Simulação com Lógica *Fuzzy* da Movimentação Bidirecional de Pessoas com Formação de Rios de Escoamento e do Empacotamento Humano*

Simulation with Fuzzy Logic of Human Movement in Bidirectional Flows with the Formation of Lane Formation and Jamming

Henrique Costa Braga¹

Gray Farias Moita²

Paulo Eduardo Maciel de Almeida³

Resumo

Durante a movimentação de pessoas em uma situação de abandono de um ambiente construído, normalmente, se imagina que o escape irá ocorrer em fluxo unidirecional rumo às saídas mais próximas. Todavia, em situações de grande estresse e desorientação, o fluxo humano pode não ser direcionado. Além disso, mesmo numa situação de normalidade, um fluxo bidirecional mal concebido pode causar uma perigosa situação de congestionamento ou comportamento não adaptativo. Dois dos importantes fenômenos que podem acontecer na movimentação bidirecional são as formações dos rios de escoamento e do empacotamento. Na movimentação humana, além dos aspectos físicos, devem também ser considerados os aspectos comportamentais e cognitivos das pessoas envolvidas, cuja natureza é basicamente qualitativa. Para que se possa realizar uma modelagem com fatores de natureza tão distinta, uma ferramenta de inteligência computacional passível de ser usada é a lógica *fuzzy*. Assim, este trabalho tem como objetivo modelar qualitativamente a movimentação humana em fluxos bidirecionais, observando a formação dos rios de escoamento humano e do empacotamento, por meio de uma modelagem celular associada à lógica *fuzzy*.

Palavras-chave: Lógica *Fuzzy*. Movimentação Humana. Simulação. Evacuação de ambientes.

*Submetido em 30/06/2017 – Aceito em 18/09/2017

¹Doutorando em Modelagem Matemática e Computacional, Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional, CEFET-MG, Brasil– bragaseg@yahoo.com.br

²Doutor em Aeronáutica, Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional, CEFET-MG, Brasil– gray@dppg.cefetmg.br

³Doutor em Engenharia, Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional, CEFET-MG, Brasil– pema@lsi.cefetmg.br

Abstract

In a situation of evacuation, it is usually imagined that the human movement will occur in a unidirectional flow, but in high stress and disorientated situations, the flow cannot be directed. Moreover, even in a normal situation, a poorly designed bidirectional flow can cause a dangerous congestion or a non adaptive situation. Two important phenomena that can happen in bidirectional movement are the formation of lane formation and jamming. In human movement, beyond the physical aspects, it should also be considered behavioral and cognitive aspects of the people involved, whose nature is basically qualitative. In order to perform a modeling with such different factors, a computational intelligence tool that can be used is *fuzzy* logic. This work aims to qualitatively model the human movement in bidirectional flows, observing the formation of lane formation and jamming, through a cellular modeling associated with *fuzzy* logic.

Keywords: *Fuzzy* Logic. Human Movement. Simulation. Evacuation.

1 INTRODUÇÃO

As nuances envolvidas na movimentação humana são diversas e multidisciplinares, envolvendo os mais diversos aspectos tais como físicos, ambientais, biológicos, organizacionais e mentais. Esses parâmetros possuem sinergia entre si, são individuais e específicos (cada pessoa e situação são únicas), do grupo (efeitos coletivos e sociais), variáveis (podem mudar radicalmente durante o decorrer do fenômeno) e possibilitam o surgimento de fenômenos emergentes (apresentam complexidade). Assim, a movimentação humana em um ambiente deve ser compreendida como um sistema ergonômico complexo.

Para que se possa entender a movimentação de pessoas em determinado contexto e realizar sua simulação computacional, torna-se necessário a seleção daqueles parâmetros considerados prioritários ou indispensáveis ao problema ou à situação específica, de modo a se simplificar a quantidade de variáveis envolvidas (Navalha de Ockam), mas sem se perder a precisão necessária no contexto em questão. Desse modo, a simulação deve ser plausível de ser realizada, mas, ainda, considerada científica ou tecnicamente relevante. Adicionalmente, será necessário que se criem procedimentos para que alguns desses parâmetros sejam dinamicamente determinados e, também, algoritmos computacionais capazes de relacioná-los dinamicamente e apresentar em uma interface gráfica informações da simulação. Um ponto crítico desse processo está no que se refere à etapa de emulação da tomada de decisões humanas.

