

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**O EFEITO DA SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO DE  
MULTIDÃO NA SEGURANÇA E NO ESTUDO DE LAYOUT**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE  
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE  
POR

Erasmu Nunes Melo

Orientador: Prof.º Márcio das Chagas Moura, DSc.

RECIFE, JULHO / 2015

ERASMO NUNES MELO

**O EFEITO DA SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO DE  
MULTIDÃO NA SEGURANÇA E NO ESTUDO DE LAYOUT**

Dissertação de Mestrado apresentada à UFPE  
para a obtenção de grau de Mestre como parte  
das exigências do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Produção (Área de  
Concentração: Pesquisa Operacional).

Orientador: Márcio das Chagas Moura, DSc

Recife

2015

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M528e    Melo, Erasmo Nunes.

O Efeito da simulação de evacuação de multidão na segurança e no estudo de Layout / Erasmo Nunes Melo. - Recife: O Autor, 2015.

70 folhas, il., gráfs.

Orientador: Prof. Dr. Márcio das Chagas Moura.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2015.

Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Simulação. 3. Autômato Celular. 4. Segurança. 5. Estudo de Layout. I. Moura, Márcio das Chagas. (Orientador). III. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-228



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DE

**ERASMO NUNES MELO**

**“O EFEITO DA SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO DE MULTIDÃO  
NA SEGURANÇA E NO ESTUDO DE LAYOUT”**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL**

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato ERASMO NUNES MELO **APROVADO**.

Recife, 06 de julho de 2015.

---

Prof. MÁRCIO JOSÉ DAS CHAGAS MOURA, Doutor (UFPE)

---

Profª. ISIS DIDIER LINS, Doutora (UFPE)

---

Prof. GILSON LIMA DA SILVA, Doutor (UFPE-CAA)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade de ter concluído mais uma etapa da minha vida acadêmica, por minha vida, família, amigos, e pelos livramentos durante todo este período de viagens sobre uma moto num percurso de 250 km de muito perigo, imprevistos e acidentes, até com vítimas fatais, presenciados a cada viagem.

A meu pai Manoel do Nascimento, minha mãe Maria do Carmo, minhas irmãs Elisângela, Edivânea e Edilânea, a meu filho Davyd e a minha companheira Thatiana, de quem passei tanto tempo distante e a quem devo todo o meu alento para ter conseguido chegar ao fim de mais uma jornada de crescimento.

Ao professor Márcio das Chagas Moura, pelos conhecimentos compartilhados, pela confiança, compreensão e pelo apoio prestados, os quais foram imprescindíveis para elaboração deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Isis Lins e Gilson Lima, pela disponibilidade em participar, observações e contribuições dadas ao trabalho.

A esta universidade, seu corpo docente, secretários, bibliotecários e todos que a fazem, que abriram a janela de onde hoje vislumbro um horizonte superior.

Aos colegas do CEERMA, em especial a Caroline Oliveira, Sharlene Neuma, Wagner Jorge, Humberto Gonzalez, Pedro Tyaquiçã e Daniela Nobrega, pelo apoio nos momentos de reflexão e mesmo de dúvida e tensão.

Aos amigos que aqui conquistei, em especial a Guilherme Caminha, Madson Monte, Thyago Poletto, Túlio Fidel, Fernando Dias, Herman, Elias Junior, Willikate Melo, Ricardo Francisco, entre muitos outros, pela amizade, companheirismo e momentos de descontração; vocês fizeram parte de minha formação e vão continuar presentes em minha vida com certeza.

Aos amigos do Armazém São José, pelo respeito, força, apoio e receptividade durante meu afastamento e atualmente em meu retorno às atividades.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

O constante crescimento populacional e as grandes concentrações de pessoas em diferentes cenários indicam a importância de se estudar o comportamento de multidões. Simulações e modelos matemáticos são destaques entre as formas pelas quais estes estudos vêm sendo desenvolvidos. Estes meios são os mais frequentes devido à falta de dados complementares para desenvolver e validar um modelo explicativo, além de questões morais, legais e éticas que impossibilitam o uso de pessoas em simulações com condições reais de pânico. Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo de simulação de evacuação de multidões em situações de emergência. Além disso, buscou-se desenvolver um modelo adaptável a diferentes cenários com o uso de autômatos celulares, que são modelos matemáticos discretos, delimitados por uma malha contendo células homogêneas e que são identificadas pelos seus pesos, que são atribuições para proporcionar o deslocamento dos indivíduos. Fazendo uso de campo de piso estático, que são modelos de autômatos celulares em que os pesos atribuídos permanecerão os mesmos durante toda a simulação, o modelo foi aplicado em um auditório que teve suas características comparadas e adaptadas com as da NBR 9077: 2001 – Saídas de Emergência de Edifícios, e por meio da permutação do posicionamento da porta, obteve-se o tempo médio de evacuação destes diferentes cenários. A análise da média do tempo total de saída, feita através das abordagens de intervalo de confiança e da análise de variância e efetuada com três diferentes percentuais da capacidade total do auditório, expressou a não-homogeneidade dos resultados, mostrando uma forte influência tanto do percentual da população, quanto do posicionamento da porta com o tempo médio de evacuação do auditório.

**Palavras-chave:** Simulação, Autômato Celular, Segurança, Estudo de *Layout*.

## ABSTRACT

The constant population growth and the large concentrations of people in different scenarios explain the importance to study the behavior of crowds. Simulations and mathematical models are featured among the ways in which these studies have been conducted. These means are the most frequent due to lack of additional data to develop and validate an explanatory model, as well as moral, legal and ethical issues that preclude the use of people in simulations with real conditions of panic. This study aims to develop a model of crowd evacuation simulation in emergency situations. In addition, we sought to develop a model adaptable to different scenarios using of cellular automata, which are discrete mathematical models, enclosed in a mesh containing homogeneous cells and that are identified by their weights, which are functions to provide the displacement. Making use of static floor field, which are cellular automata model in which the assigned weights remain the same throughout the simulation, the model was applied an auditorium that had its characteristics compared and adapted to the NBR 9077: 2001- Building Emergency Exits, and by swapping the position of the door , we obtained the average evacuation time these different scenarios. The analysis of the average total exit time made through confidence intervals and analysis of variance approaches for three different auditorium comparatives expressed non-homogeneous results. It also showed a strong influence both of population percentage and positioning of door on the mean evacuation time from the auditorium.

**Keywords:** Simulation. Cellular Automaton. Security. Layout study.

## SUMÁRIO

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                   | <b>11</b> |
| 1.1 Justificativa .....                                     | 13        |
| 1.2 Objetivos.....                                          | 14        |
| 1.2.1 Objetivo geral.....                                   | 14        |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....                           | 14        |
| 1.3 Metodologia.....                                        | 14        |
| 1.4 Estrutura do trabalho .....                             | 15        |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                         | <b>16</b> |
| 2.1 Comportamento de pedestres.....                         | 16        |
| 2.2 Simulação e modelos matemáticos .....                   | 18        |
| 2.2.1 Autômatos celulares.....                              | 19        |
| 2.2.2 Rede de gás .....                                     | 20        |
| 2.2.3 Forças sociais .....                                  | 21        |
| 2.2.4 Dinâmica dos fluidos .....                            | 21        |
| 2.2.5 Baseado em agentes .....                              | 21        |
| 2.2.6 Teoria dos jogos .....                                | 22        |
| 2.2.7 Abordagens baseadas em experiências com animais ..... | 23        |
| 2.3 Campo de piso .....                                     | 23        |
| 2.4 Tamanho da célula .....                                 | 25        |
| 2.5 Velocidade dos pedestres .....                          | 25        |
| 2.6 Das exigências da NBR 9077 .....                        | 26        |
| 2.6.1 Porta .....                                           | 27        |
| 2.6.2 População .....                                       | 30        |
| <b>3 MÉTODO.....</b>                                        | <b>32</b> |

|          |                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1      | Características do programa .....                       | 32        |
| 3.2      | Características do local de estudo .....                | 33        |
| 3.3      | Linguagem de computação .....                           | 42        |
| 3.4      | Pseudocódigo .....                                      | 43        |
| 3.4.1    | Algoritmo principal: .....                              | 44        |
| 3.4.2    | Algoritmo de criação de sala: .....                     | 46        |
| 3.4.3    | Algoritmo de Preenchimento de Pesos: .....              | 47        |
| 3.4.4    | Algoritmo resultante de salas: .....                    | 50        |
| 3.4.5    | Algoritmo de inserção de clientes: .....                | 51        |
| 3.4.6    | Algoritmo de simulação: .....                           | 52        |
| <b>4</b> | <b>SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>          | <b>56</b> |
| 4.1      | Intervalos de confiança.....                            | 56        |
| 4.2      | Análise de variância .....                              | 60        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b> | <b>64</b> |
| 5.1      | Limitações do trabalho .....                            | 65        |
| 5.2      | Sugestões de trabalhos futuros.....                     | 65        |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                | <b>67</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Vizinhança de Von Neumann (a) e vizinhança de Moore (b).....                          | 24 |
| Figura 2: <i>Layout</i> do auditório.....                                                       | 35 |
| Figura 3: 1ª Modificação no <i>layout</i> do auditório, 1ª posição da porta.....                | 38 |
| Figura 4: Trajetória do ponto mais distante até a saída .....                                   | 40 |
| Figura 5: Características da porta para as posições 1, 2, 3, 4... 26 .....                      | 41 |
| Figura 6: 2ª Modificação no <i>layout</i> do auditório, 2ª posição da porta.....                | 41 |
| Figura 7: 26ª Modificação no <i>layout</i> do auditório, 26ª posição da porta.....              | 42 |
| Figura 8: Notação utilizada nos algoritmos .....                                                | 44 |
| Figura 9: Algoritmo principal.....                                                              | 46 |
| Figura 10: Algoritmo de criação de sala .....                                                   | 47 |
| Figura 11: Procedimento de preenchimento dos pesos.....                                         | 49 |
| Figura 12: Algoritmo de preenchimento de pesos.....                                             | 50 |
| Figura 13: Algoritmo resultante de sala.....                                                    | 51 |
| Figura 14: Algoritmo de inserção de cliente .....                                               | 52 |
| Figura 15: Algoritmo de simulação .....                                                         | 54 |
| Figura 16: Fluxograma de funcionamento do código.....                                           | 55 |
| Figura 17: Gráfico dos quantis da simulação para porta na posição 1 .....                       | 57 |
| Figura 18: Tempo médio de evacuação com 50% da população atribuída para as<br>simulações .....  | 61 |
| Figura 19: Tempo médio de evacuação com 75% da população atribuída para as<br>simulações .....  | 61 |
| Figura 20: Tempo médio de evacuação com 100% da população atribuída para as<br>simulações ..... | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Dimensões de células .....                                                  | 25 |
| Tabela 2: Velocidades de pedestres .....                                              | 26 |
| Tabela 3: Classificação do auditório quanto à sua ocupação, conforme NBR 9077 .....   | 28 |
| Tabela 4: Dados para o dimensionamento das saídas .....                               | 28 |
| Tabela 5: Qualificação do auditório quanto às suas características construtivas ..... | 28 |
| Tabela 6: Distância máxima a ser percorrida no caso do auditório .....                | 29 |
| Tabela 7: Classificação do auditório quanto a sua altura .....                        | 29 |
| Tabela 8: Classificação do auditório quanto às suas dimensões em planta .....         | 30 |
| Tabela 9: Número de saídas para o caso do auditório .....                             | 30 |
| Tabela 10: Área total dos obstáculos internos no auditório .....                      | 36 |
| Tabela 11: Quantis das 25 posições da porta .....                                     | 57 |
| Tabela 12: Média, desvio padrão e intervalo de confiança dos dados .....              | 59 |
| Tabela 13: Estatística para capacidade .....                                          | 60 |

# 1 INTRODUÇÃO

Grandes tragédias marcadas pelo pânico foram registradas nos últimos tempos. A tragédia do Gran Circus Norte-Americano instalado na cidade de Niterói (RJ) em 1961, a tragédia de 1964 ocorrida no Estádio Nacional do Peru na cidade de Lima, o ataque em Nova York às torres gêmeas no ano de 2001 e o incêndio na boate Kiss na cidade de Santa Maria (RS) em 2013 são exemplos que ficaram marcados nos cenários nacional e internacional. Exemplos como estes retratam casos aterrorizantes de pessoas desesperadas buscando saídas para livrarem das consequências de tais fenômenos, estando também sujeitas ao perigo gerado pelo tumulto e aglomeração. Além disso, os indivíduos acabam compartilhando momentos indesejáveis ocasionados pelo comportamento individual de sobreviver ao perigo a que estão expostos, gerando assim consequências agravantes e inesperadas para todos.

Acidentes ou simplesmente ameaças que envolvem multidões provocam comportamentos desordenados tornando-os difíceis de serem controlados, seja pelo pânico gerado pelas pessoas em consequência da ocasião ou pela dificuldade de evacuação dos ocupantes no cenário de risco. A evacuação de um grupo de pedestres, conforme as condições temporais e físicas, é de extrema relevância já que se as pessoas não conseguem escapar da zona de perigo devido a obstáculos, insuficiência de saída ou até mesmo por seleção errada da saída, podem ser feridas ou até mesmo mortas, sejam por consequência do incidente e/ou comportamento da multidão (Xiaoping *et al.*, 2009).

Existem diversas regulamentações e normas voltadas às condições exigíveis, bem como requisitos mínimos que as edificações devem possuir. Dentre estas, podem ser citadas as seguintes normas: norma brasileira ABNT 9077: 2001 que é uma complementação da NBR 9077: 1993 - Saídas de emergência em edifícios; a norma regulamentadora NR-23: 1978 - Proteção contra incêndio; norma de procedimento técnico NPT-011: 2012 - Saída de emergência; entre outras. Nestas normas são possíveis encontrar informações estruturais que tratam de acessos, número e dimensionamento das saídas de emergências, elevadores de emergência, escadas, rampas, guardas e corrimões, área de refúgio, sonorização, iluminação de emergência e sinalização de saídas, entre outras. No entanto, ainda encontram-se informações acerca do cálculo da população, distância máxima a percorrer, dimensionamento de cada pessoa, velocidade de locomoção, dentre outros fatores que podem ser utilizados para análise do tempo total de evacuação. Neste ponto, deve-se salientar que não é objetivo deste trabalho estudar tais características estruturais descritas anteriormente, tampouco tratar dos diversos itens de segurança. Porém, tais informações serão importantes para embasar as constantes utilizadas neste estudo.

Neste contexto, os estudos de técnicas de evacuação de multidões têm se tornado cada vez mais importantes no que diz respeito à segurança de ambientes em situações de emergência, que possam colocar a vida dos ocupantes em risco, e cuja aglomeração é formada por pessoas com características distintas em um mesmo espaço físico (Carneiro, 2012). Desta forma, é imprescindível a preocupação em desenvolver diferentes estudos que abordem a segurança das pessoas quando em meio à multidão, bem como estratégias que viabilizem e minimizem o tempo de saída das mesmas de um cenário ou situação propensa a risco. Portanto, o estudo de *layout* é importante uma vez que a localização de portas, corredores ou obstáculos pode ser decisiva, assim como a quantidade segura de pessoas (lotação máxima) que se deve ter em um ambiente para que se tenha um tempo de evacuação dentro de um valor esperado (Pereira *et al.*, 2009). Embora tais estudos retratem critérios para o dimensionamento de rotas de fuga, em nenhum momento, levam em consideração as adversidades do comportamento humano (Valentin & Ono, 2006).

De igual modo, Sagun *et al.* (2011) relatam que a maioria das regulamentações e normas são baseadas em suposições incorretas sobre o comportamento das pessoas, sendo baseadas em informações de construções estáticas que apenas destacam algumas das questões de segurança, tais como dimensões necessárias para as portas de saída de emergência, escada, etc. Ressaltam ainda que observações da dinâmica de multidões durante eventos extremos podem fornecer informações sobre as falhas encontradas tanto no *design* do ambiente quanto na gestão de espaços e eventos sociais.

Portanto, simulações computadorizadas da dinâmica de pedestres permitem a observação de características do fluxo real de pessoas e um maior entendimento de seus princípios básicos. O conhecimento do comportamento de pedestres é valioso por prover informações de como formular melhores saídas, geometrias de salas e estádios, por exemplo (Perez *et al.*, 2002). Com isto, o uso de simulações tem sido comumente utilizado no que se refere ao estudo do comportamento humano.

Este trabalho propõe o uso de um modelo capaz de simular evacuação de multidões em condições de emergência, que pode ser utilizado em diferentes cenários, podendo ser aplicado para análise de uma edificação já em uso ou em edificações ainda em fase de projeto, visando a construção segura e com estrutura que proporcione o menor tempo de evacuação dos ocupantes, ou qualquer outro fim que vise à segurança das pessoas que irão ocupar um determinado ambiente.

## 1.1 Justificativa

Os estudos de técnicas de evacuação envolvem a análise do tempo de evacuação total a partir de simulações, podendo trazer informações complementares tais como: melhor localização de saída de emergência, largura de portas, quantidade adequada de pessoas para certo ambiente, dentre outras. A relação dessas informações busca a melhoria de sistemas produtivos com ações a proporcionar um ambiente seguro, a exemplo do arranjo físico, para que os usuários desses sistemas aumentem a produtividade e reduzam perdas de qualquer natureza.

Diversos estudos foram desenvolvidos na intenção de fundamentar as causas ou apontar possíveis soluções que pudessem evitar o caos e as perdas em grandes tragédias como as citadas neste trabalho. Contudo, estes servem para conscientizar e/ou informar sobre a importância de estudar normas, técnicas e procedimentos de segurança que possibilitem evitar ou minimizar os efeitos causados pelo pânico em verdadeiros cenários de risco. Além disto, há estudos que envolvem simulações com pedestres em condições de risco, e que podem ser utilizados como *input* para a tomada de decisão para novas edificações ou para as que já estão em funcionamento.

Dentro deste contexto, neste trabalho, foram realizadas simulações envolvendo multidões e modificações no posicionamento da saída, tendo em vista a redução do tempo de evacuação, que é de grande importância para os sistemas em que há um elevado número de pessoas sujeitas a riscos. O estudo destinou-se à análise de uma possível relação entre o tempo total de evacuação e o posicionamento da saída. Desta forma, o foco esteve nas variáveis tempo total de evacuação e localização da saída. Para as simulações, optou-se pelo uso do modelo de autômatos celulares. As ações individuais e fatores racionais não foram levados em consideração, sendo considerada uma população homogênea, característica possível com a utilização de autômatos celulares, pois nestes modelos, as entidades ocupam células baseadas nas regras sobre o estado das células vizinhas, condicionando os movimentos à condição de existência de células de menor peso e não ocupadas. A simplicidade na aplicação dos modelos e a possibilidade de representar qualquer algoritmo estão entre as principais vantagens dos autômatos celulares.

Desta forma, com este trabalho, buscou-se aumentar a consciência sobre o estudo de *layouts* e tempo de evacuação, para obter maior segurança em ambientes frequentados por grande número de pessoas, uma vez que a simulação com multidões pode ser adaptada para

diversas situações, envolvendo a otimização de *layouts* e até mesmo a quantidade ideal de ocupantes em um determinado ambiente.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Objetivou-se com este trabalho o desenvolvimento de um modelo de simulação de evacuação de multidões em situações de emergência, baseado na abordagem de autômatos celulares, adaptável a diferentes cenários e com a capacidade de simular a evacuação de pedestres fornecendo como *output* o tempo total de saída dos indivíduos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para se atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são definidos:

- Desenvolver um modelo que seja flexível e adaptativo a qualquer modificação no mesmo;
- Mediante o modelo, adicionar interações que se assemelhem ao comportamento de multidões;
- Aplicar o modelo em um caso real;
- Analisar as condições atuais do caso real e comparar com a NBR 9077: Saídas de emergência em edifícios;
- Adequar o campo de piso do caso real às exigências da Norma;
- Obter o tempo médio de evacuação do caso real, aplicando-se o modelo para diferentes cenários;
- Comparar os tempos médios de evacuação dos diferentes cenários a fim de mostrar o efeito do posicionamento da porta na obtenção do tempo médio de evacuação.

