



EMULAÇÃO COM LÓGICA FUZZY DA TOMADA DE DECISÃO HUMANA NA SIMULAÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DE PESSOAS EM UM AMBIENTE CONSTRUÍDO

Henrique Costa Braga

Gray Farias Moita

Paulo Eduardo Maciel de Almeida

bragaseg@yahoo.com.br

gray@dppg.cefetmg.br

pema@lsi.cefetmg.br

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional

Av. Amazonas 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte, MG, CEP 30510-000, Brasil

Resumo. *É de grande valor, tanto para a nossa qualidade de vida como nossa segurança, a forma como se dá a movimentação humana dentro de um ambiente construído. Assim existem vários critérios legais previamente estabelecidos como suporte ao projeto e uso desses ambientes. Entretanto, ferramentas computacionais de simulação da movimentação humana podem adicionalmente auxiliar na otimização e melhoria destes ambientes. Uma parte crítica de um programa desses é a etapa da emulação da tomada de decisão humana. A lógica fuzzy aparece como uma potencial ferramenta de inteligência computacional para ser usada nesse contexto. Neste trabalho é detalhado o passo-a-passo do uso da lógica fuzzy para a emulação da tomada de decisão humana efetivamente implementada no programa Fuga v. 2.0. Inicialmente é apresentado todo o sistema fuzzy (grandezas empregadas, regras, normas, funções de pertinência, exemplos), que foi gerado dentro do programa Matlab. Em sequência é mostrado como este sistema fuzzy é transformado em uma matriz fuzzy, sendo então esta matriz fuzzy introduzida dentro do programa Fuga. É apresentado também um exemplo de uma efetiva simulação da movimentação humana usando o sistema fuzzy desenvolvido.*

Palavras-chave: *Lógica fuzzy, Movimentação humana, Ambiente construído, Sistemas multiagentes, Fuga.*

1 INTRODUÇÃO

No mundo moderno a maioria das pessoas permanece grande parte do seu tempo inclusa em ambientes construídos. Isso ocorre cotidianamente nas mais diversas situações como no trabalho, na moradia, em atividades de recreação, no transporte, onde permanecemos dentro desses ambientes artificiais. O modo como nos movemos nesses, ou entre esses, ambientes construídos pode influenciar tanto a nossa qualidade de vida como mesmo a nossa segurança pessoal.

Assim, existem vários critérios legais prescritivos que estabelecem parâmetros de projeto e de ocupação desses mais diversos ambientes visando certo controle da movimentação humana. Entretanto esses códigos são muitas vezes generalistas, não sendo capazes de promover certas melhorias, e até mesmo de se evitar algumas situações perigosas. Dessa forma a existência de ferramentas computacionais que possam auxiliar na verificação das condições de qualidade, fluidez e segurança de um ambiente se torna de relevante valor (BRAGA *et al.*, 2014). Ressalta-se que esses instrumentos computacionais devem ser usados como um complemento à aplicação das normas, leis e critérios legalmente já estabelecidos.

Dessa forma, pela sua relevância, já existem diversos programas e modelos capazes de simular a movimentação humana (COELHO, 1997; PELECHANO *et al.*, 2008; KOBES *et al.*, 2010). Contudo, muitos aspectos, principalmente os mentais, permanecem ainda em aberto (SCHADSCHNEIDER *et al.*, 2009). Uma ferramenta de inteligência computacional especialmente interessante para ser usada nesse contexto é a lógica fuzzy. A lógica fuzzy possibilita se congregarem grandezas qualitativas e quantitativas das mais variadas dentro de um único procedimento decisório, possui alguns correlatos biológicos (ROJAS, 1996) e possibilita se contextualizar numericamente um dito conhecimento especialista (ALMEIDA, EVSUKOFF, 2003).

A lógica fuzzy, pelo seu potencial, já foi previamente empregada como ferramenta de suporte na modelagem da movimentação humana (BOULMAKOUL, MANDAR, 2011; BRAGA *et al.*, 2014), mas ainda de forma preliminar. Assim esse trabalho tem como objetivo apresentar um modelo mais sofisticado para a emulação da tomada de decisão humana num contexto de movimentação multiagente utilizando a lógica fuzzy.

Esse novo modelo fuzzy foi previamente implementado computacionalmente inteiramente utilizando o programa Matlab[®] (versão 7.9.0 /R2009b), com seu *toolkit* fuzzy e suas ferramentas gráficas. O modelo de inferência empregado no seu desenvolvimento foi o de Mamdani. Posteriormente esse modelo fuzzy desenvolvido foi efetivamente introduzido no programa de movimentação humana Fuga v. 2.0 na forma de uma matriz fuzzy.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Seleção da direção preferencial de movimentação

Será possível a cada iteração do sistema fuzzy a escolha entre até cinco possibilidades de movimentação preferencial em relação ao agente dentro do ambiente construído: frente (F),

direita (D), esquerda (E), frente-direita (FD) e frente-esquerda (FE); ou com θ (ângulo considerado em relação ao ângulo do agente) de 0° (sem desvio na direção de movimentação), -90° , $+90^\circ$, -45° e $+45^\circ$ respectivamente. A Figura 1 ilustra estas opções. Uma movimentação diferente, como para trás, é possível desde que feita em etapas ou desvios sucessivos.

