

Potential Fields in Smoke Dispersion Applied to Evacuation Simulations

Campos Potenciais na Dispersão de Fumaça Aplicada a Simulações de Evacuação

Bruna A. Corrêa¹, Alessandro de L. Bicho¹, Diana F. Adamatti¹

¹Centro de Ciências Computacionais (C3)
Universidade Federal do Rio Grande (Furg)
Avenida Itália, Km 8, S/N, Rio Grande/RS, Brasil

bruna_a_correa@hotmail.com, {albicho,dianaadamatti}@furg.br

Abstract. *In a fire situation it is known that one of the main causes of deaths is the inhalation of smoke. Therefore, it is essential that at the start of emergency situations people leave quickly to avoid possible injuries. We have investigated the dispersion of smoke in closed places and simulate the crowds' behavior in these situations. This paper aims to present a new proposal to model the smoke dispersion in closed environments using the concept of potential fields joined to cellular automata. To validate the work, a behavioral model for the simulation of people evacuation using the multiagent approach was implemented.*

Resumo. *Sabe-se que em uma situação de incêndio, uma das principais causas de mortes é a inalação de fumaça. Portanto, é essencial que, no início de situações de emergência, as pessoas saiam rapidamente para evitar possíveis lesões. Neste trabalho foi investigada a dispersão de fumaça em locais fechados, e simulado o comportamento de multidões nessas situações. O objetivo é apresentar uma nova proposta para modelar a dispersão de fumaça em ambientes fechados, utilizando o conceito de campos potenciais associado a autômatos celulares. Para validar o trabalho, foi implementado um modelo comportamental para a simulação de evacuação de pessoas utilizando a abordagem multiagente.*

1. Introdução

Nos últimos anos, tem-se realizado estudos para entender o comportamento da fumaça em ambientes fechados visando a rápida evacuação das pessoas em locais onde há fogo. Em situações de emergência tais como a relatada, os incêndios podem ser classificados como acidental ou intencional, sendo que a dispersão da fumaça e do fogo variam conforme o material que sofre o processo de combustão [Seito et al. 2008].

Em um incêndio associado ao fenômeno de combustão aparecem quatro situações perigosas: o calor, as chamas, a insuficiência de oxigênio e a fumaça. Destes quatro fatores, a fumaça é um dos que pode causar danos graves à vida de uma pessoa [Seito et al. 2008]. Considerando uma situação de incêndio em um ambiente em que não há qualquer tipo de alarme ou sinalização, as pessoas buscarão instintivamente a saída mais próxima ao sentirem o odor da fumaça. Entretanto, a fumaça provocará o lacrimejamento dificultando a visão, além de causar sintomas respiratórios, como a tosse e a sufocação.

Verifica-se que 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 comportamento da fumaça de modo a prevenir mortes em incêndios causados pela sua inalação. Os projetos de edificações devem incluir medidas ativas e passivas que facilitem a evacuação das pessoas, mas simulações computacionais de possíveis situações de emergência minimizariam as chances de ocorrer fatalidades. Portanto, o objetivo deste trabalho é propor um novo modelo computacional para simular a dispersão de fumaça em um ambiente fechado usando campos potenciais e autômatos celulares.

Autômatos celulares representam sistemas evolutivos onde, a partir de uma configuração inicial, 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 do sistema [Wolfram 1983]. Campo potencial é uma matriz ou campo de forças vetoriais que representa o espaço. A principal ideia deste método é estabelecer um campo potencial atraente em torno de um ponto alvo, e estabelecer um campo potencial repulsivo em torno de obstáculos. A soma de todas as forças determina a direção e a velocidade subsequentes do movimento [Koren e Borenstein 1991], e um novo campo potencial é estabelecido, chamado de campo potencial artificial [Zhang et al. 2012].

Neste trabalho é proposta uma nova aplicação para campos potenciais associados a autômatos celulares para modelar computacionalmente a dispersão da fumaça em um ambiente fechado. Foram simuladas evacuações do ambiente decorrentes de situações de emergência, onde cada pessoa é modelada através de um agente autônomo usando um modelo multiagente [Wooldridge 2009].

A organização do artigo está da seguinte forma. Na Seção 2 são apresentados os trabalhos relacionados ao modelo proposto. Os detalhes da abordagem proposta são apresentadas na Seção 3. Os resultados das simulações são analisados na Seção 4. Por fim, as considerações finais são apresentadas na Seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

Pessoli [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 na linguagem C, enquanto para os módulos externos é usado o software MATLAB[®] e uma CFD (*Computational Fluid Dynamics*), adotada para o cálculo dos campos de ventos em todo o ambiente.

