

## Capítulo

# 1

## Simulação de Multidões - Aplicações em Segurança e Conforto de Pessoas

Soraia Raupp Musse e Vinicius Cassol

### *Abstract*

*Crowd Simulation is nowadays an important area in applications such as entertainment and security. In particular in security, evacuation planning is an important and difficult task in building design. In this work we present some topics about general crowd simulation aspects and focus specifically on evacuation systems. We present some tools to simulate crowds and also discuss the crowd analysis aspects.*

### *Resumo*

*Simulação de multidões é hoje em dia uma área importante em aplicações como entretenimento e segurança. Particularmente, em segurança, o planejamento de evacuação de ambientes públicos é uma tarefa importante e difícil no projeto de construção de um novo empreendimento. Neste trabalho apresenta-se alguns tópicos importantes sobre a área de pesquisa em simulação de multidões e foca-se especificamente em sistemas de evacuação de ambientes. São abordadas algumas ferramentas para simular multidões e também discutidos aspectos relacionados à análise do comportamento de uma multidão.*

## 1.1. Introdução

Entusiastas de diferentes áreas observaram o comportamento das pessoas por muitos anos, décadas ou mesmo séculos. Tal observação pôde produzir dados valiosos para serem considerados como objeto de estudo em diferentes campos, da engenharia à psicologia, por exemplo.

A compreensão do comportamento das pessoas é um enorme campo de pesquisa na área de psicologia desde séculos atrás. No início do século XX, Freud já desenvolveu estudos que envolvem a observação do comportamento das pessoas por décadas [1]. Apoiado por estudos de LeBon [2] e McDougall [3], Freud discorre sobre o comportamento dos seres humanos quando fazem parte de um grupo e define a multidão como uma entidade temporária, constituída por elementos heterogêneos que se uniram por um momento específico.

Muitos outros aspectos foram observados no mesmo campo em séculos passados. Um deles é muito importante mencionar e foi observado primeiramente por LeBon [2] que diz que quando parte de uma multidão, os indivíduos podem executar comportamentos incomuns; comportamentos que o indivíduo não realizaria sozinho. Neste tipo de situação os indivíduos podem agir de forma coletiva e um pensamento de multidão surge como uma nova entidade. Esta nova entidade pode fazer com que as pessoas se sintam, pensem e ajam de diferentes maneiras, podendo também realizar comportamentos perigosos que podem ser responsáveis por momentos fatais. Além disso, o indivíduo pode ter seu julgamento afetado. De acordo com o autor, os indivíduos da multidão geralmente podem descartar seus próprios valores e também suas inibições e apresentar comportamentos que não seriam realizados se estivessem sozinhos. Esse comportamento incomum pode desenvolver sentimentos de emoções diferentes nas pessoas. Esses sentimentos, por exemplo ansiedade, nervosismo ou pânico, tornam o indivíduo mais emotivo e às vezes irracional. Da mesma forma, Sighele [4] destaca situações em que as pessoas perdem a razão quando estão em multidões e agem contra diferentes alvos, incluindo o próprio Estado. Ambos os autores discutem o poder de uma multidão, que é capaz de construir uma força incontrolável e imprevisível.

Comportamentos coletivos emergentes, muitas vezes imprevisíveis, podem ocorrer quando as pessoas são parte de uma multidão, e podem compartilhar idéias, sentimentos e ter o mesmo objetivo ou um objetivo semelhante. Além disso, estudos científicos recentes consideram as multidões como uma entidade capaz de pensar [5]. Sighele [4] considera a multidão como uma estrutura *heterogênea e inorgânica*. Ele considera *heterogênea* porque, geralmente, uma multidão é composta por indivíduos de todas as idades, gêneros e diferentes realidades sociais e culturais. Além disso, uma multidão é considerada *inorgânica* por sua capacidade de emergir de uma maneira repentina, sem um controle formal ou organização.

Sabe-se que alguns lugares podem ser propícios à formação de multidões. Esses locais podem incluir, não exclusivamente, aeroportos e áreas públicas, por exemplo. Conhecendo a existência de lugares propícios à formação de multidões, governos, gestores, pesquisadores, designers e outros profissionais estão interessados no desenvolvimento de diferentes tecnologias para melhorar a evolução desses locais, de forma mais inteligente e, principalmente, mais segura.

A área de *Crowd Simulation* pode ser relacionada com entretenimento (jogos e filmes) e indústrias de segurança. Pensando em entretenimento, pode-se facilmente aplicar a simulação de multidões para povoar cenas de um jogo ou filme com multidões maiores, mais realistas e dinâmicas. Por outro lado, na engenharia de segurança, observa-se alguns problemas abertos de pesquisa, principalmente no que tange à simulação de emergência e às rotas de evacuação. A possibilidade de avaliar a segurança das rotas/refúgios das populações em situações de emergência é certamente relevante no planejamento de eventos que possam conter aglomerações de pessoas (por exemplo Jogos Olímpicos em estádios, estações de trem, etc.). Essa compreensão permite aos engenheiros projetar melhores lugares e também descobrir a melhor maneira de orientar as pessoas ao escolher uma rota de evacuação.

Diferentes abordagens têm sido propostas na literatura motivando o desenvolvimento de diferentes modelos científicos ao longo das últimas décadas. Tais abordagens dizem respeito a simular computacionalmente o comportamento de movimento de pessoas, grupos e até mesmo multidões. Elas foram projetadas com base em diferentes objetivos e níveis de complexidade. O primeiro modelo conhecido é um sistema baseado em regras locais capaz de simular o comportamento de rebanhos e cardumes. Hoje em dia, técnicas complexas têm sido propostas que vão desde *navigation fields* [6] a variados algoritmos de *steering behaviors* [7, 8], aplicados quando se simulam multidões para obter resultados coerentes com a realidade.

Conforme observado por Thalmann e Musse [9], o movimento agregado é belo e complexo de se contemplar. Belo devido à sincronização, homogeneidade e unidade descritas neste tipo de movimento, e complexo porque há muitos parâmetros a serem manejados para fornecer essas características. Existem muitas características que têm sido utilizadas na literatura científica. De acordo com Fruin [10], o comportamento da multidão é afetado pela percepção espacial de cada indivíduo considerando seu próprio conhecimento e inteligência. Ao conhecer o ambiente, o indivíduo pode tomar uma decisão baseada também em padrões sociais e culturais. Quando uma pessoa específica decide se mudar, ela também afetará o quanto as pessoas próximas podem permanecer umas com as outras e influenciar o espaço pessoal dos outros. De acordo com o antropólogo americano Edward Hall, cada pessoa tem um espaço pessoal ao redor do corpo [11]. Hall denomina esse espaço como *proxemics* e seu tamanho pode ser variável com base no tipo de interação e relacionamento das pessoas envolvidas.

Além dessas características, a distância e o tipo de relacionamento entre pessoas e multidões também podem ser afetados pelas características individuais. A individualidade pode ser representada por muitos fatores como sexo, idade de cada indivíduo e seu estado físico. Um aspecto importante nos comportamentos de multidões é como tais fatores de heterogeneidade podem influenciar a evolução/simulação de multidões.

Um tipo específico de literatura de multidões é focado em processos de evacuação em situações de emergência. Ao simular multidões, um conjunto de parâmetros pode ser considerado para reproduzir comportamentos coerentes. Tais parâmetros visam representar:

- *Estrutura física do ambiente*: devem fornecer informações sobre as características

do edifício como dimensões, número de pisos, número de peças, número e localização das saídas, localização das escadas e etc;

- *Contexto/Funcionalidade do local*: as pessoas podem agir de maneiras diferentes de acordo com a funcionalidade do local, por exemplo escritórios, hospitais, escolas, aeroportos, estádios e arenas;
- *Dados populacionais*: número de pessoas no ambiente, idade, sexo, relação entre elas, conhecimento que a população tem sobre o meio ambiente; e
- *Condição do ambiente durante o evento*: Muitos fatores podem ocorrer em um ambiente específico que afeta suas condições. Tais fatores podem incluir a hora do dia (dia ou noite), fumaça, fogo, calor e etc.

Os fatores anteriormente apresentados são apenas um pequeno conjunto de aspectos que podem impactar em um processo de evacuação. A variedade de comportamentos de pessoas torna complexa e desafiadora a reprodução e a simulação virtual de um processo de evacuação.

Em alguns países, os departamentos de segurança costumam especificar a necessidade das empresas desenvolverem uma política de segurança para lidar com situações de emergência [12]. Entre as exigências, tais políticas devem incluir procedimentos de fuga de emergência e atribuições de rota, tais como planos de fuga, mapas de locais de trabalho e áreas seguras ou de refúgio. Estes fatores são importantes, pois uma evacuação desorganizada pode resultar em confusão, ferimentos e danos à propriedade. Em qualquer cenário de emergência, a determinação de um plano de evacuação ótimo ou quase ideal é atualmente um problema aberto. Esta questão está relacionada com a identificação das melhores rotas (em diferentes aspectos, como: conforto, tempo percorrido, tempo total, etc) para uma população específica ao sair de um edifício. Nesse contexto, acredita-se que o emprego de simulação de multidões é uma ferramenta poderosa para determinar diferentes maneiras de um grupo específico de pessoas deixar um certo ambiente.

Este capítulo tem por objetivo discutir questões de simulação de multidões, tanto sob a perspectiva de comportamentos humanos, como de simulação computacional. A organização é assim definida: na Seção 1.2 são apresentados alguns conceitos e classificações de multidões, utilizadas na literatura. Na Seção 1.3 discute-se conceitos relevantes na movimentação de multidões, enquanto na Seção 1.4 considera-se especificamente os casos de evacuação e emergência. Ainda, a Seção 1.5 descreve alguns detalhes sobre os regulamentos nesta área. As Seções 1.6, 1.7 e 1.8 descrevem o estado-da-arte em simulação de multidões, exemplos de tecnologias usadas para este fim e apresentam o CrowdSim, desenvolvido pelos autores, respectivamente. Finalmente, as Seções 1.9 e 1.10 apresentam estudos de caso onde o CrowdSim foi aplicado e considerações finais deste capítulo.

## **1.2. Conceitos e Classificações**

Esta seção apresenta os principais conceitos relacionados à simulação de multidões. Em primeiro lugar, é interessante definir alguns aspectos relacionados com as multidões. Sabemos, como definido anteriormente, que a multidão representa um grande grupo de in-

divíduos no mesmo ambiente. Apesar disso, sua formação pode ocorrer de forma voluntária ou não-voluntária, tanto em situações diárias como em casos específicos (pânico ou emergência). Este é um conceito simples, mas muito importante; por exemplo, as pessoas voluntariamente aceitam ser parte de uma multidão formada pelo público de um festival de música. Por outro lado, uma multidão emerge durante o processo de evacuação necessário em eventos de emergência, como acidentes ou incêndios.