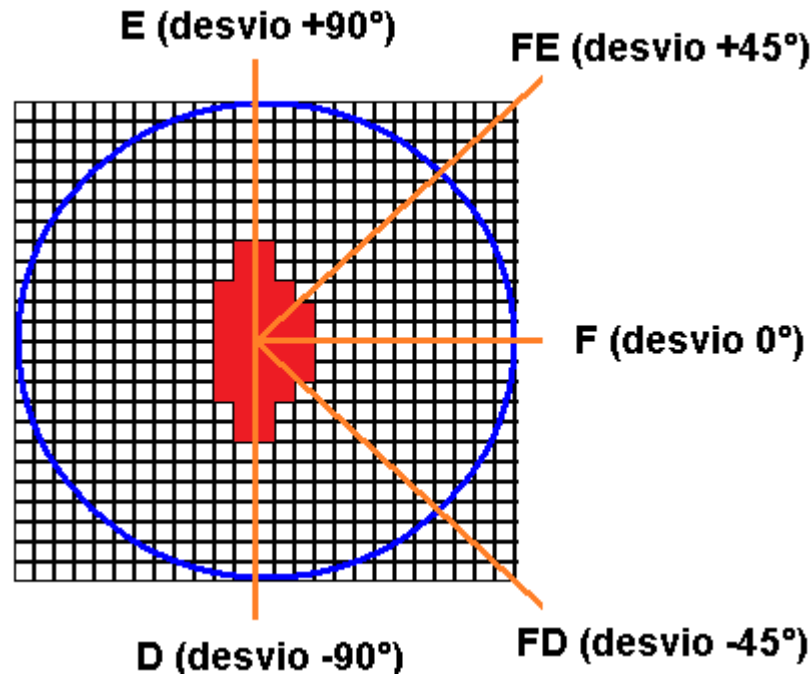


Figura 1. Um agente (em vermelho) em um direcionamento qualquer no ambiente discretizado e as cinco possibilidades de direções preferenciais possíveis a serem seguidas em relação ao agente

Se a direção de movimentação preferencial selecionada pelo sistema fuzzy for diferente da direção de movimentação momentânea, o agente irá procurar alterar seu direcionamento, mas não bruscamente, respeitando os quesitos fisiológicos humanos (BRAGA *et al.*, 2017). Se durante a mudança de direção houver uma seleção de uma nova direção de movimentação preferencial, o agente irá, mesmo sem ter atingido a meta de direção anterior, iniciar a mudança para o novo direcionamento.

2.2 Grandezas de entrada

As variáveis de entrada são aqueles aspectos ergonômicos e ambientais selecionados pelo seu potencial de influenciar a tomada de decisão de uma movimentação humana. Neste trabalho são adotadas as seguintes quatro grandezas de entrada do sistema Fuzzy: ER – efeito rota, EP – efeito parede, EA – efeito agente, e EE – efeito estresse.

O ER é obtido comparando-se a direção de movimentação indicada pelo valor da matriz rota de fuga da casa do agente (direção idealizada), com a efetiva direção de movimentação que o agente faria se movimentasse para esta casa vizinha em verificação. Esta direção idealizada é calculada por um algoritmo tipo *pathfinder* de busca referenciada (BRAGA *et al.*, 2016a) e fornece o direcionamento ideal de todos os pontos do ambiente

discretizado até a saída (ou alvo a ser atingido), visando se atingir a saída no menor percurso possível mas desconsiderando a presença das demais pessoas no ambiente.

Os valores de ER variam conforme a Tabela 1, onde $|\omega|$ é módulo do ângulo de defasagem entre a direção de movimentação em análise e a direção idealizada de movimentação.

Tabela 1. Variação de ER em função do módulo do ângulo de defasagem ($|\omega|$)

$ \omega $	ER
$90^\circ \leq \omega $	0
$67,5^\circ \leq \omega < 90^\circ$	0,25
$45^\circ \leq \omega < 67,5^\circ$	0,5
$22,5^\circ \leq \omega < 45^\circ$	0,75
$0^\circ \leq \omega < 22,5^\circ$	1

Já os EP e EA estão relacionados com a busca, ou manutenção, de uma zona de conforto pessoal (PAN, 2006), considerando o efeito de obstáculos. O EP está relacionado com os obstáculos fixos como paredes e restrições de escada, e o EA está relacionado com os obstáculos móveis, no caso os outros agentes na simulação.

O cálculo de ambos é feito de forma independente, sendo que o valor da distância ao obstáculo fixo mais próximo é diretamente obtido por uma matriz previamente calculada, e o valor da distância ao obstáculo móvel mais próximo por um algoritmo próprio. Os valores de EP ou EA variam conforme Tabela 2, onde do é distância da casa considerada do agente (seu elemento central) ao obstáculo mais próximo.

