



SIMULAÇÃO DE EMERGÊNCIA: MODELO PARA EVACUAÇÃO EM LOCAIS DE GRANDE PÚBLICO

EMERGENCY SIMULATION: MODEL FOR EVACUATION IN PUBLIC PLACES

Rogério Fernandes da Costa¹

Paulo César Pinheiro²

RESUMO: Este estudo tem como objetivo a criação de um modelo com foco na redução do tempo de evacuação em situações de emergência. As situações de filas e aglomerações humanas são decorrentes em grande parte, do inchaço populacional ocorrido nas últimas décadas, portanto, a análise das tendências gerais de comportamento na circulação dos pedestres contribui para a identificação dos possíveis fluxos de deslocamento em situações de evacuações de multidões. Neste caso, a criação de um modelo que simule condições reais de fugas em pânico pode gerar resultados com aplicação prática em situações do cotidiano, contribuindo assim, para o correto dimensionamento de instalações voltadas para o entretenimento, como salas de cinema e teatro. A redução no tempo de exposição é um fator determinante para minimizar danos e perdas mais graves em situações de emergência.

Palavras-chave: Logística humanitária. Sistemas complexos. Simulação de emergência.

ABSTRACT: *This study aims to create a model focused on reducing the evacuation time in emergency situations. The situations of queues and human agglomerations are due to a large part of the population swelling occurred in the last decades, therefore, the analysis of the general trends of behavior in the pedestrian circulation contributes to the identification of the possible displacement flows in situations of crowd evacuations. In this case, the creation of a model that simulates real conditions of panic leakage can generate results with practical application in everyday situations, thus contributing to the correct*

¹ Especialista em Gestão de Projetos e Gestão de Banco de Dados, Faculdade Interação Americana, 2014.

² Mestre em Administração de Empresas, Faculdades Integradas de Ribeirão Pires, 2002.

dimensioning of entertainment facilities such as movie theaters and theater. Reducing exposure time is a key factor in minimizing severe damage and loss in emergencies.

Keywords: *Humanitarian logistics. Complex systems. Emergency simulation.*

1 INTRODUÇÃO

Pesquisas sobre comportamento humano nas multidões são, antes de tudo, estudos sobre transporte. Integram conhecimentos de diferentes áreas e, na maioria das vezes, buscam analisar o impacto do comportamento coletivo no deslocamento de pedestres. De acordo com Furtado *et al.* (2015), ao considerar a interação de um grande número de agentes independentes, a modelagem em transportes permite analisar processos urbanos de mobilidade.

No contexto da logística humanitária, ainda existe uma lacuna na modelagem voltada para evacuação de multidões. O debate em torno da dinâmica da evacuação de multidões precisa levar em conta os comportamentos emergentes ou o de auto-organização. Tal discussão se faz necessária na medida em que o comportamento coletivo está sujeito à influência da entropia ou incerteza da informação, sendo este um fator limitante e com potencial desastroso.

Da mesma forma, dado a dificuldade em se estabelecer uma métrica que represente a transição de um estado de normalidade para um estado de pânico, desenvolver um modelo simplificado e com maior precisão configura-se como um grande desafio. Exatamente por isso.

Buscando facilitar a compreensão sobre as tendências gerais de comportamento na circulação dos pedestres e os possíveis fluxos de deslocamento em situações de evacuações de multidões, a pesquisa em questão não tem como objetivo a criação de software, limitando-se ao desenvolvimento de um modelo teórico para o fenômeno de pânico em locais com grande aglomeração.

Inicialmente este artigo correlaciona os conceitos de comportamentos emergentes, processos de tomada de decisão e situações de emergência, nesse ínterim, a partir da análise das principais características de modelagem comportamental, os sistemas multiagentes são contextualizados e um modelo teórico é proposto. Por fim, as considerações finais, limitações e direções para futuras pesquisas são apresentadas.

Simulações sobre evacuação de multidões podem contribuir de forma significativa

para a realização de previsões com foco na redução do tempo, sendo este, um fator determinante para minimizar danos e perdas mais graves em casos de emergência.

