

# **SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO VIA AUTÔMATOS CELULARES BIDIMENSIONAIS APLICADA AO PROCESSO DE EVACUAÇÃO DE AMBIENTES**

**Tatiane Cazarin da Silva**

Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, PPGMNE  
Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR  
tatianecazarin@gmail.com

**Liliana Madalena Gramani**

Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, PPGMNE  
Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR  
l.gramani@gmail.com

**Eloy Kaviski**

Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba  
- PR  
eloy.dhs@ufpr.br

**Fábio André Negri Balbo**

Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, PPGMNE  
Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR  
andrebalbo@gmail.com

**Marina Vargas R. P. G. Ferreira**

Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, PPGMNE  
Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR  
marina.vargas@gmail.com

## **RESUMO**

Este artigo apresenta resultados de simulações aplicadas ao processo de evacuação de um cinema, sem pânico. Foi utilizada a Simulação de Monte Carlo objetivando descrever as interações entre os campos de força dinâmica e estática, e a aleatoriedade do comportamento humano. As regras de interação decorrentes da delimitação do espaço e da movimentação foram estabelecidas com o auxílio da teoria dos Autômatos Celulares modificado, em um programa desenvolvido em Pascal. Foram utilizados dados referentes a 13 diferentes lotações de pedestres no espaço, e para cada caso, realizadas 1000 simulações. A aplicação da regressão polinomial estabeleceu excelentes resultados para os ajustes linear, parabólico e cúbico, permitindo estabelecer um modelo de ajuste aos dados numéricos que descreve satisfatoriamente o tempo total de evacuação em função do número de pedestres. O modelo, então, mostrou-se válido na aplicação ao processo emergencial de evacuação do ambiente proposto, estabelecendo resultados que garantam a evacuação num limite seguro.

**PALAVRAS-CHAVE.** Simulação, Monte Carlo, Autômatos Celulares.

### **ABSTRACT**

This paper presents results of simulations applied to the evacuation process of a movie, without panic. We use the Monte Carlo Simulation in order to describe the interactions between the fields of dynamic and static strength, and randomness of human behavior. The rules of interaction that arise from the delimitation of space and movement were determined by using the theory of Cellular Automata modified in a program developed in Pascal. We use data from 13 different blends with pedestrians in the area, and in each case, 1000 simulations are performed. The application of polynomial regression established excellent results for linear, parabolic and cubic adjustments, allowed establishing a model of adjust to numerical data that describing satisfactorily the total time for evacuation in function the number of pedestrians. Then, the model showed valid when applied to the process of emergency evacuation of the proposed environment, establishing results that ensure the evacuation in a safe limit.

**KEYWORDS.** Simulation, Monte Carlo, Cellular Automata.

## 1. Introdução

A história da humanidade encontra-se marcada pela constante busca por melhores condições de vida, seja relacionada a questões geográficas, econômicas ou sociais. Assim, torna-se comum, as pessoas recorrerem a regiões mais desenvolvidas, pois ao menos teoricamente, podem oferecer subsídios que possibilitam uma melhoria da qualidade de vida. Percebe-se, então, um aumento populacional significativo e gradativo nos centros urbanos e nas regiões industrializadas, que funcionam como um atrativo face às oportunidades ofertadas. Nesse contexto, para haver avanços e estabilidade no mercado competitivo, não é necessário apenas adequação à mão de obra qualificada, mas também, paralelamente, o desenvolvimento do espaço físico. Assim, torna-se necessário que tais regiões estejam devidamente estruturadas, ponderando os avanços tecnológicos aos espaciais, visto que atuam como receptoras diretas de material humano, e por sua vez, os setores relacionados à infraestrutura, tais como engenharia, economia e tecnologia, devem estar fortemente amparados. Utilizando um planejamento propício, modelado por constantes mudanças e/ou adaptações, a penalização decorrente do desequilíbrio populacional é menor, pois a distribuição dos recursos pode ser pré-definida.

Analisando as questões referentes ao espaço físico em meios susceptíveis a um alto fluxo de pessoas, é comum ocorrerem aglomerações, principalmente em locais públicos. Nesses casos, além da interação entre pedestre e meio, tem-se também a interação entre pedestres, ou seja, tem-se a influência dos campos de força estática e dinâmica, respectivamente. Diversas situações são marcadas pelo estudo do comportamento de multidões, tais como a simulação de multidões aplicadas em produções cinematográficas, jogos digitais, planejamento de construções, evacuação de ambientes complexos, arquitetura, dentre outras. (BICHO, 2009; DAPPER, 2007). O estudo de situações que envolvem multidão, quando associado à simulação pode descrever e até prever acontecimentos envolvendo a segurança pública, evitando assim, transtornos decorrentes do planejamento e infraestrutura inadequados, e possibilitando descrever o comportamento humano diante de algumas situações.