A fim de identificar um grande grupo de pessoas como uma multidão, alguns critérios devem ser observados. Challenger [13] destaca alguns deles:

- *Tamanho*: deve haver uma reunião mensurável de pessoas;
- *Densidade*: os membros da multidão devem ser co-localizados em uma área particular, com uma distribuição de densidade suficiente (não pequena);
- *Tempo*: Indivíduos normalmente devem se reunir em um local específico para uma finalidade específica durante uma certa quantidade de tempo (que não pode ser instantânea);
- *Coletividade*: os membros da multidão devem compartilhar uma identidade social, objetivos e interesses comuns e agir de maneira coerente;
- *Coerência de comportamento*: os indivíduos devem ser capazes de agir de uma maneira socialmente coerente, apesar de se reunirem em uma situação ambígua ou desconhecida.

Como pode ser observado, não existem densidades, tamanho, tempo especificados. Nem mesmo a coerência de comportamentos é especificada em detalhes, pois no que tange às multidões, os aspectos podem ser variados. Além desta falta de definições, diferentes eventos e circunstâncias podem ser o palco para a formação de multidões. Alguns poucos pesquisadores têm trabalhado para categorizar os diferentes tipos de multidões. Não há um conceito de multidão típica, mas uma variedade de tipos de multidão já foram observados, cada um com suas próprias características e comportamentos. Berlonghi [14], em 1995, identificou cinco tipos diferentes de multidões.

- *Espectador*: Uma multidão que assiste a um evento;
- *Demonstrador*: Uma multidão, muitas vezes com um líder reconhecido, organizada por um motivo ou evento específico;
- *Densa*: Uma multidão densa (pessoas/ $m^2$ ) em que o movimento de pessoas diminui rapidamente e às vezes pode parar. Devido à alta densidade de multidões, as pessoas podem ser arrastadas e comprimidas, resultando em lesões graves e mortes por sufocamento;
- *Violenta*: Uma multidão atacando, aterrorizando ou provocando, sem consideração pela lei ou pelos direitos de outras pessoas;

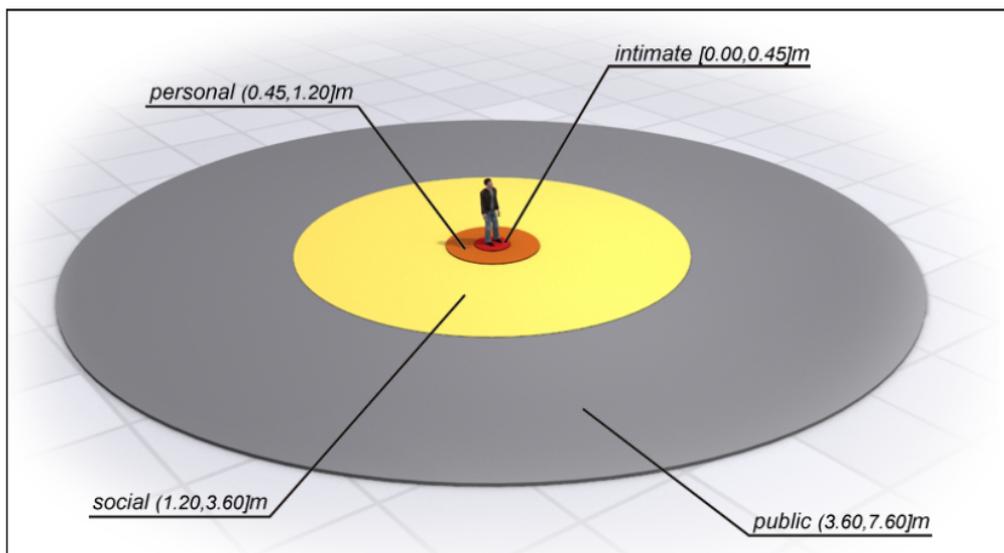
- *Escape*: Uma multidão que tenta escapar do perigo real ou percebido ou de situações que ameaçam a vida, incluindo pessoas envolvidas em evacuações organizadas, ou empurrões por parte de uma multidão em pânico .

Uma vez que são conhecidos os atributos que podem ser observados para caracterizar e também para entender diferentes tipos de multidões, a próxima seção detalha aspectos relativos à dinâmica de multidões. O objetivo é estudar conceitos de multidões, a fim de compreender principalmente como eles são susceptíveis de se mover e se comportar.

### 1.3. Dinâmica de Multidões

A observação da evolução da multidão em um lugar específico nos permite observar diferentes aspectos. Entre eles, é interessante destacar o fato de que uma multidão é composta por indivíduos independentes e cada um tem suas próprias necessidades e desejos, mas todos eles compartilham o mesmo objetivo. Esse sentimento é ressaltado por Osório [15], um psicólogo que define um grupo de pessoas como um sistema humano composto pelo conjunto de pessoas capazes de se conhecerem na própria singularidade. Além disso, essas pessoas estão compartilhando objetivos e realizando uma ação coletiva.

Sabemos que uma multidão é uma congregação de pessoas no mesmo ambiente, apesar de que é importante ter em mente que cada membro individual de uma multidão é dono de seu próprio espaço pessoal no ambiente. O antropólogo americano Edward Hall, baseado na idéia do espaço pessoal, apresentou em 1966 o conceito de *proxemics* [11] para representar o espaço pessoal de cada pessoa. O autor também explica que a distância entre as pessoas, quando interagindo umas com as outras, varia de acordo com seus níveis de intimidade. Estes níveis são divididos em quatro faixas possíveis (ver Fig. 1.1): *íntimo*  $[0.00, 0.45]m$ , *pessoal*  $(0.45, 1.20]m$ , *social*  $(1.20, 3.60]m$  e *público*  $(3.60, 7.60]m$ .



**Figura 1.1.** Ilustração do *proxemics* de um pessoa baseada nas definições de distâncias de Hall [11]: íntimo, pessoal, social e público.

Still e seus colaboradores [16] estudaram o comportamento das pessoas ao longo

das últimas décadas. Durante seu Ph.D., ele desenvolveu um conjunto de programas de computador para estudar, e também reproduzir, o comportamento de uma multidão. Seu framework chamado *Legion* foi desenvolvido com base em regras para determinar as funções para o fluxo de tráfego humano. Essas regras interagem à medida que os personagens se aproximam do espaço de cada um dos outros associados aos objetos estáticos e dinâmicos do ambiente. Apesar dos resultados da simulação, a pesquisa de Still também apontou comportamentos importantes que podem surgir de multidões reais e também foram observados por outros autores, bem como reconhecidos por instituições internacionais. A seguir resume-se alguns desses comportamentos, que são interessantes para serem reproduzidos quando se trabalha com simulação de multidões:

- *Formação de arcos (Arch formation)*: Acontece quando uma multidão grande e densa empurra para a frente em direção a uma saída estreita. Em situações como esta, obstrução e arqueamento são observados; *i.e.* a saída torna-se obstruída e a multidão forma um arco na frente da saída;
- *Formação de vias (Lanes formation)*: Quando as pessoas se movem na mesma direção ou em direções opostas, elas podem se auto-organizar para criar pistas distintas: uma para cada direção de movimento ou levando em consideração as diferentes velocidades. Este fenômeno de auto-organização ajuda a reduzir as colisões e aumentar a velocidade de movimento. No entanto, em multidões de alta densidade ou nervosas, quaisquer pistas formadas podem quebrar devido a manobras de ultrapassagem contínuas;
- *Efeito dos cantos (Corner effect)*: Quando os membros da multidão localizam-se nos cantos, eles tendem a desacelerar, tornando estes ambientes mais densos, e por consequência perigosos;
- *Efeito do anel (Ring effect)*: Este fenômeno emerge quando uma multidão está observando um evento particular em torno de um ponto particular do interesse, tal como um artista da rua. Em casos como este, uma estrutura de anel emerge, irradiando para fora do ponto de interesse;
- *Efeito de redução de velocidade (Speed reduction)*: esse efeito surge quando um ambiente específico já encontra-se bastante denso e ainda chegam mais pessoas. Neste caso, a velocidade pode ser diminuída, até a ausência de movimento; e
- *Princípio do Menor Esforço (Principle of Least Effort)*: Quando possível, os membros da multidão tentarão adotar o caminho mais rápido. O objetivo é minimizar o tempo, evitar o congestionamento e maximizar suas velocidades.

#### **1.4. Multidões em Situações de Emergência**

Como muito bem observado por Lebon [2], quando em multidões, as pessoas podem realizar um comportamento incomum que pode ser responsável por ações irracionais. Na verdade, pode-se dizer que tais ações podem até ser aumentadas em casos de pânico. É fácil olhar para a história, a fim de apontar alguns fatos importantes que exigiram das

peças comportamentos de evacuação. Por exemplo: Bombardeamento atômico do Japão durante a Segunda Guerra Mundial, ação dos terroristas em 2001 em Nova Iorque e o Furacão Katrina em 2005. Estes são apenas três exemplos de muitos que infelizmente já aconteceram. Em tais evacuações as pessoas provavelmente foram dirigidas por suas emoções. Elas podem ter sido treinadas ou não, mas inevitavelmente também responderam a comportamentos irracionais.

O sucesso de um evento de evacuação pode estar relacionado com o bom entendimento do processo. Para alcançar o sucesso pode-se apontar três fatores importantes: interpretação, preparação e ação [17]. Podemos entender *interpretação* como o momento em que as pessoas observam e chegam a conclusão da necessidade real de uma evacuação; *preparação* é sobre planejar a melhor rota a seguir, enquanto a *ação* significa a movimentação pela rota escolhida, para alcançar uma área segura. Além disso, o entendimento de outros aspectos específicos é amplamente necessário. Tais pontos são relativos a:

- Tipo de imóvel: escritório, aeroporto, estação ferroviária;
- A compreensão do comportamento dos ocupantes em situação de pânico;
- Distribuição dos ocupantes (inclui idade, sexo e deficiência); e
- Localização de áreas perigosas, bem como locais seguros e saídas de emergência.

O conhecimento dos aspectos anteriores facilita a execução de um processo de saída segura. Hoje em dia, a evolução de uma multidão durante um processo de evacuação geralmente mostra comportamentos que podem evidenciar a boa organização e estrutura do grupo. Isto é devido à cooperação e coordenação realizada pelas pessoas [18].

Geralmente, o grupo tem o poder de influenciar o movimento dos seus membros. Em outras palavras, a escolha da rota de escape, *feita individualmente*, geralmente também é influenciada pelas ações dos outros membros da multidão. Este aspecto pode justificar o fato de que em situações de emergência, as pessoas tendem a se mover na mesma direção que os outros. Desta forma, para Cocking & Drury [18], quando unida por uma situação de emergência, uma multidão física (um grupo de indivíduos no mesmo local, cada um com sua própria identidade pessoal) pode ser transformada em uma multidão psicológica (ou seja, um grupo de pessoas unidas por uma identidade social comum como membros de uma categoria particular). Além disso, um conjunto de fatores extras (mapeados por [13]) podem influenciar um processo de evacuação:

- *Mobilidade*: um indivíduo que é menos móvel provavelmente precisará de mais tempo para evacuar de um ambiente em uma emergência;
- *Posição Física*: um indivíduo deitado provavelmente terá uma taxa mais lenta de reação e movimento do que um indivíduo em pé;
- *Densidade*: o movimento da multidão será mais lento em um ambiente mais denso;
- *Alerta*: um indivíduo que está menos alerta, por exemplo como resultado de cansaço ou intoxicação, provavelmente reagirá mais lentamente no caso de uma emergência;

- *Visibilidade*: quanto mais visíveis forem as rotas de sinalização e de saída de emergência, mais atraentes estas serão para os membros da multidão;
- *Complexidade do ambiente*: quanto mais complexo for o ambiente, mais indeciso poderá ser o indivíduo, e mais tempo levará para sair.

