

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL
CURSO DE MESTRADO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**Campos Potenciais na Dispersão de Fumaça em
Evacuação de Multidões**

Bruna Antunes Corrêa

Orientadora: Prof. Dra. Diana F. Adamatti
Co-orientador: Prof. Dr. Alessandro de L. Bicho

Rio Grande, 2018

AGRADECIMENTOS

Sou grata ao Pai Celestial por ter estado ao meu lado durante todo o tempo em que estava cursando minha pós-graduação, me ajudando e confortando em todos os momentos. Sou grata a Ele pelas pessoas especiais que colocou em minha vida, e que me fortaleceram e apoiaram nesse desafio. Agradeço em especial aos meus pais Nilzelen Torres, Onildo Torres e a minha avó Ione Antunes por todo seu amor e incentivo para que eu conseguisse concluir mais essa etapa em minha vida acadêmica. Sou grata às minhas tias, tios e primos, por seu carinho ao apoiarem meus estudos. Sou grata também aos colegas que tive e aos amigos especiais que tenho, por sua compreensão e carinho, pois à minha vida trazem muita alegria. Agradeço aos meus orientadores, Professora Diana F. Adamatti e Professor Alessandro de L. Bicho, por me ajudarem a realizar este trabalho, por toda paciência que tiveram comigo e por seu exemplo como pessoa e como profissionais.

*"O futuro é tão brilhante
quanto sua fé."*
— THOMAS S. MONSON

RESUMO

CORRÊA, Bruna Antunes. **Campos Potenciais na Dispersão de Fumaça em Evacuação de Multidões**. 2018. 64 f. . Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

Frequentemente visitamos lugares com uma grande concentração de pessoas, como shopping centers, estádios de futebol, restaurantes, casas noturnas, etc. Através dos meios de comunicação, seguidamente vemos notícias de casos de situações de emergência nestes locais. Recentemente, tem-se tido um maior cuidado para que se cumpra as normas técnicas para situações de emergência, prevenindo fatalidades. Sabe-se que em uma situação de incêndio, uma das principais causas de mortes é a inalação da fumaça e, portanto, ao iniciar um incêndio as pessoas precisam sair com rapidez do local para evitar possíveis lesões. Nesta situação tem-se pesquisado sobre a dispersão da fumaça em ambientes fechados e a simulação do comportamento de multidões em situações de emergência. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma nova proposta para modelar a dispersão de fumaça em ambientes fechados utilizando o conceito de autômatos celulares associado a campos potenciais. Para complementar o trabalho, foi implementado um modelo comportamental para a simulação da evacuação de pessoas utilizando a abordagem multiagente, baseado nas regras comportamentais para deslocamento definidas no modelo Flocking.

Palavras-chave: Campos Potenciais, Dispersão de Fumaça, Evacuação de Multidões, Modelo Flocking, Sistemas Multiagente.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Transferência de calor (BOMBEIROS, 2006).	13
Figura 2	Convecção da Fumaça (BOMBEIROS, 2006).	14
Figura 3	Vizinhança de Von Neumann (SILVA et al., 2016).	15
Figura 4	Vizinhança de Moore (SILVA et al., 2016).	15
Figura 5	Força Atrativa (SILVA, 2011a).	18
Figura 6	Força Repulsiva (SILVA, 2011a).	18
Figura 7	Separação (BICHO, 2009).	20
Figura 8	Alinhamento (BICHO, 2009).	20
Figura 9	Coesão (BICHO, 2009).	20
Figura 10	Metodologia utilizada.	31
Figura 11	Interface do NetLogo.	37
Figura 12	Modelo Flocking: Aves voando de forma aleatória.	39
Figura 13	Modelo Flocking: Aves voando em bandos.	39
Figura 14	Modelo Flocking: Regras Comportamentais.	40
Figura 15	Modelo de Evacuação de Pessoas (Original)(SILVEIRA, 2015).	41
Figura 16	Interface do Modelo	42
Figura 17	Visão do Agente (SILVA; SCHOLL; ADAMATTI, 2017)	43
Figura 18	Interface do Modelo com fumaça, com os agentes e sem os vetores do campo potencial.	46
Figura 19	Interface do Modelo com fumaça, sem os agentes e com os vetores do campo potencial.	47
Figura 20	Bloqueio em forma de arco (HELBING; FARKAS; VICSEK, 2000).	49
Figura 21	Bloqueio em forma de arco, com 2000 pessoas no ambiente e apenas 4 portas de saída.	49
Figura 22	Simulação de ZHENG et al. (2017).	57
Figura 23	Simulação da fumaça de ZHENG et al. (2017) no novo modelo.	57
Figura 24	Simulação de LUNA (2014).	58
Figura 25	Simulação da fumaça de LUNA (2014) no novo modelo.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Trabalhos Relacionados	28
Tabela 2	Trabalhos Relacionados	29
Tabela 3	Dispersão da Fumaça	35
Tabela 4	Simulações com uma porta e o foco de fumaça, variando os parâmetros Constante da Porta k_a , Constante da Fumaça k_r e Influência da Fumaça $influ$	36
Tabela 5	Simulação com uma porta e o foco de fumaça.	37
Tabela 6	Simulações com uma porta, duas portas, três portas e quatro portas, nos ticks 11, 15, 21 e 25.	38
Tabela 7	Parâmetros Fixos	48
Tabela 8	Parâmetros Variados	48
Tabela 9	Simulações - População 10 agentes (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)	51
Tabela 10	Simulações - População 35 agentes (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)	52
Tabela 11	Simulações - População 75 agentes (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)	53
Tabela 12	Simulações - População 150 agentes (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)	54
Tabela 13	Simulações - População 300 agentes (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)	55
Tabela 14	Simulações - População 600 agentes (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivos	10
1.2	Objetivos Específicos	10
1.3	Organização do Trabalho	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Fumaça	12
2.2	Autômatos Celulares	13
2.3	Campos Potenciais	14
2.3.1	Definição de Campos Potenciais	15
2.4	Simulação de Multidões	19
2.5	Sistemas Multiagente	21
2.6	Considerações Finais	22
3	TRABALHOS RELACIONADOS	23
3.1	Considerações Finais	30
4	METODOLOGIA	31
4.1	Campo Potencial	31
4.1.1	Modelagem Matemática	31
4.1.2	Fumaça	34
4.2	A Evacuação De Multidões	36
4.2.1	NetLogo	36
4.2.2	Modelagem Comportamental	38
4.2.3	Interface	40
4.3	Parâmetros Utilizados	48
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	50
5.1	Comparação com Trabalhos Existentes	53
5.2	Considerações Finais	54
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento considerável de fábricas, as pessoas cada vez mais sofrem com os impactos na qualidade do ar. Por isso, tem-se feito estudos para entender os processos de dispersão das emissões de poluentes na atmosfera (LEITE; MOREIRA, 2015). Nos últimos anos, tem-se realizado estudos para entender o comportamento da fumaça em ambientes fechados visando a fuga rápida das pessoas em locais onde há fogo. Em uma situação de emergência, os incêndios podem ser classificados como acidental ou intencional, sendo que a dispersão da fumaça e do fogo variam conforme o material que sofre esse processo de combustão (ALWITRA, 2018). Então, assim como se tem tornado relevante pesquisas da qualidade e do comportamento do ar na atmosfera, também é importante ter o mesmo tipo de atenção para situações de emergência em ambientes fechados. Os projetos de edificações devem incluir medidas ativas e passivas que facilitem o escape das pessoas (GOUVEIA; ETRUSCO, 2002), mas a simulação prévia de uma situação de emergência minimiza as chances de ocasionar uma fatalidade.

Uma das metodologias computacionais que permite simular sistemas dinâmicos tais como evacuações em ambientes restritos são os autômatos celulares. Um autômato celular é uma ferramenta simples, mas um conceito poderoso para representar sistemas físicos compostos por elementos discretos com interações locais (CASTRO; CASTRO, 2008). É comum ver aplicações dos autômatos celulares na matemática e em teorias computacionais, mas as áreas da biologia, química, física, entre outras, utilizam as propriedades de autômatos celulares em seus respectivos desafios (ALVES, 2009). Autômatos celulares representam sistemas evolutivos que a partir de uma configuração inicial aleatória, cada componente do sistema tem sua evolução baseada na situação atual de seus vizinhos e em um conjunto de regras que são iguais para todos os componentes (CASTRO; CASTRO, 2008).

Ainda considerando possíveis metodologias para a simulação computacional de sistemas dinâmicos, os campos potenciais têm grande importância em sistemas robóticos, pois trata-se de um algoritmo capaz de controlar e planejar caminhos (PIRES, 2016).

O conceito de campos potenciais consiste em encontrar um caminho de uma posição inicial até uma posição final de forma que o agente ou o robô não colida com obstáculos presentes no ambiente, ou seja, o agente ou o robô é atraído para a posição final enquanto está sendo repellido pelos obstáculos.

Considerando uma situação de emergência em um ambiente comercial em que há um foco de incêndio que está produzindo fumaça, e onde encontra-se um número elevado de pessoas, a reação ao identificar o problema vai depender da intensidade do fogo do incêndio. Se surgir um princípio de incêndio é possível identificar a causa do incêndio e então utilizar de forma correta o mecanismo de segurança. Mas, se o fogo aumenta muito rápido é necessário: tentar manter a calma; sair o mais rápido possível do lugar seguindo as sinalizações; em seguida, deve-se acionar o alarme de incêndio, não esquecendo que no lugar terá fumaça o que dificultará a respiração e a visibilidade; e se caso não conseguir, sair rapidamente é importante manter-se molhado, pois a camada que a água fará oferece uma pequena proteção contra o fogo (OGUIDO, 2014). Nessa situação, pode-se notar a importância do local estar bem sinalizado e cumprindo com as normas de prevenção contra incêndio (ABNT: NBR 9077 - SAÍDAS DE EMERGÊNCIA EM EDIFÍCIOS, 2001). Esse é um exemplo onde a simulação da propagação da fumaça associada à simulação de multidões pode auxiliar na prevenção para identificar possíveis problemas.

A simulação de multidões é um sistema complexo que busca representar o comportamento e o movimento de uma multidão com recursos visuais gráficos (SHIBATA, 2016). Esse sistema possui diversas aplicações em nosso cotidiano, permitindo que as simulações produzidas possam ser mecanismos de análise do comportamento de multidões. Podemos encontrar aplicações, por exemplo, na indústria do entretenimento, como para simular realisticamente o movimento de um grande número de humanos virtuais em filmes ou jogos (CASSOL et al., 2012), e também avaliar ambientes complexos de difícil deslocamento para uma grande concentração de pessoas, como a evacuação em um estádio de futebol. Podemos considerar também situações em que as pessoas ou determinado grupo estão em uma situação de emergência. Trabalhos mais atuais como CASSOL (2016) e CASSOL et al. (2017) exemplificam a importância de estudar simulações de multidões. Na simulação de multidões encontramos o conceito de desindividualização que pode ser descrita como a situação em que os indivíduos agem em grupos e não se veem como indivíduos, facilitando o comportamento antinormativo (VILANOVA et al., 2017).

O desafio da Computação Gráfica nessa área é modelar o comportamento humano individual em sua forma mais elementar. Uma possibilidade é desenvolver esse tipo de modelo considerando características simples para os indivíduos. Um exemplo dessa

proposta é o trabalho de (REYNOLDS, 1987), que utiliza a simulação de partículas para mostrar o comportamento de bandos, rebanhos ou cardumes, utilizando as seguintes regras: separação, alinhamento e coesão.¹

A simulação de sistemas multiagentes viabiliza a resolução de problemas de uma forma não tradicional adequando-se a problemas complexos, neste sistema adota-se o conceito de agente para caracterizar uma unidade autônoma de resolução de problemas (BASTOS, 2001). A modelagem multiagente trata-se de um sistema computacional em que dois ou mais agentes interagem ou trabalham juntos para desempenhar determinadas tarefas ou objetivos (SILVA; SCHOLL; ADAMATTI, 2017).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor um modelo para simular a dispersão da fumaça em um ambiente utilizando autômatos celulares associado a campos potenciais. Com isso, pretende-se simular uma situação de emergência ocasionando a evacuação de pessoas, onde estas serão modeladas por agentes utilizando simulação baseada em sistema multiagente.

1.2 Objetivos Específicos

1. Estudar o comportamento da fumaça;
2. Estudar sobre Autômatos Celulares;
3. Estudar sobre Campos Potenciais;
4. Estudar os conceitos de Simulação de Multidões;
5. Estudar as definições de Simulação Multiagente;
6. Realizar uma revisão na literatura quanto aos trabalhos relacionados ao tema;
7. Definir e implementar um algoritmo no software NetLogo para realizar a simulação de dispersão da fumaça associado a evacuação de multidões;
8. Analisar os dados gerados pelo modelo proposto.

1.3 Organização do Trabalho

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 traz o referencial teórico sobre a fumaça, autômatos celulares, campos potenciais, simulação de multi-

¹Essas três regras estão implementadas no Modelo Flocking, disponível na biblioteca do programa NetLogo (<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>).

dões e sistema multiagente; no Capítulo 3 encontra-se trabalhos que utilizam os conceitos de autômatos celulares e campos potenciais, assim como trabalhos que utilizam simulação baseada em sistema multiagente; a metodologia utilizada está presente no Capítulo 4; no Capítulo 5 tem-se a análise dos resultados; por fim, a conclusão e trabalhos futuros estão no Capítulo 6.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fumaça

Em um incêndio associado ao fenômeno da combustão aparece de modo geral quatro situações perigosas: o calor, as chamas, a insuficiência de oxigênio e a fumaça, destes quatro fatores a fumaça é um dos que causa danos muito graves a vida de uma pessoa (CIMI, 2018). Considerando uma situação de incêndio em um ambiente em que não possui nenhum tipo de alarme ou sinalização, as pessoas ao sentirem o cheiro da fumaça buscarão, de forma instintiva, a saída mais próxima. Mas, a fumaça dificultará a visão provocando lacrimejamento, além de causar sintomas respiratórios, como tosses e sufocação. A fumaça pode provocar o pânico, por ocupar um grande volume do ambiente, dificultando a mobilidade das pessoas em uma evacuação (SEITO et al., 2008). Por isso há uma grande importância em realizar estudos do comportamentos da fumaça para prevenção de mortes em incêndios causados pela sua inalação.

A fumaça em um incêndio é resultante de gases, vapores e partículas sólidas finamente divididas. Em sua composição química encontram-se gases tóxicos e essa mistura torna-se altamente complexa. A fumaça é percebida visualmente e também por seu odor, e tem uma grande facilidade em abranger ambientes em poucos minutos causando insegurança às pessoas em situações de incêndio (SEITO et al., 2008).

A composição química da fumaça é altamente complexa e variável. Chega a ter duas centenas de substâncias e a porcentagem dessas substâncias varia com o estágio do incêndio. As substâncias mais comuns de se encontrar na fumaça de um incêndio e suas causas nos indivíduos são: Monóxido de Carbono (CO) causa asfixia, pois substitui o oxigênio no processo de oxigenação do cérebro; Gás Carbônico (CO_2) faz com que haja um aumento na aceleração dos batimentos cardíacos; Gás Cianídrico (HCN) exerce uma ação inibidora de oxigenação das células vivas do corpo; Gás Clorídrico (HCl) causa lesões na mucosa do aparelho respiratório; Óxidos de Nitrogênio (NO_x) causa uma irritabilidade inicialmente e em seguida torna-se um anestésico que afeta principalmente

o aparelho respiratório; Gás Sulfídrico (H_2) causa paralisação do sistema respiratório, além de danos ao sistema nervoso; e em uma situação de combustão, há uma diminuição no Gás Oxigênio (O_2), sendo um dos muitos fatores de risco para a vida das pessoas em incêndios (SEITO et al., 2008).

Existem três formas básicas de transferência de calor: condução, convecção e radiação (BOMBEIROS, 2006) (Figura 1).

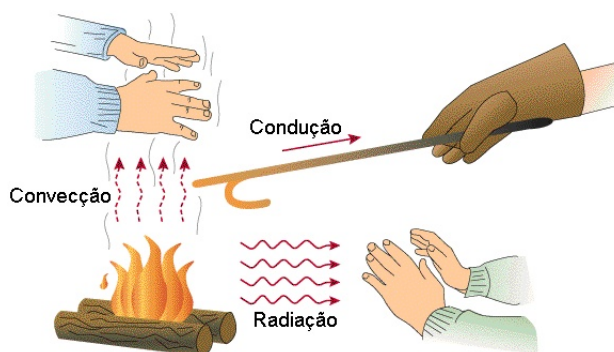


Figura 1: Transferência de calor (BOMBEIROS, 2006).

Um fluido é qualquer material que possa escoar, por exemplo a fumaça. Considerando a fumaça em movimento sua transferência de calor para uma superfície sólida ou para outro fluido é chamada de convecção. A convecção envolve três processos distintos: a condução de calor, a diferença de densidade e a mudança de fase (estado físico). A fumaça transfere o calor da base do fogo para a parte mais alta de uma edificação sem que tenha havido contato direto com as chamas. O movimento natural da fumaça em um incêndio ocorre usando o conceito de convecção, ou seja, as moléculas que foram aquecidas chocam-se umas com as outras, tornando a fumaça menos densa (portanto, mais leve) e sobe, distribuindo o calor pelo ambiente, como mostra a Figura 2.

Depois de entender um pouco sobre a fumaça é possível ver que a fumaça não é um fenômeno fácil de ser modelado, mas neste trabalho pretende-se mostrar um modelo do comportamento da fumaça utilizando o conceito de autômatos celulares associado aos campos potenciais e sistemas multiagentes.