2 Revisão da Literatura

O comportamento humano é um fenômeno complexo, sua análise pode ocorrer a partir de três estratégias distintas: com foco no indivíduo, nas interações entre os indivíduos dentro de um determinado grupo e dos grupos em uma sociedade. Ao longo dos anos diversos autores vêm se dedicando a uma vertente desses estudos: o comportamento humano em multidões.

Na literatura é bastante difundido o conceito de “lutar ou fugir”, onde os seres humanos quando expostos às situações de medo ou estresse extremo irão enfrentar a situação diretamente ou tomar uma ação evasiva. Esta intenção individual ou coletiva pode gerar competição pelo espaço ou efeito manada (*rational herding*), culminando com as pessoas empurrando, batendo e pisoteando umas as outras (HELBING *et al.*, 2000).

Conhecer as tendências gerais de comportamento na circulação dos pedestres é fundamental para planejar e conceber instalações orientadas para este público, principalmente em locais com grande aglomeração. Visão semelhante é compartilhada pelos autores (BRYAN, 1997; PROULX e RICHARDSON, 2002), de acordo com os autores, o projeto de sistemas eficientes voltados para segurança contra incêndio dependem em grande parte, de uma melhor compreensão sobre os comportamentos humanos e sociais.

Não obstante, devido à percepção do risco ser baseada em características qualitativas e não nas quantitativas, temos a tendência de acreditar que tudo está bem, porque antes daquele momento, quase sempre a situação esteve realmente bem (RIPLEY, 2008).

Em relação a este tema de estudo, chama a atenção o fato do surgimento de comportamentos incoerentes com as situações de emergência, não ser algo incomum. Isto pode ser explicado parcialmente em virtude do comportamento coletivo ocorrer sob o comando de normas emergentes. Desta forma, rumores ou movimentos entre as multidões promovem o surgimento de novas normas ou modificam as normas existentes, podendo levar a massa a tomar decisões irracionais, incoerentes ou erradas (TURNER e KILLIAN, 1957; GOMES, 2013).

Ao considerar a influência das variáveis exógenas, isto é, o processo de mobilização das massas a partir de estímulos externos, ou ainda, das forças endógenas, decorrentes da interação entre os diferentes agentes em um determinado ambiente, podemos propor modelos para dinâmica de multidões sob a ótica da análise do comportamento emergente.

O que distingue um modelo de simulação tradicional de um modelo de simulação multiagentes é a possibilidade de observar o comportamento global do sistema modelado. De acordo com certos critérios, podemos analisar como os fenômenos emergentes interferem no comportamento dos agentes, provocando mudanças nos componentes internos do sistema (GILBERT e TERNA, 2000).

Em outras palavras, comportamentos emergentes podem envolver desde uma simples resposta a estímulos externos, até abordagens deliberativas onde o agente poderá tomar uma decisão por iniciativa própria, orientada por seus objetivos, ou ainda, baseada em informações disponíveis, conhecimento prévio ou recém-adquirido. Vale ressaltar que a percepção de risco é mais ou menos previsível por um grupo social ou por um indivíduo que tenha sido exposto a ele (VEYRET, 2007).

A relevância de estudos nesta área reside na possibilidade de ajudar na concepção de novos espaços destinados a grandes públicos. Ao adequar as instalações as condições necessárias de acessibilidade e segurança ao público, facilitamos os procedimentos de entrada em recintos com grande circulação de pessoas e, em caso de emergência, realizamos o esvaziamento de forma rápida e segura.

3 Modelagem Comportamental

Enquanto a sociologia lida com o comportamento social organizado e institucionalizado, em situações de medo ou estresse extremo (decorrentes de emergências ou desastres, por exemplo) é comum à ocorrência de comportamentos não institucionalizados. Sendo assim, a incerteza é um fator relevante no contexto das simulações envolvendo logística humanitária.

Na tentativa de criar um modelo que representasse o comportamento coletivo no deslocamento de pedestres, Helbing e Molnár (1995) criaram o modelo de “Forças Sociais”. Nesse estudo os autores são enfáticos ao afirmar que a movimentação de um pedestre está sujeita às forças exercidas pelo comportamento coletivo em um determinado

ambiente. Desta forma, podemos inferir que os comportamentos mais complexos como competição pelo espaço, cooperação ou agrupamento podem emergir como diferentes respostas ao mesmo estímulo.