O método de campo potencial tem sido comumente usado em prevenção de obstáculos devido a sua modelagem simples, mas que pode trazer deficiências em determinadas aplicações. O trabalho de [Koren e Borenstein 1991] faz uma análise matemática rigorosa para identificar os problemas inerentes ao método de campos potenciais. O resultado esperado é uma equação diferencial que combina o robô e o ambiente em um sistema unificado.

O artigo de [Silva et al. 2017] mostra a importância de respeitar as indicações da norma da ABNT para situações de emergência. Para tanto, foi modelado dois cenários utilizando o software NetLogo: um cenário onde são utilizados dados reais da Boate Kiss,

em Santa Maria/RS, referentes à tragédia ocorrida em 2013, e um outro cenário para a mesma boate, respeitando as normas da ABNT para este tipo de ambiente. Considerando os dados obtidos das simulações de evacuação nos dois cenários, foi possível verificar que a aplicação de sinalizações de saídas de emergência, em conjunto com o número adequado de portas e respectivas dimensões, tornaria a evacuação consideravelmente mais efetiva.

O trabalho de [Zheng et al. 2017] propõe um modelo para estudar a dinâmica de evacuação de pedestres sob influência do fogo e da propagação da fumaça em um ambiente fechado. Sabe-se que, em um ambiente real, a propagação da fumaça ocorre no sentido de cima para baixo, o que deixa cada vez menos espaço para o movimento dos pedestres. Portanto, o comportamento dos pedestres é dividido em três estágios: caminhar normalmente, caminhar curvado e engatinhar. A influência do fogo e da fumaça no movimento dos pedestres é modelada pelos “campos” de fogo e de fumaça.

Hardt et al. [Hardt et al. 2004] propõem um modelo computacional para simulação em tempo real do fluxo de fumaça ou gás em larga escala em grandes ambientes, dependendo de uma determinada configuração de obstáculos e um campo de ventos. Uma abordagem discreta foi adotada para os mecanismos de transporte e difusão do vento, permitindo uma simulação simples e eficiente.

Nesta seção foram apresentados alguns modelos relacionados à proposta deste artigo. Uma discussão específica será dada na Seção 4.1.

3. O Modelo

3.1. O modelo de campos potenciais

Considerando um caso simples, supondo que um elemento (por exemplo, um robô ou um agente) seja um ponto que é influenciado por um campo potencial $2D$. Assumindo uma função de campo potencial diferenciável $U(q)$, encontra-se a força artificial relacionada $F(q)$ atuando na posição $q = (x, y)$ [Siegwart et al. 2011]. Com isso tem-se:

$$F(q) = -\nabla U(q), \text{ onde } \nabla U(q) = \left[\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y} \right] \quad (1)$$

denota o vetor gradiente de U na posição q . O campo potencial que atua no elemento é a soma do campo atrativo com o campo repulsivo:

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q). \quad (2)$$

O potencial atrativo pode ser definido como uma função parabólica:

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} k_{att} \cdot \rho_{goal}^2(q), \quad (3)$$

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, então:

$$F_{att}(q) = -\nabla U_{att}(q) = -k_{att} \cdot \rho_{goal}(q) \nabla \rho_{goal}(q) = -k_{att} \cdot (q - q_{goal}). \quad (4)$$

O potencial repulsivo deve ser forte quando o elemento está perto do obstáculo, mas não deve influenciar quando o elemento estiver longe do obstáculo. Com isso, é possível defini-lo como:

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & , \text{ se } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & , \text{ se } \rho(q) > \rho_0 \end{cases} . \quad (5)$$

A constante k_{rep} é um fator de escala, $\rho(q)$ é a distância de q ao obstáculo e ρ_0 é a distância da influência do obstáculo. A função potencial repulsiva U_{rep} é positiva ou zero, e tende a infinito quando o elemento se aproxima do obstáculo. Se o limite do obstáculo é convexo e diferenciável em partes, $\rho(q)$ é diferenciável em todo o espaço de configuração livre. Com isso, defini-se a força repulsiva como:

$$F_{rep} = -\nabla U_{rep}(q), \quad (6)$$

$$F_{rep} = \begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(q)} \frac{q - q_{obstaculo}}{\rho_0} & , \text{ se } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & , \text{ se } \rho(q) > \rho_0 \end{cases} . \quad (7)$$

Desta forma, a força resultante é:

$$F(q) = F_{att}(q) + F_{rep}(q), \quad (8)$$

que atua no elemento e é influenciado por forças atraentes e repulsivas, direcionando o elemento para longe dos obstáculos em direção ao alvo [Siegwart et al. 2011].