## 1.3 Metodologia

A pesquisa documentada neste trabalho foi de natureza quantitativa, pois se trabalhou com relações matemáticas e probabilísticas a fim de reproduzir um ambiente real e se tirar conclusões a respeito de melhorias implementadas nesse sistema. Pode-se afirmar que foi utilizada a abordagem do tipo “Modelagem e Simulação” no presente trabalho, visto que foi criado um modelo para representar diferentes tipos de ambiente e que este sofreu diversas iterações para simular diferentes cenários.

De acordo com Miguel (2011), as etapas de uma pesquisa do tipo “Modelagem e Simulação” são:

- Definição do problema: o problema pode ser resumido em se encontrar os tempos de evacuação para cada cenário montado e sua comparação;
- Construção do modelo: utilizaram-se todas as informações obtidas na primeira etapa para a construção do modelo;
- Solução do modelo: após a construção do modelo, sua solução foi obtida, ou seja, o tempo de evacuação do sistema foi estimado. Esta solução foi obtida para os diferentes cenários montados, os quais exigiram pequenos ajustes no modelo;
- Validação do modelo: o tempo de evacuação foi obtido e analisado para validar o modelo;
- Implementação da solução: a solução mostra os ganhos que as pessoas podem obter com um menor tempo de evacuação.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 1 possui caráter introdutório e apresenta uma contextualização geral sobre o perigo gerado por tumultos e aglomerações de pessoas em um cenário de pânico. O Capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura de forma a constituir um referencial teórico para o modelo a ser desenvolvido. A revisão de literatura, portanto, compreenderá um aprofundamento dos conceitos introduzidos no Capítulo 1. Concomitantemente, o Capítulo 2 apresenta o estado da arte, onde foi exposto o que há de mais novo sobre o tema desta pesquisa além de inteirar o leitor sobre o que já foi feito e discutido sobre o tema. O Capítulo 3 é responsável por descrever a metodologia empregada para alcançar os objetivos do modelo. O Capítulo 4 permite uma análise crítica dos resultados. O Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma abordagem teórica sobre os conceitos mais relevantes na área de técnicas de evacuação de multidões, criando um embasamento teórico para apoiar o desenvolvimento do modelo. Além disto, apresenta o estado da arte procurando evidenciar o que vem sendo trabalhado e publicado atualmente na literatura científica especializada acerca dos temas abordados.

### 2.1 Comportamento de pedestres

A eminente preocupação em descrever o comportamento de pedestres em situações de deslocamento coletivo tem se tornado tema de diversos estudos. Sobre os diferentes comportamentos que o indivíduo assume quando em uma multidão e situação de emergência, Carneiro (2012) cita:

- (1) **Fenômeno de ir com a multidão:** também conhecido por efeito manada ou comportamento de pastoreio, é quando o indivíduo tende a seguir o fluxo das outras pessoas por não saber onde se encontra a saída, por exemplo;
- (2) **Fenômeno de reunião:** os indivíduos, neste caso, se sentem mais seguros onde se encontra a multidão e tendem a permanecer juntos da mesma, o que pode causar seu recolhimento dentro do local;
- (3) **Retrocesso:** em que pessoas retornam para recuperar pertences ou ajudar outras pessoas;
- (4) **Comportamento de parentesco:** as pessoas tendem a se reunir com seus parentes ou retornar para procurá-los;
- (5) **Arqueamento:** fenômeno que ocorre nas saídas dos locais, em que há a aglomeração de pessoas em torno das saídas;
- (6) **Mais rápido é mais lento:** quanto mais rápido as pessoas tentam andar, mais lenta pode se tornar a evacuação;
- (7) **Efeito não aventureiro:** as pessoas tendem a utilizar as saídas mais seguras e conhecidas;
- (8) **Pânico:** é uma reação psicológica causada em momentos como uma emergência e que pode fazer com que o indivíduo não raciocine, aja por impulso e por vezes fique sem reação.

Diversos estudos foram realizados na tentativa de interpretar e descrever tais fenômenos. Dentre esses trabalhos, podem-se citar Zhao *et al.* (2008), que estudaram o comportamento de ir com a multidão por meio de simulações em diferentes estruturas de salas

e densidades dos ocupantes, de modo que a psicologia de ir com a multidão é discutida com o intuito de fornecer orientações úteis sobre a gestão de evacuação de emergência.

Ainda sobre os diferentes comportamentos que os indivíduos podem assumir, Zheng & Cheng (2011) estudaram os conflitos na dinâmica de evacuação de multidão durante os processos de evacuação, por meio da combinação de um jogo de conflitos com um modelo de autômatos celulares. Fatores como a racionalidade, efeito manada e o custo de conflito também são levados em consideração, tendo em vista o estudo das estratégias dos evacuados assim como do tempo de evacuação.

No que diz respeito a situações de incêndio, Valentin & Ono (2006), expressam fenômenos como: presença de chamas; aumento das temperaturas; presença de fumaça e gases tóxicos, como fatores que podem provocar uma instabilidade emocional nas pessoas. Além disto, tais fenômenos podem contribuir para que surjam comportamentos denominados não adaptativos. Os autores ressaltaram ainda que para uma evacuação satisfatória, além das proteções passivas e ativas, faz-se necessário conhecer o comportamento e o movimento das pessoas em tal situação. Além disso, estudos identificam impactos da fumaça de incêndios sobre a saúde logo após o evento de fogo. Kochi *et al.* (2010) sintetizaram alguns desses estudos que examinaram a relação dos incêndios com a qualidade do ar, concluindo que há muito a ser investigado sobre o impacto da fumaça na saúde, especialmente no que diz respeito aos atributos detalhados de um evento específico causador do incêndio. Ainda neste tema, Miguel (2011) firmou que o tempo máximo que uma pessoa pode passar exposta à fumaça tóxica é de 10 minutos.

Sergio *et al.* (2011) enfatizaram a importância do estudo do comportamento de pedestres em condições de emergência ao estudar metodologias para dimensionamento da largura das saídas a fim de permitir a saída dos pedestres em sua totalidade, dentro de um prazo pré-determinado. Os autores ressaltaram ainda três diferentes níveis de comportamento de pedestres: o estratégico, os pedestres decidem as escolhas de emergência que irão tomar e em que ordem; o nível tático, diz respeito às decisões de curto prazo, dada a situação de emergência em nível estratégico; e o nível operacional, onde os pedestres tomam decisões instantâneas para o período seguinte, em conformidade com as decisões tomadas no nível tático.

## 2.2 Simulação e modelos matemáticos

O uso de modelos matemáticos de simulação tem sido cada vez mais comum no contexto de evacuação de multidões, devido à falta de dados complementares para desenvolver e validar um modelo explicativo (Shiwakoti & Sarvi, 2013). No entanto, a falta de informações de casos verídicos, em situações extremas, realça a importância do cuidado em tirar conclusões para sistemas reais baseados em modelos físicos ou computacionais (Soria *et al.*, 2012).

A prática da simulação de multidões se torna cada vez mais útil uma vez que tentar simular situações de emergência em ambientes reais é muito caro ou mesmo impossível (Carneiro, 2012). Além do fato de que há preocupações éticas e de segurança que impedem a criação de um verdadeiro cenário de pânico (Shiwakoti & Sarvi, 2013). Tais problemas dificultam os estudos do comportamento e dos efeitos causados por pedestres em situações de pânico. Pesquisadores têm que se limitar a um pequeno número de participantes com nenhum controle sobre o nível de pânico, que depois podem não representar o cenário verdadeiro para o comportamento das multidões de pedestres (Shiwakoti & Sarvi, 2013). Podem também fazer uso dos modelos de simulação de evacuação, ferramenta aplicada na previsão do desempenho de evacuações em um ambiente específico, o que a torna uma ferramenta importante para a análise de evacuação do mesmo (Xiaoping *et al.*, 2009).

Segundo Silva (2012) a explicação significativa do modelo deve atender às restrições e aproximações de parâmetros reais, o que na maioria dos casos, torna-se complexa. Em contrapartida, quando são atendidos, os resultados são relevantes no processo de inferência e estimação.

Com isto, ao simular comportamento de pedestres, é indispensável o uso de considerações acerca de algumas variáveis, uma vez que os padrões de comportamento das pessoas em uma evacuação movida pelo pânico diferem do comportamento em condições normais, por exemplo. Na verdade, pessoas que estão em uma evacuação sem pânico estão propensas a manter certa calma, viabilizando a saída do ambiente em sua velocidade máxima confortável, além de andar sem erros graves de julgamento, diferente de pessoas condicionadas ao colapso, que estão susceptíveis ao medo e à pressão emocional, (Koo *et al.*, 2014).

O estudo de modelos matemáticos remonta dos estudos de Von Neumann com o advento de autômatos celulares (Xiaoping *et al.*, 2009). Após este marco, “a modelagem e a

simulação de multidões tem sido tema de estudo em diferentes áreas da ciência, devido a um número considerável de aplicações” (Bicho, 2009).

Dos mais diferentes estudos que foram realizados a partir de modelos de evacuação de multidão, podem ser citados:

- Bicho (2009) realizou simulação de multidões baseado no algoritmo de colonização de espaço, modelo este originalmente proposto para modelar padrões de nervuras em folhas vegetais e de ramificações em árvores.
- Kulakowski *et al.* (2010) apresentam, em *Simulation Environment for Modeling Pedestrian Dynamics*, uma nova abordagem, *Model-View-Controller*, baseada em ambiente de simulação dinâmica de modelagem de pedestres, por meio da utilização de conceitos no campo da dinâmica de pedestres e teoria da simulação.
- Weifeng & Hai (2011) utilizaram simulação para estudar o comportamento humano numa evacuação de emergência de um compartimento cheio de fumaça.
- Silva *et al.* (2012) utilizaram simulação para análise da evacuação de uma sala de cinema, visando identificar dentre quatro modelos geométricos da sala, o que minimiza o tempo de evacuação em função do número de pedestres.
- Song *et al.* (2013) realizaram simulação de evacuação para o bioterrorismo em ambientes de pequenos espaços.

Segundo Xiaoping *et al.* (2009), um problema de simulação de multidões pode ser abordado de diferentes formas. Entre elas têm-se: autômatos celulares, rede de gás, forças sociais, dinâmica dos fluidos, baseado em agentes, teoria dos jogos e abordagens baseada em experiência com animais.

O presente trabalho, semelhante aos citados, também faz uso de simulações e estas foram aplicadas via utilização da abordagem de autômato celular. Contudo, difere dos estudos citados por direcionar o foco para o estudo de *layout* e sua relação com o tempo total de evacuação. Para isto, considerou-se um comportamento homogêneo para os pedestres e tomou-se como principais variáveis o posicionamento da porta e o tempo total de evacuação para cada uma das posições.

### 2.2.1 Autômatos celulares

No modelo de autômato celular de Von Neumann, conforme descreve Xiaoping *et al.* (2009), divide-se o espaço físico do local em células, as quais devem possuir o mesmo formato e dimensão. A essas células serão atribuídos valores e, através do valor de cada uma,

os indivíduos se deslocarão, sempre em busca de valores menores, pois as saídas são as células de menor valor e quanto mais distante da saída, maior o valor da célula em questão.

No que se refere ao uso de modelos de simulação, especificamente o de autômatos celulares, Lagarias (2012) aponta como as principais vantagens deste modelo, o fato de eles serem compatíveis com a maioria dos conjuntos de dados espaciais, podendo assim representar processos espaciais de forma direta e o fato de, apesar de sua simplicidade, poderem representar e executar praticamente qualquer algoritmo. Além disso, segundo Toyama (2006), os modelos de autômatos celulares são assim chamados devido ao princípio de que *automata* ou entidades ocupam células baseando-se nas regras sobre o estado das células vizinhas. Suas regras descrevem o comportamento de cada autômato criando a aproximação do comportamento individual. O autor explica ainda que as interações entre as células vizinhas, de acordo com este conjunto de regras, são responsáveis pelo comportamento coletivo emergente. Ainda sobre autômatos celulares, Xiaoping *et al.* (2009) os define como sendo sistemas dinâmicos discretos que consistem em uma grade regular de células que evoluem a cada passo de tempo discreto com o valor da variável de uma célula determinada pelos valores de variáveis nas células vizinhas.

Acerca deste modelo, diferentes estudos podem ser encontrados na literatura. Pereira *et al.* (2009) utilizaram simulações para fornecer um programa capaz de avaliar a configuração do ambiente em relação a rotas de fuga de emergência. Cita-se ainda o estudo de Fu *et al.* (2013), onde foram realizadas simulações com a abordagem de autômato celular numa sala, estudando-se a relação do centro de gravidade da saída e do centro de gravidade do fluxo.

### 2.2.2 Rede de gás

Rede de gás é um modelo especial dos autômatos celulares, difundido na década de 80 por Fredkin e Toffoli, e por Wolfram (Zheng, 2009). Neste modelo, cada pedestre é considerado uma partícula ativa na grade.

Dos estudos com este método, destacam-se Kuang *et al.*, (2009) propuseram o modelo de rede de gás estendida para investigar o contrafluxo de pedestres em locais livres, considerando o comportamento subconsciente humano e diferentes velocidades e concluíram que o modelo proposto pode capturar algumas características como a formação da pista, efeito de segregação e a separação de fases em densidades maiores. Cirillo & Muntean (2013) que utilizaram tal abordagem para simular a evacuação de pedestres em ambientes sem visibilidade a fim de comprovar o padrão de comportamento encontrado em emergências reais

e que, em desastres, as pessoas tendem a agir de forma altruísta. Estudos realizados recentemente por Huo *et al.*, (2014) utilizou o modelo de rede de gás para analisar a evacuação de pedestres em edifícios altos, os autores fizeram simulações considerando a interface escada-chão, verificando assim, o comportamento dos pedestres e a velocidade da evacuação.

### 2.2.3 Forças sociais

Nesta abordagem, o indivíduo se mantém afastado das fronteiras do ambiente, como paredes e de outros indivíduos, mas pode também ser atraído por outros indivíduos, especialmente indivíduos conhecidos. Ainda sobre os modelos de forças sociais, segundo Toyama (2006), os mesmos descrevem fenômenos observados de maneira realista, mostrando a capacidade de auto-organização da dinâmica de pedestres. Já as simulações de computadores mostraram o desenvolvimento de filas de pedestres que andam na mesma direção e as mudanças oscilatórias de direção em passagens estreitas.

Dos estudos existentes na literatura desenvolvidos por meio do modelo de forças sociais, pode-se destacar: Wang *et al.* (2013) simulam a evacuação de pedestres através de um modelo para estudar o fluxo de pedestres e entender as características da movimentação em massa no salão da estação ferroviária de Hangzhou durante o Festival de Primavera na China; de igual modo, Qu *et al.* (2014) utilizaram a abordagem de força social para descrever o movimento e a evacuação dinâmica de pedestres em escadas, de modo que as simulações foram implementadas para estimar o tempo de saída e a capacidade das escadas. Para isto, foram feitos estudos em duas estações de metrô em Pequim para validação do modelo.

### 2.2.4 Dinâmica dos fluidos

De acordo com Thompson & Marchant (1995) quando pessoas se encontram em um ambiente densamente povoado, seus movimentos individuais são impedidos. Então os indivíduos são levados pela multidão como um todo, tendo seus movimentos individuais ditados pelo fluxo do grupo. Portanto, a multidão é tratada como um fluido e, assim, sua velocidade e deslocamento são modelados através de equações diferenciais.

### 2.2.5 Baseado em agentes

São modelos computacionais que constroem estruturas sociais, através da simulação de indivíduos como agentes virtuais, e criam organizações emergentes fora da operação de regras

que governam as interações entre os agentes. Dos estudos que fizeram uso desta abordagem, Koo *et al.* (2014) utilizam a abordagem microscópica baseada em agentes para simular evacuação de emergência de uma população heterogênea incluindo pessoas com deficiências submetidas a uma situação de pânico, estimando-se os efeitos do desgaste físico e mental nos tempos médios de evacuação de seis grupos de diferentes deficiências bem como de todo o grupo em um ambiente simulado de um edifício de 24 andares. Ainda por meio da abordagem baseada em agentes, Wagner & Agrawal (2014) desenvolveram um modelo computacional de agentes autônomos, denominado como um protótipo de sistema de apoio à decisão para simulação de evacuação de multidão na presença de um desastre, aplicável em locais que são especificamente destinados a manifestações em massa, como por exemplo, de estádios e auditórios.

### 2.2.6 Teoria dos jogos

A abordagem de teoria dos jogos leva em consideração a competição entre indivíduos como, por exemplo, indivíduos competindo para passar pela saída de emergência. No que se refere aos estudos que abordam esta metodologia, Assano *et al.* (2010) estudaram o fluxo de evacuação por meio de simulações, baseadas em um modelo microscópico de comportamento de pedestres, utilizando um jogo com dois jogadores, os autores assumem que os pedestres antecipam movimentos de modo a evitar a colisão entre eles. Os resultados das simulações são comparados com os dados experimentais e os dados observados em uma estação ferroviária.

Ao se tratar de simulação de multidão, Gustafsson & Sternad (2007) descreveram dois tipos principais de modelos que são usados para diferentes fins, a saber: modelos microscópicos, onde cada indivíduo é descrito com seus atributos e comportamento particulares. Neste modelo, o foco é no indivíduo e em suas características, podendo, portanto, lidar com populações tanto homogêneas quanto heterogêneas; e modelos macroscópicos, onde a população é descrita em termos agregados pelo número de indivíduos em diferentes estados. Estes modelos são utilizados para se obter uma perspectiva geral sobre o problema, onde todos os indivíduos de um estado são agregados em uma variável. Além disso, quando se trata das variáveis trajetória e espaçamento, são tratadas de forma microscópicas, uma justificativa para tal, se dar pelo fato de que a trajetória de cada indivíduo é intrínseca e depende do estado das células vizinhas. Já para o fluxo, velocidade e densidade, usualmente são atribuídas como macroscópica, por exemplo, atribuir velocidade e dimensão

comum para os indivíduos, ou seja, o estudo de saída de pedestres é geralmente descrito a partir de variáveis microscópicas e macroscópicas (Sergio *et al.*, 2011).

### 2.2.7 Abordagens baseadas em experiências com animais

Além dos modelos já citados, observam-se casos de simulações com não humanos. É uma nova abordagem para o estudo de evacuação de multidões, uma vez que evacuações por meio de experimentos em verdadeiras condições de pânico são difíceis, especialmente com os seres humanos por causa de possíveis preocupações éticas ou mesmo legais. Os modelos com animais podem fornecer um meio de testar empiricamente e verificar modelos de pedestres, especialmente quando os indivíduos humanos não podem ser facilmente empregados de forma ética (Shiwakoti & Sarvi, 2013). Soria *et al.* (2012) realizaram experimentos com formigas, para explicar o comportamento “mais rápido é mais lento”.

Xiaoping *et al.* (2009), além de identificarem sete abordagens metodológicas para a evacuação de multidão, realçam a importância de incorporar aos modelos de evacuação, os elementos psicológicos e fisiológicos que afetam os comportamentos individuais e coletivos. Dentre as contribuições destes modelos de evacuação, pode-se citar a estimativa do tempo de evacuação total a partir de várias simulações juntamente com o histograma da distribuição do tempo de evacuação (Pereira *et al.*, 2009).

Analisando as características dos modelos citados, optou-se pelo uso do modelo de autômatos celulares. Uma vez que as variáveis de estudo foram o tempo total de evacuação e o posicionamento da saída, as ações individuais e os fatores racionais não foram levados em consideração e, a utilização de autômatos celulares, viabilizou este estudo, pois nestes modelos, a iteração das entidades é baseada nas regras sobre o estado e pesos das células vizinhas. A simplicidade na aplicação dos modelos e a possibilidade de representar qualquer algoritmo estão entre as principais vantagens dos autômatos celulares.

