando o

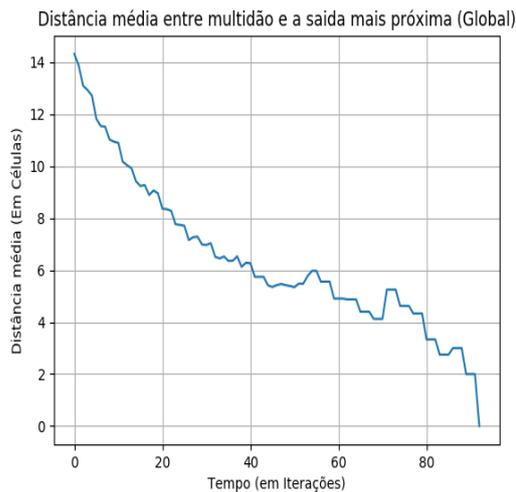
mesmo.



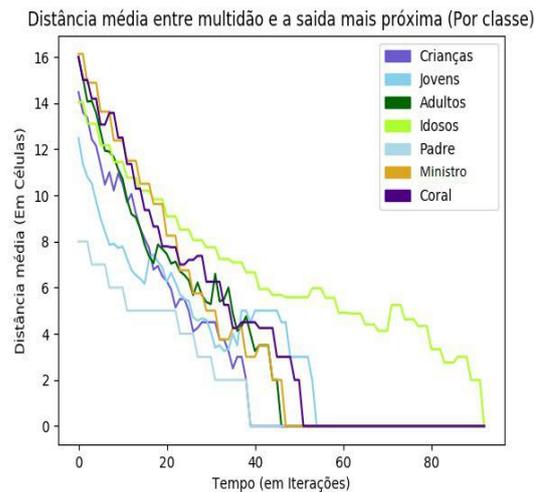
(a) Curva Cumulativa Geral



(b) Curva Cumulativa por Classe



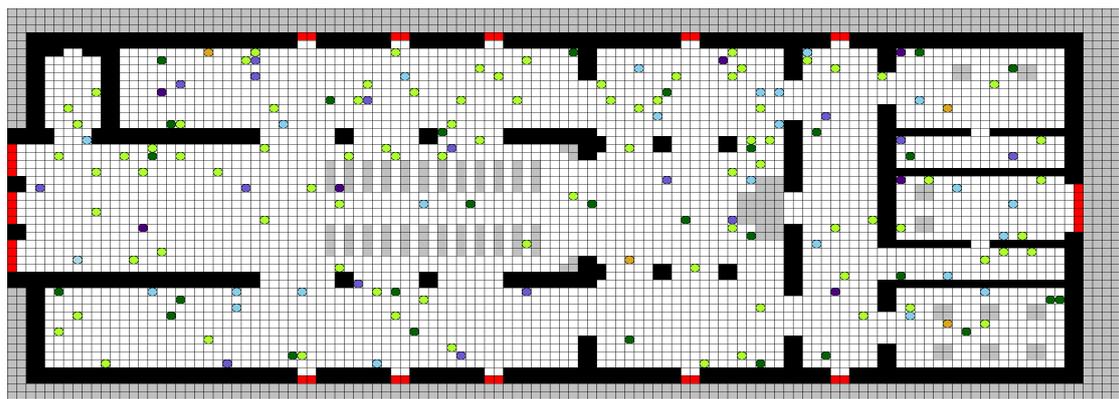
(c) Distância Média Geral



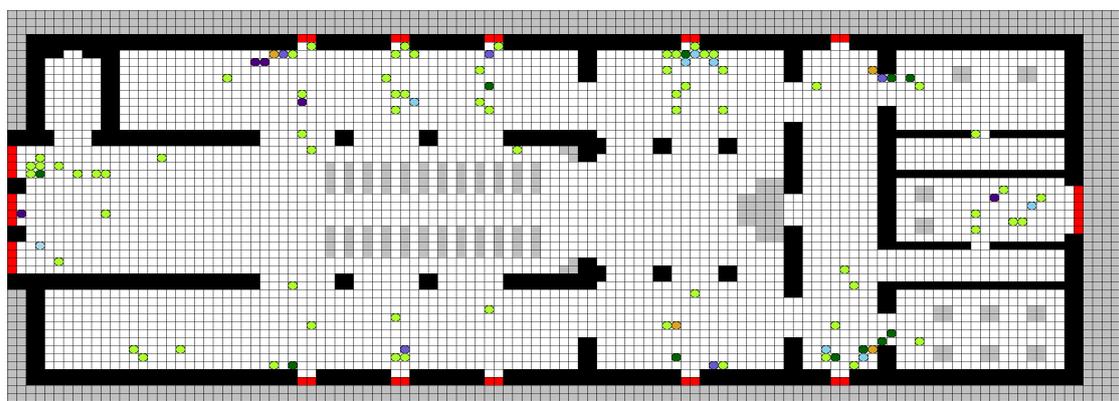
(d) Distância Média por Classe

Figura 30 – Gráficos da Experimentação Número 7

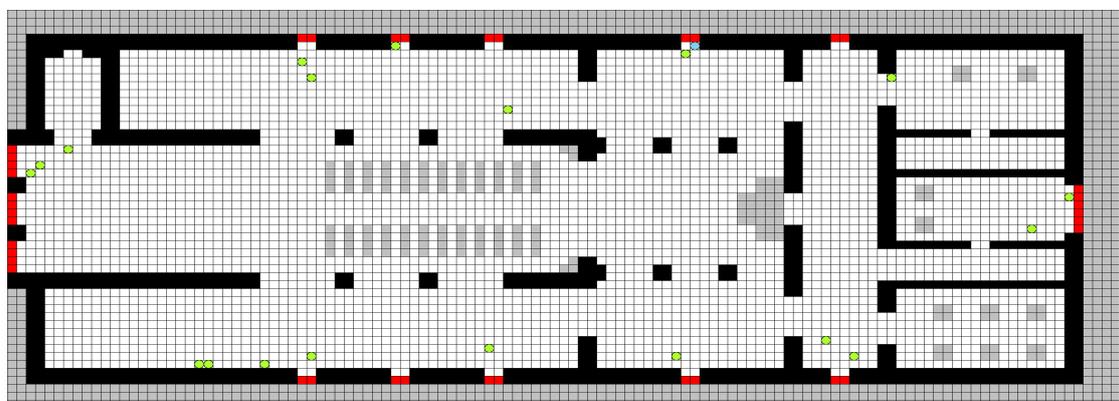
As imagens da Figura 31 mostram o início da evacuação, a distribuição quase uniforme para cada saída, a evacuação da penúltima classe deixando apenas os idosos na simulação e o fim da evacuação. Foi feita uma estimativa grosseira de quantos indivíduos saem por iteração. Supondo que a curva acumulada de indivíduos que evacuaram o ambiente é linear, utilizou-se a fórmula $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ para obter essa aproximação. Até a iteração 54 a vazão encontrada é de 2,83 indivíduos, já da iteração 54 até o fim da evacuação a vazão de indivíduos é de 0,5 indivíduos por iteração.



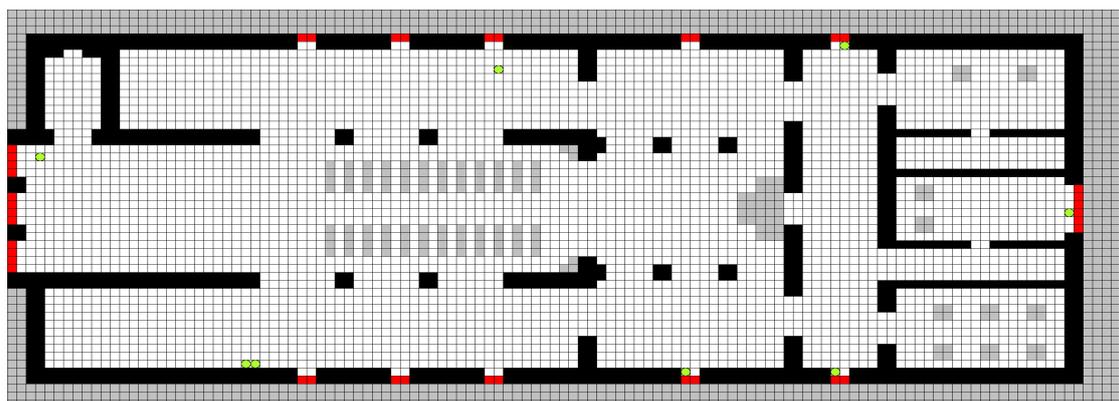
(a) Iteração 0



(b) Iteração 26



(c) Iteração 54



(d) Iteração 70

Figura 31 – Demonstração da Evacuação da Igreja ao Longo das Iterações da Simulação

6.3 Experimento: Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Culto

Observa-se que o mapa estático da Figura 32 (a) está quase uniforme, excluindo uma pequena parte do bar que está em azul que em um ambiente de culto dificilmente estaria ocupada. Na parte (b) da Figura nota-se que os indivíduos se dividiram bem para qual saída utilizar gerando assim pequenos gargalos.

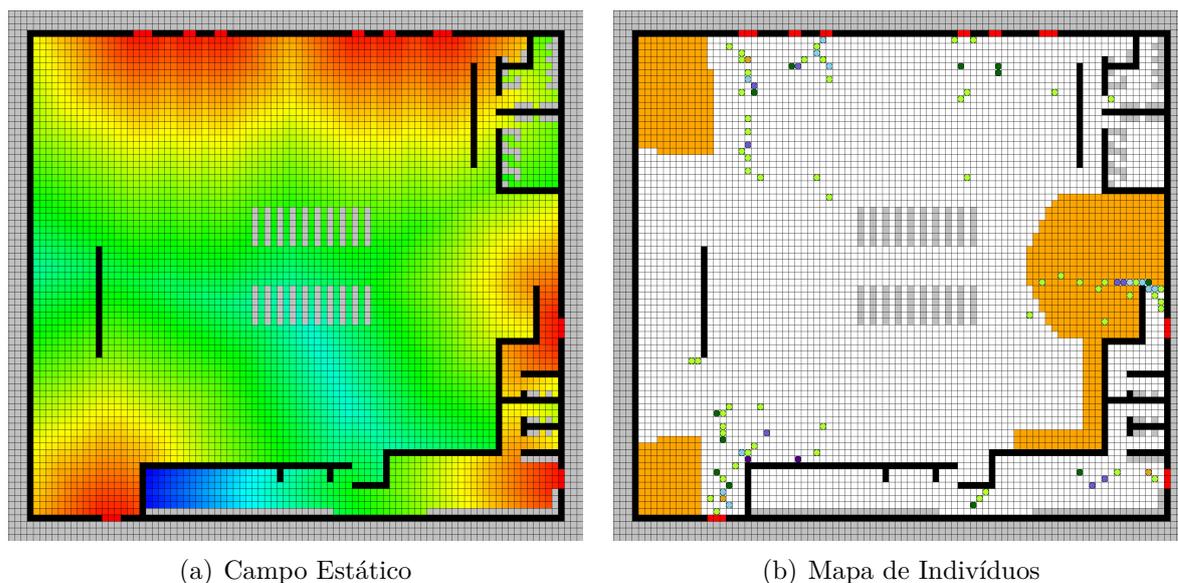


Figura 32 – Campo Estático do Centro em Ambiente de Culto e Mapa de Indivíduos

Na Tabela 12 são mostrados os resultados obtidos em 100 replicações da instância 'centro culto' considerando o tempo de execução (*runtime*), o número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de movimentos realizados por indivíduo e quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados. Neste experimento a variância do *runtime* ficou muito alta, assim como seu DP e CV, isto deve ter ocorrido por outros experimentos estarem rodando simultaneamente na mesma máquina. Em relação a quantidade de iterações gastas a variância é grande devido ao mapa ser grande e os indivíduos poderem estar dispostos de muitas maneiras diferentes, como esta quantidade variou bastante temos um DP e um CV alto. A média e mediana estão muito próximas e são boas considerando que o público em sua maioria é de meia idade. Somente em 2% dos resultados o tempo de espera foi 2 e mesmo assim possuímos um CV consideravelmente alto, dito isto o CV pode não ser uma boa medida para valores muito pequenos como o tempo de espera.

Tabela 12 – Resultados do Experimento do Centro em Ambiente de Culto

	Min	Média	Mediana	Max	Variância	DP	CV
<i>Runtime</i>	83.99	167.93	183.93	203.0	1358.53	36.86	21.95
Iterações	92.0	136.24	139.0	170.0	393.32	19.83	14.56
Movimentos	20.0	24.12	24.0	28.0	2.13	1.46	6.05
Espera	1.0	1.02	1.0	2.0	0.02	0.14	13.79

Na Figura 33 são mostrados os resultados em forma de *boxplot* obtidos em 100 replicações da instância ‘centro culto’ considerando o tempo de execução (*runtime*), o número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de movimentos realizados por indivíduo e o quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados. A grande variância do *runtime* que pode ser analisada na Tabela 12 é causada por todos os *outliers* que podem ser visto na parte (a) da Figura 33. As duas experimentações que a mediana de espera foi igual a dois também podem ser vista como *outliers* na parte (c) da Figura 33.