Estes pontos são importantes e geralmente são considerados a fim de regular o processo de saída de pessoas de ambientes. Grupos governamentais e diferentes organizações em alguns países têm trabalhado para regular o processo de evacuação. A próxima seção apresenta e detalha alguns desses regulamentos.

### 1.5. Regulamentos para Processo de Evacuação

Atualmente, governos de alguns países e profissionais de diferentes áreas trabalham para especificar medidas efetivas com o objetivo de definir planos de evacuação ótimos. A definição precisa de um plano de evacuação é visada para garantir a segurança das pessoas quando saem de um edifício, especialmente quando ocorre um pânico ou uma situação de atenção. A avaliação dos detalhes de evacuação já é solicitada por organizações internacionais como a UEFA (União da Associação Européia de Futebol) ou a FIFA (Federação Internacional de Futebol) em locais específicos como locais desportivos, estádios e Arenas, além de regulamentos regionais específicos.

A UEFA expressa algumas preocupações relacionadas ao processo de evacuação e que devem ser observadas desde o início do *design* de um novo estádio. A capacidade de segurança é um requisito obrigatório que se concentra, como o nome sugere, em garantir a máxima segurança para os espectadores. É amplamente aceito que todos os espectadores devem ser capazes de sair do estádio para um ponto de segurança dentro de no máximo oito minutos. Este valor, baseado no fluxo máximo observado em estádios, indica 660 pessoas por hora. No entanto, pode haver algum espaço para variações específicas com base no tamanho e design do local.

De acordo com a FIFA, o tempo de evacuação de emergência é em parte baseado no nível de risco e nas vias de evacuação de emergência disponíveis para refúgios/locais de segurança. A organização publicou uma diretriz <sup>1</sup> onde define um conjunto de regulamentos de segurança e segurança do estádio. De acordo com esse guia, fatores como o tipo de construção e materiais utilizados no estádio terão impacto no cálculo do tempo sugerido para a evacuação. Além disso, o incêndio é um dos principais riscos a serem considerados ao calcular o tempo de saída aceitável. Por exemplo, se o risco de incêndio for alto devido à construção do estádio, o tempo de evacuação esperado deve ser reduzido.

O tempo de evacuação de emergência não é um valor fixo. Trata-se de um cálculo que, juntamente com a taxa de passagem apropriada, é utilizado para determinar a capacidade do sistema de saída de emergência para um local seguro.

Os Estados Unidos da América utilizam o *Código de Segurança de Vida* [19], uma diretriz desenvolvida pela NFPA (Associação Nacional de Proteção Contra Incêndios), que fornece detalhes a serem seguidos durante um possível processo de evacuação

<sup>1</sup> [fifa.com/mm/document/tournament/competition/51/53/98/safetyregulations\\_e.pdf](http://fifa.com/mm/document/tournament/competition/51/53/98/safetyregulations_e.pdf)

de edifícios. Juntamente com o Manual de Design fornecido pela SFPE (Sociedade de Proteção contra Incêndio e Engenharia), os designers de edifícios podem observar, durante a fase de projeto de um edifício, aspectos de saída em relação a características como luzes de saída de emergência e alarmes.

De acordo com o Código de Construção Internacional, todos os edifícios, novos ou antigos, concebidos para ocupação humana, devem dispor de saídas suficientes para permitir a pronta saída dos ocupantes em caso de incêndio ou outra emergência. De acordo com a diretriz, todas as saídas devem descarregar diretamente para a rua ou outro espaço aberto que dê acesso seguro a uma via pública. As ruas, às quais as saídas descarregam, deverão ter largura adequada para acomodar todas as pessoas que saem do edifício. Um EAP (Plano de Ação de Emergência), de acordo com a diretriz, deve cobrir as ações designadas que garantem a segurança dos funcionários de incêndio e outras emergências:

- Procedimentos de fuga de emergência e atribuições de rota de fuga;
- Os procedimentos para contabilizar todos os indivíduos após a evacuação de emergência;
- A forma preferida de reportar incêndios e outras emergências; e
- Nomes de pessoas ou departamentos que podem ser contatados para obter mais informações ou explicações sobre as funções do plano.

Independentemente da diretriz, é importante mencionar que o comportamento das pessoas pode contribuir para congestionamentos que não são previstos durante o desenvolvimento do plano de saída. E esses congestionamentos são a principal causa de acidentes que resultam em feridos e/ou mortos.

A legislação sobre gestão de multidões no Brasil está em desenvolvimento. A atenção na área tem aumentado ao longo dos últimos anos. Tal crescimento é explicado devido a alguns eventos específicos. Em primeiro lugar, um triste desastre que ocorreu em uma boate: Kiss Night Club <sup>2</sup>. Além disso, grandes eventos esportivos que aconteceram no país (Copa do Mundo e Olimpíadas) contribuíram para determinar nova legislação.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) definiu, em 2001, a diretriz NBR 9077: 2001 com o objetivo de especificar a regulamentação concernentes às saídas de emergência. De acordo com esta diretriz, a concentração de pessoas, ao usar a saída de emergência, deve ser de até 2 pessoas /m<sup>2</sup>. A Diretriz Técnica do Governo de São Paulo - Brasil, define pontos específicos relativos à segurança das pessoas quando em saída. Resumimos alguns dos mais importantes:

- Os indivíduos devem atingir um ponto seguro sem caminhar mais de 20 metros em áreas ao ar livre e 10 metros em áreas internas. As saídas de emergência podem ser consideradas como o ponto seguro;
- O tempo para um grupo de pessoas deixar uma área interna pública, como um teatro, não deve exceder 6 minutos; e

---

<sup>2</sup>[edition.cnn.com/2013/01/28/world/americas/brazil-nightclub-fire](http://edition.cnn.com/2013/01/28/world/americas/brazil-nightclub-fire).

- A concentração de pessoas não deve ser superior a 4 pessoas/m<sup>2</sup>.

Optamos por apresentar dados de São Paulo, por esta ser a cidade mais populosa do Brasil. É importante mencionar que cada estado ou cidade pode determinar seu próprio regulamento de construção, se não houver regulamentos federais.

## 1.6. Estado-da-arte em Simulação de Multidões

A simulação de multidões tem sido estudada no contexto de ciência da computação, nas últimas décadas [9]. Hoje em dia pode-se observar um grande número de pesquisadores trabalhando para fornecer simulações coerentes e realistas aplicadas em áreas como engenharia, sistemas de segurança e animação digital. A fim de prever o comportamento das pessoas, os modelos computacionais são solicitados a produzir resultados de forma realista, quando comparados com o comportamento das pessoas no mundo real.

Os trabalhos mencionados nesta seção visam dar uma visão geral dos métodos recentes centrados na simulação de multidões e de evacuação, planos de evacuação e a possibilidade de lidar com agentes heterogêneos. Primeiramente apresenta-se uma breve classificação dos modelos de simulação em macroscópicos e microscópicos, de acordo com Hamacher & Stevanus [20]:

- *Modelos macroscópicos* são usados principalmente para produzir bons limites inferiores para o tempo global de evacuação e não consideram qualquer comportamento individual durante a situação de emergência. Os resultados da simulação podem ser utilizados para a fase de concepção do planejamento de uma construção; e
- *modelos microscópicos* são capazes de modelar as características individuais e a interação entre as pessoas, que influenciam seu movimento. Algumas leis probabilísticas para o movimento de indivíduos são às vezes empregadas neste conjunto de modelos.

A simulação de multidões é um grande campo de pesquisa na atualidade e motivou o desenvolvimento de várias outras abordagens. Diversas abordagens macroscópicas e microscópicas têm sido propostas para alcançar a reprodução do comportamento das pessoas com algum realismo. Além disso, também pode-se observar algumas abordagens que combinam a eficiência da Modelagem Macro (modelagem baseada em equações) e as vantagens da Micro Modelagem (modelagem baseada em agentes) [21]. Hoje em dia, existem ferramentas capazes de simular um único edifício, bem como uma comunidade inteira povoada por grandes multidões [22, 23]. Além da área de segurança, simulações de multidão podem ser objetos de estudo em outras áreas como o entretenimento. Podem ser aplicados algoritmos robustos para animar, controlar e criar agentes humanos com seu próprio conjunto de capacidades, personalidades e desejos únicos [24].

Especificamente em simulação de situações de emergência, um trabalho pioneiro com relação à reprodução do comportamento da multidão foi proposto por Braun *et al.* [25]. Os autores exploraram as características pessoais dos agentes para simular diferentes reações e comportamentos durante um processo de evacuação. Inspirados em uma

abordagem baseada em Física [26] os autores agregaram um conjunto de recursos para simular agentes e também grupos a fim de reproduzir uma multidão heterogênea. Tais características incluem, entre outros, aspectos como representação de famílias, nível de dependência de outros indivíduos, nível de altruísmo de agentes e também velocidades desejadas. Os autores propuseram um método baseado em forças, compostas do nível de altruísmo e dependência dos agentes de uma mesma família, para manter a coesão dos grupos (grupos de agentes que se movem juntos). Além disso, com base no nível de altruísmo, um agente pode se desagrupar de sua família, a fim de ajudar outros agentes no processo.

O trabalho de Zhu *et al.* [27] foi desenvolvido observando os Jogos Olímpicos de 2008, na China. Nessa época, os autores desenvolveram uma abordagem capaz de reproduzir o tráfego pessoal criado a partir de delegações de atletas de diferentes países e também o público. Um estudo de caso foi realizado considerando o *National Stadium* e considerou aspectos como o número de pedestres e a sua distribuição em situações específicas.

Simular o processo usual de evacuação foi o principal objetivo de Fu *et al.* [28]. A motivação dos autores foi reproduzir o comportamento dos pedestres para representar a seleção da melhor saída levando em consideração um algoritmo de autômato celular de menor esforço. É representado por um conjunto de células 2D onde podemos encontrar pedestres ou obstáculos. Os movimentos e objetivos utilizados para guiar os movimentos são definidos considerando uma abordagem probabilística. O uso de algoritmos de autômatos celulares também está presente nos trabalhos de Ji *et al.* [29], a fim de simular a dinâmica dos pedestres, e de Aik e Choon [30] com o objetivo principal de reproduzir o processo de evacuação. Chu *et al.* [31] desenvolveram a plataforma SAFEgress (Social Agent For Egress) em que os ocupantes dos edifícios são modelados como agentes que conhecem o meio ambiente e suas interações com os grupos sociais na multidão. De acordo com os autores, os resultados mostram que ambas as entidades, agentes e ambiente, podem impactar significativamente o desempenho da evacuação.