Quando em certo ambiente qualquer com uma densidade populacional razoável acontece o deslocamento de pessoas em direções preferenciais não coincidentes, por exemplo na movimentação bidirecional ou em contra fluxo, poderá acontecer a formação de colunas de deslocamento (*lane formation*), também chamadas de rios de escoamento (STILL, 2000; HELBING et al., 2002; SCHADSCHNEIDER et al., 2009).

A força da formação de tais colunas está estreitamente ligada à regra do menor esforço (a energia necessária para uma pessoa quebrar a resistência de obstrução de um grupo que está parado, ou se movendo em outra direção será muito menor se ela o fizer em grupo na forma de uma fila, assim como a melhor possibilidade da manutenção da velocidade normal de encaminhamento). Essas colunas muitas vezes podem se formar naturalmente e sem nenhuma interferência externa, como se houvesse um grande acordo coletivo entre seus participantes (efeito emergente).

A ocorrência dessas colunas é, geralmente, positiva em relação à segurança do ambiente, já que proporcionam a possibilidade de escoamento mesmo em ambientes de significativa densidade populacional. Caso não aconteça a formação dessas colunas, pode ocorrer um empacotamento na movimentação (*jamming*), o que pode ser potencialmente perigoso. O primeiro aspecto perceptível no empacotamento é a paralisação da movimentação. Essa paralisação pode ser momentânea, desfazendo-se por si só, ou permanente. Nesse último caso, será necessária alguma intervenção para o retorno a uma situação de normalidade ou fluxo desimpedido.

Quando da ocorrência de um empacotamento, se muitos resolverem tentar se locomover ou passarem ao mesmo tempo (não aguardar a liberação de espaço ou a formação de colunas

de deslocamento), poderá acontecer uma situação de comportamento não adaptativo, e um dos fenômenos mais potencialmente perigosos no deslocamento humano, o empacotamento crítico.

No empacotamento crítico, ocorre o total contato físico entre as pessoas que acabam mutuamente se prendendo ainda mais e impedindo qualquer movimentação, até mesmo o retorno à situação anterior. Durante esse estágio do empacotamento crítico, por meio do contato físico que ocorre, há grande transmissão de energia entre as pessoas, suficientes até mesmo para derrubar uma parede ou provocar, em alguns minutos, a morte dos envolvidos por compressão do pulmão (SCHADSCHNEIDER et al., 2009). Um leiaute do ambiente associado a uma ocupação inadequada e a um escape descontrolado pode provocar uma situação de empacotamento crítico em instantes.

São inúmeros os exemplos de empacotamentos críticos que resultaram ou contribuíram para a ocorrência de grandes tragédias. Na Figura 1a, tem-se uma imagem do momento de um empacotamento crítico ocorrido durante o Festival das Águas (Phnom Penh, Camboja, 2010). Nesse trágico acontecimento, um tumulto em uma ponte provocou a morte de, pelo menos, 347 pessoas, deixando outras 755 feridas. Na Figura 1b, tem-se uma imagem de outro empacotamento crítico, ocorrido durante o incêndio na casa de shows The Station (West Warwick, Estados Unidos, 2003). Nesta tragédia, 100 pessoas morreram. Na imagem da Figura 1b, nota-se que as pessoas em fuga se empacotaram em uma saída, impedindo ou dificultando sobremaneira o abandono da edificação, ao mesmo tempo em que uma fumaça escura vinda do incêndio no interior da casa de shows passa pela parte superior da saída por sobre as pessoas rumo ao ambiente externo.

Figura 1 – Exemplos de empacotamentos críticos ocorridos em grandes tragédias. (a) Um tumulto no Festival das Águas no Camboja em 2010. (b) Incêndio na casa de shows The Station nos Estados Unidos em 2003

(a)

(b)

Fonte: (a) UOL - Universo Online (2010), e (b) Adaptado de Butler (2003).