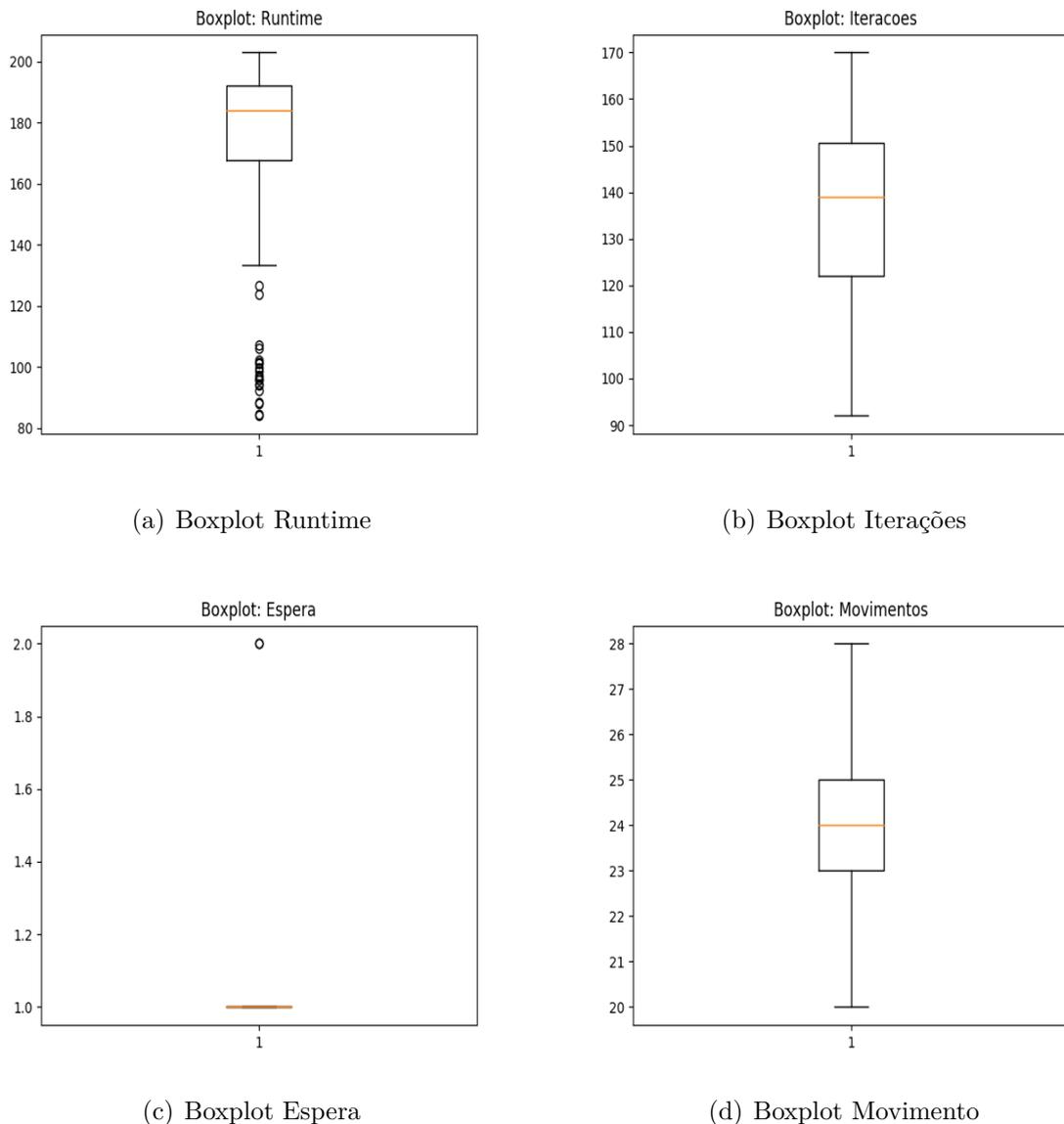
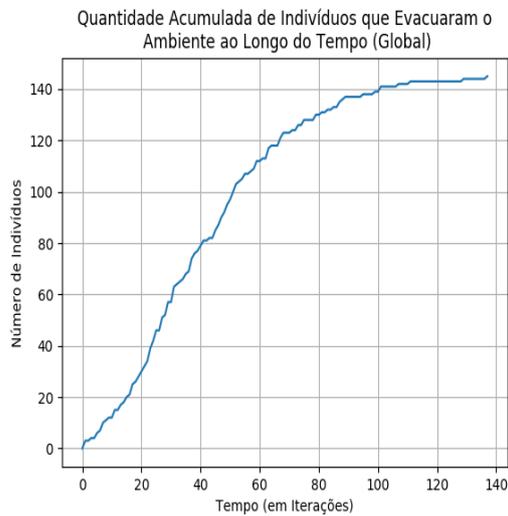


Figura 33 – Boxplots Resultados do Centro em Ambiente de Culto

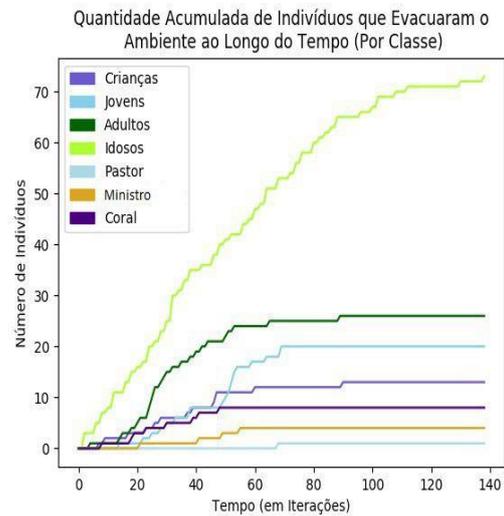
A experimentação 54 referente a Figura 34 foi escolhida devido ao fato dela ter uma quantidade próxima de iterações gastas que a mediana apresentada na Tabela 12. Como pode ser observado na parte (b) e (d) da figura, as classes Coral e Ministro foram as primeiras a serem evacuadas. Porém como essas classes estão muito bem caracterizadas e tem poucos indivíduos, resolvemos utilizar a classe dos Jovens que evacuou na iteração 68 para fazer a comparação com a classe mais lenta que é a dos Idosos que utilizaram 137 iterações. A classe dos Idosos gasta 101% de tempo a mais para evacuar do ambiente que os Jovens, isto é devido a quantidade de indivíduos ser maior e o deslocamento menor.

Na parte (a) da Figura 34 é possível notar dois pontos de estabilização da curva. O primeiro ponto é na iteração 68 onde anteriormente havia 5 classes ainda não evacuadas e duas delas terminaram de evacuar, já o segundo ponto é na iteração 89 onde as outras

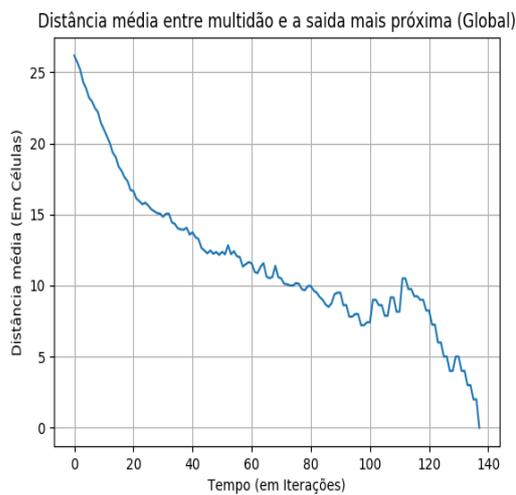
duas classes evacuaram e restaram somente os idosos na simulação. Na figura (d) não é tão perceptível o primeiro ponto de diferença na curva da iteração 68, porém está visível na iteração 89 um aumento brusco da distância global.



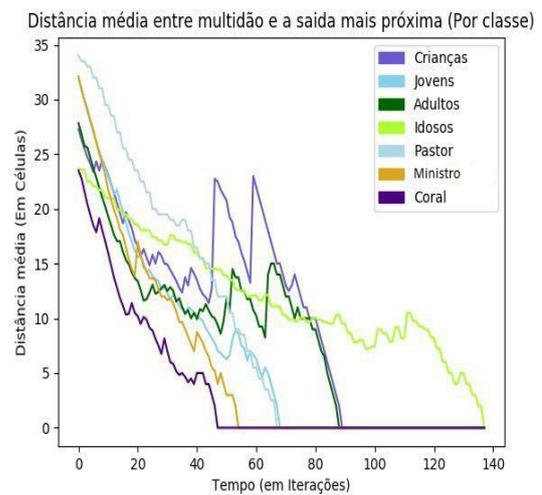
(a) Curva Cumulativa Geral



(b) Curva Cumulativa por Classe



(c) Distância Média Geral



(d) Distância Média por Classe

Figura 34 – Gráficos da Experimentação Número 54

As imagens da Figura 35 mostram o início da evacuação, a evacuação das classes melhor caracterizadas e o fim da evacuação onde sobrou somente os idosos. Foi feita uma estimativa grosseira de quantos indivíduos saem por iteração. Supondo que a curva acumulada de indivíduos que evacuaram o ambiente é linear, utilizou-se a fórmula $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ para obter essa aproximação. Até a iteração 68 a vazão encontrada é de 1,80 indivíduos, já da iteração 68 até a iteração 89 a vazão é de 0,42 indivíduos e da iteração 89 até fim da evacuação a vazão de indivíduos é de 0,16 indivíduos por iteração.

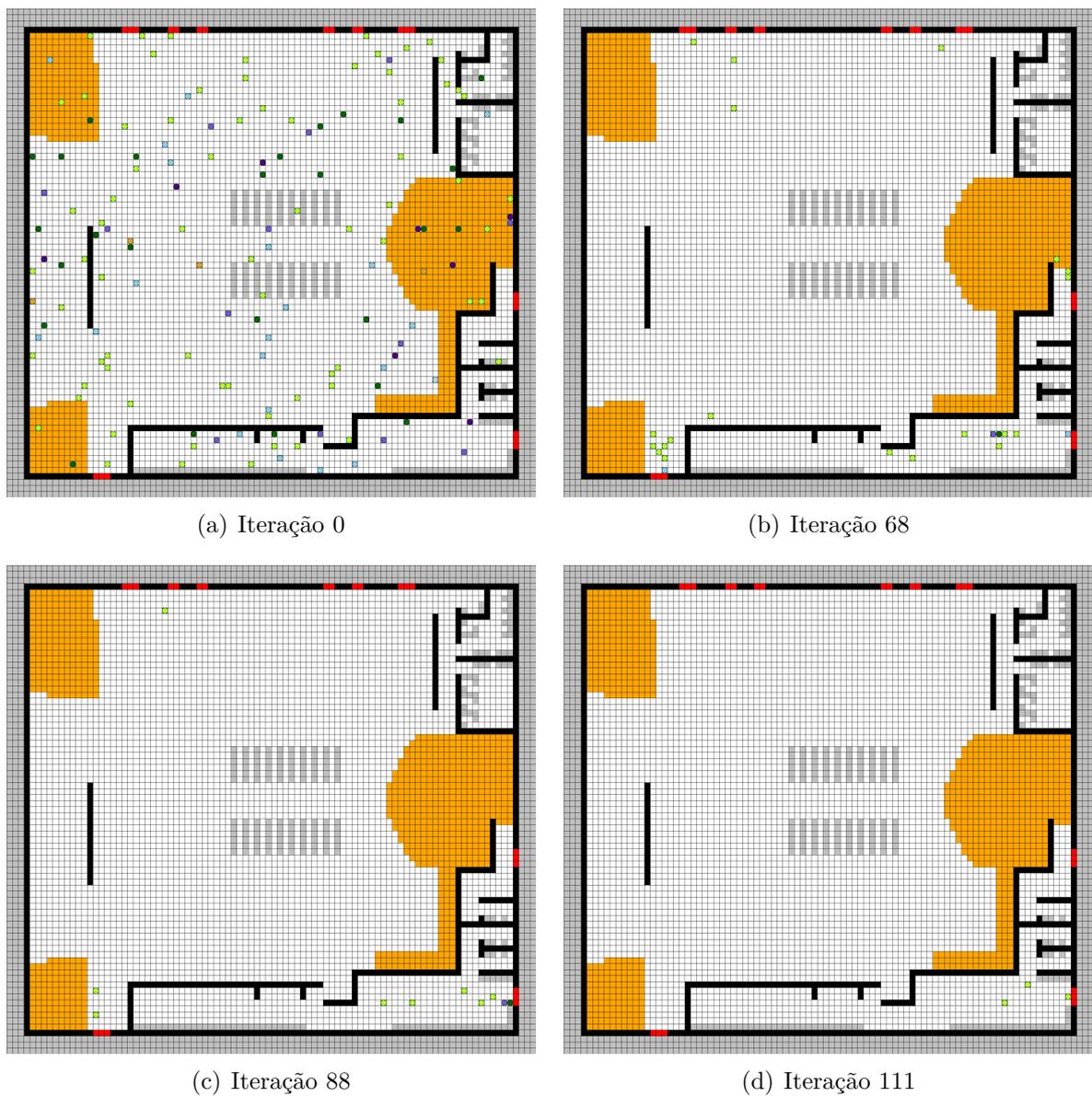


Figura 35 – Demonstração da Evacuação do Centro de Convivência em Culto ao Longo das Iterações da Simulação

6.4 Experimento: Centro de Convivência (Vargem Bonita/MG) Ambiente de Formatura

Há dois fatores que deixam esse experimento menos realístico: O primeiro é que como pode ser visto na Figura 36 (b) grande parte dos indivíduos seguiram para a saída atrás do palco o que não é usual, pois o conhecimento sobre a existência desta porta é incomum. O segundo é que considerando o cenário de pânico os indivíduos não conseguiriam passar por entre as mesas facilmente, como também é mostrado na parte (b) da Figura 36, isto devido a desordem das mesas e cadeiras que o ambiente estaria após determinado tempo da evacuação. Já o mapa estático da parte (a) mesmo com tantos obstáculos se

mantém uniforme.

