

Autômatos celulares aplicados à modelagem de dinâmica populacional em situação de risco

André P. de Castro¹, Danielli A. Lima¹

¹Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Patrocínio
Av. Lília Terezinha Lassi Capuano, nº 255, Chácara das Rosas
CEP: 38.740-000 – Patrocínio – MG – Brasil

Abstract. *The safety in environments characterized by intense movement of persons with a tendency to form crowd or conflicts, require special attention. If a crowd fails to escape in time to a place of risk, by choosing a wrong path or involvement in conflicts, there is always the imminence of injury and even death. Simulations generated by computers are important for determining the reliability and safety of a building project or even urbanization. The application of cellular automata in computer simulation is justified by the inherent parallelism of them, therefore they have been investigated. The main objective of the research was to propose a simulation model of the population dynamics for emergency evacuation of an environments with complex geometry based on the theory of cellular automata adapted from precursors models.*

Resumo. *A segurança em ambientes caracterizados pela intensa circulação de pessoas com tendência de formação de multidão ou conflitos, carecem de atenção especial. Caso uma multidão falhe ao escapar em tempo de um local de risco, pela escolha de um caminho errado ou envolvimento em conflitos, há sempre a iminência de lesões e até mesmo de morte. Simulações geradas por computador são importantes para a determinação da confiabilidade e segurança de um projeto de edificação ou até mesmo de urbanização. A aplicação de autômatos celulares na simulação computacional é justificada pelo paralelismo inerente dos mesmos e por isso tem sido bastante investigada. O principal objetivo da pesquisa foi a proposição de um modelo de simulação de dinâmica populacional para evacuação emergencial de ambientes com geometria complexa baseado na teoria de autômatos celulares adaptado de modelos precursores.*

1. Introdução

O estudo de dinâmica populacional tem sido investigado atualmente devido à sua grande aplicabilidade, uma vez que a natureza humana manifesta a característica de interagir em sociedade, formando aglomerações para propósitos gerais. Estratégias devem garantir a segurança de cada indivíduo dentro de estruturas prediais, no trânsito ou em qualquer ambiente onde a formação de multidões pode ocorrer. Caso algum fator desencadeie pânico a essa multidão como, por exemplo, incêndios, conflitos e até mesmo atentados terroristas, o tempo de evacuação é um fator primordial para garantir a integridade física de cada indivíduo.

Simulações de evacuações emergenciais, baseadas em sistemas computacionais, são muito utilizadas atualmente, pois influenciam no projeto de segurança predial [Burstedde et al. 2001] ou até mesmo no planejamento urbano, para solucionar conflitos

entre veículos e pedestres [Li et al. 2012] e na criação de ambientes públicos com saídas inteligentes, como em terminais de metrô e ônibus [Hu et al. 2013]. As simulações são estruturadas a partir de abstrações da realidade e o estudo delas determinam melhores estratégias de evacuação, que servem como base para o nivelamento de segurança de uma estrutura [Perez et al. 2002]. A análise de dinâmica populacional sob condições de risco é relevante, visto que, se um indivíduo ou multidão cometem falhas ao tentar escapar em uma situação de pânico, seja por encontrarem obstáculos em sua trajetória, saídas mal elaboradas ou caminhos incorretos, podem ocasionar uma evacuação que envolva risco e até mesmo morte das pessoas.

Os ACs são sistemas dinâmicos discretos no tempo, no espaço e nas suas variáveis. Além disso, já foi provado que os ACs são modelos matemáticos que possuem computabilidade universal [Wolfram 2002]. Sabe-se também que os ACs possuem alto nível de paralelismo, quando implementados em um hardware paralelo [Oliveira 2003]. Existem diversas aplicações no uso de autômatos celulares, tais como, a modelagem de fenômenos naturais, físicos ou biológicos, que seriam muito difíceis de serem modelados pelas equações diferenciais, sendo estas as mais utilizadas nesse tipo de tarefa. Entre os problemas que já foram investigados nessa temática, podemos citar, a evolução biológica dos seres vivos [Powathil et al. 2012], a dinâmica das reações químicas [Sarkar and Abbasi 2006], os estudos entre força e movimento de corpos da física [Puliafito 2007] e até mesmo no fluxo de mercados [Huang et al. 2008].

Neste trabalho, os ACs são utilizados para simular o processo de evacuação de pedestres em uma estrutura complexa em situações de risco. As características principais do modelo bidimensional proposto por [Varas et al. 2007] serão preservadas, bem como algumas características do modelo precursor [Carneiro 2012]. Para avaliação do modelo sugerido, testes em diferentes situações foram realizados, permitindo a investigação de sua aplicabilidade. As simulações fornecem o tempo de evacuação total de uma quantidade de pessoas e a partir de várias simulações é possível obter a média geral do tempo de evacuação e uma avaliação detalhada acerca da viabilidade desse tempo. Além disso, testes para a determinação das posições inteligentes de saídas foram realizados a partir do comportamento dos pedestres.

