



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO
TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Modelagem
Matemática e Computacional

**MODELAGEM COMPUTACIONAL HÍBRIDA
ERGONOMICAMENTE EMBASADA DA MOVIMENTAÇÃO
HUMANA POR AGENTES *FUZZY***

Henrique Costa Braga

Belo Horizonte – MG
Abril de 2019

Henrique Costa Braga

**MODELAGEM COMPUTACIONAL HÍBRIDA ERGONOMICAMENTE
EMBASADA DA MOVIMENTAÇÃO HUMANA POR AGENTES *FUZZY***

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Modelagem Matemática e Computacional.

Área de Concentração: Modelagem Matemática e Computacional

Linha de Pesquisa: Sistemas Inteligentes

Orientador: Gray Farias Moita

Coorientador: Paulo Eduardo Maciel de Almeida

Belo Horizonte – MG
Abril de 2019

B813m Braga, Henrique Costa
Modelagem computacional híbrida ergonomicamente embasada da movimentação humana por agentes fuzzy. / Henrique Costa Braga. -- Belo Horizonte, 2019.
191 f. : il.

Tese (Doutorado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, 2019.
Orientador: Prof. Dr. Gray Farias Moita
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Eduardo Maciel de Almeida

Bibliografia

1. Sistemas Difusos. 2. Edifícios - Evacuação. 3. Engenharia de Incêndio. I. Moita, Gray Farias. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 511.8

FOLHA DE APROVAÇÃO



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

MODELAGEM COMPUTACIONAL HÍBRIDA ERGONOMICAMENTE EMBASADA DA MOVIMENTAÇÃO HUMANA POR AGENTES FUZZY.

Tese de Doutorado apresentada por **Henrique Costa Braga**, em 19 de abril de 2018, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-MG, e aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Gray Farias Moita

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Paulo Eduardo Maciel de Almeida

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Paulo Gustavo von Krüger

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves

Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Sérgio Ricardo de Souza

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Alisson Marques da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Visto e permitida à impressão.

Prof. Dr. José Geraldo Peixoto de Faria
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Modelagem Matemática e Computacional

Dedico este trabalho aos meus pais e filhos,
Ozório (*in memoriam*) e Imaculada,
Caio e Gustavo.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo quero agradecer a DEUS que me permitiu enfrentar este desafio, e também a Nossa Senhora Rainha pela sua permanente interseção e auxílio nos momentos difíceis.

Agradeço ao professor Dr. Gray Farias Moita pela amizade, orientação, paciência e dedicação apresentada.

Agradeço ao professor Dr. Paulo Eduardo Maciel de Almeida pela coorientação desta pesquisa e todo o suporte dado.

Agradeço muitíssimo aos professores Dr. Francisco de Assis das Neves (UFOP), Dr. Paulo Gustavo von Krüger (UFMG), Dr. Sérgio Ricardo de Souza (CEFET-MG) e Dr. Alisson Marques da Silva (CEFET-MG) pelo aceite de participação na banca de defesa dessa tese e realização de seus valorosos comentários.

Agradeço aos professores Dr. José Geraldo Peixoto de Faria, Dra. Elizabeth Fialho Wanner e Dr. Rodrigo Tomás Nogueira Cardoso pelos seus trabalhos como coordenadores da Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional em suas respectivas gestões coincidentes com o meu período de discente.

Agradeço a M.Sc. Maura Jatobá pela sua condução das atividades na secretaria do MMC quando por lá estive, sempre muito prestativa em todos os momentos.

Agradeço aos demais colegas, professores e funcionários do CEFET-MG com os quais tive contato pelo privilégio da amizade, coleguismo e profissionalismo apresentado.

Agradeço a CAPES pelo suporte financeiro recebido.

EPÍGRAFE

**“Não é o conhecimento,
mas sim o conhecimento do conhecimento,
que cria o comprometimento.”**

H.R. Maturana & F.J. Varela

**“Para que o mal triunfe,
basta que os bons não façam nada.”**

Edmund Burke

RESUMO

Neste trabalho foram realizados o desenvolvimento, a implementação computacional, a verificação e a validação de um novo modelo por agentes para a simulação computacional da movimentação humana, utilizando, como premissas, um enfoque híbrido discreto-contínuo da estrutura espacial, a utilização de uma abordagem ergonômica formal mais acurada das principais grandezas envolvidas e o uso da lógica *fuzzy* para emulação do processo de decisão humana. Desenvolveu-se, também, um algoritmo de busca e exploração, denominado BR – Busca Referenciada, cujos resultados são superiores aos algoritmos tradicionais de pesquisa para a geração de mapas de distância. A utilização da lógica *fuzzy* incorporou o conceito da tabela *fuzzy*, o que propicia um aumento da velocidade de processamento sem perda de conhecimento. Diversos exemplos são mostrados, atestando a efetividade e eficiência do modelo proposto. Também é incluída uma aplicação prática do novo modelo, com um estudo relacionado à tragédia da Boate Kiss, no qual simulações de abandono foram realizadas de forma a se compreender melhor a razão para tal tragédia no que tange ao dimensionamento das saídas de emergência e se propor melhorias, inclusive abordando alguns aspectos legais.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem por Agentes, Lógica *Fuzzy*, Incêndio, Ergonomia, Evacuação, Engenharia de Segurança, Parâmetros de Projeto.

ABSTRACT

In this work the development, the computational implementation and the verification and validation of a new model using agents for the computational simulation of the human movement were completed, using as principles a hybrid discrete-continuous approach of the spatial structure, the utilization of an ergonomic approach and the use of fuzzy logic to emulate the human decision-making process. A pathfinder algorithm, called BR – Referenced Search, whose results are superior to the traditional search algorithms to generate distance maps, was also developed. The fuzzy logic incorporated the fuzzy table concept, which allows for an increase in processing speed without loss of knowledge. Several examples are included in order to show the effectiveness and efficiency of the proposed model. A practical application of the new model is also shown, with a study related to the Boate Kiss tragedy, where simulations of abandonment were carried out in such a way that one can better understand the reason of this tragedy with regard to the dimensioning of emergency exits and to propose improvements, including the discussions of some legal aspects.

KEY WORDS: Multiagent Modeling, Fuzzy Logic, Fire, Ergonomics, Evacuation, Safety Engineering, Project Parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Imagens de tragédias envolvendo movimentação de pessoas.	24
Figura 1.2:	Imagem de um empacotamento ocorrido durante uma fuga desordenada causada por um incêndio em uma casa noturna.	25
Figura 1.3:	Imagem da entrada/saída da Boate Kiss.	27
Figura 1.4:	Imagens internas de algumas rotas de fuga da Boate Kiss.	27
Figura 2.1:	Evolução de um AC unidimensional como exemplo de um sistema simples apresentando comportamento complexo (WOLFRAM, 1984).	42
Figura 2.2:	Imagem da frente de uma escola pública onde uma parede separa o passeio da via no entorno do seu portão de acesso (entrada e saída).	42
Figura 2.3:	Imagem de uma trilha formada ao lado da passagem oficial.	44
Figura 2.4:	Representação da auto-organização dos agentes por relações locais no sistema.	48
Figura 2.5:	Representação esquemática de diversos parâmetros e suas inter-relações envolvidas na movimentação humana.	49
Figura 3.1:	Em (a) as possibilidades de pesquisa pela vizinhança de Von Neumann (VVN) e de Moore (VM) e, em (b) a representação da primeira e segunda vizinhança em relação à origem (ou casa base).	55
Figura 3.2:	Representação de um ambiente construído em perspectiva (sem escala).	57
Figura 3.3:	Matrizes MA (a) e MBP iniciais obtidas (b) para o ambiente da Figura 3.2.	57
Figura 3.4:	Em (a) a representação da primeira vizinhança de busca em MA e, em (b) e em (c) as respectivas novas matrizes MAS (visão parcial) e MBS formadas após esta primeira busca pela VVN do primeiro elemento base de MBP.	58
Figura 3.5:	Em (a) a representação da busca em MA considerando o segundo elemento de varredura de MBP e, em (b) e em (c) as respectivas novas matrizes MAS (visão parcial) e MBS em formação.	59
Figura 3.6:	Representação das matrizes MAS finais estilizadas obtidas para o ambiente da Figura 3.2 com as distâncias (em número de elementos) de qualquer elemento em seu interior e o objetivo mais próximo.	61

Figura 3.7:	Perfil da evolução do algoritmo de busca sobre o ambiente quadrado com 1000 elementos de lado, onde a cor branca identifica a área já pesquisada e a saída está localizada no centro do lado inferior.	62
Figura 3.8:	Representações do mapa de distâncias para as variações do algoritmo de busca, em faixas (a) e em 3D (b), do ambiente quadrado de 200 elementos de lado (ou 100 m ² de área com r de 5 cm).	63
Figura 3.9:	Mapa de distâncias para as simulações de um ambiente irregular (≈ 620 m ² de área), várias salas internas e dois objetivos (duas saídas distintas indicadas pelas setas).	64
Figura 3.10:	Seleção de linhas de distância [m] obtidas da Figura 3.8 para as duas variações do algoritmo.	66
Figura 3.11:	Representação esquemática da movimentação entre casas diagonalmente vizinhas.	67
Figura 3.12:	Representações para o algoritmo de busca referenciada, onde em (a) se apresenta um elemento genérico da matriz MBP, e em (b) a respectiva matriz MBP inicial gerada para o ambiente da Figura 3.2.	72
Figura 3.13:	Representações em (a) da primeira vizinhança de busca na matriz MA, e em (b) da respectiva matriz MBS final após esta primeira busca sobre o primeiro elemento da matriz MBP.	73
Figura 3.14:	Representações, em (a) e (b), respectivamente, de parte atualizada da matriz MDA e da matriz MDR, e em (c) da matriz MBS final após a primeira busca sobre toda a matriz MBP inicial.	74
Figura 3.15:	Tempo de processamento em função do número de elementos de cada lado para todas as simulações dos ambientes quadrados.	77
Figura 3.16:	A variação da distância máxima (a) e da distância média (b) para todas as simulações dos ambientes quadrados em função do número de elementos de cada lado.	78
Figura 3.17:	Representação dos mapas de distância gerados para os três algoritmos (VVN, VM, BR) para um ambiente quadrado de 2500 m ² de área e saída no centro do lado inferior.	79
Figura 3.18:	Vista de topo do ambiente da Figura 3.1, estilizado com setas, indicando o melhor caminho (ou um dos melhores) a ser escolhido até o objetivo mais próximo (em laranja), obtido para os três algoritmos (BR, VM e VVN).	80
Figura 3.19:	Representações de algumas das linhas de distância geradas da Figura 3.17 obtidas por todos os algoritmos.	82
Figura 3.20:	Representação esquemática dos mapas de distâncias para um ambiente com diversas salas internas obtidos pelos algoritmos BR, VM e VVN.	84

Figura 3.21:	Representação dos mapas de distância para ambientes cuja geometria faz com a matriz MA um ângulo de 22,5° ou de 45° obtidos para todos os algoritmos. Cada faixa de cor representa um distanciamento de 1 m em relação à saída, identificada em laranja na parte inferior dos ambientes.	85
Figura 4.1:	Representação de um ambiente de dois pavimentos.	88
Figura 4.2:	Imagem ampliada de parte da Figura 4.1 indicando as conexões entre os pavimentos e a escada (<i>link A</i> e <i>link B</i>).	90
Figura 4.3:	Representação do mapa de distâncias para o ambiente de dois pavimentos da Figura 4.1, onde cada faixa de cor indica um distanciamento de 1 m em relação à saída em laranja.	91
Figura 4.4:	Representação em vista de topo (sem escala) de um andar tipo da HIS de cinco pavimentos em estudo.	92
Figura 4.5:	Imagens da HIS estudada neste trabalho (Limeira-SP).	92
Figura 4.6:	Planta baixa simplificada (sem escala) de toda a HIS em uma forma bidimensional (planificada), com a identificação dos seus cinco pavimentos de dois blocos cada, das quatro escadas (oito links) e das saídas no nível térreo.	93
Figura 4.7:	Mapa de distâncias da HIS da Figura 4.6, representado por faixas de cores, onde cada faixa significa um distanciamento de 1 m das saídas, gerado pelo algoritmo BR.	94
Figura 4.8:	Representação esquemática do ambiente de quatro pavimentos e duas torres (à esquerda) e sua representação planificada (à direita).	96
Figura 4.9:	Representação dos mapas de distâncias gerados pelo algoritmo VM para o ambiente da Figura 4.8. Em (a) todas as saídas são consideradas, em (b) somente a saída S1, em (c) somente a saída S2, e em (d) somente a saída S3.	98
Figura 5.1:	Corpo humano, da projeção horizontal realista (STILL, 2000) até sua representação binária efetivamente usada neste trabalho.	101
Figura 5.2:	Pessoa média no seu posicionamento básico.	102
Figura 5.3:	Ambiente circular de 20 m de diâmetro com três conjuntos de cinco agentes agrupados conforme seus tamanhos (pequeno, médio e grande) em diversas angulações.	103
Figura 5.4:	Relação entre a velocidade “normal” de movimentação em função da distância a próxima pessoa mais a frente.	105
Figura 5.5:	A curva geral da velocidade normal de movimentação (v_w) em função da distância entre pessoas (d).	106
Figura 5.6:	Evolução de n em função da distância entre pessoas (d).	107
Figura 5.7:	A curva geral da velocidade normal de movimentação (v_w) em função da distância entre pessoas (d).	108

Figura 5.8:	Estrutura básica do modelo Fuga v. 2.0 e a relação entre os programas Fuga Path e Fuga Move.	113
Figura 5.9:	Exemplo de um relatório analítico final da simulação	115
Figura 6.1:	Um agente em um direcionamento qualquer e as cinco possibilidades de direções preferenciais possíveis a serem seguidas em relação ao posicionamento do agente.	117
Figura 6.2:	Sistema <i>Fuzzy</i> com a indicação (em amarelo) das quatro grandezas de entrada (ER, EP, EA, e EE) e em azul da grandeza de saída (QR).	121
Figura 6.3:	Representação das funções de pertinência e termos primários (Z, M e U) para todas as grandezas.	121
Figura 6.4:	À esquerda a relação das normas e métodos empregados, e à direita o conjunto de regras <i>fuzzy</i> adotado.	122
Figura 6.5:	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.	122
Figura 6.6:	Exemplos da etapa de inferência <i>Fuzzy</i> , com o disparo das regras e especificação do valor de saída (acima com todas as grandezas de entrada nulas, no centro todas valendo 0,5 e abaixo todas unitárias).	123
Figura 6.7:	Etapas de processo de obtenção de um valor de saída através de uma MF.	126
Figura 7.1:	Fluxograma de decisão relativo à movimentação de cada agente.	132
Figura 8.1:	Classificação esquemática dos dados de diversos processos de evacuação.	138
Figura 8.2:	Comparação entre diferentes modelos para simulação de um ambiente simples.	139
Figura 8.3:	Um agente (em vermelho) posicionado a 40 m da saída (em laranja) em um corredor reto de 4 m de largura e 65 m de comprimento.	141
Figura 8.4:	Um agente (em vermelho) posicionado a 20 m da saída (em laranja) sobre a diagonal do ambiente (salão quadrado com 500 m ² de área).	142
Figura 8.5:	Em (a) imagem inicial da simulação de Ko (2003), e em (b) imagem inicial de uma simulação no programa Fuga (ambiente quadrado de 500m ²).	144
Figura 8.6:	Comparação entre diferentes modelos para simulação de um ambiente simples (Figura 9.2), incluindo os resultados obtidos pelo programa Fuga v. 2.0.	145
Figura 8.7:	Imagens sequenciais de uma simulação do abandono de um ambiente por três agentes com diferentes tempos de pré-reação.	146

Figura 8.8:	Imagens da disposição inicial da simulação do abandono de um corredor de 40 m de comprimento por 4 m de largura, por 1, 10, 50, 100, 500, 750 e 1000 agentes, respectivamente as imagens (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g).	148
Figura 8.9:	Imagens da simulação do abandono de 500 pessoas em ambiente com múltiplos corredores em ziguezague. Em (a) na posição inicial, em (b) em um momento durante o abandono, e em (c) recortes de imagens selecionadas de (b). Saídas em laranja.	150
Figura 8.10:	Imagens da simulação do abandono de 200 pessoas em ambiente quadrado (20 m de lado) com duas saídas em lados opostos (em laranja). Em (a) em uma posição aleatória inicial, em (b), (c) e (d) em momentos equivalentes em simulações distintas (respectivamente agentes buscando a saída mais próxima, a saída acima e a saída abaixo – vista de topo).	1452
Figura 8.11:	Imagens do instante inicial de algumas das simulações de abandono do ambiente quadrado com uma saída no centro de um dos lados.	154
Figura 8.12:	Imagens complementares do instante inicial de algumas das simulações de abandono do ambiente quadrado com uma saída (em laranja) no centro de um dos lados.	155
Figura 8.13:	Gráfico com o valor do tempo total médio de escape obtido em função da largura da saída, da população e do tipo do agente (ver Tabela 8.5).	157
Figura 9.1:	Imagem em perspectiva da Boate Kiss.	161
Figura 9.2:	Planta de topo estilizada da Boate Kiss (sem escala), complementada por diversas imagens obtidas de vários pontos de observação.	162
Figura 9.3:	Representação esquemática da região de entrada e saída da Boate Kiss (paredes e portas fechadas em preto, barras em marrom e saída em amarelo).	164
Figura 9.4:	Ambiente simplificado da Boate Kiss. Em (a) no instante inicial da simulação (1000 agentes), e em (b) ilustrando um momento intermediário da simulação.	166
Figura 9.5:	Imagens de parte da frente do ambiente, que fica para a Rua Andradas, com as diversas saídas consideradas (em laranja). Em (a) 1,65 m, em (b) 2,50 m, em (c) 3,2 m, em (d) 3,6 m, em (e) 4,4 m, em (f) 8,8 m, e em (g) 23 m.	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Comparação entre alguns dos diferentes sistemas existentes para simulação da animação de grandes grupos.	51
Tabela 3.1:	Valores de $D_{m\acute{a}x}$, $D_{m\acute{e}d}$ e do tempo de processamento obtidos para todas as simulações da Figura 3.21. As diferenças identificadas entre as distâncias estão em relação ao valor gerado pelo algoritmo BR.	86
Tabela 5.1:	Características dimensionais dos corpos humanos discretizados da Figura 5.1 (vista de topo).	101
Tabela 5.2:	Velocidade média de deslocamento com baixa densidade populacional e sem barreiras.	104
Tabela 6.1:	Variação de EP em função do módulo do ângulo de defasagem ($ \omega $).	118
Tabela 6.2:	Variação de EP (ou EA) em função da distância da casa considerada do agente ao obstáculo mais próximo (do).	119
Tabela 6.3:	Variação de EE em função do nível de estresse.	119
Tabela 6.4:	Partes da tabela <i>fuzzy</i> gerada pelo sistema no Matlab.	127
Tabela 6.5:	Conversão do valor discreto das grandezas de entrada para a respectiva dimensão da matriz <i>fuzzy</i> .	128
Tabela 7.1:	Variação do Peso NE (PNE) em função do nível de estresse.	131
Tabela 8.1:	Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após a simulação de abandono dos ambientes da Figura 9.3.	141
Tabela 8.2:	Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após a simulação de abandono do ambiente da Figura 9.4.	143
Tabela 8.3:	Comparação entre os tempos para total evacuação obtidos pelo Simulex (KO, 2003) e pelo Fuga (população de 1003 pessoas).	144
Tabela 8.4:	Tempos totais de evacuação obtidos para o abandono do ambiente corredor de 40 m de comprimento e 4 m de largura para diversas populações (Figura 9.8).	149
Tabela 8.5:	Valores do tempo total de escapes obtidos com a variação da largura da saída, da população e do tipo do agente (velocidade máxima de 1,5 m/s e orientação inicial aleatória).	156

Tabela 8.6:	Valores do tempo total de escapes obtidos com a variação da largura da saída e da população (tipo de agente médio, velocidade máxima de 1,5 m/s e orientação inicial ideal).	158
Tabela 8.7:	Valores do tempo total de escapes obtidos com a variação da largura da saída e da população (tipo de agente médio, velocidade máxima aleatória e orientação inicial aleatória).	158
Tabela 8.8:	Valores do tempo total de escapes obtidos com a variação da largura da saída e da população (tipo de agente aleatório, velocidade máxima aleatória e orientação inicial aleatória).	159
Tabela 9.1:	Tempo total de abandono para diversas larguras de saídas de emergência para o ambiente da Boate Kiss sem obstruções internas.	168

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1:	Definição das variáveis empregadas nos pseudocódigos dos Quadros 2, 3 e 4.	68
Quadro 3.2:	Listagem do pseudocódigo da função de busca na vizinhança de Von Neumann.	69
Quadro 3.3:	Listagem do pseudocódigo da função de busca na vizinhança de Moore.	70
Quadro 3.4:	Listagem do pseudocódigo da função que efetivamente altera as matrizes.	70

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 5.1: $[x_i' \quad y_i'] = [x_i \quad y_i] \begin{bmatrix} \cos \varphi & \text{sen} \varphi \\ -\text{sen} \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$ 102

Equação 5.2: $\frac{v_w}{v_c} = \left[\frac{d - d_0}{d_s - d_0} \right]^n$ 106

Equação 5.3: $\ln \left(\frac{v_w}{v_c} \right) = n \times \ln \left[\frac{d - d_0}{d_s - d_0} \right]$ 107

Equação 5.4: $n = \frac{\ln \left(\frac{v_w}{v_c} \right)}{\ln \left[\frac{d - d_0}{d_s - d_0} \right]}$ 107

Equação 5.5: $n = 1,11 - 0,63 \times d$ 107

Equação 5.6:
$$\begin{cases} v_w = 0 & \text{se} & d \leq d_0 \\ v_w = v_c \times \left[\frac{d - d_0}{d_s - d_0} \right]^{(1,11 - 0,63 \times d)} & \text{se} & d_0 < d < d_s \\ v_w = v_c & \text{se} & d \geq d_s \end{cases}$$
 108

Equação 5.7: $t_{pr} = t_r + t_a$ 109

Equação 5.8: $t_T = t_{pr} + t_m$ 109

Equação 6.1: $QR_k = f_{Fuzzy}(\text{entradas}_k)$ 120

Equação 6.2: $QR_{ke} = \max(QR_k)$ 120

Equação 6.3:	$ke = k \forall_{QR_{ke} = QR_k}$	120
Equação 6.4:	$dEi = 4 \times Ei$	128
Equação 6.5:	$QR_k = f_{Fuzzy}(0,75; 0; 0; 1)$	129
Equação 6.6:	$QR = MF [(4 \times ER; (4 \times EP); (4 \times EA); (4 \times EE)]$	129
Equação 7.1:	$TRE = TRM \times PNE$	131
Equação 8.1:	$TPR_{ae} \ll TPR_{ac} \ll TPR_{ad}$	147

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	- Autômato celular
AD	- Autômato discreto
ASET	- <i>Available Safe Egress Time</i>
CBM	- Corpo de Bombeiros Militar
CBMGO	- Corpo de Bombeiros Militar de Goiás
CBMMG	- Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais
CBMRS	- Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul
CONFEA	- Conselho Federal de Engenharia e Agronomia
DA	- Distância aparente
DCMS	- <i>Department for Culture, Media and Sport</i> (Reino Unido)
EA	- Efeito autômato
EE	- Efeito estresse
EI	- Efeito inércia
EP	- Efeito parede
IC	- Inteligência Computacional
IEA	- <i>International Ergonomics Association</i>
Dmáx	- Distância máxima
Dméd	- Distância média
Dp	- Distância pontual
IGP-RS	- Instituto-Geral de Perícias do Estado do Rio Grande do Sul
IMO	- <i>International Maritime Organization</i>
ISO	- <i>International Standards Organization</i>
IT	- Instrução Técnica
MA	- Matriz Ambiente
MAS	- Matriz Ambiente Secundário
MBP	- Matriz de Busca Primária
MBS	- Matriz de Busca Secundária

MC	- Matriz Conexões
MF	- Matriz <i>Fuzzy</i>
NBR	- Norma Brasileira
NE	- Nível de estresse
NFPA	- <i>National Fire Protection Association</i>
NIST	- <i>National Institute of Standards and Technology</i>
NO	- Número de ordem
PCT	- Possibilidades de colisão tipo
PMMG	- Polícia Militar de Minas Gerais
PNE	- Peso nível de estresse
QR	- Qualidade da rota
RF	- Rota de fuga
RP	- Rota preferencial
RSET	- <i>Required Safe Egress Time</i>
SFPE	- <i>Society of Fire Protection Engineers</i>
SIGP	- Sistema Integrado de Gestão da Prevenção de Incêndios
TF	- Tabela <i>Fuzzy</i>
TRE	- Tempo de reação efetivo
TRM	- Tempo de reação ao movimento
TRS	- Tempo de reação simples
TT	- Tempo transcorrido
UK	- <i>United Kingdom</i>
UP	- Unidade de passagem
VF	- Vetor <i>Fuzzy</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Apresentação do Tema	23
1.2	Caracterização do Problema.....	28
1.3	Justificativa	31
1.4	Objetivos	32
1.4.1	Objetivo Geral	32
1.4.2	Objetivos Específicos	32
1.5	Metodologia.....	34
1.6	Organização do Trabalho	37
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	40
2.1	Complexidade na Movimentação Humana.....	40
2.2	Interdisciplinaridade	48
2.3	Modelos de Simulação da Movimentação Humana	49
3	ALGORITMOS DE BUSCA E EXPLORAÇÃO	52
3.1	Conceituação	52
3.2	Busca pela Vizinhaça de Von Neumann ou de Moore	54
3.2.1	Vizinhaças de Busca	54
3.2.2	Discretização do Ambiente	56
3.2.3	Algoritmo de Busca Segundo a Vizinhaça de Von Neumann (VVN)	57
3.2.4	Algoritmos de Busca Segundo a Vizinhaça de Moore (VM).....	60
3.2.5	Simulações	61
3.2.6	Pseudocódigos.....	68
3.3	Busca Referenciada	71
3.3.1	Matrizes de Suporte	71
3.3.2	O Algoritmo de Busca Referenciada – Primeiro Laço.....	72

3.3.3	O algoritmo BR – Próximos Laços	75
3.4	Resultados.....	77
3.5	Discussões	80
3.6	Aplicações	87
4	SITUAÇÕES ESPECIAIS DE BUSCA E EXPLORAÇÃO	88
4.1	Ambientes de Múltiplos Andares.....	88
4.2	Múltiplos Objetivos	95
5	ASPECTOS ERGONÔMICOS E COMPUTACIONAIS	99
5.1	Antropometria.....	99
5.2	Rotação das Pessoas	102
5.3	Velocidade Normal de Movimentação	104
5.4	Tempo de Pré-Reação	109
5.5	Implementação Computacional – Detalhes Adicionais	110
5.6	Definições e Estrutura Básica do Programa.....	111
6	SISTEMA <i>FUZZY</i>	116
6.1	Seleção da Direção Preferencial de Movimentação	116
6.2	Grandezas de Entrada	117
6.2.1	<i>ER</i> – Efeito Rota	118
6.2.2	<i>EP</i> e <i>EA</i> – Efeito Parede e Efeito Agente	118
6.2.3	<i>EE</i> – Efeito Estresse.....	119
6.3	Grandeza de Saída.....	120
6.4	Sistema <i>Fuzzy</i>	120
6.4.1	Descrição	120
6.5	A Matriz <i>Fuzzy</i>	124
6.5.1	Definição	124
6.5.2	Aplicação Prática da Tabela <i>Fuzzy</i>	127
7	A EFETIVA MOVIMENTAÇÃO	130
7.1	Tempo para uma Tomada de Decisão	130
7.2	Fluxograma de Decisão.....	131
7.3	Ordem de Verificação dos Agentes	133

7.4	Seleção da Primeira Movimentação Preferencial	134
7.5	Continuação do Laço	135
8	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....	137
8.1	Fundamentação.....	137
8.2	Ensaios.....	140
8.2.1	Velocidade Fixa Linear	140
8.2.2	Velocidade Fixa Angular	142
8.2.3	Comparação com Simulex	144
8.2.4	Comparação com Outros Modelos	145
8.2.5	Verificação do Efeito do Tempo de Pré-Evacuação.....	146
8.2.6	Verificação da Velocidade de Deslocamento em Grupo	147
8.2.7	Verificação do Contorno de Objetos Durante a Movimentação	149
8.2.8	Verificação da Seleção e Uso da Saída.....	151
8.3	Verificação de Efeitos Estocásticos	153
9	APLICAÇÃO PRÁTICA – ESTUDO DO CASO DA BOATE KISS.....	161
9.1	Detalhamento do Ambiente.....	161
9.2	Simulações	165
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	170
10.1	Cumprimento dos Objetivos Específicos	170
10.2	Contribuições	172
10.3	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	174
	REFERÊNCIAS.....	176
	APÊNDICE – PUBLICAÇÕES E PARTICIPAÇÕES	188

1 INTRODUÇÃO

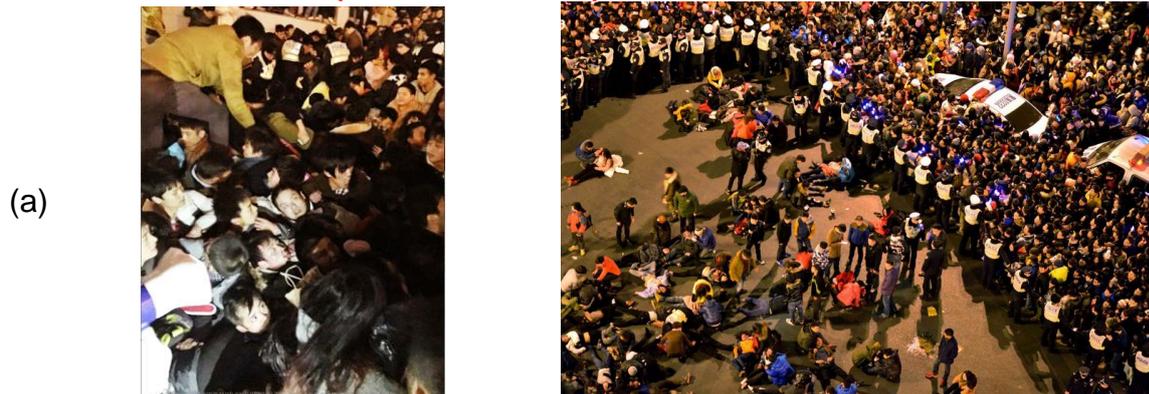
1.1 Apresentação do Tema

A movimentação humana em espaços construídos é uma atividade das mais corriqueiras e aparentemente também das mais triviais. Como vivemos na chamada “Era das Multidões” (LE BON, 1895; CROSSLAND, 2013), as movimentações envolvendo altas densidades populacionais são comuns. Talvez, devido a isso, muitas vezes não sejam devidamente consideradas, ou até mesmo subestimadas.