Infelizmente, no Brasil também já ocorreram tragédias com esse fenômeno, por exemplo no incêndio da Boate Kiss na cidade de Santa Maria – RS, em 2013 (SILVA FILHO et al., 2013). Nessa tragédia, muitas pessoas em fuga no interior da edificação se locomoveram rumo aos banheiros, achando ser a saída, e ali ficaram presas, não conseguindo mais sair devido ao grande fluxo de pessoas que tomaram a mesma decisão, criando uma barreira à livre movimentação e contribuindo para o grande número de vítimas (cerca de 180 corpos foram retirados dos

banheiros e adjacências).

Neste trabalho, é realizada a simulação da movimentação humana em contra fluxo (bidirecional) de modo a identificar algumas condições que favorecem a ocorrência do empacotamento. Como ferramenta computacional para emular o processo de uma tomada de decisão humana será utilizada a lógica *fuzzy*. A lógica *fuzzy* possibilita se incorporar variáveis qualitativas e quantitativas das mais diversas dentro de um único processo decisório, possui alguns correlatos biológicos (ROJAS, 1996) e permite se contextualizar numericamente um dito conhecimento especialista (ALMEIDA; EVSUKOFF, 2003). A lógica *fuzzy* vem, desse modo, se apresentando como uma promissora ferramenta para pesquisa e modelagem de tomada de decisão humana quando relacionada a aspectos ergonômicos (NUNES, 2010).

A lógica *fuzzy* já foi, anteriormente, utilizada como ferramenta de apoio na simulação da movimentação de pessoas em situações de abandono de ambientes devido a uma situação de emergência, como no caso de um incêndio, mas somente em condição de fluxo unidirecional (BOULMAKOUL; MANDAR, 2011; BRAGA et al., 2014). Assim, esse trabalho tem como objetivo estudar qualitativamente a potencialidade da lógica *fuzzy* na tomada de decisão de uma simulação de movimentação humana em fluxo bidirecional, com a possibilidade do surgimento de rios de escoamento e do empacotamento humano.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Existem diversos estudos e modelos já concebidos para a simulação da movimentação humana (THOMPSON; MARCHANT, 1995; COELHO, 1997; PELECHANO et al., 2008; KOBES et al., 2010). Entretanto, muitos aspectos, principalmente os mentais, ainda se encontram em aberto (SCHADSCHNEIDER et al., 2009). Assim, foi desenvolvido um programa de computador para a modelagem do escape de pessoas em ambientes construídos denominado Fuga (BRAGA et al., 2014) que considera os mais diversos aspectos nas simulações, inclusive a utilização das grandezas ditas mentais.

O modelo do programa Fuga v. 1.0 foi implementado em Matlab® e se baseia em uma modelagem tipo matricial ou celular, considerando dois importantes paradigmas que ainda não tinham sido suficientemente considerados: a ergonomia e a lógica *fuzzy*. Algumas das principais características e variáveis consideradas originalmente pelo modelo são (BRAGA et al., 2014):

- a) apenas são simuladas movimentações segundo uma rota básica unidirecional (não permite a simulação da movimentação em contra fluxo);
- b) o ambiente é discretizado na forma de uma matriz retangular;
- c) a dimensão média da população (ou área de influência) é considerada como sendo de aproximadamente $0,20\ m^2$ (STILL, 2000; SCHADSCHNEIDER et al., 2009), constituída por um quadrado de 0,45 m de lado;
- d) a velocidade efetiva de deslocamento varia em função da distância a uma eventual obstrução à frente, podendo, também, ser individualizada para cada diferente grupo de pessoas

(homens, mulheres, idosos, jovens, etc.), ou mesmo para a especificidade de cada indivíduo (THOMPSON; MARCHANT, 1995; THOMPSON et al., 2015). Entretanto, não é nesse modelo permitida a formação de grupos coesos;

e) o efeito rota preferencial (RP): visando fornecer um percurso inicial idealizado rumo à saída, não considerando o efeito das pessoas, mas somente o leiaute do ambiente;

f) o efeito distância aparente (DA): independente da rota preferencial, considera-se a percepção empírica da distância em relação à saída;

g) o efeito parede (EP): a existência de uma parede restringe a movimentação na sua área de influência;