## 2.3 Campo de piso

Para o desenvolvimento dos modelos matemáticos, apresenta-se como ferramenta o campo de piso, que é um modelo de autômato celular e tem suas vantagens específicas em reproduzir fenômenos auto-organizados de multidão, incorporando características individuais, reduzindo a complexidade computacional e traduzindo a interação de longo alcance para a interação local (Fu *et al.*, 2013). O uso de campo de piso pode se apresentar de duas formas: estático e dinâmico. Os campos de piso estático não evoluem com o tempo, não mudam com a

presença dos pedestres e geralmente são usados para especificar as regiões do espaço que são mais atraentes, como saídas de emergência. Os campos de piso dinâmico se modificam com o tempo e com a presença dos pedestres, isto é, eles têm sua própria dinâmica (difusão e decaimento) (Gwizdalla, 2015).

Com o uso do campo de piso, são necessárias aplicações de *softwares* para proporcionar a interação entre os ocupantes. Porém, devido à falta de informação de como os sistemas reais se comportam em condições extremas, os modelos computacionais e físicos não são devidamente validados, e deve-se ter cuidado ao se tirar conclusões sobre sistemas reais (Soria *et al.*, 2012).

Ainda sobre campo de piso, Carneiro (2012) mencionou a existência de duas vizinhanças que podem ser utilizadas em uma aplicação de autômatos celulares para um campo de piso estático de duas dimensões: a de Von Neumann e a de Moore. Na vizinhança de Von Neumann, cada célula interage com as quatro células adjacentes na vertical e na horizontal. Já na vizinhança de Moore, cada célula é composta das oito células adjacentes, considerando as células da vertical, horizontal e diagonal, como pode ser visto na Figura 1.

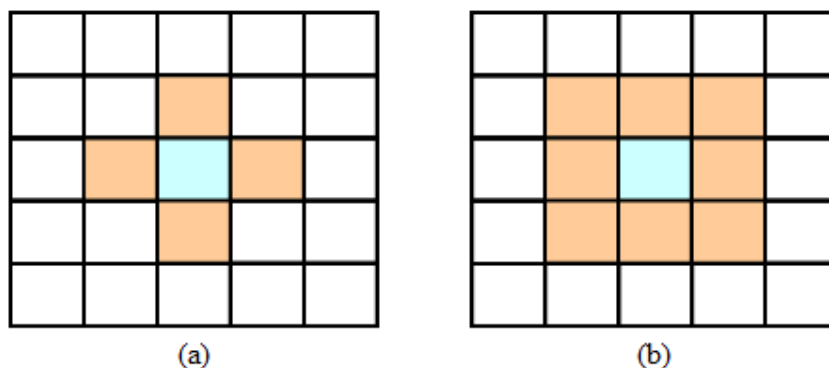


Figura 1: Vizinhança de Von Neumann (a) e vizinhança de Moore (b)

Segundo Santos (2013), a importância das diagonais tanto no uso da vizinhança de Moore quanto no cálculo dos pesos atribuídos às células diagonais, os quais são sempre maiores que os atribuídos às células adjacentes lateralmente, foi mostrada empiricamente por Varas *et al.* (2007), em que o efeito de arqueamento em torno da saída quando se utiliza o cálculo dos pesos nas diagonais é mais realístico do que no caso de se calcular os pesos baseando-se apenas em células adjacentes lateralmente. Logo, no presente estudo, a vizinhança utilizada foi a de Moore, onde cada célula interage com as oito células vizinhas, o que parece ser mais coerente com um caso real, em que pessoas em situações de perigo buscam todas as possibilidades possíveis de deslocamento para escapar do cenário de risco.

Quanto ao uso de campo de piso estático e dinâmico, optou-se pela utilização de campo de piso estático. Conforme descrito, os campos de piso estáticos são usados para especificar as regiões do espaço que são mais atraentes, como localização de saídas, que é uma das variáveis de estudo deste trabalho.

## 2.4 Tamanho da célula

Ao simular multidões, é preciso fazer considerações acerca dos valores de algumas variáveis que compõem o modelo. Dentre elas está a área e o formato de cada célula que formam o campo de piso. Para essa área é possível encontrar diferentes valores nos diversos estudos que fazem uso desta. A Tabela 1 expõe alguns valores atribuídos para esta variável encontrados na literatura. 0,2 m

*Tabela 1: Dimensões de células*

| <b>Fonte</b>               | <b>Dimensões</b>         |
|----------------------------|--------------------------|
| Zhao <i>et al.</i> (2008)  | 0,5 x 0,5 m              |
| Sagun <i>et al.</i> (2011) | 50 x 50 cm               |
| Pereira (2010)             | $\sqrt{0,2 \text{ m}^2}$ |
| Carneiro (2012)            | 0,4 x 0,4 m              |
| Fu <i>et al.</i> (2013)    | 0,4 x 0,4 m              |

*Fonte: Esta Pesquisa (2015)*

Para o modelo desenvolvido neste trabalho, adotou-se a medida de 0,4 x 0,4 m para as células do campo de piso, conforme proposto por Carneiro (2012).

## 2.5 Velocidade dos pedestres

Diferentes velocidades de caminhada podem ser atribuídas aos pedestres quando se estuda o comportamento humano bem como o tempo total de evacuação. A Tabela 2 expõe diferentes valores que podem ser observados na literatura acerca do tempo de caminhada.

Tabela 2: Velocidades de pedestres

| Fonte                       | Velocidade média [m/s] |
|-----------------------------|------------------------|
| Valentin & Ono (2006)       | 1,30                   |
| Carneiro (2012)             | 1,30                   |
| Fu <i>et al.</i> (2013)     | 1,00                   |
| Zhao <i>et al.</i> (2008)   | 1,00                   |
| Sergio <i>et al.</i> (2011) | 1,34                   |

Fonte: Esta Pesquisa (2015)

Tais variações na velocidade são dependentes do *layout*, das características do cenário, do interesse dos envolvidos, além das diferentes características fisiológicas incluindo idade, sexo, estado físico, psicológico e o comportamento, tais como percepção e reflexão para o perigo (Fu *et al.* 2015). Usher & Strawderman (2010) destacam que na detecção de uma possível colisão, os pedestres preferem a mudança de velocidade à mudança de direção. Destacam ainda que cada pedestre tem uma velocidade máxima de caminhada preferida.

Gonzales *et al.* (2014) descreveram em seus estudos uma média de  $97 \pm 24$  passos por minuto, com uma população de 45 adultos jovens. Semelhante a este, Castro *et al.* (2015), desenvolveram estudos com uma população de 60 adultos enquanto caminhavam ou normalmente, sem carga, ou usando uma mochila, e encontraram uma cadência de 120 passos por minuto em condições de marcha elevada. Já Tudor-Locke *et al.* (2011) em seus estudos de comportamento de adulto caminhando, encontraram consistentemente que um ritmo de 100 passos/min é um limite razoável para intensidade moderada. Os estudos citados mostram uma cadência igual ou próximo de 2 passos por segundo.

Para este trabalho, adotou-se um ritmo semelhante aos estudos citados, de modo que, ao invés de utilizar passos por segundo, foram consideradas células por segundo. Desta forma, como cada célula possui dimensão 0,4 x 0,4 m, um ritmo de 2 células por segundo implica uma velocidade de caminhada de 0,8 m/s.

## 2.6 Das exigências da NBR 9077

No que se refere às recomendações, a NBR 9077 da ABNT que trata de saídas de emergência em edifícios traz informações importantes sobre a população e os diversos tipos de equipamentos de segurança. Dentre estes, podem-se destacar: extintores de incêndios, portas corta fogo, sinais luminosos, sirenes, portas de emergência, entre outros. Este trabalho

destacará algumas das exigências voltadas para portas, tanto as de acesso quanto as de emergência, e informações acerca do volume da população.

### 2.6.1 Porta

Ao se tratar de saída de emergência, diferentes aspectos podem ser levantados, todos com relativo grau de importância, a saber: largura de porta, posição geográfica, quantidade, entre outras. Além da NBR que não é de caráter obrigatório e diferentes estudos direcionados à importância do estudo de *layout*, há também as Normas Regulamentadoras que são de caráter obrigatório e podem ser de âmbito nacional ou por região.

Para o cálculo da largura da saída, a NBR 9077 dispõe de uma equação para este fim, a qual é dada como:

$$N = \frac{P}{C},$$

onde:

N = número de unidades de passagem, arredondado para número inteiro superior.

P = população, conforme critério da norma que será exposto mais adiante.

C = capacidade da unidade de passagem (número de pessoas que passam pela porta no intervalo de 1 minuto), conforme critério da norma que para o caso em estudo (auditório) será mostrado mais adiante.

Especificamente, o estudo das portas (de acesso ou de emergência) com relação ao tamanho ou à posição são de grande importância para a segurança dos evacuados.

Ainda sobre a largura de porta, a NBR 9077 expõe como largura mínima para a passagem de uma fila de pessoas uma unidade de passagem fixada em 0,55 m. No entanto, a mesma sugere uma largura mínima de 1,10 m para as saídas seja qual for o caso, correspondendo a duas unidades de passagem de 0,55 m, com exceção dos casos em que precisem transitar macas, camas e outros, em que fica imposta a largura mínima de 2,20 m.

Para o valor da capacidade da unidade de passagem, é preciso observar a classificação da edificação quanto à sua ocupação e, logo após, verificar os dados para o dimensionamento das saídas. No caso do auditório, que foi o ambiente utilizado neste estudo, quanto à sua ocupação, o mesmo pertence ao grupo F, classificação dada para descrever locais de reunião de público, sendo pertencente à divisão F-2 que é uma parte do grupo F que aborda templos e auditórios, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Classificação do auditório quanto à sua ocupação, conforme NBR 9077

| Grupo | Ocupação/Uso                 | Divisão | Descrição            | Exemplos                                           |
|-------|------------------------------|---------|----------------------|----------------------------------------------------|
| F     | Locais de reunião de público | F-2     | Templos e auditórios | Igrejas, sinagogas, templos e auditórios em geral. |

Fonte: Adaptada da Tabela 1 da NBR 9077

Logo após esta distinção, é possível verificar através da Tabela 4 que, para o caso em estudo, deve-se adotar o valor 100 para a capacidade da unidade de passagem. Ou seja, para cada unidade de passagem pertencente a estes grupos, devam-se passar 100 pessoas por minuto. Além desta informação, há outras contidas nesta tabela que podem ser utilizadas para o cálculo da população e serão discutidas mais adiante.

Tabela 4: Dados para o dimensionamento das saídas

| Ocupação |               | População                     | Capacidade da unidade de passagem |                  |        |
|----------|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------|
| Grupo    | Divisão       |                               | Acesso e descargas                | Escadas e rampas | Portas |
| F        | F-2, F-5, F-8 | Uma pessoa por m <sup>2</sup> | 100                               | 75               | 100    |

Fonte: Adaptada da Tabela 5 da NBR 9077

Outra preocupação diz respeito ao posicionamento das portas de saída, mas antes deve-se ter a classificação da instalação quanto às suas características construtivas, para assim então obter as especificações exigidas. A Tabela 5 expõe a classificação para o auditório.

Tabela 5: Qualificação do auditório quanto às suas características construtivas

| Código | Tipo                                        | Especificação                                                                                      | Exemplos                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Y      | Edificações com mediana resistência ao fogo | Edificações com estrutura resistente ao fogo, mas com fácil propagação de fogo entre os pavimentos | Edificações com paredes-cortinas de vidro ("cristaleiras"); edificações com janelas sem peitoris (distância entre vergas e peitoris das aberturas do andar seguinte menor que 1,00 m); lojas com galerias elevadas e vãos abertos e outros |

Fonte: Adaptada da Tabela 4 da NBR 9077

Por edificações com mediana resistência ao fogo, a NBR 9077 as define como sendo qualquer edificação dotada de estrutura resistente ao fogo. Além desta, existem ainda as

edificações de classificação X que são as de fácil propagação do fogo, e as de classificação Z de difícil propagação do fogo.

Conhecendo a classificação da instalação quanto às suas características construtivas, deve-se também categorizá-la quanto à ocupação e, em seguida, verificar a distância máxima a ser percorrida até chegar a uma saída, conforme pode ser visto na Tabela 6.

*Tabela 6: Distância máxima a ser percorrida no caso do auditório*

| Tipo de edificação | Grupo e divisão de ocupação | Sem chuveiros automáticos |                   | Com chuveiros automáticos |                   |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
|                    |                             | Saída única               | Mais de uma saída | Saída única               | Mais de uma saída |
| Y                  | Qualquer                    | 20 m                      | 30 m              | 35 m                      | 45 m              |

*Fonte: Adaptada da Tabela 6 da NBR 9077*

No que tange a chuveiros automáticos, a NBR 10897 – proteção contra incêndio por chuveiro automático define como sendo um dispositivo para extinção ou controle de incêndios que funciona automaticamente quando seu elemento termo-sensível é aquecido à sua temperatura de operação ou acima dela, permitindo que a água seja descarregada sobre uma área específica.

Ainda sobre as saídas, pode-se mencionar também o número de portas que uma edificação deve conter. Para isto, além das informações já citadas, é preciso conhecer as classificações da edificação quanto a sua altura e suas dimensões em planta. Para o auditório, sua classificação quanto à altura pertence ao código K, onde estão definidas as edificações cuja altura entre o terreno circundante e o piso da entrada seja igual ou inferior a 1,00 m, classificadas, neste contexto, como edificações térreas, conforme mostra Tabela 7.

*Tabela 7: Classificação do auditório quanto a sua altura*

|        | Tipo de edificação  | Alturas contadas da soleira de entrada ao piso do último pavimento.                       |
|--------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Código | Denominação         |                                                                                           |
| K      | Edificações térreas | Altura contada entre o terreno circundante e o piso da entrada igual ou inferior a 1,00 m |

*Fonte: Adaptada da Tabela 2 da NBR 9077*

Da classificação quanto às dimensões da planta, o auditório pertence ao grupo  $\alpha$ , grupo com enfoque na área do maior pavimento, e receberá o código P, classificação dada para as

edificações de pequeno pavimento, ou seja, as que têm a área do maior pavimento inferior a  $750\text{m}^2$ , conforme exposto na Tabela 8.

Tabela 8: Classificação do auditório quanto às suas dimensões em planta

| Natureza do enfoque |                                            | Código | Classe da edificação | Parâmetros de área     |
|---------------------|--------------------------------------------|--------|----------------------|------------------------|
| $\alpha$            | Quanto à área do maior pavimento ( $S_p$ ) | P      | De pequeno pavimento | $S_p < 750\text{ m}^2$ |

Fonte: Adaptada da Tabela 3 da NBR 9077

Desta forma, verifica-se por meio da Tabela 9 que o número mínimo de portas,  $N^{os}$ , indicado para o auditório é de apenas uma porta, de modo que esta será de utilização tanto para o acesso quanto para saída das pessoas.

Tabela 9: Número de saídas para o caso do auditório

| Dimensão |      | P (área de pavimento $> 750\text{ m}^2$ ) |
|----------|------|-------------------------------------------|
| Altura   |      | K                                         |
| Ocupação |      | $N^{os}$                                  |
| Gr.      | Div. |                                           |
| F        | F2   | 1                                         |

Fonte: Adaptada da Tabela 7 da NBR 9077

### 2.6.2 População

Para a análise populacional, é preciso verificar como se classifica e qual a divisão da edificação quanto à ocupação. Além disto, é necessário conferir a quantidade indicada de pessoas por metro quadrado. No caso em estudo, o auditório, conforme exposto na Tabela 3, pertence ao grupo F e divisão F-2, e na Tabela 4 é apresentada a quantidade máxima de pessoas por metro quadrado permitida para este tipo de classificação, que é a de uma pessoa por  $\text{m}^2$ .

A regulamentação informa que os parâmetros dados na Tabela 4 são os mínimos aceitáveis para o cálculo da população e que, em projetos específicos, devem ser cotejados com os obtidos em função da localização de assentos, máquinas, arquibancadas e outros, e adotados os mais exigentes, para maior segurança. Além disto, a NBR 9077 informa que por "área" entende-se a "área de pavimento" que abriga a população em foco e quando

discriminado o tipo de área (ex.: "área de alojamento"), é a área útil interna da dependência em questão.

O próximo capítulo apresenta os procedimentos metodológicos informando as características do programa, do local de estudo, da linguagem de computação para implementação do *software* e o pseudocódigo com a lógica de funcionamento do *software*.

### 3 MÉTODO

Neste capítulo, serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para elaboração do modelo e captação dos dados para concretização do projeto e alcance dos objetivos esperados. Este trabalho traz como contribuição um modelo capaz de simular evacuação de multidões em condições de emergência, e que também pode ser aplicado para analisar uma edificação já em uso ou edificações ainda a serem fundadas, visando a uma construção segura e com estrutura que proporcione o menor tempo de evacuação dos ocupantes, ou qualquer outro fim que vise à segurança das pessoas que ocupam determinado ambiente.

#### 3.1 Características do programa

No presente trabalho, a abordagem escolhida para o desenvolvimento da simulação de multidões foi a de autômatos celulares. Nessa abordagem, a planta do local de interesse segue as seguintes características:

- Utilizou-se o campo de piso estático;
- Dividiu-se em células de mesma dimensão, 0,4 x 0,4 m, e cada célula pode ser ocupada por no máximo um único pedestre (Fu *et al.*, 2013);
- A cada célula foi atribuído um peso. As células que representam a saída recebem um valor baixo (neste caso, foi atribuído peso “um”). À medida que as células se afastam da saída, seus pesos aumentam. A métrica utilizada para a atribuição desses pesos difere da que foi desenvolvida por Varas *et al.* (2007) que teve características como: dado que  $N$  representa a célula ocupada em um certo instante, se a próxima célula a ser preenchida for adjacente horizontal ou vertical, a mesma irá receber um valor igual a  $N+1$ ; e se a próxima célula for diagonal à célula anterior, a mesma receberá um valor igual a  $N+1.5$ , pelo fato de que as células diagonais são mais distantes do que células adjacentes. Para este modelo, adotou-se o valor  $N+2$  para as células diagonais, uma vez que elas são mais distantes do que as adjacentes horizontais ou verticais. O aumento de 0,5 nesta medida só irá ampliar esta distância. Esta mudança não atrapalhará o critério de escolha pela célula de menor valor uma vez, que em ambos os casos, ao sair do ambiente, andar em diagonal será sempre a melhor escolha, pois, neste sentido, as células com menor valor serão as da diagonal em direção a porta. Este fato não ocorre ao entrar, onde as células com maior peso serão as das diagonais que se distanciam da saída. Além disto, a exibição do *layout* com os pesos das células

representados por números inteiros além de melhor representável se torna de fácil entendimento para o leitor;

- Se uma mesma célula for adjacente a várias células simultaneamente havendo conflito em atribuição de pesos, a mesma recebe o menor valor entre os pesos em questão;
- Para evitar que os obstáculos fixos, a exemplo de paredes, sejam transitáveis, foi atribuído um valor superior aos das células que representaram áreas de circulação; neste estudo os obstáculos receberam valor 500, mesma atribuição usada por (Carneiro 2013);
- Neste trabalho, as células foram definidas como tendo formato retangular. Porém, segundo Carneiro (2012), as mesmas podem assumir formatos triangulares, hexagonais, entre outros;
- Na existência de conflitos, ou seja, mais de um indivíduo querendo ocupar uma mesma célula, os interessados foram salvos em um vetor e receberam o número de acordo com sua entrada no vetor de interessados. Desta forma, foi feito um sorteio aleatório com os números dos interessados em se mover, o sorteado se moveu e os demais buscaram outras opções de movimentos, seguindo a analogia de se mover sempre para uma célula de menor valor inviabilizando retrocesso;
- A vizinhança utilizada foi a de Moore, onde cada célula se comunica com as oito células adjacentes. Além disto, para este modelo, cada pedestre se move com uma velocidade de 0,8 m/s, ou seja, um pedestre leva 0,5s para percorrer uma célula de 0,4 m e, desse modo, um passo de tempo demora 0,5s.