A movimentação humana é um fenômeno sofisticado, com a possibilidade do surgimento de fenômenos complexos, cuja forma de realização pode afetar de sobremaneira tanto a qualidade de vida diária como a segurança pessoal. Adicionalmente, algumas situações específicas, como a ocorrência de grandes concentrações populacionais ou a evacuação de um ambiente, possuem potenciais e reais riscos aos envolvidos, que infelizmente podem levar ou contribuir para a ocorrência até mesmo de grandes tragédias. Por outro lado, medidas adequadas de planejamento e gestão de um ambiente construído contribuem para torná-lo mais seguro, mesmo em condições críticas (AVERILL et al., 2007), além de serem requisitos legais (ABNT, 2001; CLARET, MATTEDI, 2011; CBMMG, 2017).

Essas situações de alto risco são cotidianas e nos sujeitamos a elas frequentemente em locais como estádios, shows, igrejas, estações de metro, shopping, auditórios, comícios, escolas, etc. Mesmo em espaços aparentemente abertos, o congestionamento e o fluxo desordenado podem levar à ocorrência de tragédias em instantes. Por exemplo, na Figura 1.1, apresenta-se algumas imagens de tragédias ocorridas na última década na China, no Camboja e na Alemanha, envolvendo a movimentação humana em espaços aparentemente abertos.

China, 2014/2015 (36 vítimas fatais)



Camboja, 2010 (347 vítimas fatais)



Alemanha, 2010 (21 vítimas fatais)



Figura 1.1: Imagens de tragédias envolvendo movimentação de pessoas¹.

Estas distintas tragédias ilustradas na Figura 1.1 tiveram em comum o descontrole da população. A tragédia na China ocorreu na cidade de Shanghai durante os festejos relacionados com a virada do ano de 2014 para 2015. Uma superpopulação não esperada pelas autoridades perdeu o controle quando começaram a distribuir cupons

¹ Fonte das imagens (acesso em 22 de março de 2018):
 acima à esquerda: <<http://www.scmp.com/news/china/article/1672869/shanghai-police-admit-underestimating-crowd-ahead-new-years-eve-tragedy>>; acima à direita: <<http://time.com/3651668/shanghai-stampede/>>; centro: <<http://www.vancouversun.com/sports/hockey/More+than+Cambodian+festival+revellers+killed+bridge+stampede/3867455/story.html>>; abaixo: <<https://www.cuckoo.ie/blog/safety-at-events/love-parade-charges.html>>.

de desconto em certo momento, ocasionando 36 fatalidades e dezenas de feridos. No Camboja, a tragédia ocorreu no dia 22 de novembro de 2010, durante o Festival das Águas, na cidade de Phnom Penh, resultando na morte de, pelo menos, 347 pessoas, e deixando outras 755 feridas. Relatório oficial da perícia afirma que a debandada foi iniciada pelo pavor causado pelo balanço da ponte. Já na Alemanha a tragédia ocorreu em 24 de julho de 2010, na cidade de Duisburg, durante a *Love Parade*, evento anual de música eletrônica no qual 21 pessoas faleceram e mais de 500 foram vitimadas (HELBING, MUKERJI, 2012).

Entretanto, mesmo locais que não aparentam ter grandes concentrações de pessoas, ou que possuem visualmente áreas vazias, podem se tornar perigosos. Em uma situação de evacuação, a concentração humana tende a ser incrementada em certos locais, devido à possibilidade de muitas pessoas buscarem ao mesmo tempo poucas rotas de fuga e pela passagem em pontos mais complexos e não livres (escadas, quinas, passagens). Estas situações podem levar à ocorrência de acidentes por colisões entre pessoas, esmagamento, pisoteamento ou a ocorrência do empacotamento, quando o fluxo humano é interrompido pelas próprias pessoas.

Na Figura 1.2 apresenta-se a imagem real de um empacotamento ocorrido durante uma evacuação em uma situação de incêndio em uma casa noturna nos Estados Unidos em 2003. Este empacotamento bloqueou a passagem das pessoas pela saída e contribuiu na magnitude da tragédia (100 mortes).

Estados Unidos, 2003 (100 vítimas fatais)



Figura 1.2: Imagem de um empacotamento ocorrido em uma fuga desordenada durante um incêndio de uma casa noturna (adaptado de BUTLER, 2003).

Devido a sua importância, existem diversos trabalhos já realizados sobre a movimentação humana. Portanto há razoável quantidade de literatura científica e técnica, além de procedimentos, manuais, guias, padrões e códigos legais a serem aplicados no projeto de engenharia e arquitetura dos espaços construídos. Entretanto, pela natureza, frequência e gravidade dos acidentes fica claro que muito conhecimento, e sua respectiva devida aplicação, ainda se faz realmente necessário sobre o assunto.

O Brasil também foi recentemente palco de uma grande tragédia envolvendo a movimentação humana em situação de abandono por incêndio em uma casa noturna. O caso aconteceu na cidade de Santa Maria – RS em 27 de janeiro de 2013, onde 242 pessoas, na maioria jovens estudantes universitários, perderam a vida (BRAGA, MOITA, 2017). Esta foi a segunda maior tragédia oficial desta natureza na história do Brasil (a maior dos últimos 50 anos), sendo somente superada pelo incêndio de 1961 do Gran Circus Norte-Americano em Niterói (SARMENTO, 1961; KNAUSS, 2007).

Em Santa Maria, o estabelecimento do sinistro era a casa noturna Boate Kiss (nome oficial “Santo Empreendimentos Ltda”). Como normalmente acontece em tragédias desta magnitude, são muitos os agentes causadores e potencializadores (SILVA FILHO et al., 2013). O trecho abaixo, transcrito do inquérito policial da tragédia (ARIGONY et al., 2013), ajuda a ilustrar alguns dos inúmeros problemas ocorridos:

“O pânico tomou conta dos indivíduos que estavam na boate, fazendo com que as pessoas se desesperassem e tentassem deixar o local, mas a Boate Kiss possuía apenas uma saída que dava acesso ao seu exterior. A referida saída foi absolutamente insuficiente para dar vazão à quantidade de pessoas que se amontoaram na tentativa desesperada de deixar o local, sendo que muitas delas morreram buscando a saída. Não bastasse a existência de uma única saída, contribuiu também para o resultado danoso a existência de diversos obstáculos físicos, guarda-corpos (barras de contenção) nas rotas de saída, degraus, deficiência da iluminação de emergência, falta de indicação ou sinalização das rotas de fuga, além do local estar superlotado, fatores que em conjunto dificultaram a rápida evacuação do local.”

Melhor exemplificando um dos pontos acima citados, a Boate Kiss deveria possuir duas saídas de emergência (ABNT, 2001; BRENTANO, 2010), mas estas saídas

foram postas lado a lado, de forma que, na realidade, possuía apenas uma única saída dupla (Figura 1.3), além de internamente sua configuração parecer um labirinto (Figura 1.4).

Brasil, 2013 (242 vítimas fatais)



Figura 1.3: Imagem da entrada/saída da Boate Kiss².



Figura 1.4: Imagens internas de algumas rotas de fuga da Boate Kiss.

Fonte: adaptado de Silva Filho *et al.* (2013, Anexo II).

² Disponível em <<http://img571.imageshack.us/img571/4186/kissfglobocom.jpg>>. Acesso em 06 jan. 2015.

Perícia realizada posteriormente considerou esta única saída como irregular (TREVISAN, JESUS, 2013), mas este não é um ponto completamente bem tratado nas normas aplicáveis. Adicionalmente, foi comprovado que esta questão da efetiva única saída dupla, ao invés de duas saídas independentes, era de conhecimento da prefeitura municipal e também do CBMRS – Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul. Entretanto, estes órgãos, provavelmente devido às lacunas geradas pela redação das normas prescritivas pertinentes, e pelo relaxamento e descaso institucionalizado com a fiscalização da segurança contra incêndio (TREVISAN, JESUS, 2013), não coibiram esta condição.

No RS, a simplificação e a desburocratização dos processos de concessões de alvarás de incêndio foram de tal ordem que, mesmo um ambiente do porte da Boate Kiss, na prática conseguiu seu alvará de incêndio sem ter um projeto de incêndio atualizado elaborado por um profissional habilitado (ARIGONY et al., 2013; TREVISAN, JESUS, 2013)³.

Especificamente para a Boate Kiss, apesar das inúmeras irregularidades constatadas, em declarações à imprensa⁴, um oficial do CBMRS disse “eu tenho dito que ela **estava regular no que tange a prevenção de incêndios**, querendo ou não a norma é uma norma muito, muito acanhada”, e também disse “aquele estabelecimento **estava dentro das normas brasileiras de segurança contra incêndio**, seja na parte de porta, seja nas barras anti-pânico, seja na iluminação de emergência, seja nos extintores, isso estava ok” [sic] (grifos do autor).

1.2 Caracterização do Problema

O estado da arte do conhecimento sobre a movimentação humana e sua modelagem, com enfoque especial nas situações de emergência, foi apresentado por vários autores (SCHADSCHNEIDER et al., 2009a; 2009b; KOBES et al., 2010; KULIGOWSKI, 2013; WANG, SUN, 2014) e pontos manifestados como sendo

³ Na data do sinistro, o Alvará de Incêndio estava vencido, apesar de estar em processo de renovação.

⁴ Disponíveis em <<https://www.youtube.com/watch?v=Lq6NkkKD3DI>>, aprox. 36:00 min; e em <<https://br.noticias.yahoo.com/video/boate-estava-regular-diz-bombeiro-185217040.html>>. Acesso em 14 jan. 2015.

aqueles em que mais lacunas existem no conhecimento são os relativos à determinação e incorporação das variáveis ditas humanas (cognitivas e comportamentais) pelas pessoas em movimentação nos modelos de movimentação humana, tanto em condições de normalidade como de emergência.

Tem-se que projetos baseados em desempenho⁵ são atualmente uma alternativa real para a área de proteção contra incêndio e pânico (MEACHAM, 1998; LUNDIN, 2005; WONG, 2008; SHI et al., 2011; NFPA, 2014), e estes têm atraído o interesse de muitos construtores e projetistas⁶. Entretanto, seu uso indiscriminado e sem um devido cuidado na redação da legislação pode possibilitar brechas legais perigosas, por exemplo permitindo a diminuição artificial com o rigor das exigências de um projeto, de uma maneira que as normas prescritivas podem mais facilmente minimizar pela imposição de algumas condições mínimas no projeto (BABRAUSKAS, 1999; CARATTIN, BRANNIGAN, 2014).

Como exemplo da má utilização de programas computacionais, pode-se citar o próprio caso da Boate Kiss. O RS adota na quase totalidade dos seus municípios um sistema informatizado, denominado SIGPI (Sistema Integrado de Gestão da Prevenção de Incêndios), que, além da parte administrativa dos processos, também considera a parte técnica. O SIGPI, em tese, contém todas as normas e diretrizes técnicas de observação exigidas pela legislação aplicável, e foi considerado como sendo um grande sucesso⁷. Entretanto, segundo Arigony et al. (2013), o SIGPI “é falho, incompleto, simplificado ao ponto de dar primazia à quantidade (de vistoriais superficiais) em detrimento da qualidade ...”.

Ainda conforme Arigony et al. (2013), a situação é de tal gravidade que “o sistema SIGPI teve colaboração para o incêndio que ocorreu na Boate Kiss e, conseqüentemente, nas mortes e lesões que dele decorreram”. Ressalta-se que mais

⁵ “ditam o que deve ser alcançado quanto à segurança contra incêndios, ficando a critério do profissional responsável pela elaboração do projeto, bem como da autoridade que aprovará o projeto, como obter a segurança da edificação, considerando o desempenho de todos os agentes envolvidos no processo: o fenômeno fogo, a edificação em si, os materiais contidos na edificação e os ocupantes” (TAVARES et al., 2002, p. 2).

⁶ A SFPE – Society of Fire Protection Engineers realiza a cada dois anos a *International Conference on Performance-based Codes and Fire Safety Design Methods*.

⁷ França, M., Felipetti, C. Sistema Integrado da Gestão da Prevenção ao de Incêndio - SIGPI. III SEMARES, 2009. (slides).

de 100.000 outros processos de combate a incêndio e pânico do RS também foram aprovados pelo SIGPI, em detrimento de um projeto técnico formal de combate a incêndio e pânico, inclusive de ambientes similares ao da Boate Kiss. Por casos como este, e infelizmente muitos outros (MACHI JÚNIOR et al., 2014), tem-se que a ética na engenharia (CONFEA, 2013), neste caso especificamente na engenharia de incêndio, é um assunto que merece ser mais bem discutido.

É verdade que o SIGPI não é um efetivo programa de desempenho (é apenas uma espécie de automação da aplicação das normas prescritivas), mas, de qualquer forma, ajuda a ilustrar alguns dos problemas advindos da utilização inadequada de programas ou sistemas. Entretanto, mesmo reais e sérios programas de desempenho especificamente para a modelagem do comportamento humano, apesar dos avanços já alcançados, ainda possuem significativas divergências (SCHADSCHNEIDER et al., 2009a, 2009b; ZHANG, 2012), estando em um estado no qual se torna ainda necessária muita pesquisa e desenvolvimento para permitir que seu uso seja realmente geral e consciente.

Adicionalmente, existe a necessidade de se discutir e revisar alguns dos parâmetros de projetos de engenharia visando à concepção e manutenção de ambientes construídos mais adequados às características psicofisiológicas das pessoas em movimento, em todas as situações, principalmente nas de emergência. Muitas questões, como os congestionamentos, configurações arquitetônicas internas e saídas de emergência, estão em aberto. Assim, dois pontos normativos que devem ser questionados são:

Qual seria o detalhamento legal mínimo, relacionado ao dimensionamento das saídas de emergência em ambientes do tipo casas de show, para se evitar já no projeto de engenharia a ocorrência de congestionamentos e conflitos humanos, impedindo sua ocorrência e/ou minimizando suas consequências, inclusive em situações de emergências?

Poderia um modelo computacional efetivamente auxiliar o projetista na busca de respostas como essas para um ambiente específico?

1.3 Justificativa

O desenvolvimento e implementação de um novo modelo computacional para a simulação da movimentação humana em situações de emergência se justifica, já que existe, nos modelos atuais (SCHADSCNEIDER et al, 2010; PELECHANO et al., 2016), uma lacuna na efetivação de características comportamentais relacionadas à tomada de decisão humana. Esse é um parâmetro importante para que o modelo possa ser efetivamente usado pelos profissionais envolvidos, pois somente assim pode-se ter simulações mais realistas, contribuindo na concepção de ambientes construídos mais seguros, servindo como uma ferramenta complementar ao simples uso da legislação, ressaltando, entretanto, que essa deve ser sempre cumprida.

A concepção ergonômica se justifica, pois possibilita uma visão dos múltiplos aspectos envolvidos, sejam eles físicos, fisiológicos, ambientais, organizacionais e mentais, tanto quantitativos quanto qualitativos, sem os quais se restringiria artificialmente a análise das nuances envolvidas. Este tipo de abordagem, apesar de já ter sido proposta, necessita de ser ainda melhor compreendida e teoricamente delineada.

A utilização da Lógica *Fuzzy* como ferramenta de apoio para a tomada de decisão se justifica, pois ela apresenta uma série de propriedades que a tornam compatível e potencialmente valorosa para ser aplicada nesta situação, e na literatura sua utilização para este problema específico. É ainda muito pouco trabalhada, necessitando de avanços, principalmente no seu desempenho.

Um modelo mais rigoroso, tanto no que se refere à inclusão das características humanas, assim como no uso de algoritmos de suporte de alta qualidade, se faz necessário para que os resultados obtidos sejam mais realistas, o que irá propiciar estudos e análises de natureza mais quantitativa e com maior confiabilidade. Por fim, que seja também possível se modelar ambientes dos mais diversos, sem restrições de leiaute, inclusive de múltiplos andares e com diversas saídas.

Ressalta-se que, apesar da natureza técnica desse trabalho, deve ser também destacado a sua importância humanitária e social, visto que grandes aglomerados de pessoas, muitas vezes com o total desconhecimento dos riscos ao qual se encontram somente pelo fato de estarem em um ambiente construído, estão sujeitos à fatalidades que podem, inclusive, serem de grandes dimensões. Assim, são de importantes estudos que visem, se não possível mitigar completamente, pelo menos minimizar a ocorrência desses sinistros, e, quando acontecerem, que tenham seus impactos negativos reduzidos, tanto sob o viés humanitário quanto material.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem o seguinte objetivo geral:

desenvolver e implementar uma modelagem matemática e computacional, efetivada na forma de um programa computacional, capaz de realizar simulações da movimentação de pessoas em ambientes construídos durante situações de emergência, com uma concepção ergonômica da situação, envolvendo grandezas qualitativas e quantitativas, com o uso eficaz da Lógica *Fuzzy* para a etapa de tomada de decisão, com maior precisão na concepção da natureza humana, e com o suporte de algoritmos de apoio de alta qualidade.

Tal modelagem pode contribuir tanto na concepção de ambientes construídos mais seguros quanto na análise crítica da aplicação de aspectos legais relacionados ao dimensionamento das saídas de emergência, por exemplo.

1.4.2 Objetivos Específicos

Considerar-se-á o objetivo geral deste trabalho alcançado pela realização dos seguintes objetivos específicos:

- realizar uma fundamentação conceitual teórica sobre a utilização da ergonomia como sendo um paradigma relevante para estudos relacionados à movimentação humana com condição de se considerar complexidade;
- implementar computacionalmente e detalhar algoritmos de busca e exploração que realizam pesquisa sobre a primeira vizinhança de Von Neumann e Moore. Comparar os resultados obtidos na determinação das melhores distâncias fornecidas de deslocamento com os valores ideais teóricos, observando tanto aspectos qualitativos como quantitativos, de forma a se melhor compreender os erros resultantes da aplicação desses algoritmos;
- desenvolver conceitualmente, implementar computacionalmente e detalhar um algoritmo alternativo de busca e exploração que seja quantitativamente superior aos demais, cuja aplicação não ocasione, já nessa fase, erros de modelagem;
- expandir a utilização desses algoritmos de busca e exploração para ambientes construídos sem restrições prévias de *design*, inclusive para ambientes de múltiplos andares e com várias saídas;
- desenvolver a modelagem humana ergonomicamente embasada de modo mais completo, considerando uma representação humana mais realista, com mais de uma variação possível para o tamanho (dimensões) dos agentes, possibilitando uma caracterização individual dos agentes, inclusive permitindo a realização de movimentos tanto de translação como de rotação no ambiente;
- utilizando-se das novas premissas ergonômicas utilizadas, desenvolver dentro do Matlab e detalhar um sistema *fuzzy* que vise emular a tomada de decisão humana para a escolha das rotas preferenciais de movimentação rumo aos objetivos;
- transferir todo o conhecimento *fuzzy* previamente estabelecido no Matlab para o corpo do programa em linguagem Python, mas de forma que não ocorra perda na qualidade das informações e que propicie um ganho efetivo na performance de sua utilização;
- elaborar, implementar computacionalmente e detalhar o fluxograma do processo para a realização da movimentação humana, considerando o

conceito de tempo de reação humana num processo decisório *fuzzy*. A estrutura espacial adotada deverá ser híbrida, contínuo-discreta, visando a diminuição dos erros de discretização mas sem a sofisticação do mundo contínuo;

- realizar a verificação e a validação do novo modelo, por meio de simulações específicas, visando conhecer como alguns dos principais parâmetros das simulações efetivamente se comportam, e também realizar comparações com resultados de simulações obtidos na literatura;
- realizar um estudo sobre eventuais comportamentos estocástico do modelo e de como os resultados variam dependendo de alguns parâmetros das simulações e do ambiente;
- realizar um estudo de caso, no caso simular a movimentação humana durante a ocorrência da tragédia da Boate Kiss, de modo a se ilustrar como o novo modelo pode ajudar a se entender as causas de uma grande fatalidade e da sua magnitude atingida, assim como poder propor mudanças relacionadas ao *design* daquele ambiente e na legislação pertinente ao dimensionamento das saídas de emergência, que possibilitariam tornar aquele ambiente, e outros similares, mais seguro e resiliente a eventuais sinistros.

1.5 Metodologia

Este trabalho apresenta no seu desenvolvimento como principais vieses metodológicos o exploratório, o de desenvolvimento e o experimental, todos com grande importância, sendo empregados com maior ou menor profundidade ao longo da tese.

Para a fundamentação teórica quanto à utilização da ergonomia como paradigma importante e balizador da simulação humana, o viés foi basicamente exploratório, no qual, através de extensa pesquisa bibliográfica, se obteve informações importantes para o embasamento e desenvolvimento dessa questão.

Para a implementação dos algoritmos de busca e exploração, assim como a expansão desses algoritmos para situações especiais, os vieses foram tanto de

desenvolvimento quanto experimental, no qual os algoritmos foram computacionalmente implementados em Python, de forma a serem também obtidos diversos relatórios, de natureza gráfica e analítica, possibilitando a visualização e compreensão da magnitude e natureza dos desvios e dos resultados.

A modelagem humana ergonomicamente embasada foi basicamente realizada sob os três vieses, pois uma extensa pesquisa bibliográfica foi feita de modo a serem obtidos importantes parâmetros, seguido por uma etapa de desenvolvimento, na qual esses parâmetros selecionados foram convertidos em modelos matemáticos e computacionais, seguidos da verificação experimental dos resultados implementados.

A estrutura espacial do ambiente foi tratada por uma abordagem híbrida, discreto-contínua, onde a representação gráfica, cálculos e vários algoritmos se utilizam do ambiente discreto (de processamento tipicamente mais simples e rápido), mas a real posição e orientação dos agentes permanecem no mundo contínuo (sem arredondamentos). Essa técnica teve o intuito de diminuir a propagação dos erros de discretização que podem acontecer a cada novo passo do programa.

Para o desenvolvimento do sistema *fuzzy* de emulação da tomada de decisão humana, um viés mais empírico foi utilizado, onde diversos experimentos foram realizados até serem encontrados os parâmetros necessários para a implementação do modelo *fuzzy* no Matlab. Posteriormente, o próprio Matlab gerou um arquivo com a tabela *fuzzy* contendo todo o conhecimento do sistema *fuzzy*. Essa tabela *fuzzy* é então lida pelo programa em Python e internamente convertida em uma matriz *fuzzy*, que efetivamente fica na memória dinâmica do computador sendo consultada sempre que necessário para se realizar uma tomada *fuzzy* de decisão de modo célere.

Para a etapa de verificação e validação do modelo, foram elaborados e realizados diversos experimentos de modo a serem checados como efetivamente os seguintes parâmetros se comportam no programa: manutenção da velocidade de deslocamento linear e angular; tempo de pré-reação, seleção da saída a ser atingida, e modo que os agentes contornam os obstáculos fixos. Também foram

feitos experimentos no qual o modelo é comparado com resultados de literatura (KO, 2003; ROGSCH et al., 2007).

Para a etapa da verificação do comportamento estocástico, são realizados quatro conjuntos de experimentos de abandono em um ambiente quadrado com 10 m de lado e saída no centro de um dos lados. Todos os experimentos são repetidos alterando a população considerada (100, 300 e 500 agentes) e a largura da saída (2, 4 e 8 m), sendo encontrado o tempo total de evacuação em cada cenário. No primeiro conjunto de experimentos, são realizadas simulações variando-se também o tamanho dos agentes (pequeno, médio e grande). No segundo conjunto de experimentos, os agentes sempre são do tamanho médio, mas a orientação inicial será a ideal (agentes já direcionados segundo a melhor rota rumo ao objetivo). No terceiro conjunto de experimentos, a velocidade máxima dos agentes será fixa, mas em valores aleatórios entre 1 e 2 m/s. Por fim, no quarto conjunto de experimentos tanto o tamanho dos agentes, quanto a velocidade, como o posicionamento e a orientação iniciais serão aleatórios.

Por fim, foi realizada uma aplicação prática do módulo, desenvolvido e implementado, baseada no caso na tragédia da Boate Kiss. Por meio de uma etapa exploratória, na qual dados do acontecimento e daquele ambiente foram obtidos, fez-se uma simulação de evacuação, considerando uma população inicial de 1000 agentes e os efeitos das obstruções causadas pelo *design* real do ambiente. Repetiu-se essa simulação, agora não considerando as obstruções internas, e considerando uma saída de emergência de diversas larguras.

1.6 Organização do Trabalho

O presente trabalho foi organizado em 11 capítulos. Inicialmente, nesse Capítulo 1, é realizada a introdução, no qual se apresenta o tema, a caracterização do problema, justificativa, os objetivos, a metodologia empregada e a organização deste trabalho.

No Capítulo 2 é realizada uma fundamentação teórica sobre alguns dos temas abordados (complexidade na movimentação humana, características interdisciplinares do trabalho, apresentação e classificação de modelos de simulação da movimentação humana, e lógica *fuzzy*).

No Capítulo 3 são apresentados detalhadamente os algoritmos de busca e exploração desenvolvidos e computacionalmente implementados. Dois destes algoritmos utilizam uma pesquisa simples sobre a primeira vizinhança de Von Neumann ou de Moore. O terceiro algoritmo desenvolvido se baseia numa busca referenciada ao ponto de menor distância rumo ao destino mais perto que seja visível. Estes três algoritmos são qualitativa e quantitativamente comparados entre si.

No Capítulo 4, os algoritmos de busca e exploração anteriormente desenvolvidos são incrementados, de forma a operarem, sem perda de suas qualidades, em situações muito importantes para a simulação de ambientes e situações reais. Assim, é possível aos agentes se deslocarem em ambientes sem restrições de leiaute, inclusive de múltiplos andares, passando por escadas ou rampas, possibilitando o estudo de um grande número de edificações. Também é implementada a capacidade dos agentes de se movimentarem segundo múltiplos objetivos.

No Capítulo 5 são apresentados alguns dos aspectos ergonômicos fundamentais do modelo, como a representação humana discreta, a velocidade de movimentação, a

rotação do corpo humano, assim como da maneira com que estes fatores são computacionalmente implementados.

No Capítulo 6 é realizado todo o detalhamento da aplicação prática relativa ao sistema *fuzzy* criado com o uso do software Matlab para a emulação da tomada de decisão humana. É mostrada como é realizada a escolha da direção preferencial de movimentação, a descrição e detalhamento das grandezas de entrada do sistema *fuzzy* e a descrição do próprio sistema *fuzzy* em si, com a apresentação de diversas características relativas a sua implementação e aplicação.

Ainda relacionado ao sistema *fuzzy*, no Capítulo 7 são descritas como as informações do sistema *fuzzy* gerado no Matlab são introduzidos no programa em linguagem Python, de modo que não ocorra perda na qualidade dos dados, mas com grande ganho de performance. Para isso, são apresentados e empregados os conceitos de tabela e matriz *fuzzy*.

No Capítulo 8 se delinea como a movimentação é efetivamente realizada, incluindo parâmetros como o tempo para tomada de decisão e todos os detalhes do fluxograma decisório efetivamente utilizado.

No Capítulo 9 se tem a verificação e a validação do modelo, realizada por meio de simulações específicas, como a verificação da manutenção da velocidade linear e angular, comparando resultados com outros disponibilizados na literatura para outros modelos, e verificação de diversos comportamentos, como do efeito do tempo de pré-evacuação, do modo como é realizado o contorno de objetos, da seleção da saída. Nesse capítulo é realizado um estudo sobre o comportamento aparentemente estocástico do modelo e de como os resultados variam dependendo de alguns parâmetros da simulação.

No Capítulo 10 é realizado um estudo de caso abordando simulações de abandono da Boate Kiss, de modo a apresentar como o modelo pode ajudar a entender algumas das razões da tragédia e sua magnitude, assim como propor mudanças que tornariam esse ambiente mais seguro.

Por fim, no Capítulo 11, são apresentadas as considerações finais, no qual os objetivos específicos introduzidos serão formalmente considerados. São apresentadas algumas observações sobre as efetivas contribuições desse trabalho ao estado da arte e também feitas algumas sugestões de trabalhos futuros.

Como elementos pós-textuais, têm-se a apresentação das referências efetivamente citadas no corpo desse trabalho e, no apêndice, uma relação dos principais trabalhos até o momento publicados resultantes dessa tese. Relacionam-se artigos oriundos publicados em periódicos e em congressos nacionais e internacionais, além de participações de destaque em eventos científicos na qualidade de revisor e mesmo *chairman*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Complexidade na Movimentação Humana⁸

No contexto desse trabalho, considera-se um ambiente como sendo um sistema aberto, delimitado por fronteiras e composto de diversos elementos que se relacionam dinamicamente entre si, onde uma atividade humana é ou pode ser realizada. A movimentação humana, foco deste trabalho, pode ser tanto considerada como sendo uma atividade para que uma tarefa ou objetivo maior seja alcançado, quanto também como uma própria tarefa em si, constituída por diversas atividades ou comportamentos para ser realizada.

De modo simplificado, um sistema pode ser classificado como simples ou complicado. Sistemas simples devem ser fáceis de serem visualizados, devido à pequena quantidade de componentes e de suas relações, enquanto os sistemas complicados são difíceis de serem visualizados, devido à grande quantidade de componentes e, conseqüentemente, de suas relações.

Os sistemas também podem ter diversos comportamentos, como comportamento trivial, simples, complexo ou caótico. O comportamento de um sistema não tem necessariamente relação com o tipo de sistema, ou seja, pode-se ter um sistema simples com comportamento complexo, ou pode-se ter um sistema complicado sem apresentar complexidade aparente no seu comportamento. Além disso, o comportamento pode depender tanto de fatores externos ao ambiente ou sistema, quanto do estado inicial deste ambiente. Assim, um determinado sistema, simples ou complicado, pode eventualmente ter qualquer comportamento (trivial, simples, complexo ou caótico) dependendo da sua estrutura, da vizinhança ou do seu estado inicial.

