



**Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Matemática**

Bacharelado em Estatística

**UM ESTUDO SOBRE SITUAÇÕES DE
EMERGÊNCIA NO TEATRO
MUNICIPAL DE UBERLÂNDIA:
SIMULAÇÃO VIA AUTÔMATOS
CELULARES**

Izabela Luiza Oliveira Lima

Uberlândia-MG

2019

Izabela Luiza Oliveira Lima

**UM ESTUDO SOBRE SITUAÇÕES DE
EMERGÊNCIA NO TEATRO
MUNICIPAL DE UBERLÂNDIA:
SIMULAÇÃO VIA AUTÔMATOS
CELULARES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Co-
ordenação do Curso de Bacharelado em Estatística
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Estatística.

Orientador: Leandro Alves Pereira

**Uberlândia-MG
2019**



**Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Matemática**

Coordenação do Curso de Bacharelado em Estatística

A banca examinadora, conforme abaixo assinado, certifica a adequação deste trabalho de conclusão de curso para obtenção do grau de Bacharel em Estatística.

Uberlândia, _____ de _____ de 20_____

BANCA EXAMINADORA

Leandro Alves Pereira

Danielli Araújo Lima

Rafael Alves Figueiredo

**Uberlândia-MG
2019**

AGRADECIMENTOS

Chega ao fim de mais um ciclo em minha vida, ciclo este que só foi possível pois tenho ao meu lado pessoas incríveis.

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por tornar este momento possível. A Maria por ter sempre passado na frente.

A minha mãe Ediléia, por ter ser tão presente na minha vida, especialmente nessa fase de graduação. Por vibrar tanto com minhas conquistas e ser a primeira a me incentivar a não desistir nos fracassos. (Poderia escrever mais páginas de agradecimento a ela do que este próprio trabalho).

Ao meu pai Nilto (in memoriam), que não pode estar presente neste momento tão importante da minha vida, mas se hoje consegui concluir a faculdade, devo a ele por ter me ensinado que o estudo poderia não ser o caminho mais fácil, mas seria o melhor.

A minha irmã Sara, por ser tão cúmplice de minhas escolhas e por sempre me motivar das maneiras mais esquisitas.

Aos meus avós, por acreditarem fielmente em mim. Ao meu avô Vicente Crispim, que vibrou com o início dessa trajetória e se orgulhou tanto de cada pequena conquista no decorrer mas infelizmente partiu um pouco antes do fim.

Ao meu namorado Túlio, por me incentivar sempre, me apoiar, me escutar e também por aguentar todos os meus estresses.

A Regi, ao Vinícius, a Bela e a Alice por ter me acolhido como família.

Aos meus tios, primos e amigos pelo incentivo e apoio.

Ao PET Estatística, aos petianos e o Tutor Pedro, pelas oportunidades e aprendizados.

A Universidade Federal de Uberlândia e seus funcionários, por proporcionar um ambiente agradável para que este sonho se tonasse possível.

A todos os professores, pelos ensinamentos. Um agradecimento especial ao Leandro, por ter empenhado tanto nesse e em outros trabalhos. Ao Hernán, o Santos, o Rafael, o Camâra e ao Lúcio pela orientações em iniciações científicas.

Por fim, a todos que diretamente ou inderetamente contribui para minha formação.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de realizar um estudo simulado de evacuação emergencial utilizando a metodologia de autômatos celulares estocásticos. O modelo escolhido para as simulações é um modelo de simulação discreta que utiliza células virtuais chamados de autômatos celulares. Utilizamos um modelo proposto recentemente e que possui novas extensões, visando tornar as simulações mais fiéis. Simulações foram realizadas com o objetivo de estudar as medidas de segurança de um local previamente determinado, mais precisamente no tempo de evacuação. O local escolhido para realização das simulações foi o Teatro Municipal de Uberlândia. Ao final, as estatísticas obtidas pelas simulações foram úteis para avaliar de forma qualitativa e quantitativa os aspectos de segurança, com base em uma estimativa pontual e intervalar do tempo médio de evacuação total.

Palavras-chave: Autômatos Celulares, Teatro Municipal de Uberlândia, Simulações.

ABSTRACT

This paper aims to conduct a simulated emergency evacuation study using the methodology of stochastic cellular automata. The model chosen for the simulations is a discrete simulation model that uses virtual cells called cellular automata. We use a recently proposed model that has new extensions to make the simulations more faithful. Simulations were performed in order to study the safety measures of a predetermined location, more precisely in the evacuation time. The venue for the simulations was the Uberlândia Municipal Theater. In the end, the statistics obtained by the simulations were useful to qualitatively and quantitatively evaluate safety aspects, based on a point and interval estimate of the mean total evacuation time.

Keywords: Cellular Automata, Uberlândia Municipal Theater, Simulations.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	I
Lista de Tabelas	III
Lista de Abreviações e Símbolos	V
1 Introdução	1
2 Fundamentação Teórica	3
2.1 Revisão literária	3
2.2 Modelos de autômatos celulares para dinâmica de pedestres	4
2.2.1 Campo dinâmico, estático e de antecipação	4
2.2.2 Probabilidade de transição	7
2.2.3 Regras para mudança de direção	8
2.2.4 Campo de grupos	10
2.2.5 Condições Iniciais	12
3 Metodologia	15
4 Resultados	19
5 Conclusões	23
5.1 Trabalhos futuros	23
Referências Bibliográficas	25

LISTA DE FIGURAS

1.1	Teatro Municipal de Uberlândia	2
2.1	(a) Representação do movimento de um pedestre segundo a vizinhança de Moore, sendo a opção escolhida determinada pela probabilidade de transição. (b) Representação de um ambiente por simulação via autômatos finitos.	4
2.2	Possíveis deslocamentos e a matriz de preferências $M = (M_{ij})$	5
2.3	Exemplo de CE a partir da contagem de passos	6
2.4	Exemplo de CE a partir da distância Euclidiana	7
2.5	Representação da primeira regra de mudança de rota	9
2.6	Representação dos CE no cálculo de μ	10
2.7	Representação da segunda regra de mudança de rota	11
2.8	Representação do campo de grupo (CG)	12
3.1	Matriz criada do desenho do teatro no Excel como parâmetro de entrada para o programa.	15
3.2	Simulação com 15 grupos em estado intermediário. Células em cor azul escura tem intenção de sair pela porta 1, em cor azul claro pela porta 2, as vermelhas pela porta 3. As células amarelo representa grupo de pessoas.	16
4.1	Tempo médio das replicações com 15 grupos de pessoas.	19
4.2	Tempo médio das replicações com 25 grupos de pessoas.	20
4.3	Diferença de tempo a cada 25% das pessoas evacuadas	21

LISTA DE TABELAS

3.1	Constantes necessárias no modelo.	16
4.1	Estatísticas descritivas para o tempo de evacuação (T).	20
4.2	Estatísticas descritivas para a diferença do tempo a cada 25% das pessoas evacuadas.	21
4.3	Quantidade média de pessoas que saem por cada uma das portas.	21
4.4	Estatísticas descritivas da vazão do sistema.	22

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIACÕES

- AC Autômatos celulares;
- CA Campo de antecipaco;
- CD Campo dinâmico;
- CE Campo Estático;
- CG Campo de grupos;
- SFPE Handbook of Fire Protection Engineering;

LISTA DE SÍMBOLOS

- N_c número médio de vezes que alguém teve que parar por congestionamento
- T Tempo até que 100% das pessoas tenham evacuados

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 10 anos grandes tragédias de incêndios marcaram com tristeza a história do Brasil. Em 27 de Janeiro de 2013, na boate Kiss em Santa Maria no Rio Grande de Sul um sinalizador usado pela Banda que apresentava no palco soltou faíscas que atingiram o teto da boate, incendiando a espuma de isolamento acústico, que não tinha proteção contra fogo. A tragédia deixou 242 pessoas mortas e outras 680 feridas.

Em 2017 um segurança ateou fogo na Creche Inocente em Janaúba/MG no momento em que haviam 70 crianças e 17 funcionários no local, 14 pessoas morrem maioria, sendo crianças de 4 anos.

Em Fevereiro de 2019, uma explosão no aparelho de ar-condicionado causou um incêndio que atingiu o Ninho do Urubu, como é conhecido o Centro de Treinamento do Flamengo, no Rio de Janeiro. O incêndio deixou dez mortos e três feridos, todos jogadores das categorias de base do clube carioca.