O próximo tópico tratará das características do local de estudo bem como das configurações do campo de piso e da forma como foram distribuídos os pesos das células. Além disto, será exibida parte da sequência dos *layouts* que foram montados a fim de mostrar o efeito de tais mudanças no tempo médio de evacuação.

### 3.2 Características do local de estudo

Conforme mencionado antes, o local escolhido para aplicação deste modelo foi um auditório. A escolha do lugar se deu pela necessidade de aplicar o modelo em um cenário real e, em paralelo a isto, buscou-se verificar a adequação do auditório às normas de segurança, por ser uma área que frequentemente concentra uma grande quantidade de pessoas e a depender do evento realizado, visando atender a todo o público interessado, costumam-se

abrigar quantidades maiores que o número de assentos e consecutivamente maiores que a quantidade de pessoas indicada para determinada edificação.

Com uma área de 135 m<sup>2</sup>, o auditório estudado dispõe de 93 assentos, dispostos em 7 fileiras de mesas contendo 12 cadeiras cada, formando um retângulo afastado das quatro paredes em volta. Além destas, há ainda mais duas fileiras em separado, uma contendo 6 cadeiras, posicionadas frente ao retângulo principal na parte superior da planta, e outra contendo 3 cadeiras, posicionadas na parte superior da planta e na lateral direita. Há ainda uma mesa redonda sem disposição de cadeiras, posicionada na parte superior da planta e na lateral esquerda.

A Figura 2 mostra a configuração interna do *layout*, onde as fileiras de cadeiras além de estarem afastadas uma das outras, também estão afastadas das paredes em volta, possibilitando a circulação nos arredores das fileiras. Doutra forma, é possível perceber que o retângulo formado pelas fileiras principais está suavemente afastado para a direita da planta. Com isso, o corredor da direita se torna um pouco mais estreito que o da esquerda, característica que pode afetar o tempo total de saída dos ocupantes a depender da posição da porta.

No que tange às dimensões da planta, o auditório possui 11,25 m de largura, 12 m de comprimento e 2,70 m de altura. Para acesso, possui duas portas com dimensões de 1 m cada, com abertura no sentido do fluxo de saída, e posicionadas na parte inferior da planta, uma em cada extremidade, conforme exposto na Figura 2.

Faz-se necessário salientar que o estudo do *layout* interno não é o foco deste trabalho. Contudo, pode-se cogitar que a depender da disposição do arranjo físico, este poderá afetar o tempo final de saída dos ocupantes em qualquer cenário de estudo, obstáculos em frente às saídas dificultarão a passagem dos pedestres, podendo afetar o sucesso da evacuação ou até mesmo trazer perdas de qualquer natureza. O mesmo pode acontecer se há um mau gerenciamento na disposição das portas, seja por incompatibilidade da quantidade e da largura da porta com a população e o tipo da instalação, ou pela incoerência com a posição da porta na planta, não sendo observada a regulamentação para distância máxima a ser percorrida.

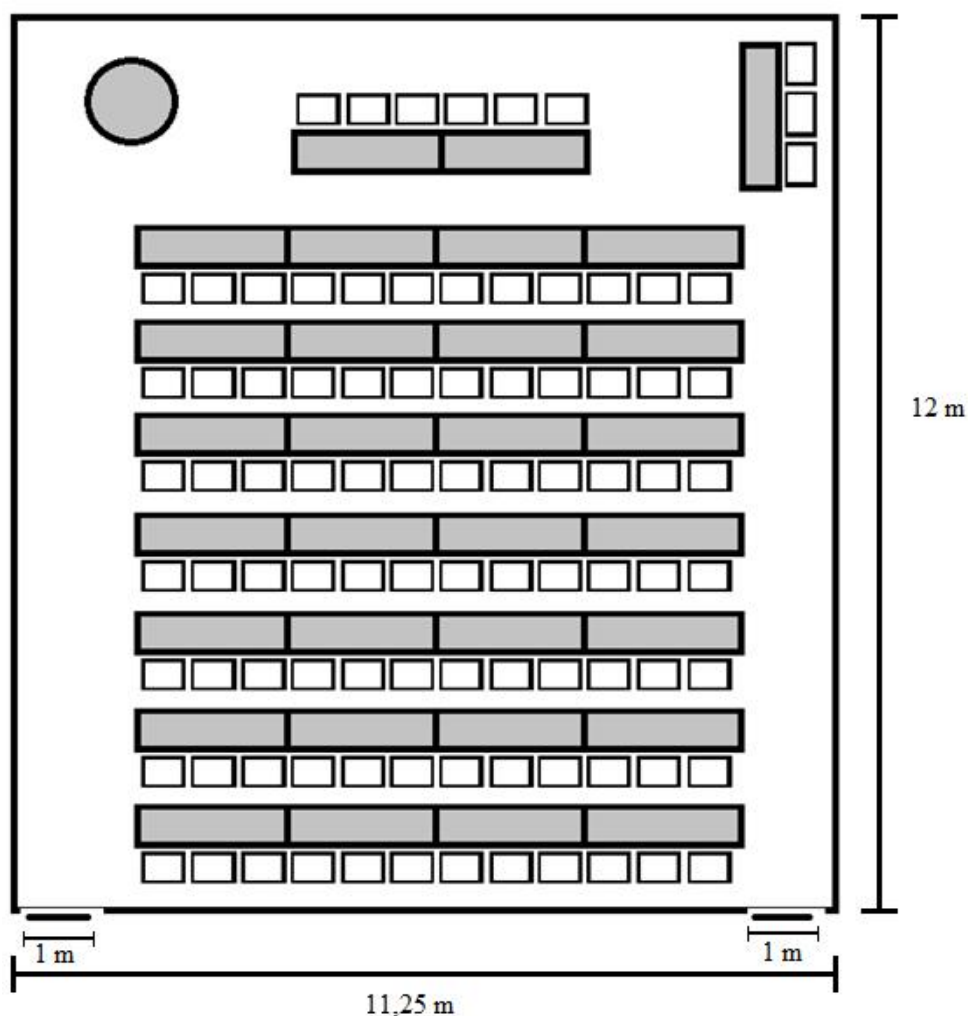


Figura 2: Layout do auditório

Avaliando-se as condições atuais do local de estudo, tomando como referência a NBR 9077, nota-se que o auditório está alocado na classificação quanto à sua ocupação ao grupo F e a divisão F-2, conforme definido antes, que é a classificação dada para locais de reunião de públicos contemplando templos e auditórios em geral. Logo, para esta classificação, utiliza-se uma pessoa por metro quadrado para o cálculo da população. Para saber a capacidade populacional total do ambiente, é preciso ainda definir a área de pavimento, ou seja, a área útil interna da dependência que abrigará a população em foco. Para isto, faz-se necessário subtrair da área total do ambiente, a área total dos obstáculos internos. Para este cálculo, é preciso classificar e obter a área de cada obstáculo bem como da área total destes, conforme expostos na Tabela 10, medidas em  $m^2$ .

Tabela 10: Área total dos obstáculos internos no auditório

|            | Itens           | Área                      | Quantidade | Área total |
|------------|-----------------|---------------------------|------------|------------|
| Obstáculos | Mesa retangular | 1,02                      | 31         | 31,6       |
|            | Cadeira         | 0,25                      | 93         | 23,3       |
|            | Mesa redonda    | 1,5                       | 1          | 1,5        |
|            |                 | Área total dos obstáculos |            | 56,4       |

Fonte: Esta Pesquisa (2015)

Obtido o valor da área total dos obstáculos, para o cálculo da capacidade total da população do auditório é preciso ainda subtrair este valor da área total do ambiente, como seguem os seguintes cálculos:

**área total do ambiente** = largura x comprimento =>

**área total do ambiente** = 11,25 m x 12 m => **área total do ambiente = 135 m<sup>2</sup>**

**área útil** = área total do ambiente – área total dos obstáculos internos =>

**área útil** = 135 m<sup>2</sup> – 56,4 m<sup>2</sup> => **área útil = 78,6 m<sup>2</sup>**

Depois de verificado o valor da área útil, pode-se então definir a população ideal para o cenário em questão segundo a norma. Com uma área de aproximadamente 79 metros quadrados, e considerando 1 pessoa por metro quadrado, o cálculo é simplório, resultando em uma população de 79 pessoas como quantidade máxima para o auditório. No entanto, para análise e desenvolvimento deste trabalho, foi adotada uma população de 100 pessoas, ou seja, uma quantidade acima do indicado pela NBR 9077 e acima da capacidade de assentos dispostos no auditório, o que configura um cenário de superpopulação, com aproximados 127% da capacidade indicada. Faz-se necessário salientar que a quantidade de 100 pessoas, como população total, aqui atribuída é apenas um dado para análise e concretização deste trabalho, podendo esta, se apresentar como um valor maior, menor ou a quantidade indicada pela norma. Neste caso, buscou-se apenas colocar uma quantidade a mais que o indicado, que é o que parece ser comum para maioria dos casos.

No que se refere à quantidade de portas, a NBR 9077 exige o uso de apenas uma para os casos de classificação F, conforme Tabela 9. Além disso, a norma atribui para esta mesma classificação, uma unidade de passagem de 100 pessoas por minuto. Logo, para o cálculo do número de unidades de passagens do auditório, tem-se:

$$N = \frac{P}{C} \Rightarrow N = \frac{100}{100} \Rightarrow N = 1.$$

Desta forma, pelo cálculo desenvolvido, dever-se-ia adotar apenas uma unidade de passagem de 0,55 m. Contudo, conforme indicado na NBR 9077, deve ser adotada a quantidade de 2 unidades de passagem, que é equivalente a 1,1 m correspondente à largura mínima para as ocupações em geral, ressaltando as condições já citadas.

Para efeito de análise e desenvolvimento deste trabalho, foi adotada a largura de 1,2 m para a porta, uma vez que as células da malha são homogêneas e possuem dimensões de 0,4 x 0,4 m, e, assim, fica restrita à representação de valores múltiplos desta unidade. Ou seja, para o caso em questão, poder-se-ia atribuir 0,8 m ou 1,2 m para a largura da porta. No entanto, como a largura mínima para a porta é de 1,1 m, foi atribuído 1,2 m para esta, correspondendo a 3 unidades de células da malha.

A Figura 3 expõe o *layout* do auditório reajustado às indicações da norma estudada, apresentando-se com apenas uma porta, inicialmente posicionada em uma das extremidades da parte inferior da planta.



esforço possível à saída. Logo, os pedestres irão procurar sempre o menor caminho, escolhendo as células diagonais em direção a saída, por possuírem os menores valores na vizinhança. Como já mencionado, a planta foi dividida em células quadradas de dimensão 0,4 m, e reajustada conforme indicações da NBR 9077 e está exposto na Figura 3.

Logo, para este caso específico, em qualquer lugar em que se encontrar o pedestre, mesmo tendo que contornar obstáculos e se deslocar de um vértice ao seu oposto, o número máximo de células que este precisará percorrer para chegar à saída é inferior a 45, conforme Figura 4, resultando assim em um valor inferior a 20 m de caminhada conforme requer a norma. Este valor pode ser verificado pelo cálculo a seguir.

|                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Distância percorrida} = \text{número de células caminhadas} \times \text{medida da célula}$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|

Para o caso em estudo, deve-se ter:

Distância percorrida < 20 m (conforme indica a NBR 9077) =>

$$45 \times 0,4 < 20 \text{ m}$$

$$18 < 20 \text{ m} \Rightarrow \textbf{Distância percorrida} < \textbf{20 m}$$

Desta forma, nota-se que para o quesito distância máxima a ser percorrida, o local de estudo está coerente com a NBR 9077, pois a distancia máxima a ser percorrida de qualquer ponto da planta até a saída mais próxima é inferior a 20 m conforme indica a norma.

[illegible]

*Figura 4: Trajetória do ponto mais distante até a saída*

Como mencionado, foram gerados novos *layouts* a partir do exposto na Figura 3, a qual representa as condições atuais do auditório salvo as adaptações da largura e número de portas à norma. Cada novo *layout* foi gerado a partir da modificação do posicionamento da porta do auditório, de modo que estas modificações se deram de forma padronizada avançando-se, da esquerda para a direita, em cada *layout*, uma posição na célula inicial e final que configuram a largura da porta. A Figura 5 expõe as características da porta para as posições 1, 2, 3, 4 e 26, e por meio destas, pode-se representar a lógica utilizada para as demais posições da porta. A Figura 6 descreve o *layout* completo referente à segunda posição da porta, neste, são expostos os pesos das células que formam o novo cenário gerado a partir do deslocamento da porta. Já a Figura 7 descreve o 26º ou último *layout*, que é a última posição para alocação da porta no espaço estudado que é a parte inferior da planta.

|          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 500      | 28  | 27  | 26  | 25  | 24  | 23  | 22  | 21  | 20  | 19  | 18  | 17  | 16  | 15  | 14  | 13  | 12  | 11  | 10  | 9   | 8   | 7   | 6   | 5   | 4   | 3   | 3   | 3   | 500 |
| 500      | 27  | 26  | 25  | 24  | 23  | 22  | 21  | 20  | 19  | 18  | 17  | 16  | 15  | 14  | 13  | 12  | 11  | 10  | 9   | 8   | 7   | 6   | 5   | 4   | 3   | 2   | 2   | 2   | 500 |
| 500      | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 1   | 1   | 1   | 500 |
| PORTA 26 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| • • •    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 500      | 6   | 5   | 4   | 3   | 3   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 500 |
| 500      | 5   | 4   | 3   | 2   | 2   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 500 |
| 500      | 500 | 500 | 500 | 1   | 1   | 1   | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| PORTA 4  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 500      | 5   | 4   | 3   | 3   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 500 |
| 500      | 4   | 3   | 2   | 2   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 500 |
| 500      | 500 | 500 | 1   | 1   | 1   | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| PORTA 3  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 500      | 4   | 3   | 3   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 500 |
| 500      | 3   | 2   | 2   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 500 |
| 500      | 500 | 1   | 1   | 1   | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| PORTA 2  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 500      | 3   | 3   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 500 |
| 500      | 2   | 2   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 500 |
| 500      | 1   | 1   | 1   | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| PORTA 1  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Figura 5: Características da porta para as posições 1, 2, 3, 4... 26

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| 500 | 32  | 31  | 31  | 32  | 33  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 52  | 53  | 54  | 55  | 500 |
| 500 | 31  | 30  | 30  | 31  | 32  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 52  | 53  | 54  | 500 |
| 500 | 30  | 29  | 29  | 30  | 31  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 52  | 53  | 500 |
| 500 | 29  | 28  | 28  | 29  | 30  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 52  | 500 |
| 500 | 28  | 27  | 27  | 28  | 29  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 51  | 500 |
| 500 | 27  | 26  | 26  | 27  | 28  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50  | 500 |
| 500 | 26  | 25  | 25  | 26  | 27  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 500 |
| 500 | 25  | 24  | 24  | 25  | 26  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 500 |
| 500 | 24  | 23  | 23  | 24  | 25  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 500 |
| 500 | 23  | 22  | 22  | 23  | 24  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 500 |
| 500 | 22  | 21  | 21  | 22  | 23  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 500 |
| 500 | 21  | 20  | 20  | 21  | 22  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 500 |
| 500 | 20  | 19  | 19  | 20  | 21  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 500 |
| 500 | 19  | 18  | 18  | 19  | 20  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 42  | 500 |
| 500 | 18  | 17  | 17  | 18  | 19  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 41  | 500 |
| 500 | 17  | 16  | 16  | 17  | 18  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  | 500 |
| 500 | 16  | 15  | 15  | 16  | 17  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 500 |
| 500 | 15  | 14  | 14  | 15  | 16  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 38  | 500 |
| 500 | 14  | 13  | 13  | 14  | 15  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 37  | 500 |
| 500 | 13  | 12  | 12  | 13  | 14  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 36  | 500 |
| 500 | 12  | 11  | 11  | 12  | 13  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 35  | 500 |
| 500 | 11  | 10  | 10  | 11  | 12  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  | 500 |
| 500 | 10  | 9   | 9   | 10  | 11  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 33  | 500 |
| 500 | 9   | 8   | 8   | 9   | 10  | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32  | 500 |
| 500 | 8   | 7   | 7   | 8   | 9   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 500 |
| 500 | 7   | 6   | 6   | 7   | 8   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 500 |
| 500 | 6   | 5   | 5   | 6   | 7   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 500 |
| 500 | 5   | 4   | 4   | 5   | 6   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 500 |
| 500 | 4   | 3   | 3   | 4   | 5   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 500 |
| 500 | 3   | 2   | 2   | 3   | 4   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 500 |
| 500 | 500 | 1   | 1   | 1   | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |

Figura 6: 2ª Modificação no layout do auditório, 2ª posição da porta

[illegible]

Figura 7: 26ª Modificação no layout do auditório, 26ª posição da porta

### 3.3 Linguagem de computação

A simulação de multidões, realizada neste trabalho, se deu por meio do uso de um software implementado pelo próprio autor com uso da linguagem de programação C++. O software utilizado para o desenvolvimento do algoritmo de simulação foi o *Microsoft Visual C++ 2010 Express*. Os resultados foram obtidos para o auditório, levando-se em consideração as características estruturais atuais do ambiente conforme expostas na Figura 2, salvo modificações no tamanho e número de portas que foram adaptados às condições sugeridas na NBR 9077 e que estão sendo representados pela Figura 3, que expõe o campo de piso do *layout* modificado. Em seguida, foram realizadas novas simulações, mas em cenários oriundos de modificações do modelo já adaptado à norma, visando identificar os efeitos destas mudanças no tempo final total de evacuação. Estes novos cenários são originários de modificações na posição da porta, conforme Figura 6 e Figura 7, de modo que, depois de estabelecida a dimensão da porta, esta foi permutada por todo o espaço estudado e viável de

sua alocação, que é a parte inferior da planta conforme visto na Figura 3, partindo de uma extremidade à outra, onde cada nova posição da porta caracteriza-se como um novo cenário e um novo *layout* que é estabelecido avançando uma posição na célula inicial e na célula final que delimitam a largura da porta.

### 3.4 Pseudocódigo

A questão fundamental deste trabalho foi: o posicionamento da porta interfere no tempo total final de saída? Para responder esta pergunta, alguns testes foram necessários, por exemplo: simular em um mesmo cenário diferentes quantidades de indivíduos e modificar a posição da porta obtendo o tempo total final de saída em cada uma das posições. Além disto, algumas considerações foram necessárias, por exemplo: homogeneidade do dimensionamento e da velocidade dos indivíduos e condicionamento do movimento dos simulados ao peso e estado das células vizinhas. Logo, mediante tais peculiaridades, para atingir os resultados esperados neste trabalho, desenvolver um *software* foi preferível a utilizar um já acabado e direcionado à outros fins.

Os algoritmos, no presente trabalho, são apresentados nesta seção e padronizados como uma série finita e enumerada de instruções. Atribuições são feitas da direita para a esquerda, e utiliza-se o símbolo  $\leftarrow$  como notação. Para facilitar o entendimento, por parte do leitor, a Figura 8 fornece uma lista com a notação utilizada nos algoritmos.