3.2. O Modelo de Campo Potencial Adaptado para a Dispersão de Fumaça

Este trabalho propõe um modelo para simular a dispersão de fumaça adotando o conceito de campos potenciais associados a autômatos celulares. Através deste modelo, foi simulada uma situação de emergência com a evacuação de pessoas do ambiente utilizando um sistema multiagente. A Figura 1 mostra o diagrama da metodologia e as subseções seguintes apresentam as partes que o compõe.

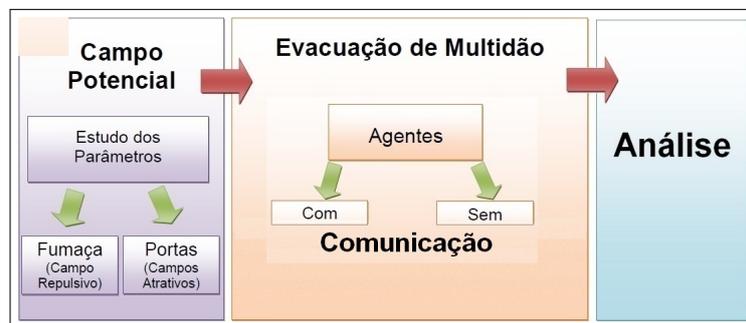


Figura 1. Metodologia Proposta.

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 ambientes fechados. Para tanto, foram necessárias adaptações nas equações dos campos potenciais para que fosse possível utilizá-los nessa nova aplicação. Na definição original de campos potenciais, considera-se apenas

um possível alvo para o agente alcançar, e podem existir obstáculos no ambiente. Em nossa proposta, as equações foram modificadas para que fosse possível ter um único obstáculo (fogo) com vários possíveis alvos (portas). Com isso, o obstáculo gera uma força de repulsão enquanto cada alvo gera sua força de atração. Considerando que o vetor posição do agente é $\vec{q} = (q_x, q_y)$, o vetor posição do alvo é $\vec{a} = (a_x, a_y)$, e sendo o vetor posição do obstáculo $\vec{o} = (o_x, o_y)$, o campo potencial artificial para a dispersão da fumaça é obtido através das seguintes equações:

Potencial Atrativo

$$U_a(q) = \frac{1}{2}k_a \frac{1}{\|\vec{q} - \vec{a}\|^2}. \quad (9)$$

A constante k_a é o quanto o campo se deforma perto do ponto alvo.

Força de Atração

$$\vec{F}_a(q) = -\nabla U_a(q) = -\left[\frac{\partial U_a}{\partial q_x}\hat{i} + \frac{\partial U_a}{\partial q_y}\hat{j}\right] = -\left[A_a\hat{i} + B_a\hat{j}\right]. \quad (10)$$

Calculando A_a , obtém-se:

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

Calculando B_a , obtém-se:

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

Potencial Repulsivo

$$U_r(q) = \begin{cases} C_r & , \text{ se } d(q, o) \leq inf \\ 0 & , \text{ se } d(q, o) > inf \end{cases}, \quad (13)$$

$$\text{onde } C_r = \frac{1}{2}k_r \left(\frac{1}{d(q, o)} - \frac{1}{inf}\right)^2. \quad (14)$$

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

Calculando C_r , obtém-se:

$$C_r = \frac{1}{2}k_r \left[\frac{1}{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2} - \frac{2}{inf\sqrt{(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2}} + \frac{1}{inf^2}\right]. \quad (15)$$

Força de Repulsão

$$\vec{F}_r(q) = -\nabla U_r(q) = -\left[\frac{\partial U_r}{\partial q_x}\hat{i} + \frac{\partial U_r}{\partial q_y}\hat{j}\right]. \quad \text{Portanto,} \quad (16)$$

$$\vec{F}_r(q) = - \left[\frac{\partial C_r \hat{i}}{\partial q_x} + \frac{\partial C_r \hat{j}}{\partial q_y} \right] = - \left[D_r \hat{i} + E_r \hat{j} \right]. \quad (17)$$