Estes exemplos, mostram que infelizmente essas tragédias possuem um alto potencial de destruição, e por isso novas medidas de prevenção de incêndio devem ser estudadas. Além da prevenção, sabemos que muitas vezes é impossível eliminar por completo o risco desses acontecimentos, e por isso estudos sobre como este devem ocorrer a evacuação em casos de emergência se tornam cruciais para reduzir ou eliminar os efeitos catastróficos. Hoje, com auxílio de ferramentas computacionais os modelos virtuais de evacuação emergencial são grandes aliados, pois permitem que possamos conhecer os aspectos de um ambiente numa situação de emergência antes que ela aconteça de fato.

Segundo o Corpo de Bombeiro Militar do Distrito Federal [7], um edifício seguro contra incêndio é aquele que possui uma baixa probabilidade de início de incêndio e, caso ocorra, há alta probabilidade de que todos os seus ocupantes sobrevivam sem sofrer qualquer injúria e, no qual os danos às propriedades serão confinados às vizinhanças imediatas do local em que se iniciou, sendo reduzidas as perdas provocadas pelo incêndio. É sobre o aspecto de "sobreviver sem qualquer injúria" que a simulação emergencial atua, otimizando o ambiente afim de que a evacuação possa ocorrer dentro de um tempo considerado seguro.

Para o estudo de evacuação emergencial, estudamos o Teatro Municipal de Uberlândia/MG. O local considerado cartão-postal da cidade é uma obra projetada por Oscar Niemeyer onde foram empregados cerca de R\$25 milhões na construção da obra, com recursos provenientes do Município e da captação fiscal pela Lei Rouanet (Lei nº 8.313, de 23 de dezembro de 1991).

Atualmente, o teatro tem capacidade máxima de 819 pessoas e é realizado cerca de 20

apresentações mensais, entre elas apresentação de orquestras, peças e shows.



Figura 1.1: Teatro Municipal de Uberlândia

É importante ressaltar que o objetivo desse trabalho não é de fiscalização. O Teatro Municipal obedece todas exigências dos órgãos competentes, sendo seus gestores um exemplo de organização e responsabilidade. O nosso objetivo é simular uma situação emergencial em ocorrência no auditório do teatro, com o objetivo de estudar aspectos físicos ligados à segurança e caso haja necessidade, propor alterações que possam ser importantes para aumentar a segurança.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: O capítulo 2 é focado na fundamentação teórica, uma revisão da literatura e modelos já existentes e atualizações recentes.

O capítulo 3 trás a metodologia, os passos seguidos nesse trabalho, representação e descrição do local implementado, o valores de alguns constantes e o manual base usado para conclusões.

O capítulo 4 apresenta os resultados em gráficos, diagramas e tabelas das medidas de tempo para evacuação total e parcial, a quantidade média para cada porta e uma medida da vazão do sistema. Já o capítulo 5 mostra as principais conclusões e trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REVISÃO LITERÁRIA

Estudos sobre a dinâmica de pedestres se tornou um atraente campo de pesquisa, devido a sua alta aplicabilidade e sua natureza complexa (Aguilar Alonso [1]). Na literatura existem alguns modelos para descrever as principais características do fluxo de Pedestres. Dentre estes, destacamos os modelos de forças sociais (Helbing & Dorso [15], Pelechano et al. [16] e Seyfried et al.[21]), modelos baseados em teoria de filas (Cruz et al. [3–5], Woensel & Cruz [26] e Stepanov & Smith [22]), modelos de autômatos celulares e modelos multiagentes (Feber [9, 10] e Hamagami & Hirata [11]).

Apesar de ser um sistema complexo (Ilachinski [12]), na dinâmica de pedestre deve existir a percepção individual do pedestre ou a percepção de um grupo particular, sobre a direção, desvio de obstáculos, entre outros, o que não ocorre em outros tipos de sistemas complexos. Por isso, os modelos baseados em autômatos celulares são considerados ferramentas excelentes para este fim, pois permite adicionar efeitos em grupos ou individuais sem perder o padrão coletivo emergente.

Este trabalho se baseará na teoria de autômatos celulares (Neumann [14], Wolfram [27, 28], Toffoli [24]) para estudos de dinâmica de pedestres em evacuação emergencial. Os modelos de autômatos celulares para dinâmica de pedestres descritos inicialmente por Schadschneider [19] são considerados modelos eficientes e simples. Nestes modelos, os pedestres são representados por células que se movem estocasticamente por reticulados, ou seja, o movimento é feito por passos discretos. Durante as últimas décadas, houve um avanço nestes modelos, em partes devido ao avanço computacional. Ao longo do tempo várias extensões foram incorporadas com o objetivo de tornar as simulações cada vez mais próximas do comportamento coletivo real (Schadschneider et al. [2, 13, 20], Suma et al. [23], Pereira et al. [18]).

Como exemplo, alguns dos trabalhos deste tema tem apresentado modelos em que há mais de uma rota de saída, apresentando as propriedades emergentes deste comportamento. Em casos de simulação emergencial, este tipo de modelo tem grande importância, pois a evacuação pode ocorrer em mais de uma saída. Pereira et al. [17] apresenta uma nova classe dos modelos de Schadschneider em que se propõe duas novas extensões: a probabilidade de mudança de rotas durante a evacuação e campo de grupos. A primeira proposta permite que durante as simulações, os pedestres possam mudar de direção quando necessário, acessando uma rota alternativa de saída. A segunda extensão adiciona um campo, fazendo os pedestres que estão

em grupos caminharem sempre próximos, buscando a saída de forma conjunta. Estes comportamentos são representados através de um novo conjunto de equações e regras que definem a probabilidade de transição. A seguir apresentaremos uma ideia geral deste modelo, que será usado como referência para condução deste trabalho.

2.2 MODELOS DE AUTÔMATOS CELULARES PARA DINÂMICA DE PEDESTRES

Nos modelos de autômatos celulares (AC), os pedestres são vistos como células ou partículas, que se movem em reticulados de duas dimensões. Cada reticulado pode ser ocupado por apenas um pedestre por vez. Cada pedestre pode se mover para um dos reticulados vizinhos de acordo com a probabilidade de transição p_{ij} em cada passo discreto. A Figura 2.1 apresenta um autômato simples em que o reticulado central está ocupado por um pedestre. As opções de movimentação são representadas pelas setas. Neste caso temos um sistema em que a vizinhança de referência é a chamada vizinhança de Moore. Nos casos em que o movimento só pode ser realizado para os reticulados verticais e horizontais, temos a chamada vizinhança de Von Neumann. Esta também pode ser chamada de vizinhança de um passo pois apenas um passo a cada simulação é permitido. Quando 2 passos são permitidos em um único momento, temos a chamada vizinhança 2 passos, que pode ser usado como uma alternativa para aumentar a velocidade do pedestre (Pereira et al. [18]).

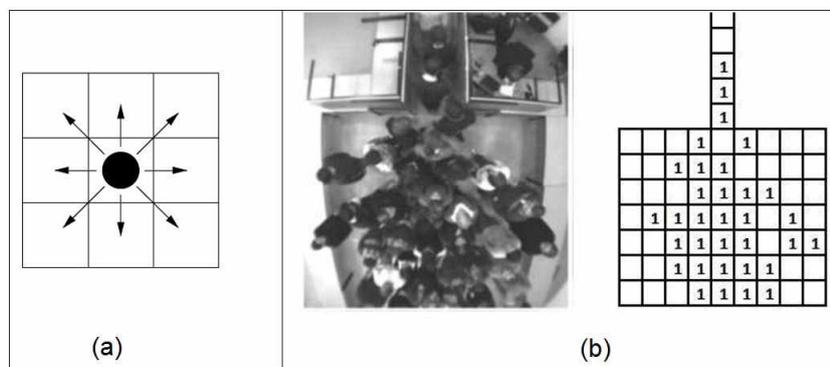


Figura 2.1: (a) Representação do movimento de um pedestre segundo a vizinhança de Moore, sendo a opção escolhida determinada pela probabilidade de transição. (b) Representação de um ambiente por simulação via autômatos finitos.

2.2.1 CAMPO DINÂMICO, ESTÁTICO E DE ANTECIPAÇÃO

Como vimos, neste modelo de AC temos várias opções futuras e por isso precisamos associar a este evento uma distribuição de probabilidade. Primeiramente esta associação será feita através da *matriz de preferências*, que consiste em uma matriz de dimensão 3×3 contendo as probabilidades iniciais de deslocamento da célula para cada respectiva posição na vizinhança. Essa associação é feita conforme apresentado na Figura 2.2. Neste caso temos uma autômato

com vizinhança um passo. Nos casos em que temos vizinhança dois passos, a matriz de preferências passa a ter dimensão 5×5 . Deve-se lembrar que estas probabilidades são apenas as orientações iniciais do autômato, e que a probabilidades finais serão definidas segundo este e outros fatores, que serão vistos posteriormente.