O estudo e a modelagem de sistemas com comportamentos complexos têm alavancado grande interesse de pesquisadores provenientes das mais diversas

⁸ Baseado em Braga et al. (2017b).

áreas tais como física, matemática, engenharia, computação, medicina, sociologia, marketing (BOCCARA, 2004). Tanto na segurança do trabalho quanto na ergonomia, o termo complexidade já tem sido muito empregado e discutido (VIDAL et al., 2002; GRANT, 2002; VIDAL, CARVALHO; 2008; DANIELLOU et al., 2010; GONZÁLES, SAURIN, 2013). Entretanto, devido à natureza ainda relativamente recente deste *modus* de aplicação do termo complexidade, tem-se a existência de uma miríade de conceituações para complexidade, tornando-se necessário uma prévia definição deste termo antes de se evoluir o assunto.

No enfoque aqui presente, considerar-se-á estritamente um sistema complexo (ou com comportamento complexo) como aquele que possui elementos interativos e que exhibe propriedades emergentes que não resultam da existência de um controlador central (adaptado de BOCCARA, 2004). Neste contexto, propriedades emergentes são características que eclodem como resultado da interação dos elementos que constituem o sistema. Como exemplos de sistemas que podem possuir comportamentos complexos estão algumas implementações de autômatos celulares – AC, como as de Von Neumann, Conway e Wolfram (RUCKER, 2005; CASTRO, CASTRO, 2008).

Um AC pode ser definido como um sistema dinâmico discreto que possui as seguintes características fundamentais (BOCCARA, 2004):

- são constituídos por um conjunto discreto de sítios;
- evoluem em passos discretos de tempo;
- cada sítio assume valores dentro de um conjunto finito de possibilidades;
- os atributos de cada célula evoluem conforme as mesmas regras; e
- as regras de transição dos atributos de uma célula são funções dos atributos de uma vizinhança de células.

Na Figura 2.1 se representa, graficamente, a evolução da implementação de um dos AC unidimensionais de Wolfram (1984). Este é um exemplo de um sistema simples, que, dependendo dos valores de sua entrada, apresenta comportamento complexo, observado pela apresentação recorrente de padrões não triviais e auto organizados.

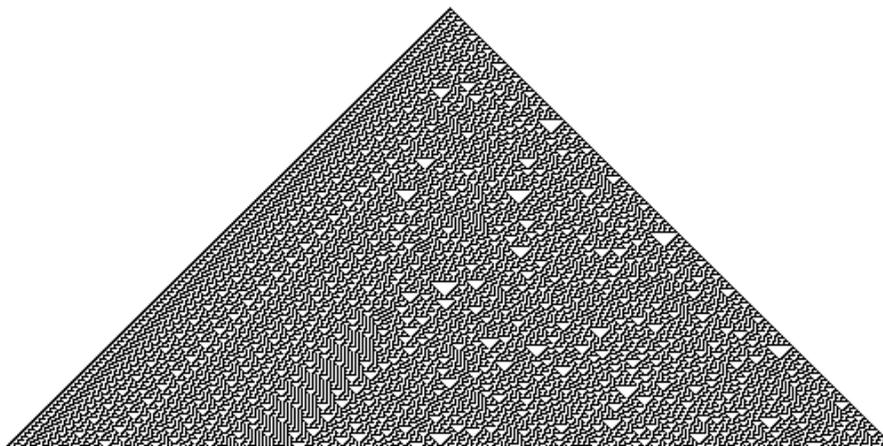


Figura 2.1: Evolução de um AC unidimensional como exemplo de um sistema simples apresentando comportamento complexo (WOLFRAM, 1984).

Especificamente na movimentação humana, são muitos os exemplos de comportamentos complexos. Na Figura 2.2 é mostrada a imagem da entrada de uma escola primária da rede pública localizada em uma via urbana com alto fluxo de veículos. De frente à entrada desta escola, sobre o passeio e separando este passeio da via pública, foi edificada uma parede, de forma que quem sai da escola não possa passar reto sobre o passeio e ir direto para a rua, agindo como uma espécie de barreira.



Figura 2.2: Imagem da frente de uma escola pública onde uma parede separa o passeio da via no entorno do seu portão de acesso (entrada e saída).

Fonte: arquivo pessoal.

Os responsáveis pela escola devem temer que, apesar de certamente darem todas as instruções e advertências para os alunos, pelas características psicofisiológicas dos alunos, pela geometria do local (o passeio é relativamente estreito e possui uma declividade) e talvez também motivados por fatos já ocorridos, no horário de término das aulas e abertura dos portões alguns alunos, ou mesmo grupos de alunos, simplesmente saiam literalmente correndo da escola diretamente para o meio da rua, portanto correndo alto risco de acidentes.

Também, como exemplo de complexidade na movimentação humana, tem-se a utilização de rotas de deslocamento que não eram previstas ou até mesmo proibidas (STILL, 2000). Não é raro encontrar em algum canteiro, apesar da existência de uma rota pavimentada apropriada para a movimentação humana, a formação de trilhas que podem ser percebidas pela não existência da vegetação que deveria lá ocorrer (GOLDSTONE, ROBERTS, 2006). Estas trilhas são formadas pela passagem constante de pessoas por este caminho não idealizado para funcionar como rota de passagem humana.

Estas rotas alternativas surgem por motivos diversos, sendo os mais comuns a busca pela diminuição da distância a ser percorrida e, para ambientes de maior densidade populacional, da manutenção da velocidade normal de deslocamento. Outro motivo para a ocorrência das trilhas está na inadequação ergonômica da rota oficial de deslocamento. Na Figura 2.3 tem-se um exemplo de formação de uma trilha ao lado do caminho dito oficial, onde não há economia no comprimento do percurso. Essa trilha surgiu principalmente pela inadequação do projeto da passagem oficial, formada por blocos de cimento distantes um do outro e em desnível em relação ao piso, de tal modo que torna o andar pelos blocos um processo cansativo.

Em situações de emergência, como durante a evolução de um incêndio, a movimentação humana também é rica em efeitos emergentes. Como exemplo, se tem o fato de que muitas pessoas que imediatamente acabaram de abandonar um ambiente em situação de incêndio reentram no mesmo ambiente, com o incêndio ainda em curso, inclusive pelos motivos mais triviais possíveis (BRYAN, MILKE, 1981), e, por isso, podendo passar a incorrer em sério risco de morte.



Figura 2.3: Imagem de uma trilha formada ao lado da passagem oficial.

Fonte: arquivo pessoal.

Outra situação importante que deve ser destacada, rica em fenômenos complexos, é durante a ocorrência de emergências a não ocorrência do pânico propriamente dito. As pessoas simplesmente não ficam irracionais em situações de grande estresse ou risco iminente. Ações, por mais estranhas que possam parecer, têm seus motivos, e o chamado pânico é nada mais que o resultado palpável do somatório de outros fenômenos (SCHADSCHNEIDER et al., 2009a). Considerar a existência de um comportamento simplesmente irracional para se “justificar” ações que resultam em morte ou graves acidentes tem similaridade com a nefasta culpabilidade da vítima em acidentes de trabalho (VILELA et al., 2004).

Assim, incorporar a possibilidade da ocorrência de complexidade na movimentação humana é fundamental para sua análise. Além disso, os parâmetros envolvidos na movimentação humana são diversos e seu estudo deve ser multidisciplinar, considerando os mais variados aspectos, tais como físicos, ambientais, biológicos, organizacionais e mentais. Também possuem sinergia entre si, são individuais e específicos (cada pessoa, situação e sistema são únicos), do grupo (efeitos coletivos

e sociais) e dinâmicos (podem mudar radicalmente durante o decorrer do fenômeno). Um sistema desse tipo pode ser estudado por uma abordagem ergonômica.

Ergonomia é um neologismo formado pelos termos *ergon*, que significa trabalho, e *nomos*, que significa regras (IIDA, 2010). O campo de atuação inicial, e ainda o mais relevante, é o estudo da adaptação do trabalho ao homem. Trabalho aqui tem uma concepção bastante ampla, abrangendo toda a situação em que ocorre o relacionamento entre o homem e uma atividade produtiva. Entretanto, atualmente esta definição foi estendida para além do ambiente produtivo, sendo que a definição oficial de ergonomia, segundo a IEA – *International Ergonomics Association*, é⁹:

“A Ergonomia (ou Fatores Humanos) é uma disciplina científica relacionada ao entendimento das interações entre os seres humanos e outros elementos ou sistemas, e à aplicação de teorias, princípios, dados e métodos a projetos a fim de otimizar o bem estar humano e o desempenho global do sistema. Os ergonomistas contribuem para o planejamento, projeto e a avaliação de tarefas, postos de trabalho, produtos, ambientes e sistemas de modo a torná-los compatíveis com as necessidades, habilidades e limitações das pessoas.”

Comparando as áreas e segmentações da ergonomia (IIDA, 2010) com as facetas envolvidas na movimentação humana, percebe-se que elas se confundem. Na movimentação humana, estão envolvidos todos os domínios tradicionais da ergonomia, como as ergonomias física, cognitiva e organizacional, assim como outros, como a ergonomia ambiental. Assim, a movimentação humana está imbuída em um sistema ergonômico verdadeiramente complicado, com possibilidade de possuir comportamento complexo.

A profundidade da abordagem necessária para a completa determinação dos comportamentos complexos observados em uma movimentação humana é de enorme magnitude. Utilizando-se do Princípio de Incompatibilidade de Zadeh (ZADEH, 1973):

⁹ Fonte: ABERGO. Disponível em <http://www.abergo.org.br/internas.php?pg=o_que_e_ergonomia>. Acesso em 15 out. 2016.

“... conforme a sofisticação de um sistema aumenta, nossa habilidade de fazer afirmações precisas e significantes sobre seu comportamento diminui, até um limiar em que a precisão e relevância tornam-se praticamente características mutuamente exclusivas.” (tradução livre),

pode-se afirmar que a total compreensão determinística de uma movimentação humana é simplesmente impossível de ser realizada. Entretanto, existe uma alternativa natural: o desenvolvimento de modelos. Um modelo tem a intenção de simplificar os aspectos e relações existentes, mas de maneira que ainda tenha relevância para determinado objetivo específico.

Ademais, o estudo e modelagem dos sistemas complexos possuem algumas peculiaridades fundamentais que devem ser observadas para uma eventual simulação, pois, como expressado por Vidal et al. (2002), “alguns aspectos funcionais de sistemas complexos não cabem em um esquema analítico funcionalista”. Para se contornar estes pontos, sugere-se a utilização de modelos baseados em agentes.

Quando se fala em modelagem por agentes, os primeiros tipos de modelo que vem a tona são utilizando os AC. A utilização dos AC tem permitido, com sucesso, a realização de modelagens de uma grande gama de sistemas de forma relativamente fácil em termos de implementação computacional e com possibilidade de se verificar o surgimento de comportamentos emergentes. A própria movimentação de pessoas em ambientes construídos também já foi alvo de modelagens com AC (KIRCHNER, SCHADSCHNEIDER, 2002; BOULMAKOUL, MANDAR, 2011; MAZUR, SCHRECKENBERG, 2018).

Contudo, os AC são muito simples e restritos, e uma modelagem estritamente com estes, mesmo que possa ser valorosa em relação a diversos aspectos, trará limitações para a simulação da movimentação humana. Entretanto o termo AC deve ser semanticamente respeitado, não podendo ser empregado fora dos limites estabelecidos pela sua definição. Dessa forma, neste trabalho vai-se empregar o termo Autômato Discreto – AD, ou simplesmente o termo genérico agente.

Assim, sugere-se realizar como paradigma balizador para o desenvolvimento da modelagem da movimentação humana uma abordagem situada da realidade através do emprego de premissas ergonômicas com o emprego de agentes.

Finalmente, de todas as múltiplas fases envolvidas na movimentação humana, uma etapa crítica é a realização da tomada de decisão. Baseado no conjunto de todos os parâmetros, qual atitude será tomada pela pessoa que está se movendo no ambiente? Esta é uma questão chave para ser respondida. Espera-se que a utilização de uma ferramenta de Inteligência Computacional, a Lógica *Fuzzy* possa auxiliar na emulação da tomada de decisão humana necessária para o desenvolvimento do modelo computacional (BORANINI, BASSO, 1997; AGUIRRE, GONZÁLEZ, 2000; BORANINI et al., 2006; ABICALIL, 2007),

Nesta proposta de modelagem, cada pessoa simulada terá incorporada suas características, e irá interagir com o ambiente, percebendo deste ambiente suas propriedades, e tomando por sua própria decisão a escolha do roteiro e forma de movimentação. Esta forma de modelagem de modo geral não obrigará nenhum dos agentes a tomarem uma decisão; o processo decisório é individual e particular, e desse comportamento individual espera-se obter os efeitos coletivos e complexos que ocorrem numa movimentação real via uma auto-organização do sistema e de suas relações locais.

Na Figura 2.4 é apresentado um esquema desta relação entre a auto-organização entre os agentes baseada em relações locais no sistema e sua influência no ambiente como um todo.

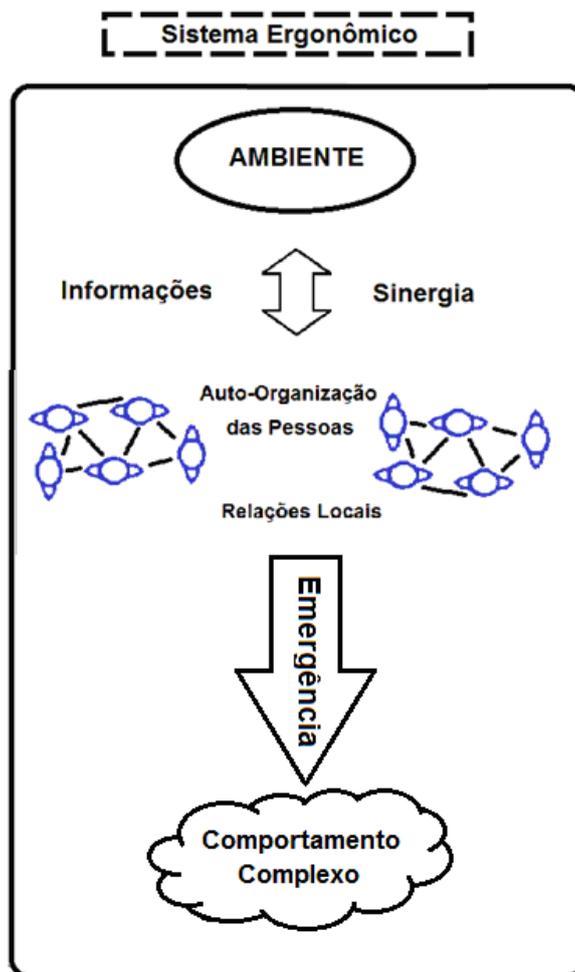


Figura 2.4: Representação da auto-organização dos agentes por relações locais no sistema.

2.2 Interdisciplinaridade

Como já visto, para que realize o estudo e a simulação da movimentação humana são necessários conhecimentos de distintas áreas do conhecimento, abordando os mais diversos assuntos como fisiologia humana, aspectos mentais e comportamentais, organizacionais, ambientais, fatores físicos e químicos, inclusive matemáticos e computacionais. Na Figura 2.5 se apresenta uma representação esquemática destes diversos parâmetros envolvidos na movimentação humana e suas inter-relações.

Esta somatória de características traz efeitos de natureza individual e coletiva, assim como dinâmicos (podem alterar com o tempo) e emergentes (sujeitos a

complexidade). Todos estes parâmetros devem ser tratados em conjunto, incluindo a etapa de tomada de decisão, e inclusos em um modelo computacional detalhado e computacionalmente implementado.

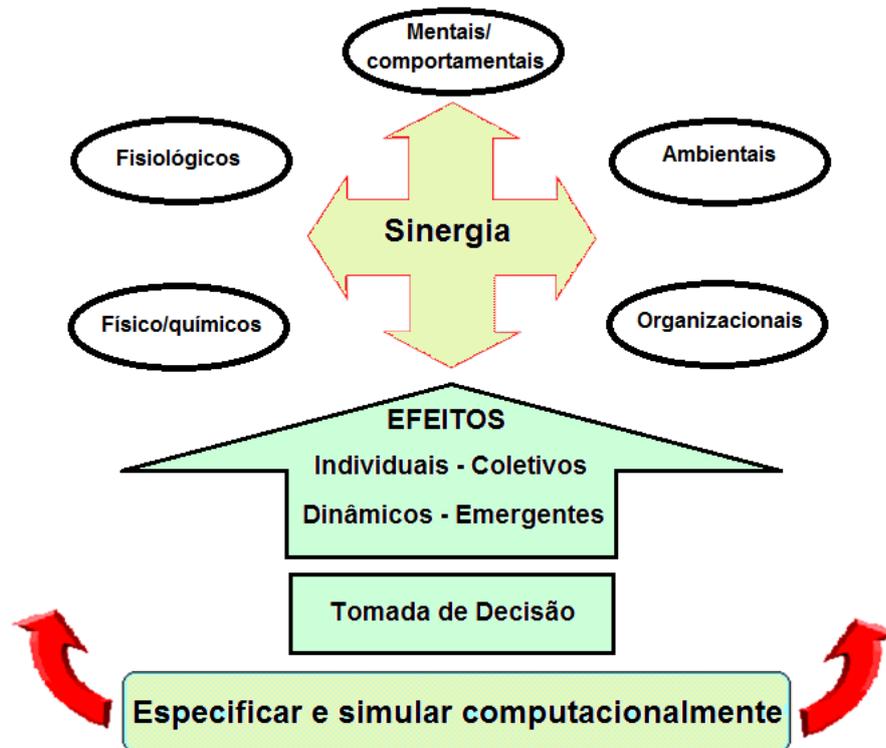


Figura 2.5: Representação esquemática de diversos parâmetros e suas inter-relações envolvidas na movimentação humana.

2.3 Modelos de Simulação da Movimentação Humana

Com o avanço dos sistemas computacionais nas últimas décadas, foram desenvolvidos diversos modelos, abordagens e concepções do estudo do comportamento humano durante sua movimentação em condições normais ou de emergência (KULIGOWSKI, PEACOCK, 2005; COELHO, 2007a, 2007b; GORRINI et al., 2016; BANERJEE et al., 2018). Esses modelos podem ser classificados pelos paradigmas principais aplicados no seu desenvolvimento.

Kuligowski e Peacock (2008) classificaram os modelos como comportamentais ou não comportamentais, conforme a seguir:

(i) Modelos não comportamentais (ou de movimento), como por exemplo, o FPETool, EVACNET4, PathFinder, TIMTEX e WAYOUT;

Estes modelos fazem as pessoas se deslocarem de um ponto para outro dentro de um ambiente (geralmente a saída ou outro local seguro). Estes modelos mostram as áreas de congestionamento e turbulência no escoamento humano dentro do ambiente.

(ii) Modelos parcialmente comportamentais, tais como o SIMULEX, GridFlow, ALLSAFE;

Eles incorporam aos modelos de movimento alguma característica de tomada de decisão do comportamento humano de forma simplificada.

(iii) Modelos comportamentais, como por exemplo o CRISP, EGRESS, EXIT, BGRAF;

As pessoas realizam ações visando movimentar-se para uma saída específica incorporando tomada de decisão pelos ocupantes em relação às condições do ambiente e levando em consideração aspectos cognitivos e psíquicos.

Por outro lado, Pelechano et al. (2008) classificaram os modelos como sendo de aproximação macroscópica ou microscópica. Os modelos de aproximação macroscópica focam no sistema como um todo (características do escoamento global superam as individuais), já os modelos de aproximação microscópica estudam o comportamento individual de cada pedestre, assim como suas interações com os demais pedestres durante a simulação, descrevendo, portanto, o comportamento espaço-tempo individualmente para cada pessoa.

Ainda, os modelos de aproximação microscópica podem ser divididos em modelos celulares ou modelos de forças sociais. Nos modelos celulares, o espaço sobre estudo é representado como uma rede de células com estados locais sob regras que descrevem o comportamento dos pedestres. Essas regras consideram tanto o estado de determinada célula em particular como das células adjacentes. Os modelos baseados em forças sociais descrevem o comportamento individual dos pedestres através de forças “físicas virtuais” induzidas pelos comportamentos

individuais dos pedestres. Na Tabela 2.1 se tem uma comparação entre alguns dos diferentes sistemas existentes para simulação da animação de grandes grupos.

Tabela 2.1: Comparação entre alguns dos diferentes sistemas existentes para simulação da animação de grandes grupos.

Modelo	Efeito de Colisões	Princípios	Comunicação	Tempo Real	Aprendizado	Estrutura Espacial
Helbig (Soc. <i>Forces</i>)	SIM	Forças sociais	NÃO	SIM	NÃO	Contínuo
<i>Rule Based</i>	NÃO	Regras	NÃO	SIM	NÃO	Contínuo
CA	NÃO	Autômato	NÃO	SIM	NÃO	2D
Simulex	SIM	Mapa de Distâncias	NÃO	NÃO	NÃO	Contínuo
Egress	NÃO	Autômato	NÃO	NÃO	NÃO	Hexagonal <i>grid</i>
ViCrowd	NÃO	Regras + Forças sociais	NÃO	SIM	NÃO	Contínuo
OpenSteer	NÃO	Regras	NÃO	SIM	NÃO	Contínuo
Legion	NÃO	Menor esforço	Alguma	NÃO	NÃO	Contínuo
Exodus	NÃO	Autômato	NÃO	NÃO	NÃO	2D
Steps	NÃO	Autômato	NÃO	NÃO	NÃO	2D
ACUMEN	SIM	Partículas	NÃO	SIM	NÃO	Contínuo
<i>Autonomous Peestrian</i>	NÃO	Vida artificial	NÃO	SIM	NÃO	Contínuo
<i>Space Syntax</i>	NÃO	Gráficos de visibilidade	NÃO	SIM	NÃO	Contínuo
MACEX + HiDAC	SIM	Forças sociais	SIM	SIM	SIM	Contínuo
Fuga v. 1.0	NÃO	Regras (<i>Fuzzy</i>) / Mapas de Distâncias	NÃO	NÃO	NÃO	2D

Fonte: adaptado de Pelechano et al. (2008, 2016).

3 ALGORITMOS DE BUSCA E EXPLORAÇÃO

3.1 Conceituação

Na simulação da movimentação humana, independente de quaisquer outros fatores, é necessário se conhecer o melhor percurso entre uma posição inicial de um agente no ambiente e seu objetivo, que pode ser tanto um setor como um almoxarifado ou um depósito, ou uma saída de emergência (KO et al., 2007; RONCHI, NILSSON, 2013; KULIGOWSKI et al., 2013). Este melhor caminho é normalmente considerado como sendo o roteiro que permite o deslocamento com o menor percurso entre estes dois pontos (ANDAYESH, SADEGHPOUR, 2014).

Este menor percurso pode ser encontrado por meio de algoritmos de busca e exploração, e podem ser úteis a pesquisas nas mais diferentes áreas como logística, pesquisa operacional, roteirização, robótica, automação, jogos (de natureza profissional ou lúdica), segurança (MA et al., 2013; BRAGA et al., 2014), dentre outras. Alguns desses algoritmos de busca podem gerar mapas de distâncias.

O mapa de distâncias é uma matriz suficientemente refinada para representar o ambiente em estudo que contém, em cada um dos seus elementos que podem servir como rota de encaminhamento, o valor da distância deste elemento a outro elemento (ou conjunto de elementos) que represente o objetivo a ser alcançado. Muitas vezes, o mapa de distâncias é representado por faixas de cores (THOMPSON, MARCHANT, 1995a), no qual cada faixa de cor representa uma faixa de distanciamento fixa em relação ao ponto objetivo.

Estando de posse do respectivo mapa de distâncias a partir de um determinado ponto do ambiente, um roteiro simples para se alcançar um objetivo seria selecionar aquele elemento no espaço imediatamente vizinho ao seu que possua a menor distância indicada no mapa de distâncias, e então se transferir para este espaço vizinho. Depois de se transferir para este elemento vizinho, deve-se continuar pesquisando e se transferindo para aquele novo elemento vizinho que sempre

contenha a menor distância ao objetivo. Repetindo este processo de pesquisa aos elementos imediatamente vizinhos e sempre se transferindo para aquele com a menor distância indicada no mapa de distâncias, em um número finito de passos irá se atingir o objetivo perpassando pela rota (ou por uma das rotas) de menor comprimento.

Existe uma grande gama de algoritmos de busca e exploração, mas, de modo geral, algoritmos de busca podem ser considerados como estratégias de inteligência computacional para a resolução de problemas e exploração (RUSSELL, NORVIG, 2004). A classe de algoritmos de busca e exploração especificamente aqui tratada também é chamada de algoritmos *pathfinder*, pois visam encontrar ou contribuir na escolha de um melhor caminho ou roteiro geralmente entre dois pontos distintos de um ambiente (STOUT, 1996; CHUI, SHI, 2011).

Esses algoritmos de busca também podem ser incorporados em ferramentas tecnológicas de apoio ao projeto arquitetônico. As ferramentas são capazes de fornecer maior suporte ao projetista de um ambiente, incentivando sua criatividade pela liberdade e capacidade de se verificar alternativas e o impacto quantitativo destas na edificação (KOWALTOWSKI et al., 2010). Estudos de casos relacionados ao projeto arquitetônico envolvendo a seleção de rotas (BOULMAKOUL, MANDAR, 2011; SILVA et al., 2012) podem se beneficiar deste tipo de algoritmo. É verdade que a realidade prática da utilização de recursos tecnológicos como este pode, ainda, estar afastada da vivência cotidiana de vários escritórios de arquitetura, mas, certamente a divulgação e a operacionalização de estudos nesta área contribuem para diminuir essas distâncias.

Existem diversos algoritmos de busca da classe *pathfinder* já consolidados e também suas variações (HART et al., 1968; STOUT, 1996; KOENIG et al., 2004; DELLING et al., 2009). Um destes algoritmos de busca mais utilizados e estudados é o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959; SNIEDOVICH, 2006). O algoritmo de Dijkstra pode ser usado com sucesso, por exemplo, na seleção de melhores roteiros para tráfego de veículos. Entretanto, a aplicação direta do algoritmo de Dijkstra para indicação de melhores rotas de movimentação em simulações de ambientes

construídos poderá resultar em grandes erros nas trajetórias indicadas para maiores percursos (SOLTANI et al., 2002).

Portanto, apesar de toda a pesquisa já realizada sobre o assunto, simplesmente não existe um único melhor algoritmo *pathfinder* geral (CHUI, SHI, 2011), tornando-se eventualmente necessária a adaptação de algoritmos já estabelecidos para melhor se atender a uma demanda específica. Adicionalmente, pela análise da literatura (LIGHTFOOT, MILNE, 2003; PELECHANO et al., 2008; BRAGA et al., 2014, ROGSH, 2016) fica claro que algoritmos logicamente simples que se aplicam, especificamente, a soluções no âmbito da seleção de melhores rotas de movimentação em edificações carecem tanto de um maior detalhamento como de uma melhor compreensão quantitativa dos erros produzidos pela aplicação destes.

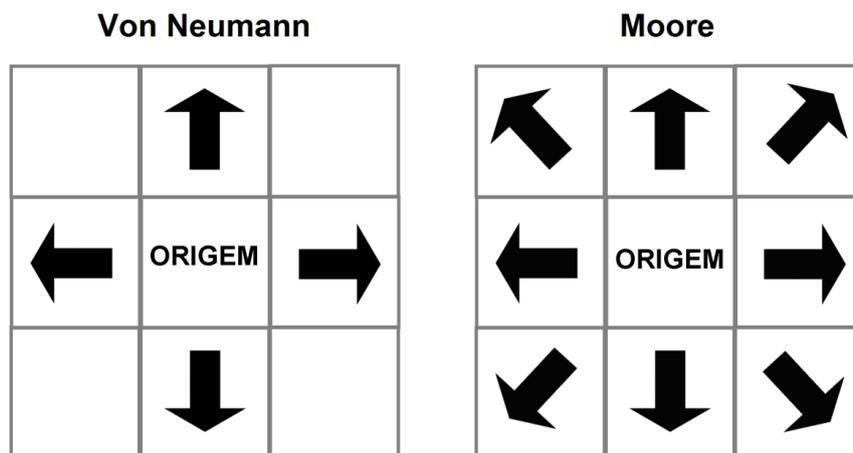
Assim, é apresentado o passo-a-passo de três algoritmos de busca e exploração da classe *pathfinder*, especialmente adequados para gerar o mapa de distâncias de um ambiente construído, assim como identificar, quantitativamente, os erros resultantes de suas aplicações. Dois destes algoritmos se baseiam numa busca sobre a primeira vizinhança de Von Neumann ou de Moore, e o terceiro por uma busca referenciada pelo critério de visibilidade à casa mais distante do agente que está mais próxima do destino desejado.

3.2 Busca pela Vizinhança de Von Neumann ou de Moore

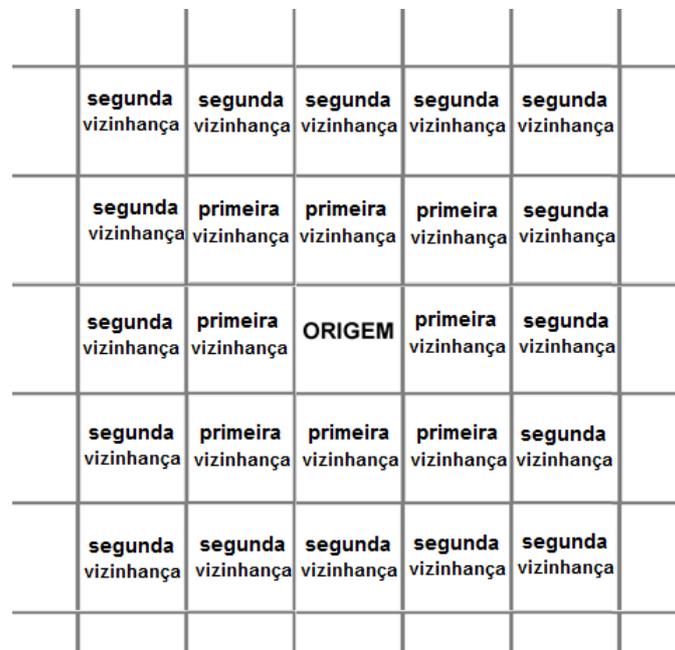
3.2.1 Vizinhanças de Busca

Na busca ou movimentação pela primeira vizinhança de Von Neumann (VVN), a partir de um ponto do ambiente, é permitido se pesquisar diretamente em apenas quatro direções (WOLFRAM, 1984; BRAGA et al., 2016c). Considerando uma vista de topo, estas direções são para cima, para baixo, para a direita e para a esquerda. Já na busca ou movimentação pela primeira vizinhança de Moore (VM), são permitidos, além dos movimentos diretos já citados, movimentações e pesquisas também nas diagonais.