Tabela 2. Variação de EP (ou EA) em função da distância da casa considerada do agente ao obstáculo mais próximo (do)

do	EP ou EA
$do \leq 60 \text{ cm}$	0
$60 \text{ cm} < do \leq 90 \text{ cm}$	0,25
$90 \text{ cm} < do \leq 1,2 \text{ m}$	0,5
$1,2 \text{ m} < do \leq 1,6 \text{ m}$	0,75
$do \geq 1,6 \text{ m}$	1

Por fim, resta detalhar o EE. Antes de cada simulação (variável de entrada) será determinado o nível inicial de estresse dos agentes (muito baixo, baixo, médio, alto ou muito alto). Baseado na hipótese do U-invertido (STAAL, 2004) e considerando que em situações de baixo ou alto estresse (principalmente em condições de muito baixo ou de muito alto estresse) haverá um reforço na tomada de decisão baseada na percepção aparente da distância à saída mais próxima, em detrimento aos efeitos EP e EA.

Assim o EE irá mais atuar como um reforço em ER. Os valores de EE estão apresentados na Tabela 3. O nível de estresse individual também poderá ser modificado ao longo da simulação.

Tabela 3. Variação de EE em função do nível de estresse

Nível de estresse	EE
Muito baixo	0,75
Baixo	0,25
Médio	0
Alto	0,5
Muito alto	1

2.3 Grandeza de saída

A variável de saída do sistema fuzzy será denominada de QR (qualidade da rota). Serão calculados para cada tomada de decisão fuzzy de um agente cinco valores independentes de QR, sendo um valor de QR para cada uma das possíveis direções de movimentação (F, D, E, FD e FE). A direção efetivamente escolhida como preferencial será aquela com maior QR. Em caso de empate a seleção será aleatória entre estas de maior QR.

Assim:

$$QR_k = f_{Fuzzy}(entradas_k) \quad (1)$$

$$QR_{ke} = \max(QR_k) \quad (2)$$

e

$$ke = k \quad \forall_{QR_{ke} = QR_k} \quad (3)$$

Onde

$entradas = \{ER; EP; EA; EE\}$;

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

k = opções de movimentação, ou seja: F (frente), D (direita), E (esquerda), FD (frente-direita), e FE (frente-esquerda);

ke = a opção de movimentação efetivamente escolhida;

QR_k = cada um dos QR para cada uma da k opções de movimentação calculados pelo sistema fuzzy; e

QR_{ke} = QR da direção efetivamente escolhida.

2.4 Sistema fuzzy

Conforme anteriormente apresentado, o sistema fuzzy é composto por quatro grandezas de entrada (RP, EP, NE e EA) e uma grandeza de saída (QR). A Figura 2 ilustra esquematicamente esse sistema fuzzy.

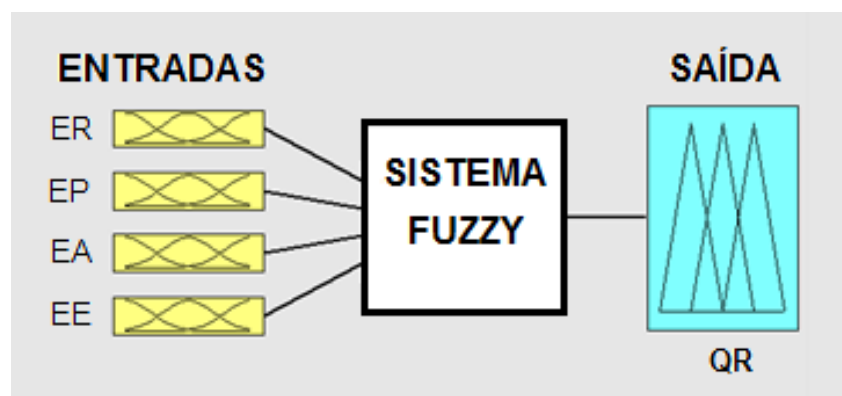


Figura 2. Representação esquemática do sistema fuzzy, com a indicação (em amarelo) das quatro grandezas de entrada (ER, EP, EA e EE) e em azul da grandeza de saída (QR)

Por padronização todas as grandezas foram criadas com 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 U-unitário (Figura 3).