Mesmo que a legislação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Normas ISO de Qualidade, Códigos de Posturas Municipais, Normas do Ministério do Trabalho, Legislações de Segurança contra Incêndio e Pânico Estaduais e outros instrumentos sejam muito úteis na prevenção de acidentes, não são suficientes, visto que pode haver negligência de características importantes na manutenção da segurança total, na delimitação ou organização do espaço. (SOUZA, 2005).

Em um espaço físico, o deslocamento de um pedestre descreve uma trajetória, que pode ser interferida por questões comportamentais ou físicas. De acordo com Bicho (2009) a modelagem e simulação de multidões, caracterizada por um alto fluxo populacional são temas de estudo em diferentes áreas da ciência, pois garantem um vasto campo aplicativo no que tange o fluxo de pedestres. Nesse sentido, destacam-se os estudos relacionados à simulação de multidões, buscando responder questões associadas desde a escolha de um caminho, até a simulação de situações marcadas pelo pânico. (ZAMPIERI, 2006).

Levando em consideração as ações humanas, com ou sem pânico, é possível associá-las a modelos matemáticos ou simulações computacionais. Estabelecendo parâmetros voltados as características do fenômeno envolvido, pode-se obter

resultados que realmente se aproximem do real. Verificando o comportamento de um pedestre quando se trata de deslocamentos, tem-se a identificação de grandezas físicas, tais como espaço, velocidade e aceleração em função do tempo, que podem caracterizar modelos descritos por equações diferenciais ordinárias, parciais ou íntegro-diferenciais, dadas respectivamente pelas escalas microscópica, macroscópica e cinética. (GRAMANI, 2010).

A fim de aplicar a simulação computacional dirigida a uma situação que envolva multidão, visou-se estabelecer um modelo de simulação de evacuação de um sistema dinâmico de pedestres, numa situação de evacuação em um ambiente fictício, satisfazendo as restrições e normas técnicas de um cinema. As análises foram realizadas com a aplicação dos autômatos celulares bidimensionais como uma forma de discretizar o ambiente e estabelecer as relações de interação dos pedestres proporcionadas pelo Método de Simulação de Monte Carlo. A seguir, serão apresentadas características teóricas que norteiam a pesquisa, estruturadas por:

- Seção 2: Desenvolvimento do Tema;
- Seção 3: Caracterização dos métodos empregados;
- Seção 4: Descrição e desenvolvimento da simulação ao problema proposto;
- Seção 5: Conclusões.

## **2. Desenvolvimento do Tema**

Além da necessidade de se investigar questões referentes ao tráfego veicular, tem-se como destaque o fluxo de pedestres, que admite grande complexidade face à vulnerabilidade humana na tomada de decisões. Qualquer ambiente quer seja público ou não, é propício a ser foco de um grande número de pessoas. Com isso, é fundamental adotar medidas de segurança que visem minimizar transtornos decorrentes do excedente número de pessoas em um determinado ambiente. Essas são preocupações que conduzem a um estudo ainda maior sobre fatos que possam afetar o comportamento de uma multidão numa situação de anormalidade. Associado a tais estudos, a modelagem do fluxo de pedestres merece grande destaque, visto que, por meio de simulações computacionais pode-se prever resultados que auxiliem na tomada de decisões nas mais diversas situações, evitando eventuais transtornos. Dessa forma, pode-se facilitar no entendimento de características básicas sobre o fluxo de pessoas, e conseqüentemente, torna-se ferramenta essencial para descrever informações relacionadas à formulação de saídas, geometrias de salas e estádios. (PEREZ *et al.*, 2002).

Helbing *et al.* (2002) apresentam um modelo de simulação de dinâmica de pedestres em fenômenos coletivos destacando características observadas em situações de evacuação. Baseados num modelo de força generalizada em escala microscópica observaram que esse processo pode ser interpretado como um fenômeno de auto-organização, decorrente da interação não-linear entre os pedestres.

Dessa forma, o comportamento de pedestres diante de situações de evacuação destaca características que podem explicar o processo de otimização do espaço e minimização do tempo. Com isso, a utilização de simulações computacionais aplicadas ao fluxo de pedestres representa grande importância no aprimoramento de projetos de construção e adequação de espaços, no planejamento urbano e no fortalecimento da dinâmica social, por meio do estudo da dinâmica de pedestres.

Aplicada a uma situação de evacuação, o comportamento e o fluxo dos pedestres pode sofrer modificações na estrutura em cada unidade de tempo que compõem a simulação. Sendo assim, é fundamental aplicar à simulação um método

estocástico associado a evoluções temporais, controlando a sensibilidade mediante a dispersão dos dados durante o desenvolvimento do algoritmo. Tais características podem ser observadas com a aplicação do Método de Simulação de Monte Carlo associado à teoria dos autômatos celulares, empregados conjuntamente na pesquisa.