Calculando D_r , obtém-se:

$$D_r = \frac{1}{2} k_r \left[\frac{2o_x - 2q_x}{[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^2} + \frac{2}{inf} \left(\frac{1}{2[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^{\frac{3}{2}}} - 2q_x + 2o_x \right) \right]. \quad (18)$$

Calculando E_r , obtém-se:

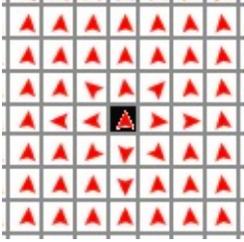
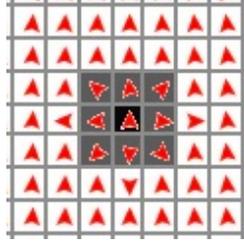
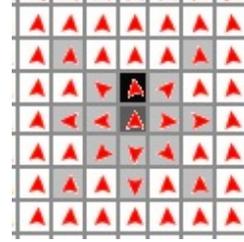
$$E_r = \frac{1}{2} k_r \left[\frac{2o_y - 2q_y}{[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^2} + \frac{2}{inf} \left(\frac{1}{2[(o_x - q_x)^2 + (o_y - q_y)^2]^{\frac{3}{2}}} - 2q_y + 2o_y \right) \right]. \quad (19)$$

Força Resultante

$$\text{Finalmente, } F(q) = - \sum_{i=1}^n \vec{F}_{a_i}(q) + \vec{F}_r(q). \quad (20)$$

O modelo do campo potencial é definido a partir de seus pontos de atração, que são as portas de saída e um ponto repulsivo que é a origem do fogo. A fumaça é gerada no ponto de repulsão, começando gradualmente, e movendo-se de acordo com os vetores gerados pelo campo potencial. A Tabela 1 mostra os passos da dispersão da fumaça, que é uma aproximação da Segunda Lei de Fick [Serra e Villani 2008], onde as Leis de Fick são equações de transporte de massa de difusão. A Segunda Lei de Fick associada a campos potenciais define as regras usadas nos autômatos celulares necessárias para modelar como a fumaça deve se espalhar no ambiente.

Tabela 1. Regras de Dispersão da Fumaça.

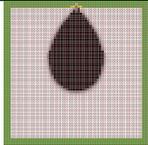
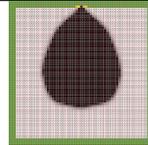
1º passo	2º passo	3º passo
A cada tick é gerado a fumaça no ponto inicial do incêndio, definido pelo usuário.	A fumaça espalha $\frac{1}{8}$ de sua intensidade para seus vizinhos (Vizinhança Moore).	A fumaça dispersa metade de sua intensidade para o patch que o seu vetor do campo potencial está direcionado.
		

3.3. Calibrando parâmetros para as simulações

A Tabela 2 mostra algumas simulações usando uma porta e o foco da fumaça, variando os parâmetros constante da porta (k_a), constante da fumaça (k_r) e influência da fumaça (inf), que fazem parte das equações do campo potencial. Analisando cada coluna da

Tabela 2, é possível verificar que não há mudança no tamanho da dispersão de fumaça variando os parâmetros k_a e k_r . No entanto, ao analisar cada linha da Tabela 2, é possível verificar que há uma mudança no tamanho da dispersão de fumaça variando o parâmetro inf , e é possível dizer que a variável mais relevante na formação da fumaça é a influência da fumaça. Desta forma, um valor médio para as variáveis foi escolhido para os nossos experimentos: constante da porta igual a 5, constante da fumaça igual a 5, e influência da fumaça igual a 5. Após definir os valores dos parâmetros constantes, a dispersão de fumaça foi simulada com 1 a 4 portas, e realizada a captura da imagem nos ticks 11, 15, 21 e 25, para mostrar a dispersão gradativa da fumaça, como mostra a Tabela 3.