h) o efeito nível de estresse (NE): conforme Staal (2004), o nível de estresse dos ocupantes influencia na qualidade das decisões tomadas;

i) o efeito inércia (EI): a tendência de se manter a mesma direção de movimentação;

j) o efeito autômato (EA): a influência causada pelos demais ocupantes do ambiente;

k) a cada iteração do programa Fuga, existem até quatro possibilidades de movimentação para cada pessoa dentro do ambiente. Na visão de topo do ambiente abordado, estas possibilidades de movimentação direta são: esquerda, acima, direita e abaixo, conforme uma vizinhança de Von Neumann (BRAGA et al., 2016). A movimentação, quando ocorre, sempre se dá de um elemento de matriz (equivalente a 9 cm) por iteração;

l) a qualidade da rota QR: este efeito é uma função dinâmica de todas as variáveis apresentadas (grandeza de saída). Ela irá valorar a qualidade de cada uma das quatro possíveis movimentações a serem realizadas por cada pessoa na simulação;

m) um processo decisório de tomada de decisões baseado na lógica *fuzzy* pelo sistema de inferência Mamdani, fornecendo o valor de QR.

Os efeitos RP e DA dependem exclusivamente da geometria e da posição do ambiente, considerando, sempre, todas as saídas existentes, sendo calculados antes da simulação e armazenados em duas matrizes, consultadas durante a simulação. Os demais efeitos dependem também das pessoas e, portando, são dinamicamente calculados a cada iteração. Assim, a cada iteração do programa, o sistema *fuzzy* irá valorar pelo valor da QR, de modo independente para cada pessoa, as quatro possíveis movimentações. A rota a ser efetivamente seguida pela pessoa será aquela correspondente ao maior QR, a saber:

$$QR_K = f_{fuzzy}(DA_K, EP_K, NE_K, RP_K, EI_K, EA_K) \quad (1)$$

$$QR_{KE} = \max(QR_K) \quad (2)$$

Onde

f_{fuzzy} = função resposta característica do sistema *fuzzy*;

K = opções alternativas de movimentação (acima, abaixo, direita e esquerda);

KE = opção de movimentação efetivamente escolhida;

QR_K = cada um dos QR para cada uma das K opções de movimentação consideradas pelo sistema;

QR_{KE} = QR da rota efetivamente escolhida.

Dessa maneira, o sistema *fuzzy* possui efetivamente seis grandezas de entrada (DA, EP, NE, RP, EI e EA) e uma grandeza de saída (QR). Na Figura 2, são apresentadas algumas imagens ilustrativas do sistema *fuzzy* e alguns de seus elementos.

Figura 2 – Imagens ilustrativas do sistema *fuzzy*. (a) Representação do sistema adotado, (b) funções de pertinência, (c) conjunto de regras, (d) relação de normas e métodos e (e) a representação de uma pessoa e das possibilidades de movimentação

Fonte: Adaptado de Braga et al. (2014).

Na Figura 2a, tem-se uma representação do sistema *fuzzy* adotado com a indicação em amarelo das seis grandezas de entrada (DA, EP, NE, RP, EI e EA) e, em azul, da grandeza de saída (QR). Em relação às grandezas, visando uma melhor padronização, todas foram criadas como tendo o mesmo universo de discurso [0 a 1], e as mesmas três funções de pertinência no formato triangular com os seguintes termos primários: Z-zero; M-mediano e P-positivo. Na Figura 2b, tem-se a representação das funções de pertinência utilizadas em todas as grandezas de entrada e saída.

Na Figura 2c e na Figura 2d, foram apresentados, respectivamente, o conjunto de regras adotado e a relação de normas e métodos. Finalmente, na Figura 2e, tem-se a representação matricial de uma pessoa (um quadrado de 0,45 m de lado) e uma ilustração das quatro possibilidades de movimentação direta pela vizinhança de Von Neumann.

3 DESENVOLVIMENTO

O programa Fuga, conforme originalmente concebido (BRAGA et al., 2014), é incapaz de realizar a simulação bidirecional da movimentação humana. Isso porque na versão anterior cada pessoa irá buscar a saída mais próxima em relação a si mesmo considerando todas as saídas existentes.