No processo de modelagem de situações de emergência, as propriedades e os comportamentos que constituem a estrutura do agente no mundo real nem sempre estão claras. Neste contexto, Fehler *et al.* (2004) ressaltam que em virtude dos grandes espaços de busca de parâmetros, dos longos tempos de execução das simulações e dos diferentes níveis de observação, a calibração de modelos baseados em agentes apresentam grandes problemas para as técnicas de calibração padrão.

Em abordagem distinta, Windrum *et al.* (2007) descrevem uma metodologia composta de três alternativas fundamentadas em agentes para calibrar e validar empiricamente modelos baseados em agentes. De fato, através de simulação busca-se a construção de um modelo que seja capaz de imitar as características operacionais e dinâmicas de um sistema real, permitindo o estudo e a compreensão desse sistema dentro de um contexto isolado e controlado (FILHO, 2008).

Simulações são amplamente utilizadas na logística para a análise de problemas complexos, o modelo denominado UrbanSim é um exemplo disso. Ao combinar a dinâmica da cidade (considerada como densidade e uso da terra) com a dinâmica de passageiros, mostrou-se um exemplo pioneiro (BORNING *et al.*, 2007). Para alguns estudiosos mais entusiastas, de uma forma geral, as simulações podem ser consideradas uma terceira possibilidade de se fazer ciência, junto com a indução e a dedução (AXELROD, 1998).

No que diz respeito à logística humanitária, modelos multiagentes podem ser usados para simular a interação entre os diversos agentes do setor de construção, transporte e emergência (EDRISSI *et al.*, 2013). Essas simulações oferecem contribuição significativa para a realização de previsões com foco na redução do tempo de resposta aos desastres, sendo este, um fator determinante para minimizar danos e perdas mais graves.

3.1 Modelo Proposto

O escopo desta pesquisa não contempla o desenvolvimento de um software, ele será desenvolvido posteriormente. A partir do modelo proposto, um algoritmo de simulação poderá ser implementado usando uma linguagem típica de programação, tal qual

C++ e Java, ou ainda, através de programas estatísticos tradicionais como o Matlab por exemplo. De acordo com (DOWNEY, 2012; MCKINNEY, 2012; NORTH *et al.*, 2006) a linguagem de alto nível Python também tem sido bastante usada para simulação e modelagem devido a sua flexibilidade.

De um modo geral, a maioria dos modelos existentes pode ser categorizada em fluidos ou sistemas de partículas, sistemas baseados em matriz e sistemas multiagentes. A utilização de modelos para analisar sistemas complexos é uma prática comum, pois tende a representar o sistema estudado de uma forma simplificada (ALTIOK e MELAMED, 2010).

Levando em conta as variáveis relevantes em um ambiente real, a implementação do modelo proposto deverá permitir a inserção de informações sobre dimensões da instalação, fluxo e densidade dos pedestres em um determinado local, nível de pânico das pessoas (abrangendo diferentes escalas), número de entradas e saídas, etc. Nessa abordagem, os agentes poderão tomar decisões com base nas características do ambiente, além disso, de forma a decidir em cada instante qual a melhor ação a executar, um agente poderá ser modelado de acordo com a arquitetura reativa, deliberativa ou híbrida, possuindo conhecimento e capacidade de raciocinar baseado no seu conhecimento.

O fluxo de pedestres em geral é expresso no sistema internacional de unidade (SI) em *ped/m/s*. Segundo a analogia de escoamento de fluidos adotada na hidrodinâmica, o fluxo corresponde à vazão de um fluido dentro de um duto, desta forma, podemos representar o fluxo de pedestres através da seguinte fórmula:

$$q(x) = \frac{n(x)}{t} \quad \text{Onde: O fluxo de pedestres } q \text{ é representado pela quantidade de } n(x) \text{ pedestres que cruzam uma seção durante um intervalo de tempo } t.$$