2. Fundamentação teórica e trabalhos relacionados

2.1. Autômatos celulares

Um AC é composto por um reticulado com uma dimensão d dividido em células, sendo que, cada célula C é representada por um estado. As células modificam seus estados a cada passo de iteração de acordo com uma regra de transição. Podemos aplicar a regra de transição por T passos de tempo para obter a evolução espaço-temporal do reticulado do AC. A regra estabelecida por uma função de transição indica o novo símbolo a ser escrito na célula do reticulado de acordo com seu estado atual e dos estados de suas vizinhas [Oliveira 2003]. Em sua definição mais usual, a atualização dos estados se dá de forma síncrona e utiliza uma regra determinística, isto é, a cada passo de tempo todas as N células do reticulado são atualizadas.

A estruturação de um AC unidimensional (1D) com regra determinística é a forma mais estudada. Nesse caso, a mudança de estado de uma célula depende de m vizinhas expressas por $m = (2r + 1)$, sendo r o raio do AC. Um exemplo de AC unidimensional é apresentado na Figura 1 (a), que utiliza uma modelagem conhecida

como regra 30 [Wolfram 2002], que é dada por: 01111000. Nesse caso, um reticulado inicial configurado da seguinte maneira: 101110, é submetido às condições periódicas de contorno, sendo que a primeira célula é vizinha imediata da última e vice-versa. Na Figura 1 (b) em $t = 0$, a célula central da vizinhança em destaque encontra-se no estado 1, após um passo de tempo e aplicando a função de transição $110 \rightarrow 0$, temos o novo estado da célula, que passa do estado 1 para o estado 0. Aplicando esse procedimento para todas as células do reticulado de forma síncrona, tem-se a nova configuração do reticulado em cada um dos instantes de tempo.

Os ACs fundamentados em duas dimensões (2D) são amplamente conhecidos na literatura. ACs bidimensionais também são muito usados para a representação de padrões gráficos, já que sua disposição assemelha-se a uma imagem pixelizada. Essa dimensão contempla variadas formas para a consideração da vizinhança de uma célula, sendo que as duas principais estão apresentadas na Figura 1 (c) e (d), tal que o símbolo ■ representa a célula central e as demais células adjacentes à central são denominadas células vizinhas. Dentre as aplicações de ACs bidimensionais com regras determinísticas, o modelo mais conhecido é o jogo matemático proposto por [Conway 1970] denominado *Game of Life*.

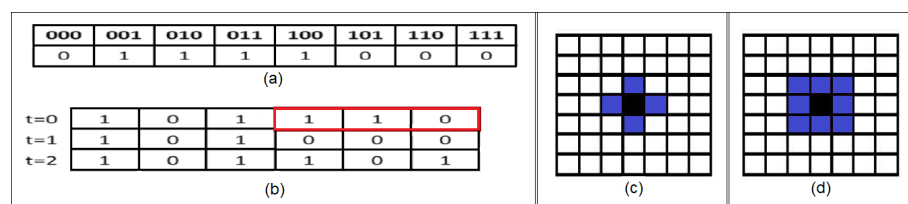


Figura 1. (a) Regra de transição de raio 1. (b) Evolução do AC por $T = 2$ passos de tempo. (c) Vizinhança de Von Neumann. (d) Vizinhança de Moore.

No modelo proposto neste trabalho o AC é bidimensional com o sistema de regras probabilístico. Nesse caso, é possível alterar o estado de uma célula a partir de uma função de probabilidade, isso significa que as regras de atualização são probabilísticas e, portanto, o estado de uma célula em um determinado instante depende probabilisticamente dos estados de suas células vizinhas no passo de tempo imediatamente anterior.

2.2. Modelos de dinâmica populacional baseados em ACs

Os modelos de evacuação e dinâmica populacional baseados em ACs pesquisados na literatura, em sua grande maioria, consistem de duas etapas principais: (i) definição de um campo de piso, geralmente estático e (ii) regras de movimentação dos pedestres. A primeira etapa refere-se a divisão do ambiente em uma malha uniforme (reticulado). Posteriormente, cada agente (indivíduo), ocupa uma célula particular do reticulado e move-se ao longo dessas posições de acordo com uma regra de transição. As variáveis de cada célula podem ser atualizadas simultaneamente baseadas nos valores das variáveis da vizinhança no passo de tempo anterior, de acordo com a regra de transição. Diversos autores apresentaram abordagens de como utilizar ACs para simular ambientes de evacuação de multidões, descrevendo modos de controle do trânsito dos indivíduos e como fatores externos e internos afetam a evacuação.