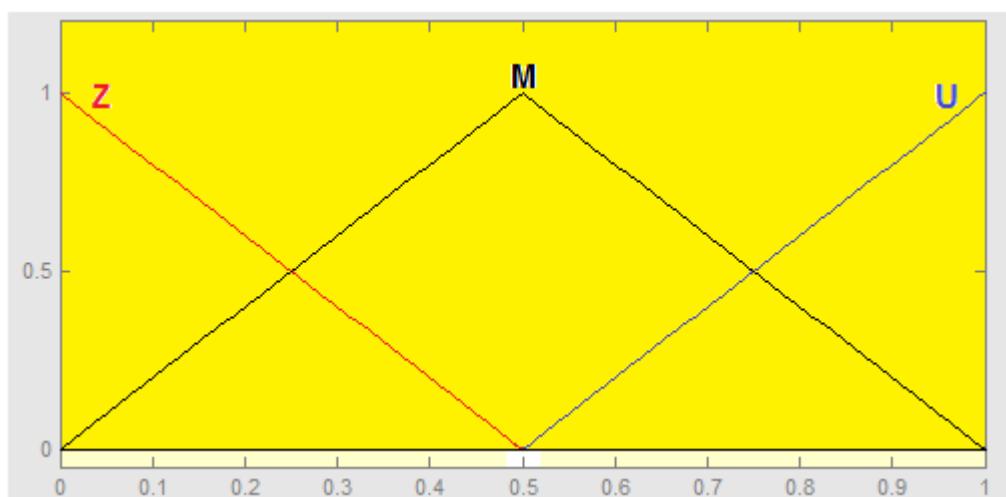


Figura 3. A representação das funções de pertinência (em formato triangular) e termos primários (Z, M, e U) para todas as grandezas de entrada e saída

Na Figura 4a é listado o conjunto de regras fuzzy empregado pelo sistema, e na Figura 4b a relação das normas e métodos para implicação, agregação e especificação utilizados.

Esse conjunto de regras, normas e métodos foram empiricamente obtidos e ajustados, conforme qualidade subjetiva dos resultados apresentados em simulações.

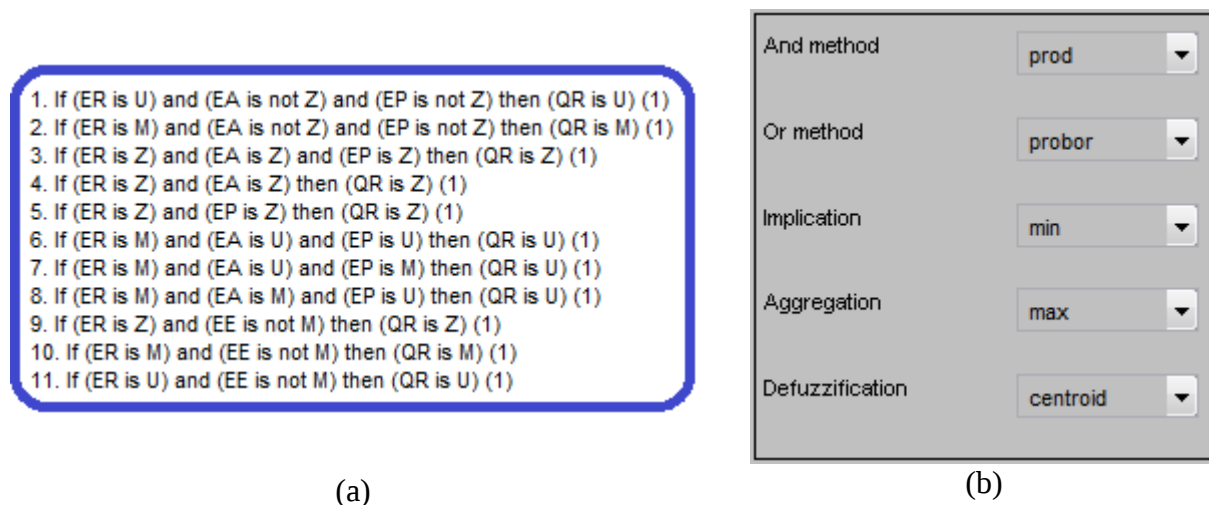


Figura 4. Em (a) o conjunto de regras fuzzy, e em (b) a relação das normas e métodos utilizados

2.5 Matriz fuzzy

O sistema fuzzy ora desenvolvido foi incorporado no programa Fuga v. 2.0, sendo este todo implementado em linguagem Python v. 3.4, como uma matriz fuzzy – MF (BRAGA *et al.*, 2016b). A matriz fuzzy nada mais é que um tipo de representação que incorpora todo o conhecimento fuzzy disponível no sistema, mas cuja consulta se dá de forma direta, portanto muito mais rápida do que aconteceria se fosse necessário se realizar todo o cálculo do sistema fuzzy a cada pesquisa.

Isso se torna especialmente importante no contexto desse trabalho, pois em uma simulação multiagente pode ser que se tenha dezenas, centenas ou mesmo milhares de agentes, necessitando realizar a cada segundo vários processamentos fuzzy em separado para cada um destes agentes. Assim o ganho de tempo com o uso da matriz fuzzy se torna de relevante valor.

Na Figura 5 se apresenta o processo de obtenção de um valor de saída (no caso o QR), tendo-se as grandezas de entrada (no caso ER, EP, EA e EE), diretamente através de uma matriz fuzzy, sem a necessidade de se processar o sistema fuzzy a cada cálculo.