### 3. Método de Simulação de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo é um método estatístico utilizado em simulações estocásticas, envolvendo a geração de números aleatórios por meio de uma distribuição de probabilidade. (JÚNIOR *et al.*, 2001). O nome “Monte Carlo” está relacionado ao cassino de Monte Carlo-Mônaco, sede dos jogos de casualidade, em uma analogia ao resultado natural das roletas. Dentre as mais diversas aplicações do Método de Monte Carlo tem-se a Simulação de Monte Carlo, cuja intenção é reproduzir algum sistema real, principalmente quando outras análises são matematicamente complexas.

De acordo com Escudero (1973) esse método consiste na substituição de um sistema físico ou matemático por um modelo probabilístico, verificando assim processos determinísticos por meio de amostras aleatórias, ou números pseudo-aleatórios. Historicamente, técnicas de Monte Carlo foram inicialmente propostas no estudo das particularidades das equações de Boltzmann e posteriormente discutidas durante a Segunda Guerra Mundial, em um projeto de construção da bomba atômica, por Ulam, John von Neumann e Fermi, a fim de simular a difusão do nêutron em alguns materiais. (CAMPOS, 2009).

Trata-se então de um modelo de simulação que utiliza a geração de números aleatórios para atribuir valores às variáveis que se deseja investigar. Os números podem ser obtidos através de algum processo aleatório (tabelas, roletas, etc.) ou diretamente do computador, por meio de funções específicas (LUSTOSA *et al.*, 2004) podendo ser aplicado nos mais diversos campos. Na literatura especializada, destacam-se: desenhos de reator nuclear, cromodinâmica quântica, terapia de câncer por radiação, fluxo de tráfego, evolução estelar, sistemas de corpos interagentes e econometria.

#### 3.1 Autômatos Celulares

O interesse em verificar o comportamento evolutivo e interativo das espécies ao longo dos anos sempre foi marcado por inúmeras pesquisas e avanços científicos, a fim de determinar padrões de crescimento e autorreprodução por meio de sistemas naturais. Nesse sentido, nos anos 40, Stanislaw Ulam propôs um estudo sobre o crescimento de cristais, modelando-os sobre uma malha. Mais tarde, John von Neumann destacou a capacidade de simular a autorreprodução, adotando um modelo inicial de robô que era capaz de se replicar a partir de um conjunto de peças separadas.

Como resultado da junção dos resultados obtidos por Ulam, von Neumann deu origem a um modelo abstrato para o problema da replicação, conhecido historicamente como o primeiro autômato celular, denominado *universal copier and constructor*, baseado numa malha bidimensional composta por células que poderiam estar em um conjunto de 29 estados, ou seja, suas características. Mas, foi somente nos anos 70 que os autômatos celulares foram popularmente difundidos. A partir do modelo proposto por John Conway, *Game of life*, permitiu-se identificar como imagens complexas podem ser geradas a partir de simples modelos e regras que

evoluem e interagem com o tempo. (GREMONINI e VICENTINI, 2008).

Devido à vulnerabilidade caracterizada pelo nascimento, morte e adaptação, a implementação dos autômatos celulares é utilizada em grande escala em simulações, visando reproduzir ou descrever fatos. Os autômatos celulares são utilizados na formação ou determinação de padrões comportamentais sociais, ambientais e biológicos, por meio da relação e interação dos fatores envolvidos. Trata-se de um modelo matemático discreto no tempo, nas variáveis dinâmicas e no espaço, modelado em uma grade regular de células, chamada malha ou *grid*, cuja evolução é permitida pelo estabelecimento de regras simples de dependência entre elas. À medida que o sistema evolui dinamicamente, emergem comportamentos complexos decorrentes dessas influências mútuas, caracterizando um sistema complexo. (LIMA, 2007; GREMONINI e VICENTINI, 2008). Essa complexidade pode ser observada pelo comportamento dinâmico determinístico dos autômatos celulares, observadas ao passo em que, há repetidas atualizações no estado das células, em intervalos de tempo discretos, satisfazendo as regras inicialmente propostas.

### 3.1.1 Caracterização de um autômato celular

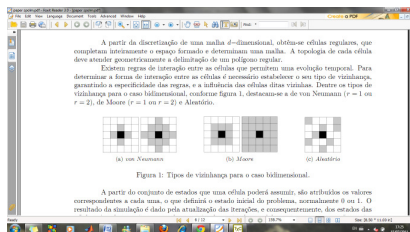
De acordo com Lima (2006) denomina-se autômato celular ao conjunto, no qual:

- representa uma grelha dimensional regular;
- é um conjunto finito de estados;
- determina a vizinhança, um conjunto finito, de tamanho e dimensão, no qual
- é uma função de transição,

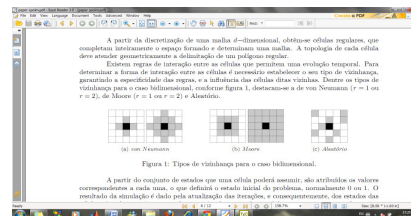
Em outras palavras, representa a discretização do espaço, o número de estados que uma célula pode assumir, a vizinhança que influencia na atualização do estado de uma célula e a regra que define o estado de uma célula a partir do seu estado atual e da vizinhança.