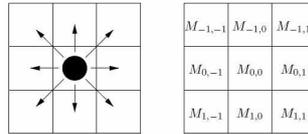


Figura 2.2: Possíveis deslocamentos e a matriz de preferências $M = (M_{ij})$.

A distribuição de probabilidade associada a cada passo pode ser constante ao longo de toda a simulação ou sofrer alterações ao longo do processo. No modelo de SCHADSCHNEIDER assume-se que a matriz de preferências não sofre alterações ao longo da simulação. Em modelos mais avançados como o modelo proposto por Pereira et al [18] assume-se que a matriz de preferências pode ser uma matriz de dimensão 3×3 ou 5×5 , dependendo da posição que a célula ocupa no ambiente, como veremos adiante. Além disso, assume-se que a distribuição de probabilidade atribuída à matriz de preferências é sempre a mesma para todas as células.

Um exemplo simples de matriz de preferências é quando temos um movimento retilíneo, sem flutuações na direção. Neste caso um dos elementos da matriz de preferências carrega toda a massa de probabilidade e todas os outros elementos assumem valor zero de probabilidade. Outro exemplo simples é quando temos um "passeio aleatório" em que todos os elementos da matriz de preferências assumem o mesmo valor. A construção da matriz de probabilidades é um processo que deve levar em conta o conhecimento acerca do fenômeno e/ou estimada através de dados. Entretanto a dificuldade de se conseguir dados para esse fim torna a segunda opção praticamente inviável. O conhecimento acerca do fenômeno aliada aos resultados visualizados durante a simulação comparados aos eventos reais são geralmente as ferramentas para construção da matriz de preferências e definição de outros parâmetros do modelo. O trabalho de Suma et al. [23] apresenta uma validação do modelo a partir de uma simulação física, feita com pedestres reais e gravada para fins de comparação. As comparações entre o modelo e os resultados físicos foram feitas de uma forma semi-quantitativa, através das análises gráficas, indicando uma boa escolha dos parâmetros.

Vimos que as probabilidades de transição de uma célula é determinada inicialmente pela matriz de preferências. Entretanto, sabemos que a movimentação de um pedestre também está associada, em partes, à interação com outros pedestres. A probabilidade de um pedestre seguir por um determinado caminho pode aumentar se os outros pedestres, em grande quantidade, adotarem este mesmo caminho. Da mesma forma pode diminuir se nenhum ou poucos pedestres o adotarem. Esta é a ideia de *rastro* (ou *trilha virtual*), que é a tendência do pedestre seguir a multidão, principalmente em ambientes em que o conhecimento acerca do mesmo é restrita. Para introduzir este conceito ao modelo foi criado o CD, ou *campo dinâmico* (*Dynamic Floor Field*), que consiste em alterar a distribuição de probabilidade conforme o fluxo de pedestre numa determinada posição. Matematicamente o CD de uma posição é um contador interno,

existente para cada posição. O número de pedestres que visitaram a posição determinará seu CD da seguinte forma: a cada célula que passa pela posição (x, y) o CD da mesma é incrementado em uma unidade. Esse aumento pode ser fortalecido (ou enfraquecido) segundo uma constante de acoplamento. A partir de então, o valor do CD será utilizado por outras células como um atrativo para aquela posição, através do cálculo da probabilidade de transição, como veremos adiante. Em Dorigo [8], o fenômeno biológico é conhecido com feromônio de formiga.

Assim, como há uma interação entre os pedestres, há também uma interação entre os pedestres e as partes físicas do ambiente, de forma que, existem partes mais atrativas (ou menos atrativas) que outras. Entre as partes mais atrativas podemos citar as portas e saídas de emergências. As partes menos atrativas incluem as proximidades com paredes de lado contrário às saídas. Para representar essa interação foi criado o *campo estático CE* (*Static Floor Field*). Diferentemente do CD, o CE permanece o mesmo durante toda a simulação. Este pode ser determinado manualmente pelo pesquisador ou automaticamente, utilizando alguma regra. Schadschneider [19] utiliza como CE a distância entre a posição da célula e a saída, sendo que, quanto maior a distância, menor será a probabilidade de ocupação da posição. A Figura 2.3 apresenta um exemplo onde temos o CE para dois ambientes, uma sala simples e um corredor composto por duas salas. Neste caso o CE é representado pelo número de passos até a saída definitiva do ambiente.

Independente de como seja definido o CE, a ideia por trás dele é sempre a mesma: atrair as células para a saída de interesse. Neste trabalho o CE será usado para direcionar a matriz de probabilidades de transição, atribuindo maior probabilidade para as posições com menor valor de CE, portanto, utilizar o CE definido por Schadschneider [19] ou utilizar o número de passos como CE não terá diferenças práticas.

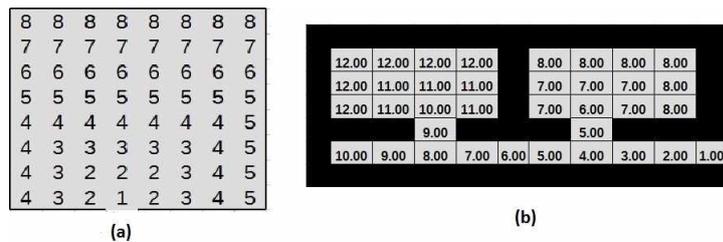


Figura 2.3: Exemplo de CE definido a partir da contagem de passos (Heurística de Manhattan). (a) Sala simples e (b) corredor e salas

Em ambientes onde há mais de um sentido preferencial, existe uma tendência de colisões de pedestres devido ao fluxo inverso ou cruzado. Porém existe também uma tendência dos pedestres em evitar essas colisões antecipando mentalmente o caminho a ser feito por ele e pelos outros pedestres. Isso acaba criando um efeito de desvio temporário de rota, ocasionado por um campo de força imaginário que afasta o pedestre daqueles outros em rota contrária ou cruzada. A esse campo damos o nome de *campo de antecipação CA* (*Anticipation Floor Field*) proposto por Suma et al. [23]. Podemos resumir matematicamente o CA de uma posição de célula como sendo a contagem do número de células que deverão passar por ela em alguns segundos futuros, sendo que, quanto maior o CA, menor é a probabilidade de se dirigir para

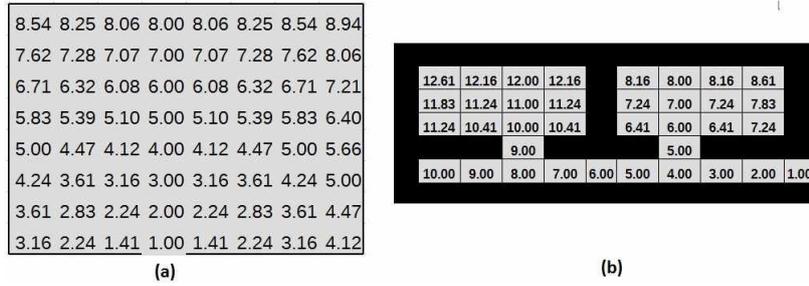


Figura 2.4: Exemplo de CE definido a partir da Distância Euclidiana (Heurística Euclidiana). (a) Sala simples e (b) corredor e salas

aquele ponto. Assim, para um célula qualquer, isso diminuirá as probabilidades da mesma se deslocar para aquela posição, mesmo que ela esteja em seu caminho preferencial. Para cada célula deste trabalho é feita uma leitura do CA de uma ou duas posições a sua frente, de forma que, quanto maior o valor de CA, maior é o número de células que pretendem passar pela mesma posição, diminuindo assim suas chances de se deslocar para o mesma posição, criando consequentemente um desvio temporário.