Um dos estudos direcionado à evacuação de multidões, foi proposto em [Perez et al. 2002]. A temática desse trabalho relaciona-se ao uso de ACs para a

simulação da dinâmica das saídas dos pedestres em uma sala. Pedestres são modelados como autômatos celulares com vizinhança de Von Neumann e competem para escapar no tempo mais rápido possível. As formas de arqueamento dos pedestres frente a saída, o impacto dos tamanhos das saídas e a distância entre as mesmas foram investigados. No mesmo ano [Yang et al. 2002] utilizou um AC para simular a evacuação de ocupantes de um ambiente com uma ou duas saídas sob condições de incêndio. Foram aplicadas regras para o movimento de pedestres introduzindo o conceito de grau de perigo para que o indivíduo faça a escolha da rota de evacuação mais conveniente. No ano posterior, em [Yang et al. 2003] é apresentado um modelo de evacuação que enfatiza o comportamento humano, neste trabalho, foram pesquisadas algumas propriedades genéricas de evacuação de movimentos fixos dos ocupantes de grandes aglomerações em grandes espaços. O modelo alcançou as vantagens de efetivamente capturar o comportamento dos ocupantes no nível do indivíduo, enquanto a realização de atividade de evacuação pode ser analisada no nível coletivo. Posteriormente, em [Yang et al. 2005] os autores propuseram um modelo para investigar o efeito do comportamento de parentesco em evacuações. A chave da evacuação é a escolha da rota, que é determinada por um gráfico de “grau de perigo total” alinhado à “forças sociais” discretas, que inclui forças de atração e repulsão dos ocupantes ao redor e a atração de direção do movimento. O modelo de [Zhao et al. 2008] também utilizou essas técnicas para verificação do impacto dos pedestres evacuarem com a multidão: direcionalmente e espacialmente.

Em [Zheng et al. 2009] os autores investigaram modelos discretos e contínuos para a dinâmica populacional. Dentre os modelos discretos, destaca-se o uso de ACs para a modelagem de dinâmica de pedestres em ambientes complexos. O objetivo era analisar quais seriam as possíveis vantagens e as desvantagens de cada abordagem no processo de movimentação de pessoas em situação de risco. A pesquisa considerou para os resultados, o tipo de abordagem, a relação entre indivíduos e grupos, a proporção escalar, a variação de espaço e tempo e por fim a inclusão de situações e comportamentos típicos. Modelos de movimentação baseados em ACs que agregam um efeito de colisão fundamentado na teoria dos jogos foram investigados em [Tanimoto et al. 2010] e [Zheng and Cheng 2011].

A maioria dos modelos de dinâmica populacional baseados em ACs contemplam um campo de piso estático, e a movimentação é realizada através do grau de atração dos próprios indivíduos. Em [Alizadeh 2011], por outro lado, foi investigado um modelo em que os valores do campo de piso são dinâmicos e podem ser alterados de acordo com a quantidade de pessoas próximas a uma determinada célula. Pesquisas para a dinâmica populacional baseada em ACs que utilizam matrizes que contém as probabilidades a priori de movimentação desses pedestres foram investigadas primeiramente em [Schadschneider 2001]. Posteriormente, [Pereira et al. 2011] propôs um modelo que aumenta a probabilidade de movimento à medida que o fluxo de uma determinada área cresce, com o passar do tempo essa força de rastro é diminuída e o tráfego populacional passa a ser independente.

Outros dois modelos importantes foram investigados em [Varas et al. 2007] e [Carneiro 2012] e são compostos de duas etapas. Na primeira etapa, um campo de piso (malha) é demarcado para representar a planta de uma estrutura. A segunda etapa apresenta um conjunto de regras de transição que permitem o deslocamento dos pedestres sobre essa malha. Para isso, [Varas et al. 2007] elaborou um modelo de AC bidimensional para simular o processo de evacuação dos pedestres em uma estrutura cujos obstáculos

são fixos e estão bem visíveis para os indivíduos que ali se encontram. O campo de piso de uma estrutura é formatado seguindo o conceito de que a partir de qualquer célula é possível seguir o menor caminho até a saída mais próxima. Para simular o comportamento dos pedestres durante a evacuação, em ambos os modelos um fator de pânico foi introduzido, sendo este responsável por evitar a movimentação de uma porcentagem de pedestres no ambiente. Segundo [Varas et al. 2007], quando um pedestre deseja movimentar-se para uma célula já ocupada, um conflito deve ser resolvido, conforme exemplificado na Figura 2 que onde os números correspondem ao valor do campo de piso em uma célula, os arcos representam as intenções de movimento, e os símbolos representam os pedestres em várias situações. Círculo preenchido: o pedestre movimenta-se para uma célula adjacente para minimizar o seu campo de piso. Círculos abertos: dois pedestres tentam se movimentar para a mesma célula, um valor aleatório decide quem se movimenta. Triângulo preenchido: duas células adjacentes com o mesmo campo de piso, os pedestres decidem randomicamente para onde mover. Triângulo aberto: pedestres em pânico, não se movimentam. Já no modelo [Carneiro 2012], os pedestres seguem rotas alternativas caso uma determinada célula esteja ocupada por um pedestre ou obstáculo, ou seja, evita a inércia populacional.

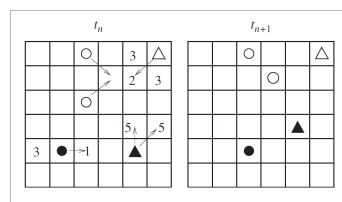


Figura 2. Movimentos possíveis para os pedestres no modelo de [Varas et al. 2007].