A partir da discretização de uma malha dimensional, obtêm-se células regulares, que completam inteiramente o espaço formado e determinam uma malha. A topologia de cada célula deve atender geometricamente a delimitação de um polígono regular.

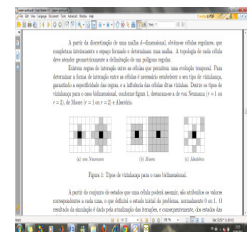
Existem regras de interação entre as células que permitem uma evolução temporal. Para determinar a forma de interação entre as células é necessário estabelecer o seu tipo de vizinhança, garantindo a especificidade das regras, e a influência das células ditas vizinhas. Dentre os tipos de vizinhança para o caso bidimensional, conforme figura 1, destacam-se a de von Neumann ( $r = 1$  ou  $r = 2$ ), de Moore ( $r = 1$  ou  $r = 2$ ) e Aleatório.



(a) Von Neumann



(b) Moore



(c) Aleatório

Figura 1: Tipos de vizinhança para o caso bidimensional.

A partir do conjunto de estados que uma célula poderá assumir, são atribuídos os valores correspondentes a cada uma, o que definirá o estado inicial do problema, normalmente 0 ou 1. O resultado da simulação é dado pela atualização das iterações, e conseqüentemente, dos estados das células. A cada iteração, a regra de transição, determinada por  $\sigma$ , determina uma nova configuração, dada por  $\sigma$ , onde  $\sigma$ . Tal regra é aplicada a cada passo da iteração, e pela sensibilidade da simulação os estados finais, podem ser caracterizados por grandes variações quando comparados ao estado inicial, justificando a complexidade dos resultados.

Após as contribuições de Ulam e von Neumann, em 1982, Stephen Wolfram verificou características da dinâmica estatística dos autômatos celulares e o processo de formação de padrões similares, estabelecendo desde outros resultados, certas propriedades algébricas. Para Wolfram, os autômatos celulares podem ser considerados como uma idealização discreta das equações diferenciais parciais, frequentemente utilizadas para descrever sistemas naturais. (GREMONINI e VICENTINI, 2008). Além disso, verificou que a complexidade dos autômatos celulares pode ser gerada, partindo de regras básicas. Gerando um padrão de auto-organização, contribuindo de maneira significativa para a formação espontânea de padrões. Empiricamente, os autômatos celulares possuem quatro padrões de classificação espaço-temporais gerados após a evolução, e definidos como:

- Classe 1: Autômatos cuja evolução conduz a um estado homogêneo, no qual as células atingem um mesmo valor;
- Classe 2: Autômatos cuja evolução conduz a um estado periódico no tempo e não homogêneo, no qual nem todas as células tem um mesmo valor;
- Classe 3: Autômatos cuja evolução conduz a um estado caótico, quase não reconhecível;
- Classe 4: Autômatos cuja evolução conduz a um estado complexo e imprevisível, podendo propagar, criar ou aniquilar estruturas.

As contribuições de Wolfram comprovam a possibilidade de auto-organização e formação de padrões durante a evolução temporal dos autômatos, e conseqüentemente, podendo ser aplicado nas simulações computacionais.

#### **4. Descrição da Simulação**

Atendendo as normas vigentes para a liberação e construção de obras públicas, assim como a arquitetura específica de um cinema, (NEUFERT, 2004), foi proposta a análise de evacuação de um ambiente fictício, apresentado na figura 2, modelado em pequenas dimensões, e com características dadas a seguir:

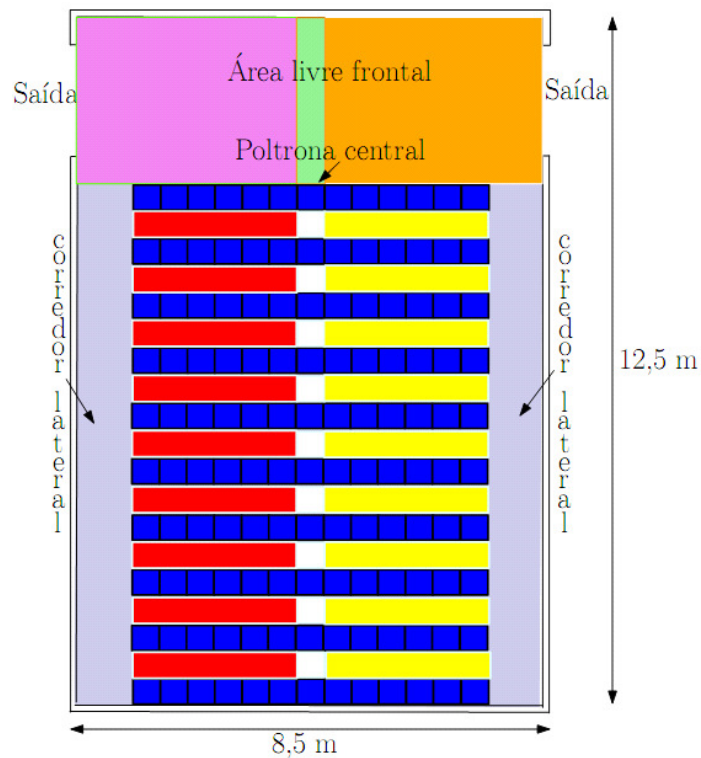


Figura 2: Distinção espacial das regras.

- Dimensões da sala: 8,5 m x 12,5 m;
- Largura dos corredores laterais: 1 m;
- Largura dos corredores transversais: 0,5 m;
- Dimensões da área livre retangular frontal: 8,5 m x 3 m;
- Número de saídas: 2 ;
- Largura de cada saída: 2 m;
- Número máximo de espectadores sentados: 130;
- Dimensões da planta baixa das poltronas: 0,5 m x 0,5 m;
- Número de fileiras com poltronas: 10.

As dimensões, descritas nos itens apresentados, satisfazem as restrições e normas para um cinema, propostas por Neufert (2004). As dimensões das saídas são proporcionais ao número de pessoas que ocupam o ambiente. Sendo assim, as medidas utilizadas, tais como a quantidade e largura mínima dos corredores e das saídas satisfazem a demanda considerada na situação exposta.

Sobre a planta ilustrada na figura 2, foi aplicada uma malha retangular bidimensional, conforme figura , de ordem , onde e Cada região quadrada formada pela malha é definida como uma célula, e conseqüentemente, cada célula define um autômato celular. Cada uma das células possui um estado, designando se há uma área ocupada ou não. De acordo com Pereira (2010), o estado de cada célula é modificado de acordo com seu estado e dos seus vizinhos na etapa de tempo anterior, através de cada série de regras que tentam imitar as leis biológicas ou físicas que regem o sistema real. Após o levantamento das informações técnicas, partiu-se para o estabelecimento das regras de interação. Dessa forma, a área correspondente a cada autômato celular, foi designada para satisfazer as restrições técnicas em uma sala de cinema, assim como a área mínima ocupada por um pedestre, sendo essa proporção

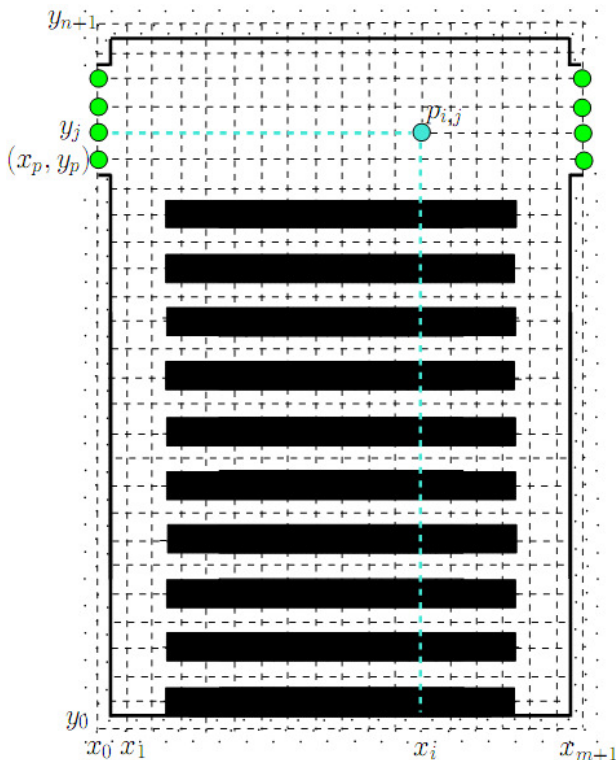


dada por 4 pessoas.

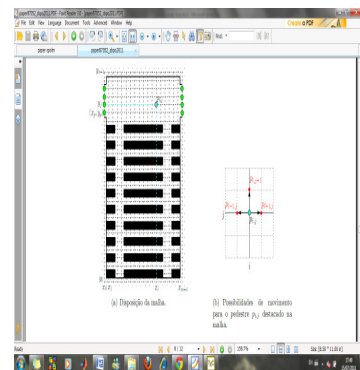
Tratando-se de uma situação de evacuação em condições normais, ou seja, sem pânico, sugere-se que ocorra um direcionamento para as saídas mais próximas, sendo evitadas regiões de tumulto e obstáculos, mediante o seu campo de visão, e não há possibilidade do movimento retrógrado.