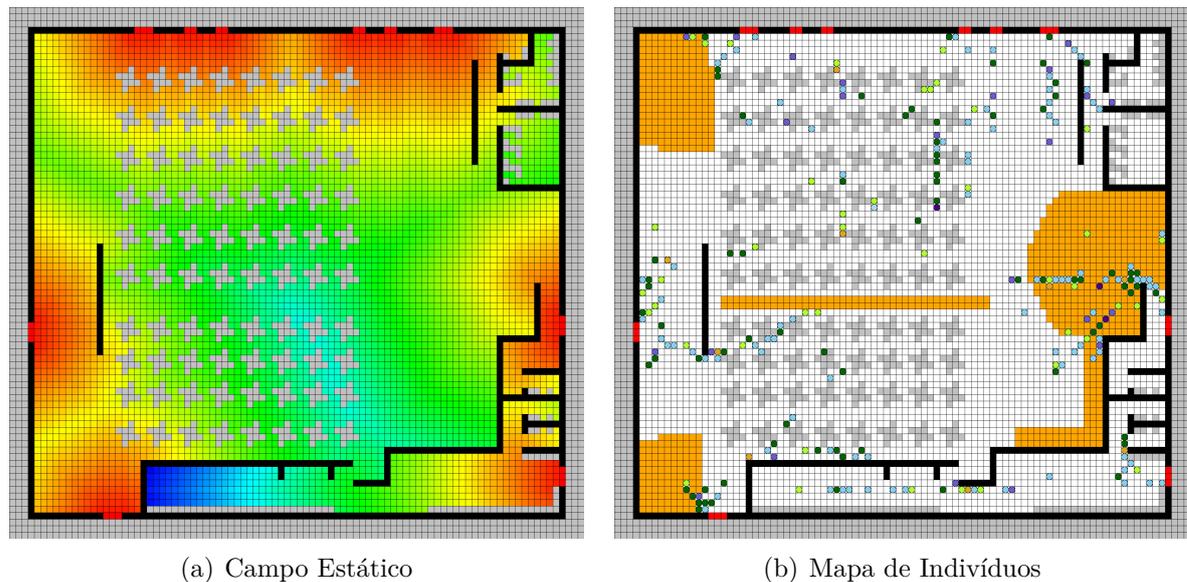


Figura 36 – Campo Estático do Centro em Ambiente de Formatura e Mapa de Indivíduos

Na Tabela 13 são mostrados os resultados obtidos em 100 replicações da instância 'centro formatura' considerando o tempo de execução (*runtime*), o número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de movimentos realizados por indivíduo e quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados. Pela tabela analisa-se que sendo a variância, o DP e CV da quantidade de iterações em espera iguais a zero, além de uma baixa variância na quantidade de movimentos gastos, deixa indícios que o ambiente foi bem projetado. Como o *runtime* novamente teve uma grande variância não se pode tirar muitas conclusões sobre ele.

Apesar da quantidade de indivíduos ser mais do que o dobro no ambiente de formatura comparado ao ambiente de culto e possuir muito mais obstáculos para obstrução do caminho, é possível de se notar pela Tabela 13 que a média e a mediana não variaram muito do experimento da Seção 6.3 apresentados na Tabela 12. Isto ocorreu devido ao adicionar da porta ao lado esquerdo como pode ser visto na Figura 36 (a).

Tabela 13 – Resultados do Experimento do Centro em Ambiente de Formatura

	Min	Média	Mediana	Max	Variância	DP	CV
<i>Runtime</i>	87.33	154.41	171.23	201.29	1298.9	36.04	23.34
Iterações	108.0	137.6	136.0	204.0	312.2	17.67	12.84
Movimentos	18.0	20.25	20.0	22.0	0.91	0.96	4.72
Espera	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0

Na Figura 37 são mostrados os resultados em forma de *boxplot* obtidos em 100 replicações da instância 'centro formatura' considerando o tempo de execução (*runtime*), o

número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de movimentos realizados por indivíduo e o quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados. Assim como esperado na parte (c) do *boxplot* temos somente uma linha já que todos os resultados foram iguais a um. Podemos ver na parte (d) da Figura 37 a quantidade de movimentos bem condensada devido sua baixa variância com a presença de somente um *outlier*.

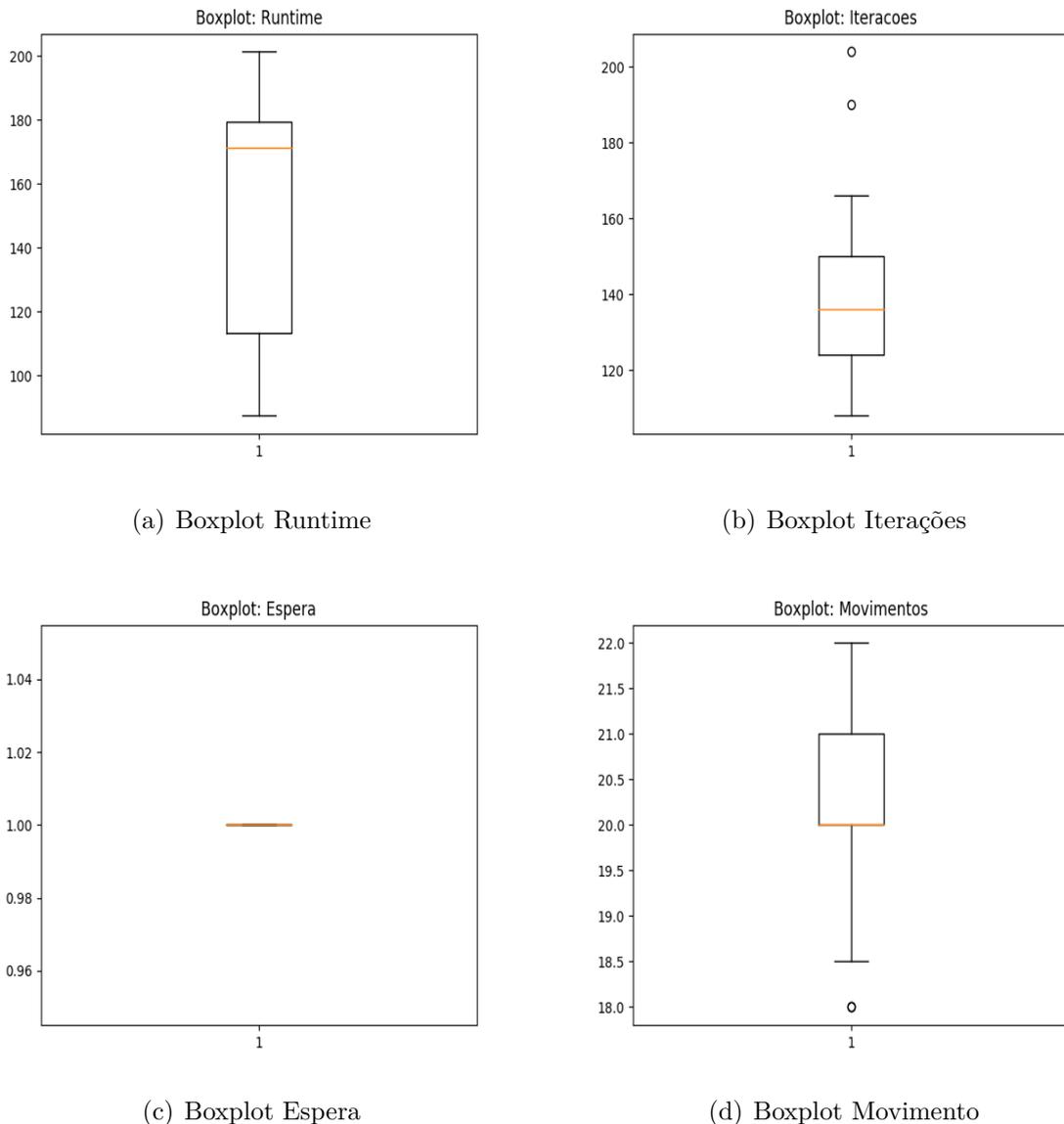


Figura 37 – Boxplots Resultados do Centro em Ambiente de Formatura

A experimentação 79 referente a Figura 38 foi escolhida devido ao fato dela ter a uma quantidade próxima de iterações gastas que a mediana apresentada na Tabela 13. Foi decidido que para calcular a diferença da classe mais rápida com a classe mais lenta não poderiam ser consideradas as classes Orador, Atendentes e Organização. Como pode ser visto na parte (b) e (d) da figura estas classes evacuam muito rápido devido

a baixa quantidade de indivíduos além do grande conhecimento sobre o local colocados na caracterização dessas classes. As classes Adultos, Jovens e Crianças evacuaram quase no mesmo momento, será considerada para o cálculo a classe dos Jovens que evacuou completamente na iteração 116 e a classe dos Idosos que evacuou na iteração 135. A classe Idosos gastou 16% a mais de tempo para evacuar comparado a classe Jovens. Na parte (a) da Figura 38 é possível notar o ponto de estabilização da curva na iteração 47, ele ocorreu devido a um gargalo formado na porta a direita atrás do palco. A parte (c) da figura reforça esta percepção mostrando que a média até as saídas aumentaram.

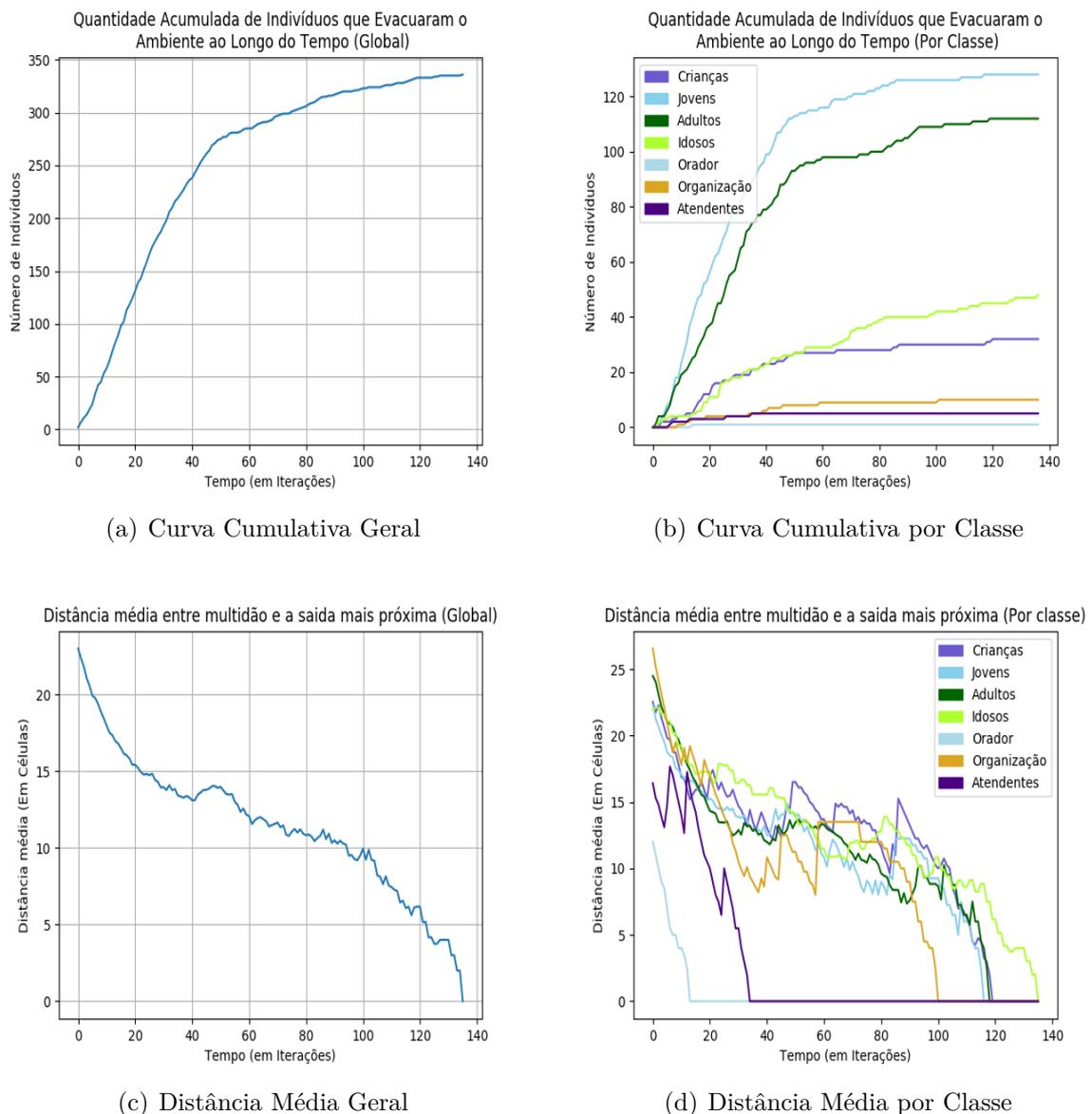


Figura 38 – Gráficos da Experimentação Número 79

As imagens da Figura 39 mostram o início da evacuação, o início da formação do gargalo na saída a direita e o fim da evacuação. Foi feita uma estimativa grosseira de quantos indivíduos saem por iteração. Supondo que a curva acumulada de indivíduos

que evacuaram o ambiente é linear, utilizou-se a fórmula $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ para obter essa aproximação. Até a iteração 47 a vazão encontrada é de 5,72 indivíduos, já da iteração 48 até fim da evacuação a vazão de indivíduos é de 0,77 indivíduos por iteração.