A Figura 3.1a ilustra estas duas possibilidades de movimentações a partir de uma vista de topo da primeira vizinhança no ambiente discretizado de uma casa qualquer de origem, também chamada casa base de varredura. A Figura 3.1b identifica as células que compõem a primeira e a segunda vizinhança genérica de busca em relação à casa base (origem). Neste trabalho, para todas as variações do algoritmo, apenas a primeira vizinhança de uma casa base será considerada a cada iteração do algoritmo de busca.



(a)



(b)

Figura 3.1: Em (a) as possibilidades de pesquisa pela vizinhança de Von Neumann (VVN) e de Moore (VM) e, em (b) a representação da primeira e segunda vizinhança em relação à origem (ou casa base).

3.2.2 Discretização do Ambiente

Inicialmente, o ambiente construído a ser simulado deve, em sua vista de topo, ser discretizado na forma de uma matriz retangular bidimensional denominada matriz ambiente (MA). Na matriz MA, o índice das respectivas linhas e colunas representa um determinado posicionamento no mundo real. A distância no mundo real entre duas linhas ou colunas consecutivas é denominada resolução (r). Quanto menor o valor de r , mais refinados tendem a ser os resultados da simulação, mas, maior será também o custo computacional associado.

Adicionalmente, os valores contidos nos elementos de MA estão diretamente associados a um significado no mundo real. Por exemplo, o valor "0" em MA indica que este respectivo elemento no mundo real está vazio e pode ser usado como passagem; o valor "-1" em MA indica que este pertence a uma parede; o valor "-2" em MA indica que este elemento pertence a um dos objetivos da simulação (uma saída ou sala específica); e, o valor "-3" em MA indica que este elemento representa uma área externa ao ambiente.

Uma vez discretizado o ambiente com a geração da matriz MA, é então criada uma matriz linha, denominada Matriz de Busca Primária (MBP), contendo, em cada elemento, o posicionamento (índices) de todos os elementos de MA pertencentes ao objetivo (ou que contém o valor "-2").

A Figura 3.2 apresenta uma representação, em perspectiva, de um ambiente construído na forma retangular com duas saídas distintas e a Figura 3.3 apresenta as respectivas matrizes MA e MBP iniciais obtidas para o ambiente da Figura 3.2. Depois de criada a MBP, é também gerada uma matriz com as mesmas dimensões da matriz MA, denominada matriz ambiente secundário (MAS), mas com todos os seus elementos contendo inicialmente o valor "0".

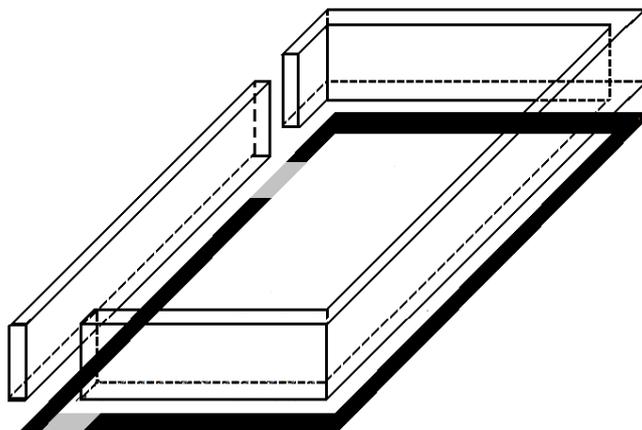


Figura 3.2: Representação de um ambiente construído em perspectiva (sem escala).

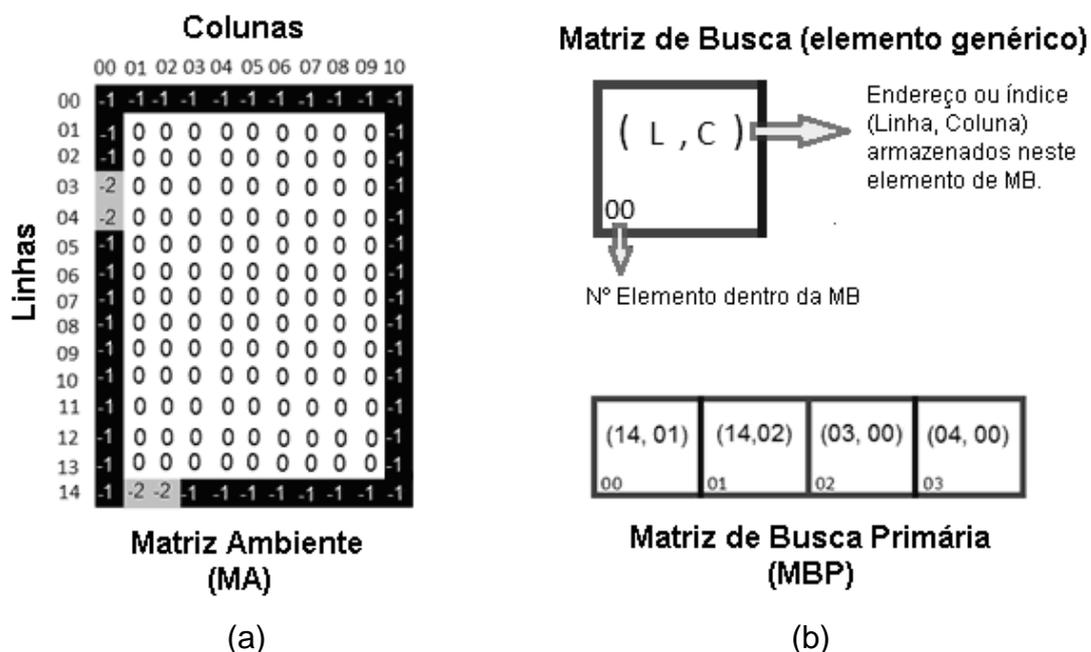


Figura 3.3: Matrizes MA (a) e MBP iniciais obtidas (b) para o ambiente da Figura 3.2.

3.2.3 Algoritmo de Busca Segundo a Vizinhança de Von Neumann (VVN)

Finda a discretização, o algoritmo de busca se inicia pela pesquisa de cada elemento de MBP. A ordem da pesquisa em MBP não é relevante. Considerando o primeiro elemento de MBP (indicado na Figura 3.3b), ele contém o índice base de busca inicial (linha 14, coluna 01), ou seja, este é um endereço que, em MA, representa um objetivo. Todos os elementos de MA (ou em MAS), que são os primeiros vizinhos de Von Neumann (VVN) deste índice base, estão a uma distância

“1” deste objetivo. Assim, todos estes elementos vizinhos em MAS terão o seu respectivo valor alterado pelo valor de MAS da casa base ou origem incrementado em “1” (como neste caso é a primeira busca o valor passará de “0” para “1”).

Entretanto, este incremento no valor de MAS não vai ocorrer caso este elemento vizinho do índice base pertença a uma parede, a um outro objetivo, ou, obviamente, esteja fora do ambiente (a matriz MA original é usada para esta verificação). Quando um elemento de MAS tem seu valor alterado, o índice deste elemento alterado é adicionado em uma nova matriz linha, denominada Matriz de Busca Secundária (MBS). Na Figura 3.4 é mostrada a representação deste primeiro passo para o ambiente da Figura 3.2. A matriz MA inicialmente criada nunca será alterada.

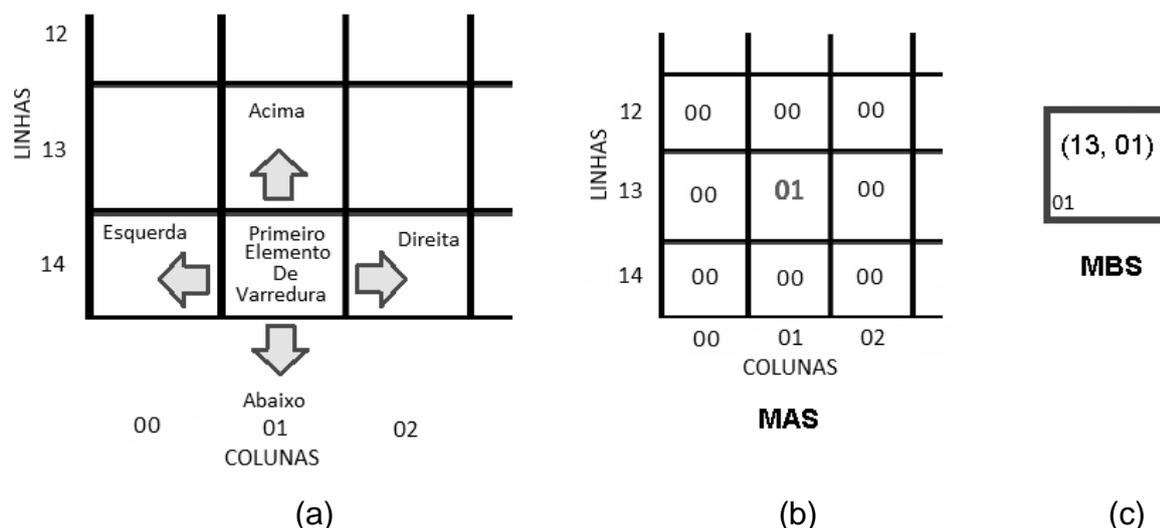


Figura 3.4: Em (a) a representação da primeira vizinhança de busca em MA e, em (b) e em (c) as respectivas novas matrizes MAS (visão parcial) e MBS formadas após esta primeira busca pela VVN do primeiro elemento base de MBP.

Terminada a busca sobre os quatro primeiros vizinhos pela VVN do primeiro índice base da matriz MBP, a busca vai prosseguir sobre o próximo elemento de MBP, no caso (14, 02) ou linha 14 e coluna 02 em MA. Repetindo o raciocínio, todos os elementos em MAS, que são os primeiros vizinhos de Von Neumann deste novo elemento base, terão o seu valor de MAS anterior substituído pelo valor de MAS do novo elemento base incrementado em “1” (exceto, novamente, os pertencentes a paredes, objetivos ou externos).

Todos os endereços de MAS que sofreram alterações no seu valor são adicionados na nova matriz linha MBS em formação, cujo tamanho vai sendo incrementado com a busca. Na Figura 3.5, pode se ver a representação deste segundo passo. Ressalta-se que, caso algum novo valor de MAS seja eventualmente igual ou superior a um valor não nulo de MAS já existente no elemento vizinho que está sendo verificado, esta substituição de valores não vai se concretizar e este índice não será adicionado à matriz MBS em formação.

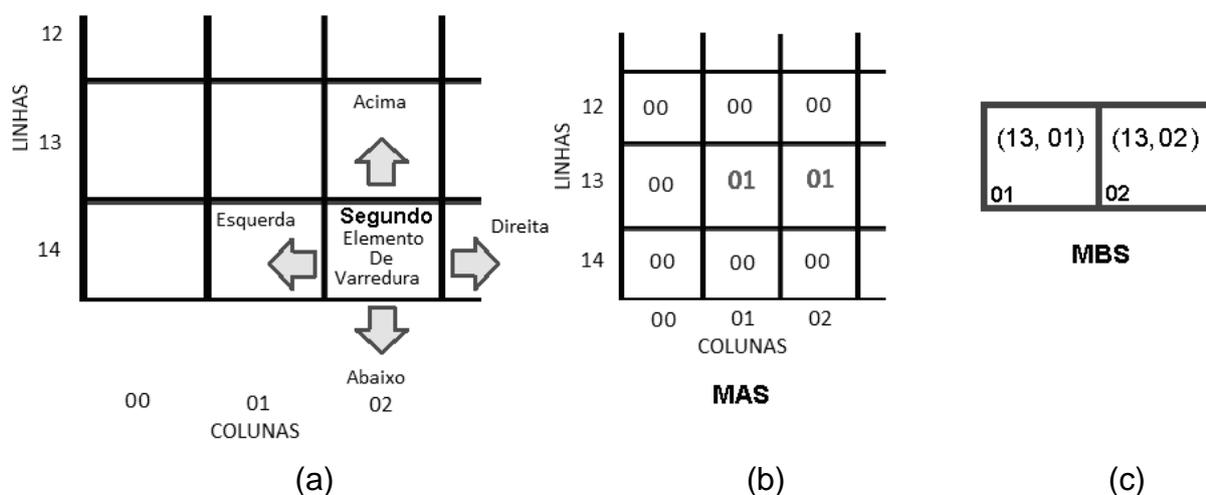


Figura 3.5: Em (a) a representação da busca em MA considerando o segundo elemento de varredura de MBP e, em (b) e em (c) as respectivas novas matrizes MAS (visão parcial) e MBS em formação.

Finda esta nova busca sobre os quatro primeiros vizinhos do segundo índice base em MBP, a busca vai prosseguir sobre o terceiro elemento de MBP, e assim, sucessivamente, até que todos os elementos de MBP tenham sido verificados. Terminada esta fase, a MBP original é apagada e uma nova MBP contendo o conteúdo de toda a matriz final MBS é criada. Após essa transferência e substituição, a matriz MBS é feita nula. Neste momento, se tem uma nova MBP, com os endereços dos novos elementos base de busca em MA, uma nova MBS nula e uma matriz MAS em formação.

Uma nova rodada de pesquisa sobre a atual MBP é, então, realizada, com a contínua formação da matriz MAS e, assim, sucessivamente. O processo irá

terminar quando, após realizar uma verificação integral de uma MBP, não ocorrer nenhuma alteração em qualquer valor de MAS, ou seja, a matriz final MBS da rodada antes da sua transferência para a MBP seja nula. Nesse momento, todo o ambiente foi integralmente pesquisado.

Para finalizar, todos os valores negativos na matriz MA são transferidos, na mesma posição em que se encontram em MA, para a matriz MAS. A matriz MAS então formada contém, em todos os seus elementos não nulos, o respectivo número de elementos (ou distância) que este elemento está da saída ou objetivo desejado mais próximo, segundo a VVN, além de ter identificado com o valor “-2” os objetivos (ou saída), com “-1” as paredes ou obstáculos e, caso exista em MA, com “-3” a parte externa do ambiente.

3.2.4 Algoritmos de Busca Segundo a Vizinhaça de Moore (VM)

Esta versão do algoritmo é similar à anterior em todos os aspectos. A diferença é que a vizinhaça considerada do elemento base identificada na matriz MBP, neste caso, será toda a primeira vizinhaça, inclusive os primeiros vizinhos em diagonal ao elemento da casa base de varredura. Quando a vizinhaça considerada for a dos elementos acima, abaixo, à direita e à esquerda, o valor substituído como o novo eventual valor de MAS continuará sendo “1” acrescido pelo valor de MAS do elemento de origem. Mas, se o vizinho estiver numa das diagonais, o valor a ser substituído como sendo o novo eventual valor de MAS será “ $\sqrt{2}$ ” acrescido pelo valor de MAS do elemento de origem.

A Figura 3.6 apresenta, para o ambiente construído da Figura 3.2, as respectivas matrizes MAS finais estilizadas obtidas com as duas variações do algoritmo de busca (VVN e VM). Na Figura 3.6, as distâncias pontuais (D_p) em número de elementos entre o objetivo mais próximo e cada uma das células do ambiente discretizado estão indicadas sobre os mesmos. Ainda na Figura 3.6, as paredes do ambiente estão representadas em preto e os objetivos em laranja, sem indicação de distâncias.

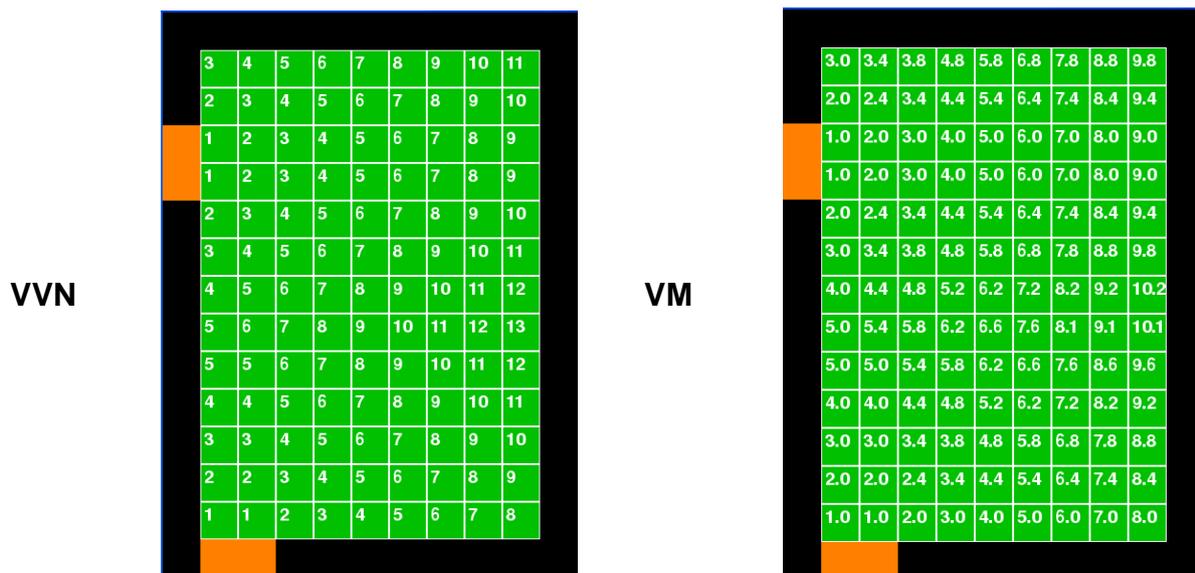


Figura 3.6: Representação das matrizes MAS finais estilizadas obtidas para o ambiente da Figura 3.2 com as distâncias (em número de elementos) de qualquer elemento em seu interior e o objetivo mais próximo.

3.2.5 Simulações

Inicialmente, foram simulados ambientes em forma de simples quadrados, sem separações internas, com paredes de um elemento de espessura e um único objetivo (saída) de dois elementos de largura posicionado no centro de um dos lados. Estes ambientes quadrados têm largura externa variando de 10 elementos a 1.000 elementos (ou com área formada por 100 a 1.000.000 de células) de modo a cobrir uma grande faixa de áreas podendo ser representativo para a maioria das edificações.

A Figura 3.7 apresenta imagens de momentos da simulação para ambas as variações do algoritmo, indicando o perfil de sua evolução no ambiente quadrado com 1000 elementos de lado. Em verde, está a região ainda não verificada pelo algoritmo e, na cor branca, a região já pesquisada. Inicialmente, toda a parte interior do ambiente está em verde. Com o andamento da simulação, a parte já analisada do ambiente (inicialmente vizinha à saída ou objetivo que se encontra no centro do lado inferior) muda sua cor para branco. A região em branco cresce com a evolução do algoritmo, até que todo o interior do ambiente fique na cor branca indicando que todo o ambiente foi analisado (a matriz MAS final foi obtida).

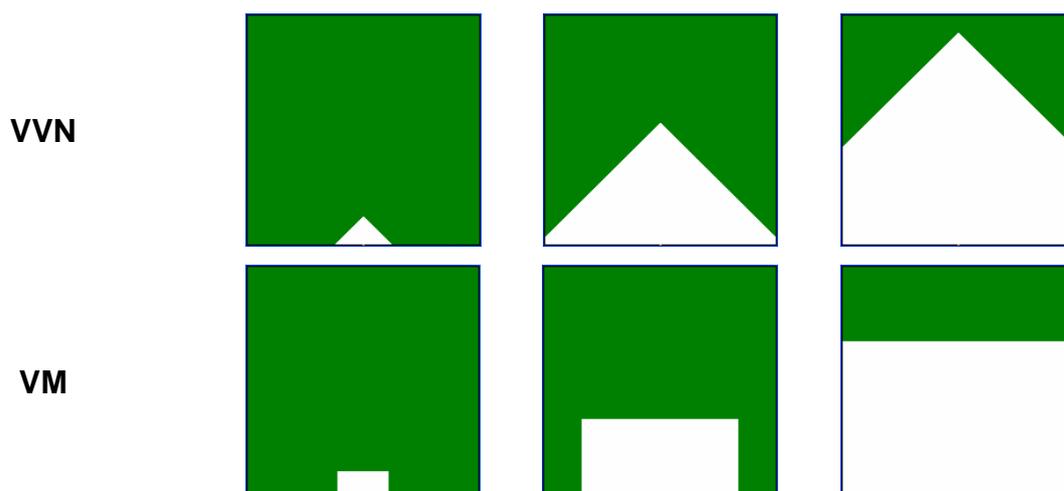


Figura 3.7: Perfil da evolução do algoritmo de busca sobre o ambiente quadrado com 1000 elementos de lado, onde a cor branca identifica a área já pesquisada e a saída está localizada no centro do lado inferior.

Foi gerado, para cada simulação dos ambientes quadrados, o respectivo mapa de distâncias. Complementando-os, foram elaborados gráficos de distância em três dimensões (3D), mostrando o valor de D_p em função de sua posição no ambiente. Como exemplo, a Figura 3.8a apresenta o mapa de distâncias em faixas de cores e a Figura 3.8b o respectivo gráfico de D_p em 3D para as simulações do ambiente quadrado com $n = 200$ elementos de lado (ou 100 m^2 de área) e para as duas variações do algoritmo de busca.

Nesta Figura 3.8a, as diferentes cores de faixas no mapa de distâncias indicam um distanciamento de 1 m entre si, estando o objetivo (ou saída) localizado no centro do lado inferior do ambiente. Na Figura 3.8b, o valor de D_p é mostrado em função da sua posição no ambiente, onde o ponto (0,0) indica o centro do objetivo.

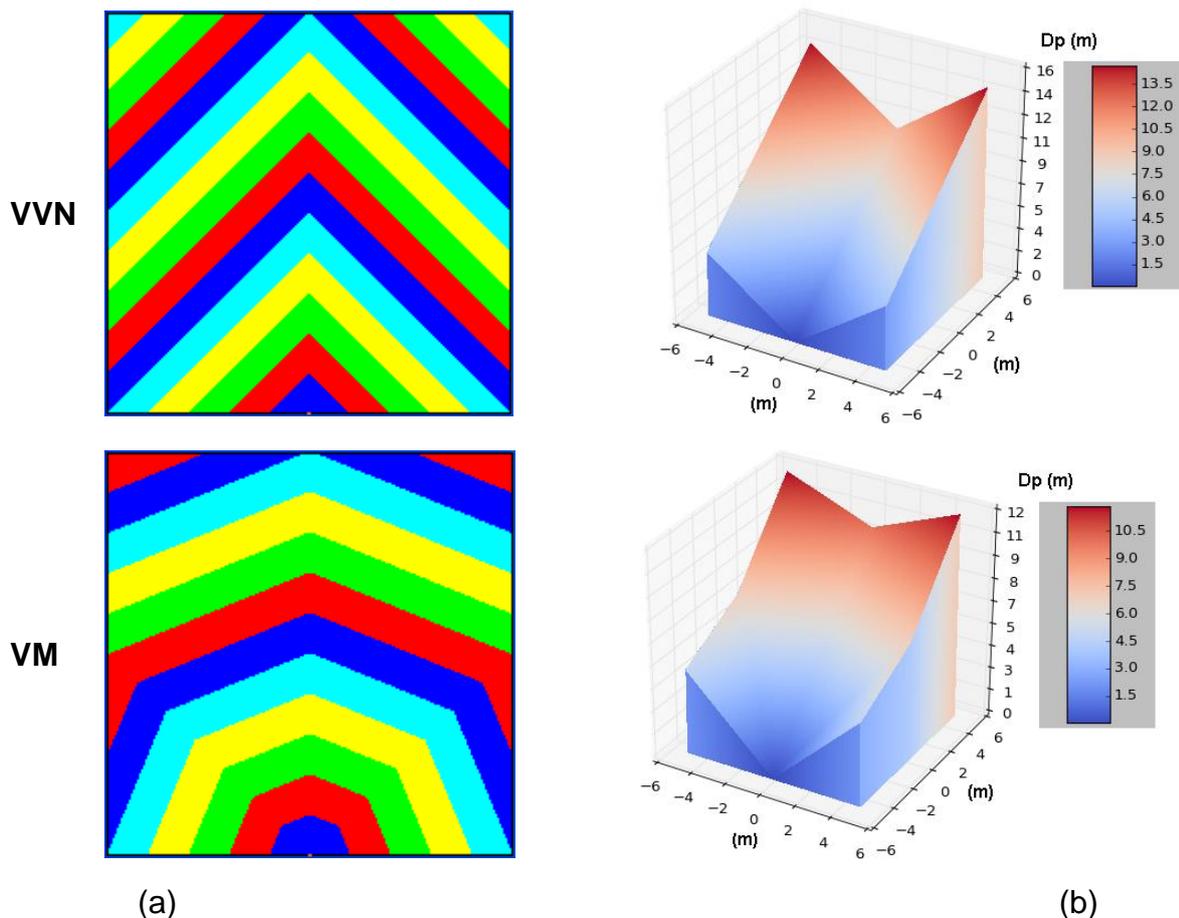


Figura 3.8: Representações do mapa de distâncias para as variações do algoritmo de busca, em faixas (a) e em 3D (b), do ambiente quadrado de 200 elementos de lado (ou 100 m^2 de área com r de 5 cm).

O algoritmo de busca como detalhado, pela sua lógica de funcionamento e por todos os testes realizados, aparenta poder ser diretamente usado (sem interferência humana) em ambientes com qualquer grau de sofisticação no seu leiaute, tanto interna quanto externamente, de qualquer tamanho, desde que de um único pavimento. Como exemplos, se apresentam, na Figura 3.9, o mapa de distâncias para simulações pelas duas variações do algoritmo de busca sobre um ambiente mais sofisticado.

A Figura 3.9 apresenta um ambiente irregular com aproximadamente 620 m^2 de área, r de 5 cm, duas saídas (indicadas pelas setas) e várias salas internas (paredes horizontais e verticais em preto). Na Figura 3.9, cada uma das tonalidades de cor das faixas internas equivale a 1 m de distanciamento da saída (em laranja) mais

próxima e a região em volta do ambiente, em azul claro, representa uma região externa a este ambiente.

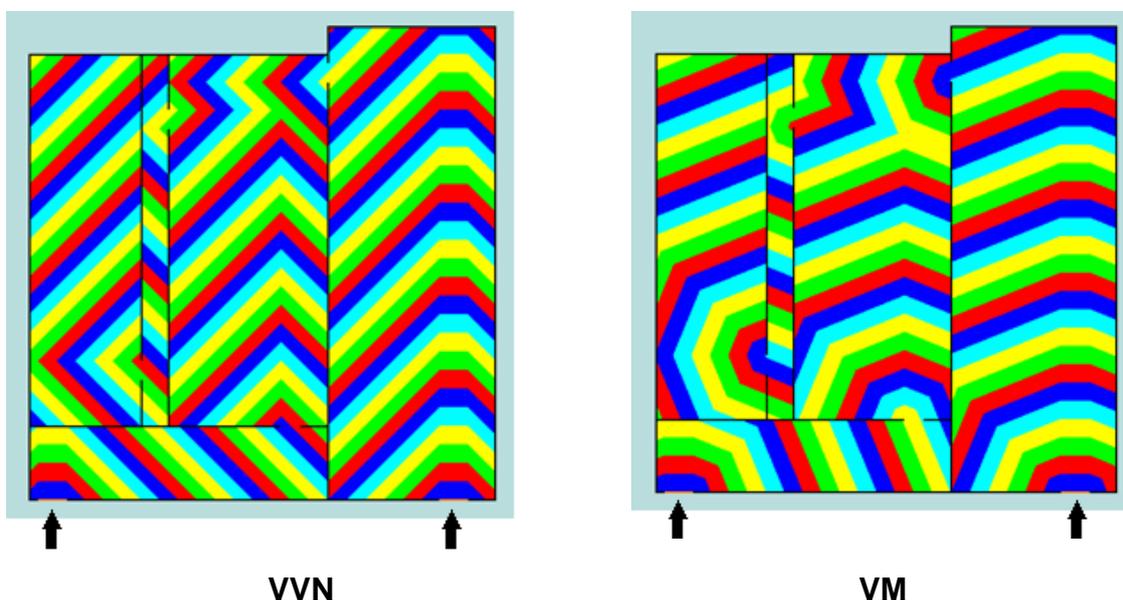


Figura 3.9: Mapa de distâncias para as simulações de um ambiente irregular ($\approx 620 \text{ m}^2$ de área), várias salas internas e dois objetivos (duas saídas distintas indicadas pelas setas).

O algoritmo apresentado, diferentemente de algoritmos como o de Dijkstra, não é do tipo guloso, pois todo o ambiente é sempre pesquisado, não havendo nunca alguma área eventualmente não verificada. Não há possibilidade de algum outro melhor percurso ter passado despercebido. Esta é uma característica positiva para que o algoritmo possa ser usado na simulação de ambientes construídos genéricos com uma população não previamente posicionada, permitindo total liberdade nas simulações do projetista. Sempre será gerado o melhor mapa de distâncias para todo o ambiente, havendo somente o erro inerente à discretização e a natureza da pesquisa (VVN ou VM).

O custo computacional para se pesquisar todo o ambiente é compensado pela necessidade da pesquisa ser feita uma única vez para cada edificação, não importando quantas simulações serão, posteriormente, realizadas e nem como as mesmas sejam planejadas, desde que não se altere a parte física da edificação (a matriz MAS é gerada uma única vez). Obviamente, se o leiaute da edificação for

modificado, uma nova matriz MAS deve ser gerada antes de se realizar novas simulações. Assim, o algoritmo descrito neste trabalho é especialmente apropriado para ser usado de modo não concomitante com a simulação, mas, sim, previamente à mesma, onde o mapa de distâncias é então salvo na memória para ser utilizado sempre que necessário. Entretanto, se ressalta que não há nenhum impedimento, exceto pelo tempo de processamento, para seu uso também dinâmico.