3. Modelo proposto

O modelo proposto é fortemente baseado nos modelos de [Varas et al. 2007] e [Carneiro 2012] e também considera duas etapas: a primeira etapa é a criação de um campo de piso, onde cada célula desse piso consiste de um valor inteiro e positivo que guia a escolha do pedestre no momento de fuga. A segunda etapa consiste na criação de um novo conjunto regras que permitem a movimentação dos pedestres de forma segura.

3.1. Campo de piso

Inicialmente, a representação da estrutura predial 3D é transformada para uma estrutura 2D, conforme é observado na Figura 3 (a). Posteriormente, é realizada uma atribuição com valores inteiros em cada célula de piso da estrutura que será simulada. A atribuição dos pesos das células do reticulado segue o algoritmo proposto por [Varas et al. 2007], com a adição do valor da célula adjacente +1.0 para horizontal ou vertical e +1.5 para as células na diagonal, considerando que cada posição da matriz possui um espaço físico de $\sqrt{2} m^2$ [Varas et al. 2007]. Essa estratégia implica em atribuir um peso menor para o alvo do pedestre (saídas) e à medida que se distancia da saída temos um campo de piso com valor maior. Um exemplo do campo de piso adotado no modelo é apresentado na Figura 3 (c) e (d).

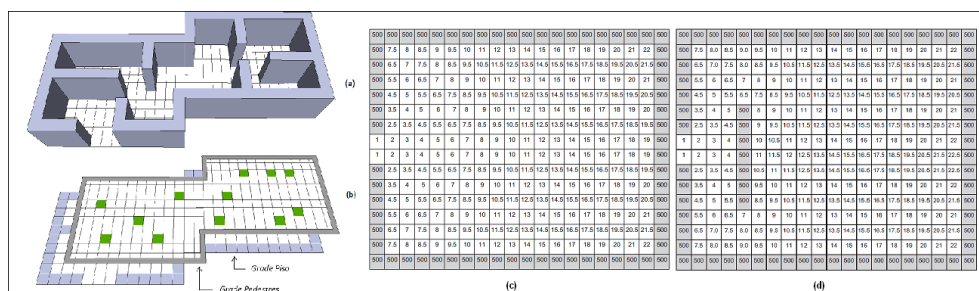


Figura 3. (a) Estrutura predial 3D. (b) Transformação da estrutura 3D para campo de piso 2D e pontos verdes representam os pedestres. (c) Campo de piso com 18×14 células utilizado no modelo [Varas et al. 2007]. A porta de saída está do lado esquerdo (células com valores igual a 1); as células correspondentes às paredes são atribuídos valores de 500. (d) Campo de piso de 18×14 células e um obstáculo na parte central.

3.2. Movimentação de pedestres

Posteriormente, uma nova grade com pedestres alocados é considerada no modelo, conforme é mostrado na Figura 3 (b). A alocação inicial desses pedestres não pode sobrepor os obstáculos. Por fim, uma regra que guia a movimentação dos indivíduos na estrutura deve ser elaborada. A regra de movimentação dos pedestres é o principal aspecto que distingue o modelo proposto dos modelos precursores em [Varas et al. 2007] e [Carneiro 2012]. A técnica considerada neste trabalho é descrita a seguir:

A cada passo de tempo os indivíduos no reticulado de pedestres escolhem seu caminho e avançam em direção a saídas. Para a escolha de rota o pedestre sempre tenta ir em direção à porta mais próxima, tendo como alvo a célula adjacente com menor valor de piso.

1. Para o cálculo da rota, um indivíduo do reticulado observa se sua célula alvo está desocupada, caso esteja ele opta por esperar que ela seja desocupada ou avança para a célula adjacente a da célula alvo. Com isso, o caminho de todos os pedestres é calculado.
2. Tentativas para que os pedestres possam avançar sobre o reticulado são realizadas. Todas as células são observadas e seu endereço é comparado com as rotas calculadas.
 - (a) Se uma rota corresponde ao valor da célula em observação, verifica-se a vizinhança para a constatação de novos candidatos.
 - (b) Se não há mais candidatos o pedestre é movido.
 - (c) Caso o número de candidatos, a ocupar a célula alvo, seja maior que “1”; a disputa é decidida lançando-se um número aleatório, e o candidato vencedor tem direito de mover-se para a célula pretendida e o perdedor recalcula sua rota.
3. Se um indivíduo alcança a porta, ele é eliminado para não impedir os demais de evacuarem.
4. Os passos (1), (2) e (3) são refeitos até que todos os pedestres sejam movidos.

As principais diferenças dos modelos são definidas a seguir: no modelo de [Varas et al. 2007] o pedestre que não se movimentou só prosseguiria no próximo passo de tempo Figura 4 (a). No modelo em [Carneiro 2012] o pedestre obrigatoriamente se moveria para a célula com menor valor adjacente da célula anteriormente escolhida Figura 4

(b). Considerando-se a fusão das técnicas propostas nesses dois modelos, o delineamento do modelo apresentado nesse trabalho, estabelece que o pedestre poderá aguardar que sua célula desejada seja liberada com a movimentação do pedestre que a ocupa, ou escolher outra célula para a realização do movimento Figura 4 (c).