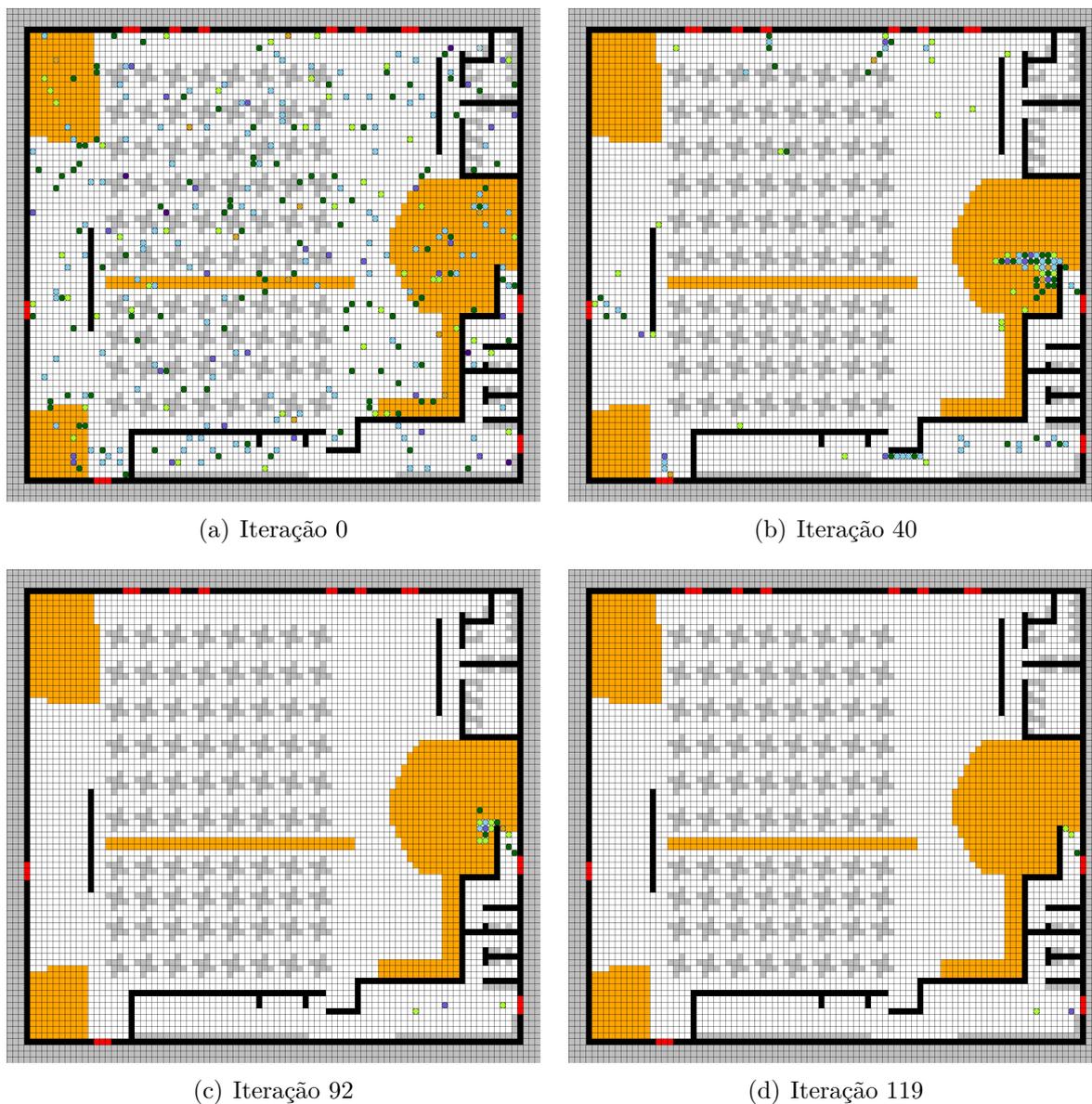


Figura 39 – Demonstração da Evacuação do Centro de Convivência em Formatura ao Longo das Iterações da Simulação

6.5 Experimento: Cinema Hipotético

Como pode ser visto na Figura 40 (a) a sala de transmissão onde que a maior parte dos indivíduos estarão concentrados é o local mais distante das portas. A parte (b) da Figura mostra dois gargalos na planta, um no início do corredor que os indivíduos precisam dar a volta para conseguir evacuar e outro nas próprias saídas.

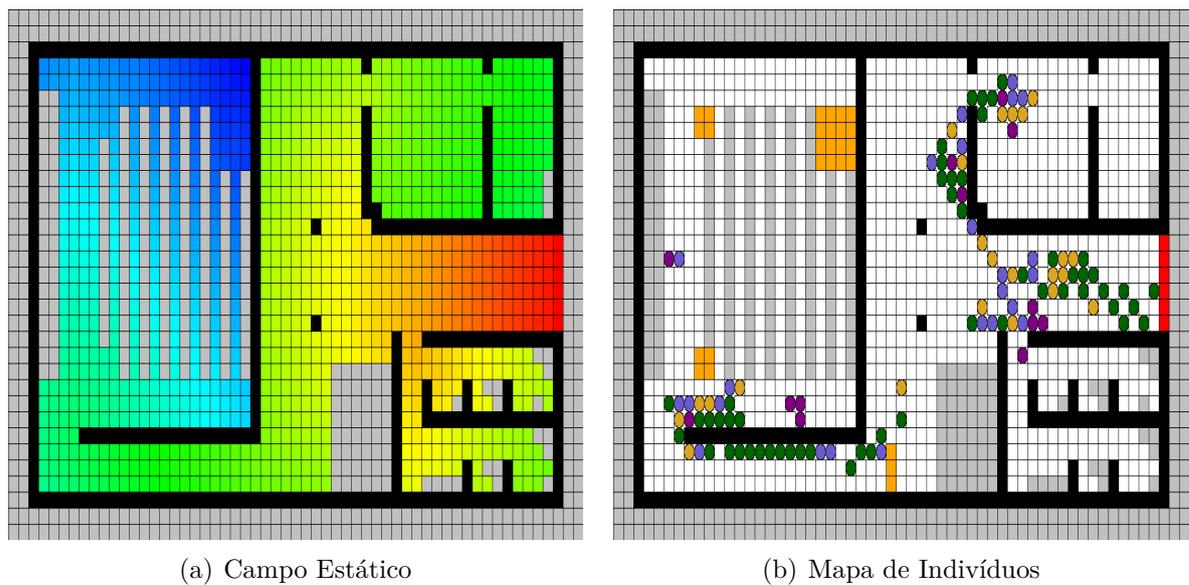


Figura 40 – Campo Estático do Cinema e Mapa de Indivíduos

Na Tabela 14 são mostrados os resultados obtidos em 100 replicações da instância ‘cinema’ considerando o tempo de execução (*runtime*), o número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de movimentos realizados por indivíduo e quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados. Neste experimento o *runtime* teve uma baixa variância DP e CV, onde a variância reflete somente a diferença da quantidade de iterações gastas entre as experimentações, a quantidade de iterações gastas com uma grande variância e muita diferença entre o mínimo e máximo.

Além dos indicativos visuais já mostrados podemos analisar através da Tabela 14 que apesar deste ambiente ser duas vezes menor e possuir duas vezes menos indivíduos do que o ambiente da seção 6.4 ele possui uma média de iterações gasta para evacuar o ambiente maior que o dobro do experimento anterior. Além disso o tempo de espera é maior do que todos os outros ambientes experimentados.

Tabela 14 – Resultados do Experimento do Cinema

	Min	Média	Mediana	Max	Variância	DP	CV
<i>Runtime</i>	26.97	46.28	47.42	59.03	33.55	5.79	12.52
Iterações	273.0	330.81	331.5	393.0	696.01	26.38	7.97
Movimentos	31.0	36.04	36.0	42.5	5.86	2.42	6.72
Espera	2.5	3.34	3.0	4.0	0.21	0.46	13.8

Na Figura 41 são mostrados os resultados em forma de *boxplot* obtidos em 100 replicações da instância ‘cinema’ considerando o tempo de execução (*runtime*), o número de iterações necessárias para evacuar completamente o ambiente, o número médio de

movimentos realizados por indivíduo e o quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados.

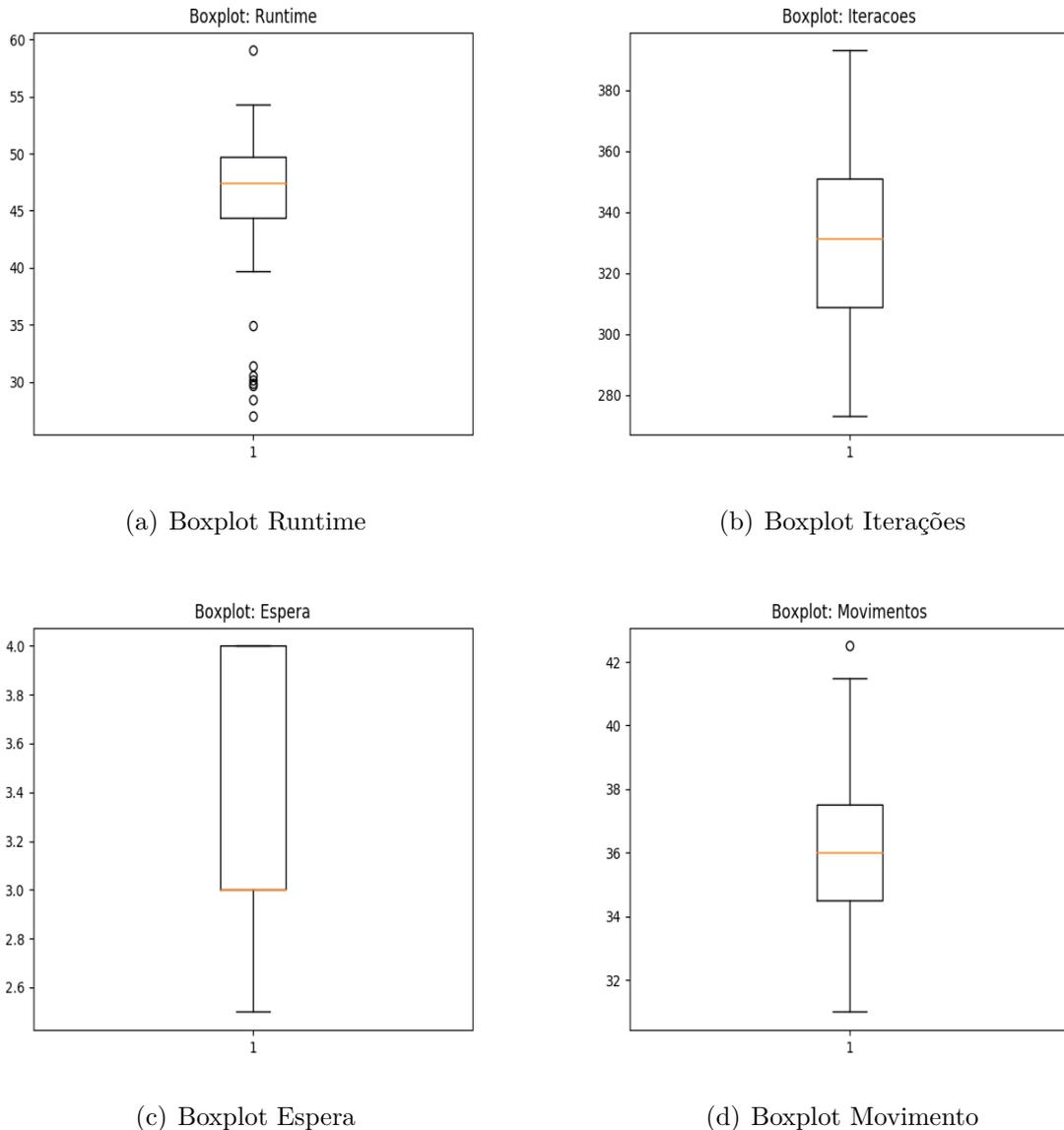


Figura 41 – Boxplots Resultados do Cinema

A experimentação 33 referente a Figura 42 foi escolhida devido ao fato dela ter uma quantidade próxima de iterações gastas que a mediana apresentada na Tabela 14. Como pode ser visto na parte (d) e (b) da Figura, a primeira classe a evacuar do ambiente foi Adultos e a última foi Idosos. A classe Idosos evacuou 56% mais lenta que a classe dos Adultos, que foi a mais rápida nesta experimentação. Na parte (a) da Figura pode ser visto uma estabilização da curva de evacuação na iteração 193, isto ocorreu devido ao restante dos indivíduos no ambiente terem ficado distantes das saídas. A parte (c) da Figura reforça isso mostrando um leve aumento da distância média da multidão e a saída mais próxima.