Existem algoritmos de busca aplicados a simulações no ambiente construído que precisam de alguma interferência humana na obtenção de bons resultados (PELECHANO et al., 2008). Entretanto, o algoritmo aqui apresentado é totalmente automático. Uma vez discretizado o ambiente, nenhuma interferência humana é necessária para a obtenção da matriz MAS ótima.

Muitos dos principais algoritmos de busca são do tipo em profundidade, o que também não é o caso deste. Neste algoritmo, a busca se dá inicialmente em largura e, somente após toda a primeira vizinhança considerada (VVN ou VM) de todos os elementos objetivos terem sido pesquisadas, é que se evolui em profundidade. A busca do algoritmo evolui a partir do(s) objetivo(s), de modo conjunto para o restante do ambiente. Por isso, na Figura 3.7, a área em branco (indicando a região pesquisada) se inicia no entorno dos objetivos (saída) e vai evoluindo paulatinamente até abranger todo o ambiente.

Observa-se também, na Figura 3.7, que a evolução da variação do algoritmo segundo VVN sobre o ambiente construído sendo pesquisado apresenta uma forma macroscópica triangular, ao passo que a evolução da variação do algoritmo segundo VM apresenta uma forma macroscópica retangular. Essas diferentes formas visualizadas de evolução do algoritmo sobre o ambiente são plenamente coerentes com o formato de busca das células vizinhas para cada uma das variações dos algoritmos (Figura 3.1a).

Ressalta-se que a pesquisa sobre a matriz MBP pode ser feita de modo sequencial simples, nem mesmo importando se a matriz MBP é tratada como uma pilha ou como uma fila.

O gráfico com o mapa de distâncias (Figura 3.8) permite conhecer o perfil de evolução das distâncias em relação ao objetivo em cada ponto do ambiente. O algoritmo, conforme a VVN apresenta, nos exemplos mostrados, um mapa de distâncias com um perfil aproximadamente similar à parte de um quadrado com 45° de defasagem em relação ao ambiente. Já o algoritmo segundo VM apresenta, nos exemplos mostrados, um mapa de distâncias com um perfil similar à parte de um octógono regular.

A Figura 3.10 ajuda a ilustrar esta observação, pela identificação de algumas linhas de distância obtidas da Figura 3.8 pelas duas variações do algoritmo.

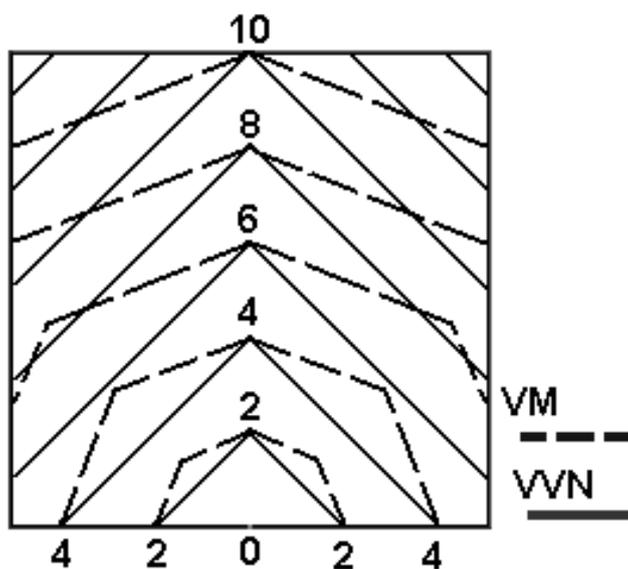


Figura 3.10: Seleção de linhas de distância [m] obtidas da Figura 3.8 para as duas variações do algoritmo.

Na Figura 3.10, as semirretas contínuas foram obtidas pelo algoritmo segundo VVN e as semirretas tracejadas pelo algoritmo segundo VM. O ponto cinza indicado pelo "0" no centro do lado inferior representa o objetivo (ou saída). Na Figura 3.10, cada série de linhas tracejadas e contínuas indica uma região afastada em 2 m da série de linhas vizinha de mesmo tipo. Os valores indicados fornecem a distância [m] da respectiva série de linhas em relação à saída. Cada série de linhas contínuas é composta por dois segmentos de retas ortogonais e cada série de linhas tracejadas é composta por segmentos de retas, formando um semi-octógono regular ou parte de um.

As linhas tracejadas e contínuas de mesma distância se tocam em certos pontos (os valores de distância indicados na Figura 3.10 foram posicionados próximos a todos estes pontos de interseção). Nestes pontos, as variações do algoritmo (segundo VVN e VM) geram o mesmo perfil de distância em relação à saída. Entretanto, para o resto do ambiente, as séries de linhas de mesma distância obtidas pelo algoritmo segundo VM (linhas tracejadas) estão sempre mais afastadas da origem do que as séries de linhas da mesma distância obtidas pelo algoritmo segundo VVN (linhas contínuas).

Assim, para qualquer ponto do ambiente que esteja fora dos pontos de interseção indicados entre as linhas contínuas e tracejadas de mesma distância, a distância indicada pelo algoritmo segundo VVN será sempre maior que a distância indicada pelo algoritmo segundo VM. Isto acontece porque, nos pontos em que se igualam, a evolução de ambas as variações do algoritmo é similar (Figura 3.1a), mas, nas diagonais, existe grande diferença, já que, pelo algoritmo, segundo VVN, é necessária a movimentação de duas casas de distância r para se locomover, na verdade, uma distância de apenas $\sqrt{2} r$ (Figura 3.11). Independente da variação do algoritmo utilizado, o erro, quando não nulo, será sempre positivo, ou seja, o mapa de distâncias sempre indicará valores iguais ou superiores aos reais.

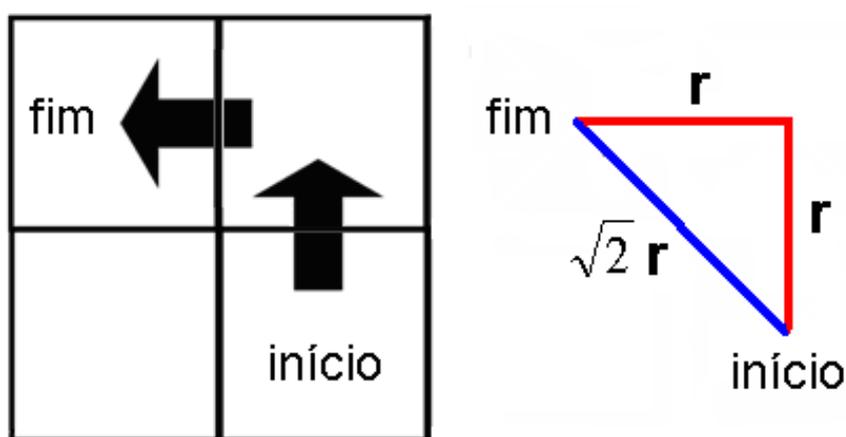


Figura 3.11: Representação esquemática da movimentação entre casas diagonalmente vizinhas.

3.2.6 Pseudocódigos

Para facilitar a compreensão desses algoritmos, os Quadros 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam os pseudocódigos da parte principal dos mesmos. No Quadro 3.1 estão as definições das variáveis utilizadas nos pseudocódigos. No Quadro 3.2 está a função inicial de busca pela vizinhança de Von Neumann. No Quadro 3.3 está a função de busca pela vizinhança de Moore e no Quadro 3.4 se apresenta a efetiva função que altera os valores das matrizes. A função apresentada pelo Quadro 3.2 é a função base desta parte apresentada do algoritmo que chama as demais funções (Quadros 3.3 e 3.4) quando necessário.

Quadro 3.1: Definição das variáveis empregadas nos pseudocódigos dos Quadros 3.2, 3.3 e 3.4.

Definições das variáveis empregadas:

MA, MAS e MBS são matrizes (mesmo significado já descrito, col, lin, colver, linver, colmax, linmax são variáveis inteiras, dnova uma variável real e vm uma variável lógica;

col (ou lin) é a coluna (ou linha) da casa base indicada na MBP cuja vizinhança é verificada em MA. Assim o índice [lin, col] indica o endereço da casa base cuja vizinhança é verificada em MA;

colver (ou linver) é o número da coluna (ou da linha) da casa vizinha à base sendo verificada em MA. Neste exemplo, o índice [linver, colver] indica o endereço da casa diagonal esquerda superior da casa base na matriz MA;

colmax (ou linmax) é o número total de colunas (ou linhas) de MA;

dnova é a eventual nova distância (em número de elementos) da casa vizinha a casa base sendo verificada em relação ao objetivo;

vm vale "true" se a pesquisa for pela vizinhança de Moore ou "false" se a pesquisa for pela vizinhança de Von Neumann;

as matrizes MA, MAS, MBS, assim como as variáveis colmax, linmax são globais. As demais locais.

Quadro 3.2: Listagem do pseudocódigo da função de busca na vizinhança de Von Neumann.

FUNÇÃO Busca (lin, col, vm) # variáveis locais de entrada

busca na casa a esquerda

colver ← col - 1;

linver ← lin;

dnova ← MAS[[lin, col] + 1

IR FUNÇÃO AlteraMA (colver, linver, dnova)

busca na casa a direita

colver ← col + 1;

linver ← lin;

dnova ← MAS[[lin, col] + 1

IR FUNÇÃO AlteraMA (colver, linver, dnova)

busca na casa acima

colver ← col;

linver ← lin - 1;

dnova ← MAS[[lin, col] + 1

IR FUNÇÃO AlteraMA (colver, linver, dnova)

busca na casa abaixo

colver ← col;

linver ← lin + 1;

dnova ← MAS[[lin, col] + 1

IR FUNÇÃO AlteraMA (colver, linver, dnova)

SE vm = "true" **ENTÃO**

IR FUNÇÃO BuscaVM (lin, col)

FIM FUNÇÃO Busca

Quadro 3.3: Listagem do pseudocódigo da função de busca na vizinhança de Moore.

FUNÇÃO BuscaVM (lin, col) # variáveis locais de entrada

busca na casa diagonal esquerda superior

colver ← col - 1;

linver ← lin + 1;

dnova ← MAS[lin, col] + $\sqrt{2}$

IR FUNÇÃO AlteraMA (colver, linver, dnova)

busca na casa diagonal esquerda inferior

colver ← col - 1;

linver ← lin + 1;

dnova ← MAS[lin, col] + $\sqrt{2}$

IR FUNÇÃO AlteraMA (colver, linver, dnova)

busca na casa diagonal direita superior

colver ← col + 1;

linver ← lin - 1;

dnova ← MAS[lin, col] + $\sqrt{2}$

IR FUNÇÃO AlteraMA (colver, linver, dnova)

busca na casa diagonal direita inferior

colver ← col + 1;

linver ← lin + 1;

dnova ← MAS[lin, col] + $\sqrt{2}$

IR FUNÇÃO AlteraMA (colver, linver, dnova)

FIM FUNÇÃO BuscaVM

Quadro 3.4: Listagem do pseudocódigo da função que efetivamente altera as matrizes.

FUNÇÃO AlteraMA (colver, linver, dnova) # variáveis locais de entrada

SE colver ≥ 0 **E** linver ≥ 0 **E** colver ≤ colmax **E** linver ≤ linmax **ENTÃO**

SE MA[linver, colver] ≥ 0 **ENTÃO**

SE MAS[linver, colver] > dnova **OU** MAS[linver, colver] = 0 **ENTÃO**

MAS[linver, colver] ← dnova;

SE [linver, colver] **NÃO ESTÁ EM** MBS **ENTÃO**

ADICIONAR [linver, colver] **EM** MBS;

FIM SE

FIM SE

FIM SE

FIM SE

FIM FUNÇÃO AlteraMA

3.3 Busca Referenciada

O terceiro algoritmo é denominado de algoritmo de busca referenciada (BR), pois uma casa sempre se referencia a outra, pelo critério de visibilidade à casa mais distante do agente que está mais próxima do destino desejado. Este princípio da busca referenciada pela visibilidade foi originalmente proposto por Thompson (1977) para suporte na navegação de robôs móveis nas então esperadas futuras viagens ao planeta Marte.

3.3.1 Matrizes de Suporte

Este algoritmo também necessita da discretização do ambiente, conforme Seção 3.2.2, e da obtenção da matriz MA. Entretanto, são necessárias a criação adicional de quatro distintas matrizes de suporte. Duas possuem as mesmas dimensões (linhas e colunas) da matriz MA, mas com todos seus elementos contendo inicialmente o valor "0". Estas duas matrizes dimensionalmente semelhantes à matriz MA são denominadas de matriz distância aparente (MDA) e de matriz de direcionamento e referência (MDR).

A terceira matriz de suporte será denominada, similarmente aos algoritmos segundo VVN e VM, de matriz de busca primária (MBP). Esta nova matriz MBP possui duas linhas e inicialmente tantas colunas quanto forem os elementos de saídas (elementos de valor "-2") existentes na matriz MA. Na primeira linha da matriz MBP, cada elemento será associado a um elemento de saída da matriz MA. Para esta associação, os índices (linhas e colunas) da matriz MA que contém as saídas serão colocados um a um nos elementos da primeira linha da matriz MBP. Assim, cada elemento da matriz MBP estará associado a um elemento de saída da matriz MA. A sequência ou ordem no qual a associação entre a matriz MA e a matriz MBP é realizada não interfere no resultado final do algoritmo.

Por ser o primeiro passo deste algoritmo, cada elemento da segunda linha da matriz MBP conterà os mesmos valores do respectivo elemento da primeira linha da matriz

MPB de sua mesma coluna. A Figura 3.12 apresenta a matriz MPB inicialmente gerada para o ambiente da Figura 3.2. Finalmente, a quarta matriz de suporte será denominada de matriz de busca secundária (MBS) e terá sempre duas linhas, inicialmente nulas.

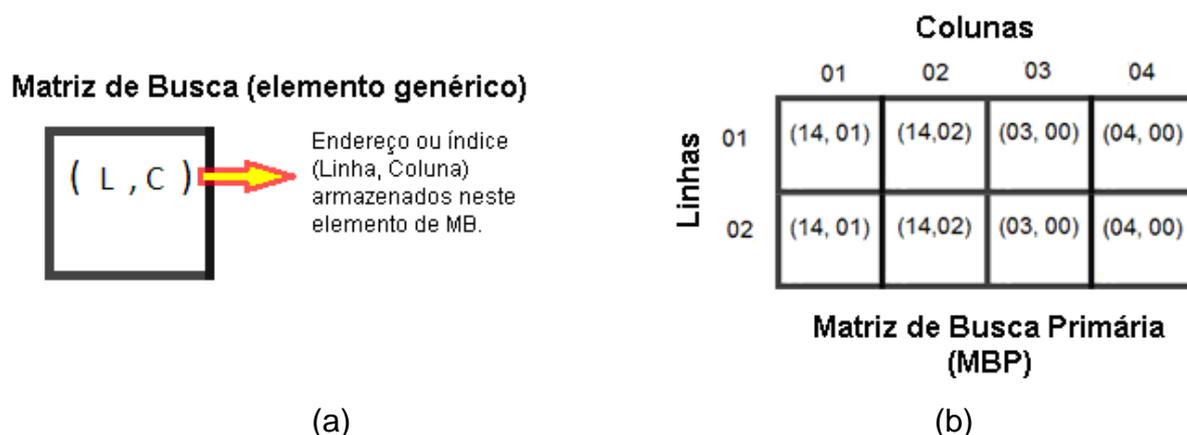


Figura 3.12: Representações para o algoritmo de busca referenciada, onde em (a) se apresenta um elemento genérico da matriz MBP, e em (b) a respectiva matriz MBP inicial gerada para o ambiente da Figura 3.2.

3.3.2 O Algoritmo de Busca Referenciada – Primeiro Laço

Geradas as quatro matrizes de suporte (MDA, MDR, MBP e MBS), o algoritmo de busca referenciada se inicia pela pesquisa sobre cada elemento da primeira linha da matriz MBP. Considerando o primeiro elemento da primeira coluna da matriz MBP indicado na Figura 3.12, ele contém o que se denominará índice base de varredura inicial, no caso a linha 14 e coluna 1, ou seja, este é um endereço que na matriz MA representa uma saída ou objetivo. Todos os elementos da matriz MA que são os primeiros vizinhos de Von Neumann (os elementos imediatamente acima, abaixo, a direita e a esquerda) deste objetivo indicado serão verificados.

O primeiro passo da verificação consiste em se determinar se na matriz MA estes elementos vizinhos são válidos. Somente atendem ao critério de validade aqueles elementos que na matriz MA não pertençam a paredes, obstáculos ou saídas, nem que sejam externos ao ambiente, ou externos a própria matriz MA.

Quando um elemento pesquisado da matriz MA é considerado válido, o índice deste elemento (linha e coluna) é adicionado na primeira linha da matriz MBS. Como se está no primeiro laço do algoritmo, a segunda linha da mesma coluna da matriz MBS terá o mesmo índice base de varredura inicial (no caso a linha 14 e coluna 1).

Na Figura 3.13 está representado este primeiro passo de busca e a respectiva matriz MBS, gerada a partir da matriz da Figura 3.12.

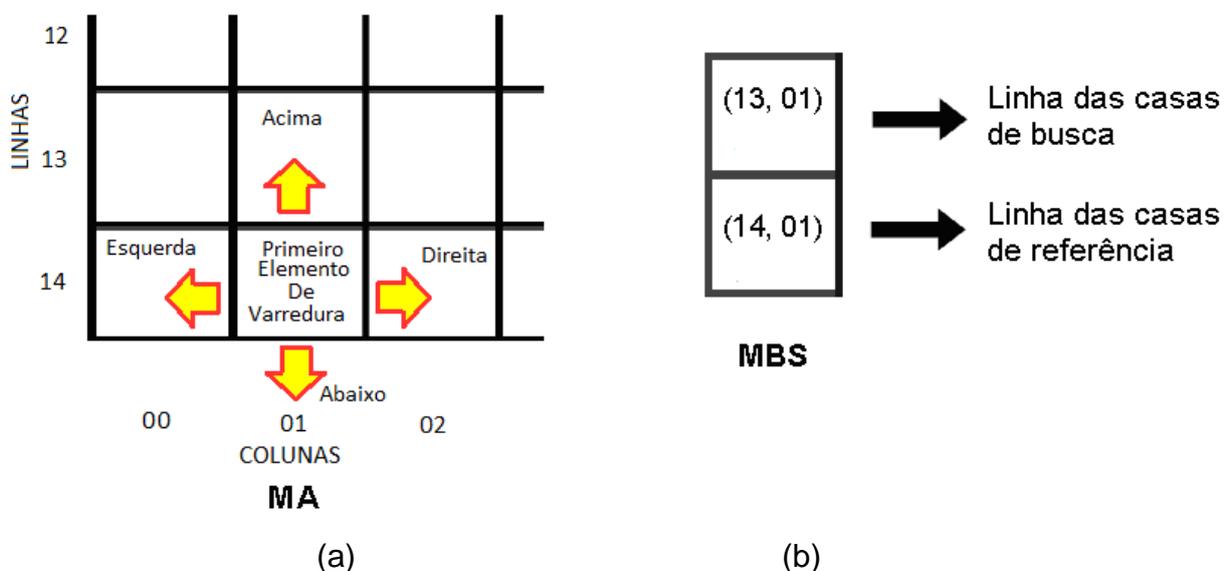


Figura 3.13: Representações em (a) da primeira vizinhança de busca na matriz MA, e em (b) da respectiva matriz MBS final após esta primeira busca sobre o primeiro elemento da matriz MBP.

Nota-se que os elementos da matriz MA à esquerda, à direita e abaixo do primeiro elemento de varredura não foram adicionados a matriz MBS porque não atenderam ao critério de validade (no caso destes elementos, os mesmos pertencem a uma parede, ou à própria saída, ou estão fora da matriz MA). Consequentemente, somente o elemento da matriz MA localizado acima da casa de varredura atendeu ao critério de validade e teve seu índice transferido para a matriz MBS.

Os elementos da primeira linha da matriz MBP serão todos pesquisados e, mantendo o mesmo raciocínio, os respectivos elementos da matriz MA, considerados como válidos, serão adicionados em novos elementos na primeira linha da matriz MBS. Terminada a varredura por sobre a matriz MBP, a matriz MBS

estará então completa. Adicionalmente, neste primeiro laço, todos os elementos válidos estão a um elemento de distância da saída. Assim, todos os elementos na matriz MDA, cuja posição está indicada na primeira linha da matriz MBS, terão seu valor alterados de “0” para “1”.

Finalmente, agora na matriz MDR, todos estes mesmos elementos alterados na matriz MDA terão o respectivo valor contendo o endereço (linha e coluna) do elemento da saída a que estão a uma casa de distância. Na Figura 3.14, está a representação de parte da matriz MDA, de parte da matriz MDR alterada, e de toda a matriz MBS final após este primeiro laço de verificação sobre toda a MBP inicial.

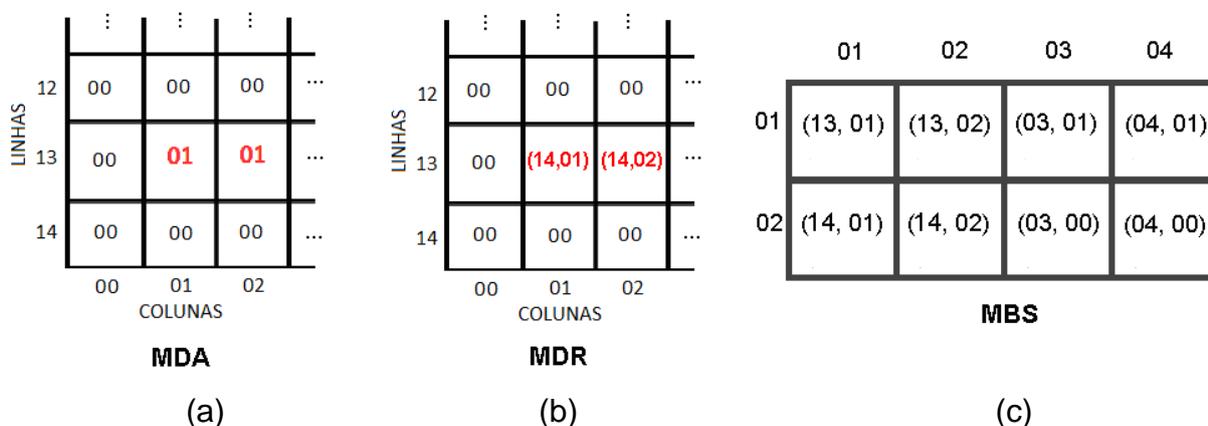


Figura 3.14: Representações, em (a) e (b), respectivamente, de parte atualizada da matriz MDA e da matriz MDR, e em (c) da matriz MBS final após a primeira busca sobre toda a matriz MBP inicial.

Nesse momento, a matriz MDA passa a conter, em todos os seus elementos que não possuem o valor “0”, a distância (em número de elementos) que este respectivo elemento está da saída mais próxima. Ainda, a matriz MDR passa a conter, em todos os seus elementos que não possuem o valor “0”, o endereço (índice linha e coluna) da saída mais próxima do respectivo elemento.

Terminada este primeiro laço de busca por toda a matriz MBP inicial, toda esta matriz MBP é então substituída pela matriz MBS final, ou seja, uma nova matriz MBP é criada com os mesmos valores e dimensões (número de colunas e linhas) da matriz MBS final. Feita esta troca de valores, a matriz MBS é então novamente feita nula.

As linhas da nova matriz MBP terão denominações particulares, relativas à função de cada uma. A primeira linha da matriz MBP será denominada de linha das casas de busca e a segunda de linha das casas de referência.

3.3.3 O algoritmo BR – Próximos Laços

O próximo laço será realizado sobre a nova matriz MBP (antiga matriz MBS final da etapa anterior). Considerando o início a partir da primeira coluna da matriz MBP (Figura 3.14c), o primeiro índice das casas de busca (primeira linha) indica a linha 13 e a coluna 1, e o índice da respectiva casa de referência (segunda linha) também indica a linha 13 e a coluna 1.

Uma nova verificação então se dará sobre a matriz MA considerando as casas vizinhas, segundo Von Neumann, do índice indicado pela casa de busca. Caso alguma casa vizinha da matriz MA não seja válida (pertença a paredes, obstáculos, saídas ou esteja fora do ambiente válido ou da própria matriz MA), esta casa não será considerada. Caso seja uma casa válida, a partir desta segunda rodada, tem-se também que verificar a adequação da mesma. Sendo considerada adequada é então calculada sua D_{pv} (distância pontual da casa sendo pesquisada vizinha a casa base de varredura).

Alteração das matrizes de suporte

Tendo sido calculado o D_{pv} , verifica-se então se o mesmo é menor que o valor já contido na matriz MDA para esta mesma casa. Se o valor de D_{pv} for menor que o valor já contido na matriz MDA, ou se na matriz MDA estiver com o valor “0”, esta casa válida é agora também considerada como adequada. Caso contrário, a casa, apesar de válida, é considerada como não adequada (o algoritmo nunca pode “piorar” um valor anteriormente encontrado). Se a casa for considerada não adequada, nenhuma alteração é feita nas matrizes MDA, MDR e MBS.

Se a casa for considerada adequada, o índice desta casa vizinha (linha e coluna) é adicionado na primeira linha de uma nova coluna da matriz MBS. Caso o critério de linearidade tenha sido atendido, na segunda linha desta mesma coluna da matriz MBS será colocado o índice (linha e coluna) contido na segunda linha da coluna da matriz MBP que está sendo analisada. Caso o critério de linearidade tenha sido reprovado, na segunda linha desta mesma coluna da matriz MBS será colocado o índice (linha e coluna) relativo à casa de varredura.

Ainda se a casa for considerada adequada, o valor de D_{pv} será transferido substituindo o valor da matriz MDA da casa vizinha que está sendo analisada, e o valor do elemento da segunda linha da nova matriz MBS, que acabou de ser adicionado, será também transferido, substituindo o valor da matriz MDR da mesma casa vizinha que está sendo analisado.

Finalizando os laços

Todas as etapas anteriores relativas ao algoritmo de busca referenciada são repetidas para todos os elementos de varredura da casa base considerada, e depois para todas as casas bases relacionadas na primeira linha da matriz MBP. Terminada a verificação, a matriz MBP será apagada e nova matriz MBS será então feita como sendo a nova matriz MBP. Após esta substituição a matriz MBS é feita nula. Este processo se repete continuamente, até que ao final de alguma rodada após a verificação de todos os elementos de varredura de todas as casas base relacionadas na matriz MBP em uso, não se encontre nenhuma casa válida e adequada.

Neste momento, a matriz MBS que no início do laço estava nula continuará nula ao fim do mesmo. Isto indica que todo o ambiente já foi inteiramente analisado e que a busca está completa. Assim, a matriz MDA final e a matriz MDR final têm respectivamente, em todos os seus elementos não nulos, a distância em números de elementos da saída mais próxima e o indicativo da melhor direção a ser seguida rumo à saída.

3.4 Resultados

Assim como já apresentado para os algoritmos VVN e VM, é realizado para avaliação e comparação, um conjunto de simulações em ambientes quadrados com o algoritmo BR. Estes ambientes quadrados não possuem separações internas, têm paredes de um elemento de espessura e um único objetivo (saída) de dois elementos de largura posicionado no centro de um dos lados, possuindo largura externa variando de 10 elementos a 1.000 elementos.

A Figura 3.15 mostra a variação do custo computacional (em tempo de processamento informado por uma rotina introduzida no próprio programa, estando o uso da CPU em torno de 50%) para estas simulações dos ambientes quadrados para os três algoritmos de busca (VVN, VM e BR). Baseado na Figura 3.15, pode-se inferir informações sobre a complexidade apresentada pelos algoritmos.

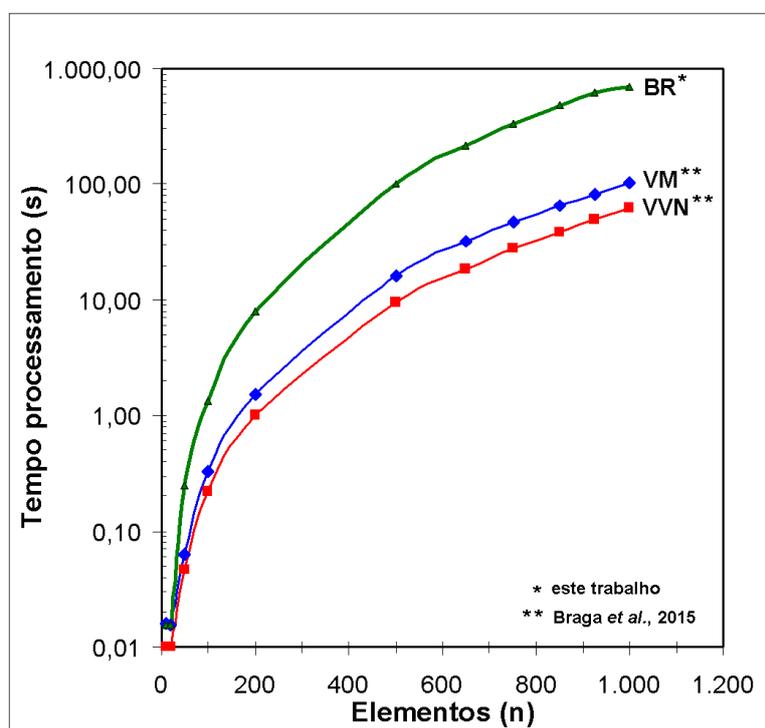


Figura 3.15: Tempo de processamento em função do número de elementos de cada lado para todas as simulações dos ambientes quadrados.

Em relação ao perfil de evolução do algoritmo sobre o ambiente, o algoritmo BR possui uma evolução similar ao perfil apresentado pelo algoritmo VVN (Figura 3.7).