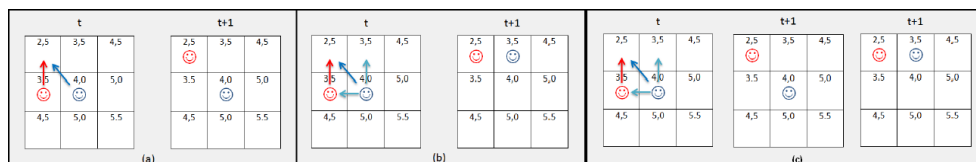


Figura 4. Movimentação de dois pedestres em caso de conflito: (a) Modelo de [Varas et al. 2007]. (b) Modelo de [Carneiro 2012]. (c) Modelo proposto.

4. Resultados experimentais

4.1. Testes de análise comportamental

Inicialmente foram realizados alguns testes para a verificação de formação de padrões durante a evacuação que ocorrem no modelo proposto. Estes testes foram utilizados apenas para guiar os experimentos e validar se o modelo estava convergindo para uma simulação realística. Além disso, foi possível comparar o comportamento populacional dos modelos precursores com a regra de movimentação proposta neste trabalho (Figura 5). O principal comportamento observado e que distingue o modelo apresentado dos demais já relatados na literatura de ACs, é a tendência da formação de filas, resultante das adaptações lógicas do modelo precursor, ou seja, os grupos de indivíduos tendem a deslocar-se ordenadamente em direção às saídas.

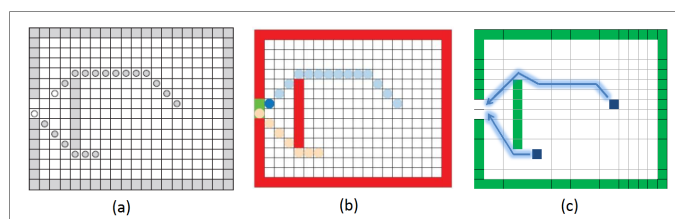


Figura 5. (a) Comportamento observado em [Varas et al. 2007]. (b) Comportamento observado em [Carneiro 2012]. (c) Comportamento gerado do modelo proposto neste trabalho.

4.2. Testes de análise temporal

A técnica proposta também foi testada em uma estrutura complexa (com obstáculos) similar a uma estrutura real (Figura 7 (a)) para verificação do tempo total de evacuação. O novo experimento levou em consideração locais aleatórios para a inserção dos 130 pedestres reservadas para cada simulação. Esse experimento consistiu na realização de 100 simulações e anotou-se a quantidade de passos necessários para que todos os pedestres deixassem o local. Esses dados foram analisados estatisticamente a fim de verificar como foi a distribuição da evacuação dos pedestres em relação ao tempo.

Inicialmente, a média do tempo de evacuação do ambiente foi calculada $\bar{X} \approx 150$

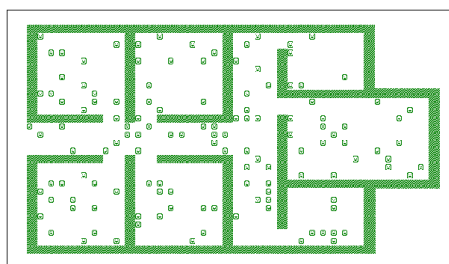


Figura 6. Estrutura complexa simulada a partir de 130 indivíduos gerados aleatoriamente.

e considerando-se o tempo de passo 0,4 segundos, utilizado em [Varas et al. 2007], então o tempo de evacuação médio foi cerca de 60 segundos. Esse tempo é perfeitamente aceitável, embora o local mais distante da estrutura esteja localizado cerca de 20 metros da saída, todos os corredores são traçados com ângulos retos e as barreiras são ortogonais, facilitando a dinâmica populacional rumo à saída e consequentemente diminuindo o tempo de evacuação. Além disso, o desvio padrão $s = 3,24$ indica que os valores de tempo obtidos não sofreram grande variação em relação à média. Assim, os resultados gerados pelo modelo foram convergentes para um valor fixo.

Posteriormente, um histograma foi plotado e está apresentado na Figura 7 (b) que aponta os dados obtidos com a simulação da planta da Figura 7 (a) a partir das 100 simulações. As classes de intervalos no gráfico representam as quantidades de iterações necessárias para que todos os pedestres pudessem evacuar da estrutura complexa. Para melhor entendimento da distribuição do tempo de evacuação os valores da mediana e da moda foram calculados e são dados, respectivamente, por $X_m = 150,8$ e $Mo = 151,78$. Neste caso, $Mo > X_m > \bar{X}$, correspondendo a uma distribuição assimétrica à direita, o que evidencia uma tendência de que os pedestres gastem um tempo inferior à média para realizarem a evacuação. Para visualizar esta característica, um boxplot foi construído com base nos quartis do conjunto de dados e está apresentado na Figura 7. Dessa forma, conclui-se que o método adotado na movimentação de pedestres, no modelo apresentado neste trabalho, é bastante eficiente no que diz respeito à distribuição de quantidades de passos de evacuação, uma vez que, possui distribuição levemente platycúrtica (coeficiente de curtose $k = 0,12$) com pequena assimetria, muito próxima à distribuição normal ($k = 0,2630$) que é a distribuição encontrada em uma situação ótima.