2.2 Autômatos Celulares

Os autômatos celulares foram introduzidos nos anos 50 por John Von Neumann numa tentativa de modelar processos naturais de auto-reprodução (MARTINS, 2013). Autômatos celulares são formalismos matemáticos que permitem discretizar um sistema complexo através de uma grade celular e modelar sua evolução, considerando as

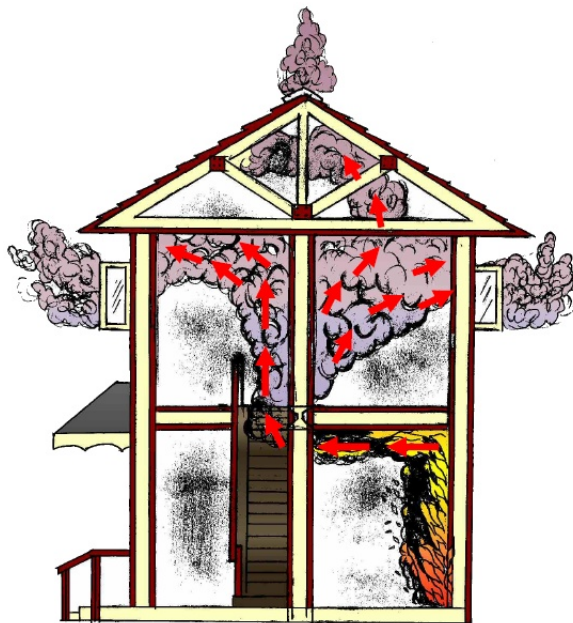


Figura 2: Convecção da Fumaça (BOMBEIROS, 2006).

interações entre células vizinhas ao longo do tempo (SILVA et al., 2016).

Sua definição consiste em uma matriz onde suas posições são chamadas de células, o estado das células é modificado de acordo com o seu próprio estado e o estado das suas células vizinhas na etapa anterior, por meio das regras de transição, que são funções simples que associa o valor de cada célula da matriz a um novo valor.

O conceito de autômatos celulares possui duas vizinhanças clássicas chamadas vizinhança de Von Neumann e vizinhança de Moore. A vizinhança de Von Neumann considera, para cada célula, as células imediatamente acima, abaixo, à esquerda e à direita, podendo-se estender o diâmetro da vizinhança para duas células imediatas ou mais (Figura 3). A vizinhança de Moore considera, para cada célula, as células imediatamente acima, abaixo, à esquerda, à direita e as diagonais (Figura 4).

2.3 Campos Potenciais

O significado físico de campo tem similaridade com o significado cotidiano da palavra campo, usando como exemplo um campo de futebol, fica clara a ideia de que é uma região na qual ocorrem determinadas interações que seguem determinadas regras em determinado intervalo de tempo. Considerando agora os conceitos da Política e em Economia internacionais, existem regiões geográficas ou campos de influência de nações, ou grupos de nações, bem definidos. E essa influência varia: em algumas regiões

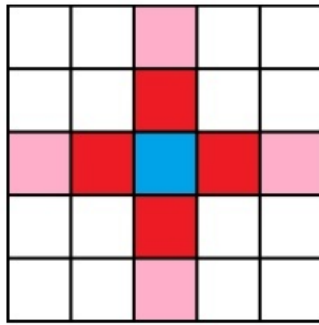


Figura 3: Vizinhança de Von Neumann (SILVA et al., 2016).

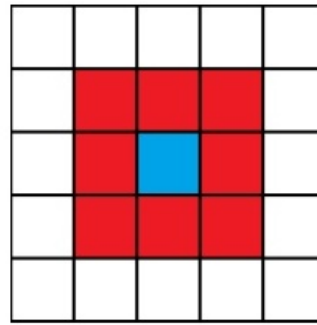


Figura 4: Vizinhança de Moore (SILVA et al., 2016).

é mais intensa; em outras, pode ser muito pequena. Em Física, essa ideia também é válida. A grande diferença está na possibilidade que a Física tem de medir escalar ou vetorialmente essa influência e, sobretudo, de definir com clareza a fonte ou a origem do campo (GASPAR, 2013).

Com isso, para existir um campo de uma grandeza em uma região só é possível se for associado a cada ponto dessa região um valor numérico e uma unidade, no caso de um campo escalar. No caso de campos vetoriais, além da representação escalar, pode-se associar um vetor a cada ponto da região, obtendo-se também uma representação vetorial (GASPAR, 2013).

2.3.1 Definição de Campos Potenciais

Campo potencial é uma matriz ou campo de vetores que representam o espaço, ou seja, campos potenciais incluem campos elétricos, magnéticos e gravitacionais. A principal ideia deste método é estabelecer um campo potencial de força atraiante em torno do ponto alvo e estabelecer um campo potencial repulsivo em torno de obstáculos, os dois campos potenciais juntos formam um novo campo potencial, chamado campo de potencial artificial (ZHANG; CHEN; CHEN, 2012). Consequentemente os obstáculos exercem forças repulsivas, enquanto o alvo aplica uma força atrativa, e a soma de todas as forças determina a direção e velocidade subsequentes do movimento (KOREN; BORENSTEIN, 1991). A ideia básica é configurar um potencial virtual ou campo de força que é definido pela localização de objetos, paredes, outros robôs, o robô de interesse, etc. (BEARD; MCLAIN, 2003).

Exemplos de Campos Potenciais

Um campo potencial será descrito como uma função $E : R^2 \rightarrow R$ (BEARD; MCLAIN, 2003). Por exemplo, podemos definir a função $E(x) = c$, como c é uma

constante ela define um Campo Potencial Constante. Um Campo de Potencial constante não é muito útil, pois não há gradiente (BEARD; MCLAIN, 2003).

É possível definir um Campo de Potencial Linear pela função

$$E(x) = a^T x + c$$

onde a é um vetor constante, e c é uma constante. Calculando o gradiente deste campo potencial temos:

$$\frac{\partial E}{\partial x}(x) = a.$$

Com isso o gradiente é constante e aponta na direção de a . Se o robô estiver programado para seguir o gradiente negativo de E , então um Campo de Potencial Linear faria com que o robô se movesse na direção de a (BEARD; MCLAIN, 2003).

Um outro Campo Potencial comum é um potencial quadrático

$$E(x) = \frac{1}{2}(x - c)^T(x - c),$$

onde c é um vetor constante. Calculando o gradiente do Campo Potencial Quadrático temos:

$$\frac{\partial E}{\partial x}(x) = x - c$$

que sempre aponta para c . Se o robô estiver programado para seguir o gradiente negativo de E , o Campo de Potencial Quadrático fará com que o robô se mova na direção de c . Com isso define-se um potencial atraente para c . Consequentemente, c é chamado de atrator (BEARD; MCLAIN, 2003).

Agora definindo E é como:

$$E(x) = -\frac{1}{2}(x - c)^T(x - c),$$

então c é um repulsor, uma vez que seguir o gradiente negativo de E fará com que o robô se afaste de c (BEARD; MCLAIN, 2003).

Considerando agora a função de Campo Potencial:

$$E(x) = \sum_{a \in A} \frac{1}{2}(x - a)^T(x - a) - \sum_{r \in R} \frac{1}{2}(x - r)^T(x - r),$$

onde A é um conjunto de atratores e R é um conjunto de repulsores. Calculando o gradi-

ente de E temos:

$$\frac{\partial E}{\partial x}(x) = \sum_{a \in A} (x - a) - \sum_{r \in R} (x - r) = (|A| - |R|)x - \left(\sum_{a \in A} a - \sum_{r \in R} r \right).$$

Onde $|A|$ é o número de elementos em A . Em outras palavras, o robô será atraído (ou repellido) do centro de massa dos atrativos e repulsores (BEARD; MCLAIN, 2003).

Definição

Considerando um caso simples, podemos assumir que o robô é um ponto e o campo potencial resultante é apenas $2D$. Se assumirmos uma função de campo potencial diferenciável $U(q)$, podemos encontrar a força artificial relacionada $F(q)$ agindo na posição $q = (x, y)$ (SIEGWART ROLAND; NOURBAKHS, 2011). Com isso teremos

$$F(q) = -\nabla U(q)$$

, onde

$$\nabla U(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \end{bmatrix}$$

denota o vetor de gradiente de U na posição q . Então o campo potencial que atua no robô é a soma do campo atraente com o campo repulsivo:

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q)$$

. Da mesma forma, as forças também são separadas em parte atraente e repulsiva:

$$F(q) = F_{att}(q) + F_{rep}(q) = -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q)$$

O potencial atraente pode ser definido como uma função parabólica:

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} k_{att} \cdot \rho_{goal}^2(q).$$

Onde k_{att} é um fator de escala positivo e $\rho_{goal}(q)$ indica a distância euclidiana $\|q - q_{goal}\|$. Como esse potencial é diferenciável teremos uma força atrativa (Figura 5):

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = -k_{att} \cdot \rho_{goal}(q) \nabla \rho_{goal}(q) = -k_{att} \cdot (q - q_{goal}).$$

O potencial repulsivo deve ser forte quando o robô está perto do objeto, mas não deve influenciar quando o robô estiver longe do objeto. Com isso podemos defini-lo como:

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \text{se } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{se } \rho(q) \geq \rho_0 \end{cases}.$$

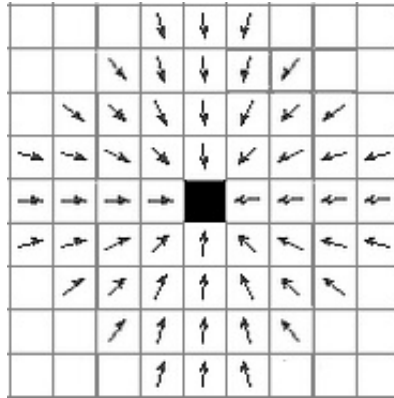


Figura 5: Força Atrativa (SILVA, 2011a).

Onde k_{rep} é novamente um fator de escala, $\rho(q)$ é a distância mínima de q para o objeto e ρ_0 a distância de influência do objeto. A função de potencial repulsivo U_{rep} é positiva ou zero e tende ao infinito q aproximando-se do objeto. Se o limite do objeto é convexo e diferenciável por partes, $\rho(q)$ é diferenciável em todos os lugares no espaço de configuração livre. Com isso teremos uma força repulsiva (Figura 6):

$$F_{rep} = -\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(q)} \frac{q - q_{obstaculo}}{\rho_0} & \text{se } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{se } \rho(q) \geq \rho_0 \end{cases}$$

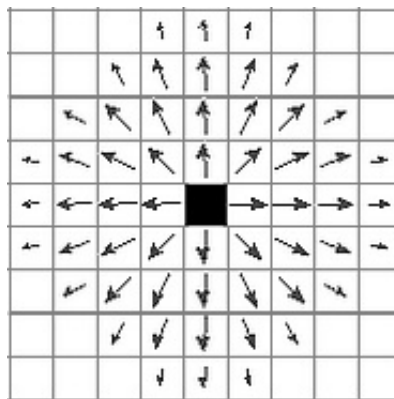


Figura 6: Força Repulsiva (SILVA, 2011a).

Portanto é possível dizer que a força resultante

$$F(q) = F_{att}(q) + F_{rep}(q)$$

que atua no robô, que sofre influência de forças atrativas e repulsivas, afasta o robô dos obstáculos em direção ao objetivo (SIEGWART ROLAND; NOURBAKSH, 2011).

2.4 Simulação de Multidões

As multidões são formadas tanto em situações voluntárias como involuntárias e, a partir dessa organização, os indivíduos começam a interagir com integrantes de seu grupo e a tomar decisões coletivas. Considerando as diferentes situações em que as multidões se formam, diversos estudos foram realizados a fim de verificar tal comportamento. Com isso, surge a área de simulação de multidões, onde busca-se simular os comportamentos coletivos e de massa (CASSOL et al., 2012).

Simulações de multidões podem ser baseada em duas abordagens: os macroscópicas e as microscópicas. Considerando os modelos macroscópicos, são utilizadas variáveis como fluxo, velocidade média ou densidade da multidão. Já nos modelos microscópicos, os indivíduos são descritos como partículas individuais (LEMERCIER; AUBERLET, 2016). A abordagem microscópica é a mais utilizada por permitir que sejam modeladas particulares, tornando-se uma solução que reproduz com maior fidelidade o comportamento humano.

O trabalho de REYNOLDS (1987) mostra a possibilidade de se produzir comportamentos de bandos de pássaros, rebanhos de animais e cardumes de peixes a partir de regras simples, definidas em um modelo de partículas, baseando-se no comportamento de cada ave, animais ou peixes. O movimento do bando é o resultado das ações de cada pássaro, com cada um agindo de acordo com sua percepção do ambiente, gerando um movimento coletivo.

Com isso, Reynolds define os *boids*, que são os personagens virtuais. Cada *boid* tem a capacidade de perceber o ambiente local, mantendo sua posição e orientação no grupo através de três regras:

1. Separação (evitar colisões): o *boid* deve manter uma distância mínima dos *boids* vizinhos e dos obstáculos no ambiente, verificando a necessidade de aumentar ou diminuir a sua velocidade, conforme Figura (7).
2. Alinhamento (manter a velocidade): o *boid* deve ajustar seu vetor velocidade (módulo e orientação), mantendo uma trajetória coerente aos *boids* vizinhos, conforme Figura (8).
3. Coesão (manter o agrupamento): o *boid* deve manter sua posição próxima ao centroide das posições dos *boids* vizinhos, conforme Figura (9).

As três regras apresentam uma ordem de prioridade de aplicação: primeiro a regra separação; segundo a regra alinhamento; e terceiro a regra coesão. Assim, possíveis

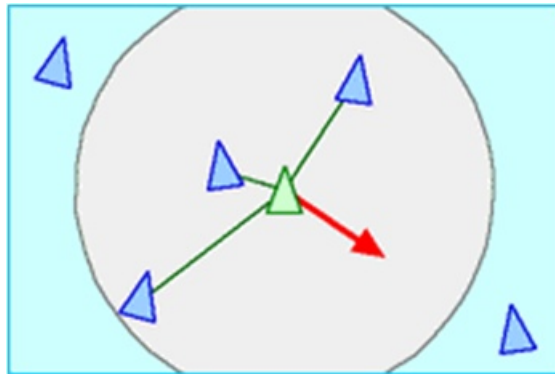


Figura 7: Separação (BICHO, 2009).

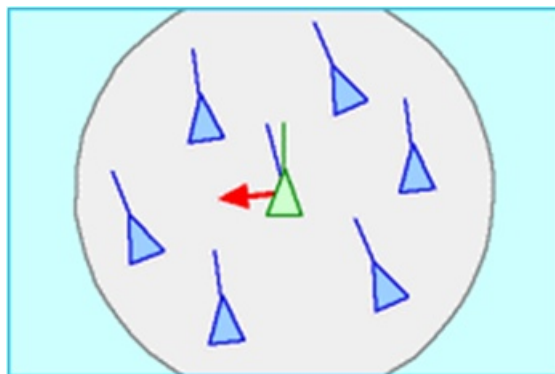


Figura 8: Alinhamento (BICHO, 2009).

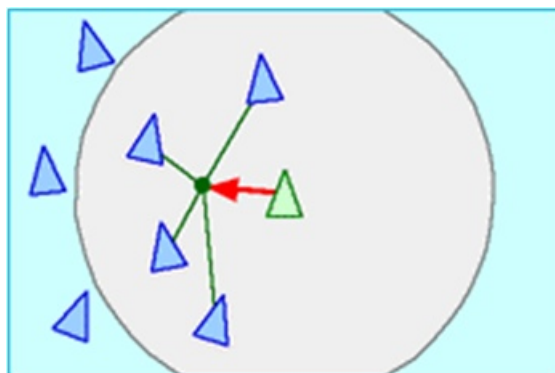


Figura 9: Coesão (BICHO, 2009).

conflitos de comportamento são resolvidos utilizando as prioridades definidas.

Conhecendo o vôo dos pássaros, pode-se fazer uma comparação com uma situação de emergência em um ambiente fechado, onde tem-se pessoas em estado de pânico, tentando sair de um local, por exemplo, que esteja pegando fogo. Com isso, as pessoas buscarão a saída mais próxima, formando assim uma multidão e fazendo uma analogia aos bandos de pássaros.

2.5 Sistemas Multiagente

A Inteligência Artificial é um ramo da computação que simula comportamentos humanos utilizando algoritmos. E para realizar esses estudos, uma das linhas de pesquisa que vem sendo utilizada é a área de sistemas multiagente, onde se modelam agentes capazes de tomar decisões individuais e em grupo. Os agentes envolvidos nesses sistemas podem apresentar capacidade de raciocínio e aprendizado, de forma que é possível haver adaptação às mudanças ocorridas no ambiente sobre o qual operam (CHANG, 2014).

A simulação multiagente é uma área de algoritmo de simulação que é utilizada em jogos de computador, realidade virtual, animação e dinâmica de pedestres (WOLINSKI et al., 2014).

Existem algumas situações em que a simulação multiagente é mais indicada (SILVA, 2011b):

1. quando o problema pode ser naturalmente representado por agentes;
2. quando as decisões e comportamentos são bem definidos;
3. quando é necessário que os agentes se adaptem e mudem o seu comportamento dinamicamente;
4. quando é preciso que os agentes tenham um componente espacial entre os seus comportamentos e suas interações.

Com isso, o conceito base para a realização deste trabalho é a modelagem multiagente, que é um sistema computacional onde agentes interagem entre si, realizando assim determinadas tarefas pré-definidas (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995).

Para realizar a simulação a ser modelada será usada a abordagem por Partículas, onde cada partícula representa uma pessoa. Esse modelo é usado para representar formas irregulares e complexas. O sistema de partículas é composto de um grande número de

partículas individuais onde cada uma tem o seu próprio comportamento. Em uma multidão há um grande número de pessoas, e o Modelo de Partículas se adapta adequadamente, pois cada pessoa tem seu próprio comportamento.