O estado inicial dos autômatos celulares consistiu em estabelecer as células que representavam as paredes e as poltronas. As paredes designariam obstáculos fixos ao longo da simulação, enquanto as poltronas, poderiam se tornar obstáculos após a iteração, já que os pedestres não poderiam retornar ao estado inicial correspondente.

Os pedestres são aleatoriamente alocados nas áreas correspondentes às poltronas, donde iniciam a dinâmica do movimento. Adotando a vizinhança de Von Neumann, com raio 1, o movimento dos pedestres, a fim de evitar colisões, estaria restrito a dois tipos de obstáculos: fixos (poltronas e paredes) ou móveis (pedestres). Caso o estado das células que influenciariam o movimento estivesse livre (estado 0), o movimento seria aleatório, com velocidade constante e direcionado a saída geometricamente mais próxima. Entretanto, se as células estivessem ocupadas, o pedestre permaneceria na mesma célula determinada pela iteração anterior.



- Disposição da malha



- Possibilidades de movimento do pedestre destacado na malha.

Figura 3: Disposição geométrica da malha para o caso bidimensional.

A modificação dos autômatos celulares bidimensionais encontra-se no fato de que o movimento das células em alguns pontos é extremamente limitado, como por exemplo, entre as fileiras. Assim, a influência da vizinhança é quase mínima, já que o movimento deve seguir o fluxo para a saída desejada. Nos corredores laterais e na área frontal o movimento é mais flexível, já que não encontra-se restrito apenas à lateral. Seja a posição correspondente a um pedestre na malha, então, as

possibilidades do seu movimento poderão ser descritas conforme a figura

Pode ser observada uma pequena modificação nas possibilidades de interação de acordo com a vizinhança adotada. Considerando o fato de que visa-se evacuar a sala de cinema, numa situação sem pânico, considera-se que um pedestre pode manter a mesma posição (repouso), caminhar para a frente ou para as laterais (com velocidade constante), portanto uma das direções será omitida, ou seja, voltar.

Com a identificação do estado inicial das células que compõem a malha, é possível iniciar a simulação. Os pedestres são aleatoriamente dispostos nas células que representam as poltronas. As células correspondentes às saídas são dadas por  $i = 0,1,2,3$  e por  $j = 0,1,2,3$ .

Seja o tempo  $t$  e um pedestre escolhido aleatoriamente. Verifica-se o estado das células vizinhas: se a célula estiver livre, então o pedestre ocupa essa posição, se não, verifica se a célula lateral que conduz a saída mais próxima está disponível, caso afirmativo, ocupa as posições  $i \pm 1, j$  ou  $i, j \pm 1$ . Se nenhuma das condições for verificada o pedestre continua na posição definida pela iteração anterior, ou seja,  $(i, j)$ . Incrementa-se o tempo, e um novo pedestre é escolhido aleatoriamente, repetindo os passos descritos. Caso a nova posição ocupada represente a saída, o número de pedestres diminui em uma unidade.

As simulações são realizadas até que ocorra a evacuação total, ou seja, incrementa-se o tempo ao passo em que o número de pedestres que atingem as saídas seja condizente ao total inicialmente gerado. Como saída o programa retorna o tempo total, em segundos, para a evacuação total do cinema analisado em uma quantidade fixada de simulações, dado pelo número de iterações.

A figura 2 explicita as regiões que limitam um mesmo movimento dos pedestres, com igualdade de cores, por meio da identificação dos setores que possuem sentido de fluxo, com as condições propostas. Pode-se observar que os pedestres que ocupam as poltronas centrais, são identificados pela aleatoriedade do movimento lateral, favorecido pela aplicação do Método de Simulação de Monte Carlo, já que encontram-se equidistantes das 2 saídas estipuladas.

#### 4.1 Simulações

As simulações computacionais utilizando o Método de Monte Carlo foram verificadas para números diferentes de ocupação do cinema, totalizando 10 casos. Para cada um destes, foram realizadas 1000 simulações, até a evacuação total. Como haviam duas saídas, com medidas fixadas, o número de células correspondentes ao ponto desejado pelo algoritmo foi igual a 8. Consequentemente, num mesmo instante de tempo, poderia haver a evacuação de 8 pedestres. A tabela a seguir apresenta os resultados da análise.

Tabela 1: Resultados das 1000 simulações referentes ao tempo de evacuação total do ambiente estudado, aplicados em 13 casos de ocupação.