Adicionalmente, ainda para as simulações dos ambientes quadrados e considerando uma resolução r de 5 cm, foi obtido o valor da maior distância entre um ponto do ambiente e o objetivo ($D_{\text{máx}}$) e o valor da distância média entre todos os pontos do ambiente e o objetivo mais próximo ($D_{\text{méd}}$). O valor teórico para o $D_{\text{máx}}$, obtido pela distância euclidiana contínua do ponto mais afastado da saída independente de qualquer discretização, foi manualmente calculado para cada simulação para fins de comparação. Na Figura 3.16, são apresentados os resultados obtidos de $D_{\text{máx}}$ e $D_{\text{méd}}$ para todas as variações dos algoritmos.

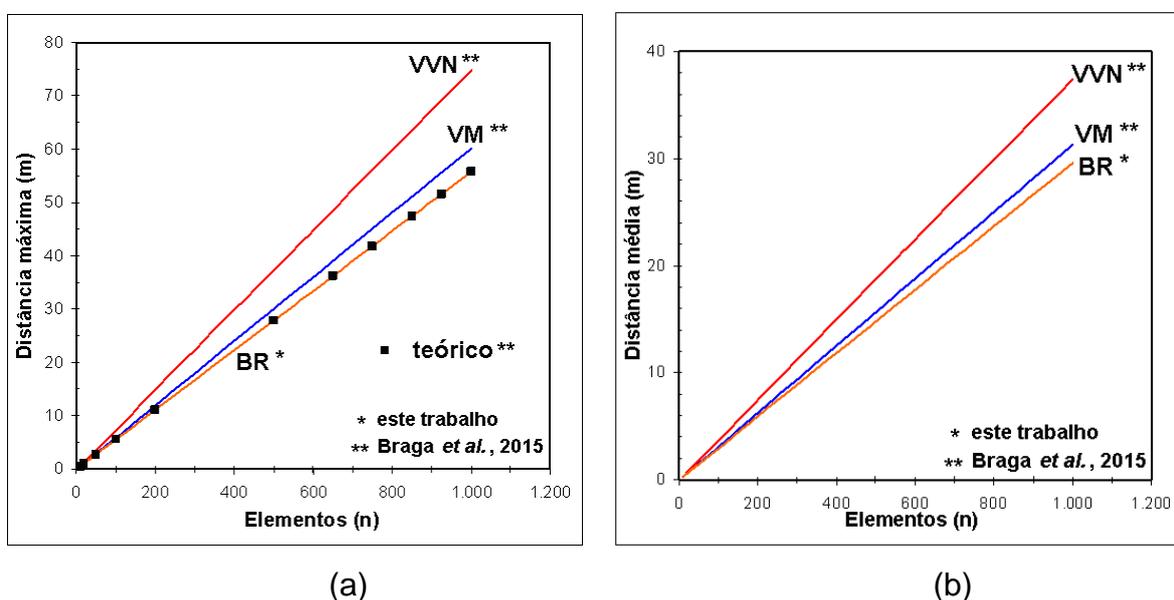


Figura 3.16: A variação da distância máxima (a) e da distância média (b) para todas as simulações dos ambientes quadrados em função do número de elementos de cada lado.

Adicionalmente, para se facilitar a identificação e visualização dos perfis de evolução dos valores de distância aparente em relação a saída mais próxima ao longo de todo o ambiente, são gerados os respectivos mapas de distância. Assim, na Figura 3.17 estão mostrados os mapas de distância para o ambiente quadrado com n de 1000 elementos (r de 5 cm, 2500 m² de área). As diferentes cores de faixas no mapa de distâncias da Figura 3.17 sempre indicam um distanciamento de 1 m crescente em relação à saída, sendo que o objetivo (ou saída) está localizado no centro do lado inferior (vista de topo) do ambiente.

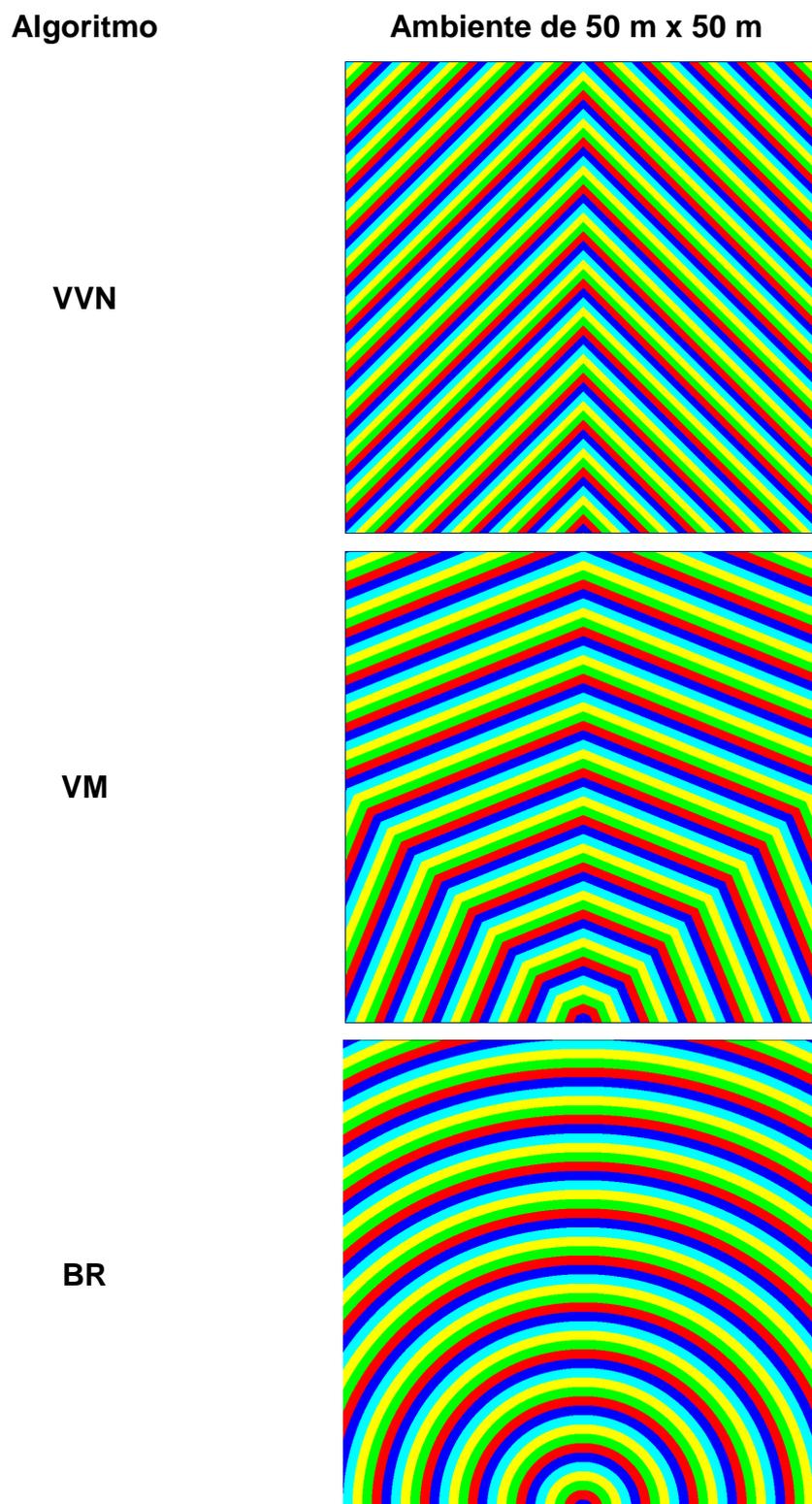


Figura 3.17: Representação dos mapas de distância gerados para os três algoritmos (VVN, VM, BR) para um ambiente quadrado de 2500 m² de área e saída no centro do lado inferior.

Finalmente, na Figura 3.18, apresenta-se o ambiente da Figura 3.2 estilizado com setas indicando a direção rumo a saída de qualquer parte do ambiente obtidos pelos três distintos algoritmos a partir do respectivo mapa de distâncias previamente gerado.

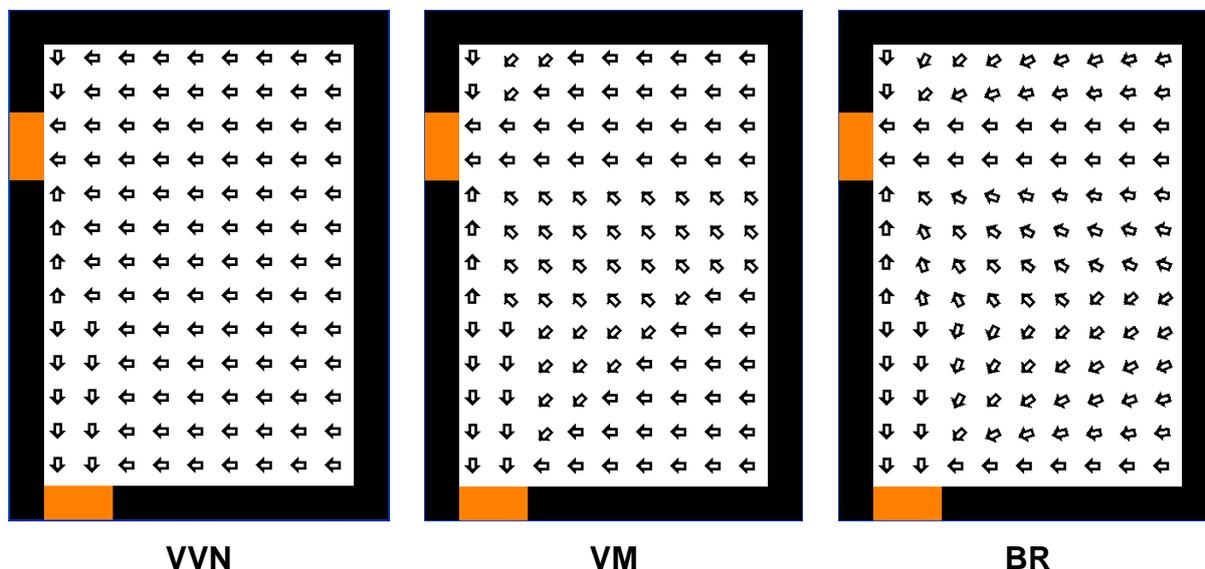


Figura 3.18: Vista de topo do ambiente da Figura 3.2, estilizado com setas, indicando o melhor caminho (ou um dos melhores) a ser escolhido até o objetivo mais próximo (em laranja), obtido para os três algoritmos (BR, VM e VVN).

3.5 Discussões

A forma gráfica da evolução do algoritmo BR sobre o ambiente ser similar a forma gráfica apresentada pelo algoritmo VVN (Figura 3.7) era esperada devido ao algoritmo BR também seguir a pesquisa segundo uma primeira vizinhança de Von Neumann. Entretanto, as semelhanças com o algoritmo segundo VVN param por aí, já que o algoritmo BR utiliza a todo momento a casa referência (segunda linha da matriz MBP) como balizadora tanto do distanciamento (matriz MDA) como do direcionamento (matriz MDR), e não somente os primeiros vizinhos da casa de busca (primeira linha da matriz MBP), como fazem os algoritmos de busca simples.

Desconsiderando os valores absolutos indicados para os tempos de processamento, pois estes dependem da arquitetura e da configuração computacional particular das

simulações (*hardware* e *software*), na Figura 3.15 se observa que a variação do algoritmo segundo VM apresenta um tempo de processamento cerca de 64% superior ao tempo de processamento obtido para a variação segundo VVN. Considerando que, a cada iteração, a variação do algoritmo segundo VM pesquisa 8 casas vizinhas à base, enquanto a variação VVN pesquisa apenas 4 casas vizinhas à base (Figura 3.1a), este aumento no tempo de processamento era esperado.

Já o algoritmo BR possui um tempo de processamento cerca de 8 vezes superior ao apresentado pelo algoritmo VM. Este é um incremento considerável, causado principalmente pela necessidade de se verificar constantemente a visualização da casa referência. Entretanto, para aplicações não dinâmicas, como pode acontecer em programas de simulação de evacuação de ambientes (THOMPSON, MARCHANT, 1995a, 1995b; BRAGA et al., 2014), este tempo gasto no processamento não é um impeditivo e os valores alcançados são aceitáveis. Isto acontece pois o algoritmo BR, assim como os demais, é aplicado antes da simulação uma única vez e os resultados armazenados na memória (uso não dinâmico).

Pela Figura 3.16a, verifica-se que os valores de $D_{\text{máx}}$ fornecidos pelo algoritmo BR são similares aos valores teóricos calculados para aqueles mesmos ambientes, mas cerca de 8% inferiores aos valores fornecidos pelo algoritmo de busca simples conforme uma VM e cerca de 34% inferiores pelo algoritmo de busca simples conforme uma de VVN. Esta é uma grande qualidade a favor do algoritmo BR, a alta precisão dos valores de distância obtidos, mesmo quando comparados com os valores teóricos, sem a necessidade de nenhum tipo de correção. Em relação à $D_{\text{méd}}$, a diferença entre os valores obtidos pelos algoritmos BR, VM e VVN mantém esta mesma diferença relativa (Figura 3.16b).

Curiosamente, apesar de o algoritmo VVN ser o que apresentou os piores resultados na determinação da distância máxima, ressalva-se que caso em determinada aplicação o agente que irá percorrer a rota a ser gerada pelo mapa de distâncias apenas poder realizar movimentações em ângulos de 90° (não poder se locomover nas diagonais), a utilização da variação VM ou BR não se aplicam e somente deve

ser usado o algoritmo pela variação VVN (dependendo da aplicação a que se destina esta é uma possibilidade real, apesar de fora do contexto deste trabalho).

Devido a qualidade dos resultados, o perfil das curvas dos mapas de distância gerado pelo algoritmo BR (Figura 3.17) é aparentemente como se fosse “macroscopicamente diferenciável”, sem variações bruscas, similar a arcos de circunferência. Já os mapas de distância para estes mesmos ambientes gerados pelos algoritmos VM e VVN (Figura 3.17) são formados, mesmo macroscopicamente, por segmentos de retas contínuas e não colineares.

Para melhor visualizar as diferenças nos perfis, na Figura 3.19 todos os mapas de distância para o ambiente de 100 m² foram superpostos em uma única representação estilizada. As semi-retas vermelhas foram obtidas do mapa de distância conforme VVN, as retas azuis do mapa de distância conforme VM, e ao fundo desbotado está o mapa de distância obtido pelo algoritmo BR.

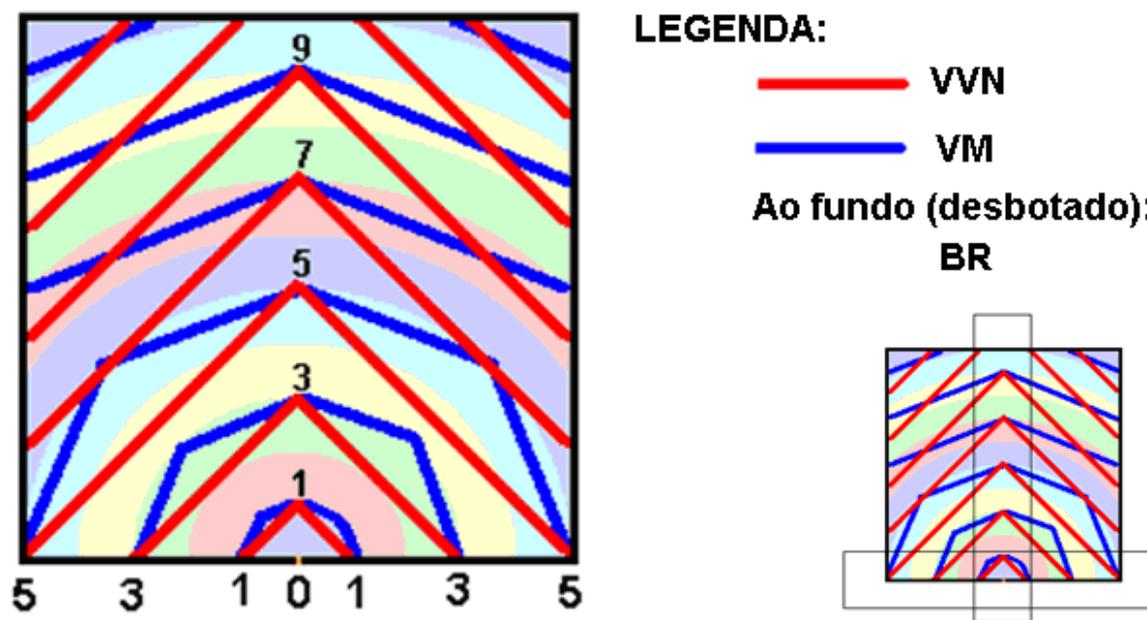


Figura 3.19: Representações de algumas das linhas de distância geradas da Figura 3.17 obtidas por todos os algoritmos.

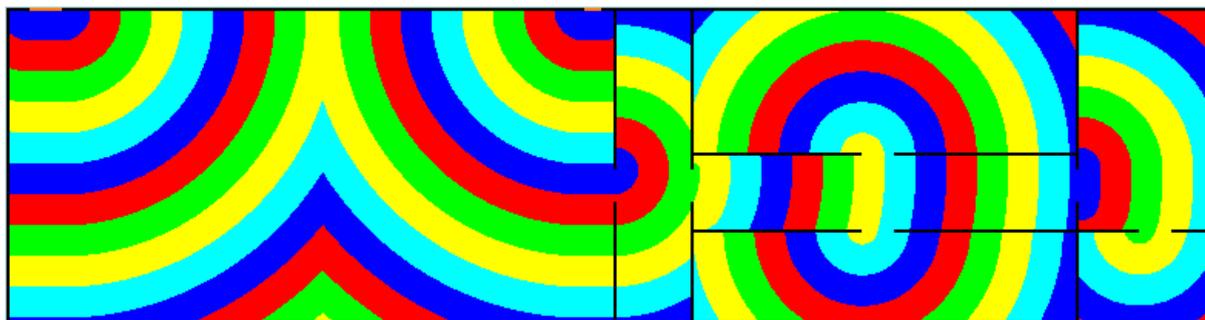
Ainda na Figura 3.19, em miniatura à direita, apresenta-se a reprodução da imagem com a identificação das áreas (retângulos) onde a discrepância entre as distâncias obtidas pelos algoritmos é menor.

O primeiro conjunto de segmento de retas azuis e vermelhas contínuo (o conjunto com o número 1 posicionado perto da interseção de ambos) indica a posição localizada a 1 m da saída (indicada pelo número 0). Exceto pelas interseções, os segmentos vermelhos estão mais próximos da saída que os segmentos azuis. Isto indica que para um ponto qualquer no ambiente (exceto nas interseções), o algoritmo segundo VVN fornece distâncias maiores que o valor de distância fornecido pelo algoritmo segundo VM.

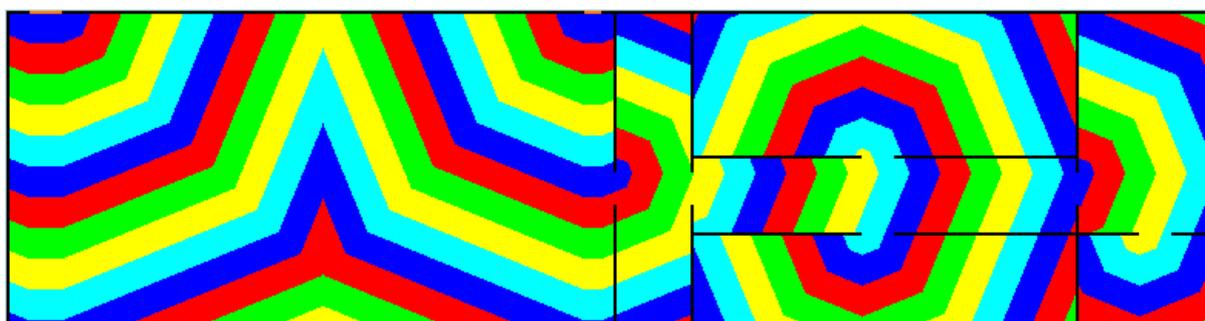
Considerando o mapa de distância desbotado ao fundo, gerado pelo algoritmo BR, os valores de distância gerados para todos os três algoritmos são visualmente similares nas interseções, mas fora das interseções, o valor relativo ao distanciamento de 1 m da saída obtido pelo algoritmo BR está ainda mais distante da saída que os obtidos pelos algoritmos segundo VVN e VM. Isto fica mais evidente ao se observar as linhas de distância de 3 m e de 5 m. Esta característica é coerente com as discrepâncias entre os valores de distâncias máximos obtidos (Figura 3.17).

Os algoritmos segundo a busca simples (VVN e VM) incorrem em erros devido a discretização. Em um caso extremo, para uma movimentação de duas casas diagonais na matriz ambiente segundo VVN são necessárias duas movimentações, resultando num distanciamento de 2 casas, enquanto o valor correto seria de $\sqrt{2}$ casas de aumento no distanciamento entre estas casas (Figura 3.11). O algoritmo BR minimiza enormemente este efeito, como se estivesse mesclando o mundo discreto, com suas vantagens computacionais, e o mundo contínuo, com suas vantagens físicas.

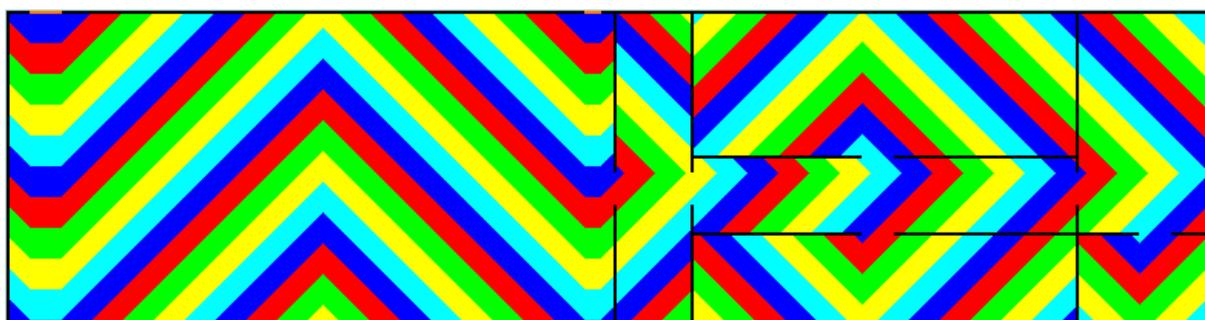
Para visualizar melhor ainda mais este efeito, na Figura 3.20 se tem os mapas de distância obtidos para um ambiente mais sofisticado (com várias passagens internas) gerado pelo algoritmo BR e também pelos VM e VVN. Cada faixa de cor representa um distanciamento de 1 m, e são duas saídas independentes localizadas na sala maior (em laranja).



Algoritmo BR: Dmáx de 27,0 m; Dméd de 12,0 m e tempo de processamento de 54 s.



Algoritmo VM: Dmáx de 27,5 m; Dméd de 12,4 m e tempo de processamento de 11 s.



Algoritmo VVN: Dmáx de 30,3 m; Dméd de 13,9 m e tempo de processamento de 8 s.

Figura 3.20: Representação esquemática dos mapas de distâncias para um ambiente com diversas salas internas obtidos pelos algoritmos BR, VM e VVN.

No ambiente da Figura 3.20, as diferenças verificadas entre os valores da distância máxima e da distância média dos algoritmos foi menor que as diferenças encontradas anteriormente (Figura 3.17). Isto aconteceu porque a específica geometria irregular retangular da Figura 3.20, tanto interna quanto externa (ambientes formados por retângulos posicionados em ângulos múltiplos de 90° em relação às coordenadas do ambiente), minimizam os erros do efeito da discretização, que, por outro lado, pode ser acentuado em outros formatos.

A pior situação (maior diferença entre os valores de distância entre os algoritmos) obtida ocorreu em ambientes cuja discretização esteja a múltiplos de 45° do posicionamento deste ambiente para o algoritmo conforme VVN e para múltiplos de $22,5^\circ$ e não múltiplos de 45° para o algoritmo conforme VM. A Figura 3.19 corrobora estas observações pela identificação das regiões onde os perfis de distância dos algoritmos se aproximam (ou se afastam).

Para ilustrar estas situações limites, foram obtidos pelos três algoritmos os mapas de distância de ambientes em forma de corredores, sem divisões internas e saídas da largura do corredor na face inferior do mesmo (vista de topo), defasados em $22,5^\circ$ e em 45° no ambiente discretizado. A Figura 3.21 ilustra estes casos.

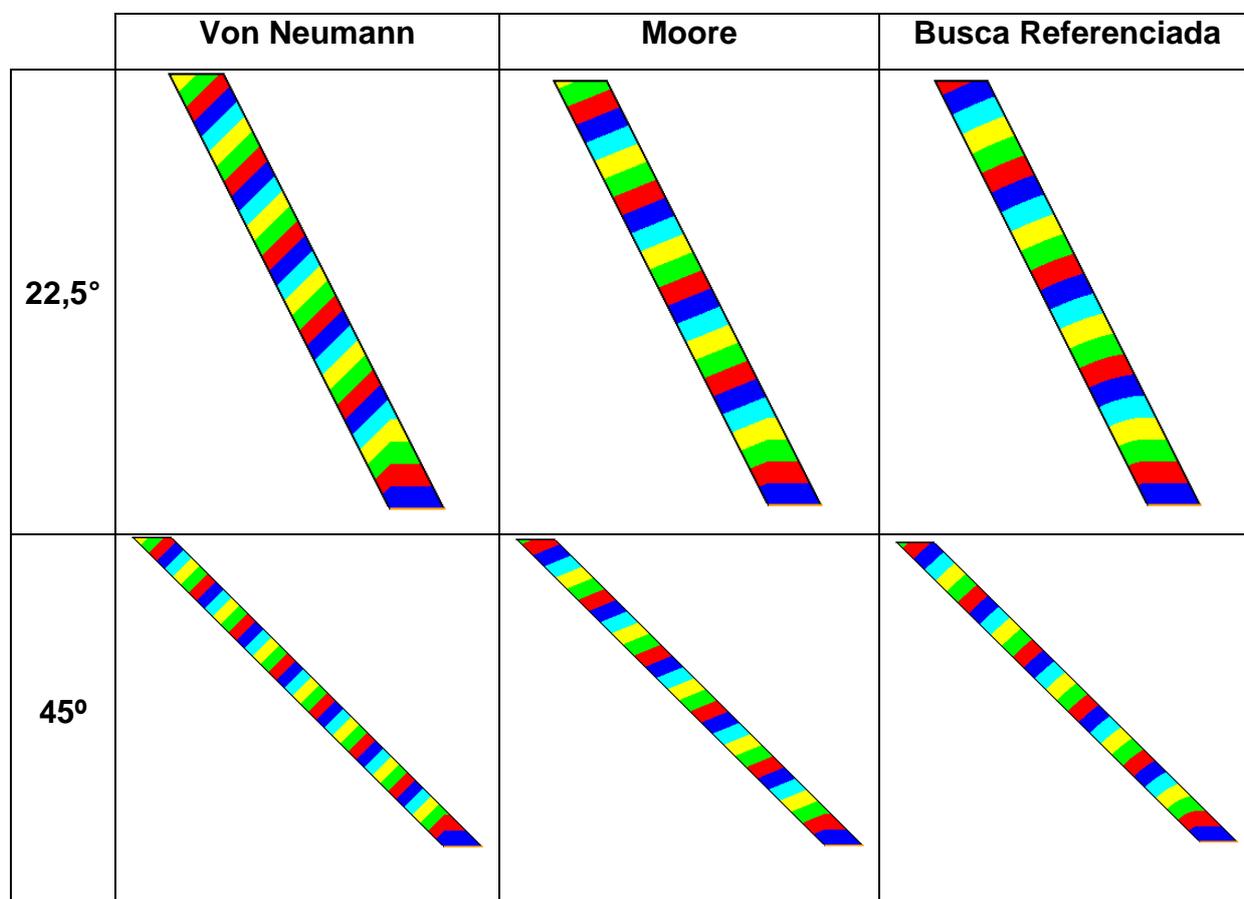


Figura 3.21: Representação dos mapas de distância para ambientes cuja geometria faz com a matriz MA um ângulo de $22,5^\circ$ ou de 45° obtidos para todos os algoritmos. Cada faixa de cor representa um distanciamento de 1 m em relação à saída, identificada em laranja na parte inferior dos ambientes.

Na Tabela 3.1 são mostradas os valores de $D_{\text{máx}}$ e $D_{\text{méd}}$, assim como as diferenças percentuais entre os valores obtidos pelo mapa de distâncias e os ideais para os ambientes da Figura 3.21 pelos três algoritmos. Também, para comparação, os valores obtidos para os ambientes quadrados sem repartições internas com uma saída pontual central, utilizados para a geração da Figura 3.16.

Tabela 3.1: Valores de $D_{\text{máx}}$, $D_{\text{méd}}$ e do tempo de processamento obtidos para todas as simulações da Figura 3.21. As diferenças identificadas entre as distâncias estão em relação ao valor gerado pelo algoritmo BR

	Ambiente a 22,5°			Ambiente a 45°		
	VVN	VM	BR	VVN	VM	BR
$D_{\text{máx}}$ (m)	29,0	23,3	21,6	38,7	27,3	27,3
Dif $D_{\text{máx}}$ (%)	+ 34,3	+ 7,9	-	+ 41,8	0	-
$D_{\text{méd}}$ (m)	13,5	11,3	10,5	18,3	13,2	13,1
Dif $D_{\text{méd}}$ (%)	+ 28,6	+ 7,3	-	+ 39,7	+ 0,8	-
Tempo (s)	1,4	1,5	2,3	1,5	1,5	2,4

Os resultados da Tabela 3.1 são muito favoráveis à utilização da variação segundo VM em detrimento da variação pela VVN (quando o BR não for viável). Este erro de até quase + 42% na determinação da distância máxima indica que o algoritmo segundo VVN simplesmente não deve ser utilizado diretamente em simulações e modelagens mais rigorosas, pelo menos não sem algum algoritmo adicional de suporte para corrigir ou minimizar este efeito.