Para sanar essa situação, na nova versão, cada pessoa estará inicialmente associada a somente um conjunto específico selecionado de saídas, e não mais a todas as saídas. Assim, as pessoas irão buscar a saída mais próxima considerando somente o conjunto de saídas a qual está associado, desprezando as outras saídas existentes.

Para isso, ao invés de se ter uma única matriz RP e uma única matriz DA para todas as pessoas, haverá uma matriz RP e DA diferente para cada conjunto considerado de saídas, e cada pessoa estará associada a uma matriz RP e DA específica. Além disso, o cálculo do EA será realizado para cada autômato, considerando a sua matriz RP específica. Dessa maneira, no novo sistema *fuzzy* de tomada de decisões, a equação (1) foi substituída pela equação (3), a saber:

$$QR_{ki} = f_{fuzzy}(DA_{ki}, EP_{ki}, NE_{ki}, RP_{ki}, EI_{ki}, EA_{ki}) \quad (3)$$

onde:

ki = opções de movimentação (numa vista de topo são esquerda, direita, acima e abaixo) para um conjunto i específico de saídas.

Caso a movimentação seja unidirecional, o conjunto de saídas para todas as pessoas será único e a equação (3) se reduzirá a forma original da equação (1). Assim, o modelo e seu sistema de tomada de decisões *fuzzy* passam a realizar simulações, considerando tanto a movimentação unidirecional quanto a opção de movimentação bidirecional, ou mesmo a movimentação multidirecional apesar dessa última estar fora do escopo deste trabalho.

No programa, agora já modificado, serão realizadas simulações de movimentação em contra fluxo em um ambiente na forma de um corredor reto com 5 m de largura e duas saídas de 5 m cada. Uma das saídas está posicionada na extremidade direita do corredor, e a outra saída está posicionada na extremidade esquerda do corredor. As pessoas estão inicialmente distribuídas de forma uniforme ao longo deste corredor. A população que, inicialmente, se encontra do lado direito do corredor irá se mover em direção à saída do lado esquerdo; e as pessoas que, inicialmente, se encontram no lado esquerdo do corredor irão se mover rumo à saída do lado direito.

As pessoas do lado direito ficam, inicialmente, nas mesmas linhas ou direções das pessoas que ficam do lado esquerdo (assim, somente se desviando entre si poderão alcançar a saída). Os experimentos serão realizados para populações de 20, 60, 100 e 200 pessoas. Serão considerados corredores com 50 e 100 m de comprimento.

Para melhor acompanhar a evolução das simulações, as pessoas que se encontram inicialmente no lado esquerdo serão representadas por uma tonalidade mais escura, enquanto as pessoas inicialmente posicionadas do lado direito serão representadas por uma tonalidade mais clara. Na Figura 3, se apresenta o corredor de 50 m com algumas pessoas apenas para a identificação de seus elementos principais.

Figura 3 – Representação esquemática do corredor e seus elementos

Fonte: Elaborada pelos autores.

Na Figura 4 e na Figura 5, se apresentam as representações iniciais de todas as simulações para os corredores de 50 m e de 100 m de comprimento respectivamente.

Figura 4 – Representação do estado inicial das simulações para o corredor de 50 m. (a) Com 20 pessoas, (b) com 60 pessoas, (c) com 100 pessoas e (d) com 200 pessoas

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 5 – Representação do estado inicial das simulações para o corredor de 100 m. (a) Com 20 pessoas, (b) com 60 pessoas, (c) com 100 pessoas e (d) com 200 pessoas

Fonte: Elaborada pelos autores.

As densidades populacionais das simulações para o corredor de 50 m de comprimento são de 0,08 pessoas/ m^2 , 0,24 pessoas/ m^2 , 0,40 pessoas/ m^2 e 0,8 pessoas/ m^2 para as populações de 20, 60, 100 e 200 pessoas respectivamente. Já as densidades populacionais das simulações para o corredor de 100 m de comprimento são de 0,04 pessoas/ m^2 , 0,12 pessoas/ m^2 , 0,20 pessoas/ m^2 e 0,4 pessoas/ m^2 para as populações de 20, 60, 100 e 200 pessoas respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos experimentos realizados, não houve diferenças significativas do comportamento, e, consequentemente, dos resultados obtidos, em função do comprimento do corredor. Entretanto, a densidade populacional localizada teve um papel fundamental nos resultados das simulações.