2.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os principais fundamentos teóricos utilizados neste trabalho que são: Autômatos Celulares, Campos Potenciais, Simulação de Multidão e Sistemas Multiagentes. O Capítulo 3 traz alguns trabalhos que aplicam esse conceitos.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Esse capítulo apresenta alguns trabalhos já existentes com propostas sobre Autômatos Celulares, Campos Potenciais, Simulação de Multidões e Simulação Multiagente.

O trabalho de SILVA et al. (2016) tem como objetivo utilizar autômatos celulares para modelar a dispersão de poluentes em um canal urbano em Recife-PE, utilizando uma discretização sobre a imagem de satélite. Primeiro foi obtida a imagem com o destaque apenas dos corpos hídricos, em seguida são definidos os postos que representam o lançamento de poluentes, considerando a função de transição uma aproximação da segunda lei de Fick ¹.

Em MARTINS (2013) é proposta uma modelagem de recursos minerais utilizando a abordagem de autômatos celulares. Para utilizar autômatos celulares foi desenvolvida uma ferramenta, e ela foi aplicada para modelar um banco de dados conhecido na mineração, como Walker Lake Dataset. O trabalho consiste em testar autômatos celulares como ferramenta de estimativa de recursos minerais para minimizar os desafios enfrentados pelo processo tradicional baseado em métodos geoestatísticos.

PESSOLI (2006) propõe uma metodologia para simular o transporte de poluentes leves sob a ação de campos de ventos em ambientes complexos. O método consiste na divisão da equação de difusão advectiva em duas componentes, uma laminar e outra tubular. Os módulos internos do modelo são programados em C, para os módulos externos é usada a ferramenta de interpolação MATLAB e uma CFD (*Computational Fluid Dynamics*), utilizada para o cálculo dos campos de ventos em todo o ambiente.

O trabalho de ZHANG; CHEN; CHEN (2012) busca modelar um caminho para o robô de futebol, do ponto de partida até o ponto alvo, evitando os obstáculos. Foi escolhido o método de campo potencial artificial para resolver o problema de evitar colisão, pois é de fácil manipulação em tempo real, mas o método de campo potencial

¹As Leis de Fick são equações de transporte de massa por difusão (ELENO, 2016).

artificial é um método de planejamento local e é difícil de planejar o caminho global. O trabalho teve como objetivo um novo modelo de prevenção de obstáculos, onde utiliza o método de grade para descrever o ambiente e as informações dos obstáculos, e utilizou o método de campo potencial artificial evolutivo para otimizar o caminho de evitar colisão com obstáculos.

O método de campo potencial tem sido comumente usado em prevenção de obstáculos devido a sua modelagem simples, apesar disso o método traz deficiências substanciais. O trabalho de KOREN; BORENSTEIN (1991) faz uma análise matemática rigorosa para identificar os problemas inerentes ao método de campo potencial. Resulta, assim, em uma equação diferencial que combina o robô e o ambiente em um sistema unificado.

BORENSTEIN; KOREN (1988) propõe uma nova abordagem de prevenção de obstáculos em tempo real para robôs móveis. O objetivo do trabalho é permitir que o robô móvel detecte obstáculos desconhecidos simultaneamente com sua direção, evitando colisões e avançando em direção ao alvo. A nova abordagem chama-se campo de força virtual, considerando o conceito de grades de certezas para a representação dos obstáculos e campos potenciais para a navegação no ambiente.

O trabalho de CHU et al. (2014) traz um novo modelo para simular multidões, uma aplicação de seu algoritmo é em situações de emergência. O trabalho é baseado em agentes e simula comportamentos humanos e sociais em situações de pânico. Os agentes possuem características e podem ser influenciados por outros agentes ou grupos, onde cada agente realiza cinco processos que são: Percepção, o agente percebe outros agentes ou grupos; Interpretação, os ocupantes do ambiente interpretam a situação; Tomada de Decisão, usa-se uma árvore de decisão composta de comportamentos e individuais e em grupo; Execução, o agente move-se para o alvo escolhido; e Memorização, após o movimento é feito um registro das áreas visitadas. No modelo proposto o agente ao perceber os grupos, identifica a quantidade de agentes nesses grupos e segue o grupo com maior quantidade de agentes. Com isso, os agentes podem ser líderes ou seguidores de um grupo.

O trabalho de BOATRIGTH et al. (2015) propõe um algoritmo baseado em agentes que contém uma base de dados. Primeiro, são implementados os dados de treinamento; em seguida os modelos aprendidos pela máquina são ajustados aos dados. Então, esses modelos são usados em tempo de execução para decidir o próximo passo do agente. Para isso, é definido um conjunto de situações onde são agrupados por suas similaridades e quando é identificada a situação é dividido o espaço do problema o que limita o escopo necessário para a solução com base nos dados.

O trabalho de XIE et al. (2016) simula a influência de pequenos grupos sociais sobre os comportamentos de pedestres em situações de emergência. Pesquisas mostram que as pessoas tendem a andar em grupos onde os membros são socialmente próximos e os grupos sociais tem mais impacto sobre os comportamentos individuais em situação de emergência do que em condições normais. Com isso, o artigo propõe um novo método dinâmico de força de grupo para simular o fenômeno de agregação de grupo, em especial a tendência das pessoas aproximarem-se de grupos socialmente íntimos/próximos. E também considera decisões baseadas em custos para realizar a simulação de busca de membros perdidos do grupo. Nesse processo, os pedestres decidem procurar ou não membros perdidos, quem irá realizar a busca e quem será procurado.

No artigo de ANTUNES; MAGNENAT-THALMANN (2016) foi realizada uma investigação de como a personalidade e os comportamentos emocionais influenciam nas ações, decisões e no comportamento individual e em grupo. Com isso, foram modeladas populações de agentes que expressam sua individualidade e autonomia, enquanto que, simultaneamente, se adaptam e superam suas limitações perceptivas. As análises foram feitas individualmente dentro de grupos e em particular considerando expressões individuais e dinâmica de grupo. Cada agente tem sua personalidade que envolve três camadas interligadas que são: emoção, humor e personalidade. Além disso, os agentes constantemente monitoram o ambiente interno e externo atualizando um conjunto de sensores que são: falta de energia, libido excessivo, proximidade a um agente com recursos, proximidade com um companheiro, vizinho é conhecido, atualmente em interação e emergência, as mudanças ocorridas nos estados geram emoções.

BEST et al. (2014) propõem um novo algoritmo que modela comportamento de multidão dependendo de sua densidade. Com isso, o modelo gera trajetórias de pedestres que relacionam velocidade e densidade. Trabalhos mostram que o movimento de pedestres é sensível a densidade da multidão. O diagrama fundamental é a relação observada entre velocidade e a densidade, ou seja, a medida que a densidade aumenta a velocidade diminui. Nos algoritmos para simulação de multidões utilizando simulação multiagente existe um subconjunto que decompõem o problema de computação de trajetória em duas fases: planejamento global e navegação local. BEST et al. (2014) modelam o *DenseSense*, que é um filtro de densidade dependente e atua como uma interface entre o planejador global e o módulo de navegação local. Isso resulta em trajetórias mais suaves, redução de colisões entre agentes e comportamentos mais realistas dos agentes.

No trabalho de LEMERCIER; AUBERLET (2016), o agente tem a capacidade de obter uma representação individual do ambiente que lhe permita adaptar o seu compor-

tamento de acordo com a situação, ou seja, é dado ao agente a possibilidade de decidir a relação que terá com outros agentes assim como decidir o que fazer em um ambiente. Essa autonomia melhora o realismo e também faz com que cada agente seja diferente um do outro. Alguns modelos de simulação de multidão consideram principalmente a prevenção de colisões como o único tipo de interação entre indivíduos. A proposta de LEMERCIER; AUBERLET (2016) é dar aos agentes a capacidade de ter vários tipos de interações e de se comportar diferentemente de acordo com a situação baseado na interação no meio. Para isso, o artigo baseia-se em dois tipos de comportamentos: seguir ou evitar o comportamento do grupo.

O artigo de SILVA; SCHOLL; ADAMATTI (2017) busca mostrar a importância de respeitar as indicações da norma da ABNT para situações de emergência, para isso foi modelado dois cenários utilizando o software NetLogo, um cenário onde utiliza dados reais da boate Kiss, em Santa Maria/RS, no momento em que aconteceu a tragédia em 2013, e um outro cenário para a boate Kiss respeitando a norma da ABNT. Considerando os dados obtidos das evacuações nos dois cenários, foi possível notar que a aplicação das sinalizações de saída de emergência, em conjunto com o número de portas e suas dimensões corretas tornam a evacuação consideravelmente mais efetiva.

O trabalho de HELBING; FARKAS; VICSEK (2000) modela a evacuação de pedestres em uma situação de pânico utilizando sistemas de partículas. Usa um modelo de forças sociais que influenciam o comportamento dos pedestres para investigar os mecanismos de pânico e interferência por movimento descoordenado em multidões.

O trabalho de COURTY; MUSSE (2005) aborda situações de emergência para sistemas de segurança. Propõe um aprimoramento para o modelo de HELBING; FARKAS; VICSEK (2000) de animação baseado em física que permite considerar a influência de fenômenos gasosos no comportamento da multidão.

O trabalho de dissertação de CASSOL (2016) discute o uso de simulação de multidões como ferramenta para reproduzir e avaliar computacionalmente o processo de evacuação de ambientes aglomerados, é desenvolvida a ferramenta Crowdsim com o fim de reproduzir o comportamento de pessoas durante o processo de evacuação de ambientes, a ferramenta é capaz de gerar automaticamente diversos planos de evacuação possíveis de serem realizados em um mesmo ambiente e esses planos são avaliados a fim de identificar o melhor de fuga.

CASSOL et al. (2017) simula planejamentos de evacuação de pessoas em um edifício otimizando planos de fuga para alcançar a melhor evacuação com base em uma métrica

validada quantitativamente para o desempenho de evacuação. Essa métrica captura muitos dos aspectos importantes de uma evacuação: tempo total de evacuação, tempo médio de evacuação, velocidade do agente e densidade do agente local.

WOLINSKI et al. (2014) modelam uma nova estrutura para avaliar algoritmos multi-agente. A nova proposta permite uma abordagem mais justa, estimando automaticamente os parâmetros que permitem que os algoritmos de simulação de multidão melhor se ajustem aos dados reais. No estimador, a comparação de algoritmos de simulação de multidão ocorre utilizando dados da simulação e dados de referência reais. O grande desafio do modelo é estimar o melhor conjunto de parâmetros para um dado algoritmo que resultaria na correspondência com os dados de referência. A avaliação de um algoritmo de simulação de multidão foi feita como um problema de otimização, onde a estrutura é composta por três componentes: algoritmo de simulação de multidões, dados de referência e conjunto de métricas para medir a qualidade do algoritmo de simulação corresponde aos dados. Com isso, primeiro é encontrado um conjunto de parâmetros que permite a melhor correspondência entre cada algoritmo de simulação e os dados de referência. E depois, são realizadas comparações com os escores de funções objetivo (que é a distância entre os dados de referência) para o dado conjunto de algoritmo.

O trabalho de ZHENG et al. (2017) propõe um modelo para estudar a dinâmica de evacuação de pedestres com influência do fogo e a propagação de fumaça. A propagação da fumaça é de cima para o baixo, o que deixa cada vez menos espaço para o movimento dos pedestres e assim o comportamento de movimento dos pedestres é dividido em três estágios: caminhada normal, caminhada curvada e engatinhar. A influência do fogo e da fumaça no movimento dos pedestres é modelada pelo campo de piso de fogo e o campo de piso de fumaça.

Em seu trabalho, LUNA (2014), propõe um modelo computacional para simulação em tempo real do escoamento em grande escala de fumaça ou gás em grandes ambientes, para uma dada configuração de obstáculos e, um campo de ventos. Foi adotada uma abordagem discreta simples tanto para o transporte devido aos ventos, como para os mecanismos de difusão, possibilitando uma simulação simples e eficiente.

As Tabelas 1 e 2 resumizam os trabalhos estudados e apresentados anteriormente.

Tabela 1: Trabalhos Relacionados

Autor	Fundamentação	Objetivo Principal
SILVA et al. (2016)	Autômatos Celulares	Utilizar autômatos celulares para modelar a dispersão de poluentes em um canal urbano em Recife-PE.
MARTINS (2013)	Autômatos Celulares	Propor uma modelagem de recursos minerais utilizando a abordagem de autômatos celulares.
PESSOLI (2006)	Autômatos Celulares	Propor uma metodologia para simular o transporte de poluentes leves sob a ação de campos de ventos em ambientes complexos.
ZHANG; CHEN; CHEN (2012)	Campo Potencial	Desenvolver um novo modelo de prevenção de obstáculos, onde utiliza o método de grade para descrever o ambiente e as informações dos obstáculos, e utilizou o método de campo potencial artificial evolutivo para otimizar o caminho de evitar colisão com obstáculos.
KOREN; BORENSTEIN (1991)	Campo Potencial	Fazer uma análise matemática rigorosa para identificar os problemas inerentes ao método de campo potencial. Resulta, assim, em uma equação diferencial que combina o robô e o ambiente em um sistema unificado.
BORENSTEIN; KOREN (1988)	Campo Potencial	Permitir que o robô móvel detecte obstáculos desconhecidos simultaneamente com sua direção, evitando colisões e avançando em direção ao alvo.
CHU et al. (2014)	Sistema Multiagente	Simular comportamentos humanos e sociais em situações de pânico. Analisa grupos.
BOATRIGHT et al. (2015)	Sistema Multiagente	Propor um algoritmo baseado em agentes que contém uma base de dados. Analisa distintas multitudes.
XIE et al. (2016)	Sistema Multiagente	Propor novo método para simular as influências de pequenos grupos sociais sobre comportamentos de pedestres em situações de emergência. Analisa grupos onde as pessoas são socialmente íntimas.
ANTUNES; MAGNENAT-THALMANN (2016)	Sistema Multiagente	Investigar como a personalidade e os comportamentos emocionais influenciam nas ações, decisões e no comportamento individual e em grupo. Concentram-se em interações individuais dentro de grupos e multitudes.
BEST et al. (2014)	Sistema Multiagente	Gerar trajetórias de pedestres que correspondem às relações velocidade/densidade que são tipicamente expressas usando o Diagrama Fundamental. Analisa multidão densa.
LEMERCIER; AUBERLET (2016)	Sistema Multiagente	Proporcionar ao agente pedestre a capacidade de obter uma representação individual do ambiente que lhe permita adaptar o seu comportamento de acordo com a situação. Modela interações diretamente com grupos de pessoas, ao invés de indivíduos.

Tabela 2: Trabalhos Relacionados

Autor	Fundamentação	Objetivo Principal
SILVA; SCHOLL; ADA-MATTI (2017)	Sistema Multiagente	Mostrar a importância de respeitar as indicações da norma da ABNT para situações de emergência. Analisa multidão densa.
HELBING; FARKAS; VICSEK (2000)	Simulação de Multidões, modelo microscópico (partículas)	Utilizar um modelo de comportamento de pedestres investiga os mecanismos de pânico e interferência por movimento descoordenado em multidões. Analisa diferentes densidade de multidões.
COURTY; MUSSE (2005)	Simulação de Multidões, modelo microscópico (multiagente)	Aprimorar um modelo de animação baseado em física que permite considerar a influência de fenômenos gasoso no comportamento da multidão. Analisa grandes multidões.
CASSOL (2016)	Simulação de Multidões	Desenvolve a ferramenta Crowdsim com o fim de reproduzir o comportamento de pessoas durante o processo de evacuação de ambientes sendo capaz de gerar automaticamente diversos planos de evacuação possíveis de serem realizados em um mesmo ambiente e esses planos são avaliados a fim de identificar o melhor de fuga.
CASSOL et al. (2017)	Simulação de Multidões	Otimiza planos de fuga para alcançar a melhor evacuação com base em uma métrica validada quantitativamente para o desempenho de evacuação.
WOLINSKI et al. (2014)	Problema de Otimização	Avaliar algoritmos multiagente de simulação de multidões com base em observações do mundo real de movimentos de multidões. Analisa diferentes densidade de multidões.
ZHENG et al. (2017)	Simulação de Multidões	Estudar a dinâmica de evacuação de pedestres com influência do fogo e a propagação de fumaça.
Esse trabalho	Autômatos Celulares, Campos Potenciais, Sistema Multiagente e o Flocking	Propor um modelo para simular a dispersão da fumaça em um ambiente utilizando autômatos celulares associado a campos potenciais, simulando uma situação de emergência que ocasiona em uma evacuação de pessoas, onde é modelado utilizando simulação baseada em sistema multiagente. Analisa diferentes densidade de multidões.

3.1 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados diferentes trabalhos que utilizaram como base as seguintes fundamentações: Autômatos Celulares, Campos Potenciais, Simulação de Multidão e Sistemas Multiagentes, tendo como objetivo mostrar algumas aplicações destes conceitos.

É importante ressaltar que não se sabe de trabalhos anteriores utilizando o conceito de Autômatos Celulares associado a Campos Potenciais para mostrar a dispersão da fumaça. Neste trabalho, portanto, é proposto unir uma ferramenta que representa a evolução de um sistema baseado na situação de sua célula atual e das células vizinhas, com o controle e planejamento de caminhos para representar a dispersão da fumaça. A partir disso exemplificar uma aplicação dos parâmetros definidos por REYNOLDS (1987) em uma simulação de multidões utilizando sistemas multiagentes. O Capítulo 4 traz a metodologia utilizada para modelar essa proposta.

4 METODOLOGIA

Este trabalho teve como objetivo criar um modelo para simular a dispersão da fumaça em um ambiente utilizando o conceito de campos potenciais. A partir desse modelo foi simulado uma situação de emergência ocasionando uma evacuação de pessoas.

Para essa modelagem foi utilizado autômatos celulares e a simulação baseada em sistema multiagente. A Figura 10 apresenta o diagrama da metodologia.