A concentração de pessoas também pode ser medida usando analogia à hidrologia, dada a correspondência entre concentração e densidade de fluido. Por isso mesmo, a concentração de pessoas por metro quadrado também é chamada de densidade relativa. Tendo a variável p para representar o número de pedestres por unidade de área, a concentração é dada pela expressão:

$$p(t) = \frac{n(t)}{x} \quad \text{Onde: Em um determinado instante } t \text{ é possível contar os } n \text{ pedestres por metro quadrado.}$$

No estudo dos pedestres, a velocidade é adotada como a média de todas as

velocidades dos pedestres que passam por um local em um determinado intervalo de tempo. Normalmente é expressa no SI em m/s e denotada por u .

$$u = \frac{q}{p}$$

A equação fundamental do tráfego, como ficou conhecida pelos operadores logísticos, é a junção dessas três variáveis (fluxo, densidade relativa e velocidade), ela também é bastante utilizada para medir o fluxo de pedestres.

$$q(t, x) = u(t, x)p(tx)$$

Devido à impossibilidade física de se alocar um número maior do que seis pessoas por metro quadrado, de acordo com Vargas *et al.* (2012), a teoria para o fluxo de pedestres é expressa por

$$p \leq 6 \text{ ped/m}^2$$

Contudo, sabe-se que a velocidade de fuga dos indivíduos diminui com o aumento da densidade dos mesmos de forma proporcional, portanto, ao considerar 4 ped/m² inibimos a liberdade de locomoção. A velocidade média padrão, em um ambiente sem obstáculos é de 1,19 m/s e tende a zero quando a densidade é maior que 3,8 pessoas/m² (NELSON e MOWRER, 2002).

A condição de pânico é outro fator relevante relacionado à locomoção, Nestes casos, o aumento da velocidade de movimento pode gerar a ocorrência do aprisionamento de indivíduos contra as paredes ou bloqueio das saídas, sendo estas as principais consequências do chamado “efeito de arco”. Nos últimos anos, grandes tragédias foram registradas, entre estas, 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. Em ambos os casos, a tragédia foi potencializada por falhas nos projetos das instalações.

As portas são os elementos mais importantes para evacuação, por isso, é importante que se forneça, nos recintos de grande aglomeração de pessoas, circulações de saída capazes de comportar, de forma segura, a passagem das pessoas dentro de um período de tempo aceitável. De acordo com dados fornecidos pela Instrução Técnica 012/2010 do Corpo de Bombeiros, a largura dimensionada para o abandono seguro da população do recinto nunca deverá ser inferior a 1,20 m. Para efeito de cálculo, considera-se a passagem de 100 pessoas por minuto para uma largura de 1,20 m.

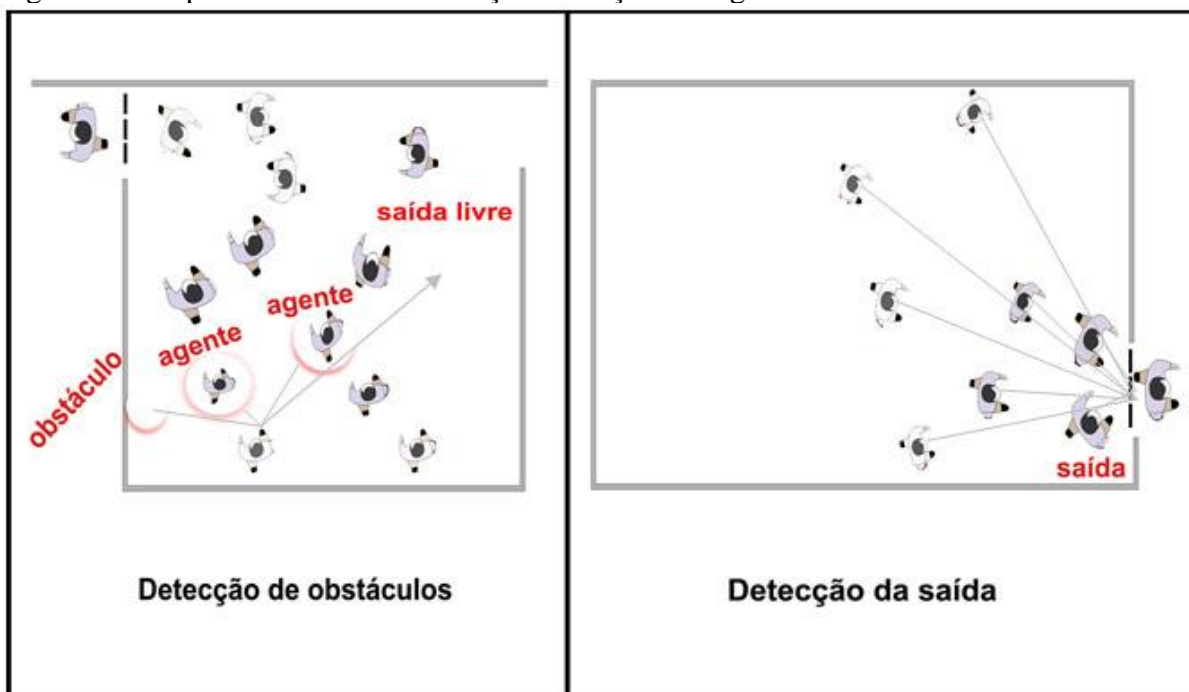
Os parâmetros responsáveis pelos comportamentos de locomoção deverão ser controlados diretamente pelos atuadores de cada agente, correspondendo aos