Pelechano e colaboradores [32] exploraram diferentes aspectos relativos ao comportamento de multidões virtuais. Um aspecto estudado pelos autores visa melhorar os sistemas de simulação de multidões pela adição de um modelo psicológico [33]. Desta forma, os autores apresentaram um modelo (MACES) [34] que combina modelos de fisiologia, estresse, percepção e emoção com a comunicação de agentes em situações de evacuação. A integração permitiu que o modelo de simulação de multidões gerasse eventos que agentes podem perceber, resultando em comportamentos responsivos, reativos e contextualizados. O objetivo do trabalho de Pelechano & Malkawi [35] foi estudar a importância de incorporar fatores psicológicos e fisiológicos nos modelos de simulação de multidões. Os autores apresentaram uma visão geral dos fundamentos que devem ser usados ao simular o movimento humano mais próximo dos movimentos reais de pessoas, onde a interação entre os humanos é emergente e as taxas de fluxo, densidades e velocidades se tornam o resultado dessas interações, em vez de terem algum valor pré-definido.

## 1.7. Simuladores de Multidão

Os modelos de evacuação podem ser usados para extrair outros dados além do simples tempo total de evacuação. Como discutido anteriormente, o modelo deve fornecer informações capazes de extrair dados a serem analisados para avaliar a segurança, mas também em situações de conforto. A fim de produzir resultados realistas e também prever comportamentos de multidões com o objetivo de alertar os gerentes de eventos, alguns softwares comerciais são atualmente usados por equipes de gerenciamento de multidões em diferentes países. Nesta seção, apresentamos 3 importantes softwares nesta área: MassMotion, VStep e Legion.

### 1.7.1. MassMotion

*MassMotion*, desenvolvido pela Oasys Software <sup>3</sup>, é projetado para a criação e execução de simulações com grande quantidade de personagens. O software começou como um simulador de movimento de pedestres e evoluiu para um sistema específico de evacuação em ambientes. O simulador opera em um ambiente 3D, onde cada agente individual é informado no ambiente, representado através de mapa de bits de espaço livre e obstruído em toda a área que pode ser percorrida. Cada agente determina seu melhor local de destino disponível para o próximo quadro da simulação e ajusta sua velocidade e orientação para alcançar essa posição. Este cálculo é executado a uma taxa de cinco quadros por segundo de tempo simulado que é normalmente suficiente para permitir que os agentes se adaptem às condições de mudança dinâmica dentro do ambiente.

### 1.7.2. Crowd Control Trainer

*Crowd Control Trainer* é um simulador que visa treinar pessoas que trabalham com incidentes relacionados com a multidões e eventos de massa. O software foi desenvolvido pela VSTEP <sup>4</sup>, uma empresa certificada pelo ISO9001:2008 <sup>5</sup>, em cooperação com o departamento de Polícia de Rotterdam e do Governo Holandês. Esta parceria foi firmada para apoiar seus comandantes de polícia e gerentes de treinamento de controle de multidões. Além disso, o software foi selecionado pelo governo dos Países Baixos como um dos melhores no campo de segurança. A simulação ocorre em uma réplica 3D virtual do ambiente urbano real permitindo o reconhecimento instantâneo e planejamento realista de estratégias de gestão e respostas reais para manifestações e motins. Além disso, o software inclui algoritmos de movimento e inteligência artificial, a fim de calcular o movimento de multidões de qualquer tamanho através do ambiente de treinamento virtual.

### 1.7.3. Legion

Os produtos de simulação de pedestres da *Legion*<sup>6</sup>, desenvolvidos no Reino Unido, incluem um conjunto de ferramentas capazes de lidar com a simulação de comportamentos de pedestres. *Legion-Evac* é uma ferramenta de simulação baseada em agentes, onde cada agente pode se movimentar pelo ambiente, de uma origem para um destino. Nesta trajetória, os agentes interagem com outros agentes e realizam atividades. É importante

---

<sup>3</sup>[oasyssoftware.com](http://oasyssoftware.com)

<sup>4</sup>[vstepsimulation.com](http://vstepsimulation.com).

<sup>5</sup>[iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=46486](http://iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=46486)

<sup>6</sup>[legion.com](http://legion.com)

mencionar que os agentes movem-se através do ambiente de acordo com o princípio de menor esforço. Além disso, elementos aleatórios de comportamento podem ser introduzidos para fazer a simulação mais realista, por exemplo, tamanho da entidade, velocidade, idade e bagagem carregada.

O Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia, *Technical Note 1680* [36, 37], provê uma lista padronizada de recursos para alguns dos modelos de evacuação mais proeminentes no mercado. A tabela 1.1 reproduz parte desta revisão para os softwares de simulação de multidão descritos anteriormente: *MassMotion*, *VStep* e *Legion*.

	<b>MassMotion</b>	<b>VStep</b>	<b>Legion</b>
<b>Metodologia Empregada</b>	Comportamental	Comportamental	Comportamental
<b>Construção</b>	Sem restrição	Sem restrição	Sem restrição
<b>Perspectiva do ocupante /</b>	Individual and /Global	Individual	Individual
<b>Modelo de comportamento /</b>	Inteligência Artificial / Probabilístico	Condicional / Probabilístico	Inteligência Artificial / Probabilístico
<b>Movimento</b>	Condicional	Distâncias Inter-pessoais Busca por células vazias	Distâncias Inter-pessoais Condicional /
<b>Definição de rotas</b>	Condicional	Condicional	Condicional
<b>Validação</b>	Simulações / Literature / Outros Modelos	Simulações / Literature / Outros Modelos	Simulações / Literature / Outros Modelos / Avaliação com experts

**Tab. 1.1. Análise de características de sistemas de simulação de multidões, adaptado de [36].**

## 1.8. CrowdSim - Desenvolvido no VHLAB@PUCRS

Nas próximas seções descrevemos *CrowdSim*, um software de simulação de multidões desenvolvido para reproduzir o comportamento das pessoas em diferentes situações (desde o movimento normal até grandes casos de evacuação). Ao projetar *CrowdSim*, definimos alguns objetivos principais a serem alcançados no software: *i*) Deve prover uma estrutura fácil de ser usada e controlada; *ii*) os planos de evacuação devem ser parametrizados; *iii*) deve permitir a exportação de vários tipos de dados resultantes, que podem ser usados posteriormente em análises/avaliações; e *iv*) deve lidar com apenas um agente bem como grandes multidões.

Primeiramente, a fim de esclarecer a terminologia usada neste trabalho, seguem as definições de alguns conceitos:

- grafo de navegação/grafos do ambiente: está relacionado ao ambiente específico a ser simulado. Considera salas como nós e portas e passagens como arestas de um grafo. Quando o ambiente simulado é configurado (explicado mais adiante neste capítulo) este grafo é gerado automaticamente;

- plano de evacuação: é um gráfico de evacuação que contém a distribuição da população (número de pessoas) nas regiões onde os agentes devem ser criados e a porcentagem de distribuição em cada bifurcação (pontos de decisão no grafo) até chegarem nas saídas.

CrowdSim é um software de simulação de multidões baseado em regras desenvolvido para simular movimentos coerentes e comportamentos de humanos virtuais em um processo de evacuação [38, 39]. Ele também apresenta dados para análise, que são usados para estimar conforto e segurança dos humanos em simulações em um ambiente específico. Durante a fase de projeto do CrowdSim, procurou-se desenvolver um protótipo capaz de:

- Representar a geometria física de uma construção em um ambiente 3D. Essa representação permite que os engenheiros de segurança usem o software para simular praticamente um plano de ocupação ou evacuação atendendo as restrições físicas reais do ambiente (portas, saídas de emergência, tamanho dos corredores, etc);
- Definir a ocupação espacial da população no ambiente para reproduzir as condições iniciais de um evento de abandono;
- Modelar um plano de saída no contexto de situações de emergência;
- Produzir uma visualização da simulação e gerar os dados de saída, a serem considerados nas análises estatísticas.

Existem dois componentes-chave na estrutura do CrowdSim, organizados em módulos distintos: *Configuration* e *Simulation*. A Figura 1.2 ilustra a arquitetura do software incluindo sub-módulos, as entradas necessárias bem como as saídas produzidas.

Nas seções a seguir descreve-se os módulos de CrowdSim detalhando suas entradas, dependências e fluxo de dados.

### 1.8.1. Módulo de Configuração

O módulo de configuração solicita, como primeira entrada, a representação 3D do ambiente que será simulado. Esse modelo 3D será utilizado pelo *Environment Manager* para permitir que o usuário defina as regiões passíveis de movimento de acordo com a estrutura do prédio, bem como restrições físicas e obstáculos. Mais especificamente, os componentes de geometria podem ser detalhados como se segue:

- Contextos: São regiões (quadriláteros convexos ou não convexos) nos quais os agentes podem ser criados (início da simulação), mover-se (durante a simulação) ou serem removidos (ao chegarem ao objetivo);
- Portas: Bordas que conectam dois contextos e permitem que os agentes se movam entre eles;

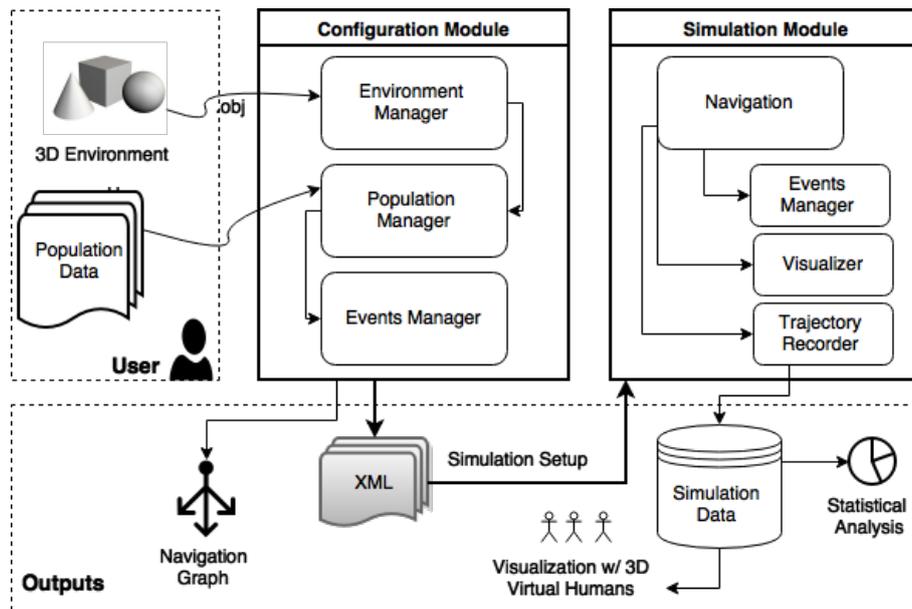


Figura 1.2. Arquitetura do protótipo *CrowdSim*.

- Escadas e rampas: Regiões (quadriláteros convexos ou não convexos) que podem conectar portas de salas diferentes. Os agentes não podem ser criados ou removidos nessas regiões; e
- Obstáculos: Os obstáculos são definidos em salas para restringir o movimento de agentes dentro do ambiente físico.