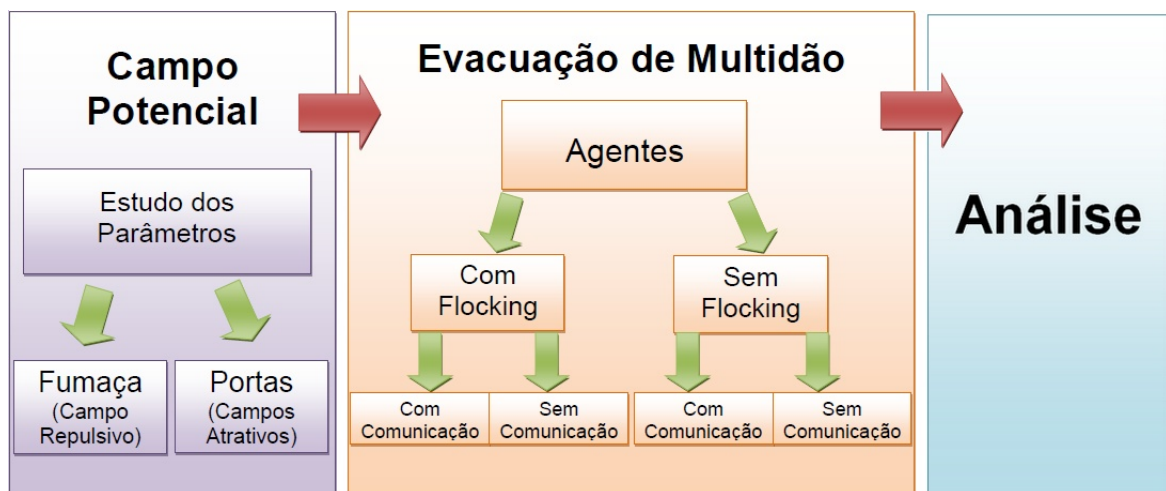


Figura 10: Metodologia utilizada.

4.1 Campo Potencial

Os campos potenciais são normalmente utilizados para modelos de deslocamento de agentes. Neste trabalho é proposto uma nova aplicação para o conceito, sendo utilizado para descrever a dispersão da fumaça em um ambiente fechado.

4.1.1 Modelagem Matemática

A partir do que foi visto na Seção 2.3 foi necessário fazer alguns ajustes nas equações dos campos potenciais para que fosse possível utilizá-lo nessa nova aplicação. Na

definição original de campos potenciais é considerado apenas um possível alvo para o agente alcançar e os obstáculos podem ser mais de um no ambiente. Para a nova aplicação as equações foram modificadas para que fosse possível ter um único obstáculo com vários possíveis alvos de chegada. Com isso, o obstáculo gera uma força de repulsão enquanto que cada alvo gera sua força de atração.

Consideremos:

- Vetor posição do Agente: $\vec{q} = (q_x, q_y)$
- Vetor posição do Alvo: $\vec{a} = (a_x, a_y)$
- Vetor posição do Obstáculo: $\vec{o} = (o_x, o_y)$

4.1.1.1 Potencial Atrativo

$$U_a(q) = \frac{1}{2}k_a \frac{1}{\|\vec{q} - \vec{a}\|^2} \quad (1)$$

$$U_a(q) = \frac{1}{2}k_a \frac{1}{(\vec{q} - \vec{a})(\vec{q} - \vec{a})} \quad (2)$$

$$U_a(q) = \frac{1}{2}k_a \frac{1}{(q_x - a_x, q_y - a_y)(q_x - a_x, q_y - a_y)} \quad (3)$$

$$U_a(q) = \frac{1}{2}k_a \frac{1}{q_x^2 - 2q_x a_x + a_x^2 + q_y^2 - 2q_y a_y + a_y^2} \quad (4)$$

Onde k_a é o quanto o campo se deforma próximo ao ponto alvo.

4.1.1.2 Força de Atração

$$\vec{F}_a(q) = -\nabla U_a(q) \quad (5)$$

$$\vec{F}_a(q) = - \left[\frac{\partial U_a}{\partial q_x} \hat{i} + \frac{\partial U_a}{\partial q_y} \hat{j} \right] \quad (6)$$

$$\vec{F}_a(q) = - [A_a \hat{i} + B_a \hat{j}] \quad (7)$$

Calculando A_a :

$$A_a = \frac{\partial}{\partial q_x} \left[\frac{1}{2}k_a \frac{1}{q_x^2 - 2q_x a_x + a_x^2 + q_y^2 - 2q_y a_y + a_y^2} \right] \quad (8)$$

$$A_a = \frac{1}{2}k_a \left[\frac{[(q_x - a_x)^2 + (q_y - a_y)^2](0) - (1)[2q_x - 2a_x]}{[(q_x - a_x)^2 + (q_y - a_y)^2]^2} \right] \quad (9)$$

$$A_a = \frac{1}{2}k_a \left[\frac{2a_x - 2q_x}{[(q_x - a_x)^2 + (q_y - a_y)^2]^2} \right] \quad (10)$$

Calculando B_a :

$$B_a = \frac{\partial}{\partial q_y} \left[\frac{1}{2} k_a \frac{1}{q_x^2 - 2q_x a_x + a_x^2 + q_y^2 - 2q_y a_y + a_y^2} \right] \quad (11)$$

$$B_a = \frac{1}{2} k_a \left[\frac{[(q_x - a_x)^2 + (q_y - a_y)^2](0) - (1)[2q_y - 2a_y]}{[(q_x - a_x)^2 + (q_y - a_y)^2]^2} \right] \quad (12)$$

$$B_a = \frac{1}{2} k_a \left[\frac{2a_y - 2q_y}{[(q_x - a_x)^2 + (q_y - a_y)^2]^2} \right] \quad (13)$$

4.1.1.3 Potencial Repulsivo

$$U_r(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_r \left(\frac{1}{d(q,o)} - \frac{1}{influ} \right)^2 & \text{se } d(q,o) \leq influ \\ 0 & \text{se } d(q,o) \geq influ \end{cases} \quad (14)$$

$$U_r(q) = \begin{cases} C_r & \text{se } d(q,o) \leq influ \\ 0 & \text{se } d(q,o) \geq influ \end{cases} \quad (15)$$

Onde k_r é o quanto o campo se deforma próximo ao ponto de obstáculo, $d(q,o)$ é a distância euclidiana do agente ao obstáculo e $influ$ é distância de influência do obstáculo.

Calculando C_r :

$$C_r = \frac{1}{2} k_r \left(\frac{1}{d(q,o)} - \frac{1}{influ} \right)^2 \quad (16)$$

$$C_r = \frac{1}{2} k_r \left(\frac{1}{\sqrt{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2}} - \frac{1}{influ} \right)^2 \quad (17)$$

$$C_r = \frac{1}{2} k_r \left[\frac{1}{(\sqrt{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2})^2} - \frac{2}{influ \sqrt{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2}} + \frac{1}{influ^2} \right] \quad (18)$$

$$C_r = \frac{1}{2} k_r \left[\frac{1}{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2} - \frac{2}{influ \sqrt{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2}} + \frac{1}{influ^2} \right] \quad (19)$$

4.1.1.4 Força de Repulsão

$$\vec{F}_r(q) = -\nabla U_r(q) \quad (20)$$

$$\vec{F}_r(q) = - \left[\frac{\partial U_r}{\partial q_x} \hat{i} + \frac{\partial U_r}{\partial q_y} \hat{j} \right] \quad (21)$$

$$\vec{F}_r(q) = - \left[\frac{\partial C_r}{\partial q_x} \hat{i} + \frac{\partial C_r}{\partial q_y} \hat{j} \right] \quad (22)$$

$$\vec{F}_r(q) = - [D_r \hat{i} + E_r \hat{j}] \quad (23)$$

Calculando D_r :

$$D_r = \frac{\partial}{\partial q_x} \left\{ \frac{1}{2} k_r \left[\frac{1}{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2} - \frac{2}{influ \sqrt{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2}} + \frac{1}{influ^2} \right] \right\} \quad (24)$$

$$D_r = \frac{1}{2} k_r \left[\frac{[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2](0) - (1)[-2o_x + 2q_x]}{[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^2} + \right. \\ \left. - \frac{2}{influ} \left(-\frac{1}{2[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^{\frac{3}{2}}} + 2q_x - 2o_x \right) \right] \quad (25)$$

$$D_r = \frac{1}{2} k_r \left[\frac{2o_x - 2q_x}{[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^2} + \frac{2}{influ} \left(\frac{1}{2[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^{\frac{3}{2}}} - 2q_x + 2o_x \right) \right] \quad (26)$$

Calculando E_r :

$$E_r = \frac{\partial}{\partial q_y} \left\{ \frac{1}{2} k_r \left[\frac{1}{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2} - \frac{2}{influ \sqrt{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2}} + \frac{1}{influ^2} \right] \right\} \quad (27)$$

$$E_r = \frac{1}{2} k_r \left[\frac{[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2](0) - (1)[-2o_y + 2q_y]}{[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^2} + \right. \\ \left. - \frac{2}{influ} \left(-\frac{1}{2[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^{\frac{3}{2}}} + 2q_y - 2o_y \right) \right] \quad (28)$$

$$E_r = \frac{1}{2} k_r \left[\frac{2o_y - 2q_y}{[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^2} + \frac{2}{influ} \left(\frac{1}{2[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^{\frac{3}{2}}} - 2q_y + 2o_y \right) \right] \quad (29)$$

4.1.1.5 Força Resultante

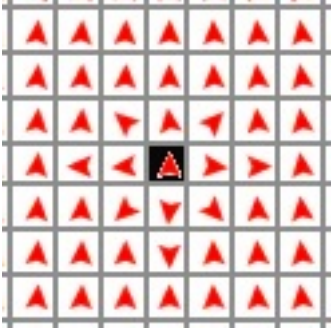
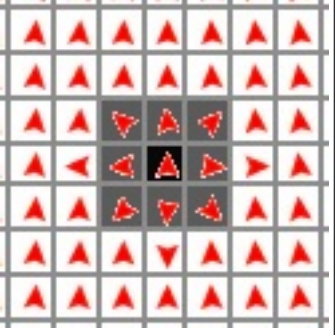
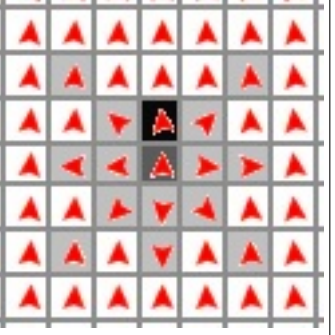
$$F(q) = \left(- \sum_{i=1}^n \vec{F}_{a_i}(q) \right) + \vec{F}_r(q) \quad (30)$$

4.1.2 Fumaça

O campo potencial do modelo é definido a partir de seus pontos atratores que são as portas de saída e um ponto repulsor que é a origem do incêndio. A fumaça é gerada no ponto de repulsão, ela inicia gradualmente e se movimenta conforme os vetores gerados pelo campo potencial, a Tabela 3 traz os passos da dispersão da fumaça. A dispersão da

fumaça é uma aproximação da Segunda lei de Fick (SERRA; VILLANI, 2008), onde as Leis de Fick são equações de transporte de massa por difusão, a segunda lei de Fick associado aos campos potenciais definem as regras utilizadas para usar os autômatos celulares.

Tabela 3: Dispersão da Fumaça

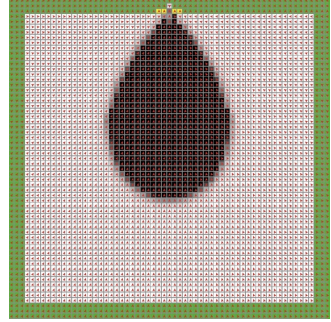
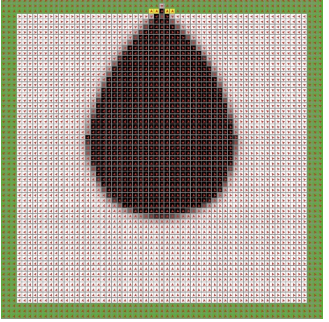
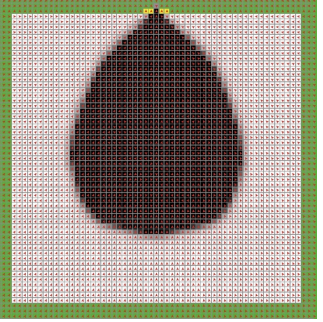
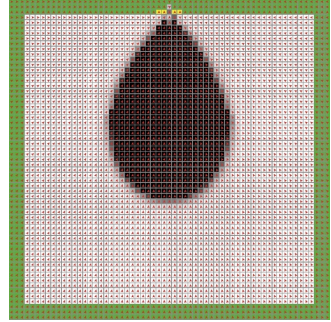
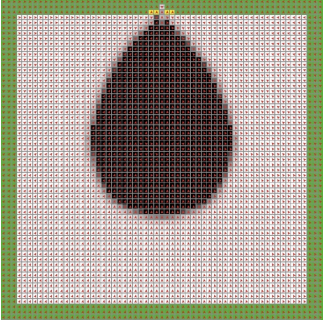
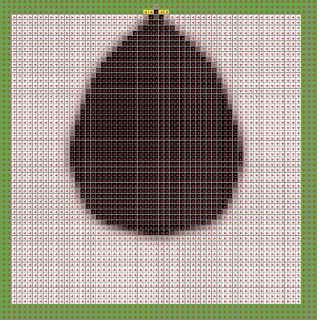
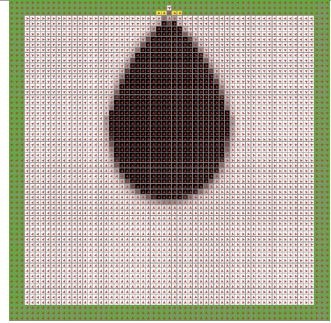
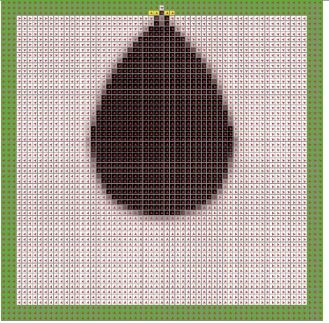
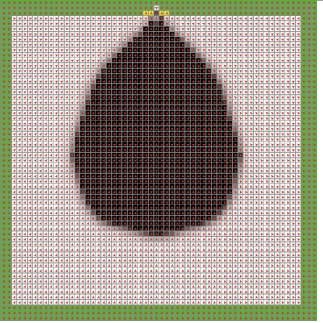
1	2	3
A cada tick é gerado fumaça no ponto inicial do incêndio, que é definido pelo usuário.	A fumaça espalha $\frac{1}{8}$ de sua intensidade para seus vizinhos (Vizinhança de Moore).	A fumaça dispersa metade ($\frac{1}{2}$) de sua intensidade para o patch que o seu vetor do campo potencial esta apontando.
		

A Tabela 4 mostra algumas simulações utilizando apenas uma porta e o foco da fumaça, variando os parâmetros Constante da Porta (k_a), Constante da Fumaça (k_r) e Influência da Fumaça ($influ$), parâmetros esses que fazem parte das equações do campo potencial. Analisando cada coluna da Tabela 4 é possível ver que não há uma alteração no tamanho da dispersão da fumaça variando os parâmetros k_a e k_r , mas ao analisar cada linha da Tabela 4 é possível ver que há uma alteração no tamanho da dispersão da fumaça variando o parâmetro $Influ$, com isso é possível dizer que a variável com maior relevância na formação da fumaça é a Influência da Fumaça.

Desta forma, foi escolhido para as simulações posteriores um valor médio para as variáveis. Com isso escolheu-se: Constante da Porta = 5, Constante da Fumaça = 5 e Influência da Fumaça = 5, como mostra a Tabela 5.

Após definir os valores dos parâmetros Constante da Porta, Constante da Fumaça e Influência da Fumaça, foi analisada a variação da quantidade de portas de saída para ver dispersão da fumaça em diferentes cenários. A Tabela 6 traz o comportamento da fumaça com uma porta, duas portas, três portas e quatro portas, nos ticks 11, 15, 21 e 25.

Tabela 4: Simulações com uma porta e o foco de fumaça, variando os parâmetros Constante da Porta k_a , Constante da Fumaça k_r e Influência da Fumaça $influ$

k_a	k_r	$influ$	k_a	k_r	$influ$	k_a	k_r	$influ$
1	1	1	1	1	5	1	1	10
								
k_a	k_r	$influ$	k_a	k_r	$influ$	k_a	k_r	$influ$
5	5	1	5	5	5	5	5	10
								
k_a	k_r	$influ$	k_a	k_r	$influ$	k_a	k_r	$influ$
10	10	1	10	10	5	10	10	10
								

4.2 A Evacuação De Multidões

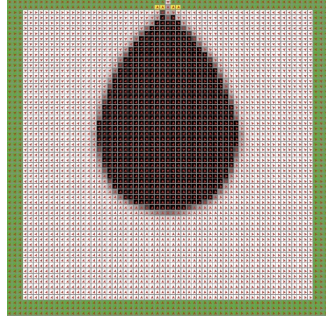
Para realizar o trabalho proposto, de simular uma situação de emergência com uma multidão de pessoas com a dispersão da fumaça, foi utilizado o software NetLogo para implementar o modelo.

4.2.1 NetLogo

O NetLogo é um ambiente de modelagem programável que simula fenômenos naturais e sociais. Ele modela sistemas utilizando agentes, onde os agentes são definidos como turtles. É possível dar instruções a milhares de agentes e todos eles agem de forma

Tabela 5: Simulação com uma porta e o foco de fumaça.

k_a	k_r	$influ$
5	5	5



independente. Sua linguagem de programação é o Logo, dialeto estendido para suportar agentes. A Figura 11 mostra a interface do software NetLogo.