Já a utilização da variação do algoritmo segundo VM irá resultar num erro máximo de +7,9% na determinação das distâncias, mas este erro pontual é dependente da geometria do ambiente e da posição considerada. Ainda para a variação do algoritmo segundo VM, para o ambiente a 45°, o erro médio encontrado foi de apenas +0,8% e nulo para a determinação da distância máxima. Para o ambiente quadrado, o erro médio foi de + 5,7%.

Assim, pela sua superioridade, não havendo nenhum motivo específico, o algoritmo BR deve ser preferencialmente usado em detrimento dos demais.

3.6 Aplicações

Como já mostrado, os mapas de distância podem fornecer por si só diversas grandezas importantes do ambiente, como a distância pontual, a distância máxima, e a distância média. Por exemplo, estando num posicionamento qualquer no ambiente, o mapa de distância fornece diretamente para aquela posição o valor da menor distância até a saída (D_p). O ponto da maior distância até um objetivo qualquer em um ambiente também pode ser facilmente encontrado pelo uso direto dos mapas de distância (basta se identificar o ponto de maior D_p). E a distância média de um ambiente para se alcançar um objetivo pode ser encontrado pela média aritmética simples de todos os valores de D_p (BRAGA et al., 2019). Outra importante aplicação dos mapas de distância está na indicação da rota ideal (ou em uma delas) entre um ponto qualquer do ambiente e o objetivo desejado.

Se o mapa de distância foi obtido segundo VVN, estando em um ponto qualquer do ambiente, basta se pesquisar nos pontos imediatamente vizinhos do ambiente (numa vista de topo acima, abaixo, direita e esquerda) válidos para movimentação, e se transferir para a casa vizinha que possui o menor valor de D_p . Realizando essa pesquisa e transferência sucessivamente, em um número finito de laços, o objetivo será alcançado, passando pela rota (ou por uma delas) de menor distância. Se o mapa de distâncias foi obtido segundo VM, segue-se o mesmo raciocínio, mas nesse caso vai-se pesquisar também as diagonais em relação a casa base.

Entretanto, se o mapa de distância foi obtido segundo o BR, essa pesquisa no mapa de distâncias das casas vizinhas não se torna necessário. Para se alcançar o objetivo partindo-se de um ponto qualquer do ambiente, basta pesquisar o valor indicado como referência na matriz MDR na casa de mesma posição, e seguir direto por essa direção. A cada movimentação, deve-se sempre verificar o novo valor indicado na MDR, que pode inclusive ser o mesmo já que várias casas podem se encontrar em uma mesma rota de deslocamento.

4 SITUAÇÕES ESPECIAIS DE BUSCA E EXPLORAÇÃO

Apesar das suas qualidades, os algoritmos de busca VVN, VM, e mesmo o BR, não são capazes de diretamente atenderem a algumas demandas importantes para que o modelo que os empregue possa ser efetivamente aplicado em casos reais de simulação da movimentação humana em ambientes construídos dos mais variados.

Estas características são:

- a possibilidade dos agentes se locomoverem em ambientes de múltiplos andares, passando por escadas ou rampas; e
- a possibilidade de se terem múltiplos objetivos (ou movimentações multidirecionais), que inclusive podem ser dinamicamente alterados.

É importante ressaltar que o atendimento a estes importantes pontos deve ser feito se mantendo todas as características positivas dos algoritmos apresentados.

4.1 Ambientes de Múltiplos Andares

Para se tratar ambientes de múltiplos andares, passando por escadas e rampas, o princípio básico está em planificar toda a edificação na forma de uma única matriz bidimensional. Para melhor ilustrar este ponto, na Figura 4.1 se tem a representação estilizada na forma planificada de um ambiente de dois pavimentos (cada pavimento constituído por um único salão livre), unidos por uma escada direta (sem quebras), estando a entrada do ambiente no primeiro pavimento e com r de 5 cm.



Figura 4.1: Representação planificada de um ambiente de dois pavimentos.

Ainda na Figura 4.1, a entrada do ambiente está indicada em laranja (na matriz MA contém o valor “-2”), as áreas livres dos pavimentos e da escada (região que pode ser usada para a movimentação) estão indicadas na cor branca (na matriz MA contém o valor “0”). Na cor preta estão indicadas as paredes e os limites da escada (na matriz MA contém o valor “-1”), e na cor azul claro uma região que, apesar de estar dentro da matriz, não pertence ao ambiente considerado (na matriz MA possui o valor “-3”). Todas estas regiões já estão descritas no algoritmo *pathfinder* base.

Entretanto, se têm adicionalmente duas novas regiões, que somente aparecem quando da discretização de ambientes de mais um pavimento, representadas pela cor cinza e pela cor azul escuro. A região em cinza indica a área dos pavimentos que apesar de não estarem obstruídas por paredes não permitem a movimentação de pessoas pela restrição física imposta pela escada (na matriz MA contém o valor “-4”).

A indicação desta região em cinza é importante porque, apesar de na verdade ela representar uma área vazia, a movimentação sobre a mesma não é possível, sendo necessária sua identificação para impedir que o algoritmo realize uma pesquisa sobre a mesma. Já as faixas em azul escuro indicam o início e o fim das escadas (ou rampas), tanto na própria escada (ou rampa) como na sua respectiva posição nos pavimentos (na matriz MA contém o valor “-5”).

Estando planejado e discretizado o ambiente na forma de uma única matriz bidimensional, com todas as suas regiões numericamente identificadas, além de todos os passos anteriores do algoritmo *pathfinder* base, deve ser também criada uma nova matriz chamada de matriz conexões (MC). Esta matriz MC possui duas linhas e tantas colunas quanto forem os elementos que contém o valor “-5” na matriz MA (elementos que indicam o início e fim das escadas).

A primeira linha da matriz MC deve conter o índice (linha, coluna) de todos os elementos “-5” da matriz MA. Cada um desses elementos na matriz MA está conectado a outro elemento também na matriz MA, que deve vir indicado na respectiva mesma coluna da segunda linha da matriz MC. Na Figura 4.2 se

apresenta em destaque a parte do ambiente da Figura 4.1 que contém as regiões da cor azul escura (escadas) e a indicação de suas partes conectadas (*link A* e *link B*).

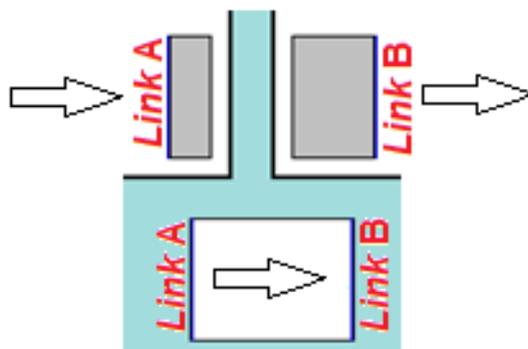


Figura 4.2: Imagem ampliada de parte da Figura 4.1 indicando as conexões entre os pavimentos e a escada (*link A* e *link B*).

Assim, quando o algoritmo de busca avançar a partir da entrada do 1º pavimento (em laranja) para seu interior até encontrar a região azul escura (o *link A*) dentro do primeiro pavimento (o controle é feito pela primeira linha da matriz MC), a busca sobre o ambiente é transferida para o respectivo ponto do link A dentro da escada (conforme indicado na respectiva coluna da segunda linha da matriz MC).

Seguindo com o algoritmo de busca dentro da escada, o algoritmo irá avançar até o fim da escada, encontrando a outra região azul escuro (ou *link B*) dentro da escada (o controle é feito pela primeira linha da matriz MC). Nesse momento, a busca é transferida para o respectivo ponto do link B dentro do segundo pavimento (conforme indicado na respectiva coluna da segunda linha da matriz MC).

As setas na Figura 4.2 mostram esta sequência de transferências, iniciando pela entrada da escada no primeiro pavimento, e explorando toda a escada até sair no segundo pavimento. Ou seja, a busca que se iniciou na entrada no primeiro pavimento prossegue até o *link A*, sendo então transferida para a escada. Na escada, a busca prossegue até o *link B*, sendo então transferido para o segundo pavimento. No segundo pavimento, a busca prossegue até pesquisar todo o ambiente. Na Figura 4.3 se apresenta então o respectivo mapa de distâncias estilizado, gerado pelo algoritmo BR, do ambiente da Figura 4.1, onde cada faixa de cor representa um distanciamento de 1 m da saída no primeiro pavimento.

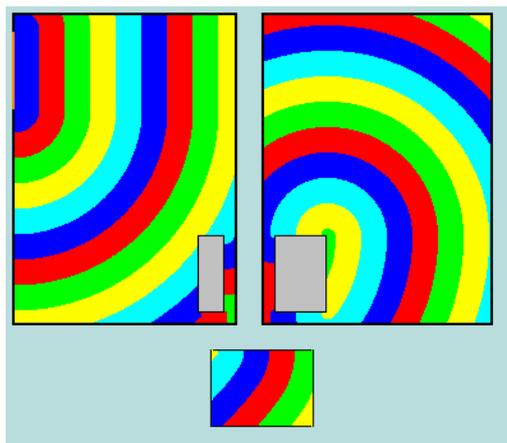


Figura 4.3: Representação do mapa de distâncias para o ambiente de dois pavimentos da Figura 4.1, onde cada faixa de cor indica um distanciamento de 1 m em relação à saída em laranja (algoritmo BR).

Para exemplificar a geração do mapa de distância em um ambiente real de múltiplos andares, uma chamada Habitação de Interesse Social de 5 pavimentos será simulada. A edificação específica a ser tratada neste trabalho consiste em uma unidade habitacional de baixo custo estruturada em aço já utilizada em programas habitacionais da Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano de São Paulo (CDHU-SP). Esta edificação apresenta uma tipologia tipo “H” com cinco pavimentos de dois blocos cada, interligados pela caixa da escada, já tendo sido detalhada na literatura (BONITESE, 2007; RODRIGUES, BONITESE, 2008).

Cada pavimento de um bloco possui dois apartamentos, possuindo dez apartamentos por bloco ou vinte apartamentos por edificação. Cada apartamento possui dois dormitórios de $8,65 \text{ m}^2$ cada, um banheiro ($2,59 \text{ m}^2$), sala ($11,88 \text{ m}^2$), cozinha ($4,32 \text{ m}^2$), e pequena área de serviço, perfazendo um total de $46,29 \text{ m}^2$ de área construída. A área construída considerada por bloco é de $462,90 \text{ m}^2$ e a altura da edificação (relativo ao nível do piso do quinto pavimento) é de 10,40 m.

Na Figura 4.4 se apresenta uma representação esquemática da planta tipo da edificação. Para facilitar as simulações, foram feitas algumas pequenas simplificações em relação ao projeto original. Na Figura 4.5 são apresentadas fotos de HIS já construídas com esta tipologia na cidade de Limeira-SP.

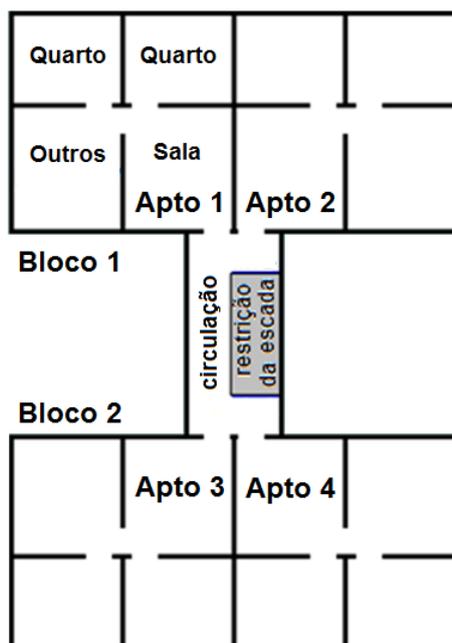


Figura 4.4: Representação em vista de topo (sem escala) de um andar tipo da HIS de cinco pavimentos em estudo.

Fonte: baseado no projeto arquitetônico apresentado por Bonitese (2007).



Figura 4.5: Imagens da HIS estudada neste trabalho (Limeira-SP).

Fonte das imagens: adaptadas do sitio Google Street View (acessado em 24 mar. 2016).

Na Figura 4.6 é apresentada a planta baixa de toda a HIS em uma forma bidimensional (planificada). Todas as saídas na cor laranja estão indicadas pelas setas e ficam no primeiro pavimento. A entrada única de cada um dos quatro apartamentos de cada pavimento ocorre pela sala com os dois quartos ficando mais ao fundo. A cor azul claro em volta dos pavimentos representa uma região que não é utilizada nas simulações, a cor branca representa a região interna dos pavimentos e das escadas, que pode ser considerada livre para a movimentação, e a cor preta representa as paredes da edificação.

Ainda na Figura 4.6, a cor cinza identifica as regiões do ambiente cuja movimentação não é possível devido às restrições causadas pelas escadas e as tênues linhas na cor azul escuro, os respectivos *links* entre as escadas e os pavimentos.

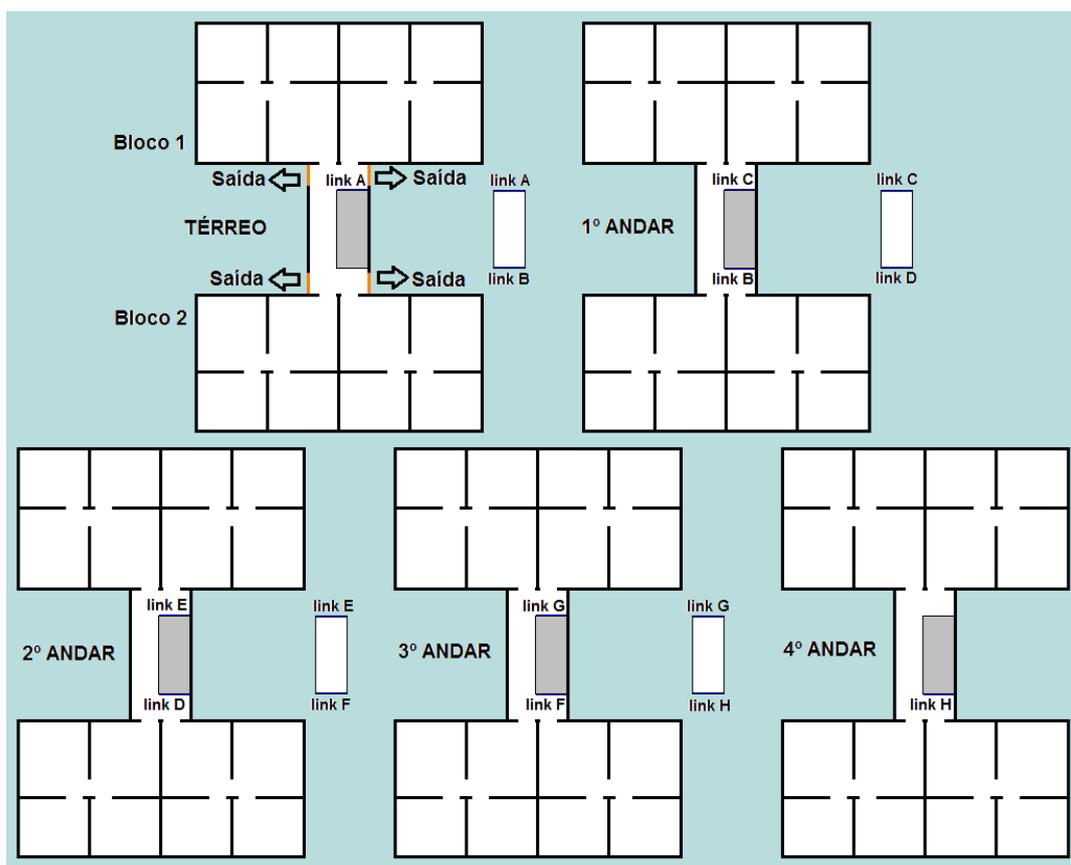


Figura 4.6: Planta baixa simplificada (sem escala) de toda a HIS em uma forma bidimensional (planificada), com a identificação dos seus cinco pavimentos de dois blocos cada, das quatro escadas (oito *links*) e das saídas no nível térreo.

A introdução destes oito *links* (A, B, C, D, E, F, G e H) é fundamental para o tratamento e incorporação das escadas. O *link* A une o primeiro pavimento (ou nível térreo) com a escada entre o primeiro e segundo pavimentos. O *link* B une esta mesma escada com o segundo pavimento (ou primeiro andar). O *link* C une o segundo pavimento com a escada entre o segundo e terceiro pavimentos. O *link* D une esta mesma escada com o terceiro pavimento (ou segundo andar). O *link* E une o terceiro pavimento com a escada entre o terceiro e quarto pavimentos. O *link* F une esta mesma escada com o quarto pavimento (ou terceiro andar). O *link* G une o quarto pavimento com a escada entre o quarto e quinto pavimentos. Finalmente, o *link* H une esta mesma escada com o quinto pavimento (ou quarto andar).

Assim, a planta da HIS está completamente descrita e pronta para ter seu mapa de distância gerado. A Figura 4.7 apresenta o mapa de distâncias desta HIS representado por faixas de cores gerados pelo algoritmo BR.

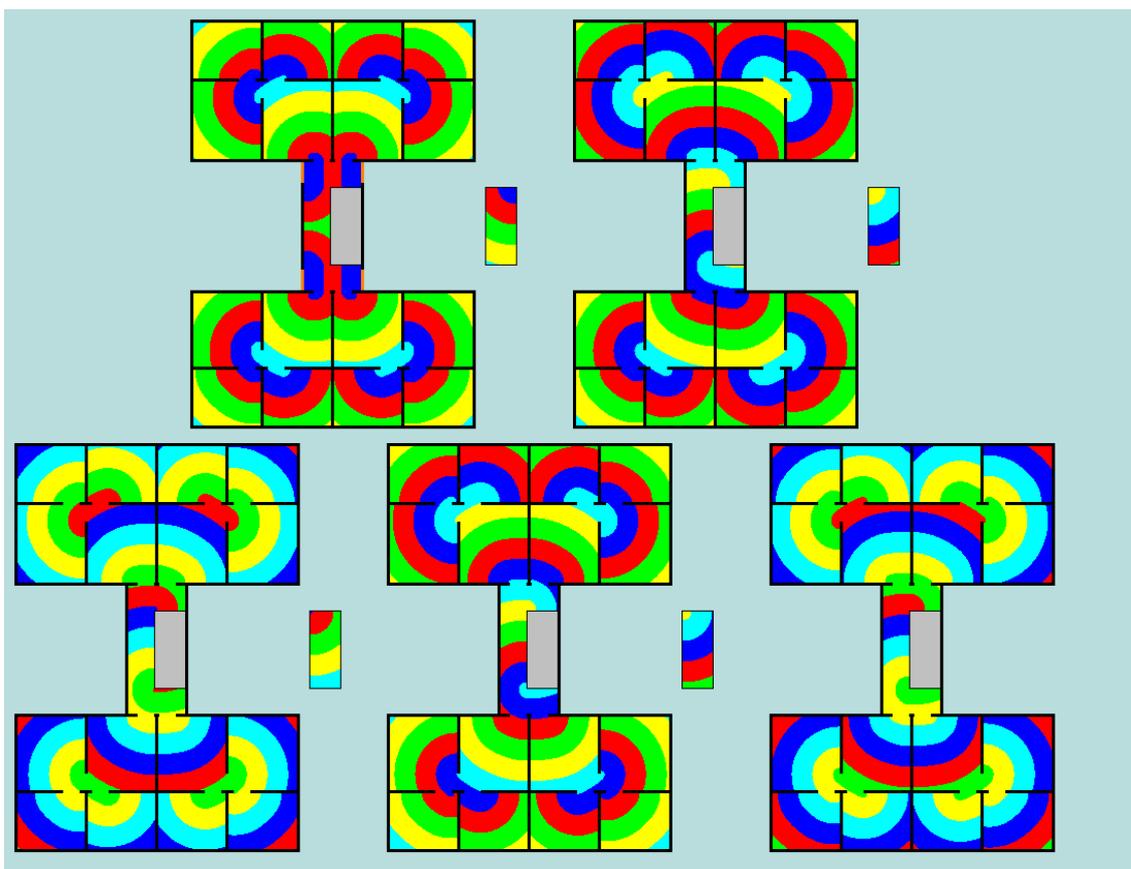


Figura 4.7: Mapa de distâncias da HIS da Figura 4.6, representado por faixas de cores, onde cada faixa significa um distanciamento de 1 m das saídas, gerado pelo algoritmo BR.

Para melhor compreensão qualitativa do significado do mapa de distâncias da Figura 4.7, apresenta-se a seguir uma explicação de alguns pontos da evolução das primeiras faixas de cores:

- inicialmente, o algoritmo começa sua pesquisa nas vizinhanças de todas as saídas do primeiro pavimento, gerando as primeiras faixas na cor azul escura (indica um distanciamento de até 1 m da saída mais próxima);
- ainda dentro da primeira faixa de cor azul escura a pesquisa já entra na sala de todos os quatro apartamentos do primeiro pavimento assim como o *link A*;
- a busca acontece agora tanto dentro no primeiro pavimento como também dentro da escada que vai até o segundo pavimento;
- quando a busca atinge o final desta escada (*link B*), ela está no início da primeira faixa azul claro (distanciamento entre 4 e 5 m);
- logo depois, a busca atinge a entrada de todos os quartos do bloco 2 do segundo pavimento na segunda faixa de cor azul escura (distanciamento entre 5 e 6 m) e também passa a seguir no segundo pavimento;
- o término da busca do primeiro pavimento termina no início da segunda faixa azul claro (distanciamento aproximado de 9,5 m);
- neste momento, a busca atinge o *link C* e também passa a seguir dentro da escada entre o segundo e terceiro pavimentos.

Seguindo este raciocínio, pode-se acompanhar visualmente toda a evolução do distanciamento em relação à saída mais próxima para todo o ambiente. Obviamente que, apesar do caráter visual das faixas, todos os valores numéricos exatos estão disponíveis para consulta. Assim, verifica-se que o maior distanciamento ocorre no canto direito da parede do fundo do apartamento 2 (bloco 1) do quinto pavimento, que é de 42,25 m (início da nona faixa verde), e que a distância média a ser percorrida em toda a edificação rumo a saída mais próxima é de 20,65 m.

4.2 Múltiplos Objetivos

Outra situação realista muito importante é a possibilidade de, em um mesmo ambiente, haver múltiplos objetivos a serem alcançados (movimentos

multidirecionais independentes). Por exemplo, no mesmo ambiente e ao mesmo tempo, algumas pessoas podem desejar alcançar uma saída enquanto outras pessoas desejam entrar no ambiente rumo à uma outra determinada sala.

A solução é relativamente simples. Basta se gerar uma matriz MAS distinta para cada conjunto de objetivos diferentes. Cada pessoa sendo simulada estará então associada a matriz MAS relativa ao seu objetivo particular. É possível inclusive se alterar o objetivo de uma pessoa sendo simulada, bastando trocar a matriz MAS a qual esta pessoa está associada no momento que se desejar. Com isso, uma pessoa pode, por exemplo, entrar no ambiente rumo à determinada sala, e depois de atingir este objetivo seguir rumo à outra sala qualquer ou mesmo sair do ambiente.

Para se ilustrar a aplicação do algoritmo modificado para atender a múltiplos objetivos em um ambiente mais sofisticado, é gerado o mapa de distâncias para uma hipotética edificação de duas torres e quatro pavimentos com três saídas distintas. A Figura 4.8 traz a representação esquemática em perspectiva desse ambiente e de sua representação planificada dentro do programa Fuga.

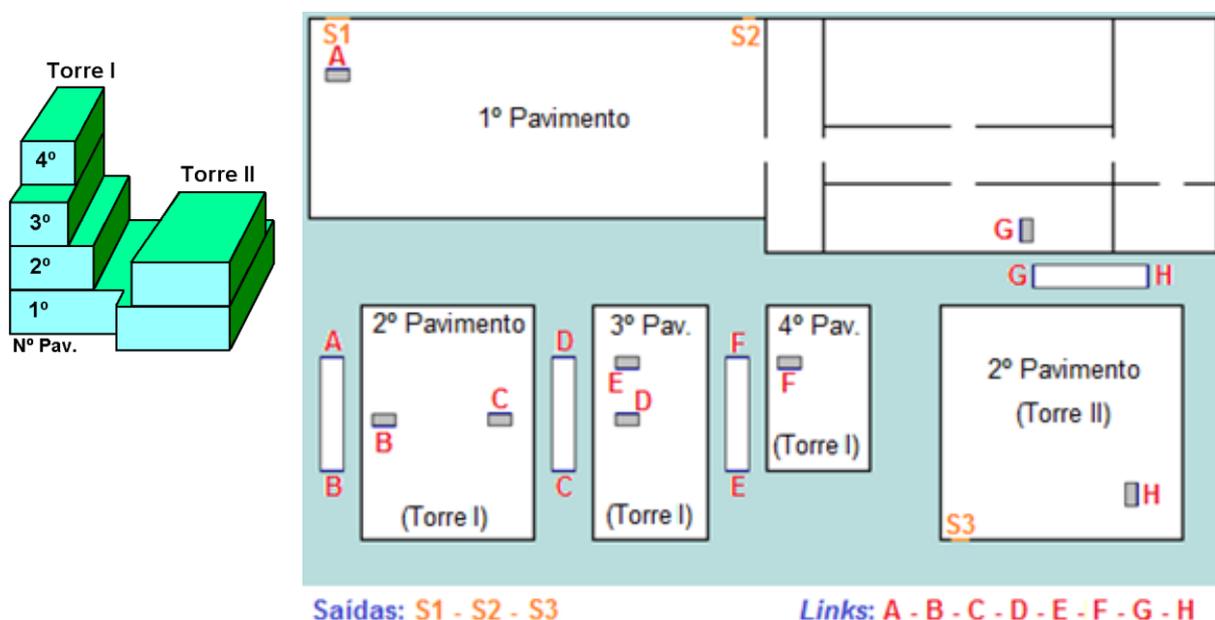
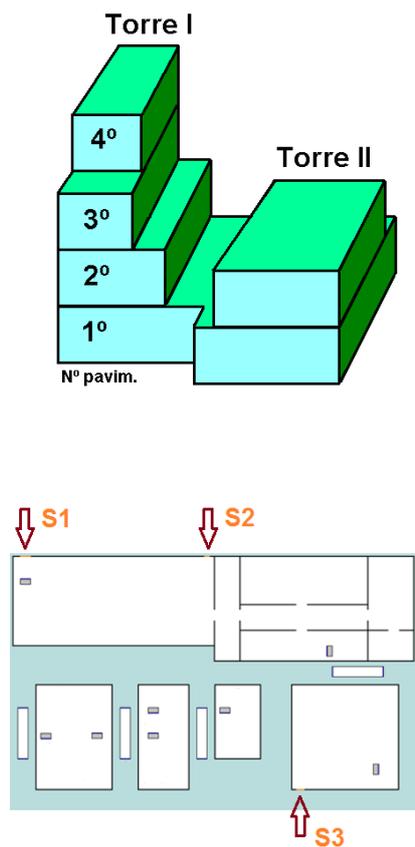


Figura 4.8: Representação esquemática do ambiente de quatro pavimentos e duas torres (à esquerda) e sua representação planificada (à direita).

Nesse ambiente, a primeira e a segunda torre possuem quatro e dois pavimentos respectivamente. No primeiro pavimento existem duas entradas separadas (S1 e S2), e as torres somente se interconectam pelo primeiro pavimento. A segunda torre também possui uma entrada independente no 2º pavimento (S3). Na edificação existem ao todo quatro escadas ou oito *links* (A, B, C, D, E, F, G e H). O primeiro pavimento possui sete ambientes ou cômodos distintos e todos os demais pavimentos possuem somente um único cômodo.

Adicionalmente, foi gerado, pelo algoritmo VM modificado, o mapa de distâncias considerando o objetivo de se atingir a saída desejada mais próxima de qualquer ponto no interior da edificação em quatro situações distintas: considerando todas as saídas (S1, S2 e S3), considerando somente a saída S1, considerando somente a saída S2 e considerando somente a saída S3 do segundo pavimento da segunda torre. Estes mapas de distância nas quatro situações estão apresentados na Figura 4.9.

Dessa forma, os três algoritmos de busca anteriormente detalhados permanecem com todos os seus pontos positivos, mas agora também tendo a capacidade de explorar edificações com qualquer quantidade de pavimentos e também com a possibilidade de se considerar múltiplos objetivos ou de se alterar dinamicamente os objetivos, características essenciais para sua efetiva utilização no estudo de ambientes construídos reais.



Legenda:
O posicionamento das Saídas (S1, S2, e S3) está indicado pelas setas.