comportamentos mais simples que cada um pode realizar, ou seja, andar para frente, correr para frente, parar, virar, andar para trás e correr para trás. Para escolher um tipo de locomoção em um momento específico, os passos poderão ser determinados por uma regra de decisão aleatória.

Seguindo essa mecânica, se um agente detectar uma saída a sua frente que não possua nenhum obstáculo impedindo a sua passagem, então o agente escolhe andar para frente. No entanto, se o agente é bloqueado por uma multidão, ele pode escolher aleatoriamente entre parar (ou seja, evitando a colisão), girar (tentando um caminho diferente), ou mover-se para trás (isto é, mantendo seu espaço pessoal de locomoção). Na figura 1 esta mecânica é exemplificada.

Os comportamentos descritos acima servem apenas como referência para criação dos blocos básicos, estes representam as estruturas elementares de controle que serão utilizadas para a construção de comportamentos mais complexos. Para simular padrões comportamentais realistas, devemos levar em conta que raramente os agentes executam o mesmo comportamento de direção. Os padrões podem variar dependendo da situação.

Figura 1: Comportamentos de locomoção e direção dos agentes



Fonte: Elaborada pelos autores

Este modelo poderá ser implementado tendo como aplicação prática um sistema executável de simulação baseado em agentes, permitindo que seus usuários possam observar o comportamento individual ou coletivo (por meio de interpretação qualitativa ou quantitativa) a partir da definição de cenários.

A generalização das regras do modelo poderá ser definida e automatizada através de motor de transformação, assim, seria possível atribuir papéis para os agentes (policial, bombeiro, primeiros socorros, pessoa a ser evacuada, etc.). Desta forma, o nível de observação se tornaria dinâmico, tendo a possibilidade de um mesmo agente desempenhar o mesmo papel em um ou vários grupos, bem como, o mesmo papel poder ser desempenhado por vários agentes.