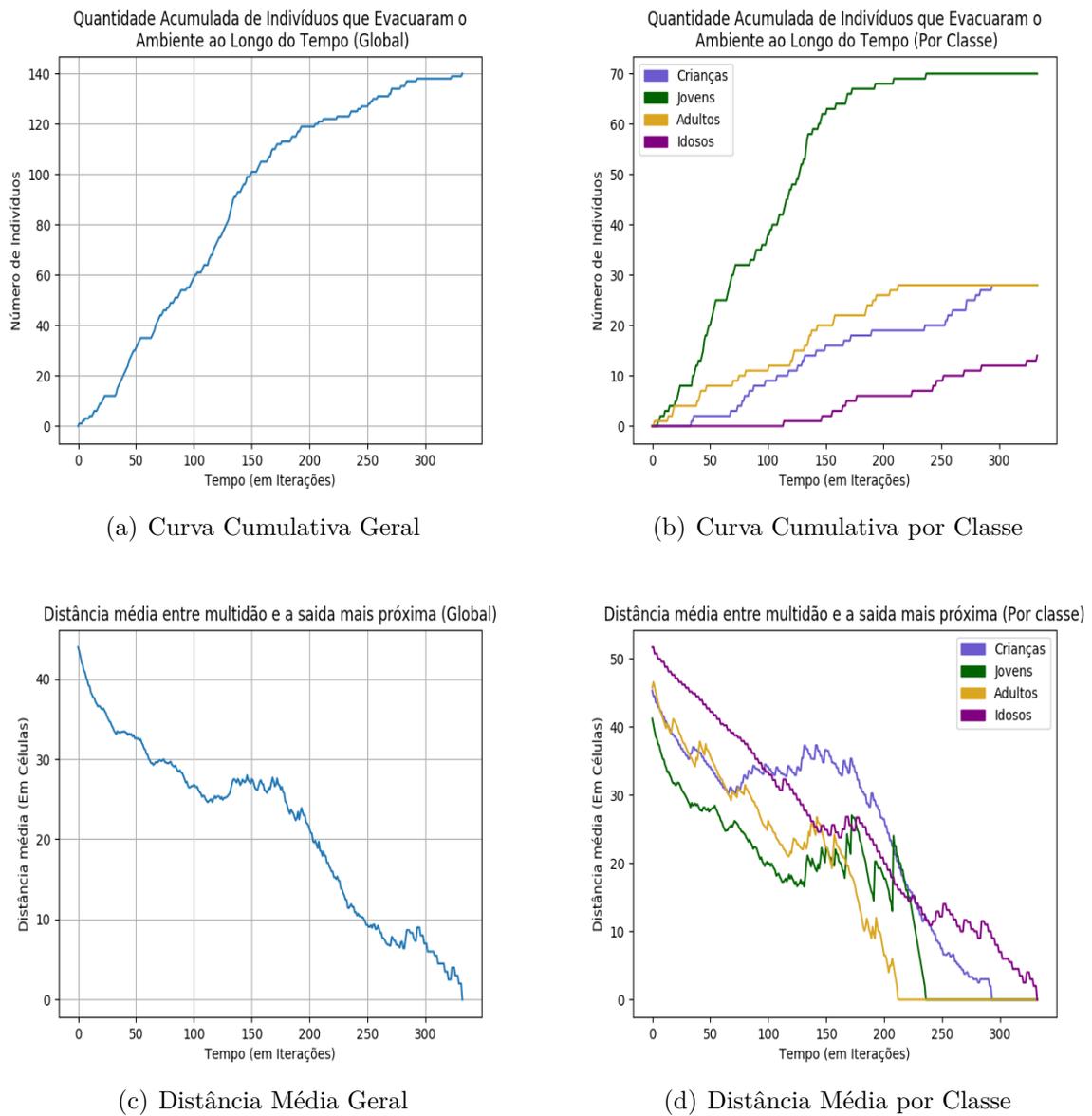
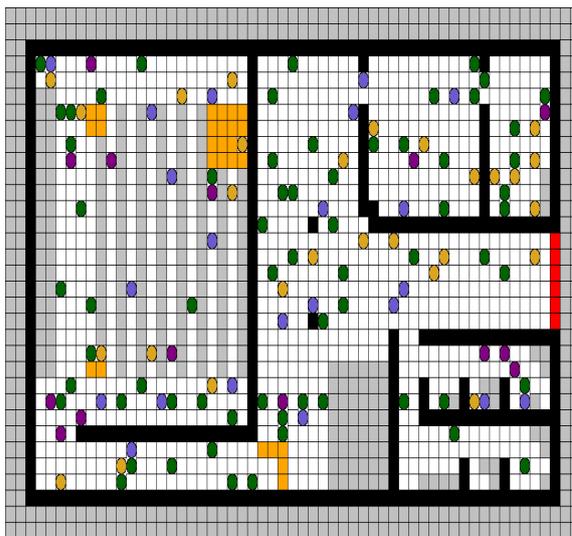
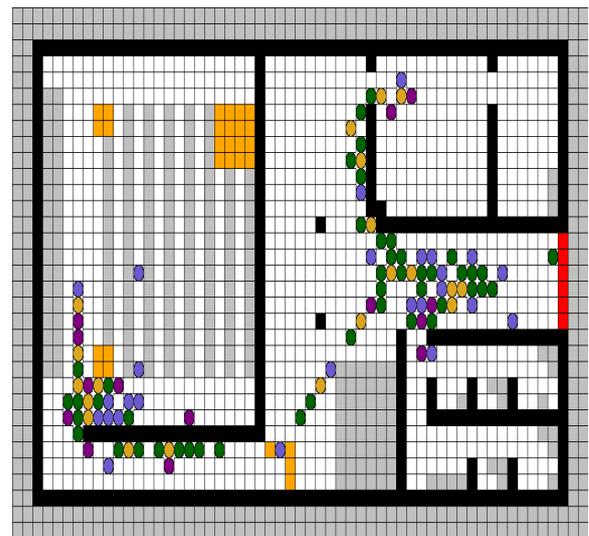


Figura 42 – Gráficos da Experimentação Número 33

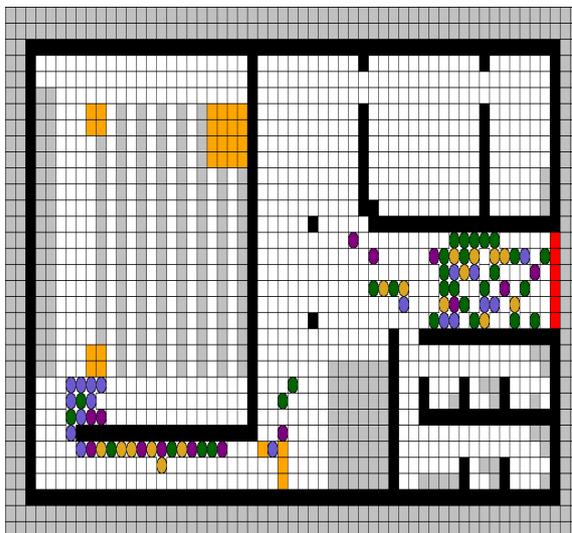
As imagens da Figura 43 mostram o início da evacuação, o início gargalo ocorrido, a formação de uma fila e o fim da evacuação. Foi feita uma estimativa grosseira de quantos indivíduos saem por iteração. Supondo que a curva acumulada de indivíduos que evacuaram o ambiente é linear utilizou-se a fórmula $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ para obter essa aproximação. A estimacão feita nos mostra que até a iteração 193 a taxa de vazão de indivíduos é de 0,61 indivíduos por iteração, após isto esta taxa decaiu para 0,15 indivíduos por iteração.



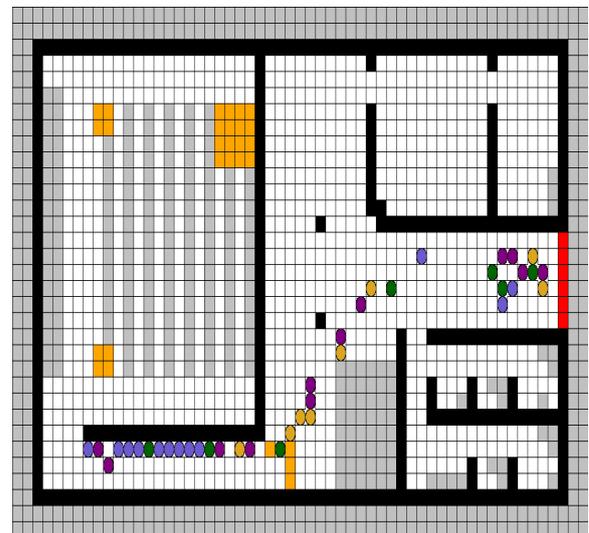
(a) Iteração 0



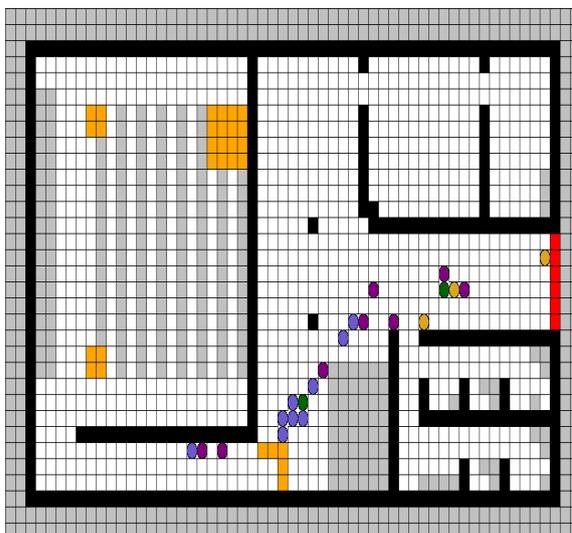
(b) Iteração 54



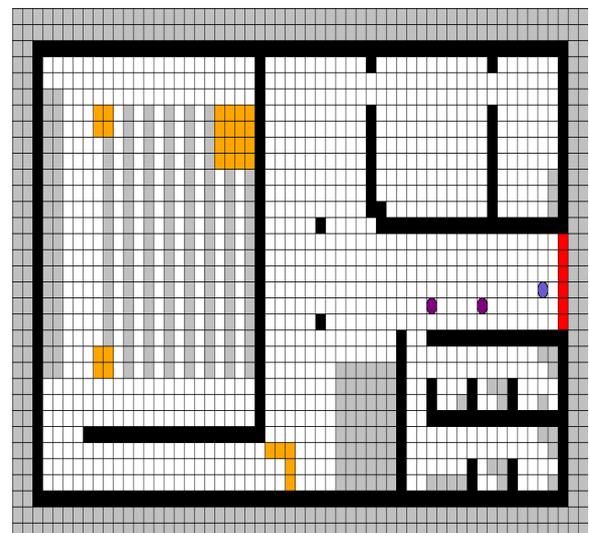
(c) Iteração 108



(d) Iteração 151



(e) Iteração 193



(f) Iteração 286

Figura 43 – Demonstração da Evacuação do Cinema ao Longo das Iterações da Simulação

6.6 Experimento da Literatura: (NISHINARI et al., 2004)

Pode ser visto na Figura 44 o campo estático do experimento do (NISHINARI et al., 2004). Como há somente dois obstáculos o campo acaba ficando uniforme no geral.

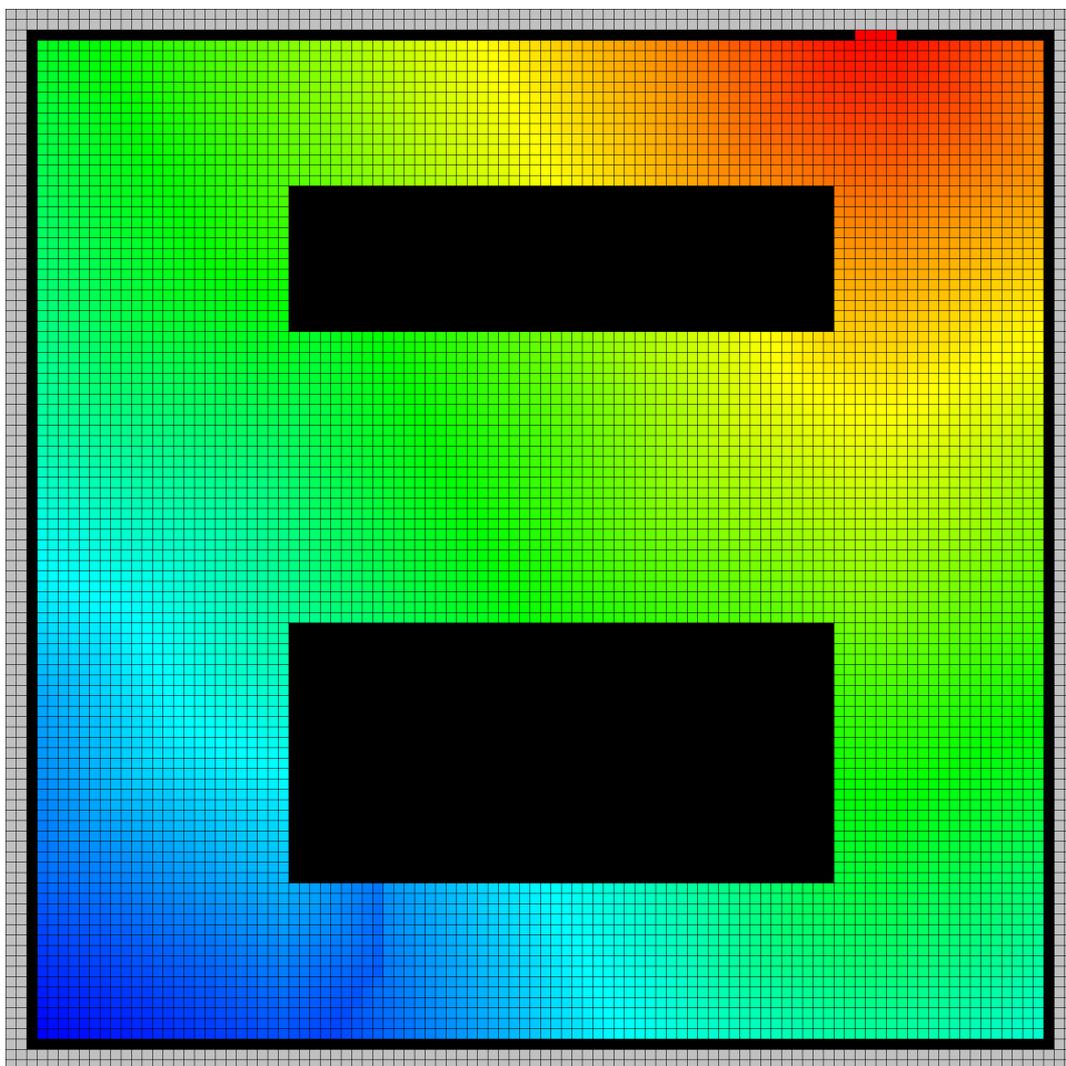


Figura 44 – Campo Estático do Experimento do Nishinari

O cenário onde o KW é igual a 0.5 não é mostrado nas análises a seguir devido uma grande diferença dos resultados em comparação com os outros experimentos, onde 25% dos resultados da quantidade de iterações gastas para evacuar o ambiente eram iguais a 1200 que foi o limite máximo imposto para evacuação. Mesmo quando excluía-se estes resultados considerados *outliers* da análise a média ainda era de 724.37 e o desvio padrão 245.33. Decidiu-se então por desconsiderar este cenário devido a sua disparidade dos resultados com os outros experimentos.

Na Figura 45 são mostrados os resultados das iterações necessárias para evacuar o ambiente em forma de *boxplot* obtidos em 100 replicações da instância ‘Nishinari’ para cada KW diferente experimentado. Pode ser analisado que os resultados não variam tanto

entre si e ficam em torno de 300 iterações gastas. Nota-se também que, quanto mais se aumenta o KW, maior a tendência a se obter *outliers* devido aos indivíduos ficarem perdidos da multidão e não conseguirem evacuar.