Tabela 1. Resultados da simulação da estrutura da Figura 6.

Classes (\bar{X}_i)	Centro de intervalo (C_i)	Frequência absoluta f_i	Frequência absoluta acumulada fa_i	$(\bar{X} - C_i)^2$
[130:135[	132,5	7	7	306,215001
[135:140[	137,5	9	16	156,225001
[140:145[	142,5	10	26	56,235001
[145:150[	147,5	20	46	6,245001
[150:155[	152,5	25	71	6,255001
[155:160[	157,5	16	87	56,265001
[160:165[	162,5	10	97	156,275001
[165:170[	167,5	3	100	306,285001

5. Testes de análise estrutural

Posteriormente, mais experimentos para definição a posição estratégica das portas de saída foram realizados. Para isso, foram adotadas as mesmas características de ambiente

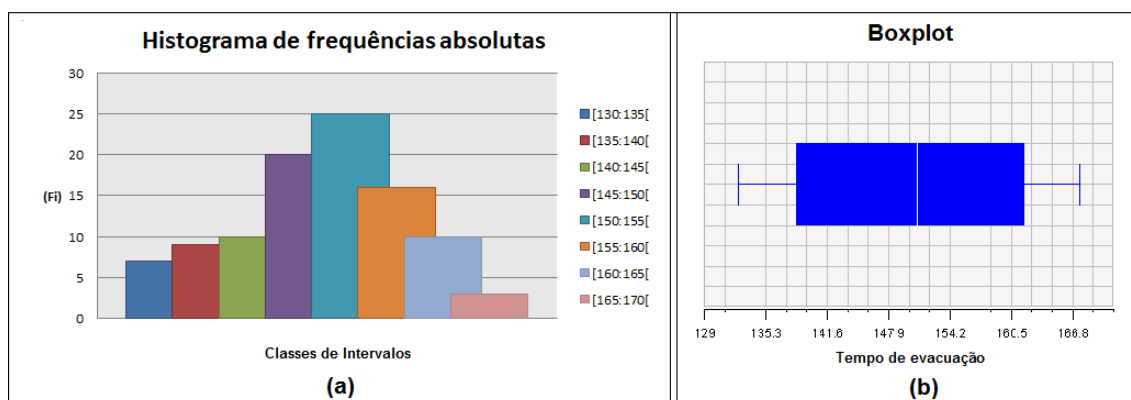


Figura 7. (a) Histograma que representa as frequências de dados obtidas para cada classe (quantidade de passos necessários para a evacuação). (b) Boxplot dos tempos de evacuação.

testadas por [Varas et al. 2007], que em seu trabalho adotou como parâmetro ambientes sem nenhum obstáculo e ambientes complexos (com obstáculos Figura 8 (a)). Neste trabalho, para facilitar a análise, apenas as estruturas complexas, ocupadas por 50 indivíduos, foram utilizadas, uma vez que estruturas complexas são encontradas com maior frequência em situações reais. Para a simulação, as portas foram inicialmente rotuladas e foram alternadas a cada bloco de testes. Nesse caso, as portas são consideradas separadamente e somente um indivíduo pode retirar-se da sala em um determinado passo de tempo, ou seja, a saída só é permitida por uma única pessoa.

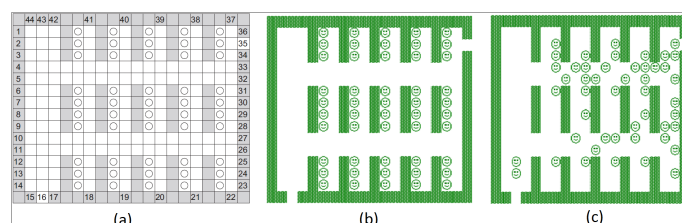


Figura 8. Estrutura: (a) Teste proposto por [Varas et al. 2007]. (b) Geometria aplicada ao modelo proposto com 50 indivíduos. (c) Simulação utilizando modelo proposto após 15 iterações.