$C$  – célula da matriz  $L$   
 $\text{Calcula\_Pesos}(S_p)$  – função que preenche os pesos das células de cada uma das sala  $S_p$   
 $C_i$  – célula da sala  $S_i$   
 $\text{Cria\_Sala}(P, x, y)$  – função que cria salas de dimensões  $x$  por  $y$  para cada porta  $P$  do layout  
 $C_s$  – células diferente de obstáculos, ou seja, células de circulação  
 $C_v$  – célula vizinha de  $C$   
 $D$  – conjunto de todos os clientes em  $S_{\text{resultante}}$   
 $\text{Insere\_Clintes}(S_{\text{resultante}})$  – função que distribui os clientes na sala  $S_{\text{resultante}}$   
 $L$  – matriz de ordem  $x$  por  $y$   
 $L_p$  – lista de pesos  
 $N_c$  – número de clientes para simulação  
 $O$  – obstáculo no layout  
 $p$  – peso  
 $p_{\text{resultante}}$  – menor peso entre as células correspondentes do conjunto de sala  $S$   
 $P_t$  – passo de tempo para que todos os clientes dêem um passo em direção a saída  
 $P_{\text{total}}$  – quantidade total de passos de tempo  $P_t$  até  $S_{\text{resultante}}$  ficar vazia  
 $\text{Resultante}(S)$  – função que toma as salas do conjunto  $S$  e retorna uma única sala  
 $S$  – conjunto de salas com pesos já distribuídos  
 $S_i$  – sala  $i$  do conjunto de sala  $S$   
 $\text{Simula}(S_{\text{resultante}})$  – função que faz a simulação dos clientes e retorna o tempo de saída  
 $S_p$  – sala para porta  $P$ , em que  $P$  é um número natural  
 $S_{\text{resultante}}$  – sala com os menores pesos entre as células correspondentes no conjunto  $S$   
 $T$  – cliente do conjunto  $D$   
 $T$  – tempo de saída de todos os clientes  
 $T_i$  – lista de clientes interessados em ocupar uma determinada célula  $C_i$  de  $S_{\text{resultante}}$   
 $X$  – comprimento da sala  
 $Y$  – largura da sala

Figura 8: Notação utilizada nos algoritmos

### 3.4.1 Algoritmo principal:

O algoritmo na Figura 9 descreve o comportamento geral do programa desenvolvido para o caso em estudo, mas que pode atender a casos mais gerais, por exemplo, *layouts* com

diversas portas e obstáculos. Sejam  $x$  e  $y$  os tamanhos do comprimento e da largura da sala respectivamente. Essas informações são absorvidas por uma nova classe que irá criar um conjunto de salas originárias do número de portas existentes no *layout*, ou seja, a função **Cria\_Sala**( $P, x, y$ ), descrita na Figura 10, será chamada para criar uma sala de dimensões  $x$  por  $y$ , para cada uma das portas existentes. Estas salas posteriormente serão processadas e resultarão em apenas uma sala. Para o caso em estudo, a função **Cria\_Sala**( $P, x, y$ ) irá criar apenas uma sala referente a uma porta conforme indica a norma.

De modo geral, uma vez criadas as salas, deve-se então alocar os obstáculos. No processo de alocação de obstáculos, o código verifica se as coordenadas fornecidas dos obstáculos são válidas, ou seja, se as posições dos mesmos são condizentes com a dimensão da sala. Depois de verificada a adequação dos obstáculos, o código os adiciona a cada uma das salas criadas. Além disto, depois de alocados os obstáculos e a porta para cada sala, a função **Calcula\_Pesos**( $S_P$ ), descrita na Figura 12, é chamada e nesta parte o código preenche as demais células da sala, finalizando-a e, em seguida, a insere no conjunto  $S$  de salas. Essas salas são repassadas como *input* para a função **Resultante**( $S$ ), descrita na Figura 13, que irá processá-las e retornará como *output* uma única sala,  $S_{\text{resultante}}$ , que resume todas as outras, pois se trata de uma sala compostas pelos menores pesos das células correspondentes dentre as salas existentes no conjunto  $S$  de salas.

A sala  $S_{\text{resultante}}$  receberá os clientes por meio da função **Inserir\_Clientes**( $S_{\text{resultante}}$ ), descrita na Figura 14, sendo estes distribuídos na quantidade e nas posições viáveis, ou seja, uma quantidade de clientes igual ou inferior ao número de células de circulação e sejam distribuídos em células diferentes de obstáculos ou células que já possuam clientes. Em seguida, a função **Simula**( $S_{\text{resultante}}$ ), descrita na Figura 15, faz a simulação de saída destes clientes e retorna como *output* o tempo total de evacuação.

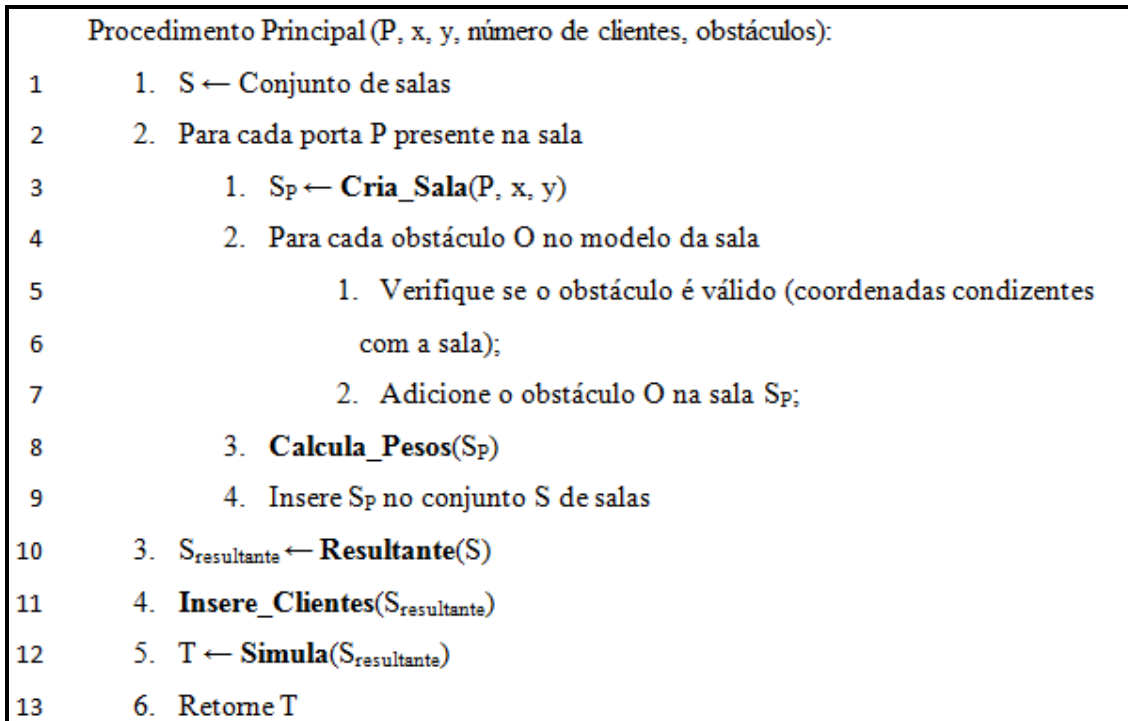


Figura 9: Algoritmo principal

### 3.4.2 Algoritmo de criação de sala:

O algoritmo da Figura 10 é responsável pelo processo de inicialização de uma sala a partir das informações fornecidas no algoritmo principal, especificamente as informações do posicionamento da porta e das dimensões da sala. A função **Cria\_Sala**( $P, x, y$ ) recebe os parâmetros do algoritmo principal e cria matrizes  $L$  de ordem  $x$  por  $y$  relacionadas ao número de portas existentes. A matriz armazena informações sobre a sala em suas células. As características fundamentais são: obstáculo, porta, peso e visitado. Esta matriz é inicializada com a ausência de obstáculos e porta, pesos de valor zero e recebe também a característica de não visitado em todas as células, que é condição necessária para o algoritmo de preenchimento de pesos, através da função **Calcula\_Pesos**( $S_P$ ), descrita na Figura 12 funcionar corretamente.

Após a alocação da matriz  $L$ , a função **Cria\_Sala**( $P, x, y$ ) insere a porta nesta matriz e atribui 1 para cada uma das células  $C$  que compõem a porta. Em seguida, marca cada célula da porta como visitada, de modo a impedir que o algoritmo de preenchimento de pesos modifique o valor destas células, permanecendo estas, com o peso 1 durante todo o processo de construção da sala bem como em toda a simulação, tendo em vista que o campo de piso

utilizado neste trabalho foi o estático e, neste caso, os pesos das células permanecem constantes.

Depois de criada a matriz  $L$ , esta será transformada em uma sala  $S_P$  pela função “construtor” que irá retornar a sala  $S_P$  para o algoritmo principal da Figura 9, de modo que  $P$  expressa a classificação da porta, ou seja,  $S_1$  indica a sala criada para primeira porta,  $S_2$  a sala criada para a segunda porta e assim sucessivamente. Em seguida,  $S_P$  será adicionada ao conjunto  $S$  de salas que irá unificar estas salas em apenas uma, conforme descrito anteriormente.

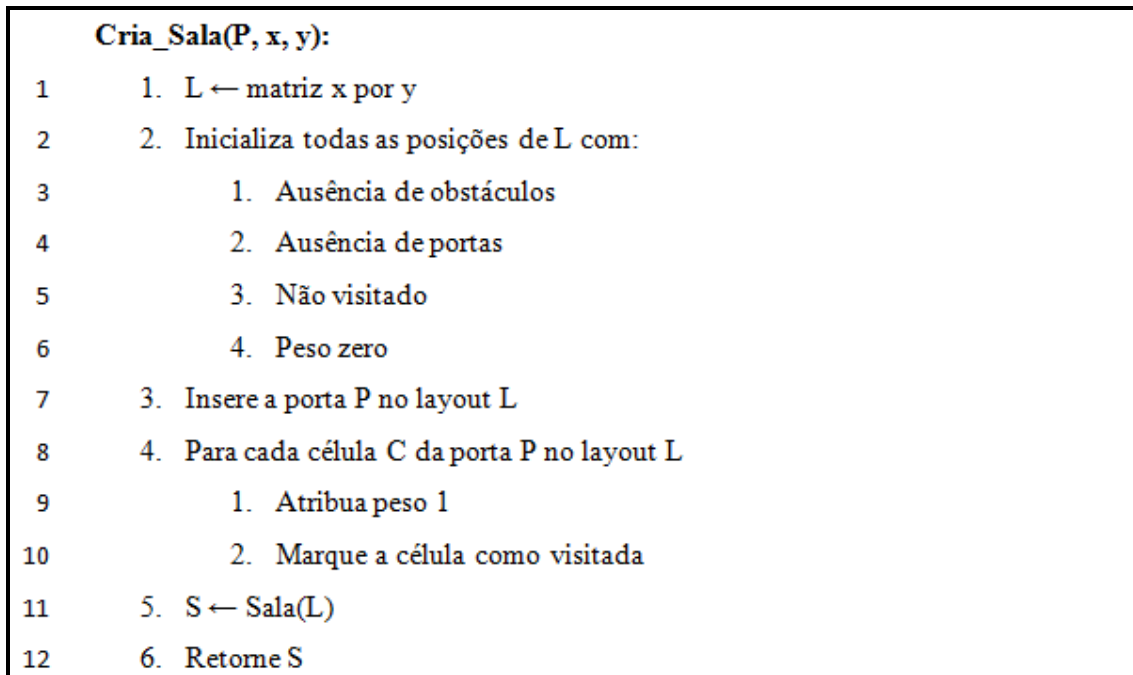


Figura 10: Algoritmo de criação de sala

### 3.4.3 Algoritmo de Preenchimento de Pesos:

O algoritmo da Figura 12, através da função **Calcula\_Peso( $S_P$ )**, é responsável pelo preenchimento do peso das células, procedendo de forma recursiva de maneira similar a uma busca em largura, (*breadth-first search*), e que está relacionado com o conceito de caminho mínimo. Conforme proposto por Corneil *et al.* (2010), o algoritmo de busca em largura inicia uma busca por um vértice  $F$ , começando de um vértice  $V$ , expandindo-se para os vértices de distância 1 de  $V$ , depois de distância 2 de  $V$ , e assim segue por todos os  $n$  vértices do conjunto  $M$  de vértices até encontrar  $F$ , conforme ilustra a Figura 11.

Para o caso em estudo, o algoritmo parte de uma das células que compõem a porta e preenchem as células vizinhas, na vertical e horizontal, com o peso da célula de origem somado 1, ou seja, como neste estudo as células da porta recebem peso 1, as células vizinhas receberão nesta iteração peso 2. Em seguida, o procedimento é chamado para cada uma das células recém-preenchidas e é repetido para cada uma de suas células vizinhas, desde que estas não sejam obstáculos, ou seja, se em determinado ponto da malha não houver condições de preenchimento por estar cercado de obstáculos ou células já preenchidas, o procedimento é interrompido, sai da recursão e inicia-se na próxima célula da porta, se esta existir. Caso contrário, encerra-se o procedimento para esta matriz.

O preenchimento das células vizinhas com um peso  $p$  é direto, desde que estas não possuam peso ou não estejam marcadas como visitadas no procedimento atual. Quando a célula vizinha já possuir um peso, este será julgado com o peso que está sendo ofertado nesta nova sequência de preenchimento, que teve origem na segunda célula das que compõem a porta. Se o módulo da diferença, entre o peso atual da célula e o peso ofertado, for maior que 1, a célula receberá o menor peso, de modo a prevalecer a ordem com os menores pesos e, em seguida, é marcada como visitada nesta sequência.

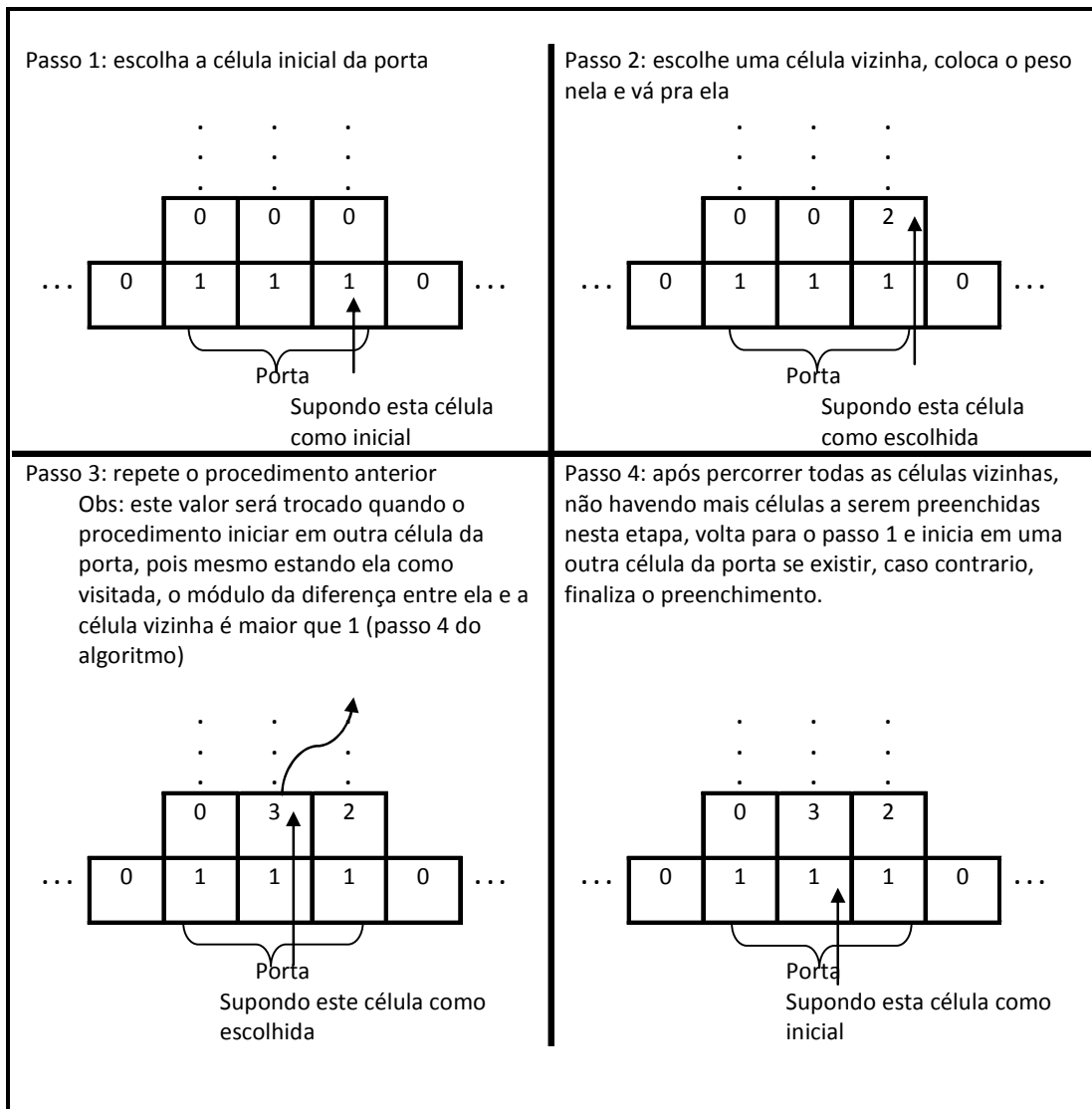


Figura 11: Procedimento de preenchimento dos pesos

|    |                                                                               |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|
|    | <b>Calcula_Pesos(<math>S_p</math>):</b>                                       |
| 1  | 1. $C \leftarrow$ célula da posição inicial da porta presente na sala         |
| 2  | 2. Preenche( $C, 1$ )                                                         |
| 3  | Preenche( $C, p$ ):                                                           |
| 4  | 1. Se a célula $C$ contiver um obstáculo                                      |
| 5  | 1. Retorne-o;                                                                 |
| 6  | 2. Se a célula $C$ estiver marcada como visitada ou possuir peso $> p$        |
| 7  | 1. Atribua o peso $p$ à célula $C$ ;                                          |
| 8  | 2. Marque a célula $C$ como visitada;                                         |
| 9  | 3. Se não                                                                     |
| 10 | 1. $p \leftarrow$ Peso da célula $C$                                          |
| 11 | 4. Para cada célula vizinha $C_v$                                             |
| 12 | 1. Se a célula $C_v$ não estiver marcada como visitada ou se o valor absoluto |
| 13 | da diferença entre $p$ e o peso de $C_v$ for maior que 1                      |
| 14 | 1. Preenche( $C_v, p+1$ )                                                     |

Figura 12: Algoritmo de preenchimento de pesos

#### 3.4.4 Algoritmo resultante de salas:

O algoritmo representado na Figura 13, algoritmo Resultante de Sala, usa um conjunto de salas  $S$ , cada uma com uma porta única, e calcula uma sala resultante a partir destas. Como já mencionado, para ambientes com mais de uma porta, é criada uma sala para cada uma das portas, conforme algoritmo de criação de salas exposto na Figura 10. Estas salas são sobrepostas conforme Algoritmo de preenchimento de pesos na Figura 12. Desta forma, depois de criadas as salas para as respectivas portas, é criada uma a sala  $S_{\text{resultante}}$  com as mesmas dimensões que as demais, e inicializada sem atribuição de pesos.

Para cada sala  $S_i$  do conjunto de salas  $S$ , o algoritmo irá identificar nas células  $C_i$  de  $S_i$  quais correspondem a portas e obstáculos e, em seguida, irá copiar estas características para as células correspondentes, ou seja, as células de mesma posição em  $S_{\text{resultante}}$ , marcando e unificando nesta, as portas e obstáculos existentes. Para as demais células em  $S_{\text{resultante}}$ , o algoritmo irá selecionar as células correspondentes em todas as salas, irá calcular o menor peso  $p_{\text{resultante}}$  dentre todas as células selecionadas e, em seguida, atribuirá este peso à célula  $C$

em  $S_{\text{resultante}}$ . Por fim, o algoritmo fornece como *output* a sala  $S_{\text{resultante}}$ , para que se possa, a partir desta, adicionar os clientes e efetuar as simulações.