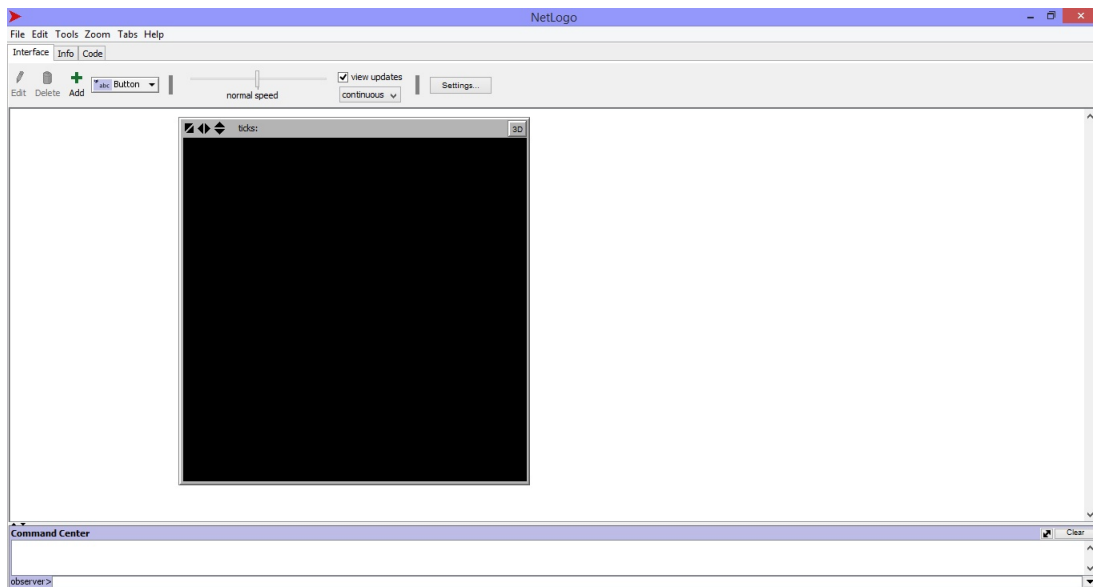
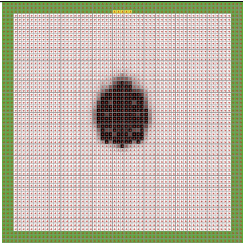
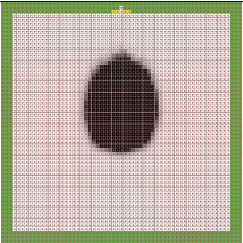
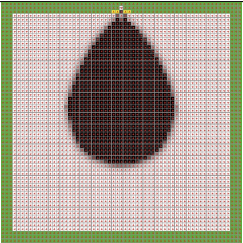
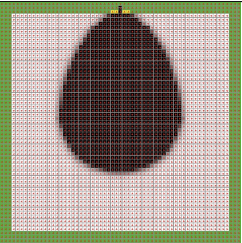
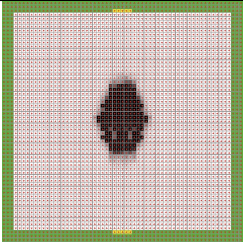
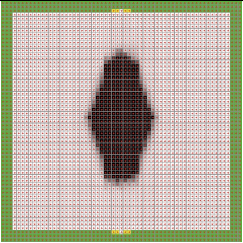
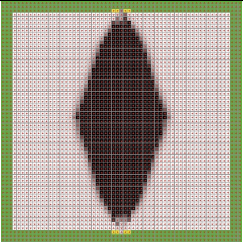
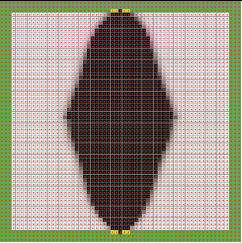
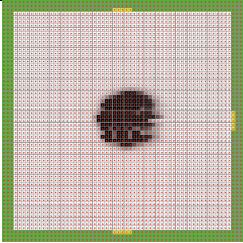
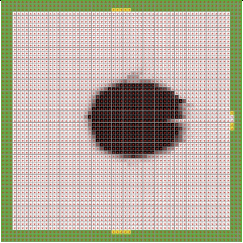
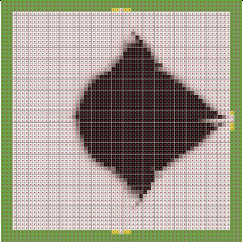
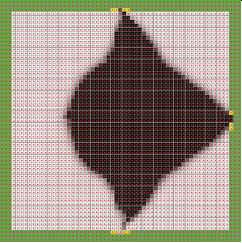
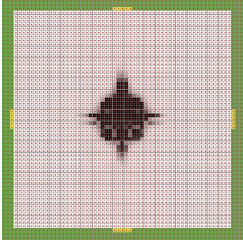
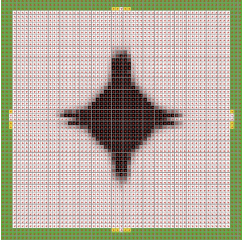
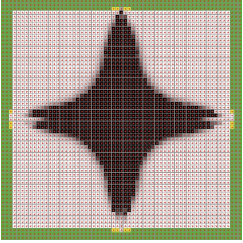
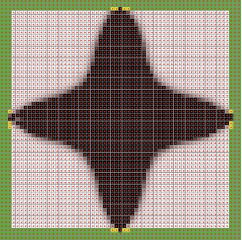


Figura 11: Interface do NetLogo.

O modelo Flocking, que faz parte da Biblioteca de Modelos do NetLogo, simula bandos de pássaros. Os pássaros são criadas em posições aleatórias (como mostra a Figura 12) e, ao iniciar a simulação, elas procuram outras aves próximas para voar junto. Com isso, os bandos são formados (Figura 13), mas não são criados ou conduzidos por aves líderes.

O Flocking utiliza em seu código as regras estudadas sobre simulações de vôo de aves, como se encontra em REYNOLDS (1987): Separação, Alinhamento e Coesão (Figura 14).

Tabela 6: Simulações com uma porta, duas portas, três portas e quatro portas, nos ticks 11, 15, 21 e 25.

Uma Porta			
11 Ticks	15 Ticks	21 Ticks	25 Ticks
			
Duas Portas			
11 Ticks	15 Ticks	21 Ticks	25 Ticks
			
Três Portas			
11 Ticks	15 Ticks	21 Ticks	25 Ticks
			
Quatro Portas			
11 Ticks	15 Ticks	21 Ticks	25 Ticks
			

4.2.2 Modelagem Comportamental

Têm-se dois algoritmos como base para o novo modelo: o Modelo Flocking e o Modelo de SILVEIRA (2015). O Modelo Flocking é utilizado, pois em sua estrutura ele modela os parâmetros Separação, Alinhamento e Coesão, que faz as pessoas formarem grupos, ou seja, se movimentem de forma coordenada. O Modelo de SILVEIRA (2015)

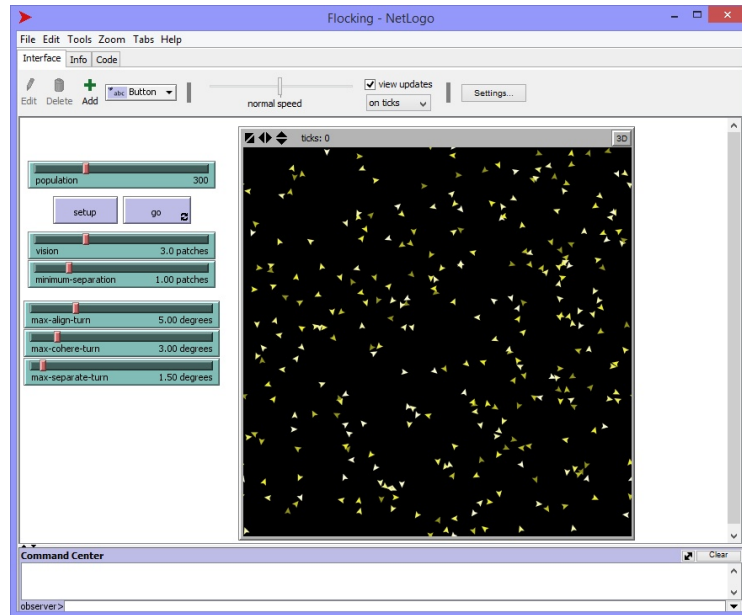


Figura 12: Modelo Flocking: Aves voando de forma aleatória.

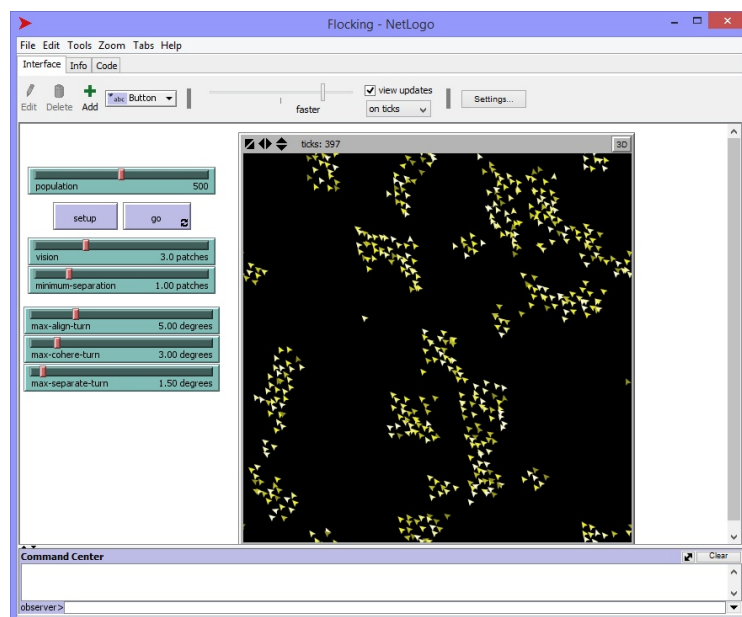


Figura 13: Modelo Flocking: Aves voando em bandos.

é um programa de evacuação de pessoas, onde é criado um ambiente com uma multidão e ao iniciar a simulação as pessoas saem pela porta mais próxima utilizando a Distância Euclidiana em relação as portas. No programa é possível ajustar o número de portas (entre [1;4]), o tamanho das portas (entre [1;5] patches) e o número de pessoas (entre [1;1000] pessoas).

O código faz o cálculo da distância de cada porta com cada agente identificando assim qual é a porta mais próxima do agente em questão. A Figura 15 mostra a interface do programa.

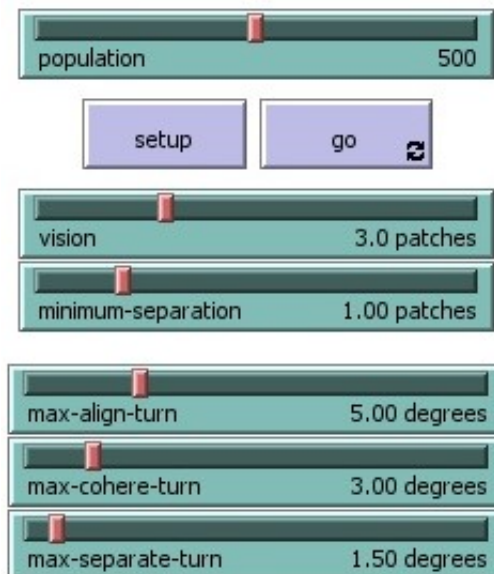


Figura 14: Modelo Flocking: Regras Comportamentais.

Com base nos dois modelos, Modelo Flocking e o Modelo de SILVEIRA (2015), foi criado um novo modelo de evacuação de pessoas onde o ambiente tem uma configuração quadrada, com dimensões de 61x61 patches e possui um foco de início de fumaça. No ambiente há também portas de saída e podem ter de [1;4] portas e sua largura pode variar de [1;5] patches. No ambiente modelado as pessoas são criadas em posições aleatórias e se deslocam de forma randômica até reconhecer a fumaça.

Quando isso acontece, os agentes identificam a saída mais próxima, calculada pela distância euclidiana, e se dirigem a ela. Ao se dirigirem para as portas, o modelo traz duas configurações onde é possível ter ou não o agrupamento das pessoas, no caso da formação de grupos, as pessoas utilizam as regras comportamentais definidas por REYNOLDS (1987), Separação, Alinhamento e Coesão, além disso, é possível determinar se as pessoas terão ou não a capacidade de se comunicarem entre si de que há fumaça no ambiente.

4.2.3 Interface

Para realizar as simulações do trabalho as implementações foram feitas no software NetLogo. Na interface do programa (Figura 16) tem-se parâmetros, monitores e o mundo.

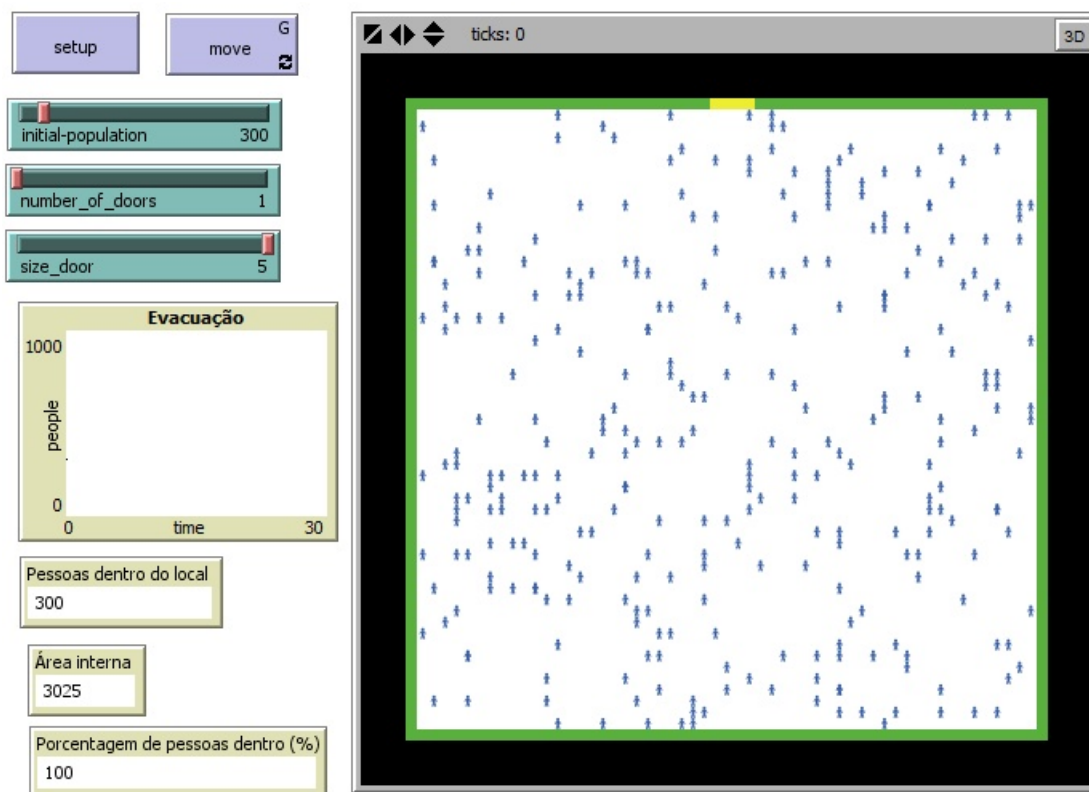


Figura 15: Modelo de Evacuação de Pessoas (Original)(SILVEIRA, 2015).

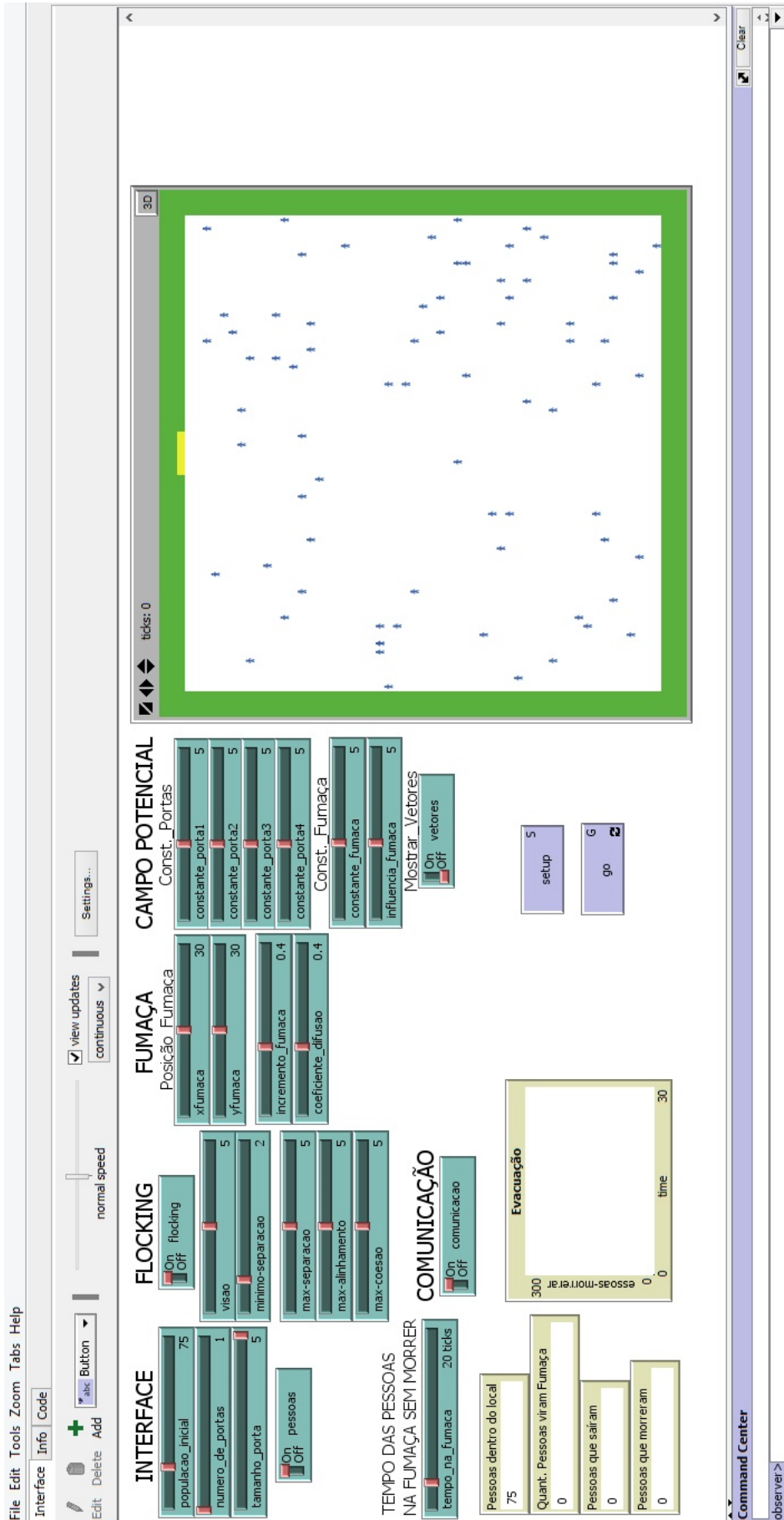


Figura 16: Interface do Modelo

Parâmetros:

- Interface:

- populacao_inicial: define a população inicial entre 1 pessoa a 1000 pessoas no ambiente (são criadas na cor azul);
- numero_de_portas: é possível escolher a quantidade de portas entre 1 a 4 portas no ambiente (elas são de cor amarela);
- tamanho_porta: é possível escolher o tamanho das portas entre 1 a 5 patches;
- pessoas: se pessoas **on** teremos as pessoas na simulação, mas se pessoas **off**, então não teremos as pessoas na simulação (que é útil quando deseja-se analisar somente o comportamento da fumaça no ambiente).