2.2.2 PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO

A probabilidade de transição é calculada para cada pedestre conforme a seguinte expressão:

$$p_{ij} = N e^{K_d D_{ij}} e^{-K_a E_{ij}^{(m)}} (e^{K_s M_{ij}})^{V_{ij}} (e^{K_s U_{ij}})^{(1-V_{ij})} (1 - n_{ij}) \xi_{ij} \quad (2.1)$$

$$E_{ij}^{(m)} = \sum_{m' \neq m} A_{ij}^{(m')} \quad (2.2)$$

em que:

- p_{ij} é a probabilidade de transição, ou seja, é a probabilidade de uma célula que está em na posição (i^*, j^*) , se deslocar para a posição (i, j) (sendo (i, j) uma vizinhança de (i^*, j^*));
- N é uma constante normalizadora para garantir que $\sum \sum p_{ij} = 1$;
- D_{ij} é o valor da Força Dinâmica referente a posição (i, j) ;
- n_{ij} é um identificador de estado da posição (i, j) . Se $n_{ij} = 1$ então a posição (i, j) possui estado *ocupado*. Se $n_{ij} = 0$ então a posição (i, j) possui estado *livre*. Deve-se lembrar que os AC estocásticos para simulação de pedestres só possuem dois estados possíveis;
- K_d é a Constante de acoplamento que altera os efeitos de D_{ij} ;
- ξ_{ij} é um fator reconhecedor de barreiras e obstáculos. Diferentemente dos AC clássicos, Nos AC para simulação de pedestres existem posições que assumem um comportamento especial: possuem o estado *ocupado* durante toda a simulação para representar barreiras físicas. Como a ocupação não será feita por uma pessoa, o modelo apresenta o identificador

particular ξ_{ij} para essas posições. Se $\xi_{ij} = 0$, então a posição (i, j) é uma posição especial, ou seja, é uma barreira física.

- m corresponde a direção preferencial da célula, indicada pelo CE;
- m' corresponde às quatro direções que a célula pode seguir em uma vizinhança de VONN NEUMANN, sendo que 1: direita, 2:cima, 3:esquerda e 4:baixo. Dessa forma $m' \in \{1, 2, 3, 4\}$;
- $A_{ij}^{(m')}$ corresponde ao CA para a posição (i, j) . Logo, cada posição (i, j) existem quatro valores de CA, um para cada direção. Primeiro verifica-se se a posição (i, j) é uma *posição reservada*, ou seja, se a mesma faz parte de um conjunto de D_A células pertencentes ao trajeto esperado de algum pedestre. Depois faz-se a contagem do número de trajetos esperados que passam por (i, j) e atribui a cada $A_{ij}^{(m')}$ o número de trajetos esperados na direção m' . Mais detalhes podem ser obtidos em Suma et al. [23].
- $E_{ij}^{(m)}$ é o efeito da antecipação. Note que, quanto maior o valor de $E_{ij}^{(m)}$, menor será a probabilidade da célula se deslocar para (i, j) . Isso significa que existe um ou mais trajetos esperados de outras células em (i, j) (com diferente CE), logo, deve-se evitar esse trajeto como uma forma de evitar colisões. Mais detalhes podem ser obtidos em Suma et al. [23].
- K_a é a Constante de acoplamento que potencializa os efeitos de $E_{ij}^{(m)}$.
- M_{ij} é a probabilidade inicial de transição (elemento da matriz de preferências 3×3) da posição (i, j) considerando uma vizinhança de 1 passo.
- U_{ij} é a probabilidade inicial de transição (elemento da matriz de preferências 5×5) da posição (i, j) considerando uma vizinhança de 2 passos
- V_{ij} é uma variável binária, em que $V_{ij} = 1$ se pelo menos uma das duas células na vizinhança de 2 passos no sentido preferencial (de menor distância para a saída) estiverem no estado ocupado. Caso contrário temos que $V_{ij} = 0$. Mais detalhes em Pereira et al. [18].
- K_s é a constante de acoplamento que altera os efeitos de M_{ij} e U_{ij} ;

2.2.3 REGRAS PARA MUDANÇA DE DIREÇÃO

Seja um autômato celular estocástico para simulação de pedestres bi-dimensional definido com mais de um CE. Neste caso podemos dizer que, em um contexto de evacuação, temos diversas rotas de saída, diretamente relacionadas aos CE. Inicialmente cada célula ocupada terá um CE definido aleatoriamente, de acordo com a sua posição inicial. Este CE poderá ser alterado durante a simulação quando as vizinhanças n_z passos no seu sentido preferencial estiverem ocupadas, conforme a Figura 2.5. A vizinhança hachurada chamaremos de *vizinhança*

preferencial. Deve-se lembrar que o número de passos que define a vizinhança n_z é usado exclusivamente para determinar a mudança de rota, e que não precisa ser necessariamente igual ao valor n que define a vizinhança para as probabilidades de transição.

Também há algumas regras relativas à parte não hachurada da vizinhança, ou *vizinhança não preferencial*. Podemos supor que, em casos de emergências, geralmente os pedestres que se encontram no início do congestionamento provocado pela multidão poderão mudar de rota, ao passo que, aqueles que estão dentro do aglomerado, mesmo que queiram mudar de rota, não terão como fazê-lo. Assim, uma forma de avaliar se uma célula está ou não incluída em um congestionamento é analisando a ocupação em sua vizinhança. Se as vizinhanças preferenciais e não preferenciais estiverem todas ocupadas, é um sinal de que essa célula encontra-se dentro de um congestionamento. Se há uma ocupação total na vizinhança preferencial e uma ocupação média ou baixa na vizinhança não preferencial, é um indicativo de que a célula está no início de um congestionamento, podendo assim, se preferir, mudar de rota.

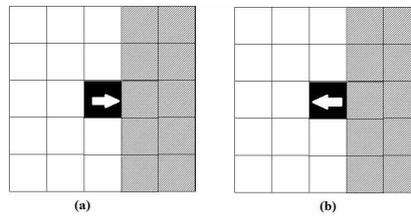


Figura 2.5: Representação da primeira regra de mudança de rota. As setas indicam o sentido preferencial determinado pelo CE. Em (a) as células hachuradas indicam que estão ocupadas. Em (b), com probabilidade μ , o sentido preferencial é alterado devido a configuração das células ocupadas em uma vizinhança 2 passos ($\varphi=0$).

Seja W o número de CE presentes em um ambiente. Denominaremos como $S_{ij}^{(t)}$ o valor do CE da célula de referência no passo (t) . Suponha que, no passo (t) , a célula de referência tenha como orientação o CE chamado de $w_g \in w_p$, ($p = 1, 2, \dots, W$) de forma que $S_{ij}^{(t)} = S_{ij}(w_g)$. Suponha agora que, no passo (t) , todas as células na vizinhança preferencial n_z passos estão ocupadas e a ocupação na vizinhança não preferencial é menor ou igual a φ (veja Figura 2.5- indicativo de congestionamento). Logo temos que $P(S_{ij}^{(t+1)} = S_{ij}(w_g)) = \mu_g$, e $P(S_{ij}^{(t+1)} = S_{ij}(w_p)) = \mu_p$, ($\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_W = 1$).

Evidentemente, podemos dizer que a mudança de rota terá uma maior probabilidade de ocorrer para pedestres que se encontram distantes das saídas e essa probabilidade irá diminuir conforme o pedestre se aproxima da saída escolhida por ele, de forma que, essa probabilidade se tornará quase nula quando o pedestre se encontrar muito próximo da saída, mesmo que hajam congestionamentos. Logo, para cálculo de $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_W)$ devemos ter como base a distância a ser percorrida pela célula até a saída definitiva do ambiente. Seja um automato celular estocástico para simulação de pedestres bi-dimensional definido com W campos estáticos. Logo definimos

$$q_p = \left(\frac{\frac{1}{S_{ij}(w_p)}}{\sum_{l=1}^W \frac{1}{S_{ij}(w_l)}} \right), p = 1, \dots, W. \quad (2.3)$$

$$\mu_g = q_g^{K_r} \quad (2.4)$$

$$\mu_p = (1 - q_g^{K_r}) \frac{q_p}{(\sum_{l=1}^W q_l) - q_g}, g \neq p. \quad (2.5)$$

em que $\mu_g + \sum \mu_p = 1$. As equações 2.3, 2.4 e 2.5 definem a probabilidade de mudança de rota com base nas distâncias entre o pedestre e as saídas do ambiente, calculadas conforme a Figura 2.6. Dessa forma, as equações definem que, quanto mais próximo à saída de sua rota, menor será a probabilidade de mudança de rota. Da mesma forma, quanto mais distante, maior será a probabilidade de mudança de rota. A constante K_r , ($0 \leq K_r \leq 1$) é uma constante de acoplamento, que define a força das distâncias no cálculo das probabilidades. Quanto menor o valor de K_r , menor é a força das distâncias, de forma que, para valores baixos de K_r , teremos poucas, ou nenhuma mudança de rota no modelo. Assim, quando $K_r = 0$, o modelo se transforma nos modelos tradicionais. Valores de altos K_r (próximo de 1) indica uma maior força das distâncias, de forma que, teremos um modelo mais propenso a mudança de rota pelos pedestres.