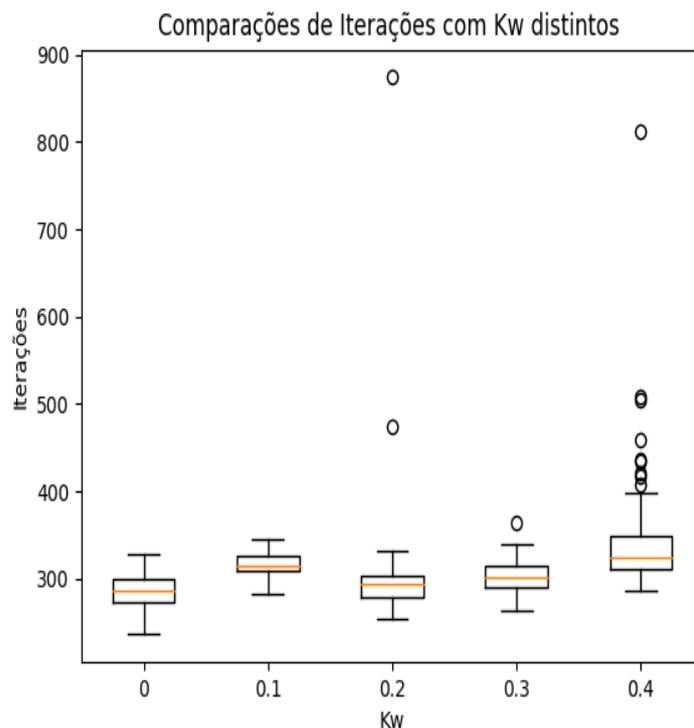


Figura 45 – Boxplot da Quantidade de Iterações Gastas para Evacuar o Ambiente do Experimento do Nishinari para Cada KW Experimentado

Na Figura 46 são mostrados os resultados do número médio de movimentos realizados por indivíduo e quantas iterações, em média, cada indivíduo ficou em espera/com movimentos bloqueados, em forma de *boxplot* obtidos em 100 replicações da instância ‘Nishinari’ para cada KW diferente experimentado. Analisando a parte (a) da Figura nota-se que quando KW é igual a 0.1 temos mais formações de gargalos pois a média é mais alta quando comparado aos outros cenários. Já a média de movimentos apresentadas na parte (b) da Figura teve uma certa variação ao se modificar o parâmetro mas não é algo tão significativo assim.

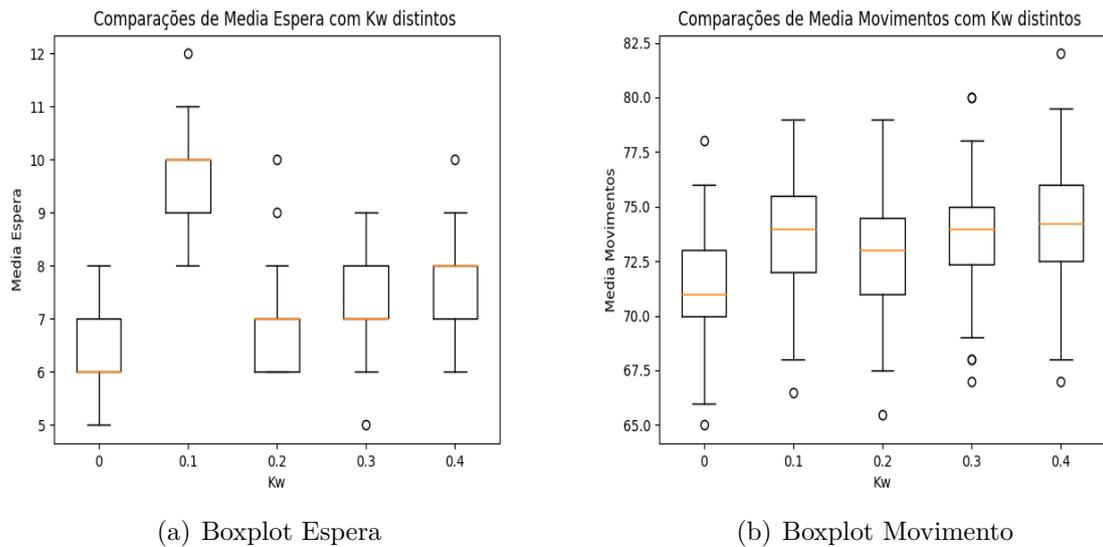
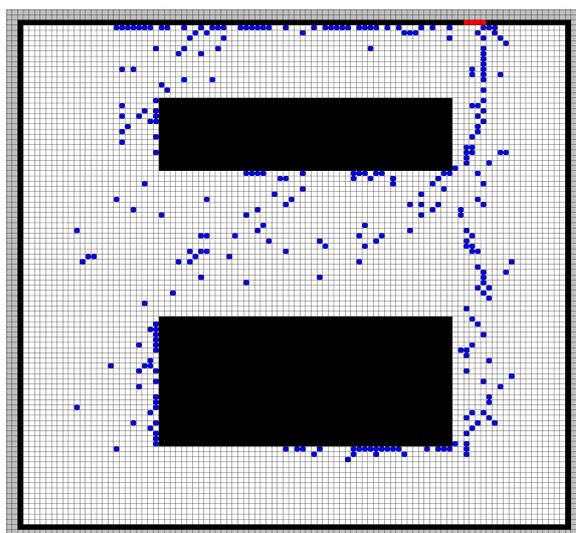


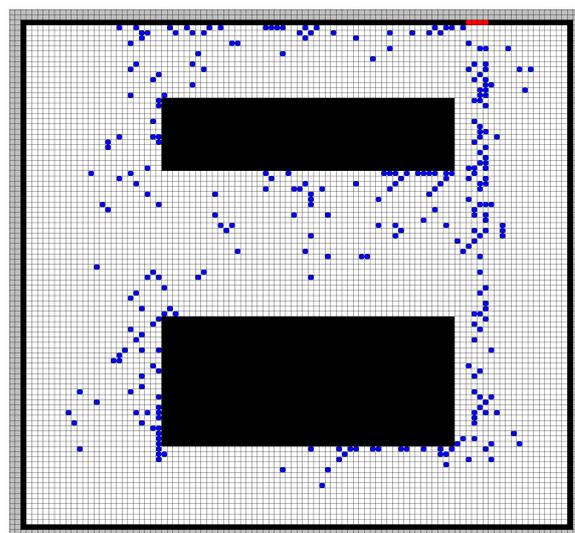
Figura 46 – Boxplots Média de Espera e Movimentos do Experimento do Nishinari

Foi escolhido para representar o potencial de paredes a iteração de número 17 para cada experimento apresentado na Figura 47. Serão comparadas 3 partes principais das figuras que são: as duas partes a esquerda dos obstáculos posicionados no meio do mapa e a parede superior onde se encontram as portas.

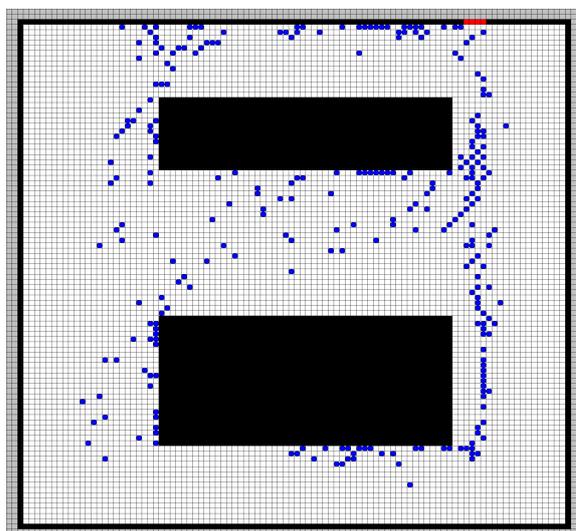
Na parte (a) da Figura nota-se que os indivíduos estão encostados em sua maioria na parede superior e em sua maioria eles mantém-se de 2 a 3 pixels de distância dos obstáculos. Na parte (b) é possível de ser visto que os indivíduos já começam a se afastar da parede superior e a distância média passa a ser 3 pixels dos obstáculos. Já na parte (c) e (d) os indivíduos mantém-se a praticamente a mesma distância da parede superior devido ao campo estático fazer mais força, todavia eles começaram a se distanciar dos obstáculos estando agora de 4 a 5 pixels de distância de cada um deles. Na parte (e) da figura podemos ver claramente os indivíduos ficando mais distantes da parede superior e mantendo uma distância similar aos obstáculos no meio do mapa.



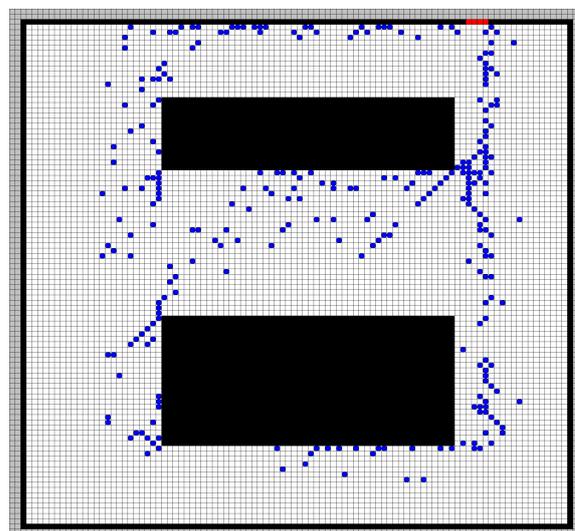
(a) $KW = 0$



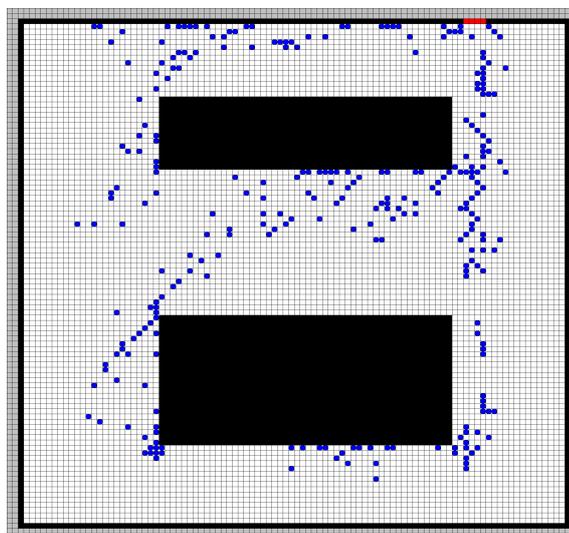
(b) $KW = 0.1$



(c) $KW = 0.2$



(d) $KW = 0.3$



(e) $KW = 0.4$

Figura 47 – Demonstração do Fator KW na Evacuação

7 Considerações finais

O desenvolvimento do presente trabalho mostrou o estudo de autômatos celulares e outros métodos para a evacuação de ambientes com quantidade massiva de pedestres. Foi feita a modelagem de 5 ambientes reais ou hipotéticos e um presente na literatura. No desenvolvimento foi produzido um conversor de mapas para que fosse simplificada a modelagem dos ambientes. Por fim feito as análises de cada experimento.

Pôde ser visto que as plantas que obtiveram os melhores resultados foram aquelas com as maiores quantidades de portas. Mesmo se os indivíduos destes ambientes estivessem com o deslocamento baixo ou uma má caracterização, a quantidade de portas distribuía bem os indivíduos de forma que não havia formação de gargalos e a evacuação era feita de forma mais eficiente.

A utilização de autômatos celulares na evacuação de multidões aparenta ser uma boa técnica. Isto devido a sua curva de aprendizado ser menor que os outros métodos citados, ter boa parte dos pesquisadores utilizando este método e possuir um custo computacional razoável são bons indícios que o método é robusto.

8 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se:

- O adicionar de objetos inocupáveis, porém que podem ser movidos pelos pedestres, desta forma as cadeiras e mesas do cenário de formatura e culto atrapalhariam mais a evacuação.
- A caracterização de indivíduos de forma mais realística que poderia ser feita com uma experimentação em massa.
- Adaptar o conversor de mapas para aceitar também plantas feitas no AutoCAD, que é um software mais utilizado no meio acadêmico para representar plantas baixas.
- Melhorar a forma de posicionar os indivíduos iniciais, ao invés de posicioná-los de forma uniforme, utilizar um conceito de áreas de preferência. No ambiente da igreja por exemplo, os fiéis seriam posicionados perto dos bancos, o padre perto do altar. No ambiente da escola, os alunos ficariam em sua maioria dentro das salas de aula assim como professores, enquanto os secretários estariam em suas respectivas salas. Já no ambiente de formatura, os convidados estariam perto das mesas, o orador e organização no palco ou perto dele e os atendentes no bar.
- Adaptar a fórmula de mudança de cada indivíduo para ter um viés maior para células inocupadas, para dissipar um pouco a efetividade do campo dinâmico e tornar o modelo mais realista.
- Colocar para cada saída um incremento diferente a ser considerado no campo estático, pois como as saídas são tratadas de forma igual, certas classes podem utilizar saídas que não seriam usadas em uma situação comum.
- Rever a caracterização do campo estático para situações onde a visibilidade é turva ou comprometida por escuridão, como é o caso do cinema.

Referências

- ALMEIDA et al. Crowd simulation modeling applied to emergency and evacuation simulations using multi-agent systems. *arXiv preprint arXiv:1303.4692*, 2013. Citado na página 20.
- ALTSHULER, E. et al. Symmetry breaking in escaping ants. *The American Naturalist*, The University of Chicago Press, v. 166, n. 6, p. 643–649, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 93.
- BANDINI, S. et al. Towards a methodology for situated cellular agent based crowd simulations. In: SPRINGER. *International Workshop on Engineering Societies in the Agents World*. [S.l.], 2005. p. 203–220. Citado na página 92.
- BAR-YAM, Y. General features of complex systems. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK, v. 1, 2002. Citado na página 29.
- BELLOMO et al. Modeling crowd dynamics from a complex system viewpoint. *Mathematical models and methods in applied sciences*, World Scientific, v. 22, n. supp02, p. 1230004, 2012. Citado na página 30.
- BRAUN, A.; BODMANN, B. E.; MUSSE, S. R. Simulating virtual crowds in emergency situations. In: ACM. *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*. [S.l.], 2005. p. 244–252. Citado na página 92.
- BURSTEDDE, C. et al. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 295, n. 3-4, p. 507–525, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 31.
- CARNEIRO, L. d. O. Simulação de evacuação de multidão por autômato celular estudo de caso em um estádio de futebol, 2012, 73 p. *Mestrado–Universidade Federal do Ceará*). Disponível em < <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/18459> > Acesso em, v. 21, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 9, 16, 19, 22, 23 e 24.
- CHERIF, N. D. F. A framework to simulate the evacuation of a crowd in emergency situations. *Georg Electron Sci J*, v. 1, n. 1, p. 2006, 2006. Citado na página 21.
- COLOMBO, R. M.; ROSINI, M. D. Pedestrian flows and non-classical shocks. *Mathematical methods in the applied sciences*, Wiley Online Library, v. 28, n. 13, p. 1553–1567, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 91.
- CUNHA, M. Ciência e tecnologia em prevenção em incêndios e perícia análise do comportamento individual e coletivo em situações de pânico analysis of the behavior individually and collectively in panic situations. *Ignis: Revista Técnico Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina*, Vol. 1 n. 2, p. 109–119, 11 2016. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 26.
- DAOLIANG, Z.; LIZHONG, Y.; JIAN, L. Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 363, n. 2, p. 501–511, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.