Tabela 2. 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 inf .

k_a	k_r	inf	k_a	k_r	inf	k_a	k_r	inf
1	1	1	1	1	5	1	1	10
								
k_a	k_r	inf	k_a	k_r	inf	k_a	k_r	inf
5	5	1	5	5	5	5	5	10
								
k_a	k_r	inf	k_a	k_r	inf	k_a	k_r	inf
10	10	1	10	10	5	10	10	10
								

3.4. Modelo de Evacuação de Multidão

Para simular uma multidão em uma situação de emergência com a dispersão de fumaça, o software NetLogo foi usado para implementar o estudo de caso. Foi utilizado o ambiente de simulação implementado por [Silveira 2015] no NetLogo, sendo um modelo simples de evacuação em um ambiente fechado, cujo objetivo é que as pessoas (agentes) saem pela porta mais próxima baseados na distância Euclidiana. O ambiente tem uma geometria quadrada, adotando-se uma grade com 61 x 61 células, como mostra a Tabela 4. É possível escolher os agentes ou os vetores do campo potencial a ser mostrado, mas é sempre possível ver a dispersão de fumaça. No ambiente modelado, as pessoas são criadas em posições aleatórias, e se movimentam também de forma aleatória até reconhecerem a fumaça. Quando isto acontece, os agentes identificam a saída mais próxima, calculada pela distância Euclidiana. Os agentes têm a capacidade de se comunicarem com outros, ou seja, quando um agente identifica a fumaça no ambiente, ele “informa” aos agentes vizinhos de que há fumaça no ambiente (essa capacidade pode estar ativada ou desativada).

Tabela 3. Simulações com 1-4 portas, nos ticks 11, 15, 21 e 25.

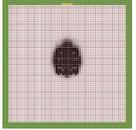
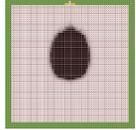
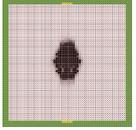
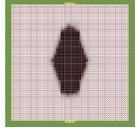
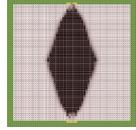
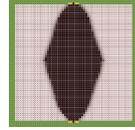
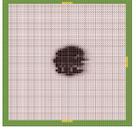
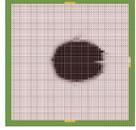
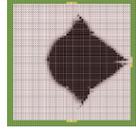
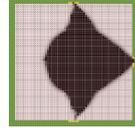
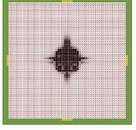
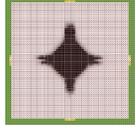
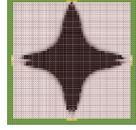
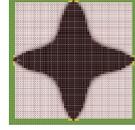
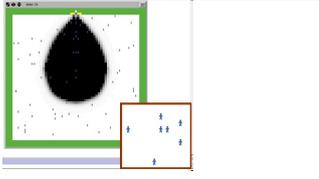
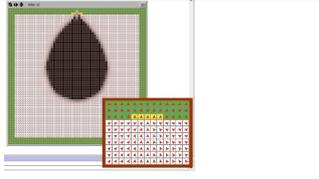
Uma Porta			
11 Ticks	15 Ticks	21 Ticks	25 Ticks
			
Duas Portas			
11 Ticks	15 Ticks	21 Ticks	25 Ticks
			
Três Portas			
11 Ticks	15 Ticks	21 Ticks	25 Ticks
			
Quatro Portas			
11 Ticks	15 Ticks	21 Ticks	25 Ticks
			

Tabela 4. Interfaces.

	
Interface do modelo (com fumaça, com os agentes e sem os vetores do campo potencial).	Interface do modelo (com fumaça, sem os agentes e com os vetores do campo potencial).

4. Análise dos Resultados

Nas simulações realizadas alguns parâmetros tiveram seus valores fixados, enquanto outros os valores atribuídos foram variados, como mostra a Tabela 5. A escolha do tamanho da população nas simulações foi gradativamente aumentando para facilitar a análise dos resultados. Para cada configuração de valores, foram realizadas cinco simulações, calculando a média, o desvio padrão e o percentual de pessoas que saíram ou morreram em relação à quantidade inicial de pessoas no ambiente.

Cada agente possui três variáveis: *Vizinhos*, que identifica quantas pessoas estão

Tabela 5. Parâmetros.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
tamanho_portas	5	peessoas	on
tempo_na_fumaca	20 ticks	visao	5
xfumaca	30	yfumaca	30
incremento_fumaca	0,4	coeficiente_difusao	0,4
constante_porta1	5	constante_porta3	5
constante_porta2	5	constante_porta4	5
constante_fumaca	5	influencia_fumaca	5
vetores	off	-	-
Parâmetros		Valores	
populacao_inicial		35, 150 e 600 agentes	
numero_de_portas		1, 2, 3 e 4 portas	
comunicacao		ON e OFF	

próximas a ele; *Ver-fumaça*, que seta com “true” ou “false” se o agente sabe ou não da existência da fumaça; e *Tempo*, que armazena o tempo em ticks que o agente está na fumaça. Um agente morre quando o valor da variável *Tempo* é igual ao valor da variável *Tempo_na_fumaca* (valor da variável definido na interface). A comunicação acontece se a variável *Ver-fumaça* de um dos agentes *Vizinhos* está definida como “true”, fazendo com que a variável *Ver-fumaça* do agente também seja alterada para “true”.