Nas simulações com 20 pessoas, quando dois ou mais autômatos caminhando em direções opostas se aproximam, o sistema de tomada de decisões *fuzzy* foi capaz de fazer com que as pessoas em contra fluxo encontrassem caminhos alternativos, fazendo, portanto, com que se desviassem umas das outras e conseguissem atravessar todo o ambiente, atingindo a saída. Não foi percebida a formação de colunas ou rios de escoamento, provavelmente por que a densidade populacional foi tão baixa que não foi necessária a sua ocorrência.

Nas simulações com 60 pessoas, quando duas ou mais pessoas caminhando em direções opostas se aproximam, o sistema de tomada de decisões *fuzzy* também foi capaz de fazer com que as mesmas se desviassem, fazendo, portanto, com que as pessoas conseguissem atravessar todo o ambiente e atingir a saída.

Entretanto, nesse caso foi percebida a formação de algumas pequenas colunas ou rios de escoamento, mesmo que incipientes. Na Figura 6, se apresenta uma sequência de imagens da simulação para o corredor de 50 m com 60 pessoas.

Figura 6 – Imagens sequenciais (de cima para baixo) selecionadas da simulação do corredor de 50 m e 60 pessoas

Fonte: Elaborada pelos autores.

Nas simulações com 100 pessoas, quando duas ou mais pessoas estão sendo simuladas caminhando em direções opostas se aproximam, o sistema de tomada de decisões *fuzzy* também foi capaz de fazer com que as mesmas se desviassem, formando alguns rios de escoamento.

Entretanto, a alta densidade populacional fez com que, em determinado momento, ocorresse um congestionamento, que resultou em um empacotamento. Contudo, durante a simulação, o empacotamento foi se dispersando e, no final, todas as pessoas conseguiram se desvencilhar e atingir a saída. Na Figura 7, se apresenta uma sequência de imagens da simulação para o corredor de 50 m com 100 pessoas. A primeira imagem da Figura 7 já se apresenta na situação de empacotamento.

Figura 7 – Imagens sequenciais (de cima para baixo) selecionadas da simulação do corredor de 50 m e 100 pessoas

Fonte: Elaborada pelos autores.

Já nas simulações com 200 pessoas, apesar do sistema *fuzzy* propiciar alguns caminhos alternativos quando duas ou mais pessoas caminhando em direções opostas se aproximam, a densidade populacional foi de tal ordem que o caminho alternativo proposto era logo tomado por outras pessoas.

Nesse caso, mesmo depois de longo tempo de simulação, a movimentação foi totalmente obstruída sem que as pessoas simuladas conseguissem atingir a saída. O total empacotamento foi o fenômeno marcante nas simulações com 200 pessoas. A Figura 8 apresenta uma sequência de imagens da simulação para o corredor de 50 m com 200 pessoas, resultando no empacotamento permanente da movimentação.

Para fins de comparação, na Figura 9, é apresentada uma imagem da simulação para o corredor de 100 m também com 200 pessoas no momento que o empacotamento já estava estabelecido. Assim como para o corredor de 50 m com 200 pessoas, nessa simulação, o empacotamento não se dissipou, bloqueando total e permanentemente a movimentação.

Figura 8 – Imagens sequenciais (de cima para baixo) selecionadas da simulação do corredor de 50 m e 200 pessoas

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 9 – Imagem da simulação da parte do corredor de 100 m com 200 pessoas num momento em que o empacotamento já está estabelecido

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os resultados desses experimentos com total empacotamento na movimentação bidirecional são preocupantes, pois as densidades populacionais em que ocorreram, apesar de elevadas, são inferiores as que podem ocorrer normalmente em casas de shows, mostrando serem esses ambientes potencialmente perigosos e que necessitam de grande cuidado na sua concepção e organização.