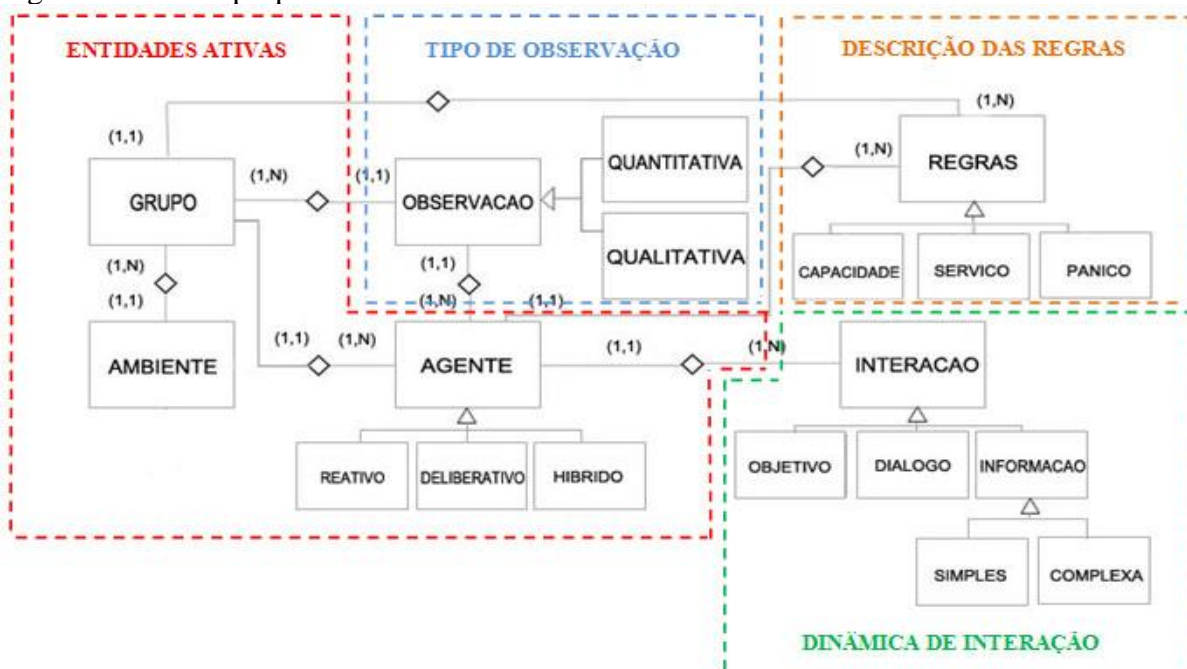
Outro fator importante para a dinâmica é que a aplicação de regras comportamentais não deve se restringir ao conhecimento prévio do agente. As inferências deverão ser guiadas por critérios de evolução do conhecimento, podendo ocorrer a partir da interação, ou seja, em virtude da troca de informações entre os agentes, ou ainda, a partir de estímulos externos.

Tendo em mente que durante o processo de comunicação os agentes estão “competindo uns com os outros”, devemos considerar isso como um possível fator de orientação do seu comportamento. Neste caso, ao perceberem mudanças no ambiente, os agentes podem apresentar uma mistura de diferentes padrões de comportamentos, alternado sua locomoção e direção.

O comportamento humano nas multidões é um fenômeno complexo, ele emerge a partir das interações entre um grupo de agentes autônomos. Tendo como premissa que o comportamento de um único agente é essencialmente não determinista em um nível microscópico; se o sistema for executado várias vezes com a mesma configuração inicial, os agentes não se comportariam exatamente da mesma maneira.

Na figura 2 o modelo teórico é apresentado. Sua representação no nível conceitual busca facilitar a compreensão da complexidade do problema e seus objetivos de simulação, reduzindo assim, a possibilidade de falhas na implementação do modelo.

Figura 2: Modelo proposto



Fonte: Elaborada pelos autores

4 Considerações Finais

Tendo como enfoque a abordagem de sistemas complexos, neste estudo, o processo de modelagem adotado foi orientado através do conceito de múltiplos agentes. Dada a possibilidade de interação entre os diferentes pedestres em um determinado ambiente, o princípio fundamental dos modelos multiagentes foi adotado para explicar como ocorre o surgimento de comportamentos dinâmicos e fenômenos emergentes.

A discussão sobre circulação de pedestres é apropriada no ambiente logístico do setor humanitário, objetivando, além do bem estar dos usuários de instalações físicas, na medida do possível, minimizar os possíveis impactos ocasionados pelas rápidas mudanças no comportamento de locomoção de pedestres em ambientes coletivos.

De forma análoga a maioria das outras experiências de modelagem, a modelagem para evacuação em locais de grande público pode ajudar tomadores de decisão a descrever cenários nos quais os principais parâmetros de ajuste são baseados em fatos observados do mundo real, desta forma, as consequências e efeitos em situações de emergências e desastres podem ser medidos de forma objetiva.