- DICIONARIO infopédia da Língua Portuguesa. 2019. <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/evacuacao>. Acessado em 11/09/2019. Citado na página 18.
- FUKAMACHI, M.; NAGATANI, T. Sidle effect on pedestrian counter flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 377, n. 1, p. 269–278, 2007. Citado na página 89.
- GEORGOUDAS, I. G.; SIRAKOULIS, G. C.; ANDREADIS, I. T. A simulation tool for modelling pedestrian dynamics during evacuation of large areas. In: SPRINGER. *IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations*. [S.l.], 2006. p. 618–626. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- GUO, R.; HUANG, H.-J. A mobile lattice gas model for simulating pedestrian evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 387, n. 2-3, p. 580–586, 2008. Citado na página 90.
- HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 407, n. 6803, p. 487, 2000. Citado na página 90.
- HELBING, D. et al. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and evacuation dynamics*, Springer, Berlin, v. 21, n. 2, p. 21–58, 2002. Citado na página 21.
- HELBING, D. et al. Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics. *Physical review E*, APS, v. 67, n. 6, p. 067101, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 89.
- HELBING, D.; MOLNAR, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, APS, v. 51, n. 5, p. 4282, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 90.
- HENDERSON, L. The statistics of crowd fluids. *nature*, Springer, v. 229, n. 5284, p. 381–383, 1971. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 30.
- HENEIN, C. M.; WHITE, T. Information in crowds: The swarm information model. In: SPRINGER. *International Conference on Cellular Automata*. [S.l.], 2006. p. 703–706. Citado na página 92.
- HOU, L. et al. A social force evacuation model with the leadership effect. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 400, p. 93–99, 2014. Citado na página 31.
- HUGHES, R. The flow of large crowds of pedestrians. *Mathematics and Computers in Simulation*, Elsevier, v. 53, n. 4-6, p. 367–370, 2000. Citado na página 21.
- HUGHES, R. L. A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 36, n. 6, p. 507–535, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 22, 30 e 91.
- HUGHES, R. L. The flow of human crowds. *Annual review of fluid mechanics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 35, n. 1, p. 169–182, 2003. Citado na página 91.

- ISOBE, M.; HELBING, D.; NAGATANI, T. Experiment, theory, and simulation of the evacuation of a room without visibility. *Physical Review E*, APS, v. 69, n. 6, p. 066132, 2004. Citado na página 89.
- ITOH, T.; NAGATANI, T. Optimal admission time for shifting the audience. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 313, n. 3-4, p. 695–708, 2002. Citado 4 vezes nas páginas 9, 18, 19 e 89.
- JIAN, L.; LIZHONG, Y.; DAOLIANG, Z. Simulation of bi-direction pedestrian movement in corridor. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 354, p. 619–628, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- KIRCHNER, A. et al. Simulation of competitive egress behavior: comparison with aircraft evacuation data. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 324, n. 3-4, p. 689–697, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- KIRCHNER, A.; NISHINARI, K.; SCHADSCHNEIDER, A. Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, APS, v. 67, n. 5, p. 056122, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- KIRCHNER, A.; SCHADSCHNEIDER, A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, Elsevier, v. 312, n. 1-2, p. 260–276, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 30, 88 e 94.
- KLUEPFEL, H. L. *A cellular automaton model for crowd movement and egress simulation*. Tese (Doutorado), 2012. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.
- LI-JUN, J.; JIN-CHANG, C.; WEI-JIE, Z. A crowd evacuation simulation model based on 2.5-dimension cellular automaton. In: IEEE. *2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems*. [S.l.], 2009. p. 90–95. Citado na página 30.
- LIAO, W. et al. Layout effects of multi-exit ticket-inspectors on pedestrian evacuation. *Safety science*, Elsevier, v. 70, p. 1–8, 2014. Citado na página 31.
- LIN, Q.; JI, Q.; GONG, S. A crowd evacuation system in emergency situation based on dynamics model. In: SPRINGER. *International Conference on Virtual Systems and Multimedia*. [S.l.], 2006. p. 269–280. Citado na página 90.
- LO, S. M. et al. A game theory based exit selection model for evacuation. *Fire Safety Journal*, Elsevier, v. 41, n. 5, p. 364–369, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 87.
- MACHADO, A. F. V. *Agentes Inteligentes*. 2014. <<https://slideplayer.com.br/slide/337758/>>. Acessado em 22/10/2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 21.
- MURAKAMI, Y. et al. Multi-agent simulation for crisis management. In: IEEE. *Proceedings. IEEE Workshop on Knowledge Media Networking*. [S.l.], 2002. p. 135–139. Citado na página 21.
- NAGAI, R.; FUKAMACHI, M.; NAGATANI, T. Experiment and simulation for counterflow of people going on all fours. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 358, n. 2-4, p. 516–528, 2005. Citado na página 89.

- NAGAI, R.; FUKAMACHI, M.; NAGATANI, T. Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 367, p. 449–460, 2006. Citado na página 89.
- NAGAI, R. et al. Effect of exit configuration on evacuation of a room without visibility. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 343, p. 712–724, 2004. Citado na página 89.
- NISHINARI, K. et al. Extended floor field ca model for evacuation dynamics. *IEICE Transactions on information and systems*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 87, n. 3, p. 726–732, 2004. Citado 11 vezes nas páginas 9, 13, 14, 23, 24, 25, 26, 40, 47, 51 e 75.
- NISHINARI, K. et al. Modelling of self-driven particles: Foraging ants and pedestrians. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 372, n. 1, p. 132–141, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- PAN, X. et al. A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. *Ai & Society*, Springer, v. 22, n. 2, p. 113–132, 2007. Citado na página 20.
- PAN, X. et al. A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. *Ai & Society*, Springer, v. 22, n. 2, p. 113–132, 2007. Citado na página 92.
- PARISI, D. R.; DORSO, C. O. Microscopic dynamics of pedestrian evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 354, p. 606–618, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 90.
- PARISI, D. R.; DORSO, C. O. Morphological and dynamical aspects of the room evacuation process. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 385, n. 1, p. 343–355, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 9, 20 e 90.
- PELECHANO, N.; ALLBECK, J. M.; BADLER, N. I. Controlling individual agents in high-density crowd simulation. In: EUROGRAPHICS ASSOCIATION. *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*. [S.l.], 2007. p. 99–108. Citado na página 92.
- PEREZ, G. J. et al. Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 312, n. 3-4, p. 609–618, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- RAMADÃ, o que é? 2014. <<https://observador.pt/explicadores/o-que-e-o-ramadao/>>. Acessado em 05/09/2019. Citado na página 16.
- SALOMA, C. et al. Self-organized queuing and scale-free behavior in real escape panic. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 100, n. 21, p. 11947–11952, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 93.
- SARTOR, J.; BOICZUK, C. Tragédia boate kiss. *XVIII Jornada de Extensão*, 2017. Citado na página 16.
- SCHADSCHNEIDER, A. Cellular automaton approach to pedestrian dynamics-theory. *arXiv preprint cond-mat/0112117*, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

- SCHADSCHNEIDER, A. et al. Fundamentals of pedestrian and evacuation dynamics. In: *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*. [S.l.]: IGI Global, 2009. p. 124–154. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.
- SCHULTZ, M.; LEHMANN, S.; FRICKE, H. A discrete microscopic model for pedestrian dynamics to manage emergency situations in airport terminals. In: *Pedestrian and evacuation dynamics 2005*. [S.l.]: Springer, 2007. p. 369–375. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- SEYFRIED, A.; STEFFEN, B.; LIPPERT, T. Basics of modelling the pedestrian flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 368, n. 1, p. 232–238, 2006. Citado na página 90.
- SONG, W. et al. Simulation of evacuation processes using a multi-grid model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 363, n. 2, p. 492–500, 2006. Citado na página 89.
- SUGIMAN, T.; MISUMI, J. Development of a new evacuation method for emergencies: Control of collective behavior by emergent small groups. *Journal of Applied Psychology*, American Psychological Association, v. 73, n. 1, p. 3, 1988. Citado na página 21.
- TAJIMA et al. Scaling of pedestrian channel flow with a bottleneck. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 294, n. 1-2, p. 257–268, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 89.
- TAJIMA, Y.; NAGATANI, T. Scaling behavior of crowd flow outside a hall. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 292, n. 1-4, p. 545–554, 2001. Citado na página 89.
- TAJIMA, Y.; NAGATANI, T. Clogging transition of pedestrian flow in t-shaped channel. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 303, n. 1-2, p. 239–250, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 89.
- TAKIMOTO, K.; NAGATANI, T. Spatio-temporal distribution of escape time in evacuation process. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 320, p. 611–621, 2003. Citado na página 89.
- TISSERA et al. Evacuation simulations using cellular automata. *Journal of Computer Science and Technology*, v. 7, n. 01, p. 14–20, 2007. Citado na página 26.
- TOYAMA, M. C.; BAZZAN, A. L.; SILVA, R. D. An agent-based simulation of pedestrian dynamics: from lane formation to auditorium evacuation. In: ACM. *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. [S.l.], 2006. p. 108–110. Citado na página 92.
- UCHOA, P. *Nos EUA, incêndio fatal em boate levou a prisões e indenizações*. 2013. <https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2013/01/130127_incendio_boate_rhode_island_pu.shtml>. Acessado em 11/11/2019. Citado na página 16.
- VARAS, A. et al. Cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 382, n. 2, p. 631–642, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 23, 88 e 94.

- WEI-GUO, S. et al. Evacuation behaviors at exit in a model with force essentials: A comparison with social force model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 371, n. 2, p. 658–666, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 30, 88 e 94.
- WEIFENG, F.; LIZHONG, Y.; WEICHENG, F. Simulation of bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 321, n. 3-4, p. 633–640, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- WENG, W. et al. Cellular automaton simulation of pedestrian counter flow with different walk velocities. *Physical Review E*, APS, v. 74, n. 3, p. 036102, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of modern physics*, APS, v. 55, n. 3, p. 601, 1983. Citado na página 23.
- YAMAMOTO, K.; KOKUBO, S.; NISHINARI, K. Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (rca). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 379, n. 2, p. 654–660, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- YANG, L. et al. Occupant evacuation model based on cellular automata in fire. *Chinese Science Bulletin*, Springer, v. 47, n. 17, p. 1484, 2002. Citado na página 26.
- YANG, L. et al. Simulation of the kin behavior in building occupant evacuation based on cellular automaton. *Building and Environment*, Elsevier, v. 40, n. 3, p. 411–415, 2005. Citado 5 vezes nas páginas 24, 29, 30, 88 e 94.
- YU, Y.; SONG, W. Cellular automaton simulation of pedestrian counter flow considering the surrounding environment. *Physical Review E*, APS, v. 75, n. 4, p. 046112, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 94.
- YUAN, W.; TAN, K. H. An evacuation model using cellular automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 384, n. 2, p. 549–566, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 24, 88 e 94.
- ZARBOUTIS, N.; MARMARAS, N. Searching efficient plans for emergency rescue through simulation: the case of a metro fire. *Cognition, Technology & Work*, Springer, v. 6, n. 2, p. 117–126, 2004. Citado na página 92.
- ZHENG et al. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, Elsevier, v. 44, n. 3, p. 437–445, 2009. Citado 10 vezes nas páginas 11, 22, 30, 87, 88, 89, 90, 91, 92 e 93.
- ZHENG, M.; KASHIMORI, Y.; KAMBARA, T. A model describing collective behaviors of pedestrians with various personalities in danger situations. In: IEEE. *Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing, 2002. ICONIP'02*. [S.l.], 2002. v. 4, p. 2083–2087. Citado na página 90.
- ZHENG, Y. et al. Evacuation dynamics with fire spreading based on cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 390, n. 18-19, p. 3147–3156, 2011. Citado na página 26.