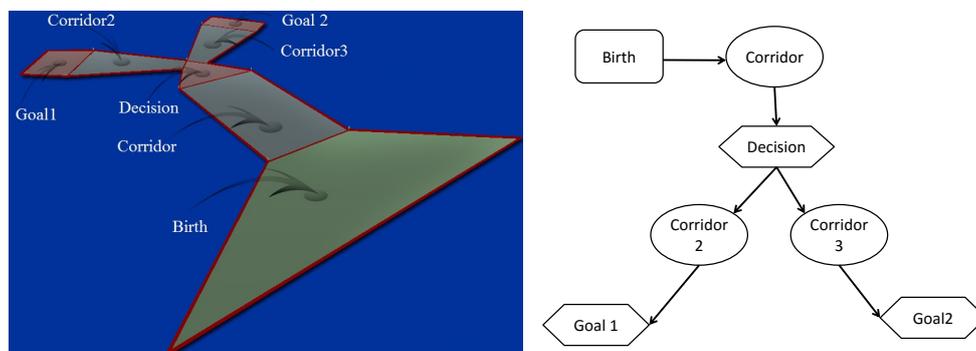
Para definir o cenário que será simulado, o Gerenciador de Ambiente classifica as regiões transitáveis com diferentes propósitos. Tais áreas transitáveis são chamadas de contextos. Definimos três tipos diferentes de contextos ao especificar um ambiente de simulação: contextos de *birth*, *motion* e *goal*.

*Birth Contexts* são usados para representar áreas da construção onde os agentes devem ser criados durante a simulação. Nessas áreas, o usuário é solicitado a fornecer o número de agentes a serem simulados que devem ser criados em tal contexto. Além disso, o usuário define as seguintes informações com base no número total de agentes a serem criados:

- *Tamanho dos grupos*: Os agentes podem ser criados em grupos diferentes até que alcancem o número total que deve ser criado no contexto;
- *Tempo de Criação*: Tempo em que grupos de agentes começam a ser criados após o início da simulação;
- *Tempo entre grupos*: Intervalo de tempo a ser considerado ao criar grupos diferentes; e
- *Objetivo*: O contexto (ou conjunto de contextos possíveis) a ser considerado como objetivos a serem alcançados por um agente ao se mover.

*Goal Contexts* são regiões de interesse a serem consideradas durante o movimento do agente (objetivos). Ao criar um contexto deste tipo, o usuário é solicitado a definir a porcentagem de agentes que devem ser removidos da simulação ao atingir o contexto, a porcentagem de agentes que devem permanecer em movimento nesse contexto e a porcentagem de agentes que devem encontrar outro objetivo e mover-se nessa nova direção.

Os *Motion Contexts* são considerados pelo algoritmo de simulação como regiões de conexão entre contextos de nascimento e objetivo. Eles são importantes nos cálculos das rotas de movimento dos agentes. Além disso, um grafo de conexão é construído como uma saída do módulo de configuração de acordo com conexões entre contextos e suas especificações populacionais. Tais contextos nos permitem reproduzir um ambiente virtual simples, como ilustrado à esquerda, na Fig. 1.3. Este é apenas um exemplo simples para ilustrar uma configuração de ambiente no CrowdSim. Além disso, este ambiente simples nos permite representar facilmente um grafo ambiental calculado por *CrowdSim* como ilustrado à direita, na Figura 1.3.



**Figura 1.3. Ambiente de simulação simples composto por diferentes tipos de contextos (à esquerda) e respectivo grafo de navegação calculado por CrowdSim (à direita). Diferentes formas no gráfico significam contextos com finalidades diferentes.**

Uma vez que o ambiente está mapeado de forma coerente e o usuário definiu todos os dados de população, é possível especificar no sub-módulo *Population Manager* como os agentes devem se comportar ao se mover. Os comportamentos possíveis dos agentes podem ser:

- *Goal Seeking*: Os agentes devem procurar seus objetivos imediatamente ou vagamente, por realização de movimento aleatório;
- *Keep waiting*: Os agentes, quando alcançam alguma região específica do ambiente, podem passar algum tempo nele antes de procurar outro objetivo;
- *Random movement*: os agentes podem escolher destinos aleatórios durante um tempo específico, antes de tentar identificar o melhor caminho para atingir o objetivo principal.

A definição correta dos cenários é crítica neste trabalho, pois a combinação e análise de informações é responsável pela produção de resultados aceitáveis e válidos.

Quando o ambiente é corretamente definido, com todas as regiões definidas, todos os parâmetros configurados e comportamentos desejados especificados, o usuário é capaz de executar o segundo módulo do CrowdSim: Simulação. A transferência de dados entre os módulos de configuração e simulação é realizada atualmente por um arquivo de cenário (XML), capaz de armazenar todas as configurações a serem observadas ao calcular uma nova simulação. Além do arquivo XML, o Módulo de Configuração também gera um gráfico de navegação com a população distribuída inicial nos nós do grafo. Além disso, foi desenvolvido um planejador, executado off-line, para ler o grafo e gerar planos de evacuação diferentes. A principal diferença entre um plano de navegação e um plano de evacuação é que no primeiro define-se onde as pessoas estão no início da simulação e no último define-se a distribuição de pessoas em qualquer bifurcação de gráfico, ou seja, define-se as saídas para cada pessoa/grupo. É claro que adotamos a importante hipótese de que o caminho mais curto nem sempre é o melhor para a simulação de multidões.

### **1.8.2. Módulo de simulação**

O módulo de simulação do CrowdSim é responsável pela navegação de agentes virtuais em um ambiente específico. Essa navegação deve levar em conta o movimento do agente, o controle de colisão, a variação de velocidade e outros comportamentos dos pedestres. Uma configuração de simulação, previamente definida no módulo de configuração, é solicitada como entrada para a simulação. A simulação calcula as rotas de cada agente para atingir uma meta específica, com base nos possíveis caminhos, como mencionado na última seção. As rotas podem ser calculadas com base na especificação do usuário (isto é, um gráfico determinado pelo usuário - um grafo de evacuação, por exemplo) ou calculada para executar o melhor caminho, considerando apenas critérios de distância. O CrowdSim utiliza o algoritmo A\* [40] para calcular caminhos mais curtos sem colisões, se forem declarados obstáculos. Durante a simulação do movimento, CrowdSim executa algoritmos para que agentes evitem colisões com outros agentes, usando um método geométrico local simples.

O método para evitar colisões é baseado em regras e definido localmente (baseado na proximidade de distância). Agentes próximos e suas velocidades são usados no teste de colisão para detectar uma possível situação de colisão em um próximo quadro. Se essa situação vai acontecer, um dos agentes envolvidos (definidos aleatoriamente) deve tomar uma decisão baseado nas seguintes possibilidades: *i*) mudar seu vetor de direção (mudanças de 40deg -positivo ou negativo- são permitidas), ou *ii*) reduzir sua velocidade (mudanças até velocidade zero são permitidas). As informações sobre o par de agentes e a decisão tomada são salvas em uma lista de ações passadas, que é armazenada a cada segundo. Se uma nova situação de colisão for detectada para o mesmo par de agentes e ainda houver uma ação na lista de ações passadas, o agente tomará uma decisão diferente, ou seja, se a mudança de direção for salva em ações passadas, então uma mudança de velocidade deve ser realizada. Conseqüentemente, os agentes tentam alcançar seus objetivos, evitando colisões com outros. Este método não é livre de colisão, mas o erro máximo de 10% foi observado em todas as experiências realizadas com CrowdSim.

Cada simulação realizada gera um conjunto de dados de saída para posterior análise:

- Trajetórias do agente durante a simulação;
- variação de velocidade para cada agente;
- tempo de cada agente da simulação;
- tempo total de simulação, e
- densidade local por frame - calcula-se a densidade local contando o número de agentes por metro quadrado em cada contexto, em vez da densidade global (ou seja, número de pessoas divididas pela área de construção).

Os dados de saída são armazenados e podem ser usados para produzir diferentes análises estatísticas. As trajetórias dos agentes podem ser facilmente exportadas para serem visualizadas com humanos virtuais articulados em uma *engine* que fornece visualização realista.

## 1.9. Estudos de Caso

Nesta seção apresentaremos alguns casos de estudo, onde o CrowdSim foi aplicado.

### 1.9.1. Simulação no Estádio Olímpico João Havelange (Engenhão) - RJ

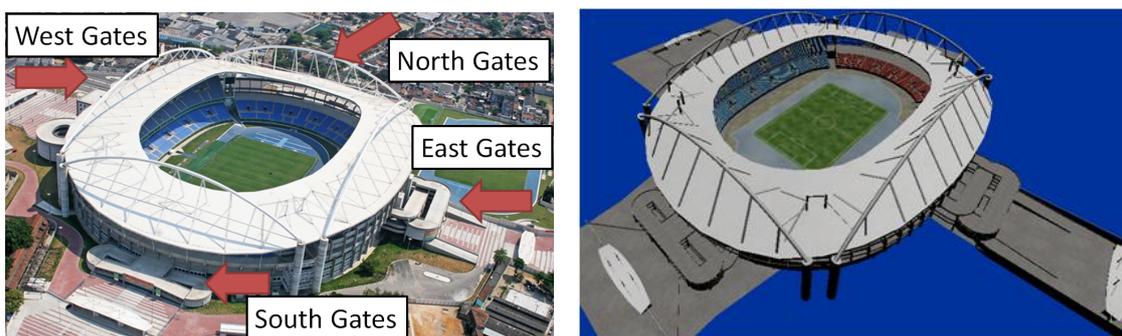
Neste estudo de caso, aplicamos o CrowdSim para estudar o processo de evacuação de um Estádio Olímpico. O "Estádio Olímpico João Havelange", denominado Estádio Nilton Santos desde 2010, foi construído para os Jogos Pan-americanos de 2007 e, de acordo com os gerentes do estádio, pode ser considerado o estádio mais moderno da América Latina América e número cinco no mundo <sup>7</sup>. O estádio, sede da equipe de futebol brasileira Botafogo <sup>8</sup>, tem capacidade para 46.000 pessoas e foi sede dos Jogos Olímpicos em 2016. O projeto foi realizado como uma parceria entre a PUCRS e o Botafogo com o objetivo principal de fornecer um estudo sobre o processo de saída de público no estádio. Os fatores considerados nas análises representam informações de conforto das pessoas (densidade de pessoas) e também o tempo total de evacuação.

Uma representação do estádio é ilustrada na Figura 1.4. O estádio pode ser acessado por quatro áreas distintas, como apresentado na Fig. 1.4, à esquerda. A compreensão detalhada da estrutura do estádio, ou seja, portões e corredores, é muito importante quando se realiza um projeto de simulação de multidões. Isso ocorre porque a primeira fase do projeto está relacionada com a modelagem do ambiente 3D que oferece as restrições do ambiente para a movimentação das pessoas (uma representação 3D do estádio é ilustrada na Fig. 1.4), à direita.