Foram analisados os resultados obtidos nas simulações, de modo a verificar a influência da comunicação em uma situação de emergência com diferentes quantidades de pessoas no ambiente. Nas Tabelas 6(a), 6(b) e 6(c) são apresentados os resultados obtidos a partir destas simulações. De um modo geral, é possível perceber que quanto mais portas, menor o percentual de mortos, conforme estabelecido pela Norma Brasileira [NBR 2001]. Com uma população de 35 agentes (Tabela 6(a)), havendo comunicação e com três ou quatro portas foram as situações onde mais pessoas saíram. Entretanto, sendo uma população pequena, as pessoas provavelmente estavam longe umas das outras para se comunicarem. É possível verificar na Tabela 6(a), na simulação com quatro portas e comunicação ativa, saíram 83% das pessoas, enquanto sem comunicação saíram 79% do total de pessoas no ambiente. Ao analisar a Tabela 6(b), com 150 agentes, nas simulações com comunicação o total de pessoas que saíram são os melhores, concluindo que a comunicação tem mais impacto no processo de evacuação das pessoas neste contexto. É possível verificar na Tabela 6(b), na simulação com quatro portas e comunicação ativa, que 82% das pessoas saíram, enquanto sem comunicação 77% do total de pessoas saíram. Por fim, com 600 agentes (Tabela 6(c)), verifica-se nas simulações que quando há muitas pessoas no ambiente, os melhores resultados obtidos foram quando há quatro portas e não há comunicação entre as pessoas. É possível verificar na Tabela 6(c), na simulação com quatro portas e sem a comunicação entre as pessoas que 60% do total de pessoas saíram, enquanto com comunicação 53% do total de pessoas saíram.

4.1. Análise comparativa de métodos de dispersão de fumaça

[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

Tabela 6. Simulações: (a)População de 35 agentes, (b)População de 150 agentes e (c)População de 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 de 35 agentes							População de 150 agentes						
Com Com.			Sem Com.				Com Com.			Sem Com.			
Quantidade de Portas: 1							Quantidade de Portas: 1						
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%		\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	7,6	1,82	22%	11,4	2,88	33%	S	48,0	5,79	32%	43,4	5,08	29%
M	27,4	1,82	78%	23,6	2,88	67%	M	102,0	5,79	68%	106,6	5,08	71%
Ticks	78,8	2,59	-	79,6	4,28	-	Ticks	80,2	1,30	-	82,4	2,19	-
Quantidade de Portas: 2							Quantidade de Portas: 2						
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%		\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	20,2	2,49	58%	20,2	3,03	58%	S	101,4	5,13	68%	93,0	2,74	62%
M	14,8	2,49	42%	14,8	3,03	42%	M	48,6	5,13	32%	57,0	2,74	38%
Ticks	73,8	3,19	-	76,0	3,08	-	Ticks	78,6	1,52	-	78,2	0,84	-
Quantidade de Portas: 3							Quantidade de Portas: 3						
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%		\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	23,2	1,92	66%	22,0	5,29	63%	S	94,0	2,55	63%	90,4	3,58	60%
M	11,8	1,92	34%	13,0	5,29	37%	M	56,0	2,55	37%	59,6	3,58	40%
Ticks	76,0	4,30	-	77,2	3,27	-	Ticks	79,4	1,67	-	79,6	1,52	-
Quantidade de Portas: 4							Quantidade de Portas: 4						
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%		\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	29,2	2,59	83%	27,8	1,10	79%	S	122,6	5,64	82%	115,6	5,94	77%
M	5,8	2,59	17%	7,2	1,10	21%	M	27,4	5,64	18%	34,4	5,94	23%
Ticks	77,2	5,63	-	78,8	4,44	-	Ticks	81,0	1,58	-	83,6	2,07	-