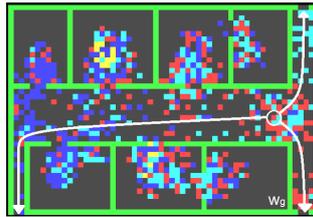


Figura 2.6: Representação dos CE usados no cálculo de μ . A célula em destaque que tem como referência a rota w_g encontrou um congestionamento e terá que escolher uma nova rota (3 rotas possíveis). A probabilidade de seguir em cada direção será inversamente proporcional ao tamanho dos CE (distâncias), apresentados pelas linhas brancas. Neste caso a probabilidade de continuar na mesma rota será a de maior valor.

É válido que, em um congestionamento é praticamente impossível de seguir um caminho contrário a maioria dos pedestres. Esta teoria fornece uma outra regra para mudanças de rota: se a ocupação da vizinhança de uma célula na posição (i, j) for total e se todas as células (ou quase todas) na vizinhança n_z passos tiverem o mesmo CE, exceto a célula da posição (i, j) , então esta célula poderá mudar de CE. Esta regra está ilustrada na Figura 2.7.

Seja $S_{ij}(1)$ e $S_{ij}(2)$ os dois possíveis CE do autômato. Denominaremos como $S_{ij}^{(t)}$ o valor do CE no passo (t) . Suponha que, no passo (t) , a célula de referência tenha como orientação $S_{ij}(1)$ e que a sua vizinhança n_z passos tenha um número de células maior ou igual a ζ em estado ocupado e com orientação $S_{ij}(2)$. Logo, com probabilidade π , teremos $S_{ij}^{(t+1)} = S_{ij}(2)$ e com probabilidade $(1 - \pi)$ teremos $S_{ij}^{(t+1)} = S_{ij}(1)$.

2.2.4 CAMPO DE GRUPOS

A partir da seção anterior, vimos que uma célula poderá alternar seu percurso de acordo com algumas circunstâncias importantes. A partir da adição desse novo elemento ao modelo

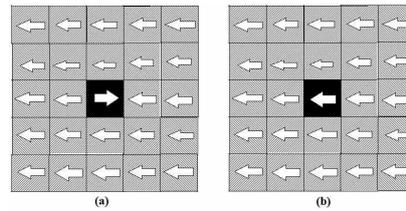


Figura 2.7: Representação da regra segunda de mudança de rota. As setas indicam o sentido preferencial determinado pelo CE. Em (a) apenas a célula central tem direção contrária a vizinhança. Em (b), com probabilidade π , o sentido preferencial é alterado devido a configuração das células ocupadas em uma vizinhança 2 passos.

de AC, surge uma questão importante. Nem todos pedestres agem alternando seu percurso por vontade própria mas sim por um comportamento coletivo. Exemplos típicos que ilustram esse comportamento são os grupos familiares, grupos escolares e grupos de amigos, dentre outros. A importância em considerar esses grupos é que eles podem ter influência direta nos parâmetros de segurança, já que variáveis como velocidade e tempo de evacuação podem sofrer alterações devido a influência direta dos grupos. Elementos em grupos podem desencadear congestionamentos pelo fato de sempre caminharem em proximidade e/ou diminuírem a velocidade (podem até mesmo parar) quando algum elemento do grupo não está próximo.

Para criação dos grupos no modelo de AC, foi criado um novo campo de atração chamado *campo de grupo (CG)*. Este campo será uma área definida no espaço pelos próprios elementos do grupo, sendo que as coordenadas são determinadas pelo menores e maiores valores de linhas e colunas, dinamicamente a cada passo, conforme a Figura 2.8(a). Neste caso o modelo para cálculo das probabilidades de transição terá o acréscimo de uma variável indicadora, que anula as probabilidades de transição para posições fora do CG para todos os elementos do grupo. Dentro do CG o movimento é livre e será definido pelo CE. Todos os elementos do grupo obviamente terão o mesmo CE, que poderá ser alterado caso o grupo encontre algum congestionamento. A possível mudança de rota do grupo será definida pelo elemento mais adiantado, utilizando as mesmas regras adotadas anteriormente. Todos os outros elementos irão adotar a mesma postura.

Em alguns casos pode surgir algum obstáculo no meio do grupo que impede a progressão do mesmo até a saída. A Figura 2.8(b) ilustra um caso possível. Casos como este acabam criando uma parada definitiva do grupo pelo fato da área de atuação do CG não poder ser deslocada. Logo, uma solução encontrada foi a interrupção temporária do efeito do CG nos elementos que se encontram retidos pelo obstáculo. Com isso, estes elementos poderão então caminhar livremente sem o efeito do CG enquanto o grupo espera a aproximação dos mesmos. Assim que o elemento superar o obstáculo, o CG volta a fazer efeito sobre o mesmo e o grupo retorna o percurso até a saída.

Existem casos em que os elementos não conseguem superar o obstáculo pelo fato de não existir caminho livre. Estes casos ocorrem quando outras células estão bloqueando todo o caminho, conforme apresentado na Figura 2.8(c). Eventos como estes foram observados com frequência nas simulações deste trabalho e podem ocorrer também com frequência em situações

reais. O problema gerado é que cria-se um círculo vicioso em que, ao mesmo tempo que o grupo bloqueia o caminho das outras células enquanto "espera" a célula retida, estas outras células bloqueiam o caminho do elemento retido do grupo, então cria-se um colapso, aumentando demasiadamente o tempo de simulação ou fazendo com que a simulação nunca seja concluída. A solução encontrada neste caso é permitir que, em um certo momento, o elemento do grupo retido possa deixar de fazer parte do grupo definitivamente. Assim o grupo continuará o seu percurso permitindo a passagem das outras células e estas por sua vez, permitindo a passagem do elemento retido, que agora caminhará para a saída independente do grupo. Assim será fixada uma probabilidade Δ de que um elemento retido, deixe de fazer parte do grupo. A probabilidade Δ garante, pela lei dos grandes números, que em algum momento haverá uma solução do colapso, com probabilidade 1.

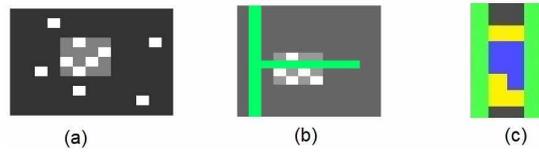


Figura 2.8: (a) Representação do campo de grupo (CG). A área clara representa o CG para um grupo composto de cinco elementos. (b) Representação de obstáculo que impossibilita movimentação do grupo. O elemento isolado terá a ação do CG interrompida. (c) Representação de colapso provocado pelo CG. As células em amarelo na parte inferior representa o grupo estagnado a espera das células amarelas na parte superior. As células em azul estão presas pelas barreiras formada pelo grupo.

Seja a célula na posição (i^*, j^*) uma célula escolhida como sendo uma célula de grupo. A probabilidade de transição de uma célula da posição (i^*, j^*) para uma posição (i, j) de sua vizinhança é dada por:

$$p_{ij} = N e^{K_d D_{ij}} e^{-K_a E_{ij}^{(m)}} (e^{K_s M_{ij}})^{V_{ij}} (e^{K_s U_{ij}})^{(1-V_{ij})} (1 - n_{ij}) \xi_{ij} I_{g1} \quad (2.6)$$

em que $I_{g1} = 0$ se a nova área do CG a ser gerado a partir da movimentação para a posição (i, j) é maior que η e $I_{g1} = 1$ caso contrário.

2.2.5 CONDIÇÕES INICIAIS

Um fato importante e que pode impactar diretamente nas propriedades emergentes do sistema, são as condições iniciais de simulação. A condição mais importante e que será tratada aqui é a definição da rota de saída de cada célula no início da simulação. É fácil chegar à conclusão que esta escolha deva ser aleatória, porém, com maiores chances da célula escolher a saída mais próxima, sendo que estas chances devem aumentar de acordo com a proximidade da saída.

Para definição da rota ao qual a célula pertencerá no início da simulação, será utilizado como critério o CE, de forma que, a célula possuirá maior probabilidade de ter como saída aquela que fornece o menor CE.

Seja um automato celular estocástico para simulação de pedestres bi-dimensional definido com W campos estáticos. Seja $S_{ij}(w_p), p = 1, \dots, W$ um possível CE do ambiente. Logo definimos

$$P(CE = S_{ij}(w_p)) = \left(\frac{\frac{1}{S_{ij}(w_p)}}{\sum_{l=1}^W \frac{1}{S_{ij}(w_l)}} \right), \quad (2.7)$$

sendo $P(CE = S_{ij}(w_p))$ a probabilidade do CE inicial para a célula na posição (i, j) ser igual a $S_{ij}(w_p)$.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, consideramos como ambiente a ser simulado o Teatro Municipal de Uberlândia.