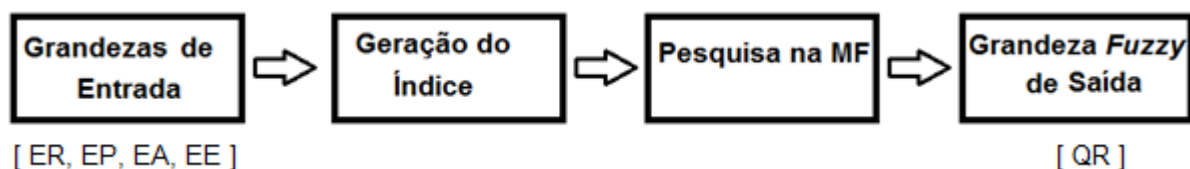


Figura 5. Processo de obtenção de um valor de saída através de uma matriz fuzzy - MF

Fonte: adaptado de Braga *et al.* (2016b).

Assim o Matlab gerou os dados fornecidos pelo sistema fuzzy, considerando todas as possibilidades de valores de entrada, salvando-os na forma de uma tabela fuzzy em um arquivo tipo “.txt.” Este arquivo “.txt” é então lido pelo programa Fuga quando da sua inicialização. Internamente o programa Fuga converte a tabela fuzzy lida do arquivo em sua respectiva matriz fuzzy. Essa matriz fuzzy permanece então na memória dinâmica do computador, que a utiliza sempre que se fizer necessário uma tomada de decisão fuzzy pelo agente sendo simulado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como exemplo, apresentam-se na Figura 6 os gráficos da variação de QR em função de algumas grandezas de entrada, e na Figura 7, apresenta-se a visualização de uma etapa de inferência fuzzy, com o processo de disparo das regras e a conversão fuzzy-escalar (*defuzzification*) do sistema fuzzy em três condições selecionadas (considerando todas as grandezas de entrada nulas; ou todas valendo 0,5; ou todas unitárias).

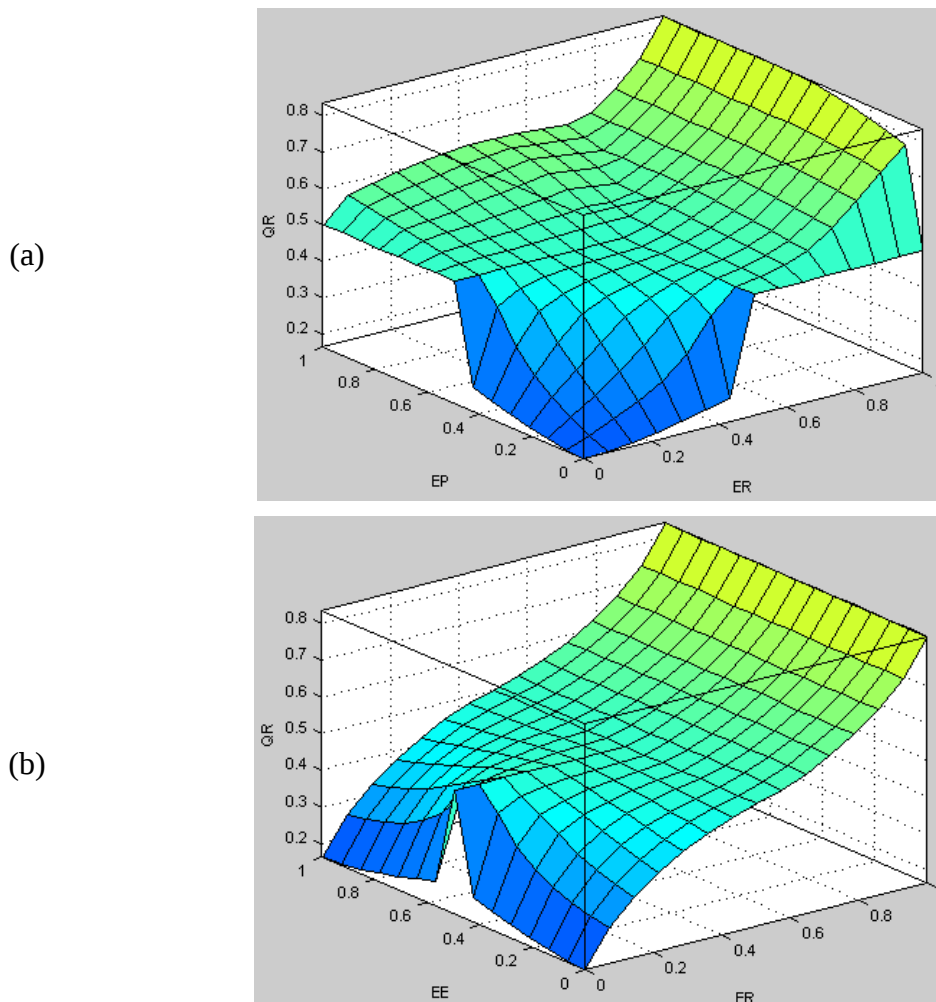


Figura 6. Variação do QR em função de grandezas de entrada. Em (a) em função de ER e EP, e em (b) em função de ER e EE