Número de pedestres	Tempo Médio de evacuação (seg.)	Desvio padrão	Mínimo	Mediana	Máximo	Intervalo de confiança
10	24,99	0,0676	16	25	29	(24,8573; 25,1227)
20	26,861	0,0477	21	27	32	(26,7675; 26,9545)
30	29,024	0,0657	23	29	38	(28,8951; 29,1529)
40	33,581	0,0956	27	33	45	(33,3933; 33,7687)
50	39,496	0,1109	30	39	54	(39,2783; 39,7137)
60	45,8	0,1081	38	45	58	(45,5879; 46,0121)
70	51,319	0,1059	43	51	64	(51,1112; 51,5268)
80	56,255	0,1038	48	56	69	(56,0512; 56,4588)
90	60,971	0,1002	53	61	74	(60,7744; 61,1676)
100	65,91	0,1055	58	66	76	(65,7030; 66,1170)
110	70,302	0,1054	62	70	82	(70,0951; 70,5089)
120	75,152	0,101	66	75	85	(74,9539; 75,3501)
130	80,064	0,1088	71	80	90	(79,8505; 80,2775)

Em estatística, um intervalo de confiança (IC) é utilizado para a estimação de parâmetros por meio de intervalos. São obtidas estimativas, que satisfazem um determinado coeficiente de confiança e garantem uma melhor precisão ao resultado. Dessa forma, foram estimados intervalos de confiança, a um nível de 95% para o tempo médio de evacuação para os dados. Quanto menor o intervalo, maior é a eficiência do parâmetro estimado.

Pode-se verificar que o tempo médio de evacuação foi próximo ao valor representado pela mediana de cada simulação. Com isso, há uma maior uniformidade nos resultados, o que leva conseqüentemente, a uma menor dispersabilidade em cada uma das etapas da simulação, ocasionando uma maior aderência ao modelo. Analisando os histogramas, há possibilidade de identificar afastamentos ou não na distribuição formada. Para os casos analisados, pode-se perceber uma proximidade entre as variáveis média, moda e mediana, que intensificam-se à medida que o número de pedestres aumenta e evidenciam a uniformidade dos dados.

Uma forma de verificar uma possível relação funcional entre as variáveis em estudo é a análise do diagrama de dispersão. O aspecto do diagrama pode sugerir uma relação funcional adequada ao problema de regressão. Dessa forma, foi aplicada a regressão polinomial, com o auxílio do *software* Minitab, para os casos linear, parabólico e cúbico, a fim de comparação a eficiência do ajuste aos dados. Os coeficientes R-Sq e R-Sq(adj) representam a sensibilidade e a proporção que as variáveis do modelo explicam as variáveis originais, ou seja, um valor próximo a 1 significa uma boa aderência ao modelo.

Tabela 2: Resultados da aplicação da regressão polinomial

Regressão Polinomial	Equação de Regressão	R-Sq	R-Sq(adj)
Linear		0,994	0,993
Parabólica		0,995	0,993
Cúbica		0,998	0,997

Os resultados apresentados na tabela 2 evidenciam a adequação das três equações obtidas ao modelo, sendo superiores a 0,99. O fato de o ajuste estar significativamente bom pode ser explicado pelo tamanho da amostra utilizada e pelo número de variáveis independentes. Esses são fatores que podem definir com maior

precisão eventuais desvios entre o tempo simulado e o tempo ajustado, quando considerado um número suficientemente grande. Nas condições analisadas, a regressão polinomial cúbica foi a que melhor quantificou a variável tempo médio de evacuação em função do número de pedestres, por meio da equação:

e representada graficamente por:

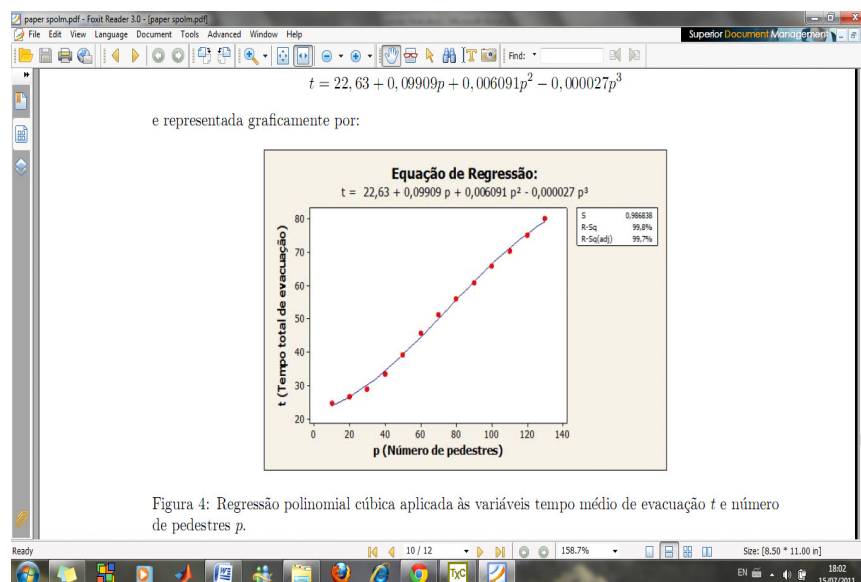


Figura 4: Regressão polinomial cúbica aplicada às variáveis tempo médio de evacuação t e número de pedestres p.