Ao construir o modelo 3D do estádio é importante ter em conta todas as restrições físicas existentes no estádio real. O tamanho das portas, as dimensões dos corredores e a existência de obstáculos devem existir no modelo 3D. A Figura 1.5 apresenta áreas comuns do estádio que foram consideradas ao desenvolver o modelo 3D.

<sup>7</sup><http://bfr.com.br/estadioniltonsantos.php>

<sup>8</sup><http://bfr.com.br>

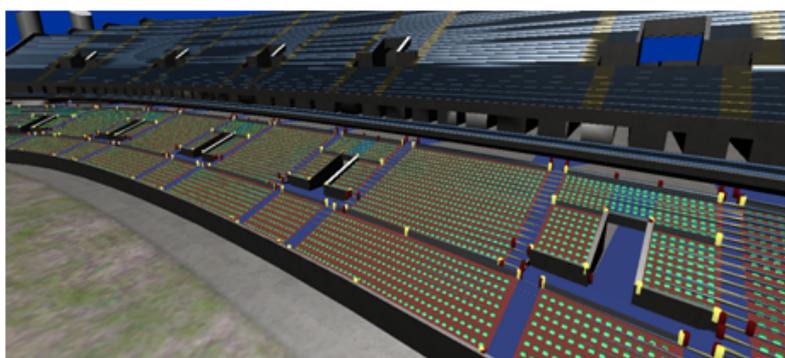


**Figura 1.4.** À esquerda é apresentada uma visão real do Estádio Olímpico onde se destacam as quatro áreas de acesso ao público; Enquanto que à direita ilustramos uma representação 3D do estádio.



**Figura 1.5.** Três representações de áreas comuns no estádio, incluindo as arquibancadas e corredores, onde as pessoas podem caminhar.

Outro aspecto importante, considerado neste projeto, foi a especificação correta das áreas das arquibancadas. Na Figura 1.6 é possível observar essas áreas (piso vermelho e cadeiras verdes) e as regiões definidas para permitir o movimento dos pedestres (azul). Considerando essa definição, quando ocorre um evento, por exemplo, o fim de uma partida, os indivíduos são capazes de deixar seus assentos e encontrar a melhor maneira de deixar o estádio.

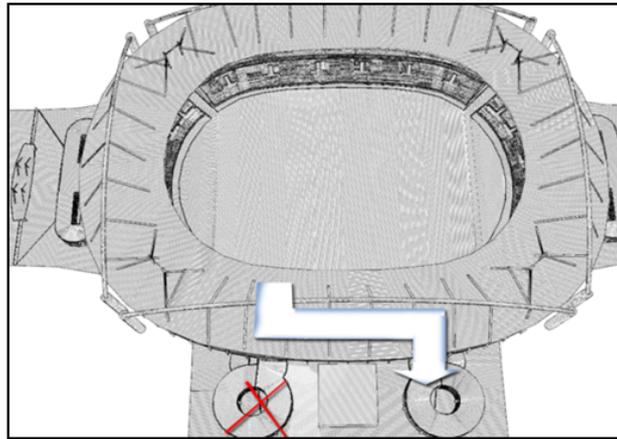


**Figura 1.6.** Exemplo de configuração de simulação, considerando as áreas de arquibancada.

Neste projeto, simulamos três situações diferentes considerando as informações sobre o histórico dos jogos fornecidos pelos gerentes do estádio:

1. A média da população durante alguns jogos observados: 17.000 pessoas;

2. capacidade total: 46.000 pessoas; e
3. um caso de teste onde consideramos a capacidade total do estádio juntamente com a indisponibilidade de uma saída (ver Figura 1.7).

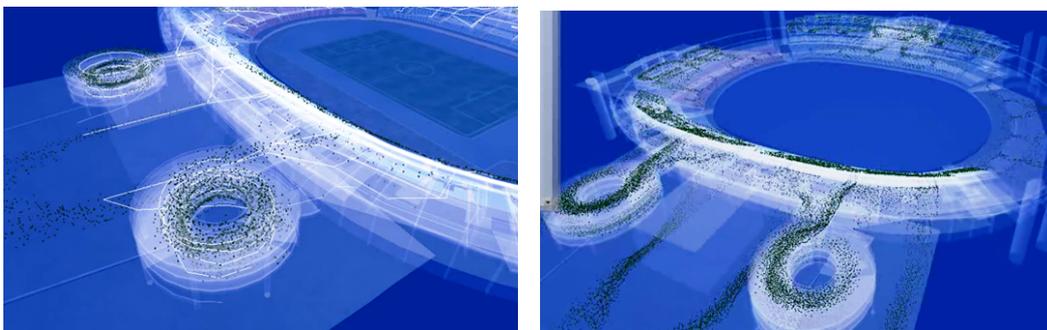


**Figura 1.7. Ilustração de uma saída indisponível no estádio.**

É importante ressaltar que todos os agentes conhecem sua melhor rota. Mesmo quando uma saída estava indisponível, os agentes sabiam disso e foram direto para a segunda melhor saída. Após as simulações, realizamos algumas análises estatísticas que nos permitiram destacar alguns aspectos:

- Em todas as situações simuladas os agentes foram capazes de caminhar de acordo com a velocidade desejada (1.2m/s);
- O tempo médio de todos os cenários foi de cerca de 7 minutos.

Figura 1.8 ilustra dois momentos das simulações no estádio.

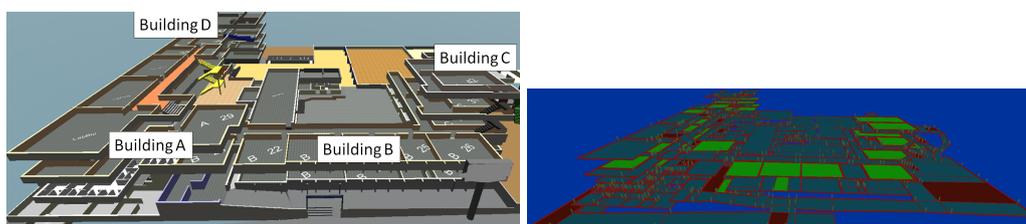


**Figura 1.8. Representação visual da simulação de saída no estádio.**

### 1.9.2. Simulação no Colégio Pastor Dohms - Porto Alegre

Neste estudo de caso, aplicamos CrowdSim em uma escola que recebe educação infantil, alunos do ensino fundamental e médio. O projeto foi realizado na Escola Pastor Dohms<sup>9</sup>, em Porto Alegre - Brasil. O primeiro passo foi reproduzir a escola em um ambiente 3D como entrada solicitada. Posteriormente, definimos as restrições de ambiente, bem como os comportamentos desejados de acordo com as etapas enumeradas da seguinte forma:

1. Especificou-se as regiões onde o movimento é permitido (por exemplo corredores e escadas) no ambiente 3D. Além disso, definiu-se as regiões onde os agentes devem ser criados (isto é, salas de aula) e as regiões a serem consideradas como objetivos (ou seja, portas de saída). Essas informações são levadas em conta pelo CrowdSim ao executar o planejamento do caminho para calcular rotas de saída. A Figura 1.9 ilustra o modelo 3D da escola (à esquerda) e o ambiente mapeado no simulador, à direita.
2. Os dados populacionais foram definidos de acordo com as especificações da direção da escola. Definiu-se o número de agentes a serem simulados, bem como seus objetivos durante a simulação. A fim de especificar tais informações, considerou-se os valores de acordo com a ocupação real da escola para cada sala de aula, em cada edifício (como ilustrado na Figura 1.9). A escola possui duas saídas que são consideradas pelos alunos ao sair do edifício, em dias normais. Além disso, observou-se a existência de portas extras (não utilizadas pelos alunos) que podem ser consideradas como rotas adicionais.



**Figura 1.9.** O colégio modelado em 3D (à esquerda); e a especificação do ambiente de simulação no CrowdSim (à direita).

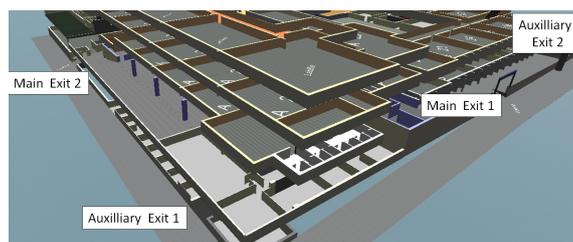
Após as especificações do ambiente e restrições populacionais, realizaram-se simulações de acordo com quatro cenários diferentes. Tais cenários foram definidos considerando a população escolar pela manhã (1067 alunos) e pela tarde (729 pessoas), assim como as saídas disponíveis. A (Figura 1.10 ilustra possíveis configurações de saída.

Os quatro cenários simulados são:

1. População da manhã com apenas as principais saídas disponíveis;
2. população da tarde com apenas as saídas principais disponíveis;
3. população da manhã com todas as saídas disponíveis;

---

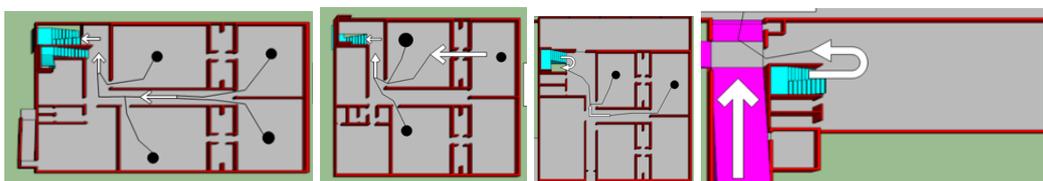
<sup>9</sup><http://dohms.org.br/>



**Figura 1.10. Saídas disponíveis da escola.**

4. população da tarde com todas as saídas disponíveis.

Para testar os quatro cenários, foi necessário definir rotas capazes de guiar os agentes até a saída mais próxima, de acordo com as localizações das salas de aula. As rotas representam, neste ponto, um plano de evacuação a ser realizado. Neste projeto, quatro planos de evacuação foram desenvolvidos de acordo com a especificação de cada cenário de evacuação. A Figura 1.11 ilustra as rotas a serem seguidas pelos agentes que devem sair do Edifício D da escola. As linhas indicam o caminho a ser seguido enquanto as setas brancas representam a direção do movimento. Como ilustrado anteriormente na Figura 1.9 à esquerda, a escola é composta por quatro edifícios de salas de aula.