A simulação da movimentação humana em um contexto multidirecional (três ou quatro diferentes fluxos atravessando uma mesma região) é uma sugestão para trabalhos futuros. Outra importante alteração futura será o refinamento do modelo *fuzzy*, e de sua respectiva verificação e validação para fluxos não unidirecionais, de modo que se tenha resultados quantitativamente validados e, com isso, a possibilidade de se efetivamente usar o programa como um instrumento de suporte ao projeto arquitetônico.

5 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o programa Fuga modificado pode ser usado, ainda que qualitativamente, na simulação de movimentação humana em situação de fluxo bidirecional (contrário). Verificou-se também que a lógica *fuzzy* é uma potencial ferramenta de inteligência computacional para a emulação da tomada de decisão humana no contexto de movimentação em contra fluxo. Pelas simulações, foi possível observar tanto a formação dos rios de escoamento quanto a possibilidade de empacotamento humano, dependendo das dimensões do ambiente, densidade e distribuição populacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES por todo o apoio recebido.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Paulo E. M.; EVSUKOFF, Alexandre G. Sistemas *Fuzzy*. In: REZENDE, S. O. (Ed.). **Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri: Manole, 2003. cap. 7, p. 169–201.
- BOULMAKOUL, A; MANDAR, M. Fuzzy ant colony paradigm for virtual pedestrian simulation. **Open Operational Research Journal**, Bentham Science Publishers B. V., P. O. Box 1673 Hilversum 1200 BR Netherlands, v. 5, p. 19–29, 2011.
- BRAGA, Henrique Costa; MOITA, Gray Farias; ALMEIDA, Paulo Eduardo Maciel de. Comparação entre os algoritmos de busca pela vizinhança de von neumann ou de moore para geração do mapa de distâncias em um ambiente construído. **Abakós**, v. 4, n. 2, p. 20–40, 2016.
- BRAGA, Henrique Costa et al. Simulação da movimentação de pessoas em situações de emergência: aspectos ergonômicos e computacionais com autômatos *Fuzzy* e sua aplicação ao projeto arquitetônico. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 61–77, 2014.
- BUTLER, Brian. **The Station nightclub fire**. Massachusetts: WPRI-TV of Providence, 2003. <https://www.youtube.com/watch?v=0_9Kj_3VKg4>. Acesso em: 18 set 2017.
- COELHO, António Leça. **Modelação matemática da evacuação de edifícios sujeitos à acção de um incêndio**: Volume II - Anexo. 1997. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, Lisboa.
- HELBING, Dirk et al. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. **Pedestrian and evacuation dynamics**, Springer, Berlin, v. 21, n. 2, p. 21–58, 2002.
- KOBES, Margrethe et al. Building safety and human behaviour in fire: A literature review. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 1–11, 2010.
- NUNES, Isabel L. Handling human-centered systems uncertainty using fuzzy logics. **The Ergonomics Open Journal**, v. 3, p. 38–48, 2010.
- PELECHANO, Nuria; ALLBECK, Jan M; BADLER, Norman I. Virtual crowds: Methods, simulation, and control. **Synthesis Lectures on Computer Graphics and Animation**, Morgan & Claypool Publishers, v. 3, n. 1, p. 1–176, 2008.
- ROJAS, Raúl. Fuzzy logic. In: **Neural networks: a systematic introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 1996. cap. 11, p. 297–318.
- SCHADSCHNEIDER, Andreas et al. Fundamentals of pedestrian and evacuation dynamics. In: **Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering**. Hershey, PA: Information Science Reference, 2009. cap. 6, p. 124–154.
- SILVA FILHO, LCP et al. **Análise do Sinistro na Boate Kiss**. Porto Alegre: CREA-RS, 2013.
- STILL, G Keith. **Crowd dynamics**. 2000. Tese (Doutorado) — University of Warwick, Coventry.
- THOMPSON, Peter et al. Evacuation models are running out of time. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 78, p. 251–261, 2015.
- THOMPSON, Peter A; MARCHANT, Eric W. Testing and application of the computer model ‘simulex’. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 24, n. 2, p. 149–166, 1995.

UOL - Universo Online. **Tumulto em ponte deixa centenas de mortos no Camboja**. 2010. <<https://goo.gl/6ioMfJ>>. Acesso em: 04 set 2017.