Para a análise do local mais indicado para as saídas é observado o rótulo de saída que possui a menor quantidade de iterações. No total, 10 simulações são realizadas, para cada uma das 20 posições “diferentes” das saídas indicadas Figura 8 (a). Os resultados observados em [Varas et al. 2007] resultou em médias que variam de 98 a 106 passos de tempo para cada porta alternada na mesma estrutura, conforme o gráfico da Figura 9 (a). Realizando os testes em estruturas complexas, algumas diferenças surgiram entre os dois modelos. Nesse caso, notou-se que a evacuação é realizada mais rapidamente e as médias variam de 52,1 a 95.8 passos de tempo para cada porta modificada (Tabela 2), por outro lado, a melhor rota de fuga está próxima à saída 30, conforme também foi observado no modelo de [Varas et al. 2007]. O tempo de evacuação no modelo proposto está abaixo dos valores obtidos por [Varas et al. 2007] e pode ser explicado devido ao fato de que no modelo precursor, apenas um pedestre se movia em caso de conflito de células e o outro ficava paralisado. No modelo aqui descrito, além de cada indivíduo poder escolher

uma rota alternativa também deve ser lembrado que o comportamento de pânico não foi considerado neste trabalho, o que justifica os tempos, resultantes da simulação, terem sido inferiores em relação aos observados no trabalho precursor.

Tabela 2. Resultados detalhados da simulação da estrutura com obstáculos.

Experimento	Saída	Nº de Testes	Evacuação média	Tempo (s)	Experimento	Saída	Nº de Testes	Evacuação média	Tempo (s)
1	5	10	71,1	28,44	11	18	10	82	32,8
2	8	10	95,8	38,32	12	20	10	79,6	31,84
3	10	10	63,2	25,28	13	22	10	91,3	36,52
4	11	10	56,2	22,48	14	23	10	83,4	33,36
5	12	10	77,4	30,96	15	24	10	61,9	24,76
6	13	10	80,1	32,04	16	25	10	75,3	30,12
7	14	10	62	24,8	17	26	10	73,2	29,28
8	15	10	89	35,6	18	27	10	72,9	29,16
9	16	10	93,3	37,32	19	28	10	52,7	21,08
10	17	10	91,5	36,6	20	29	10	52,1	20,84

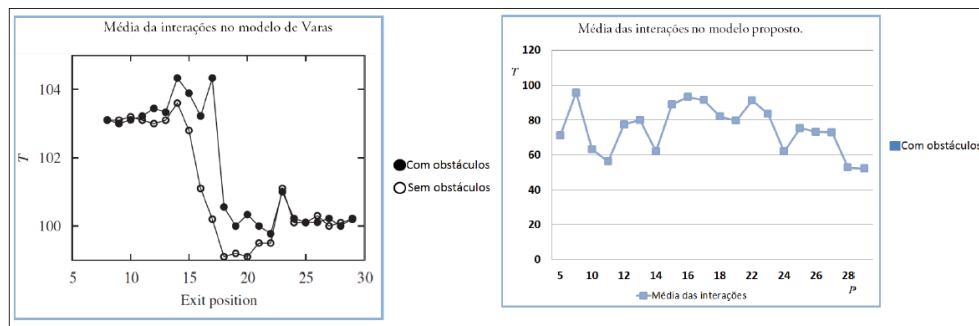


Figura 9. (a) Modelo em [Varas et al. 2007] média das iterações (T) em função da localização da porta na estrutura. (b) Resultados dos testes obtidos com o modelo proposto considerando apenas as estruturas com obstáculos.

6. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi investigado um modelo de autômatos celulares bidimensionais fundamentado em modelos precursores aplicados a simulação dinâmica populacional em caso de evacuação emergencial para ambientes complexos. Para a modelagem do AC detalhado no trabalho, considerou-se a implementação descrita por [Varas et al. 2007] e as complementações idealizadas por [Carneiro 2012]. Todas as adaptações lógicas foram concebidas com a análise desses modelos precursores. Além disso, uma análise das características do modelo desenvolvido foi abordada através do programa elaborado, que poderá ser utilizado em estudos posteriores, tais como verificar se a densidade de pedestres em conjunto com a configuração do ambiente pode afetar o tempo.

No caso do modelo proposto, uma planta predial é formatada, ou seja, a base na qual ocorrerá a simulação de uma evacuação emergencial. Aleatoriamente pedestres são alocados no interior da estrutura. Para que um pedestre possa traçar uma rota em direção ao exterior da estrutura, o piso é identificado com valores que decrescem ao se aproximar das saídas. Os pedestres, em cada iteração, sempre tentam se deslocar para a célula adjacente com menor valor do campo de piso. Entretanto, caso uma célula esteja ocupada, o pedestre tem a opção de aguardar que ela seja liberada ou deslocar-se para outra célula que seja adjacente a célula alvo escolhida inicialmente. Esse fato desencadeia a tendência de ordenação de grupos na multidão de pedestres ao longo do tempo. Os comportamentos capazes de serem percebidos no modelo aplicam-se ao movimento dos pedestres diante

do conflito gerador de pânico e ao fato de que nem sempre a escolha de um indivíduo é satisfeita no mesmo passo de tempo. A formação de filas ocorre principalmente em passagens estreitas ou aglomerados de pedestres deslocando-se para as saídas.