Inicialmente foi feita uma visita ao local, com o intuito de conhecer o ambiente a ser reproduzido e verificar possibilidades de rotas de emergência, para que futuramente fosse comparado ao mapa que representa o ambiente. O Teatro municipal possui hoje 3 saídas do auditório, sendo que duas levam diretamente para o exterior e uma leva para o saguão de entrada.

Como o auditório apresenta um formato curvilíneo em alguns pontos, a reprodução de formato pela simulação foi aproximada, contudo respeitando ao máximo a área do ambiente, de forma que isso não interfira de forma significativa nos resultados das simulações. A figura 3.1 representa o mapa final utilizado nas simulações. O desenho da matriz 3.1 do local foi feito usando planilhas eletrônicas no Software Microsoft Excel, como o indicado por [18]. As setas indicam as três saídas possíveis. As faixas centrais representam as poltronas, com os corredores de escoamento dispostos tanto horizontalmente quanto verticalmente. Os corredores das saídas 1 e 2 são representados verticalmente e não curvilíneos como no mapa original, porém respeitam a mesma área em toda a sua extensão.

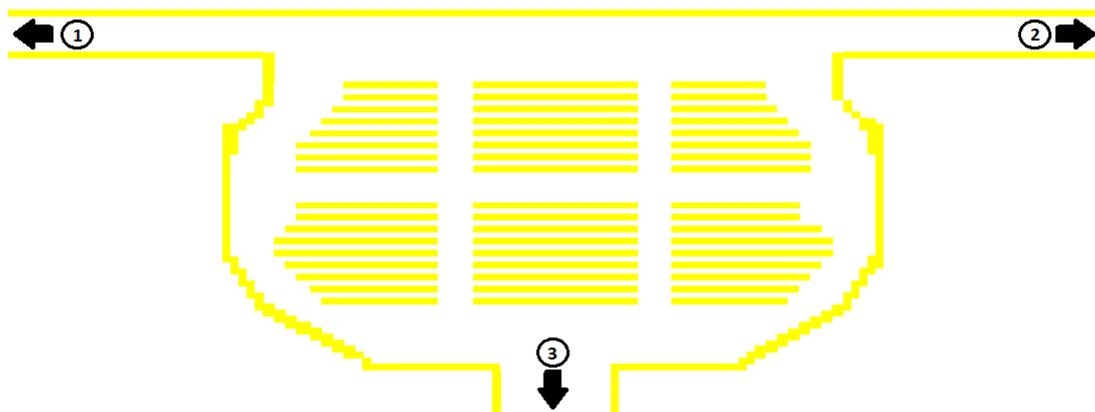


Figura 3.1: Matriz criada do desenho do teatro no Excel como parâmetro de entrada para o programa.

O pixel do desenho possui tamanho da área média de ocupação de um pedestre que é de $40 \times 40\text{cm}^2$, esta área foi estimada por [25]. Por conta dessa limitação, algumas medidas foram reajustadas e ocasionou na falta de simetria para alguns pontos.

As portas 1 e 2 são saídas de emergências, são sinalizadas como imposto pelo corpo de Bombeiros, possuem portas antipânico, caminho sinalizado até a saída e sem material inflamável. A

porta 3 é a entrada e saída principal do teatro, normalmente esta permanece fechada durante o espetáculo porém, pode ser aberta facilmente em caso de emergência.

Após a adequação dos parâmetros foram realizadas duas simulações com 15 (quinze) grupos e outra com 25 (vinte e cinco) grupos, cada uma com 1.000 replicações. Para realização das simulações, foram considerados os parâmetros do modelo apresentados em [17]. Os valores das principais constantes estão na tabela 3.1.

Constante	Valor
K_r	0,25
K_a	1
K_d	1
K_s	12

Tabela 3.1: Constantes necessárias no modelo.

As simulações foram feitas com uma lotação de 896 pessoas, quantidade acima da lotação máxima do Teatro que é de 819 pessoas sentadas. Esse aumento tem o objetivo de aproximar número máximo de usuários, pois nem todos são espectadores e precisamos considerar elenco e também funcionários. Consequentemente todas as simulações acontecem em situação de extrema de lotação. A figura 3.2 apresenta uma foto de uma simulação realizada com 15 grupos.

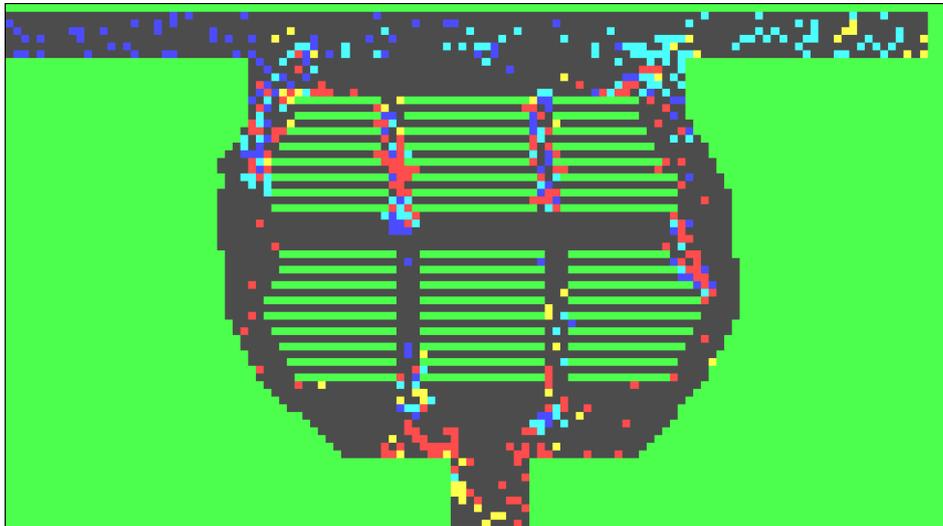


Figura 3.2: Simulação com 15 grupos em estado intermediário. Células em cor azul escura tem intenção de sair pela porta 1, em cor azul claro pela porta 2, as vermelhas pela porta 3. As células amarelo representa grupo de pessoas.

As simulações foram realizadas usando um software próprio desenvolvido pelo orientador desse trabalho e foram realizadas em notebook da marca Dell, com processador i7 8ª Geração com memória RAM de 8GB. As simulações demoraram cerca de 40 minutos.

Em cada simulação foi coletado a quantidade média de pessoas que saíram por cada uma das 3 portas, o tempo de evacuação total e uma medida de vazão do sistema (número total

de vezes que os usuários pararam de andar e/ou retornaram devido a congestionamentos). A partir desses resultados, foram calculadas as medidas descritivas sobre o tempo de evacuação total. Para cada simulação foi produzido um gráfico de pontos, onde cada ponto representa o resultado de uma simulação. Este gráfico nos dá uma ideia global dos acontecimentos, como a variabilidade do tempo de evacuação e evacuações atípicas (tempo de evacuação muito altos).

Para uma conclusão sobre a eficiência da evacuação a partir das simulações, utilizaremos como referência o O SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [6], um manual internacional sobre normas de segurança para emergências. Segundo o SFPE, em ambiente que consiste em auditórios fechados, o tempo de evacuação total deve ser de aproximadamente 4 minutos, para garantir uma evacuação segura. Consideraremos portanto este valor como referência para o estudo final com os resultados obtidos pelas simulações.

4. RESULTADOS

Abaixo apresentamos os gráficos 4.1 e 4.2 que apresentam o tempo até a evacuação total para as 1000 simulações realizadas. As linhas representam o tempo médio de evacuação obtido pelas simulações e o valor de referência. Notamos que a grande massa de pontos ocorrem numa sequência próxima a linha de referência, com alguns pontos discrepantes ao longo do gráfico. Os gráficos mostram resultados mais concentrados quando temos 15 grupos, e resultados mais dispersos quando temos 25 grupos. Este resultado indica que quanto maior for o numero de grupos, maior é a possibilidade de imprevistos, que aumentam o tempo de evacuação total. Este resultado já era esperado, pois sabemos que muitos problemas podem ocorrer devido aos laços que unem as pessoas em uma situação de emergência, dentre eles podemos citar a perda de alguém conhecido, o que impede de continuar o trajeto e acidentes que causam a parada não só do acidentado mas de todos que o acompanham.

O vídeo da simulação com 25 grupos pode ser acessado pelo link: <https://www.youtube.com/watch?v=9YSsKxnULIk>.