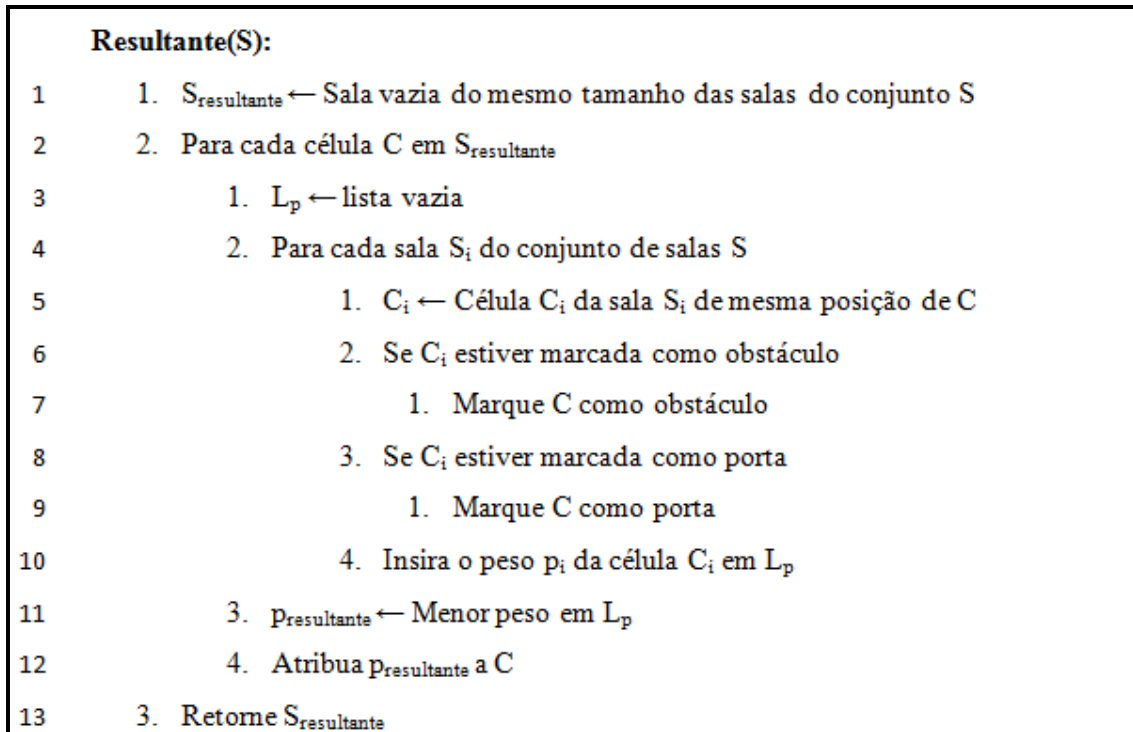


Figura 13: Algoritmo resultante de sala

### 3.4.5 Algoritmo de inserção de clientes:

Neste ponto do código, a sala considerada é a sala  $S_{\text{resultante}}$ , que é o resultado da intersecção das salas criadas a partir das diferentes portas existentes no *layout*. Caso exista uma única porta no *layout*, será criada uma única sala S, que será, consecutivamente, a sala principal para as simulações, uma vez que não existirá intersecção para unificação das salas, que é o que ocorre para o caso em estudo por realizar simulações com apenas uma porta.

O algoritmo da Figura 14 procede com a inserção em posição aleatória de clientes, para população da sala. A função **Inserir\_Cliente**( $S_{\text{resultante}}$ ) recebe a informação do número de clientes que se deseja inserir na sala  $S_{\text{resultante}}$ , que é a sala  $S_{\text{resultante}}$  descrita no algoritmo da Figura 13, e antes de inseri-los, a função de inserção verifica se o número de células sem obstáculos  $C_s$  (células de circulação) em  $S_{\text{resultante}}$  é menor ou igual que o número de cliente  $N_c$  que se deseja inserir na sala. Logo, se o número de clientes a serem inseridos na sala for maior que o número de células vazias em  $S_{\text{resultante}}$ , o algoritmo não procederá com a inserção e

exibirá uma mensagem de erro para o usuário. Caso o número de clientes seja condizente com a quantidade de células vazias, procede-se com a inserção.

Para inserção de clientes em  $S_{\text{resultante}}$ , o algoritmo faz a distribuição uniforme, sorteando para cada cliente uma coordenada  $x$  e  $y$ , linha e coluna, que representará uma determinada localidade na sala. Se a célula sorteada for um obstáculo ou se já houver algum cliente nesta, o algoritmo irá desconsiderar esta localidade e tornará a sortear outra até encontrar uma célula vazia. Encontrada uma célula que não possua obstáculos e que não tenha cliente, o algoritmo insere o cliente nesta célula e continua o processo de inserção até enquanto existirem clientes a serem alocados em  $S_{\text{resultante}}$ .

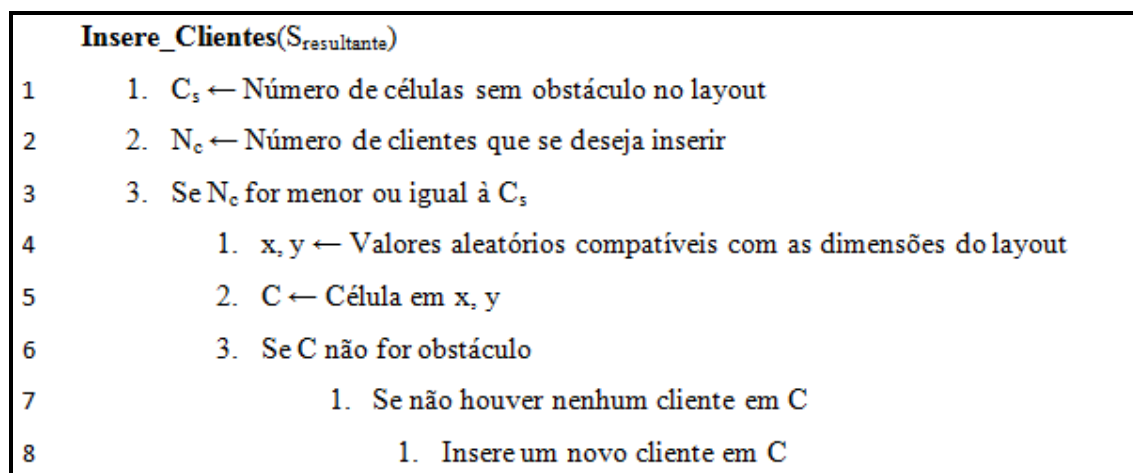


Figura 14: Algoritmo de inserção de cliente

#### 3.4.6 Algoritmo de simulação:

O algoritmo da Figura 15 recebe da função **Inserere\_Cliente( $S_{\text{resultante}}$ )** descrita na Figura 14, a sala  $S_{\text{resultante}}$  com um número de clientes  $N_c$  já distribuídos. Em seguida, efetua a simulação de evacuação destes, fornecendo como retorno o tempo total de saída de todos os clientes.

Para a simulação, atribui-se  $D$  ao conjunto de todos os clientes em  $S_{\text{resultante}}$ ,  $P_t$  como sendo um passo de tempo, ou seja, o período para que todos se desloquem dando um passo em direção a uma das saídas, e  $P_{\text{total}}$  como sendo a quantidade total de passos de tempo para que não haja mais nenhum cliente em  $S_{\text{resultante}}$ .

Se um cliente  $T$ , do conjunto de todos os clientes  $D$ , não conseguir se movimentar no passo de tempo  $P_t$ , para que o sistema mude para o próximo passo de tempo, este cliente receberá o status MOVEU e tentará um deslocamento no próximo passo. O cliente  $T$  fica

impossibilitado de se mover em um determinado passo de tempo  $P_t$  se as células de interesse, ou seja, as células vizinhas com menor peso que a atual de  $T$  estiverem todas ocupadas com clientes que já se moveram no passo de tempo atual e que estão com status MOVEU.

Caso  $C$  exista, ou seja, se há células para que  $T$  possa se deslocar, a estas serão atribuídas uma propriedade próximo\_passo de  $T$  que guardará as células de interesse. E para cada célula  $C_i$  em  $S_{\text{resultante}}$ , é atribuída uma lista vazia  $T_i$  que guardará os clientes que a tem como próximo passo. E se não houver nenhum cliente em  $C_i$ , sorteia-se um dos candidatos a ocupar esta célula, move-se então este candidato e lhe atribui o status MOVEU. Para cada cliente  $T$  que estiver em uma porta no passo  $P_t$  atual, este será removido do conjunto  $D$ .

No que se refere ao cálculo do tempo total de evacuação, este virá do produto de  $P_{\text{total}}$  por 0,5s, ou seja, o número total de passos de tempo para que todos deixem o ambiente multiplicado pelo tempo que uma pessoa leva para percorrer uma distancia de 0,4 m, que é a medida de cada célula, a uma velocidade de 0,8 m/s. Assim, o tempo total de evacuação é o retorno que a função irá fornecer e que será uma das variáveis de estudo deste trabalho.

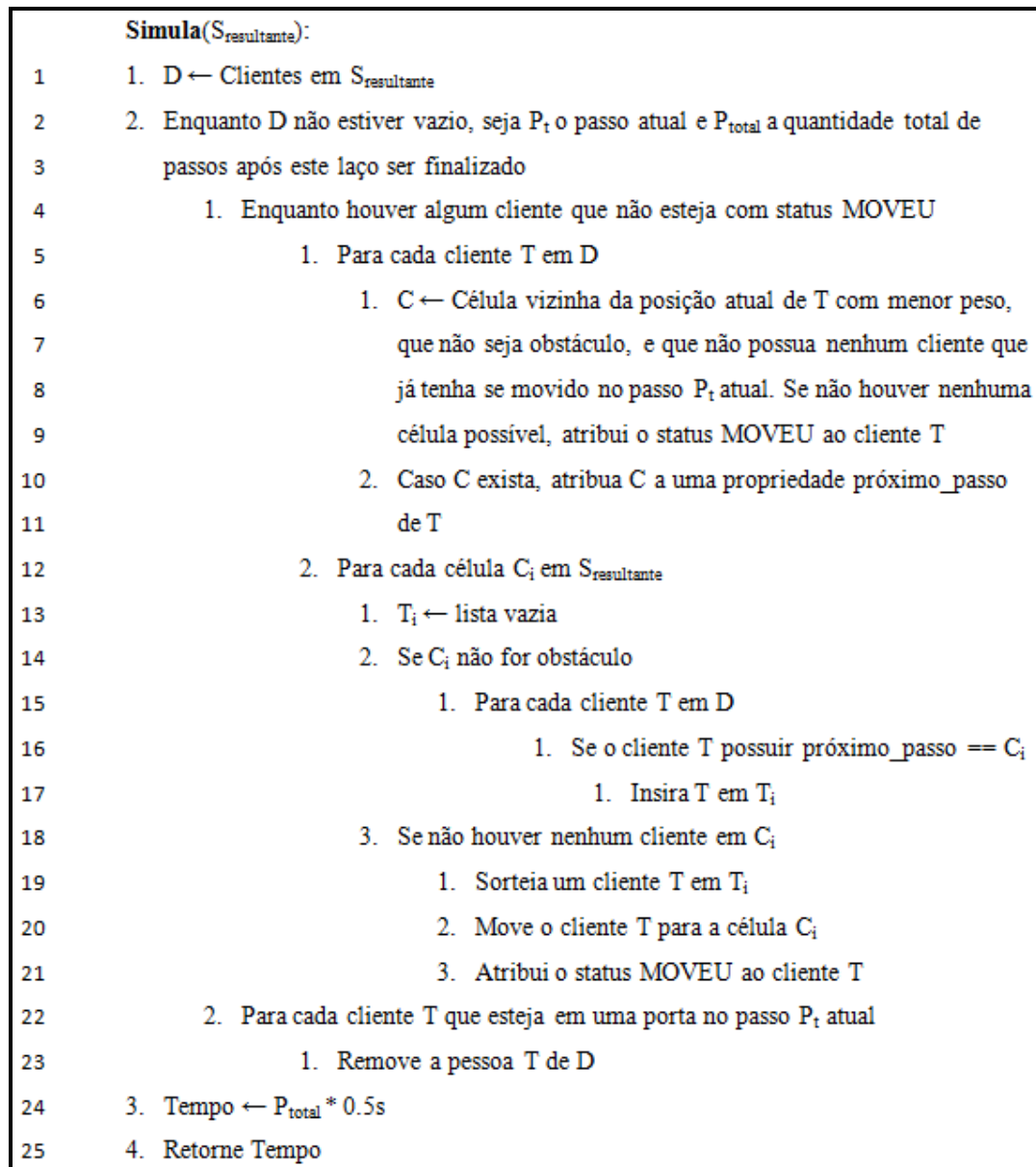


Figura 15: Algoritmo de simulação

A Figura 16 expõe o fluxograma com a hierarquia dos algoritmos. Como informado antes, o Algoritmo Principal recebe como *input* as coordenadas x e y, largura e comprimento, respectivamente. Além destas, ele recebe as informações acerca dos obstáculos existentes e da quantidade e posições das portas. Essas informações são captadas pelo algoritmo de criação de salas que cria uma sala para cada uma das portas descritas. Estas salas possuem as mesmas dimensões e se diferenciarão apenas pela posição da porta. Depois de criadas as salas, estas são repassadas para o algoritmo preenchimento de pesos para que possam receber os pesos

das áreas de circulação. Finalizadas as salas, estas são absorvidas pelo algoritmo resultante de sala que fará a intersecção destas salas e devolver como *output* uma única sala de mesma dimensão que as demais, só que contendo os menores pesos destas e também todas as portas existentes no layout.

O algoritmo de inserção de cliente toma esta sala resultante e insere, de maneira aleatória, um número NC de clientes. Esta sala, agora povoada, é repassada para o Algoritmo de Simulação que fará a evacuação destes clientes e repassará, como *output*, o tempo total final de saída dos NC clientes.

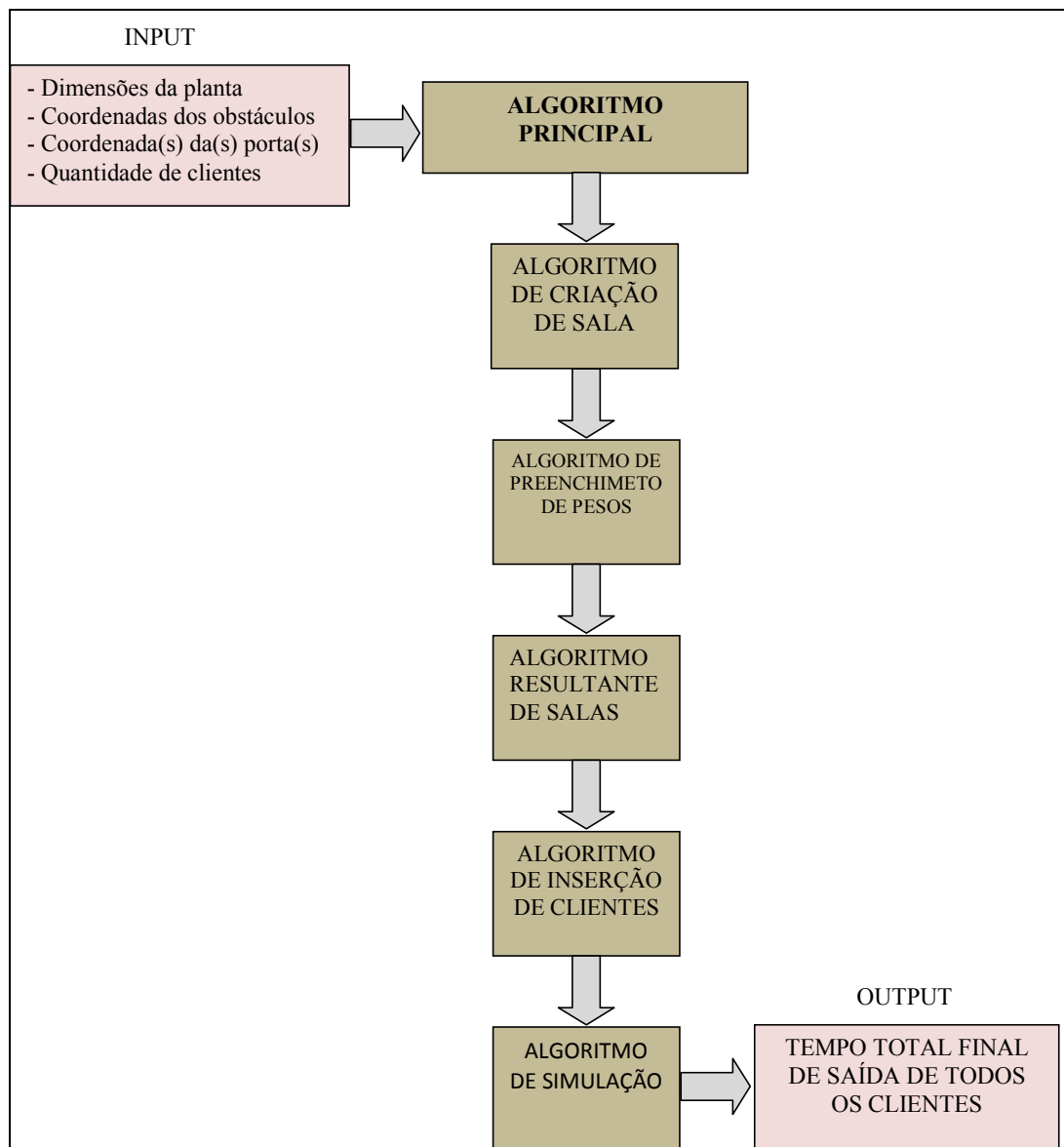


Figura 16: Fluxograma de funcionamento do código

## **4 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Foram realizadas 1000 simulações via simulação Monte Carlo do procedimento de evacuação do auditório para cada uma das 26 posições da porta e para cada uma das lotações simuladas, onde Monte Carlo é um método que tem como base a geração de valores aleatórios para criar o cenário de um problema e é muito utilizado para se determinar propriedades de estimadores ou para se comparar métodos de testes estatísticos (Oliveira, 2008). A partir da simulação, foram obtidas estimativas para média do tempo de evacuação com o objetivo de entender o comportamento dessa medida. Duas abordagens foram tomadas para análise da média: a primeira através de intervalos de confiança e a segunda através de uma análise de variância (ANOVA). Ambas as abordagens consideraram uma lotação de 50%, 75% e 100% da população atribuída para simulação no auditório, que conforme indicado pela norma deveria ser de 79 pessoas, mas para as simulações foi adotada uma população de 100 pessoas, implicando em 127% da população indicada, configurando assim, um cenário com superpopulação.

### **4.1 Intervalos de confiança**

A suposição mais natural a ser feita na construção do intervalo de confiança para a média do tempo de evacuação é que a mesma segue distribuição normal. Porém, a Figura 17 ilustra o comportamento dos quantis, medida separatriz correspondente a uma proporção acumulada dos valores da simulação para a porta na posição 1, evidenciando que a distribuição do tempo médio não segue distribuição normal em virtude dos “degraus” encontrados nos quantis, comum em distribuições discretas. Ou seja, a Figura 17 mostra que a relação entre os quantis da distribuição normal teórica e os quantis da distribuição empírica dos dados apesar de ser linear e estar compreendida no intervalo -3 e 3 (intervalo da maior concentração de massa de probabilidade de uma normal) a presença de "degraus" mostra que os dados provenientes da simulação não seguem uma distribuição normal. Esse comportamento se repete para as demais 25 posições em que a porta se encontra. A Tabela 11 exhibe os quantis da normal para as 25 posições evidenciando que as mesmas, assim como a posição 1, não seguem distribuição normal sob o mesmo argumento.