População de 600 agentes						
Com Com.			Sem Com.			
Quantidade de Portas: 1						
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	106,8	9,58	18%	101,8	3,83	17%
M	493,2	9,58	82%	497,8	4,21	83%
Ticks	75,8	3,56	-	83,6	1,14	-
Quantidade de Portas: 2						
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	218,6	12,44	36%	232,8	8,17	39%
M	361,4	51,72	60%	367,2	8,17	61%
Ticks	75,2	5,54	-	81,0	1,00	-
Quantidade de Portas: 3						
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	246,6	49,08	41%	271,2	22,11	45%
M	333,4	13,39	56%	321,6	6,50	54%
Ticks	77,0	9,64	-	84,0	0,71	-
Quantidade de Portas: 4						
	\bar{x}	σ	%	\bar{x}	σ	%
S	315,2	10,18	53%	359,6	8,08	60%
M	284,8	10,18	47%	240,4	8,08	40%
Ticks	71,0	13,34	-	85,0	0,71	-

para baixo, com o passar do tempo menos espaço há para as pessoas caminharem no ambiente adotando a postura considerada normal. Portanto, [Zheng et al. 2017] considera três formas de movimento para as pessoas: caminhada normal; caminhada curvada; e engatinhar. A Figura 2(a) mostra a simulação realizada, onde o foco do fogo está no meio da sala, 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; em um ambiente onde há duas portas de evacuação no lado esquerdo da sala.

Usando o modelo proposto para representar o mesmo cenário apresentado em [Zheng et al. 2017], foram obtidos os resultados apresentados na Figura 2(b), onde a fumaça é representada em tons de cinza, as duas portas à esquerda em amarelo e os vetores dos campos potenciais em vermelho. É possível perceber que nossa abordagem poderia reproduzir a dispersão da fumaça nesse cenário de maneira mais “realista”, pois a forma da fumaça é menos simétrica (forma de gota), diferentemente dos resultados em [Zheng et al. 2017], que usa apenas a vizinhança para dispersar a fumaça.

[Hardt et al. 2004] simula o fluxo de fumaça ou gás em larga escala em grandes ambientes, onde há um obstáculo (círculo amarelo) e um campo de ventos. A Fig. 3(a)

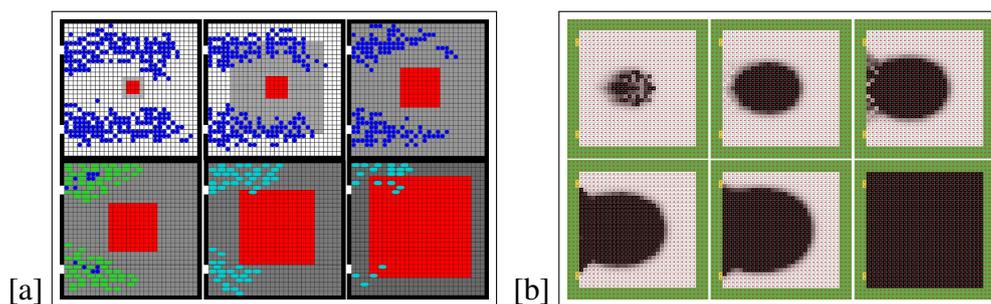


Figura 2. Os resultados do trabalho em [Zheng et al. 2017], em (a). Em (b), os resultados do presente trabalho, usando o mesmo cenário.

mostra a sequência de imagens de vento laminar, com coeficiente de difusão igual a 0, 2.

Usando o modelo proposto no mesmo cenário de [Hardt et al. 2004], foram obtidos os resultados apresentados na Figura 3(b), que mostra a sequência de imagens da fumaça com coeficiente de difusão igual a 0, 2. No cenário o obstáculo é o círculo azul, e o atrator é a porta amarela do lado direito do cenário. Há apenas um atrator para causar a dispersão da fumaça, enquanto o método proposto em [Hardt et al. 2004] adota um campo de vento (ou seja, um campo inteiro age como “atratores”, por meio de uma velocidade de fluxo). Portanto, a forma da fumaça é diferente: a dispersão em nosso modelo é mais ampla no ponto inicial e mais fina no ponto final, próximo à porta.