- Pessoas:

- tempo_na_fumaca: define-se o tempo (em ticks) que as pessoas podem ficar na fumaça sem morrerem, quando atingir o tempo máximo o agente morre. Esse parâmetro pode ser configurado pensando nos diferentes produtos (mais ou menos tóxicos) que podem estar sendo queimados no ambiente.

- Flocking:

- flocking: se flocking **on** as pessoas saíam em grupos quando identificaram a fumaça, mas se flocking **off** as pessoas não saíam ordenadas.
- visao: os agentes possuem um campo de visão em forma de cone como mostra a Figura 17, eles só enxergam o que está dentro desse campo de visão, sejam outros agentes, seja a fumaça ou as saídas.

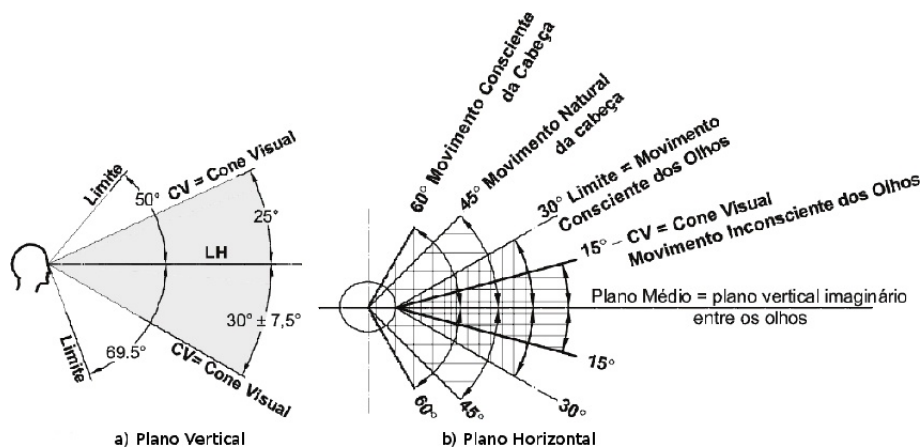


Figura 17: Visão do Agente (SILVA; SCHOLL; ADAMATTI, 2017)

- minimo-separacao, max-separacao, max-alinhamento, max-coesao: são parâmetros do flocking.

- Comunicação:

- comunicacao: se comunicacao **on** as pessoas ao identificarem a fumaça avisam os vizinhos, que estão dentro do seu campo de visão, que há fumaça, se comunicacao **off** as pessoas não avisam os vizinhos sobre a fumaça;

- Fumaça:

- xfumaca e yfumaca: é a posição onde a fumaça será iniciada e pode ser em qualquer lugar do ambiente. Nas Tabelas 4, 5 e 6 a fumaça começou no ponto $xfumaca=30$ e $yfumaca=30$;
- incremento_fumaca: é quanto de fumaça será gerado a cada tick. Nas Tabelas 4, 5 e 6 o incremento_fumaca foi 0.4;
- coeficiente_difusao: quanto a fumaça irá difundindo sua intensidade.

- Campo Potencial:

- constante_porta1, constante_porta2, constante_porta3, constante_porta4: são as constantes relacionada a cada porta. Nas Tabelas 4, 5 e 6 foi configurado $constante_porta1=5$, $constante_porta2=5$, $constante_porta3=5$ e $constante_porta4=5$.
- constante_fumaca e influencia_fumaca: são as constantes relacionadas a fumaça. Nas Tabelas 4, 5 e 6 foi configurado $constante_fumaca=5$ e $influencia_fumaca=5$.

Monitores:

- Pessoas dentro do local: mostra durante a simulação quantas pessoas estão dentro do ambiente.
- Quant. Pessoas viram Fumaça: mostra a quantidade de pessoas (que estão dentro do ambiente) que já sabem que tem fumaça.
- Pessoas que saíram: mostra a quantidade de pessoas que conseguiu sair do ambiente.
- Pessoas que morreram: mostra a quantidade de pessoas que morreram por ficar muito tempo na fumaça.
- Evacuação: gráfico que mostra a quantidade de pessoas que morreram com o passar do tempo.

Mundo (World): é um ambiente quadrangular dividido em quadrados chamados de patches que possuem coordenadas inteiras. O mundo, do modelo, é composto de um grid de 61x61 patches, e o centro (coordenada (0,0)) localiza-se no canto inferior esquerdo. No mundo temos: paredes (verde), portas (amarelo), agentes (azul) e a fumaça (tons de preto). Na simulação da fumaça, podemos ou não ter os agentes (como mostra a Figura 18), assim como podemos ou não ver os vetores do campo potencial (como mostra a Figura 19).

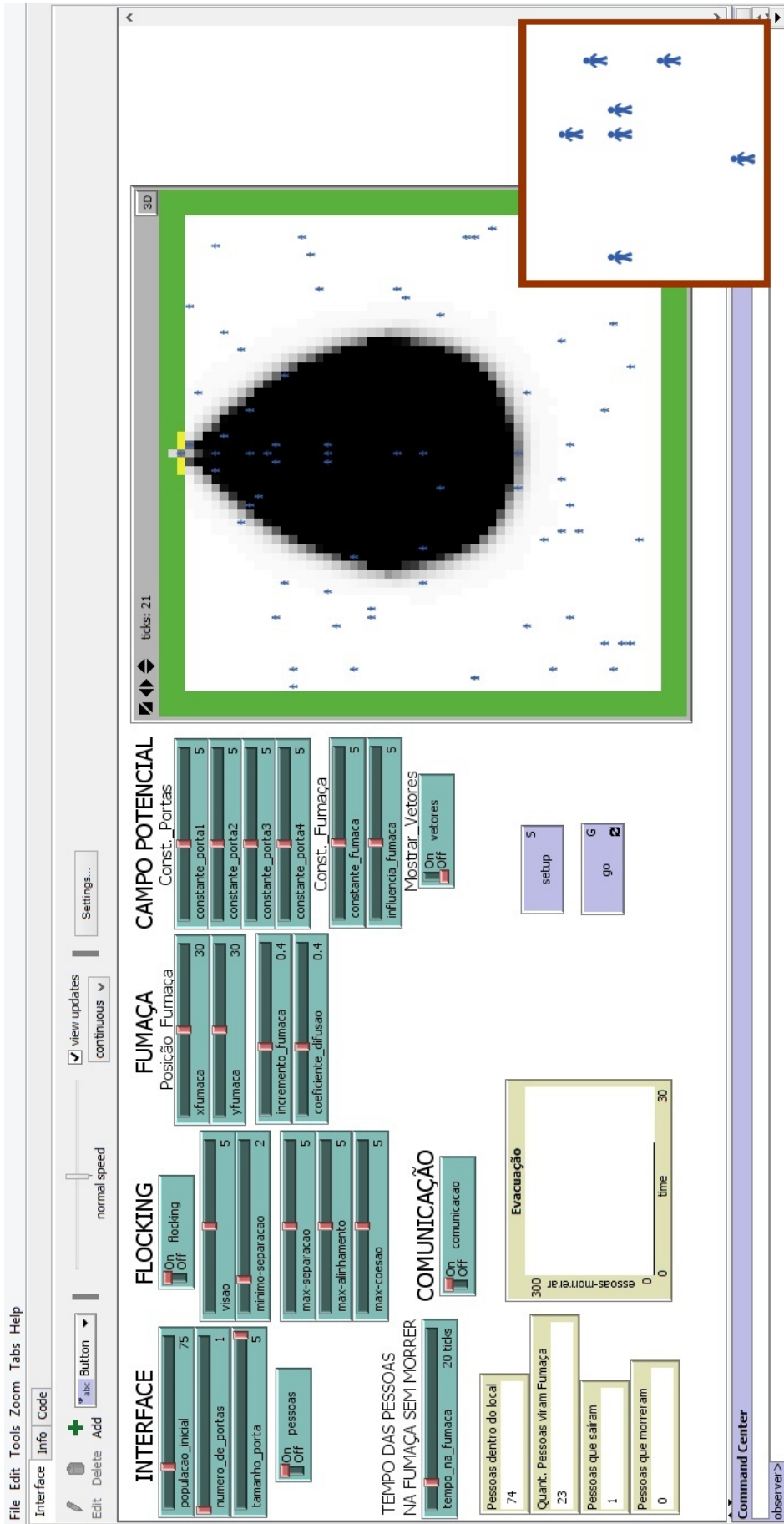


Figura 18: Interface do Modelo com fumaça, com os agentes e sem os vetores do campo potencial.

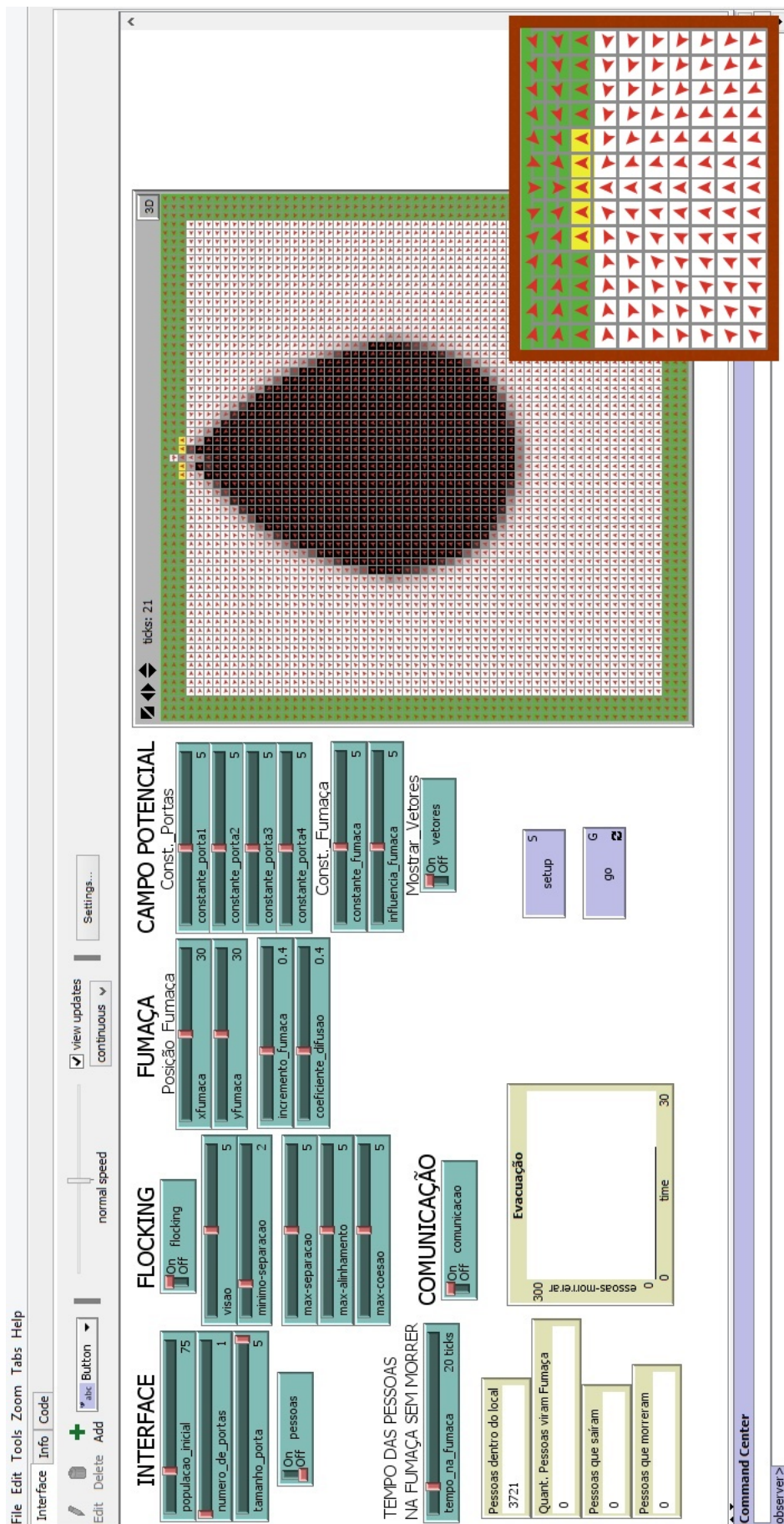


Figura 19: Interface do Modelo com fumaça, sem os agentes e com os vetores do campo potencial.

4.3 Parâmetros Utilizados

O novo modelo traz parâmetros com valores fixos e parâmetros que foram variados os seus valores. A Tabela 7 mostra os valores para os parâmetros fixos e a Tabela 8 mostra os valores que foram usados para os parâmetros variáveis. Os tamanhos da população no ambiente foram escolhidos para que houvesse um aumento gradual gradual para facilitar a análise dos resultados. Para cada configuração de valores foram realizadas cinco simulações e depois obteve-se a média, o desvio padrão e a porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação a quantidade inicial de pessoas no ambiente. Os valores obtidos nas simulações serão apresentados no próximo capítulo.

Tabela 7: Parâmetros Fixos

Parâmetro	Valor
tamanho_portas	5
peessoas	on
tempo_na_fumaca	20 ticks
visao	5
minimo-separacao	2
max-separacao	7
max-alinhamento	7
max-coesao	7
xfumaca	30
yfumaca	30
incremento_fumaca	0,4
coeficiente_difusao	0,4
constante_porta1	5
constante_porta2	5
constante_porta3	5
constante_porta4	5
constante_fumaca	5
influencia_fumaca	5
vetores	off

Tabela 8: Parâmetros Variados

Parâmetro	Valores
populacao_inicial	10 agentes, 35 agentes, 75 agentes, 150 agentes, 300 agentes e 600 agentes.
numero_de_portas	um porta, duas portas, três portas e quatro portas.
flocking	on e off.
comunicacao	on e off.

HELBING; FARKAS; VICSEK (2000) em seu trabalho notou que quando há um grande número de pessoa querendo passar por uma saída, ocorre o fenômeno chamado bloqueio em forma de arco, como mostra a Figura 20. Esse fenômeno também é possível notar neste trabalho, como mostra a Figura 21. Acontece pois são muitas pessoas querendo sair em poucas portas, sendo essas saídas de tamanhos menores que o sugerido pela ABNT: NBR 9077 - SAÍDAS DE EMERGÊNCIA EM EDIFÍCIOS (2001).

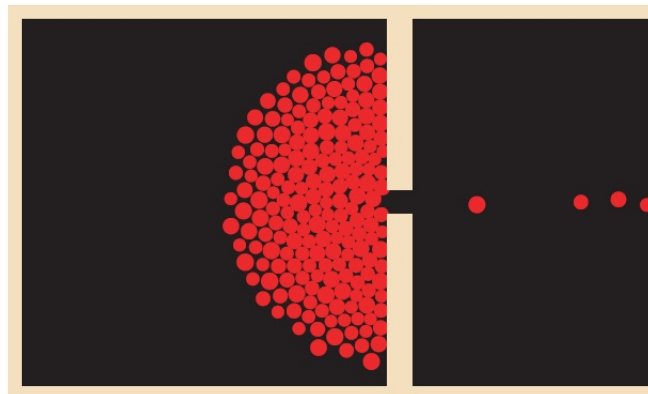


Figura 20: Bloqueio em forma de arco (HELBING; FARKAS; VICSEK, 2000).