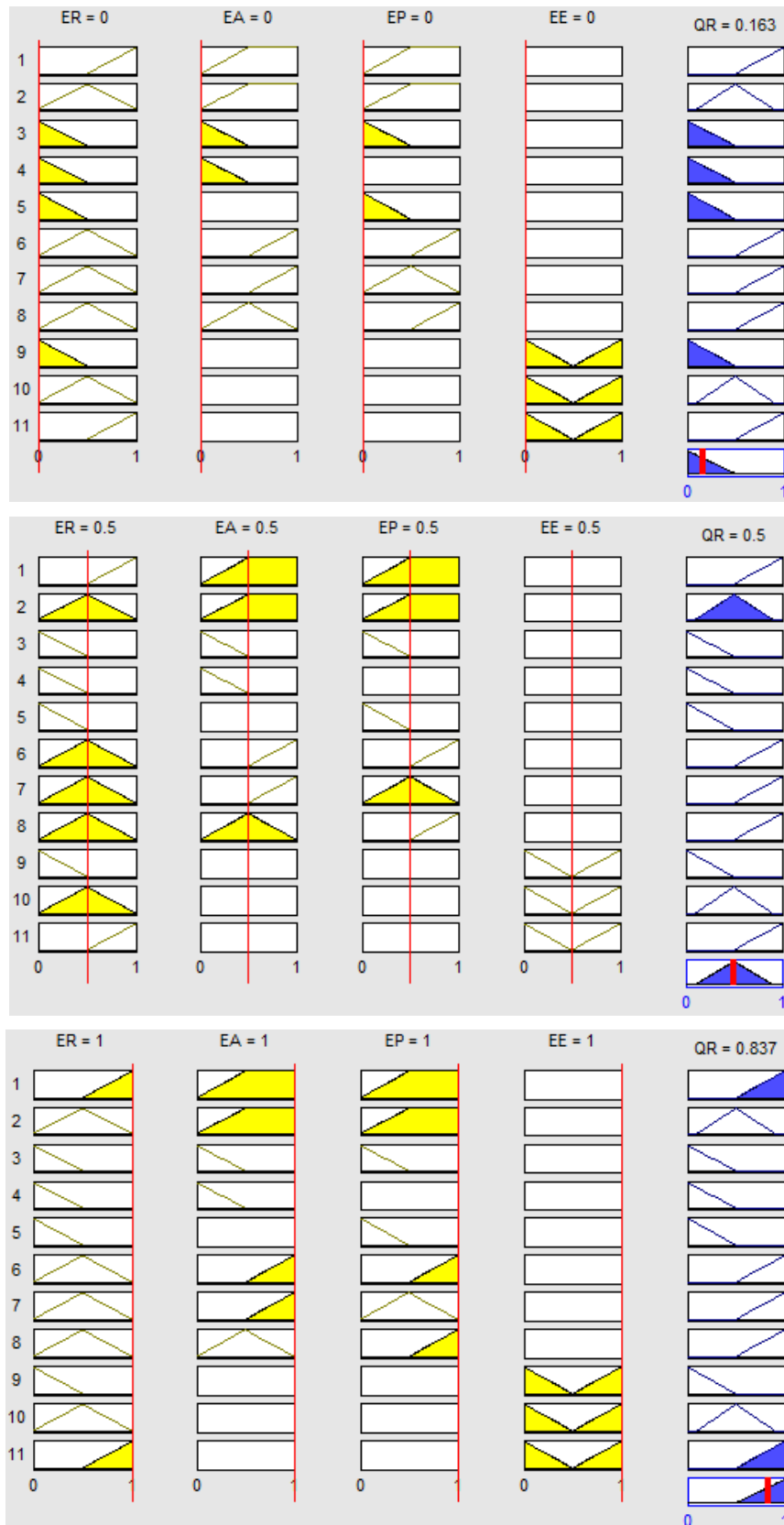


Figura 7. Exemplos da etapa de inferência fuzzy, com o disparo das regras e especificação do valor de saída (acima com todas as grandezas de entrada nulas, no centro valendo 0,5 e abaixo unitárias)

No caso específico dessa aplicação prática, têm-se quatro grandezas de entrada, sendo que cada uma dessas grandezas podem possuir cinco possíveis valores (0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1). Assim a respectiva matriz fuzzy terá o tamanho de 5 x 5 x 5 x 5 elementos, ou seja, com apenas 625 campos todo o conhecimento fuzzy obtido no sistema desenvolvido está plenamente representado. Como todas as grandezas de entradas são discretas não haverá quaisquer erros de arredondamento entre o sistema fuzzy e a respectiva matriz fuzzy. Na Tabela 4 têm-se, como exemplo, partes da tabela fuzzy gerada pelo sistema fuzzy no Matlab. E finalmente na Tabela 5, também como exemplo, a conversão de parte dos índices da tabela fuzzy para a matriz fuzzy.