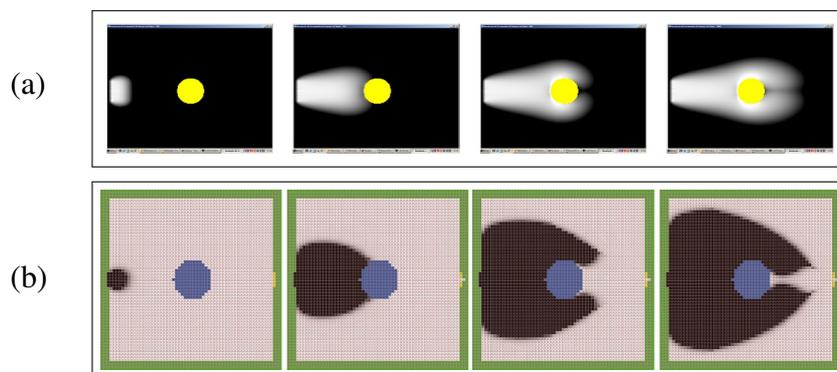


Figura 3. Os resultados do método proposto em [Hardt et al. 2004], em (a). Em (b), os resultados do presente trabalho, usando o mesmo cenário.

5. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou um novo modelo para simular a dispersão da fumaça em ambientes fechados usando campos potenciais associados a autômatos celulares. Para validar a proposta, é modelada uma situação de emergência adotando simulação baseada em multiagentes. Os resultados dos experimentos mostraram que, usando o campo potencial em uma modelagem de dispersão da fumaça, geralmente há uma boa aproximação do que acontece em uma situação real. Por exemplo, quando há uma única porta e um único foco de fogo que gera a fumaça, esta tende a se mover em direção à porta, produzindo um formato que se assemelha a uma gota, tendo sua parte mais arredondada no foco do fogo e afinando na vizinhança da porta. Modelando a evacuação de pessoas em uma situação de emergência, levou-se em consideração a comunicação entre as pessoas, para saber se a

influência desta habilidade é significativa neste contexto. Se as pessoas tomam ciência sobre a fumaça, a quantidade de agentes que conseguem sair do ambiente é significativa. Ao realizar as simulações e analisar os resultados, verificou-se que mais pessoas sobrevivem quando conversam sobre a situação de emergência.

Como trabalho futuro, pretende-se gerar cenários com obstáculos no ambiente, bem como aplicar os conceitos de *Roadmaps* e *Path Planning*. Desta forma, acredita-se que as pessoas não procurarão apenas o caminho mais próximo, mas sim o caminho mais seguro. Outro trabalho é garantir a conservação de massa na propagação da fumaça.

Referências

- Hardt, K., de Oliveira, L. P. L., e Goedert, J. (2004). Smoke or gas flow simulation in large environments with obstacles considering the effect of wind arrays. Em *Proc. of the 5th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, páginas 1–8, Marne la Vallée, France. ESIEE Paris.
- Koren, Y. e Borenstein, J. (1991). Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. Em *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, páginas 1398–1404.
- NBR (2001). *ABNT: NBR 9077 - Saídas de emergência em edifícios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, RJ.
- Pessoli, L. (2006). Modelagem da dispersão de poluentes leves em ambientes complexos. Master's thesis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS.
- Seito, A. I., Gill, A. A., Pannoni, F. D., Ono, R., da Silva, S. B., Del Carlo, U., e Silva, V. P. e., editors (2008). *A Segurança Contra Incêndio no Brasil*. Projeto Editora, SP.
- Serra, R. e Villani, M. (2008). A CA model of spontaneous formation of concentration gradients. Em Umeo, H., Morishita, S., Nishinari, K., Komatsuzaki, T., e Bandini, S., editors, *Cellular Automata*, páginas 385–392, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg. Proceedings of the International Conference on Cellular Automata.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., e Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press, London, England, 2 edition.
- Silva, V. M., Scholl, M. V., Corrêa, B. A., da Costa Junior, M. J. Z., e Adamatti, D. F. (2017). Multi-agent simulation of a real evacuation scenario: Kiss nightclub and the panic factor. Em *Proceedings of the 15th European Conference on Multi-Agent Systems (EUMAS)*, páginas 1–15, Berlin, Germany. Springer.
- Silveira, A. G. (2015). A people evacuation model. *Simulação Social: Teoria e Aplicações*, Prog. de Pós-Grad. em Modelagem Computacional, Univ. Fed. do Rio Grande.
- Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *R.M.P.*, 55:601–644.
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & Sons, UK.
- Zhang, Q., Chen, D., e Chen, T. (2012). An obstacle avoidance method of soccer robot based on evolutionary artificial potential field. *Energy Procedia*, 16, Part C:1792–1798.
- Zheng, Y., Jia, B., Li, X.-G., e Jiang, R. (2017). Evacuation dynamics considering pedestrians' movement behavior change with fire and smoke spreading. *Safety Science*, 92:180–189.