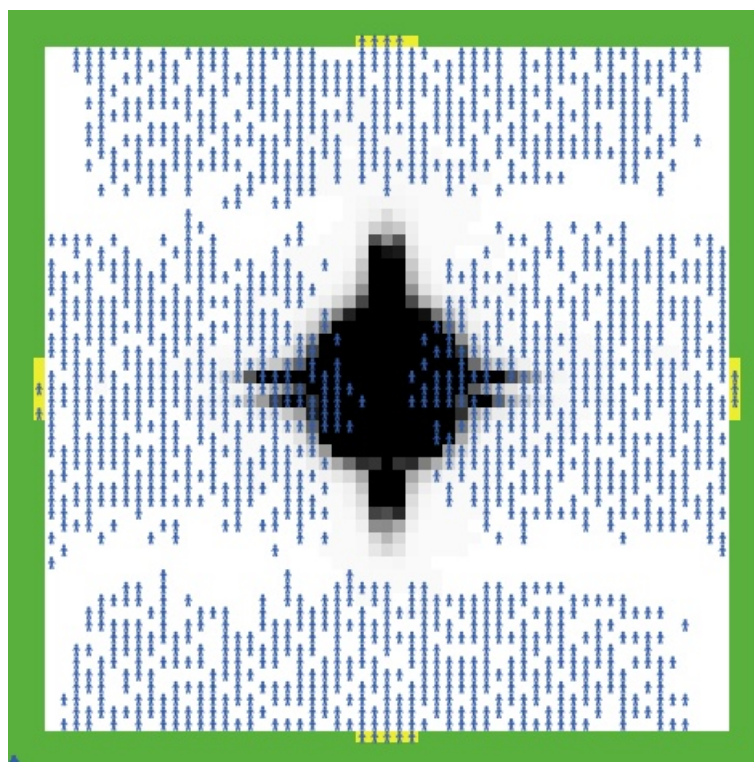


Figura 21: Bloqueio em forma de arco, com 2000 pessoas no ambiente e apenas 4 portas de saída.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos das simulações descritas na Seção 4.3, com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros do modelo Flocking e da comunicação em uma situação de emergência, com diferentes populações de pessoas em um ambiente.

Nas Tabelas 9, 10, 11, 12, 13 e 14 encontram-se os valores obtidos das simulações.

Análise das Tabelas 9, 10, 11, 12, 13 e 14

- **Análise Geral:**

A norma brasileira NBR 9.077 (ABNT: NBR 9077 - SAÍDAS DE EMERGÊNCIA EM EDIFÍCIOS, 2001), estabelece padrões de segurança contra incêndio para saídas de emergência em edifícios. SILVA; SCHOLL; ADAMATTI (2017) verificou, em seu trabalho, que aplicando a NBR 9.077 em um edifício, considerando uma situação de emergência, torna a evacuação consideravelmente mais efetiva. É possível também verificar, neste trabalho, que quanto mais portas, menor é o percentual de mortos.

- **População de 10 agentes (Tabela 9):**

Os valores de saída e de morte das pessoas não são muito diferentes nos casos com os parâmetros do flocking e nem com a possibilidade de comunicação, ou seja, nem o flocking nem a comunicação fizeram diferença nos resultados. O motivo é que o ambiente é muito grande, com isso as pessoas demoram para se comunicarem e não conseguem se coordenar. Um exemplo que podemos ver na Tabela 9, quando temos duas portas, sem flocking e sem comunicação saíram 70% das pessoas, enquanto que com flocking e com comunicação saíram 56% das pessoas.

- **População de 35 agentes (Tabela 10):**

Com três ou quatro portas, sem os parâmetros do flocking e com comunicação os valores de pessoas que saíram foi melhor, mas como é uma população pequena as pessoas ainda estão muito longe umas das outras para poderem se coordenar. Um

Tabela 9: Simulações - População **10 agentes** (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)

População 10 agentes												
	Com Flocking						Sem Flocking					
	Com Comunicação			Sem Comunicação			Com Comunicação			Sem Comunicação		
Quantidade de Portas: 1												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	3,6	1,95	36%	2,6	2,41	26%	2,0	2,00	20%	4,0	1,41	40%
M	5,8	2,17	58%	7,4	2,41	74%	8,0	2,00	80%	6,0	1,41	60%
Ticks	71,4	2,88	-	68,6	6,50	-	72,2	7,73	-	69,2	7,40	-
Quantidade de Portas: 2												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	5,6	2,51	56%	5,0	1,22	50%	5,8	1,10	58%	7,0	1,87	70%
M	4,4	2,51	44%	5,0	1,22	50%	4,2	1,10	42%	3,0	1,87	30%
Ticks	71,2	3,70	-	72,6	6,95	-	70,6	5,03	-	70,4	4,10	-
Quantidade de Portas: 3												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	6,8	1,79	68%	6,2	1,92	62%	7,2	1,64	72%	5,8	1,30	58%
M	3,2	1,79	32%	3,8	1,92	38%	2,8	1,64	28%	4,2	1,30	42%
Ticks	66,0	11,55	-	71,6	4,93	-	66,4	4,77	-	69,0	8,37	-
Quantidade de Portas: 4												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	8,6	0,55	86%	8,0	1,22	80%	8,0	1,22	80%	8,4	0,89	84%
M	1,4	0,55	14%	2,0	1,22	20%	2,0	1,22	20%	1,6	0,89	16%
Ticks	60,2	8,47	-	70,2	12,36	-	70,4	3,71	-	69,0	6,20	-

exemplo, que podemos ver na Tabela 10, quando temos quatro portas, sem flocking e com comunicação saíram 83% das pessoas, enquanto que com flocking e com comunicação saíram 81% das pessoas.

- População de 75 agentes (Tabela 11):

É possível dizer que os parâmetros do flocking tem sua importância na saída das pessoas. Com poucas portas (uma, duas e três portas) sem o flocking e sem comunicação obteve-se o pior resultado, mostrando que o egoísmo não funciona. Um exemplo, que podemos ver na Tabela 11, quando temos duas portas, sem flocking e sem comunicação saíram 62% das pessoas, enquanto que com flocking e com comunicação saíram 68% das pessoas.

- População de 150 agentes (Tabela 12):

Sem os parâmetros do flocking e com comunicação os valores de pessoas que saíram são um pouco melhores. Nas simulações com comunicação os resultados de saída das pessoas são melhores, com isso entende-se que a comunicação tem mais

Tabela 10: Simulações - População **35 agentes** (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)

População 35 agentes												
	Com Flocking						Sem Flocking					
	Com Comunicação			Sem Comunicação			Com Comunicação			Sem Comunicação		
Quantidade de Portas: 1												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	10,8	4,27	31%	10,2	1,30	29%	7,6	1,82	22%	11,4	2,88	33%
M	24,2	4,27	69%	24,8	1,40	71%	27,4	1,82	78%	23,6	2,88	67%
Ticks	77,4	3,78	-	80,0	4,64	-	78,8	2,59	-	79,6	4,28	-
Quantidade de Portas: 2												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	23,0	1,87	66%	21,8	3,42	62%	20,2	2,49	58%	20,2	3,03	58%
M	12,8	1,64	37%	13,2	3,42	38%	14,8	2,49	42%	14,8	3,03	42%
Ticks	77,0	2,55	-	74,0	4,64	-	73,8	3,19	-	76,0	3,08	-
Quantidade de Portas: 3												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	22,6	2,41	65%	20,8	2,39	59%	23,2	1,92	66%	22,0	5,29	63%
M	12,4	2,41	35%	14,2	2,39	41%	11,8	1,92	34%	13,0	5,29	37%
Ticks	75,4	4,16	-	79,0	6,12	-	76,0	4,30	-	77,2	3,27	-
Quantidade de Portas: 4												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	28,4	2,07	81%	29,6	2,30	85%	29,2	2,59	83%	27,8	1,10	79%
M	6,6	2,07	19%	5,4	2,30	15%	5,8	2,59	17%	7,2	1,10	21%
Ticks	79,4	5,18	-	77,4	5,55	-	77,2	5,63	-	78,8	4,44	-

impacto na evacuação as pessoas. Um exemplo, que podemos ver na Tabela 12, quando temos três portas, sem flocking e com comunicação saíram 63% das pessoas, enquanto que com flocking e com comunicação saíram 61% das pessoas.

- População de 300 agentes (Tabela 13):

Realizando as simulações com flocking não foram obtidos resultados muito relevantes em nenhum dos cenários. Nota-se que os melhores resultados são quando tem-se comunicação entre as pessoas. Um exemplo, que podemos ver na Tabela 13, quando temos uma porta, sem flocking e com comunicação saíram 30% das pessoas, enquanto que sem flocking e sem comunicação saíram 26% das pessoas.

- População de 600 agentes (Tabela 14):

Nas simulações quando tem-se muitas pessoas no ambiente obteve-se melhores resultados quando temos quatro portas e com os parâmetros do flocking e sem comunicação. Um exemplo, que podemos ver na Tabela 14, quando temos quatro portas, com flocking e sem comunicação saíram 61% das pessoas, enquanto que

Tabela 11: Simulações - População **75 agentes** (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)

População 75 agentes												
	Com Flocking						Sem Flocking					
	Com Comunicação			Sem Comunicação			Com Comunicação			Sem Comunicação		
Quantidade de Portas: 1												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	23,8	2,86	32%	31,0	14,58	41%	23,8	2,95	68%	22,0	3,54	29%
M	51,2	2,86	68%	50,0	1,58	67%	51,2	2,95	68%	53,0	3,54	71%
Ticks	81,2	2,17	-	78,0	3,16	-	78,2	2,39	-	77,6	2,10	-
Quantidade de Portas: 2												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	50,8	2,59	68%	48,6	1,95	65%	51,8	3,42	69%	46,8	2,59	62%
M	24,2	2,59	32%	26,4	1,95	35%	23,2	3,42	31%	27,4	1,52	37%
Ticks	78,6	1,67	-	79,6	1,34	-	78,0	2,35	-	79,6	1,34	-
Quantidade de Portas: 3												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	45,6	5,08	61%	47,0	4,06	63%	45,6	2,88	61%	44,2	4,21	59%
M	29,4	5,08	39%	28,0	4,06	37%	29,4	2,88	39%	30,8	4,21	41%
Ticks	83,6	2,61	-	82,4	3,05	-	81,6	1,67	-	79,6	2,70	-
Quantidade de Portas: 4												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	61,6	2,51	82%	58,0	2,65	77%	61,0	2,14	81%	61,0	4,18	81%
M	13,6	2,61	18%	17,0	2,65	23%	14,0	2,24	19%	14,0	4,18	19%
Ticks	79,0	4,18	-	80,4	5,41	-	82,2	1,30	-	77,4	2,51	-

com flocking e com comunicação saíram 52% das pessoas.

5.1 Comparação com Trabalhos Existentes

ZHENG et al. (2017), em seu trabalho, simula a dinâmica de evacuação de pedestres com a influência do fogo e a dispersão da fumaça. Como a dispersão da fumaça é de cima para baixo, fica cada vez menos espaço para as pessoas caminharem no ambiente de forma normal. Então, ZHENG et al. (2017) considera três formas de movimento para as pessoas: (1) Caminhada normal; (2) Caminhada curvada; e (3) Engatinhar. A Figura 22 mostra a simulação realizada, onde, no meio da sala acontece o fogo, na cor vermelha; a fumaça em tons de cinza, sendo o cinza mais forte onde a fumaça é mais espessa; na cor azul são as pessoas andando de forma normal; na cor verde, as pessoas que andam curvadas; na cor ciano, as pessoas que estão engatinhando; e possuindo duas portas de evacuação na parede esquerda da sala.

Utilizando o novo modelo para representar a da fumaça gerada na simulação de

Tabela 12: Simulações - População **150 agentes** (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)

População 150 agentes												
	Com Flocking						Sem Flocking					
	Com Comunicação			Sem Comunicação			Com Comunicação			Sem Comunicação		
Quantidade de Portas: 1												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	44,0	2,65	29%	44,0	1,2	29%	48,0	5,79	32%	43,4	5,08	29%
M	106,0	2,65	71%	106,0	71	%	102,0	5,79	68%	106,6	5,08	71%
Ticks	79,4	4,34	-	82,2	1,64	-	80,2	1,30	-	82,4	2,19	-
Quantidade de Portas: 2												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	98,8	3,90	66%	93,4	4,16	62%	101,4	5,13	68%	93,0	2,74	62%
M	51,2	3,90	34%	56,6	4,16	38%	48,6	5,13	32%	57,0	2,74	38%
Ticks	79,0	1,00	-	79,0	2,00	-	78,6	1,52	-	78,2	0,84	-
Quantidade de Portas: 3												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	92,0	2,55	61%	90,8	10,40	61%	94,0	2,55	63%	90,4	3,58	60%
M	58,0	2,55	39%	59,2	10,40	39%	56,0	2,55	37%	59,6	3,58	40%
Ticks	80,6	2,88	-	81,8	1,48	-	79,4	1,67	-	79,6	1,52	-
Quantidade de Portas: 4												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	121,4	6,27	81%	123,8	3,11	83%	122,6	5,64	82%	115,6	5,94	77%
M	28,6	6,27	19%	26,2	3,11	17%	27,4	5,64	18%	34,4	5,94	23%
Ticks	78,4	4,39	-	82,2	1,10	-	81,0	1,58	-	83,6	2,07	-

ZHENG et al. (2017), obtêm-se a Figura 23, onde a fumaça é representada em tons de cinza, quanto mais escuro, mais espessa a fumaça é; duas portas na parede esquerda na cor amarela; e os vetores do campo potencial na cor vermelha.

Em seu artigo, LUNA (2014) simula em tempo real o escoamento em grande escala de fumaça ou gás em grandes ambientes para uma dada configuração de obstáculo e um campo de vento. A Figura 24 mostra a sequência de imagens do vento laminar com coeficiente de difusão de 0.2.

Utilizando o novo modelo para representar a simulação de LUNA (2014), obtêm-se a Figura 25, onde mostra-se a sequência de imagens da fumaça com coeficiente de difusão de 0.2.

5.2 Considerações Finais

Depois de analisar as Tabelas 9, 10, 11, 12, 13 e 14, é importante destacar que para as populações analisadas os parâmetros do modelo flocking definidos por REYNOLDS

Tabela 13: Simulações - População **300 agentes** (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)

População 300 agentes												
	Com Flocking						Sem Flocking					
	Com Comunicação			Sem Comunicação			Com Comunicação			Sem Comunicação		
Quantidade de Portas: 1												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	89,0	9,19	30%	78,8	8,26	26%	88,8	8,84	30%	79,2	3,83	26%
M	211,0	9,19	70%	221,2	8,26	74%	211,2	8,84	70%	220,8	3,83	74%
Ticks	82,4	1,67	-	82,6	1,14	-	81,4	1,82	-	83,0	2,35	-
Quantidade de Portas: 2												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	183,0	8,46	61%	163,2	7,79	54%	184,2	8,04	61%	166,8	7,46	56%
M	117,0	8,46	39%	136,8	7,79	46%	115,8	8,04	39%	133,2	7,46	44%
Ticks	78,6	2,97	-	80,2	0,84	-	76,8	3,27	-	79,8	1,79	-
Quantidade de Portas: 3												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	181,4	8,62	60%	170,2	11,56	57%	171,2	4,66	57%	169,2	6,98	56%
M	118,6	8,62	40%	129,8	11,56	43%	128,8	4,66	43%	130,8	6,98	44%
Ticks	80,8	3,56	-	80,8	1,79	-	80,0	2,00	-	83,6	1,67	-
Quantidade de Portas: 4												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	230,6	6,73	77%	219,8	4,71	73%	232,8	6,10	78%	221,6	5,94	74%
M	69,4	6,73	23%	80,2	4,71	27%	67,2	6,10	22%	78,4	5,94	26%
Ticks	80,2	1,92	-	84,2	0,45	-	81,8	1,10	-	83,2	1,30	-

(1987) não tiveram muita influência na porcentagem de pessoas vivas na evacuação do ambiente, mas quando este comportamento é habilitado as pessoas demoravam menos tempo para sair, pois elas saiam de forma mais ordenada do ambiente. Ter ou não a comunicação entre as pessoas teve mais influência nas porcentagens de vivos nas simulações. Quando a comunicação é habilitada na simulação as pessoas ao identificar a fumaça além de buscarem a porta mais próxima para saírem elas avisavam para seus vizinhos sobre a situação de emergência e com isso as pessoas no ambiente sabendo com antecedência sobre a fumaça evacuam mais rapidamente.

Pode-se perceber que o ambiente desenvolvido pode modelar outros cenários, como os apresentados pelos trabalhos de (ZHENG et al., 2017) e (LUNA, 2014) de forma bastante satisfatória, mostrando que a abordagem adotada, com o uso de campos potenciais para dispersão de fumaça, é bastante robusta.

Tabela 14: Simulações - População **600 agentes** (S - Pessoas que Saíram; M - Pessoas que Morreram; \bar{x} - Média; σ - Desvio Padrão; % - Porcentagem de pessoas que saíram ou morreram em relação ao total de pessoas.)