Considerando a evolução temporal no processo de construção da simulação pode-se verificar que os resultados do modelo encontrado verificam a relação direta entre as grandezas. Consequentemente, o modelo mostrou-se válido na análise da evacuação do cinema, satisfazendo os parâmetros determinados no modelo.

## 5. Conclusões

No processo de evacuação de um ambiente, utilizando simulações computacionais, critérios como a delimitação do espaço e a localização dos obstáculos representam parâmetros que modificam as estratégias utilizadas. Dessa forma, é necessário estabelecer regras de interação entre os pedestres e também com os obstáculos, ou seja, características da evolução da dinâmica.

O estudo mostrou que a lotação do ambiente estudado, um cinema, a localização da saída, assim como o estudo do comportamento do pedestre são fundamentais na eficácia do modelo. A partir das ferramentas empregadas na relação de interações e evolução temporal, o modelo obtido para o caso, evidenciou a dependência das variáveis analisadas.

Utilizando um modelo de regressão que realiza o ajuste dos dados e permite estipular valores não mensurados das variáveis, pode-se definir critérios para a lotação máxima do ambiente, com precisão considerável, face o tempo de evacuação que atenda as restrições e normas de segurança, que encontram-se especificamente relacionadas à geometria e característica do espaço.

As simulações aplicadas ao fluxo de pedestres permitem a modelagem do comportamento humano em situações próximas ao real, por introduzir parâmetros relacionados às atitudes do pedestre. Como continuação do trabalho, visa-se estudar e identificar a localização ótima das saídas e a disposição da arquitetura do ambiente, verificando a possibilidade de minimizar o tempo de evacuação, de forma que o modelo seja ainda mais significativo, além de integrar novas restrições ao modelo.

## Referências

**Bicho, A. L.** Da modelagem de plantas à dinâmica de multidões: um modelo de animação comportamental bio-inspirado. 114 p. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2009.

**Campos, C.** Análise de risco com o método de Monte Carlo. 2009.

**Dapper, F.** Planejamento de Movimento para Pedestres utilizando Campos Potenciais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007.

**Escudero, L. F.** La simulación en la empresa, Barraincúa: Deustro, 1973.

**Gramani, L. M.** Descrições microscópica, macroscópica e cinética do fluxo de tráfego veicular. *Títulos publicados para o XXXIII CNMAC - 2010*, SBMAC, São Carlos - SP, Brasil, 2010.

**Gremonini, L.; Vicentini, E.** Autômatos celulares: revisão bibliográfica e exemplos de implementações. *Revista eletrônica Lato Sensu - UNICENTRO*, Ed. 6, 2008.

**Helbing, D.; Farkas, I. J.; Molnar, P.; Vicsek, T.** Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations, 2002.

**Andrade JR, A. S.; Frizzone, J. A; Sentelhas, P. C.** Simulação da precipitação diária para Parnaíba e Teresina, PI, em planilha eletrônica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*. vol. 5, n.2, Campina Grande, 2001.

**Lima, E. B.** Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2007.

**Lustosa, P. R. B.; Ponte, V. M. R.; Dominas, W. R.** Simulação. In: *CORRAR, L.P;* Theóphilo, C.R. (coord). Pesquisa Operacional para decisão em contabilidade e administração: contabilometria. São Paulo: Atlas, 2004, 242-284.

**Neufert, E.; Neufert, P.** Arte de projetar em arquitetura: princípios, normas, regulamentos sobre projeto, construção, forma, necessidade e relações espaciais, dimensões de edifícios, ambientes, mobiliário, objetos. 17. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 618p., 2004.

**Pereira, L. A.** Efeito da Lotação e da Localização de Saídas no Tempo de Evacuação Emergencial de um Auditório: Simulação via Autômatos Celulares. *XXXIII CNMAC*, 2010.

**Perez, G. J; Tapang, G.; Lim M.; Saloma, C.** Streaming, disruptive interference and power-lan behavior in the exit dynamics of confined pedestrians. *Physica A*, v. 312, n. 3-4, 609-918, 2002.

**Santos, L. P. P.** Integração de Monte Carlo: Iluminação e Realismo. Notas de aula: Mestrado em Informática, (<http://www.di.uminho.pt/uce-cg/index.php>).

**Souza, A. P.** A segurança das casas noturnas e similares. *Articulistas*, 2005, ([www.24horasnews.com.br/evc/index.php](http://www.24horasnews.com.br/evc/index.php)).

**Toyama, M. C.** Uma abordagem multiagentes para a dinâmica de pedestres. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2006.

**Zampieri, F. L. L.** Modelo Estimativo de Movimento de Pedestres baseado em sintaxe espacial, medidas de desempenho e redes neurais artificiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2006.