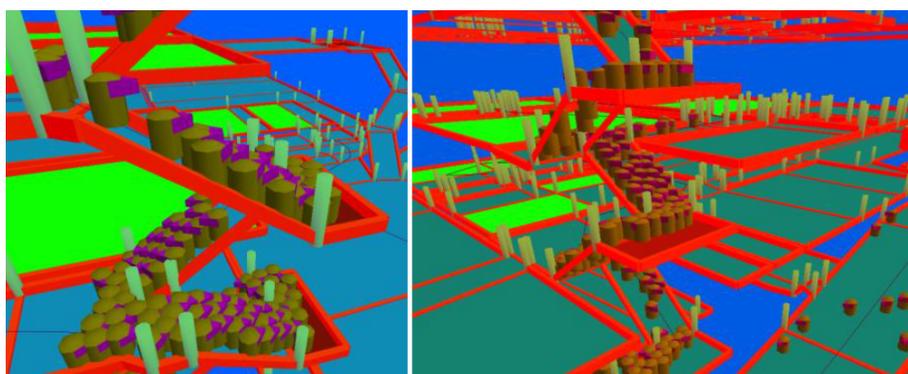


**Figura 1.11. Rotas que representam o plano de evacuação do Edifício D.**

Além de definir os planos de evacuação (ambiente e dados de pessoas, comportamentos e rotas), é importante enfatizar alguns pontos a serem observados durante a simulação de todos os cenários:

- A distribuição de pessoas por sala de aula foi calculada de acordo com os dados fornecidos pela direção da escola.
- Consideramos um tempo de reação para todos os cenários. Este tempo representa o tempo de resposta de cada agente até que ele começa a se mover, após receber uma orientação para a saída. Consideramos o tempo de resposta como 5s para todas as experiências.
- Os agentes não são criados exatamente na mesma hora. Nos experimentos, criamos grupos de 1 a 10 agentes (em cada sala de aula) observando um intervalo de 10 segundos. Este procedimento foi adotado para evitar que todos os agentes comecem a se mover ao mesmo tempo.
- Todos os agentes pretendem mover-se a uma velocidade de 0.8m/s.

As análises dos resultados da simulação de multidões nos permitiram observar diferentes aspectos importantes durante o processo de saída. Um deles diz respeito à variação da densidade nos edifícios da escola durante a evacuação. Os dados estatísticos mostraram o tempo de simulação quando a maior densidade foi detectada. A estimação do tempo para maior densidade permitiu analisar a simulação e o ambiente para identificar o lugar de alta densidade como região de atenção. Nos quatro cenários simulados, a maior densidade ocorreu na escada dos edifícios C (cenários 1 e 3) e D (cenários 2 e 4). A Figura 1.12 apresenta dois quadros de simulação quando a maior densidade foi detectada no Edifício C (esquerda) e Edifício D (direita).



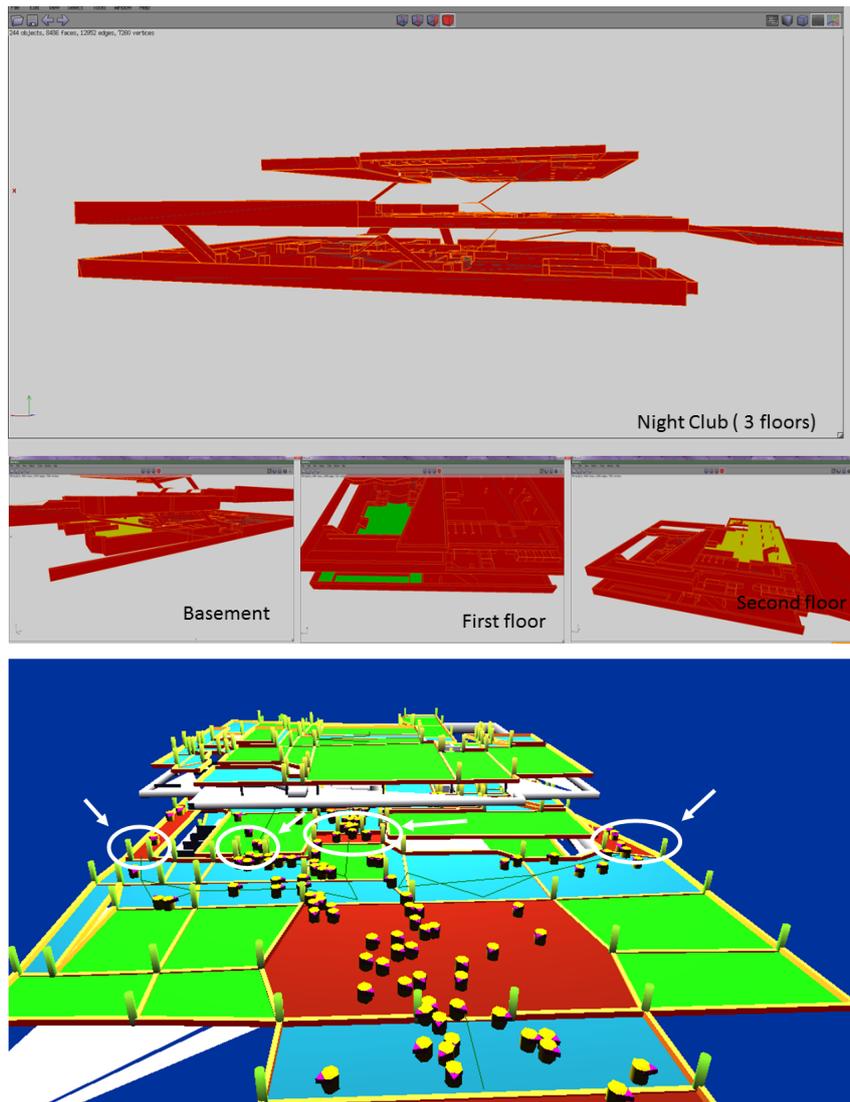
**Figura 1.12. Maior densidade detectada por simulações no Edifício C (esquerda) e Edifício D (direita).**

### 1.9.3. Simulação na Boate Santa Mônica - Porto Alegre

Nesta seção detalhamos a aplicação de CrowdSim em uma casa noturna, em Porto Alegre, Brasil. Nosso objetivo foi estudar como as pessoas realizam um processo de evacuação na vida real e assim obter dados para permitir comparações quantitativas. O experimento foi uma experiência compartilhada desenvolvida em parceria com os donos da casa noturna e uma empresa de segurança. No dia em que o experimento foi conduzido, o público concordou em deixar o clube exatamente às 2 da manhã. Alguns dias antes do exercício de saída no clube, CrowdSim foi testado para fornecer diferentes planos de evacuação que poderiam ser usados para estimar o comportamento dos ocupantes. O primeiro passo do processo foi reproduzir o ambiente do clube em 3D. O ambiente tem uma área total de  $1010m^2$  e tem 4 andares (veja Figura 1.13 para ver os locais de saída). Uma representação 3D é ilustrada na Figura 1.13.

O ambiente 3D foi necessário para permitir a definição dos possíveis planos de evacuação. Neste modelo, são definidas as regiões onde os agentes devem ser inseridos e removidos da simulação e também especifica-se as regiões onde o movimento é permitido. A especificação do ambiente, definida no módulo de configuração do CrowdSim, de acordo com o modelo 3D do ambiente, possibilita a construção de um gráfico do ambiente. Esse gráfico é ilustrado na Figura 1.14 e é composto por três tipos diferentes de nós, que são representados por cores diferentes:

1. nós alaranjados representam áreas de decisão. Em tais áreas do clube, onde os agentes podem ser criados, eles precisam escolher rotas diferentes a partir desse

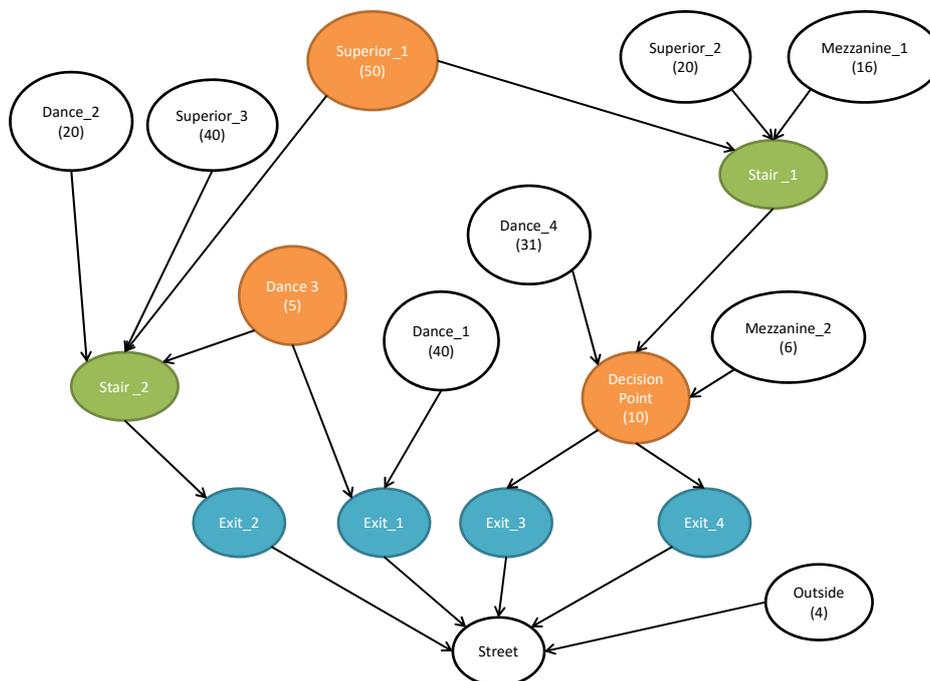


**Figura 1.13. Ilustração do modelo 3D da boate e da localização das portas de saída na interface do CrowdSim.**

ponto. Esses nós representam as bifurcações no gráfico;

2. nós verdes representam as escadas responsáveis pela conexão dos diferentes andares do clube. Nenhum agente é criado em tais regiões que são consideradas apenas áreas de movimento; e
3. Os nós brancos são regiões onde os agentes podem ser criados na simulação e também, áreas passíveis de movimento. A única exceção é o nodo chamado *Street* que é responsável pela remoção dos agentes na simulação (contexto de saída).

Após a realização de várias simulações, foi possível identificar um conjunto de planos de evacuação plausíveis a serem realizados no exercício da vida real. Na Tabela 1.2 apresentamos os resultados computados de três planos de evacuação que foram projetados e testados no CrowdSim pelos engenheiros de segurança.



**Figura 1.14.** Gráfico do clube noturno especificando a estrutura ambiental a ser considerada na geração de possíveis rotas de evacuação. Todos os nós significam regiões caminháveis, enquanto as bordas representam as portas que conectam as salas do lugar. Além disso, nós laranja significam áreas de decisão (onde os agentes podem escolher caminhos diferentes), enquanto os nós verdes representam as escadas que conectam os diferentes andares do clube noturno.

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
tempo máximo (sec)	142	142	146
tempo médio (sec)	61	62	64
densidade média ( <i>peessoas/m<sup>2</sup></i> )	0.1123	0.1138	0.1162
velocidade média <i>m/s</i>	0.80	0.80	0.80
Local com maior densidade	escadas do 2º andar	escadas do 2º andar	escadas do 2º andar
Tempo em que máxima densidade foi observada	Segundo 40	Segundo 39	Segundo 50
Maior velocidade (m/s)	1.3	1.2	1.3
Menor velocidade (m/s)	0.01	0.01	0.005
Maior densidade	5.4	5.4	5.0
<b>Número de pessoas na Door1</b>	54	18	21
<b>Número de pessoas na Door2</b>	12	41	50
<b>Número de pessoas na Door3</b>	80	126	75
<b>Número de pessoas na Door4</b>	100	61	100

**Tab. 1.2.** Dados quantitativos comparando cenários simulados contendo 240 pessoas.

Avaliando-se a tabela, optou-se por utilizar o plano da Simulação 1 como estratégia para treinamento de evacuação das pessoas reais, na Boate. Assim, a empresa de

segurança começou a treinar indivíduos que trabalham no local. A verdadeira evacuação foi realizada com 240 pessoas que concordaram em participar da experiência. Durante o exercício de saída real, pode-se coletar dados diferentes para avaliar os resultados dessa experiência. Os dados dos ocupantes foram obtidos a partir de vídeos de câmeras de segurança. Esta informação foi muito importante para avaliar este trabalho. A Tabela 1.3 resume a comparação entre os cenários de evacuação real e virtual.