Ainda que essas ferramentas não sejam capazes de identificar os fluxos de forma

exata, elas permitem realizar boas previsões, contribuindo de forma efetiva para o dimensionamento do layout e do arranjo físico das instalações. Portanto, sugere-se que estudos futuros sobre o desenvolvimento de jogos digitais, poderiam ser suplementares ao modelo sugerido, proporcionando procedimentos de resposta a diferentes tipos de situação e cenários.

Referências

ALTIOK, Tayfur; MELAMED, Benjamin. *Simulation modeling and analysis with Arena*. Academic press, 2010.

AXELROD, R. *Advancing the art of simulation in the social sciences*. Complexity, v. 3, n. 2, p. 16–22, December 1998. ISSN 1099-0526. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0526\(199711/12\)3:2<16::AID-CPLX4>3.0.CO;2-K](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-0526(199711/12)3:2<16::AID-CPLX4>3.0.CO;2-K)>. Acessado em: 16/08/2017.

BORNING, A.; WADDELL, P.; FÖRSTER, R. *UrbanSim: using simulation to inform public deliberation and decision-making*. Digital Government, v. 17, p. 439-464, 2008.

BRYAN, J., “*Human Behavior and Fire*,” In Fire Protection Handbook, Eighteenth Edition, Cote, A. (Ed.), National Fire Protection Association, pp. 8.1-8.30, 1997.

Corpo de Bombeiros. *Instrução Técnica 012/2010*. Disponível em: <http://www.corpodebombeiros.sp.gov.br/rev_it/IT12.pdf>. Acessado em 02/09/2017.

DOWNEY, A. B. *Think complexity: complexity science and computational modeling*. 1st ed. United States: O’Reilly Media, 2012.

FEHLER, Manuel; KLÜGL, Franziska; PUPPE, Frank. *Techniques for Analysis and Calibration of Multi-agent Simulations*. In: ESAW. 2004. p. 305-321.

FREITAS Filho, P. J. de. *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena*. Florianópolis - SC: Visual Books, 2008.

FURTADO, Bernardo Alves; SAKOWSKI, Patrícia AM; TÓVOLI, Marina H. *Modelagem de sistemas complexos para políticas públicas*. IPEA-Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/150727_livro_modelagem_sistemas.pdf>. Acesso em 19/08/2017.

GOMES JESUS, Jaqueline. *Psicologia das massas: contexto e desafios brasileiros*. Psicologia & Sociedade, v. 25, n. 3, 2013.

HELBING, Dirk; FARKAS, Illés; VICSEK, Tamas. *Simulating dynamical features of escape panic*. Nature, v. 407, n. 6803, p. 487-490, 2000.

HELBING, Dirk.; MOLNÁR, Péter. *Social force model for pedestrians dynamics*. Physical Review E, 1995.

MCKINNEY, W. *Python for data analysis: data wrangling with pandas, NumPy, and IPython*. 1st ed. China: O’Reilly Media, 2012.

NELSON, H.E.; MOWRER, F.W. (2002) *Emergency movement*, in: P.J. DiNenno, et al. (Eds.), The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3 ed., Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, MD, 2002, pp. 3- 367–3-380.

NORTH, M. J.; COLLIER, N. T.; VOS, J. R. *Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit*. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, v. 16, n. 1, p. 1-25, Jan. 2006.

PROULX, G. and RICHARDSON, J., “*The Human Factor: Building Designers Often Forget How Important the Reactions of Human Occupants Are When they Specify Fire and Life Safety Systems,*” *Canadian Consulting Engineer*, 43(3): 35-36, May 2002.

RIPLEY, Amanda. *Impensável – como e por que as pessoas sobrevivem a desastres*. Globo Livros, 2008.

TURNER, R. & KILLIAN, L. (1954). *Collective Behavior*. Englewood-Cliff, NJ:Prentice-Hall.

VARGAS, Marina *et al.* (2012) *Modelagem do fluxo de pedestres pela teoria macroscópica*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 4, 4318.

VEYRET, Yvette (org.). *Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente*. São Paulo: Contexto, 2007.

WINDRUM, P.; FAGIOLO, G.; MONETA, A. *Empirical validation of agent-based models: Alternatives and prospects*. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, v. 10, n. 2, p. 8, 2007.