Tabela 4. Partes da tabela fuzzy gerada pelo sistema no Matlab

ER	EP	EA	EE	QR
0	0	0	0	0,13
0	0	0	0,25	0,13
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0,25	0	0	0	0,411
0,25	0	0	0,25	0,377
0,25	0	0	0,5	0,163
0,25	0	0	0,75	0,377
0,25	0	0	1	0,411
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0,75	0	0	0	0,589
0,75	0	0	0,25	0,576
0,75	0	0	0,5	0,5
0,75	0	0	0,75	0,576
0,75	0	0	1	0,589
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	0,75	0,87
1	1	1	1	0,87

Tabela 5. Exemplo de conversão de uma grandeza de entrada da tabela fuzzy para um índice da matriz fuzzy empregada no programa Fuga

Tabela fuzzy		Matriz fuzzy	
Grandeza de entrada	Valor de entrada	Respectiva dimensão	Índice da dimensão
ER	0	ER _d	1
	0,25		2
	0,5		3
	0,75		4
	1		5

Finalmente, como exemplo de uma efetiva simulação da movimentação de pessoas durante o abandono de um ambiente construído, apresentam-se na Figura 8 duas imagens, uma inicial e a outra obtida durante a simulação com o programa Fuga. Nessa simulação exemplo, 1000 agentes de três tamanhos diferentes (na cor vermelha), inicialmente com posicionamento e orientações aleatórias ao longo do ambiente, vão se direcionar rumo à saída (na cor laranja, localizada no lado direito superior do ambiente – considerando uma vista de topo). Esse ambiente construído possui a forma de sucessivos corredores (ambiente propositalmente sofisticado para facilitar observações do comportamento dos agentes durante a simulação). Ainda nesse ambiente, as paredes estão na cor preta, na cor branca a região interna do ambiente livre para movimentação, e na cor azul claro está uma região externa ao ambiente (não influencia na simulação).

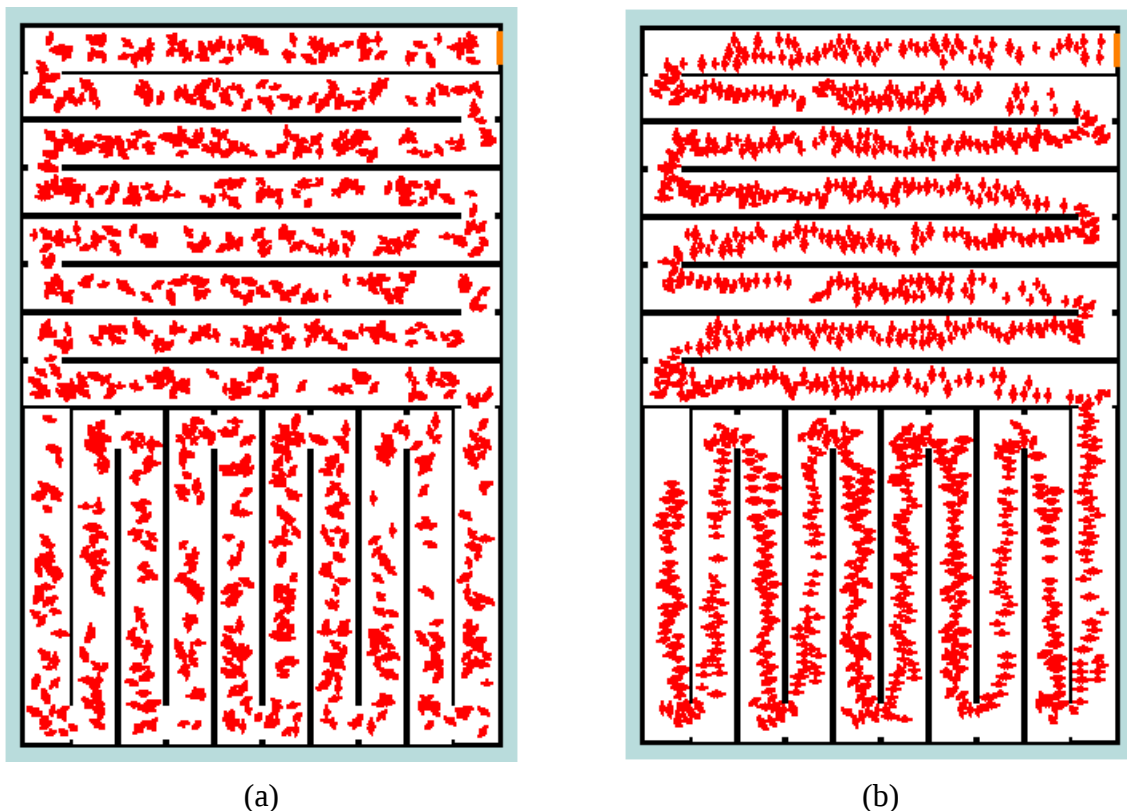


Figura 8. Exemplos da simulação do abandono de um ambiente (agentes na cor vermelha, paredes na cor preta, saída na cor laranja, área interna livre para movimentação na cor branca, e área externa na cor azul claro). Em (a) no momento inicial, e em (b) em um momento durante a simulação de abandono

Nessa simulação, o sistema fuzzy desenvolvido e apresentado como uma ferramenta de inteligência computacional para a emulação da tomada da decisão humana, apesar de ser utilizado em conjunto com rotinas adicionais cuja discussão está fora do escopo desse trabalho, foi efetivamente empregado com resultados qualitativamente promissores.