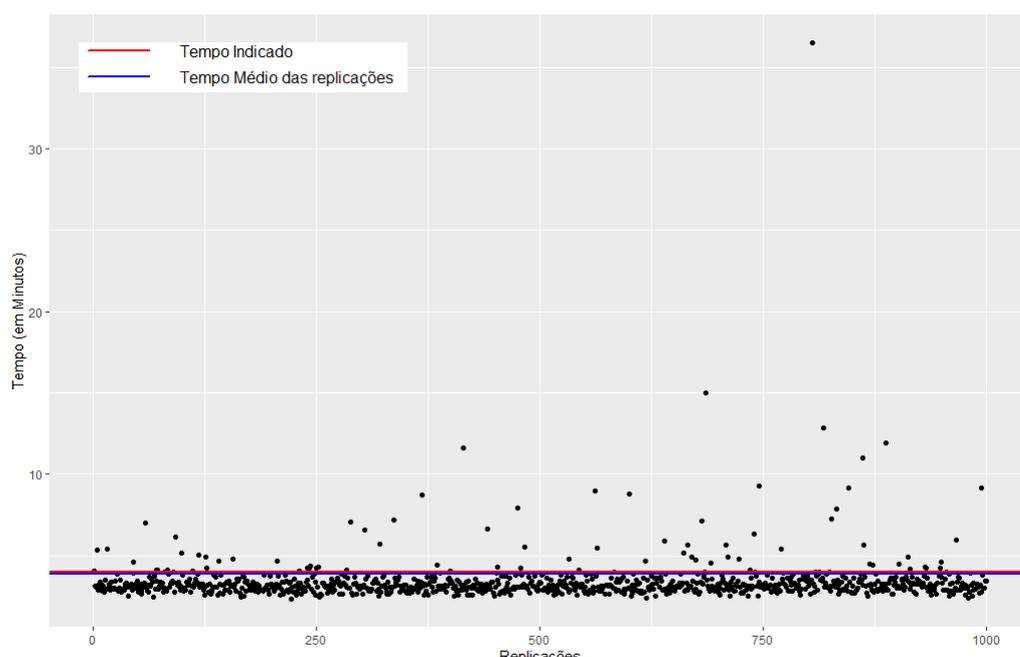


Figura 4.1: Tempo médio das replicações com 15 grupos de pessoas.

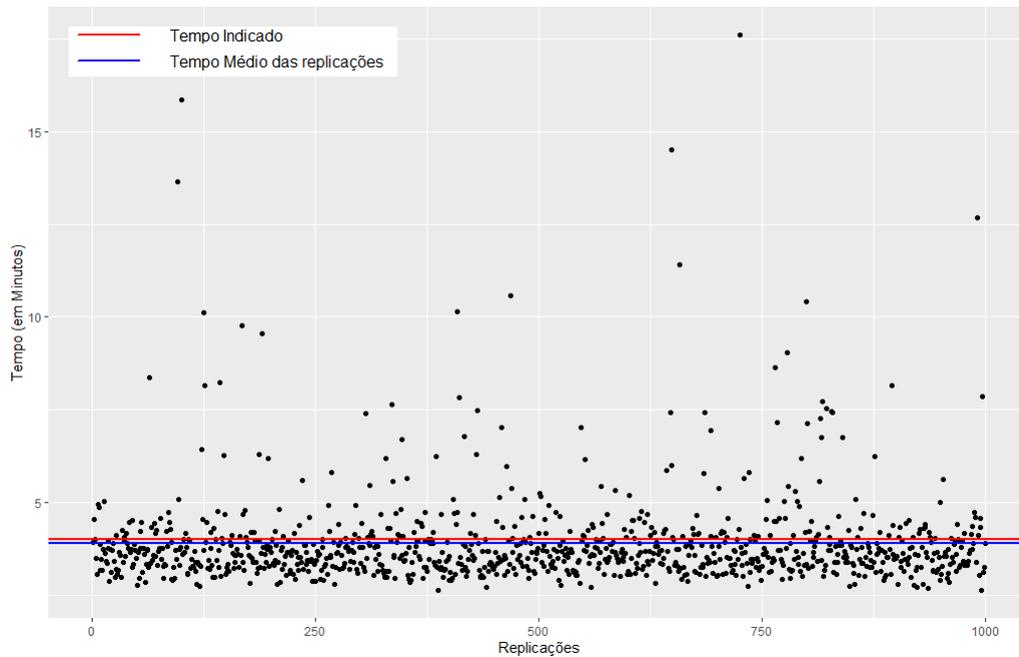


Figura 4.2: Tempo médio das replicações com 25 grupos de pessoas.

A tabela 4.1 mostra as principais estatísticas descritivas para o tempo de evacuação para as 3 quantidades de grupos. Com 15 grupos, o tempo médio de evacuação é 3,40 min e a mediana de 3,15 min. O tempo médio está abaixo do considerando seguro pelo SFPE [6]. Para 25 grupos, o tempo médio é de 3,91, valor também abaixo da norma.

Devido ao grande número de simulações, os intervalos de confiança obtidos tiveram baixa amplitude. Um fato importante é que os limites superiores destes intervalos estão abaixo do valor de referência indicando que há uma alta confiança de que o tempo médio de evacuação real esteja abaixo do valor de referência. Outro fato importante é que há um aumento significativo no tempo de evacuação total quando temos 25 grupos, pois os intervalos de confiança não se interceptam, indicando que a presença de grupos provavelmente é um fator importante no tempo de evacuação total.

Tabela 4.1: Estatísticas descritivas para o tempo de evacuação (T).

Grupos	Média	Desvio Padrão	Mediana	Max	Min	Int. de Confiança (95%)
15	3,40	1,46	3,15	36,53	2,34	[3,31-3,49]
25	3,91	1,29	3,62	17,61	2,63	[3,82-3,99]

Em ambas as simulações fica evidente a assimetria à direita ou positiva, uma vez que a média é maior que a mediana. Isto indica que a ocorrência de valores abaixo da média é maior que valores acima. Quando consideramos 15 grupos, das 1000 simulações apenas 8,1% estão acima de 4 minutos e considerando 25 grupos, 27,2% estão acima. Isto pode ser uma evidência da segurança do local.

Considerando que o perfil do público que visita um teatro, é comum que sejam estas visitas sejam feitas em grupos. Vale ressaltar que duas pessoas não é considerado um grupo, a

formação do grupo é considerada em média por 4 pessoas. Por este motivos vamos considerar as informações a seguir apenas para 25 grupos.

A princípio podemos pensar que a saída é feita de forma constante, ou seja, o intervalo de tempo para evacuação entre as 10% primeiras pessoas e o mesmo intervalo de tempo para evacuação entre as últimas 10% . Porém quando analisado a diferença do tempo a cada 25% das pessoas, tabela 4.2 e figura 4.3, vemos que a primeira parte evacua em 0,45 min e a última parte em 2,26 min , ou seja, gasta 5 vezes mais tempo.

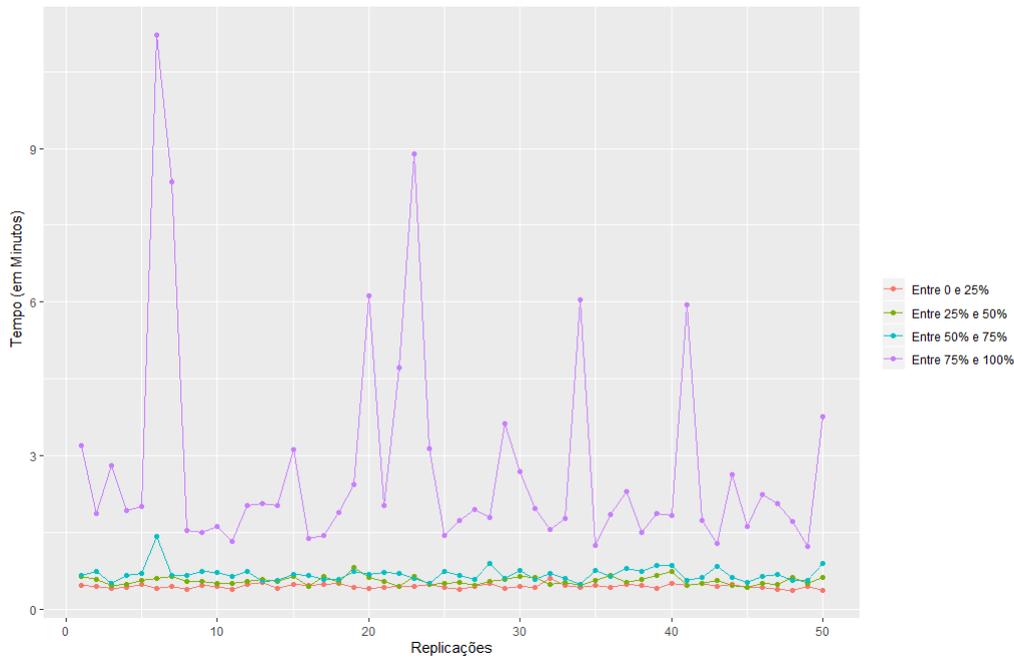


Figura 4.3: Diferença de tempo a cada 25% das pessoas evacuadas

Tabela 4.2: Estatísticas descritivas para a diferença do tempo a cada 25% das pessoas evacuadas.