Com a execução do modelo descrito foi possível gerar dados visuais, onde os comportamentos de padrões sociais inseridos durante a evacuação puderam ser observados. Além disso, dados estatísticos foram obtidos relacionando a média das iterações com a quantidade de indivíduos alocados em uma estrutura. A grande vantagem de se usar o modelo desenvolvido, na simulação de evacuação emergencial, encontra-se no fato de que ocorre uma padronização das rotas de pedestres. Entretanto, não podemos garantir que apenas os comportamentos inseridos por si só já comprovam a segurança da estrutura predial gerada pelo modelo. Mas, elas iniciam uma análise que pode ser aprofundada em um trabalho de pesquisa posterior.

Como continuidade desse trabalho, seria interessante a adaptação do modelo 2D para um modelo 3D, no qual as alturas dos obstáculos poderiam ser avaliadas. Para alcançar o paralelismo do modelo poderia ser utilizada uma implementação em hardware paralelo, uma vez que toda a motivação para o emprego de ACs na simulação reside na possibilidade de implementação eficiente. Além disso, acredita-se que, o fato do modelo ser gerenciado por regras simples na função de transição, é possível a adição de novos parâmetros para que diferentes comportamentos sociais possam ser observados no decorrer de uma mesma simulação. Essa inserção visa o objetivo do alcance de uma maior fidelidade se comparado com uma situação real.

Referências

- Alizadeh, R. (2011). A dynamic cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Safety Science*, 49(2):315–323.
- Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., and Zittartz, J. (2001). *Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton.*, pages 507 – 525.
- Carneiro, L. O. (2012). Simulação de evacuação de multidão por autômato celular - estudo de caso em um estádio de futebol. Master's thesis, Universidade Federal do Ceará.
- Conway, J. H. (1970). Jogo da vida. *Scientific American*. Jogos matematicos.
- Hu, J.-h., Zhan, C.-z., Cheng, Z.-f., and Cheng, B. (2013). A research of pedestrian evacuation simulation for brt station based on fine grid method. *Procedia Engineering*, 52:137–144.
- Huang, H., Zhang, L., Guan, Y., and Wang, D. (2008). A cellular automata model for population expansion of *spartina alterniflora* at jiuduansha shoals, shanghai, china. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77(1):47 – 55.
- Li, X., Yan, X., Li, X., and Wang, J. (2012). Using cellular automata to investigate pedestrian conflicts with vehicles in crosswalk at signalized intersection. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012.
- Oliveira, G. M. B. (2003). Autômatos celulares: aspectos dinâmicos e computacionais. *III Jornada de Mini-cursos em Inteligência Artificial (MCIA)*. Sociedade Brasileira de Computação, 8:297 – 303.

- Pereira, L., Duczmal, L., and Cruz, F. (2011). Simulacao de evacuacao emergencial via automatos celulares: Uma proposta de modificacao do modelo de schadschneider. *Anais do CMAC*, pages 21 – 30.
- Perez, G., Tapang, G., Lim, M., and Saloma, C. (2002). *Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians.*, pages 609 – 618.
- Powathil, G. G., Gordon, K. E., Hill, L. A., and Chaplain, M. A. J. (2012). Modelling the effects of cell-cycle heterogeneity on the response of a solid tumour to chemotherapy: Biological insights from a hybrid multiscale cellular automaton model. *Journal of Theoretical Biology*, 308(0):1 – 19.
- Puliafito, J. L. (2007). A transport model for the evolution of urban systems. *Applied Mathematical Modelling*, 31(11):2391 – 2411.
- Sarkar, C. and Abbasi, S. A. (2006). Enhancing the accuracy of forecasting impact of accidents in chemical process industry by the application of cellular automata technique. *Process Safety and Environmental Protection*, 84(5):355 – 370.
- Schadschneider, A. (2001). Bionics-inspired cellular automaton model for pedestrians dynamics trafic and granular flow. pages 110 – 114.
- Tanimoto, J., Hagishima, A., and Tanaka, Y. (2010). Study of bottleneck effect at an emergency evacuation exit using cellular automata model, mean field approximation analysis, and game theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(24):5611–5618.
- Varas, A., Cornejo, M., Mainemer, D., Toledo, B., Rogan, J., Munoz, V., and Valdivia, J. (2007). Cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 382(2):631 – 642.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media - (1st edition): 1197 - 2006-09-19T07:35:05.000+0200.
- Yang, L., Fang, W., and Fan, W. (2003). Modeling occupant evacuation using cellular automata - effect of human behavior and building characteristics on evacuation. *Journal of Fire Sciences*.
- Yang, Z., Fang, W., Huang, R., Huang, R., and Deng, Z. (2002). *Occupant evacuation model based on cellular automata in fire.*, pages 1484 – 1488.
- Yang, Z., Zhao, L., Li, J., and Fang, Y. (2005). *Simulation of the kin behavior in building occupant evacuation based on cellular automaton.*, pages 411 – 415.
- Zhao, D., Yang, L., and Li, J. (2008). Occupants behavior of going with the crowd based on cellular automata occupant evacuation model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(14):3708–3718.
- Zheng, X. and Cheng, Y. (2011). Conflict game in evacuation process: A study combining cellular automata model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(6):1042–1050.
- Zheng, X., Zhong, T., and Liu, M. (2009). *Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches.*, pages 437 – 445.