Um próximo passo está na validação e verificação quantitativa da modelagem implementada. Essa é uma etapa fundamental para que o modelo possa ser efetivamente empregado no suporte ao projeto arquitetônico. Essa etapa de validação e verificação deverá

ser realizada pela comparação entre os resultados encontrados para o tempo total de abandono de alguns ambientes selecionados obtidos em simulações, tanto pelo modelo ora proposto como também por outros modelos já estabelecidos (ROGSCH *et al.*, 2009). Complementarmente, também deverá ser realizada para essa etapa de verificação e validação a aplicação do protocolo proposto pelo NIST – *National Institute of Standards and Technology* para programas de simulação da movimentação humana no contexto do abandono de ambientes construídos (RONCHI *et al.*, 2013).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi detalhado um sistema fuzzy visando à emulação da tomada de decisão humana num contexto de simulação da movimentação humana. A lógica fuzzy se mostrou uma ferramenta de inteligência computacional plenamente plausível de ser implementada e usada, propiciando às pessoas então simuladas a possibilidade selecionar e escolher rotas preferenciais rumo a um destino previamente estabelecido, desviando-se uma das outras e dos demais obstáculos. Para a sua efetiva implementação dentro do corpo do programa de simulação da movimentação humana Fuga v. 2.0, a utilização e o emprego da matriz fuzzy também se mostrou adequada. O uso da matriz fuzzy permitiu a utilização de todo o conhecimento fuzzy anteriormente estabelecido, mas com uma ótima performance computacional, mesmo em uma situação de simulação multiagente.

Como próximo passo a ser desenvolvido, apesar de qualitativamente os resultados terem sido muito satisfatórios, espera-se proceder à etapa de validação e verificação do modelo como um todo, de modo a validar também quantitativamente os resultados das simulações, de modo que essas possam ser efetivamente empregadas para a otimização de ambientes construídos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo suporte recebido.

REFERÊNCIAS

- Almeida, P.E.M. & Evsukoff, A.G., 2003. Sistemas Fuzzy. In: Rezende, S.O. (coord.). *Sistemas inteligentes: Fundamentos e Aplicações*, Cap. 7, Manole, p. 169-202.
- Boulmakoul, A. & Mandar, M., 2011. Fuzzy Ant Colony for Virtual Pedestrian Simulation. *The Open Operational Research Journal*, v. 5, p. 19–29.
- Braga, H.C., Moita, G.F., Camargo, F. & Almeida, P.E.M., 2014. 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, p. 61-77.
- Braga, H.C., Moita, G.F. & Almeida, P.E.M., 2016a. High quality pathfinder algorithm to be used to find the best route to the nearest exit of an environment. In: 8th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics - PED 2016, 2016, Hefei - China. *Anais ...*, v. 1, p. 306-312.

Braga, H.C., Moita, G.F. & Almeida, P.E.M., 2016b. O uso da lógica fuzzy para suporte à tomada de decisões em modelagens de sistemas multiagentes. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, v. 2, n. 9, p. 124-137.

Braga, H.C., Moita, G.F. & Almeida, P.E.M., 2017. Implementação de alguns fatores ergonômicos físicos e cognitivos para a simulação da movimentação humana. In: 16º Ergodesign - Congresso Internacional de Ergonomia e Usabilidade de Interfaces Humano Tecnológica, 2017, Florianópolis. *Anais...*, v. 1, p. 1435-1444.

Coelho, A.L. *Modelação matemática da evacuação de edifícios sujeitos à acção de um incêndio* - estudo dos conhecimentos sobre o movimento e o comportamento de pessoas em edifícios e sua modelação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, v. 2, 1997. Tese (Doutor em Engenharia Civil).

Kobes, M., Helsloot, I., Vries, B. & Post, J.G., 2010. Building safety and human behavior in fire: a literature review. *Fire Safety Journal*, v. 45, p. 1-11.

Pan, X., Han, C.S., Dauber, K. & Law, K.H., 2007. A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. *AI and Society*, n. 2, v. 22, p. 113-132.

Pelechano, N., Allbeck, J. & Badler, N., 2008. *Virtual Crowds: methods, simulation, and control*. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers.

Rogsch C., Klingsch, W., Seyfried, A. & Weigel, H., 2009. Prediction accuracy of evacuation times for high-rise buildings and simple geometries by using different software-tools. In: Traffic and Granular Flow 2007. *Anais...*, v. 1, p. 395-400.

Rojas, R., 1996. Fuzzy logic. In: *Neural networks: a systematic introduction*. Cap. 11, Berlim: Springer-Verlag, p. 297-318.

Ronchi, E., Kuligowski, E.D., Reneke, P.A., Peacock, R.D., Nilsson, D., 2013. *The process of verification and validation of building fire evacuation models*. NIST, 84 p. Technical Note 1822.

Staal, M.A., 2004. *Stress, cognition and human performance: a literature review and conceptual framework*. NASA, 171 p. (Report TM 212824).