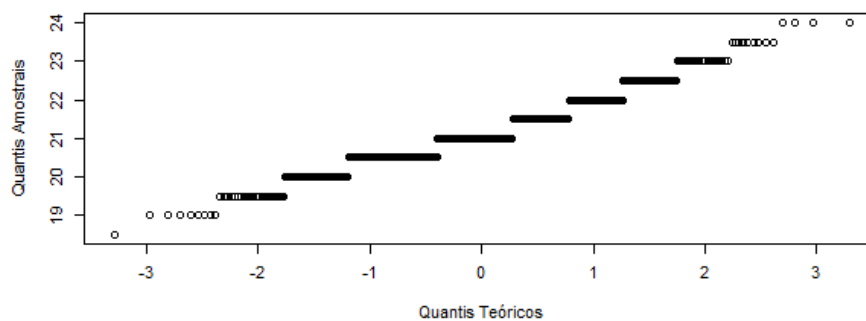


Figura 17: Gráfico dos quantis da simulação para porta na posição 1

Tabela 11: Quantis das 25 posições da porta

| Posição | 0%   | 10%   | 20%  | 30%  | 40%  | 50%  | 60%  | 70%  | 80%  | 90%  | 100% |
|---------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2       | 23   | 24,5  | 25   | 25   | 25,5 | 25,5 | 25,5 | 26   | 26   | 26,5 | 28,5 |
| 3       | 23   | 24,5  | 25   | 25   | 25,5 | 25,5 | 26   | 26   | 26,5 | 26,5 | 28,5 |
| 4       | 23,5 | 24,5  | 25   | 25,5 | 25,5 | 25,5 | 26   | 26   | 26,5 | 27   | 29   |
| 5       | 25   | 27,5  | 28   | 28,5 | 29   | 29   | 29,5 | 30   | 30   | 30,5 | 32,5 |
| 6       | 37,5 | 40,5  | 41   | 41,5 | 42   | 42,5 | 43   | 43   | 43,5 | 44,5 | 46,5 |
| 7       | 36   | 39    | 39,5 | 40   | 40,5 | 41   | 41,5 | 42   | 42,5 | 43   | 46   |
| 8       | 33,5 | 36,5  | 37,5 | 38   | 38,5 | 39   | 39,5 | 40   | 40,5 | 41   | 45,5 |
| 9       | 30   | 34    | 35   | 35,5 | 36   | 36,5 | 37   | 37,5 | 38   | 39   | 42   |
| 10      | 29   | 32    | 33   | 33,5 | 34   | 34,5 | 34,5 | 35   | 36   | 36,5 | 40,5 |
| 11      | 27,5 | 30,45 | 31   | 31,5 | 32,5 | 32,5 | 33   | 34   | 34,5 | 35   | 40,5 |
| 12      | 27   | 29,5  | 30,5 | 31   | 31,5 | 32   | 32,5 | 32,5 | 33,5 | 34   | 37,5 |
| 13      | 27   | 28,5  | 29   | 29,5 | 30   | 30   | 30,5 | 31   | 31,5 | 32,5 | 37   |
| 14      | 27   | 28,45 | 28,5 | 29   | 29,5 | 29,5 | 30   | 30,5 | 30,5 | 31,5 | 34,5 |
| 15      | 27   | 28    | 28,5 | 29   | 29   | 29,5 | 30   | 30   | 30,5 | 31,5 | 35,5 |
| 16      | 27   | 28,5  | 29   | 29,5 | 30   | 30,5 | 31   | 31,5 | 32   | 32,5 | 35,5 |
| 17      | 27,5 | 29,5  | 30,5 | 31   | 31,5 | 32   | 32,2 | 32,5 | 33,5 | 34   | 37,5 |
| 18      | 27   | 30,5  | 31,5 | 32   | 32,5 | 33   | 33,5 | 34   | 34,5 | 35,5 | 38,5 |
| 19      | 29   | 32,5  | 33   | 33,5 | 34   | 34,5 | 35   | 35,5 | 36   | 37   | 40   |
| 20      | 31,5 | 34,5  | 35,5 | 36   | 36,5 | 37   | 37,5 | 38   | 38,5 | 39   | 43   |
| 21      | 34,5 | 37    | 38   | 38,5 | 39   | 39,5 | 39,5 | 40   | 40,5 | 41,5 | 45,5 |
| 22      | 36,5 | 39,5  | 40   | 40,5 | 41   | 41,5 | 42   | 42,5 | 43   | 43,5 | 47   |
| 23      | 22,5 | 24,5  | 25   | 25,5 | 26   | 26   | 26,5 | 27   | 27,5 | 28   | 30,5 |
| 24      | 23,5 | 25    | 25,5 | 26   | 26   | 26   | 26,5 | 26,5 | 27   | 27   | 29,5 |
| 25      | 23,5 | 24,5  | 25   | 25   | 25,5 | 25,5 | 25,5 | 26   | 26   | 26,5 | 29,5 |
| 26      | 23,5 | 24,5  | 24,5 | 25   | 25   | 25,5 | 25,5 | 26   | 26   | 26,5 | 29,5 |

A fim de estimar o tempo médio de evacuação, conforme proposto por DiCiccio & Efron (1996), utilizou-se o método bootstrap, uma técnica de reamostragem que consiste em sortear com reposição dados pertencentes a uma amostra retirada anteriormente, denominada amostra mestre, de modo a formar uma nova amostra através da distribuição *t-student*. Contudo devido à falta de normalidade, neste caso não é indicado o uso do intervalo de confiança Bootstrap *t-student*. Segundo Efron & Tibshirani (1986), se o vício e a assimetria estão presentes de forma muito forte recomenda-se a utilização do método de Bootstrap de correção como o método BCPB e o método BCa. Em ambos os métodos BCPB e BCa no cálculo do intervalo de confiança os extremos do intervalo são os percentis da distribuição Bootstrap ajustados para corrigir o vício e a assimetria desta distribuição. No entanto, o método BCa difere do BCPB pelo fato do BCa possuir uma constante de aceleração “a” que ajusta o intervalo de confiança em relação à assimetria. Assim, os intervalos foram calculados via Bootstrap com viés corrigido e acelerado (BCa). Dessa forma, ainda com base no proposto por DiCiccio & Efron (1996), os intervalos foram calculados através de 1000 amostras via BCa, que não exige normalidade.

A Tabela 12 exibe o tempo médio, o desvio padrão e os limites do intervalo de confiança, em segundos, com nível de confiança de 95%, onde o grifo em negrito representa os tempos médios mais altos e o grifo sublinhado representa o tempo mais baixo. Conforme Tabela 12, pode-se observar quando auditório está com 50% da população atribuída para as simulações, que foi de 100 clientes correspondendo a 127% da população indicada pela norma, as posições das portas 6 e 22 são as que mais dificultam a evacuação do auditório devido ao tempo médio de evacuação serem os mais altos com os tempos 24,4s e 24s, respectivamente. Já a porta na posição 15 mostrou o melhor resultado para a evacuação por possuir o menor tempo entre as demais posições, 20,3s. Com 75% da população atribuída o tempo médio de evacuação é mais baixo na posição 23 com o tempo médio de 22,2s e mais alto nas posições 6 e 22, com valores iguais a 33,1s e 32,5s, respectivamente. É possível constatar também que com 100% da população atribuída, ou seja, com 127% da população indicada, o tempo médio de evacuação do auditório é mais alto nas posições 6 e 22 com os tempos 42,3s e 41,6s, respectivamente, e mais baixo nas posições 1 e 26, ambas as posições com tempo médio de 25,4s.

Tabela 12: Média, desvio padrão e intervalo de confiança dos dados

| 50% da população atribuída |             |               |                 |                 | 75% da população atribuída |               |                 |                 | 100% da população atribuída |               |                 |                 |
|----------------------------|-------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Posição                    | Médias      | Desvio Padrão | Limite Inferior | Limite Superior | Médias                     | Desvio Padrão | Limite Inferior | Limite Superior | Médias                      | Desvio Padrão | Limite Inferior | Limite Superior |
| 1                          | 21,1        | 0,9           | 21,1            | 21,2            | 22,7                       | 1,1           | 22,6            | 22,7            | <u>25,4</u>                 | 0,9           | 25,4            | 25,5            |
| 2                          | 21,1        | 0,8           | 21,1            | 21,2            | 22,6                       | 1,0           | 22,6            | 22,7            | 25,5                        | 0,9           | 25,5            | 25,6            |
| 3                          | 21,1        | 0,9           | 21,1            | 21,2            | 22,7                       | 1,0           | 22,7            | 22,8            | 25,6                        | 0,9           | 25,6            | 25,7            |
| 4                          | 21,1        | 0,8           | 21,1            | 21,2            | 22,7                       | 1,0           | 22,6            | 22,7            | 25,7                        | 0,8           | 25,7            | 25,8            |
| 5                          | 21,0        | 0,8           | 21,0            | 21,1            | 23,1                       | 1,0           | 23,1            | 23,2            | 29,1                        | 1,3           | 29,0            | 29,2            |
| 6                          | <b>24,4</b> | 1,4           | 24,3            | 24,5            | <b>33,1</b>                | 1,5           | 33,0            | 33,2            | <b>42,3</b>                 | 1,6           | 42,2            | 42,4            |
| 7                          | 23,9        | 1,4           | 23,8            | 24,0            | 32,2                       | 1,6           | 32,1            | 32,3            | 41,0                        | 1,7           | 40,9            | 41,1            |
| 8                          | 22,8        | 1,4           | 22,7            | 22,9            | 30,5                       | 1,7           | 30,4            | 30,6            | 38,9                        | 1,8           | 38,8            | 39,0            |
| 9                          | 21,8        | 1,3           | 21,7            | 21,8            | 28,7                       | 1,7           | 28,6            | 28,8            | 36,5                        | 1,8           | 36,4            | 36,6            |
| 10                         | 21,1        | 1,2           | 21,0            | 21,2            | 27,2                       | 1,7           | 27,1            | 27,3            | 34,3                        | 1,9           | 34,2            | 34,4            |
| 11                         | 20,8        | 1,1           | 20,7            | 20,9            | 26,3                       | 1,7           | 26,2            | 26,4            | 32,7                        | 1,9           | 32,6            | 32,8            |
| 12                         | 20,6        | 1,0           | 20,6            | 20,7            | 25,5                       | 1,6           | 25,4            | 25,6            | 31,8                        | 1,8           | 31,7            | 31,9            |
| 13                         | 20,4        | 1,0           | 20,4            | 20,5            | 24,9                       | 1,3           | 24,8            | 24,9            | 30,4                        | 1,6           | 30,3            | 30,5            |
| 14                         | 20,4        | 1,0           | 20,3            | 20,5            | 24,4                       | 1,2           | 24,4            | 24,5            | 29,7                        | 1,2           | 29,6            | 29,8            |
| 15                         | <u>20,3</u> | 0,9           | 20,3            | 20,4            | 24,4                       | 1,2           | 24,4            | 24,5            | 29,7                        | 1,3           | 29,6            | 29,8            |
| 16                         | 20,4        | 1,0           | 20,3            | 20,5            | 24,8                       | 1,3           | 24,7            | 24,9            | 30,6                        | 1,7           | 30,5            | 30,7            |
| 17                         | 20,5        | 1,0           | 20,5            | 20,6            | 25,5                       | 1,6           | 25,4            | 25,6            | 31,8                        | 1,8           | 31,7            | 31,9            |
| 18                         | 20,7        | 1,1           | 20,6            | 20,8            | 26,4                       | 1,7           | 26,3            | 26,5            | 33,1                        | 1,8           | 33,0            | 33,2            |
| 19                         | 20,9        | 1,0           | 20,9            | 21,0            | 27,1                       | 1,7           | 27,0            | 27,2            | 34,5                        | 1,7           | 34,4            | 34,6            |
| 20                         | 21,8        | 1,3           | 21,7            | 21,9            | 28,8                       | 1,7           | 28,7            | 29,0            | 36,9                        | 1,8           | 36,7            | 37,0            |
| 21                         | 22,8        | 1,4           | 22,8            | 22,9            | 30,7                       | 1,6           | 30,6            | 30,8            | 39,2                        | 1,6           | 39,1            | 39,3            |
| 22                         | <b>24,0</b> | 1,4           | 23,9            | 24,1            | <b>32,5</b>                | 1,6           | 32,4            | 32,6            | <b>41,6</b>                 | 1,6           | 41,5            | 41,7            |
| 23                         | 20,8        | 0,7           | 20,7            | 20,8            | <u>22,2</u>                | 0,9           | 22,2            | 22,3            | 26,2                        | 1,3           | 26,1            | 26,3            |
| 24                         | 21,1        | 0,8           | 21,1            | 21,2            | 22,9                       | 0,9           | 22,8            | 22,9            | 26,2                        | 0,8           | 26,2            | 26,3            |
| 25                         | 21,1        | 0,8           | 21,0            | 21,1            | 22,6                       | 1,0           | 22,6            | 22,7            | 25,5                        | 0,9           | 25,5            | 25,6            |
| 26                         | 21,1        | 0,8           | 21,0            | 21,1            | 22,6                       | 1,0           | 22,5            | 22,6            | <u>25,4</u>                 | 0,9           | 25,4            | 25,5            |

## 4.2 Análise de variância

Complementando o estudo anterior foi realizada uma análise de variância a fim de verificar se a posição da porta influencia no tempo de evacuação do auditório. Dessa forma, foi investigado através de uma análise de variância o impacto da posição. Como já foi mencionada a ausência de normalidade, uma alternativa não paramétrica utilizada foi o teste de hipótese não paramétrico Kruskal - Wallis (Kruskal & Wallis, 1965).

O teste Kruskal - Wallis, neste caso, tem como hipótese nula que as posições das portas não influenciam o tempo de evacuação. Porém, como é possível observar na Tabela 13, a hipótese nula foi rejeitada ao nível de significância de 5% para 50%, 75% e 100% da população atribuída para as simulações.

*Tabela 13: Estatística para capacidade*

| População | Estatística | Graus de Liberdade | p-valor   |
|-----------|-------------|--------------------|-----------|
| 50%       | 11030,73    | 25                 | < 2.2e-16 |
| 75%       | 21590,15    | 25                 | < 2.2e-16 |
| 100%      | 23980,69    | 25                 | < 2.2e-16 |

Logo, a posição da porta interfere no tempo de evacuação do auditório em estudo. A Figura 18 mostra o gráfico tipo boxplot para o tempo médio de evacuação com 50% da população atribuída para as simulações e nela se observa a diferença que há no tempo de evacuação do auditório, sendo as posições 6 e 22 as que apresentam maior tempo de evacuação e a 15 com menor tempo.

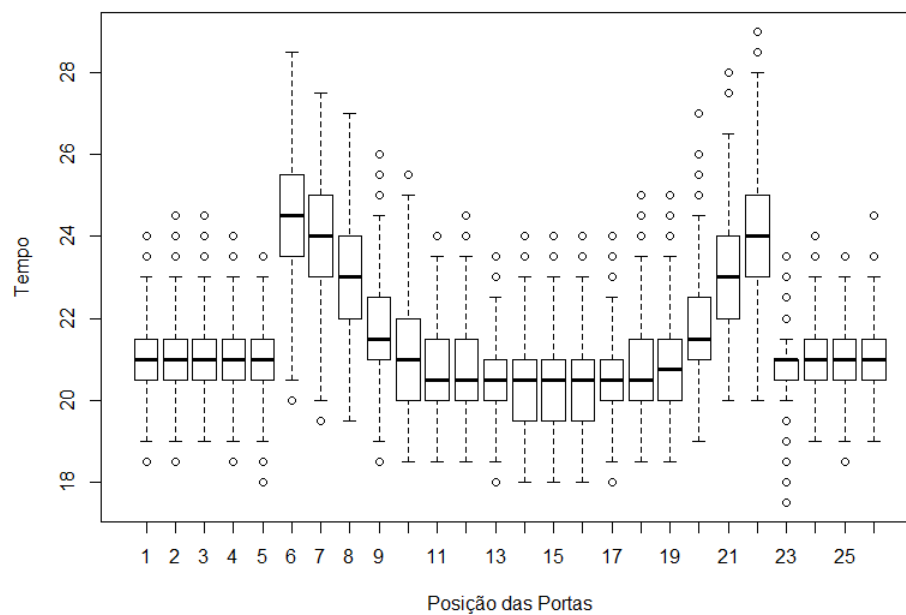


Figura 18: Tempo médio de evacuação com 50% da população atribuída para as simulações

Pela Figura 19 observa-se que a diferença no tempo de evacuação do auditório é muito alta com a capacidade de 75%. As posições 6 e 22 mais uma vez se destacam com maior tempo de evacuação e a 23 com menor tempo.

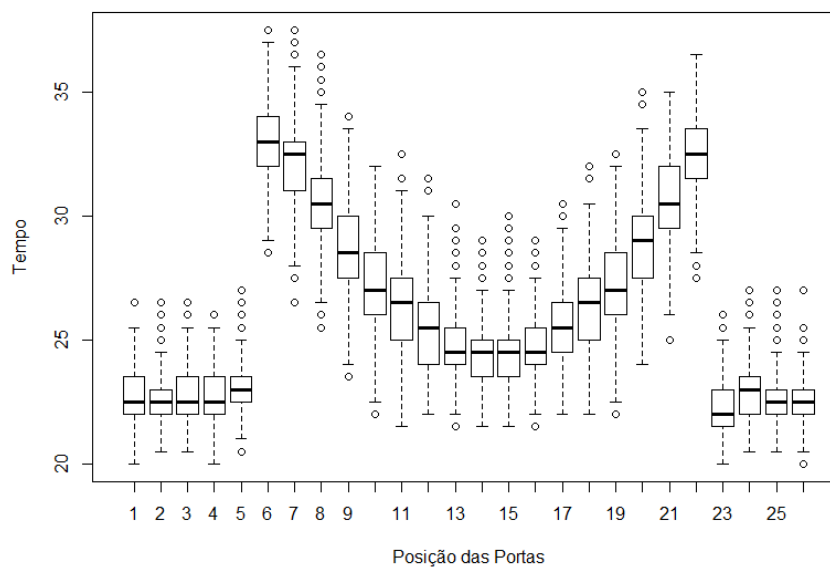


Figura 19: Tempo médio de evacuação com 75% da população atribuída para as simulações

A Figura 20 revela que a diferença no tempo de evacuação do auditório é muito alta com a capacidade de 100%. As posições 6 e 22 mais uma vez se destacam com maior tempo de evacuação, e as posições 1 a 3 e 25 a 26 com menor tempo de evacuação.

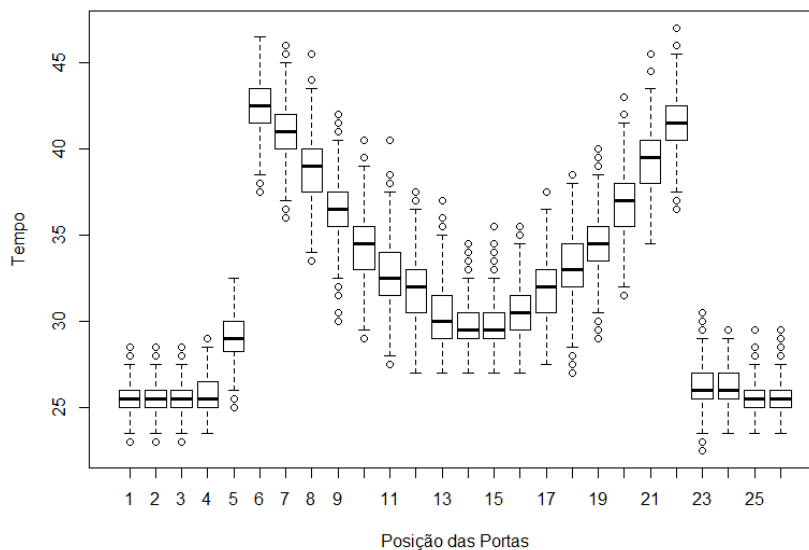


Figura 20: Tempo médio de evacuação com 100% da população atribuída para as simulações

Conforme o exposto, com a análise de variância realizada através do teste de hipótese não paramétrico Kruskal - Wallis observou-se através da Tabela 13, que a hipótese nula foi rejeitada para os três casos ao nível de significância de 5%. Desta forma, conclui-se que a posição da porta interfere no tempo de evacuação.

Ainda por meio da análise de variância, a Figura 18, Figura 19 e Figura 20 expõem o mesmo cenário apresentado por meio do intervalo de confiança, em que se tem as posições 6 e 22 são as que apresentam a maior média para os casos estudados, a porta na posição 15 como a menor média para 50%, a posição 23 para 75% e as posições 1 e 26 para 100% da população estabelecida para as simulações ou 127% da população indicada pela norma. Desta forma, constata-se uma forte influência da posição da porta no tempo médio de evacuação. Além disto, quanto ao menor tempo de evacuação, observa-se que a melhor posição de porta não foi unânime para as três lotações simuladas, evidenciando que não só a posição da saída, mas a lotação também pode influencia o tempo médio de evacuação do auditório.