População 600 agentes												
	Com Flocking						Sem Flocking					
	Com Comunicação			Sem Comunicação			Com Comunicação			Sem Comunicação		
Quantidade de Portas: 1												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	103,8	7,66	17%	103,0	3,39	17%	106,8	9,58	18%	101,8	3,83	17%
M	498,0	6,52	83%	497,0	3,39	83%	493,2	9,58	82%	497,8	4,21	83%
Ticks	77,2	3,42	-	83,6	1,34	-	75,8	3,56	-	83,6	1,14	-
Quantidade de Portas: 2												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	193,4	48,28	32%	224,4	6,50	37%	218,6	12,44	36%	232,8	8,17	39%
M	406,6	48,28	68%	375,6	6,50	63%	361,4	51,72	60%	367,2	8,17	61%
Ticks	72,2	11,28	-	79,8	0,84	-	75,2	5,54	-	81,0	1,00	-
Quantidade de Portas: 3												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	253,8	8,07	42%	271,0	7,25	45%	246,6	49,08	41%	271,2	22,11	45%
M	346,2	8,07	58%	306,0	46,29	51%	333,4	13,39	56%	321,6	6,50	54%
Ticks	74,2	8,38	-	84,4	1,34	-	77,0	9,64	-	84,0	0,71	-
Quantidade de Portas: 4												
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	311,2	6,42	52%	368,6	8,73	61%	315,2	10,18	53%	359,6	8,08	60%
M	288,8	6,42	48%	231,4	8,73	39%	284,8	10,18	47%	240,4	8,08	40%
Ticks	70,4	10,64	-	85,0	1,87	-	71,0	13,34	-	85,0	0,71	-

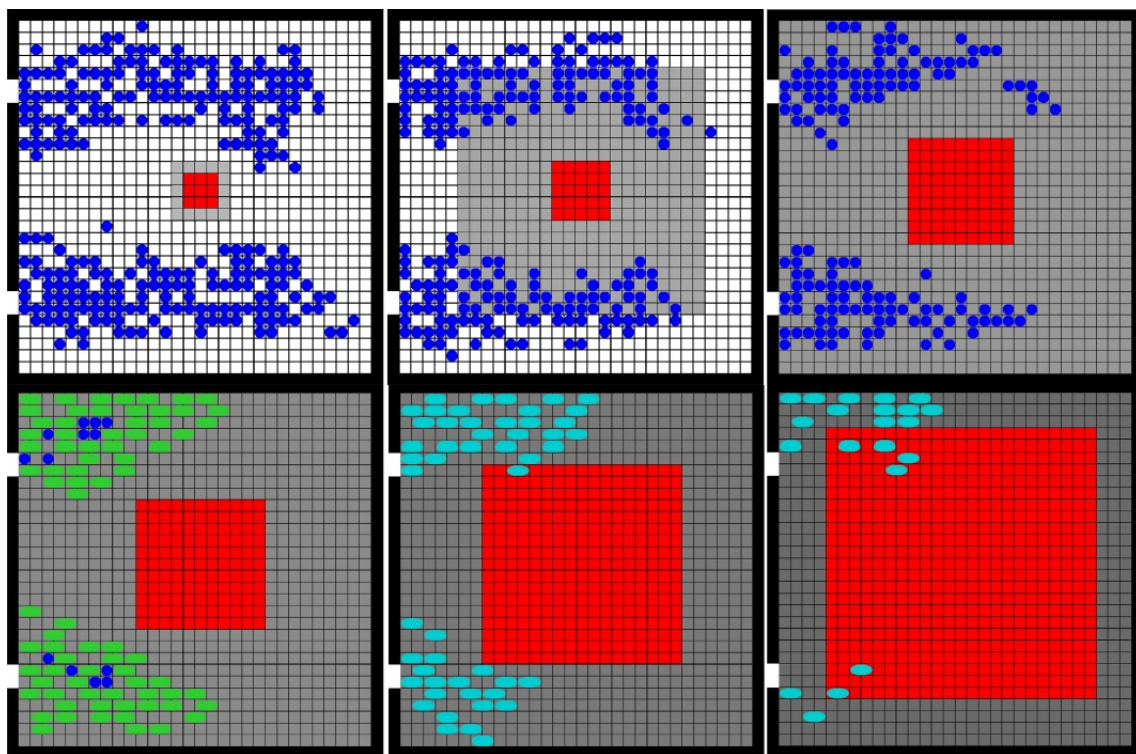


Figura 22: Simulação de ZHENG et al. (2017).

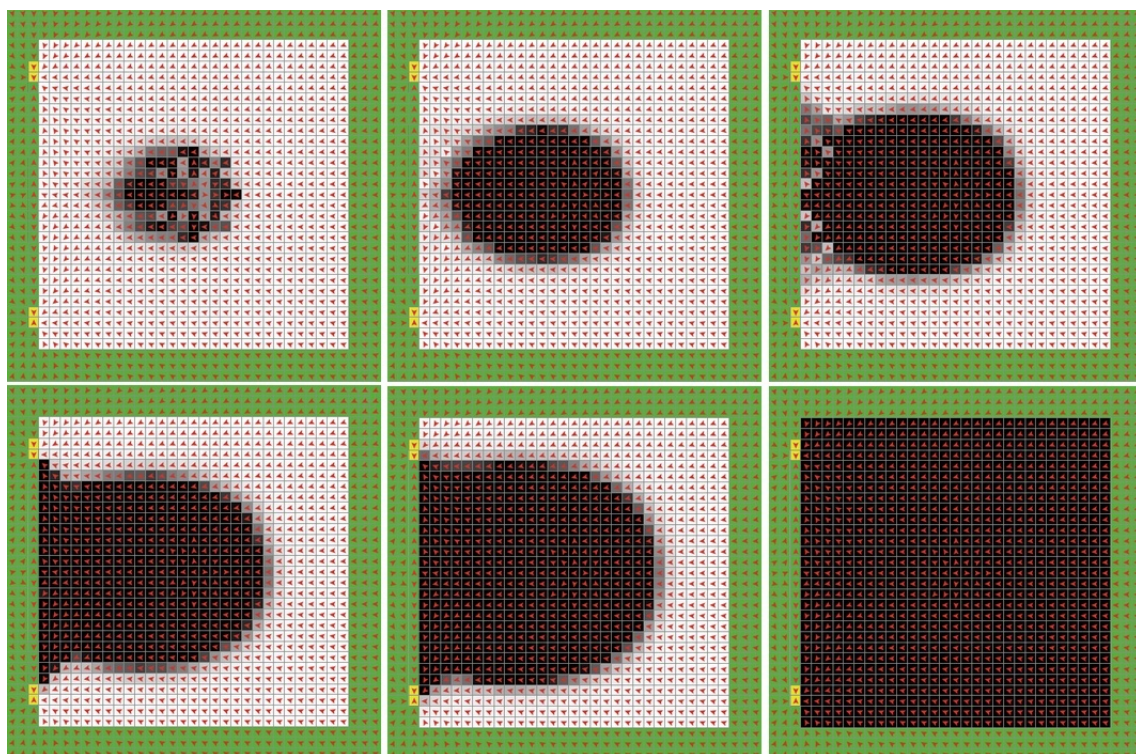


Figura 23: Simulação da fumaça de ZHENG et al. (2017) no novo modelo.

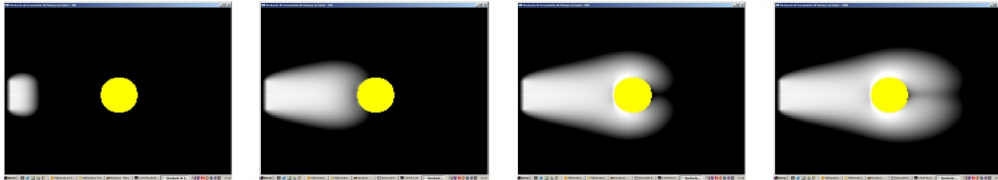


Figura 24: Simulação de LUNA (2014).

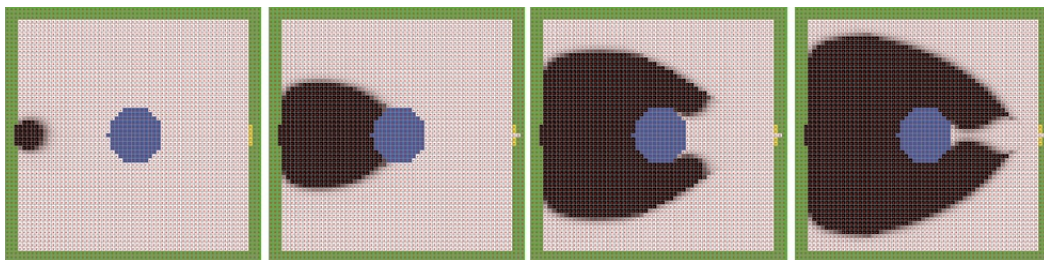


Figura 25: Simulação da fumaça de LUNA (2014) no novo modelo.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um novo modelo para simular a dispersão da fumaça em ambientes fechados, utilizando autômatos celulares associado ao conceito de campos potenciais, e modelando uma situação de emergência utilizando simulação baseada em sistemas multiagente.

A partir dos estudos, notou-se que uma das aplicações da utilização do conceito de autômatos celulares é para mostrar o comportamento de poluentes, seja na água ou no ar, mas não é comum ser utilizado como fundamentação associada aos autômatos celulares o conceito de campos potenciais para a modelagem de dispersão. Na Seção 4.1 é possível ver que utilizando o campo potencial na modelagem da dispersão da fumaça traz de forma geral uma boa aproximação do que acontece na realidade, por exemplo, quando há uma única porta e um único foco de incêndio que gera a fumaça, a fumaça tende a dirigir-se para a porta gerando o formato de uma gota, tendo sua parte mais arredonda no foco do incêndio e afinando nas proximidades da porta.

Estudando as regras definidas por REYNOLDS (1987), notou-se uma relação entre o modo com que os pássaros voam com o comportamento de multidões, pois as pessoas ao identificarem a porta mais próxima para sair formam bandos, mesmo em uma situação de emergência. Um outro parâmetro levado em consideração foi a comunicação entre as pessoas. Para saber qual destes comportamentos tem mais influência na quantidade de saída de pessoas em uma situação de emergência foram realizadas as simulações que estão no Capítulo 5. A partir das análises, pode-se notar que em uma situação de emergência, entre sair de forma organizada e comunicar as pessoas sobre a emergência, as pessoas vivem mais quando avisam umas as outras sobre a situação de emergência, mas elas saem mais rápido quando saem de forma coordenada.

Como trabalhos futuros ao proposto nessa dissertação, vislumbra-se:

- a geração de cenários mais complexos com obstáculos no interior do ambiente (contendo, por exemplo, paredes, mesas, cadeiras);

- aplicar os conceitos de Roadmap e Path Planning para que as pessoas não busquem apenas o caminho mais próximo mas sim o mais seguro;
- garantir a conservação de massa na geração da fumaça.

REFERÊNCIAS

ABNT: NBR 9077 - Saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro, RJ, 2001.

ALVES, M. L. **Análise Do Uso De Autômatos Celulares Na Reprodução De Filtros Em Processamento De Imagens**. 2009. — Faculdade Farias Brito, Campinas, SP.

ALWITRA. **Controle de Fumaça**. <http://www.alwitra.com/produtos/controle-de-fumaca/outros/sistema-de-controle-de-fumaca-em-shopping-centers/> [Online; Acessado em 20-03-2018].

ANTUNES, R. F.; MAGNENAT-THALMANN, N. Bio-Inspired Virtual Populations: Adaptive Behavior with Affective Feedback. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER ANIMATION AND SOCIAL AGENTS, 29., 2016, New York, NY, USA. **Proceedings...** ACM, 2016. p.101–110. (CASA '16).

BASTOS, M. J. e. R. M. **Engenharia de Sistemas Multiagentes: Uma Investigação sobre o Estado da Arte**. 2001. — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

BEARD, R. W.; MCLAIN, T. W. **Motion Planning using Potential Fields**. Provo, Utah: Brigham Young University, 2003. BYU ScholarsArchive.

BEST, A.; NARANG, S.; CURTIS, S.; MANOCHA, D. DenseSense: Interactive Crowd Simulation Using Density-dependent Filters. In: ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS SYMPOSIUM ON COMPUTER ANIMATION, 2014, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland. **Proceedings...** Eurographics Association, 2014. p.97–102. (SCA '14).

BICHO, A. **Da modelagem de plantas à dinâmica de multidões: um modelo de animação comportamental bio-inspirado**. 2009. — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

BOATRIGHT, C. D.; KAPADIA, M.; SHAPIRA, J. M.; BADLER, N. I. Generating a multiplicity of policies for agent steering in crowd simulation. **Computer Animation and Virtual Worlds**, v.26, n.5, p.483–494, 2015.

BOMBEIROS, M. d. D. F. Corpo de. **Manual básico de combate a incêndio**. Distrito Federal, 2006.

BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots. **Third International Symposium on Intelligent Control**, Arlington, Virginia, 1988.

CASSOL, V. J. **CROWDSIM: A Framework to Estimate Safety of Egress Performance in Real Life Scenarios**. 2016. — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

CASSOL, V. J.; RODRIGUES, R. A.; CARNEIRO, L. C. C.; SILVA ANDERSON MUSSE, S. R. CrowdSim: Uma ferramenta desenvolvida para Simulação de Multi-dões. **SBC - Proceedings of SBGames 2012**, Brasília – DF, 2012.

CASSOL, V. J.; TESTA, E.; JUNG, C. R.; USMAN, M.; FALOUTSOS, P.; BERSETH, G.; KAPADIA, M.; BADLER, N.; MUSSE, S. R. Evaluating and Optimizing Evacuation Plans for Crowd Egress. **IEEE Computer Graphics and Applications**, 2017.

CASTRO, M. L. A.; CASTRO, R. d. O. Autômatos celulares: implementações de von Neumann, Conway e Wolfram. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, São Paulo, SP, v.3, n.3, p.89–106, 2008.

CHANG, S. **Simulação de ambientes multiagente normativos**. 2014. — Pontifícia Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, RS.

CHU, M. L.; PARIGI, P.; LAW, K.; LATOMBE, J.-C. Modeling social behaviors in an evacuation simulator. **Computer Animation and Virtual Worlds**, v.25, n.3-4, p.373–382, 2014. CAVW-14-0047.

CIMI, S. C. I. **Fumaça**. <http://www.cimi.com.br/Site/conceitos/Fumaca.htm> [Online; Acessado em 16-03-2018].

COURTY, N.; MUSSE, S. R. Simulation of large crowds in emergency situations including gaseous phenomena. **IEEE Computer Graphics and Applications**, 2005.

ELENO, L. T. F. A Primeira Lei de Fick da Difusão. **Universidade de São Paulo**, São Paulo, SP, 2016.

GASPAR, A. **Compreendendo a Física 3: Eletromagnetismo e Física Moderna**. São Paulo, SP: Editora Ática, 2013.

GOUVEIA, A. M. C. d.; ETRUSCO, P. Tempo de escape em edificações: os desafios do modelamento de incêndio no Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, MG, 2002.

HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. **Nature**, v.407, 2000.

KOREN, Y.; BORENSTEIN, J. Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation. **Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation**, Sacramento, California, p.1398–1404, 1991.

LEITE, M. d. F. S.; MOREIRA, D. M. Um Estudo Comparativo Entre Coeficientes de Difusão Verticais na Simulação da Dispersão de Poluentes em uma Camada Limite Convectiva. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2015.

LEMERCIER, S.; AUBERLET, J.-M. Towards more behaviours in crowd simulation. **Computer Animation and Virtual Worlds**, v.27, n.1, p.24–34, 2016. cav.1629.

LUNA, L. P. d. O. Simulação de Escoamentos de Fumaça ou Gás em Grandes Ambientes com Obstáculos sob a Ação de Campos de Ventos. , 2014.

MARTINS, A. C. d. C. **Aplicação de Autômatos Celulares para Modelagem de Variáveis Regionalizadas na Mineração**. 2013. — Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

OGUIDO, E. **Proposta de plano de emergência em um campus universitário em Curitiba**. 2014. — Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, PR.

PESSOLI, L. **Modelagem da dispersão de poluentes leves em ambientes complexos**. 2006. — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS.

PIRES, P. A. A. **Navegação de Robôs Móveis através de Campos Potenciais baseados em Problemas de Valor de Contorno**. 2016. — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG.

REYNOLDS, C. W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model. **SIGGRAPH Comput. Graph.**, New York, NY, USA, v.21, n.4, p.25–34, Aug. 1987.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B. da; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. e. (Ed.). **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo, SP: Projeto Editora, 2008. 496p.

SERRA, R.; VILLANI, M. A CA Model of Spontaneous Formation of Concentration Gradients. In: **CELLULAR AUTOMATA**, 2008, Berlin, Heidelberg. **Anais...** Springer Berlin Heidelberg, 2008. p.385–392. Proceedings of the International Conference on Cellular Automata.

SHIBATA, F. A. S. **Simulador de Multidões**. 2016. — Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

SIEGWART ROLAND; NOURBAKHSI, I. R. **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. 2.ed. London, England: The MIT Press, 2011.

SILVA, G. R. L. **Sistema Multiagente Para Simulação Da Dinâmica De Estacionamentos - SMSDES**. 2011. — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

SILVA, M. C. L. d.; SOUZA, R. d.; ZOBY JR., L. C.; MOTTA SOBRINHO, M. A. Uso de Autômatos Celulares para Simulação da Dispersão de Poluentes em um Corpo Hídrico Urbano. **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Fortaleza, CE, 2016.

SILVA, M. O. d. **Campos Potenciais Modificados Aplicados Ao Controle De Múltiplos Robôs**. 2011. — Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

SILVA, V. M.; SCHOLL, M. V.; ADAMATTI, D. F. Simulação Multiagente da Evacuação da Boate Kiss: A Importância da NBR 9.077 e sua Relação com o ‘Pânico’. **Revista de Informática Teórica e Aplicada**, v.24, n.2, p.101–111, 2017.

SILVEIRA, A. G. **A People Evacuation Model**. Simulação Social: Teoria e Aplicações, Prog. de Pós-Grad. em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande.

VILANOVA, F.; BERIA, F. M.; COSTA, B.; LOLLER, S. H. Deindividuation: From Le Bon to the social identity model of deindividuation effects. **Cogent OA**, 2017.

WOLINSKI, D.; GUY, S.; OLIVIER, A.-H.; LIN, M.; MANOCHA, D.; PETTRÉ, J. Parameter estimation and comparative evaluation of crowd simulations. **Computer Graphics Forum**, v.33, n.2, p.303–312, 2014.

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

XIE, R.; YANG, Z.; NIU, Y.; ZHANG, Y. Simulation of Small Social Group Behaviors in Emergency Evacuation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER ANIMATION AND SOCIAL AGENTS, 29., 2016, New York, NY, USA. **Proceedings...** ACM, 2016. p.71–77. (CASA '16).

ZHANG, Q.; CHEN, D.; CHEN, T. An Obstacle Avoidance Method of Soccer Robot Based on Evolutionary Artificial Potential Field. **Energy Procedia**, v.16, p.1792–1798, 2012.

ZHENG, Y.; JIA, B.; LI, X.-G.; JIANG, R. Evacuation dynamics considering pedestrians' movement behavior change with fire and smoke spreading. **Safety Science**, 2017.