Diferença	Média	DP	Mediana	Max	Min	Int. de Confiança (95%)
0 e 25%	0,45	0,04	0,44	0,63	0,32	[0,445-0,451]
25% e 50%	0,54	0,08	0,52	1,04	0,38	[0,534-0,544]
50% e 75%	0,66	0,11	0,64	1,42	0,47	[0,656-0,671]
75% e 100%	2,26	1,28	1,95	15,77	0,97	[2,181-2,339]

A quantidade de pessoas que saíram por cada uma das portas é uma informação útil para a segurança, a tabela 4.3 mostra que a porta principal é por onde sai a maior quantidade de pessoas, o que na prática realmente acontece pois a princípio temos a pensar em sair por onde entramos.

Tabela 4.3: Quantidade média de pessoas que saem por cada uma das portas.

Porta 1	Porta 2	Porta 3
263,80	276,64	345,56

Podemos ainda analisar o número total de vezes que alguém teve que parar por congestionamento ou voltou por causa da lentidão pois esta é uma medida da qualidade da vazão do sistema e quanto menor melhor.

Tabela 4.4: Estatísticas descritivas da vazão do sistema.

Média	DP	Mediana	Max	Min	Int. de Confiança (95%)
93.631,19	10.373,77	91.421	178.325	75.227	[92.987,45-94.274,93]

Considerando que as simulações foram realizadas com 896 pessoas, cada pessoa em média teve que parar ou voltar 104,5 vezes.

5. CONCLUSÕES

O modelo via Autômatos Celulares se mostra como uma ferramenta bastante útil para a resolução do problema de situação de emergências, em que permite simular ambientes independente de sua complexidade. Apesar de algumas alterações terem sido necessárias devido às limitações próprias da ferramenta, tentamos representar ao máximo as dimensões da planta do local.

Após as simulações realizadas, temos evidências suficientes para afirmar que o local pode ser considerado um ambiente seguro, pois o tempo médio de evacuação emergencial estimado ficou dentro da faixa considerada segura. Algumas conclusões complementares também foram obtidas a partir deste estudo. Sendo elas:

- o tempo de evacuação está associado com a quantidade de grupos formados;
- o tempo de evacuação apresenta pontos discrepantes, indicando que em situações raras podem haver atrasos na evacuação, superando em muito, o tempo considerado ótimo para evacuação com segurança. Porém estes pontos discrepantes não estão associados em hipótese nenhuma com a configuração do ambiente. Alternativas para evitar estes casos raros são medidas preventivas que já existem no teatro, como sinalização, acessibilidade, e outros.
- a saída do ambiente não ocorre de forma constante, o que é esperado devido aos congestionamentos formados pelas primeiras pessoas a evacuarem.
- pela porta principal (de entrada) temos uma maior densidade de evacuação.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho mostrou que novas implementações no modelo podem ser úteis para tornar as simulações mais realísticas. Dentre elas podemos destacar:

- Aumento de granulado (Pedestre ocupando mais de uma célula) para refinamento do movimento e do layout do ambiente.
- Alterar a velocidade de caminhada conforme a idade do pedestre (crianças, jovens, adultos e idosos).
- Verificar o efeito nas medidas de segurança do número de pedestres dentro dos grupos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alonso, E. J. A.: *Autômatos Celulares Generalizados como Modelos de Influência para Agrupamentos de Dados e Interações Sociais*. Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- [2] Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A. e Zittartz, J.: *Simulation of Pedestrian Dynamics using a Two-dimensional Cellular Automaton*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 295(3-4):507–525, 2001.
- [3] Cruz, F., Smith, J. e Medeiros, R.: *An M/G/c/c state dependent queueing network simulation model*. *Computers & Operations Research*, 32(4):919–941, 2005.
- [4] Cruz, F. R. B., MacGregor Smith, J. e Medeiros, R. O.: *An M/G/C/C State Dependent Network Simulation Model*. *Computers & Operations Research*, 32(4):919–941, 2005.
- [5] Cruz, F. R. B., Oliveira, P. C. e Duczmal, L.: *State-dependent Stochastic Mobility Model in Mobile Communication Networks*. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 18(3):348–365, 2010.
- [6] DiNenno, P. J.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, vol. 3. National Fire Protection Association National Fire Protection Association, Inc., Quincy, Massachusetts, 2002.
- [7] Distrito Federal, C. de Bombeiros Militar do: *Manual Básico de Combate a Incêndio*. 2009.
- [8] Dorigo, Marco e Maniezzo, V. e. C. A. e. o.: *Sistema de formigas: otimização por uma colônia de agentes cooperantes*. *IEEE Transactions on Systems, man, and cybernetics*, Parte B: Cybernetics, 26:29–41.
- [9] Ferber, J.: *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, cap. Reactive Distributed Artificial Intelligence: Principles and Applications, pp. 287–314. John Wiley & Sons, New York, NY, 1996.
- [10] Ferber, J.: *An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley Longman, New York, NY, 1999.
- [11] Hamagami, T. e Hirata, H.: *Method of Crowd Simulation by Using Multiagent on Cellular Automata*. Em *IEEE/WIC International Conference on Intelligent Agent Technology - IAT 2003*, pp. 46–52. IEEE, 2003.

- [12] Ilachinski, A.: *Cellular Automata: A Discrete Universe*. World Scientific, Singapore, 2001.
- [13] Kirchner, A. e Schadschneider, A.: *Simulation of Evacuation Processes using a Bionics-inspired Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 312(1-2):260–276, 2002.
- [14] Neumann, J. von: *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Champaign, IL, 1966.
- [15] Parisi, D. R. e Dorso, C. O.: *Morphological and Dynamical Aspects of the Room Evacuation Process*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 385(1):343–355, 2007.
- [16] Pelechano, N., Allbeck, J. M. e Badler, N. I.: *Controlling individual agents in high-density crowd simulation*. Em *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pp. 99–108. Eurographics Association, 2007.
- [17] Pereira, L. A., Burgarelli, D., Duczmal, L. H. e Cruz, F. R. B.: *Emergency evacuation models based on cellular automata with route changes and group fields*. *Physica A*, 473:97–110, 2017.
- [18] Pereira, L. A., Duczmal, L. H. e Cruz, F. R. B.: *Congested Emergency Evacuation of a Population Using a Finite Automata Approach*. *Safety Science*, 51(1):267–272, 2013.
- [19] Schadschneider, A.: *Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics - Theory*. Em *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, pp. 75–86, 2002.
- [20] Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C. e Seyfried, A.: *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, cap. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications, pp. 3142–3176. Springer New York, New York, NY, 2009.
- [21] Seyfried, A., Steffen, B. e Lippert, T.: *Basics of Modelling the Pedestrian Flow*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 368(1):232–238, 2006.
- [22] Stepanov, A. e MacGregor Smith, J.: *Multi-objective Evacuation Routing in Transportation Networks*. *European Journal of Operational Research*, 198(2):435–446, 2009.
- [23] Suma, Y., Yanagisawa, D. e Nishinari, K.: *Anticipation Effect in Pedestrian Dynamics: Modeling and experiments*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(1-2):248–263, 2012.
- [24] Toffoli, T.: *Cellular automata as an alternative to (rather than an approximation of) differential equations in modeling physics*. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 10(1):117–127, 1984.
- [25] Tregenza, P. R.: *The Design of Interior Circulation*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, 1976.

-
- [26] Woensel, T. van e Cruz, F. R. B.: *A Stochastic Approach to Traffic Congestion Costs*. Computers & Operations Research, 36(6):1731–1739, 2009.
- [27] Wolfram, S.: *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1994.
- [28] Wolfram, S.: *A New Kind of Science*, vol. 5. Wolfram Media, Inc., Champaign, IL, 2002.