Além do que já foi discutido e exposto sobre o menor e maior tempo de evacuação para o auditório nas três diferentes lotações simuladas, pode-se ainda estudar a influencia do *layout* interno para redução do tempo médio de evacuação. Conforme já mencionado, o estudo do

*layout* interno não foi foco deste trabalho, no entanto, observa-se nos menores tempos obtidos através de intervalo de confiança e análise de variância, que há uma possível relação entre o *layout* interno e o tempo médio de evacuação. A Tabela 12 expõe, para 50% da população simulada, a posição 15 como a de menor tempo médio, 20,3s. No entanto, observa-se ainda que as posições 13, 14 e 16 apresentaram tempos iguais, 20,4s, e apenas 0,1 segundo maior que o menor tempo obtido. Com isto, nota-se que para 50% da população, os menores tempos médios de evacuação estiveram relacionadas às posições centrais da porta na parte inferior do *layout*.

Para 75% da população simulada, o menor tempo esteve para a porta na posição 23 com 22,2s. Seguindo a mesma análise, observa-se que os valores mais próximos deste, posições 2, 25 e 26, estão para as portas frente aos corredores laterais, entre a parede e as fileiras de cadeiras, conforme exposto na Figura 2. O mesmo acontece para 100% da população simulada, em que os menores tempos estão para as portas frente aos corredores laterais, com as posições 1 e 26 como as de menor tempo médio de evacuação, ambas com 25,4s.

Quanto ao maior tempo médio obtido para as simulações, nota-se que independente da população simulada, a porta nas posições 6 e 22, apresentaram o maior valor. Estes valores não podem ser considerados como coincidência pelo fato da redução do espaço de circulação à medida que a porta é deslocada para trás das fileiras de cadeiras. Esta situação é passível de congestionamento, fenômeno também conhecido por arqueamento, em que as pessoas iriam se aglomerar disputando espaço para entrar no corredor atrás da fileira de cadeiras que só permite a entrada de duas pessoas em cada uma das extremidades, pelo fato das cadeiras estarem a apenas duas células de distância da parede. A entrada neste corredor fará com que as pessoas percam tempo disputando e consecutivamente aumentando o tempo total final de evacuação. Isto acontece para a porta nas posições 6 e 22, que estão centradas nestas áreas de conflito, explicando assim, o porquê do maior tempo para as tais.

Conforme o exposto, os resultados obtidos por este estudo, evidenciam que o posicionamento da porta influencia o tempo total final de evacuação. Observa-se ainda que a lotação e o arranjo físico da planta podem afetar o tempo de saída dos ocupantes. Tais considerações destacam a importância de estudar o comportamento de pedestres e normas de segurança, para as edificações, que possam evitar ou minimizar os efeitos causados por tumultos em grandes multidões.

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho, verificou-se um modelo de simulação de multidões capaz de se adaptar a diferentes cenários e simular a saída de pedestres por meio de interações que se assemelham ao comportamento de multidões. O modelo recebe como entrada as especificações do ambiente e a quantidade de pessoas a serem simuladas e estima o tempo médio de evacuação de todos os ocupantes. Para aplicação do modelo, optou-se por um auditório que conta com uma área de 135m<sup>2</sup> adaptado com duas portas que servem tanto para o acesso quanto para a saída. Este dispõe de 93 assentos dispostos conforme Figura 2 que expõe o *layout* atual do ambiente.

No que se refere às adaptações do auditório à NBR 9077, para efetuar a simulação, o *layout* do ambiente sofreu modificações tanto na quantidade quanto na largura da porta. A condição atual com duas portas medindo 1,00 m cada poderia ser de apenas uma com largura mínima de 1,10 m conforme o proposto pela norma. No entanto, devido à estrutura do campo de piso que possui células de 0,4 x 0,4 m, foram atribuídas 3 células para especificação da porta, resultando assim em uma única porta de medida 1,20 m.

Logo, a arguição central voltou-se para qual seria a melhor posição em que esta porta poderia ficar, de modo a minimizar o tempo total de saídas dos ocupantes. Para isto, permutou-se a posição da porta por toda a região possível de sua alocação, e por meio de simulações, obtiveram-se médias para os tempos de evacuação para cada uma das posições, de modo a permitir uma análise estatística dos resultados, bem como identificar qual posição indicaria um melhor resultado (menor tempo de evacuação).

Paralelo a isto, optou-se também por aplicar populações diferentes para cada cenário, na intenção de verificar a existência de influência da lotação no tempo médio de evacuação para cada um dos cenários descritos pela posição da porta. Sendo assim, foram realizadas 1000 simulações via Monte Carlo permutando-se as posições das portas para cada caso independente, com 50%, 75% e 100% da população estabelecida para este estudo, que foi de 100 pessoas ou 127% da população indicada pela norma que sugere 79 pessoas como quantidade ideal para o cenário em estudo.

Desta forma, de posse dos dados, duas abordagens foram utilizadas para análise da média, a primeira através de intervalo de confiança e a segunda através de uma análise de variância (ANOVA). Na análise por meio do intervalo de confiança, a suposição inicial era se a média do tempo de evacuação seguia distribuição normal. No entanto, o comportamento dos quantis da simulação para a porta na posição 1, evidenciou que a distribuição do tempo médio não segue distribuição normal, e tendo em vista que esse comportamento se repetiu para as

demais posições, não se pôde assumir normalidade na construção do intervalo de confiança para a média. Contudo, a partir destes dados, os mesmos foram calculados via bootstrap com viés corrigido e acelerado (BCa) e foram geradas populações de médias para cada um dos casos, de modo a possibilitar uma análise mais acurada e representativa da população real.

Já para a análise de variância, a abordagem fundamental era se as posições das portas influenciam no tempo de evacuação. Para isto, foi investigado o impacto da posição de modo que, depois de constatada a ausência de normalidade, a alternativa não paramétrica utilizada foi o teste de hipótese Kruskal-Wallis, que teve a hipótese nula rejeitada para os três casos estudados ao nível de significância de 5%, conforme Tabela 13. Desta forma, conclui-se que a posição da porta interfere no tempo de evacuação e, conforme visto, as lotações de 75% e 100% da população atribuída para as simulações apontaram as posições frente aos corredores laterais como melhores localizações de porta.

## 5.1 Limitações do trabalho

Ao decorrer do desenvolvimento deste trabalho, encontraram-se algumas limitações, em sua maioria, na adequação do modelo às condições reais, tanto na construção da malha, quanto na representação dos pedestres. Como o campo de piso foi criado com células homogêneas de 0,4 x 0,4 m, algumas medidas do *layout* tiveram que ser arredondadas para valores múltiplos desta unidade. Outra limitação esteve em representar as diferentes funções fisiológicas dos pedestres, atribuindo-se para este estudo, uma população homogênea. No que diz respeito ao comportamento de pedestres, para um caso real, as pessoas tendem a se empurrar, pular obstáculos, cair, voltar ao cenário de risco, entre outros comportamentos que são de difícil representação em uma simulação.

## 5.2 Sugestões de trabalhos futuros

O presente estudo desperta possibilidades para diversas pesquisas. Uma vez observadas as suas limitações, poder-se-ia desenvolver um modelo capaz de simular pedestres sem a homogeneidade de velocidades e dimensões de células, bem como adicionar ao modelo agentes com diferentes comportamentos, com intenção de aproximar ao máximo a simulação às condições reais de uma evacuação de emergência. Uma das possíveis soluções para estas necessidades seria a utilização de agentes inteligentes para a simulação de evacuação de multidões.

Conforme Zhang *et al.* (2009), modelagem baseada em agentes é uma poderosa técnica de simulação que tem vantagens sobre as técnicas de simulações numéricas tradicionais baseadas em modelos matemáticos ou estocásticos, tanto pelo poder de avaliar visualmente o comportamento do agente na simulação, quanto a capacidade de rastrear dinamicamente como a estrutura global surge como um resultado de interações individuais dos agentes. O autor ressalta ainda a importância da simulação multiagentes por poder ser usada para testar hipóteses, construir teorias e integrar várias teorias de várias disciplinas.

É possível encontrar na literatura atual, vários estudos envolvendo modelos baseados em agentes para a simulação de evacuação de multidões. Conforme Wagner & Agrawal (2014), esses estudos caem em uma das três categorias: evacuação de multidões em edifícios, evacuação de multidões para vias urbanas e estudos voltados ao comportamento da multidão durante a evacuação. Relacionado à primeira categoria, evacuação de multidão em edifícios, Wagner & Agrawal (2014) apresenta um protótipo de simulação de computador que utiliza modelagem baseada em agentes para simular evacuação de multidão em cenários com incêndios, em que o sistema utiliza uma abordagem de modelagem baseada em agentes em que agentes autônomos individuais interagem uns com os outros e com o meio ambiente. Logo, poder-se-ia utilizar simulação multiagentes para desenvolver estudos de *layout* interno de edificações de modo que os fatores fisiológicos dos pedestres sejam levados em consideração, e que a análise do menor deslocamento e, conseqüentemente, do menor tempo de saída seja o mais próximo possível de uma situação real.

## REFERÊNCIAS

- ASSANO, M; IRYO, T; KUWAHARA, M. Microscopic pedestrian simulation model combined with a tactical model for route choice behavior. *Transportation Research Part C*, vol. 18, n. 6, pp. 842 – 855, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Saídas de Emergência em Edifícios** (NBR 9077), Rio de Janeiro, 2001.
- BICHO, A. L. *Da modelagem de plantas à dinâmica de multidões: um modelo de animação comportamental bio-inspirado*. São Paulo, 2009, 122 p. (Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, SP).
- CARNEIRO, L. O. *Simulação de Evacuação de Multidão por Autômato Celular Estudo de Caso em um Estádio de Futebol*. Fortaleza, 2012, 73 p. (Mestrado – Universidade Federal do Ceará).
- CASTRO, M. P; FIGUEIREDO, M. C; ABREU, S; SOUSA, H; MACHADO, L; SANTOS, R; VILAS-BOAS, J. P. The influence of gait cadence on the ground reaction forces and plantar pressures during load carriage of Young adults. *Applied ergonomics*, n. 49, p. 41 – 46, 2015.
- CIRILLO, E. N. M.; MUNTEAN, A. Dynamics of pedestrians in regions with no visibility – a lattice model without exclusion. *Physica A*, vol. 392, n.17, pp. 3578–3588, 2013.
- CORNEIL, D. G.; KÖHLER, E.; LANLIGNEL, J-M. On end-vertices of Lexicographic Breadth First Searches. *Discrete Applied Mathematics*, vol. 158, n. 5, pp. 434 – 443, 2010.
- DICICCIO, T. J; EFRON, B. Bootstrap confidence intervals. *Statistical Science*, vol. 11, n. 3, pp. 189 – 228, 1996.
- EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy. *Statistical Science*. vol. 1, n.1, pp. 55 – 77, 1986.
- FERREIRA, M. C. C. dos S. **Modelos de Regressão: uma aplicação em Medicina Dentária**. Dissertação (Mestrado em Estatística, Matemática e Computação), Universidade Aberta, Lisboa, 2013. Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Teresa Paula Costa Azinheira Oliveira.
- FU, Z.; YANG, L.; CHEN, Y.; ZHU, K.; ZHU, S. The effect of individual tendency on crowd evacuation efficiency under inhomogeneous exit attraction using a static field modified FFCA model. *Physica A*, vol. 392, n.23, pp. 6090 – 6099, 2013.
- FU, Z.; ZHOU, X.; ZHU, K.; CHEN, Y.; ZHUANG, Y.; HU, Y.; YANG, L.; CHEN, C.; LI, J. A floor field cellular automaton for crowd evacuation considering different walking abilities. *Physica A*, vol. 420, pp. 294 – 303, 2015.
- GONZALES, J. U; KUMAR, P; SHPHARD, J; MEANS, A. Peak stepping cadence is associated with leg vascular compliance in young adults. *Journal of Science and Medicine in Sport*, v. 17, n. 6, p. 683 – 687, 2014.
- GUSTAFSSON, L. & STERNAD, M. Bringing consistency to simulation of population models – Poisson Simulation as a bridge between micro and macro simulation. *Mathematical Biosciences*, vol. 209, n. 2, pp. 361 – 385, 2007.

- GWIZDALLA, T. M. Some properties of the floor field cellular automata evacuation model. *Physica A*, vol. 419, pp. 718 – 728, 2015.
- HUO, F.; SONG, W.; LV, W.; LIEW, K. M. Analyzing pedestrian merging flow on a floor-stair interface using an extended lattice gas model. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, vol. 90, n. 5, pp 501 – 510, 2014.
- KOCHI, I.; Donovan, G.; Champ, P.; Loomis, J. The economic cost of adverse health effects from wildfire smoke exposure: a review. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 19, pp. 803–817, 2010.
- KOO, J.; KIM, B.; KIM, Y.S. Estimating the effects of mental disorientation and physical fatigue in a semi-panic evacuation. *Expert Systems With Applications*, vol. 41, n. 5, pp. 2379 – 2390, 2014.
- KRUSKAL, W. H. WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 47, n. 260, pp. 583 – 621, 1952.
- KUANG, H.; LI, X.; SONG, T.; DAI, S. Analysis of pedestrian dynamics in counter flow via an extended lattice gas model. *Physical review e*. Vol. 78, 066.117, 2008.
- KULAKOWSKI, K.; WAS, J.; TOPA, P. Simulation environment for modeling pedestrian dynamics. *Intelligent Information Systems*, pp. 243 – 252, 2010.
- LAGARIAS, A. Urban sprawl simulation linking macro-scale processes to micro-dynamics through cellular automata, an application in Thessaloniki, Greece. *Applied Geography*, vol. 34, pp. 146 – 160, 2012.
- MIGUEL, P. A. C. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. 2ª Ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2011.
- OLIVEIRA, M. H. F. *A avaliação econômico-financeira de investimentos sob condição de incerteza: uma comparação entre o método de Monte Carlo e o VPL fuzzy*. São Carlos, 2008, 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Orientador: Profª. Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto.
- PEREIRA, L. A.; DUCZMAL, L. H.; CRUZ, F. R. B. Simulação de Evacuação Emergencial Via Autômatos Celulares: Uma Proposta de Modificação do Modelo de Schadschneider. In: *Anais do XXXII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, Cuiabá, 2009.
- PEREIRA, L. A.; Efeito da Lotação e da Localização de Saídas no Tempo de Evacuação Emergencial de um Auditório: Simulação via Autômatos Celulares. In: *Anais do XXXIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*, Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São Paulo, 2010.
- PEREZ, G. J.; TAPANG, G.; LIM, M.; SALOMA, C. Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians. *Physica A*, [S.l.], v.312, n.3–4, p. 609 – 918, 2002.
- QU, Y.; GAO, Z.; XIAO, Y.; LI, X. Modeling the pedestrian’s movement and simulating evacuation dynamics on stairs. *Safety Science*, vol.70, pp. 189 – 201, 2014.

SAGUN, A.; BOUCHLAGHEM, D.; ANUMBA, C. J. Computer simulations vs. building guidance to enhance evacuation performance of buildings during emergency events. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 19, n. 3, pp. 1007 – 1019, 2011.

SANTOS, C. de O. *O efeito da segurança e do estudo de layout na simulação de evacuação de multidão: estudo de caso em casa noturna*. TCC (Graduação em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Orientador: Prof. Márcio das Chagas Moura, D.Sc.

SERGIO, D’ELIA; SALVATORE, DE M.; DOMENICO, W. E. M. A methodology for the sizing and positioning of emergency exits in tunnels. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, vol. 20, pp. 41 – 48, 2011.

SHIWAKOTI, N.; SARVI, M. Understanding pedestrian crowd panic: a review on model organisms approach. *Journal of Transport Geography*, vol. 26, pp. 12 – 17, 2013.

SILVA, T. C. da; GRAMANI, L.; KAVISKI, E.; BALBO, F.; FERREIRA, M. Análise do tempo de evacuação total de um cinema por meio da aplicação de simulações computacionais. *Revista Ingeniería Industrial*, vol. 11, n. 1, pp. 5 – 16, 2012.

SILVA, T. C. da. **Simulações computacionais aplicadas ao processo de evacuação de ambientes**: uma análise comparativa de variantes geométricas via autômatos celulares bidimensionais. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Liliana Madalena Gramani.

SONG, Y.; GONG, J.; LI, Y.; CUI, T.; FANG, L.; CAO, W. Crowd evacuation simulation for bioterrorism in micro-spatial environments based on virtual geographic environments. *Safety Science*, vol. 53, pp. 105 – 113, 2013.

SORIA, S.A.; JOSENS, R.; PARISI, D.R. Experimental evidence of the “Faster is Slower” effect in the evacuation of ants. *Safety Science*, vol. 50, n. 7, pp. 1584 – 1588, 2012.

TUDOR-LOCKE, C; CAMHI, S. M; LEONARDI, C; JOHNSON, W. D; KATZMARZYK, P. T; EARNEST, C. P; CHURCH, T. S. Patterns of adult stepping cadence in the 2005 – 2006 nhanes. *Preventive Medicine*, v. 53, n. 3, p. 178 – 181, 2011.

TOYAMA, Marcelo Costa. **Uma abordagem Multiagentes para Dinâmica de Pedestres**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) -- Programa de Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Lúcia Cetertich Bazzan.

THOMPSON, P. A.; MARCHANT, E. W., Computer and fluid modeling of evacuation. *Safety Science*, v. 18, n. 4, p. 277 – 289, 1995.

USHER, J. M.; STRAWDERMAN, L. Simulating operational behaviors of pedestrian navigation. *Computers & Industrial Engineering*, vol.59, n. 4, pp. 736 – 747, 2010.

VALENTIN, M. V.; ONO, R. Saídas de Emergência e Comportamento Humano: Uma Abordagem Histórica e o Estado Atual da Arte no Brasil. In: *6º Seminário Internacional – NUTAU’2006 – Inovação Tecnologia e Sustentabilidade*, São Paulo, 2006.

- VARAS, A.; CORNEJO, M. D.; MAINEMER, D.; TOLEDO, B.; ROGAN, J.; MUÑOZ, V.; VALDIVIA, J. A. Cellular automation model for evacuation process with obstacles. *Physica A*, vol. 382, n. 2, pp. 631–642, 2007.
- WAGNER, N.; AGRAWAL, V. An agent-based simulation system for concert venue crowd evacuation modeling in the presence of a fire disaster. *Expert Systems With Applications*, vol. 41, n. 6, pp. 2807 – 2815, 2014.
- WANG, L.; ZHANG, Q.; CAI, Y.; ZHANG, J. ; MA, Q. Simulation study of pedestrian flow in a station hall during the Spring Festival travel rush. *Physica A*, vol. 392, n. 10, pp. 2470–2478, 2013.
- WEIFENG, Y.; HAI, T. K. A model for simulation of crowd behaviour in the evacuation from a smoke-filled compartment. *Physica A*, vol. 390, n. 23-24, pp. 4210–4218, 2011.
- XIAOPING, Z.; TINGKUAN, Z.; MENGTING, L. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*, vol. 44, n.3, pp. 437–445, 2009.
- ZHANG, Q.; GUOMIN, Z.; JINLAN, L. Performance-Based Design for Large Crowd Venue Control Using-Agent Model. *Tsinghua Science & Technology*, vol. 14, n. 3, pp. 352 – 359, 2009.
- ZHENG, X.; CHENG, Y. Conflict game in evacuation process: A study combining Cellular Automata model. *Physica A*, vol. 390, n. 6, pp. 1042-1050, 2011.
- ZHAO, D.; YANG, L.; LI, J. Occupants' behavior of going with the crowd based on cellular automata occupant evacuation model. *Physica A*, vol.387, n. 14, pp. 3708 – 3718, 2008.