9 Anexos

Tabela 15 – Trabalhos relacionados sobre Teoria de Jogos, adaptado de (ZHENG et al., 2009)

Fonte	Abordagem	Indivíduos/ Grupos	Escala	Situações	Fenômenos
(LO et al., 2006)	Game Theory	Homogênea	Micro	Emergencial	Seleção de saída

Tabela 16 – Trabalhos relacionados sobre Autômatos Celulares, adaptado de (ZHENG et al., 2009)

Fonte	Abordagem	Indivíduos/ Grupos	Escala	Situação	Fenômenos Típicos
(YANG et al., 2005)	CA e SF	Homogênea	Micro	Emergencial	Comportamento de parentesco
(DAOLIANG; LIZHONG; JIAN, 2006)	CA	Homogênea	Micro	Emergencial	Arqueando
(PEREZ et al., 2002)	CA	Homogênea	Micro	Emergencial	Arqueando
(VARAS et al., 2007)	CA	Homogênea	Micro	Emergencial	Efeito de Obstáculos
(YU; SONG, 2007)	CA	Homogênea	Micro	Normal	Atolamento
(KIRCHNER; NISHINARI; SCHADSCHNEIDER, 2003)	CA	Homogênea	Micro	Emergencial	Efeitos de atrito, entupimento
(KIRCHNER et al., 2003)	CA	Homogênea	Micro	Emergencial	Comportamento de saída competitivo
(SCHULTZ; LEHMANN; FRICKE, 2007)	CA	Heterogênea	Micro	Emergencial	Efeitos de atrito, comportamento de repulsão, localização de caminhos
(WEIFENG; LIZHONG; WEICHENG, 2003)	CA	Homogênea	Micro	Normal	Atolamento, movimento bidirecional
(JIAN; LIZHONG; DAOLIANG, 2005)	CA	Homogênea	Micro	Normal	Degrau lateral, atraso
(NISHINARI et al., 2006)	CA	Homogênea	Micro	Emergencial	Comportamento de seguir
(GEORGODAS; SIRAKOULIS; ANDREADIS, 2006)	CA	Heterogênea	Micro	Emergencial	Entupimento e comportamento em massa
(KIRCHNER; SCHADSCHNEIDER, 2002)	CA	Homogênea	Micro	Emergencial	Comportamento de pastoreio
(WENG et al., 2006)	CA	Homogênea	Micro	Normal	Formação de linha, atolamento
(YUAN; TAN, 2007)	CA	Homogênea	Micro	Emergencial	Efeitos não aventureiros, inerciais e de grupo
(WEI-GUO et al., 2006)	CA e SF	Homogênea	Micro	Emergencial	Arqueando, entupindo, mais rápido é mais lento
(YAMAMOTO; KOKUBO; NISHINARI, 2007)	CA e LG	Homogênea	Micro	Normal	Entupimento
(MIRANDA, 2019)	CA	Heterogênea	Micro	Emergencial	Arqueando, enfileirando, mais rápido é mais lento

Tabela 17 – Trabalhos relacionados sobre *Lattice Gas*, adaptado de (ZHENG et al., 2009)

Fonte	Abordagem	Indivíduos/ Grupos	Escala	Situação	Fenômenos Típicos
(TAJIMA et al., 2001)	LG	Homogênea	Micro	Normal	Fluxo livre, fluxo de asfixia
(TAJIMA; NAGATANI, 2001)	LG	Homogênea	Micro	Normal	Fluxo livre, fluxo de asfixia
(TAJIMA; NAGATANI, 2002)	LG	Homogênea	Micro	Normal	Fluxo livre, fluxo de asfixia
(NAGAI; FUKAMACHI; NAGATANI, 2005)	LG	Homogênea	Micro	Emergencial	Contrafluxo de pessoas rastejando de quatro
(FUKAMACHI; NAGATANI, 2007)	LG	Homogênea	Micro	Normal/ Emergencial	Efeito lateral, contrafluxo
(ITO; NAGATANI, 2002)	LG	Homogênea	Micro	Normal	Atolamento
(TAKIMOTO; NAGATANI, 2003)	LG	Homogênea	Micro	Emergencial	-
(NAGAI; FUKAMACHI; NAGATANI, 2006)	LG	Homogênea	Micro	Emergencial	Andar e rastejar
(HELBING et al., 2003)	LG	Homogênea	Micro	Emergencial	Atolamento (enfileiramento)
(NAGAI et al., 2004)	LG	Homogênea	Micro	Emergencial	Comportamento de pessoas cegas
(ISOBE; HELBING; NAGATANI, 2004)	LG	Homogênea	Micro	Emergencial	Atolamento, comportamento de pastoreio
(SONG et al., 2006)	LG e SF	Homogênea	Micro	Emergencial	Arqueamento, entupimento

Tabela 18 – Trabalhos relacionados sobre Forças Sociais, adaptado de (ZHENG et al., 2009)

Fonte	Abordagem	Indivíduos/ Grupos	Escala	Situação	Fenômenos típicos
(HELBING; MOLNAR, 1995)	SF	Homogênea	Micro	Normal	Formação de faixa, mudança oscilatória
(HELBING; FARKAS; VICSEK, 2000)	SF	Homogênea	Micro	Emergencial	Entupimento, mais rápido é mais lento, comportamento em massa
(ZHENG; KASHIMORI; KAMBARA, 2002)	SF	Homogênea	Micro	Normal/ Emergencial	Impaciência da multidão
(SEYFRIED; STEFFEN; LIPPERT, 2006)	SF	Homogênea	Micro	Normal	-
(PARISI; DORSO, 2005)	SF	Homogênea	Micro	Emergencial	Mais rápido é mais lento, entupimento
(PARISI; DORSO, 2007)	SF	Homogênea	Micro	Emergencial	Mais rápido é mais lento
(LIN; JI; GONG, 2006)	SF e AB	Homogênea	Micro	Emergencial	Bloqueio, comportamento em massa
(GUO; HUANG, 2008)	SF e LG	Homogênea	Micro	Emergencial	Arqueamento, entupimento

Tabela 19 – Trabalhos relacionados sobre Fluidos Dinâmicos, adaptado de (ZHENG et al., 2009)

Fonte	Abordagem	Indivíduos/ Grupos	Escala	Situação	Fenômenos típicos
(HUGHES, 2002)	FD	Homogênea	Macro	Normal	Comportamento fluido
(HUGHES, 2003)	FD	Homogênea	Macro	Normal	Comportamento de "Pensar fluido"
(COLOMBO; ROSINI, 2005)	FD	Homogênea	Macro	Emergencial	Efeito de supercompressão

Tabela 20 – Trabalhos relacionados Baseado em Agentes, adaptado de (ZHENG et al., 2009)

Fonte	Abordagem	Indivíduos/ Grupos	Escala	SSFM	Situações	Fenômenos típicos
(ZARBOUTIS; MARMARAS, 2004)	AB	Heterogênea	Macro	Contínua	Emergencial	Comportamento baseado em regras
(BRAUN; BODMANN; MUSSE, 2005)	AB e SF	Heterogênea	Macro	Contínua	Emergencial	Comportamento de decisão, comportamento de escape, comportamento de risco
(PELECHANO; ALLBECK; BÄDLER, 2007)	AB e SF	Heterogênea	Macro	Contínua	Normal/ Emergencial	Filas, comportamento agressivo, propagação de pânico, impaciência
(TOYAMA; BAZZAN; SILVA, 2006)	AB e CA	Heterogênea	Macro	Discreta	Normal/ Emergencial	Comportamento de criação de fileiras, comportamento para evitar obstáculos
(BANDINI et al., 2005)	AB e CA	Heterogênea	Macro	Discreta	Normal	Comportamentos competitivos e colaborativos
(HEINEIN; WHITE, 2006)	AB e CA	Heterogênea	Macro	Discreta	Emergencial	Comportamento de decisão
(PAN et al., 2007b)	AB	Heterogênea	Macro	Discreta	Emergencial	Comportamento competitivo, comportamento de fileiras, comportamento de pastoreio

Tabela 21 – Trabalhos relacionados sobre Experimentos com animais, adaptado de (ZHENG et al., 2009)

Fonte	Abordagem	Indivíduos/ Grupos	Escala	Situações	Fenômenos
(SALOMA et al., 2003)	Experimento com ratos	Homogênea	Micro	Emergencial	Enfileiramento auto-organizado, comportamento sem escala em pânico de fuga
(ALTSHULER et al., 2005)	Experimento com formigas	Homogênea	Micro	Emergencial	Propagação de pânico, comportamento de pastoreio

Fonte	Indivíduos Grupos	Situação	Fenômenos Típicos
(YANG et al., 2005)	Homogênea	Emergencial	Comportamento de parentesco
(DAOLIANG; LIZHONG; JIAN, 2006)	Homogênea	Emergencial	Arqueando
(PEREZ et al., 2002)	Homogênea	Emergencial	Arqueando
(VARAS et al., 2007)	Homogênea	Emergencial	Efeito de Obstáculos
(YU; SONG, 2007)	Homogênea	Normal	Atolamento
(KIRCHNER; NISHINARI; SCHADSCHNEIDER, 2003)	Homogênea	Emergencial	Efeitos de atrito, entupimento
(KIRCHNER et al., 2003)	Homogênea	Emergencial	Comportamento de saída competitivo
(SCHULTZ; LEHMANN; FRICKE, 2007)	Heterogênea	Emergencial	Efeitos de atrito, comportamento de repulsão, localização de caminhos
(WEIFENG; LIZHONG; WEICHENG, 2003)	Homogênea	Normal	Atolamento, movimento bidirecional
(JIAN; LIZHONG; DAOLIANG, 2005)	Homogênea	Normal	Degrau lateral, atraso
(NISHINARI et al., 2006)	Homogênea	Emergencial	Comportamento de seguir
(GEORGOUDAS; SIRAKOULIS; ANDREADIS, 2006)	Heterogênea	Emergencial	Entupimento e comportamento em massa
(KIRCHNER; SCHADSCHNEIDER, 2002)	Homogênea	Emergencial	Comportamento de pastoreio
(WENG et al., 2006)	Homogênea	Normal	Formação de linha, atolamento
(YUAN; TAN, 2007)	Homogênea	Emergencial	Efeitos não aventureiros, inerciais e de grupo
(WEI-GUO et al., 2006)	Homogênea	Emergencial	Arqueando, entupindo, mais rápido é mais lento
(YAMAMOTO; KOKUBO; NISHINARI, 2007)	Homogênea	Normal	Entupimento
(MIRANDA, 2019)	Heterogênea	Emergencial	Arqueando, enfileirando, mais rápido é mais lento

APÊNDICE A – Visão do Pastor e Eclesiásticos



Figura 48 – Visão do Pastor e Eclesiásticos

APÊNDICE B – Calibragem de Parâmetros

Tabela 22 – Resultados da Calibragem de Parâmetros

KD	KS	KW	KI	Iter 1	Iter 2	Iter 3
0.5	0.5	0.5	0.5	384	436	406
0.5	0.5	0.5	1.0	374	427	384
0.5	0.5	0.5	1.5	324	393	366
0.5	0.5	1.0	0.5	624	633	679
0.5	0.5	1.0	1.0	679	549	803
0.5	0.5	1.0	1.5	477	565	585
0.5	0.5	1.5	0.5	1200	1200	1200
0.5	0.5	1.5	1.0	1200	1200	1200
0.5	0.5	1.5	1.5	1200	1200	1200
0.5	1.0	0.5	0.5	226	226	229
0.5	1.0	0.5	1.0	217	213	208
0.5	1.0	0.5	1.5	200	215	199
0.5	1.0	1.0	0.5	310	341	312
0.5	1.0	1.0	1.0	300	320	324
0.5	1.0	1.0	1.5	312	293	282
0.5	1.0	1.5	0.5	441	421	486
0.5	1.0	1.5	1.0	417	425	437
0.5	1.0	1.5	1.5	379	433	412
0.5	1.5	0.5	0.5	199	181	195
0.5	1.5	0.5	1.0	173	195	168
0.5	1.5	0.5	1.5	158	161	161
0.5	1.5	1.0	0.5	237	261	243
0.5	1.5	1.0	1.0	229	259	231
0.5	1.5	1.0	1.5	202	225	200
0.5	1.5	1.5	0.5	353	301	284
0.5	1.5	1.5	1.0	272	272	273
0.5	1.5	1.5	1.5	253	249	269
1.0	0.5	0.5	0.5	632	871	602
1.0	0.5	0.5	1.0	692	546	865
1.0	0.5	0.5	1.5	507	470	499
1.0	0.5	1.0	0.5	1200	1200	1200
1.0	0.5	1.0	1.0	1200	1200	1200

1.0	0.5	1.0	1.5	1200	1200	977
1.0	0.5	1.5	0.5	1200	1200	1200
1.0	0.5	1.5	1.0	1200	1200	1200
1.0	0.5	1.5	1.5	1200	1200	1200
1.0	1.0	0.5	0.5	302	316	311
1.0	1.0	0.5	1.0	269	273	242
1.0	1.0	0.5	1.5	229	242	243
1.0	1.0	1.0	0.5	372	394	384
1.0	1.0	1.0	1.0	352	368	479
1.0	1.0	1.0	1.5	305	440	403
1.0	1.0	1.5	0.5	739	1200	1200
1.0	1.0	1.5	1.0	1025	931	1134
1.0	1.0	1.5	1.5	552	895	879
1.0	1.5	0.5	0.5	277	236	263
1.0	1.5	0.5	1.0	251	238	237
1.0	1.5	0.5	1.5	215	184	206
1.0	1.5	1.0	0.5	288	315	283
1.0	1.5	1.0	1.0	280	309	295
1.0	1.5	1.0	1.5	267	266	271
1.0	1.5	1.5	0.5	396	493	385
1.0	1.5	1.5	1.0	338	364	364
1.0	1.5	1.5	1.5	329	344	404
1.5	0.5	0.5	0.5	1200	1200	1200
1.5	0.5	0.5	1.0	1200	1200	1200
1.5	0.5	0.5	1.5	1200	1200	1200
1.5	0.5	1.0	0.5	1200	1200	1200
1.5	0.5	1.0	1.0	1200	1200	1200
1.5	0.5	1.0	1.5	1200	1200	1200
1.5	0.5	1.5	0.5	1200	1200	1200
1.5	0.5	1.5	1.0	1200	1200	1200
1.5	0.5	1.5	1.5	1200	1200	1200
1.5	1.0	0.5	0.5	489	922	323
1.5	1.0	0.5	1.0	440	478	392
1.5	1.0	0.5	1.5	298	330	317
1.5	1.0	1.0	0.5	1200	874	946
1.5	1.0	1.0	1.0	1141	530	1124
1.5	1.0	1.0	1.5	1117	870	864
1.5	1.0	1.5	0.5	1200	1200	1200
1.5	1.0	1.5	1.0	1200	1200	1200

1.5	1.0	1.5	1.5	1200	1200	1200
1.5	1.5	0.5	0.5	265	307	270
1.5	1.5	0.5	1.0	274	196	246
1.5	1.5	0.5	1.5	267	256	240
1.5	1.5	1.0	0.5	377	613	1200
1.5	1.5	1.0	1.0	322	329	334
1.5	1.5	1.0	1.5	504	284	261
1.5	1.5	1.5	0.5	1200	621	434
1.5	1.5	1.5	1.0	1179	452	1200
1.5	1.5	1.5	1.5	783	470	702