	Simulação	Dados do Mundo Real
Tempo total de evacuação (segundos)	119	175
Densidade máxima (pessoas / $m^2$ )	5.4	4.5
Lugar da maior densidade	Escadas (2º andar)	Escadas (2º andar)
Tempo em que a maior densidade foi observada	Segundo 40	Segundo 50
Velocidade máxima (m / s)	1.3	1.5
Velocidade menor (m / s)	0,1	0,2

**Tab. 1.3. Dados quantitativos comparando mundos reais e simulados considerando exatamente o mesmo plano de evacuação.**

A Figura 1.15 fornece uma imagem capturada durante a evacuação que mostra as pessoas nas escadas (2º andar) aos 40 segundos, após a simulação começar, e outra imagem no mesmo local e tempo na simulação virtual.



**Figura 1.15. Imagens ilustrando as escadas no segundo andar, 40 segundos após o início da simulação, em ambiente real e virtual.**

Ao analisar a Tabela 1.3 há claras diferenças no tempo de evacuação. Isso pode ser explicado pelo fato de que pessoas reais não se comportam voluntariamente da mesma forma que em uma verdadeira emergência. Ou seja, pessoas reais, não em pânico, respeitam o espaço de outros, e portanto não atingem as maiores densidades aparentes nos dados de simulação.

### 1.10. Considerações Finais

As pessoas, quando fazem parte de uma multidão, são capazes de realizar um comportamento incomum, que não realizariam se estivessem sozinhas [2]. Uma multidão é uma entidade importante e sua compreensão é relevante, sobretudo em questões de avaliação de segurança e conforto de populações.

Ao simular multidões, os engenheiros podem validar seus comportamentos e evolução em um ambiente específico de acordo com diferentes circunstâncias e restrições. Além disso, as empresas podem economizar tempo e dinheiro ao simular e analisar o comportamento das multidões durante a fase de projeto de edifícios.

Em particular, neste texto focou-se na simulação de evacuação, para investigar a melhor maneira de uma multidão deixar um ambiente. A fim de exemplificar este problema e suas soluções, apresentou-se CrowdSim, um protótipo desenvolvido no VH-LAB <sup>10</sup> para simular multidões em diferentes situações durante um processo de evacuação. Além do protótipo, alguns dos estudos de caso desenvolvidos usando CrowdSim foram apresentados.

## Referências

- [1] S. Freud, *Group psychology and the analysis of the ego*. New York: New York, Boni and Liveright, 1922.
- [2] G. LeBon, *Psychologie des Foules*. Paris: Alcan, 1895.
- [3] W. Mc Dougall, *The Group Mind (1920)*. La Vergne, US: Lightning Source, 2009.
- [4] S. Sighele, *A multidão Criminosa - Ensaio de Psicologia Coletiva*. Tradução Adolfo Lima., 1954.
- [5] C. McPhail, *The Myth of the Madding Crowd*. New York, USA: Walter de Gruyter, 1991.
- [6] S. Patil, J. Van Den Berg, S. Curtis, M. Lin, and D. Manocha, “Directing crowd simulations using navigation fields,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 17, no. 2, pp. 244–254, 2011.
- [7] G. Berseth, M. Kapadia, and P. Faloutsos, “Robust space-time footsteps for agent-based steering,” *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2015.
- [8] C. D. Boatright, M. Kapadia, J. M. Shapira, and N. I. Badler, “Generating a multiplicity of policies for agent steering in crowd simulation,” *Computer Animation and Virtual Worlds*, pp. n/a–n/a, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/cav.1572>
- [9] D. Thalmann and S. R. Musse, *Crowd Simulation - Second Edition*. Springer-Verlag London Ltd, 2013.
- [10] J. Fruin, *Pedestrian Planning and Design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.
- [11] E. T. Hall, *The hidden dimension / Edward T. Hall*, [1st ed.] ed. Doubleday, Garden City, N.Y. :, 1966.

---

<sup>10</sup>[www.inf.pucrs.br/vhlab](http://www.inf.pucrs.br/vhlab)

- [12] U.S. Department of Labor, “How to plan for workplace emergencies and evacuations,” online: <https://www.osha.gov/Publications/osha3088.pdf>, The address of the publisher, 2001.
- [13] C. R. M. Challenger, Rose; Clegg, *Understanding Crowd Behaviours: Guidance and Lessons Identified*. York, UK: The Cabinet Office Emergency Planning College, 2009.
- [14] A. Berlonghi, “Understanding and planning for different spectator crowds,” vol. 18, no. 4, pp. 239–247, 1995-02-01T00:00:00. [Online]. Available: <http://www.ingentaconnect.com/content/els/09257535/1995/00000018/00000004/art00033>
- [15] L. C. Osorio, *Psicologia Grupal: Uma nova disciplina para o advento de uma era*. Porto Alegre: Artmed, 2003.
- [16] G. K. Still, “Crowd dynamics,” Ph.D. dissertation, University of Warwick, Coventry, UK, 2000.
- [17] H. Mu, J. Wang, Z. Mao, J. Sun, S. Lo, and Q. Wang, “Pre-evacuation human reactions in fires: An attribution analysis considering psychological process,” *Procedia Engineering*, vol. 52, pp. 290 – 296, 2013, 2012 International Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813002610>
- [18] C. Cocking and J. Drury, “The mass psychology of disasters and emergency evacuations: a research report and implications for the fire and rescue service,” *Fire Safety, Technology and Management*, vol. 10, no. 2, pp. 13–19, 2008. [Online]. Available: <http://eprints.brighton.ac.uk/11416/>
- [19] *NFPA 101 Life Safety Code*. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2015.
- [20] H. W. Hamacher and S. A. Tjandra, “Mathematical Modelling of Evacuation Problems – A State of the Art,” in *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, M. Schreckenberg and S. D. Sharma, Eds. Berlin: Springer, 2002, pp. 227–266.
- [21] N. T. N. Anh, Z. J. Daniel, N. H. Du, A. Drogoul, and V. D. An, “A hybrid macro-micro pedestrians evacuation model to speed up simulation in road networks,” in *Proceedings of the 10th International Conference on Advanced Agent Technology*, ser. AAMAS’11. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, pp. 371–383. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27216-5\\_28](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27216-5_28)
- [22] X. Wei, M. Xiong, X. Zhang, and D. Chen, “A hybrid simulation of large crowd evacuation,” in *Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2011 IEEE 17th International Conference on*, Dec 2011, pp. 971–975.
- [23] L. B. Zomer, W. Daamen, S. Meijer, and S. P. Hoogendoorn, “Managing crowds: The possibilities and limitations of crowd information during urban mass events,” *Planning Support Systems and Smart Cities. Part of the series Lecture*

*Notes in Geoinformation and Cartography*, pp. 77–97, 2015. [Online]. Available: [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-18368-8\\_5](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-18368-8_5)

- [24] M. Kapadia, N. Pelechano, J. Allbeck, and N. Badler, *Virtual Crowds: Steps Toward Behavioral Realism*. Morgan & Claypool Publishers, 2015.
- [25] A. Braun, S. R. Musse, L. P. L. d. Oliveira, and B. E. J. Bodmann, “Modeling individual behaviors in crowd simulation,” in *CASA '03: Proceedings of the 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents (CASA 2003)*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2003, p. 143.
- [26] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek, “Simulating dynamical features of escape panic,” *Nature*, vol. 407, pp. 487–490, Sep 2000. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0009448>
- [27] N. ZHU, J. WANG, and J. SHI, “Application of pedestrian simulation in olympic games,” *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 85 – 90, 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B8H0W-4VDRVV0-7/2/3ff342f75f2deb5c1acdb0484b75e002>
- [28] L. Fu, W. Song, W. Lv, and S. Lo, “Simulation of exit selection behavior using least effort algorithm,” *Transportation Research Procedia*, vol. 2, no. 0, pp. 533 – 540, 2014, the Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014 (PED 2014), 22-24 October 2014, Delft, The Netherlands. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214651400129X>
- [29] L. Ji, Y. Qian, J. Zeng, M. Wang, D. Xu, Y. Yan, and S. Feng, “Simulation of evacuation characteristics using a 2-dimensional cellular automata model for pedestrian dynamics,” *Journal of Applied Mathematics*, 2013.
- [30] L. E. Aik and T. W. Choon, “Simulating evacuations with obstacles using a modified dynamic cellular automata mode,” *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2012, 2012.
- [31] M. L. Chu, P. Parigi, K. Law, and J.-C. Latombe, “Modeling social behaviors in an evacuation simulator,” *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 25, no. 3-4, pp. 373–382, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/cav.1595>
- [32] N. Pelechano, J. Allbeck, and N. Badler, *Virtual Crowds: Methods, Simulation, and Control (Synthesis Lectures on Computer Graphics and Animation)*. Morgan and Claypool Publishers, 2008.
- [33] N. Pelechano, K. O’Brien, B. Silverman, and N. Badler, “Crowd simulation incorporating agent psychological models, roles and communication,” DTIC Document, Tech. Rep., 2005.
- [34] N. Pelechano and N. I. Badler, “Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 26, no. 6, pp. 80–86, Nov 2006.

- [35] N. Pelechano and A. Malkawi, "Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches," *Automation in Construction*, vol. 17, no. 4, pp. 377 – 385, 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580507000908>
- [36] E. Kuligowski and S. Gwynne, "What a user should know when selecting an evacuation model," *Fire Protection Engineering*, pp. 600–611, Oct. 2005. [Online]. Available: <http://magazine.sfpe.org/occupants-and-egress/what-user-should-know-when-selecting-evacuation-model>
- [37] E. D. Kuligowski, R. D. Peacock, and B. L. Hoskins, "A review of building evacuation models, 2nd edition," *Technical Note (NIST TN) - 1680*, December 2010. [Online]. Available: [http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub\\_id=906951](http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=906951)
- [38] V. J. Cassol, R. A. Rodrigues, L. C. C. Carneiro, A. Silva, and S. R. Musse, "Crowd-sim: Uma ferramenta desenvolvida para simulação de multidões," in *I Workshop de Simulação Militar - SBGames2012*, 2012.
- [39] V. Cassol, C. M. Dal Bianco, A. Carvalho, J. Brasil, M. Monteiro, and S. R. Musse, "An experience-based approach to simulate virtual crowd behaviors under the influence of alcohol," in *IVA'15: Proceedings of the 15th International Conference on Intelligent Virtual Agents*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [40] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, "A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths," *SIGART Bull.*, no. 37, pp. 28–29, 1972.