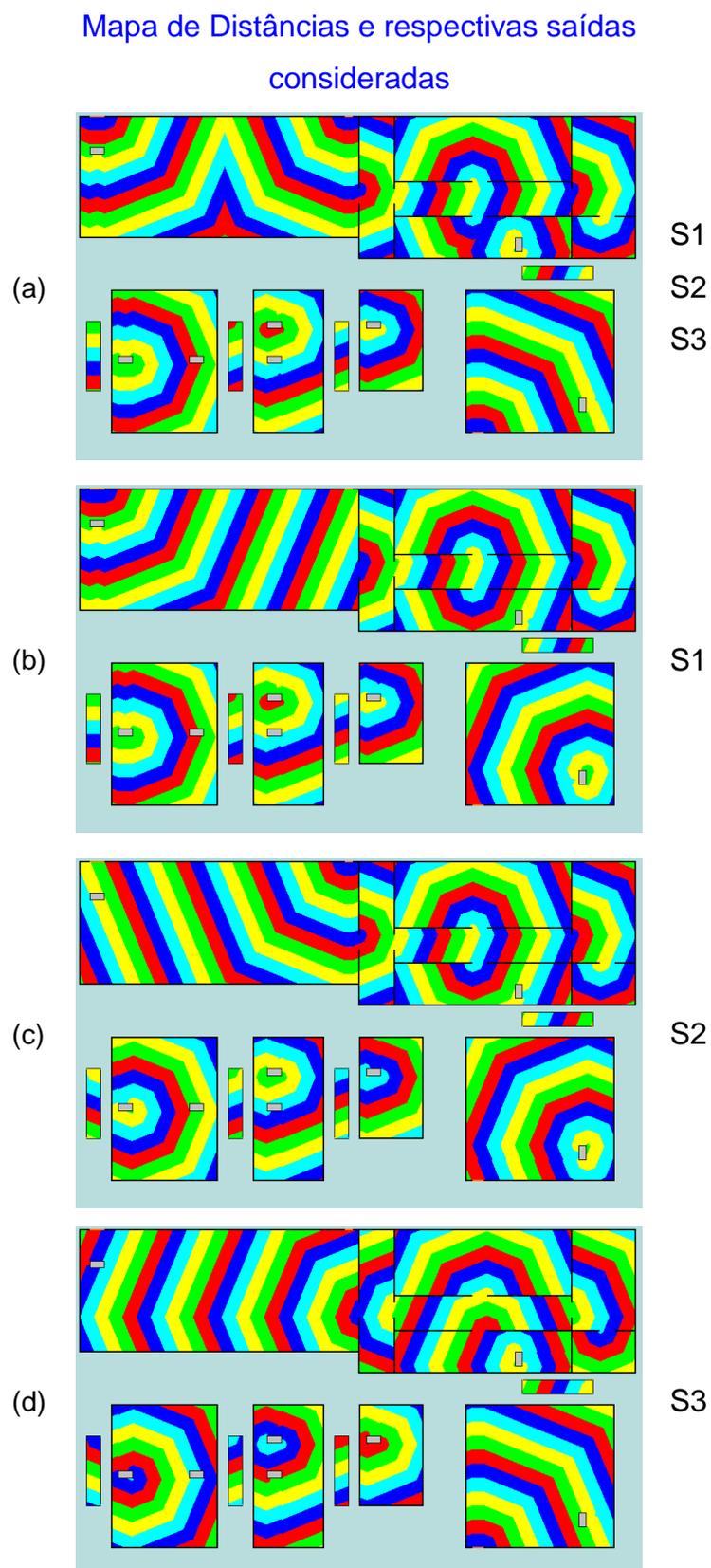


Figura 4.9: Representação dos mapas de distâncias gerados pelo algoritmo VM para o ambiente da Figura 4.8. Em (a) todas as saídas são consideradas, em (b) somente a saída S1, em (c) somente a saída S2, e em (d) somente a saída S3.

5 ASPECTOS ERGONÔMICOS E COMPUTACIONAIS

5.1 Antropometria

Os fatores antropométricos¹⁰ têm um papel fundamental na modelagem. Pessoas são como objetos tridimensionais e uma completa descrição de sua altamente desenvolvida sequência de movimentos não é trivial (VIEL, 2001). Entretanto, conforme também considerado por diversos pesquisadores (THOMPSON et al., 2015), o atual modelo é baseado em duas dimensões consistindo simplesmente na projeção vertical do corpo.

Pesquisas feitas nos Estados Unidos (CUCCI NETO, 1996), consideram que o corpo visto por cima pode se resumir a uma elipse de 60,9 cm (comprimento do corpo) por 45,7 cm (largura do corpo) tendo uma área média de 0,28 m². Estes valores são propositalmente tendenciosos para cima (são maiores que a média real obtida em estudos de dimensões humanas) de forma a se proteger ou compensar um pouco das grandes variações destes valores. Já outros autores consideram em suas pesquisas valores inferiores, como Still (2000), que aproxima o corpo humano a uma elipse de 58 cm por 33 cm. A *National Institute of Standards and Technology* – NIST, por outro lado, considera em seus modelos uma geometria distinta (não elíptica) constituída por três círculos formando o torso e os ombros (KULIGOWSKI, PEACOCK, 2005).

Outros autores (HELBING et al., 2000; PEREIRA, 2007) consideraram em seus estudos o corpo visto por cima como uma simples circunferência ou quadrado, respectivamente. Na verdade não existe um perfil único, já que se tem uma enorme variabilidade entre países, etnias, idade, gênero e mesmo entre indivíduos (a muito discutida falácia do homem médio). Um valor considerado por alguns autores como satisfatoriamente médio é o de 0,20 m² de área por pessoa (STILL, 2000). Além disso, existem pessoas que, por características especiais, irão requerer mais espaço para seu deslocamento e passagem, tais como pessoas que utilizam muletas,

¹⁰ Antropometria: ciência das medidas do tamanho corporal humano (PANERO, ZELNIK, 1998).

cadeiras de rodas ou que transportam crianças em veículos pedestres (PANERO, ZELNIK, 1998; ABNT, 2004). Até mesmo a própria vestimenta usada pode influenciar na área ocupada (PREDETECHENSKII, MILINKII, 1978).

Neste trabalho, considerando a representação pela sua projeção vertical, não será realizado nenhuma forma de simplificação do formato humano, que será considerado no seu formato mais realístico possível, exceto pela sua discretização por quadrados (pixels) de 5 cm de lado (resolução do modelo). Para melhor representar a variabilidade entre tamanhos de diferentes pessoas serão consideradas três variações. A base da representação humana utilizada foi baseada em Still (2000), que apresentou realisticamente diversos perfis humanos em função da massa corporal.

Para a discretização dos perfis, empregou-se o seguinte método:

- inicialmente, a imagem da projeção, sem nenhuma simplificação, é superposta e centrada a uma malha composta por campos de 5 cm de lado;
- quando, dentro de um destes campos de 5 cm de lado, a imagem do perfil humano ocupar mais da metade de sua área interna, este campo (pixel) é considerado totalmente preenchido;
- entretanto, se a imagem do perfil humano ocupar menos da metade da sua área interna, este campo (pixel) é considerado totalmente vazio; e
- realizando este processo para todo o perfil se obtêm a melhor representação humana possível em vista de topo, dentro dos limites da discretização adotada.

Ajustes pessoais também foram realizados para se manter a simetria hemisférica da representação do corpo (lados direitos e esquerdos mantidos iguais). A Figura 5.1 ilustra este processo para três tamanhos distintos de pessoas adultas, cuja variação no perfil engloba pelo menos 95% da população (STILL, 2000), e a Tabela 5.1 resume algumas das principais características dimensionais dos corpos humanos discretizados da Figura 5.1.

5.2 Rotação das Pessoas

Neste modelo é possível o movimento de rotação dos agentes. Assim se torna necessário a caracterização das pessoas no ambiente em diferentes ângulos. Devido ao formato mais realista adotado para representação das pessoas, a rotação das mesmas no ambiente deve ser realizada criteriosamente. Esta angulação ocorrerá então por mapeamento através de uma transformação de rotação (AMMERAAL, ZHANG, 2008; TONEIS, 2015). Na Figura 5.2 se apresenta uma pessoa média no seu posicionamento básico sobre um sistema de coordenadas no plano xy .

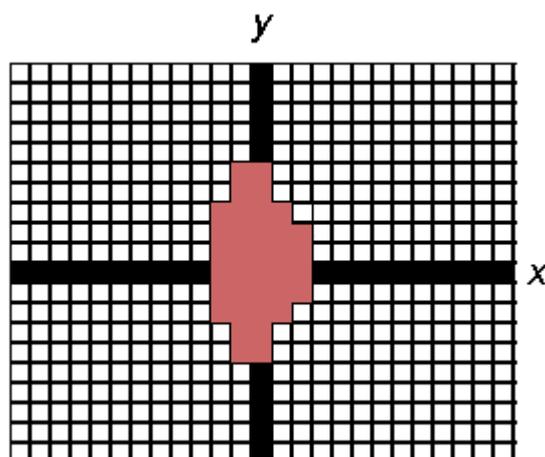


Figura 5.2: Pessoa média no seu posicionamento básico.

A rotação desta pessoa (ou de todos os pontos que compõem esta pessoa) em um ângulo φ sobre o sistema de coordenadas xy pode ser realizada pela substituição de cada ponto individual da pessoa que se localiza nas coordenadas x_i e y_i , por um novo ponto que se localiza nas coordenadas x_i' e y_i' . Estes pontos se relacionam entre si pela seguinte matriz de rotação:

$$[x_i' \quad y_i'] = [x_i \quad y_i] \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Em ambientes contínuos, esta é uma transformação reversível. Entretanto, no contexto deste trabalho, esta transformação não pode rigorosamente ser considerada como reversível devido às simplificações causadas pela discretização. Para evitar a propagação de erros que resultariam na contínua deformação no formato do corpo das pessoas com a evolução da simulação, a transformação de rotação sempre se dará somente em relação à posição base (Figura 5.2), e não em relação à posição anterior na qual o agente se encontrava.

Finalmente, para melhor se ilustrar, na Figura 5.3 se apresenta em um ambiente circular com 20 m de diâmetro com agentes nos três tamanhos incorporados no modelo (pequeno, médio e grande) a serem simulados separados em grupos contendo cinco pessoas cada em diversas angulações em relação ao posicionamento básico.

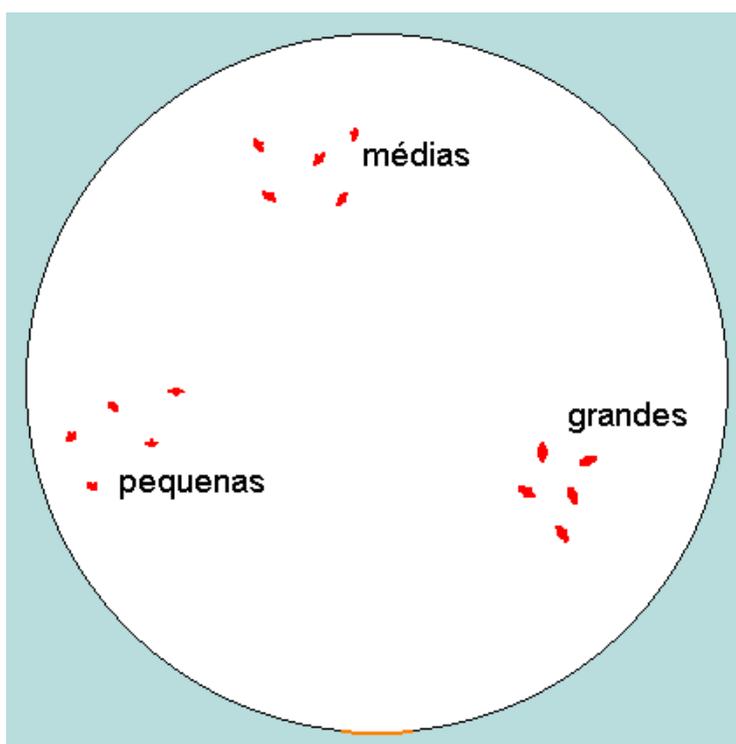


Figura 5.3: Ambiente circular de 20 m de diâmetro com três conjuntos de cinco agentes agrupados conforme seus tamanhos (pequeno, médio e grande) em diversas angulações.

5.3 Velocidade Normal de Movimentação

A determinação da velocidade normal de deslocamento varia de forma extensiva em relação à população e o mesmo indivíduo pode apresentar diferentes velocidades dependendo da situação momentânea externa ou intrínseca ao mesmo, tais como: altura, idade, condição física e gênero do indivíduo; familiaridade da rota; finalidade do deslocamento; comprimento do percurso; características da rota (largura de passagem, tipo de pavimentação, mudança de nível); condições de visibilidade; condições meteorológicas; se sozinho ou em grupo; densidade populacional; sentido do fluxo; barreiras diversas; e aspectos cognitivos e mesmo culturais (OKUNO et al., 1986; ABLEY, 2007; BLAIR, 2010).

Para ilustrar esta grande variabilidade, na Tabela 5.2 se têm uma relação das velocidades médias de deslocamento em função da idade e sexo entre outras obtidas para a travessia de ruas em situações de baixa densidade populacional. Nota-se que os homens se locomovem normalmente mais rapidamente que as mulheres, assim como, independente do sexo, a velocidade média é reduzida pela elevação da idade. Tem-se também que uma criança ou um deficiente físico reduz significativamente a velocidade média do acompanhante.

Tabela 5.2: Velocidade média de deslocamento com baixa densidade populacional e sem barreiras.

Idade e Sexo	Velocidade Média (m/s)
Homens com menos de 55 anos	1,7
Homens com mais de 55 anos	1,5
Mulheres com menos de 55 anos	1,4
Mulheres com mais de 55 anos	1,3
Mulheres com crianças	0,7
Crianças de 6 a 10 anos	1,1
Adolescentes	1,8
Deficientes físicos	0,45
Deficientes visuais	1,0

Fonte: adaptado de Cucci Neto (2000).

Pela sua importância, a influência da percepção visual que uma pessoa tem da distância entre si e de outras pessoas, ou de obstáculos como paredes, nas proximidades será mais profundamente tratada. Thompson e Marchant (1995b) estudaram a relação entre a velocidade “normal” de movimentação (v_w) em função da distância a mais próxima pessoa à frente (d) para três grupos distintos, homens de 20 anos, mulheres de 50 anos e para a população média (Figura 5.4).

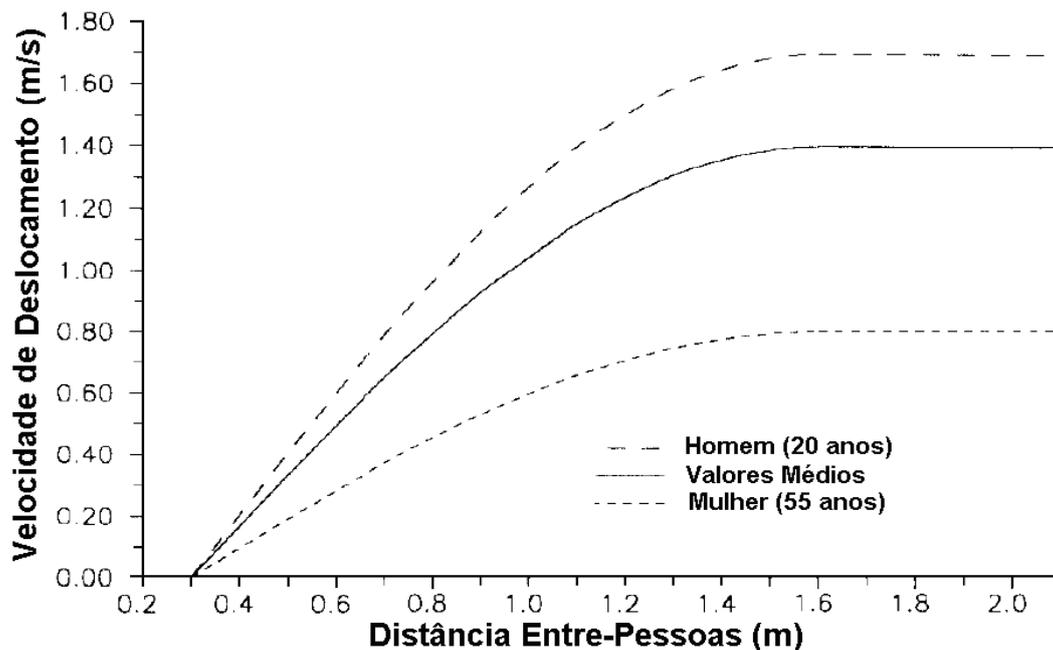


Figura 5.4: Relação entre a velocidade “normal” de movimentação em função da distância a próxima pessoa mais a frente.

Fonte: adaptado de Thompson e Marchant (1995b).

Observando estas curvas, verifica-se uma similaridade no formato de todos os grupos. Assim, na Figura 5.5 se apresenta a curva geral de v_w em função de d . As pessoas representadas na Figura 5.4 não estão submetidas a nenhuma situação especial de estresse, portanto se considera que este perfil foi livremente gerado. Assim, de certo modo, esta curva sintetiza tanto os aspectos físicos quanto cognitivos das pessoas em movimentação normal.

Na Figura 5.5, as variáveis apontadas são: d_0 (distância mínima entre pessoas ou a espessura média do corpo humano), v_c (velocidade de cruzeiro ou velocidade

máxima normal) e d_s (distância estacionária ou a menor distância onde v_c é alcançado). Ainda de Thompson e Marchant (1995b), d_0 é considerado como sendo 30 cm, v_c é considerado como sendo 1,8 m/s para homens com 20 anos, ou 0,8 m/s para mulheres de 55 anos, ou como sendo 1,4 m/s como valor médio para a população, e d_s é considerado como sendo 1,6 m. Pela Figura 5.5, quando d é menor que d_s as pessoas reduzem sua velocidade para um valor inferior a v_c .

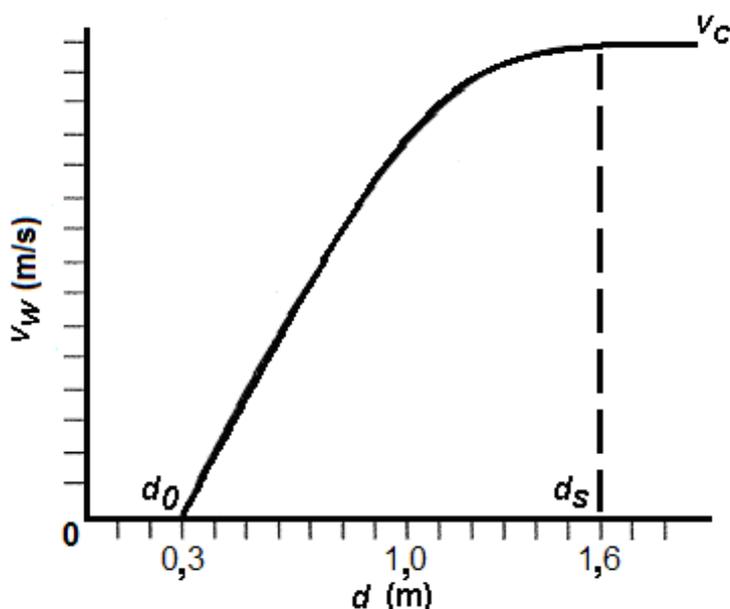


Figura 5.5: A curva geral da velocidade normal de movimentação (v_w) em função da distância entre pessoas (d).

Pelo formato das curvas da figuras 5.4 e 5.5, pode-se empiricamente assumir como sendo eventualmente possível essas curvas serem modeladas por alguma equação tipo exponencial, como, por exemplo, a Equação 5.2:

$$\frac{v_w}{v_c} = \left[\frac{d - d_0}{d_s - d_0} \right]^n \quad (5.2)$$

No qual n seria uma espécie de taxa de amortecimento, que visivelmente varia com d .

Para se testar esta hipótese e obter o valor de n , a Equação 5.2 é posta em uma forma linear, obtendo-se a Equação 5.3:

$$\ln\left(\frac{v_w}{v_c}\right) = n \times \ln\left[\frac{d - d_0}{d_s - d_0}\right] \quad (5.3)$$

Ou ainda:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{v_w}{v_c}\right)}{\ln\left[\frac{d - d_0}{d_s - d_0}\right]} \quad (5.4)$$

Através de pontos retirados das curvas da Figura 5.4 para todos os três grupos, pela Equação 5.4 se pode então verificar a evolução de n com d (Figura 5.6), de onde se obtêm a Equação 5.5 por meio de uma regressão linear ($r^2 = -0,991$). Assim:

$$n = 1,11 - 0,63 \times d \quad (5.5)$$

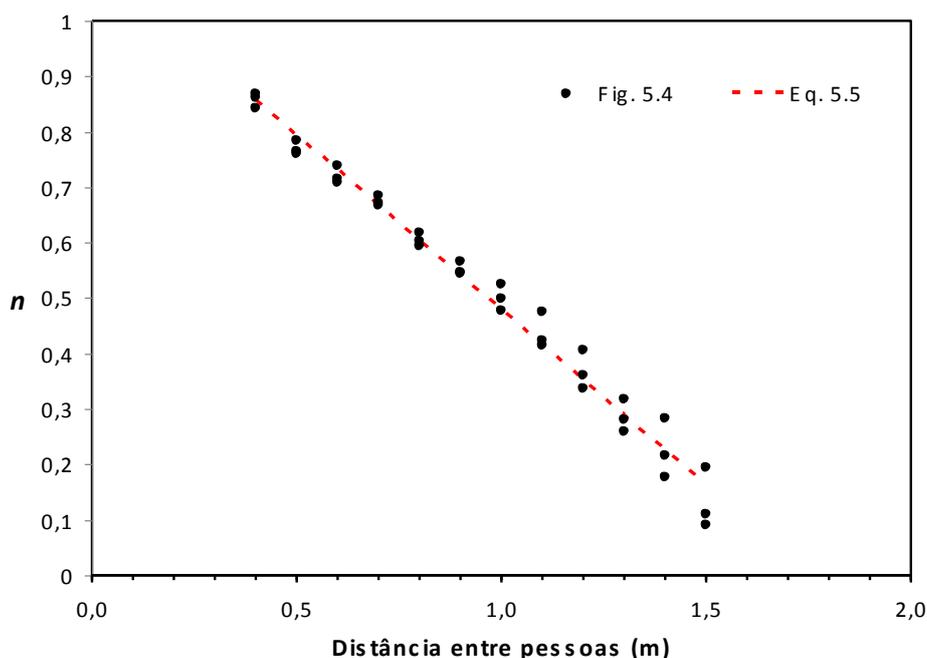


Figura 5.6: Evolução de n em função da distância entre pessoas (d).

Com as Equações 5.2 e 5.5, e pela análise da curva da Figura 5.5, pode-se obter uma equação geral válida para todos os grupos que relaciona v_w [m/s] em função de d [m] (Equação 5.6), já que todos os demais parâmetros se encontram estabelecidos. Na Equação 5.6 a possibilidade da ocorrência de $d < d_0$ é apenas teórica.

$$\begin{cases} v_w = 0 & \text{se } d \leq d_0 \\ v_w = v_c \times \left[\frac{d - d_0}{d_s - d_0} \right]^{(1,11 - 0,63 \times d)} & \text{se } d_0 < d < d_s \\ v_w = v_c & \text{se } d \geq d_s \end{cases} \quad (5.6)$$

Pode-se verificar a adequação da Equação 5.6 pela comparação dos valores de v_w em função de d obtidos pela mesma e os retirados da Figura 5.4, cujo gráfico está apresentado na Figura 5.7.

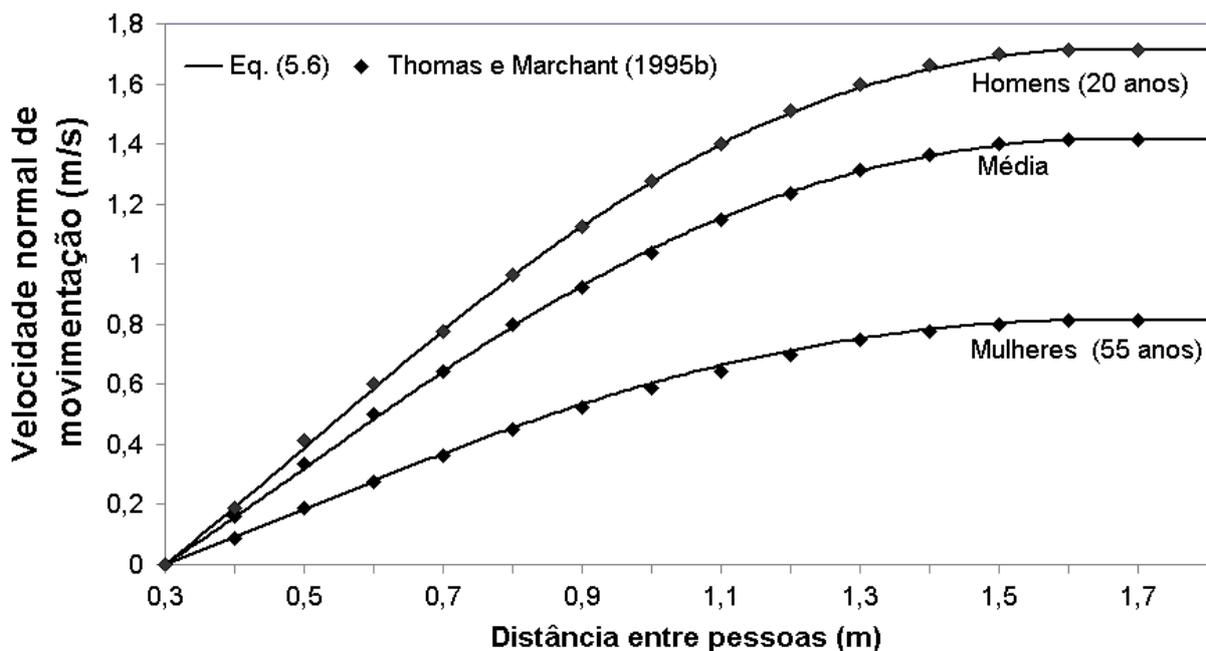


Figura 5.7: A curva geral da velocidade normal de movimentação (v_w) em função da distância entre pessoas (d).

5.4 Tempo de Pré-Reação

Quando uma situação de emergência se inicia, as pessoas irão levar um tempo para perceberem o acontecimento, e ainda outro tempo para iniciarem efetivamente uma reação (GOUVEIA, ETRUSCO, 2002; KO, 2003; NG, CHOW, 2006). Este tempo de pré-reação deve ser levado em consideração, pois um escape, em tese capaz de ser realizado a tempo, pode não acontecer devido a este processo. Este tempo de pré-reação é muito variável de pessoa a pessoa (idade, concentração, características físicas e cognitivas), além de depender de como a situação de emergência é percebida pelos envolvidos (sinal sonoro, movimentação de outras pessoas, cheiro ou sinal de fumaça, visualização de algum perigo e da sua distância ao mesmo, percepção do risco).

O tempo de pré-reação é normalmente considerado como composto pelo somatório de duas parcelas: o tempo de reconhecimento e o tempo de resposta ou ação. Este tempo de reconhecimento e resposta pode variar de alguns segundos a até mesmo horas. As Equações 5.7 e 5.8 indicam esses tempos (GOUVEIA, ETRUSCO, 2002):

$$t_{pr} = t_r + t_a \quad (5.7)$$

$$t_T = t_{pr} + t_m \quad (5.8)$$

No qual:

t_{pr} = tempo de pré-reação;

t_T = tempo total gasto;

t_r = tempo de reconhecimento;

t_a = tempo de resposta ou ação; e

t_m = tempo de movimento (escape efetivo).

No modelo desenvolvido, este tempo de pré-reação será incorporado, mesmo que preliminarmente, como sendo uma variável do sistema. O tempo de pré-reação

poderá ser tanto previamente estabelecido para cada pessoa ou grupo, quanto, também, dinamicamente determinado em função da evolução do escape ou movimentação, ou simplesmente desconsiderado e deixado nulo.

5.5 Implementação Computacional – Detalhes Adicionais

Pela superioridade do algoritmo de busca e exploração BR sobre os demais algoritmos de pesquisa direta de vizinhança (Von Neumann e Moore) para os fins deste trabalho, somente o algoritmo BR será a partir de agora considerado na geração das melhores rotas prévias de movimentação.

Em relação ao ambiente, será adotado um modelo híbrido discreto-contínuo. A realização da modelagem no ambiente discretizado facilita sobremaneira a sua modelagem computacional, mas introduz erros devido a esta simplificação realizada. Já a realização da modelagem em ambiente contínuo não possui estes erros de discretização, mas o modelo passa a ter grande custo computacional e requer grande sofisticação nos algoritmos.

Para a implementação desse modelo híbrido, a localização e rotação de cada agente estarão associadas a uma tupla de três valores contínuos contendo a posição x e y , assim como a orientação do agente no ambiente. Quando da efetiva representação gráfica dos agentes e da realização dos diversos cálculos e algoritmos, estes valores são previamente discretizados. Entretanto, finda a determinação do deslocamento do agente sobre o ambiente e da sua variação angular, estes acréscimos obtidos são adicionados sobre os valores contínuos, e não sobre os discretos utilizados nos cálculos.

Dessa forma se tem a representação gráfica, cálculos e algoritmos se beneficiando do ambiente discreto, mas a real posição e orientação dos agentes permanecem no mundo contínuo (sem arredondamentos), o que diminui a propagação dos erros de discretização, que podem acontecer a cada novo passo do programa.

A efetiva velocidade normal de movimentação (translação) de cada pessoa irá sempre seguir a equação (5.6) (exceto quando indicado em contrário). Portanto, irá depender da distância de separação entre a pessoa se movimentando à pessoa à sua frente. A velocidade máxima normal poderá ser individualmente estipulada para cada pessoa antes de cada simulação, podendo inclusive variar durante a simulação, desde que seja até o valor máximo de 2 m/s (limite do modelo).

O tempo é uma variável discreta e varia de modo fixo, servindo de base para a realização de todos os cálculos. Assim, a variação de referência do tempo (variação do relógio das simulações) é uma variável estática global previamente definida, e nesta versão do programa possui o valor 0,025 s. Assim a cada laço da simulação o tempo transcorrido será sempre este¹¹.

Conforme já visto, os agentes poderão sempre que necessário realizar giros em torno de si mesmo ou de algum obstáculo. Essa rotação, quando ocorrer, sempre se dará a 2,5° a cada iteração¹².

Por fim, muitos modelos são influenciados por um efeito causado pela saída (ROGSCH *et al.*, 2007), que tende a acelerar a movimentação do agente na região vizinha a mesma, e com isso se reduzir o tempo calculado de abandono. Para se evitar tal efeito no modelo Fuga ora desenvolvido, as saídas irão por si só causar uma redução na velocidade dos agentes que se aproximam dela a partir de uma distância de 1 m e que não estejam com nenhum outro agente à sua frente.

5.6 Definições e Estrutura Básica do Programa

Como já explicitado, o modelo desenvolvido neste trabalho é denominado Fuga. Optou-se por se manter a mesma designação de um modelo anterior (BRAGA, 2012), mas para diferenciação o modelo atual será referido como sendo sua versão 2.0, ou Fuga v. 2.0. Entretanto, quando neste trabalho o modelo Fuga for citado, sempre que

¹¹ Equivalente a um giro de 10° a cada 0,1 s, conforme Thompson e Marchant (1995b).

¹² Este valor foi obtido considerando uma situação extrema, ou seja, uma velocidade de movimentação de 2 m/s (velocidade máxima previamente definida) com uma variação de posição de 5 cm (resolução adotada do ambiente). Assim, tem-se que o tempo transcorrido para tal será de $0,05 \text{ m} / 2 \text{ (m/s)}$, ou seja, de 0,025 s, valor então adotado como sendo a variação padrão do tempo.

não houver a clara identificação da correspondente versão que se está apreciando no momento, deve-se considerar que se trata da versão mais recente (v. 2.0). Ressalta-se que, apesar de terem alguns objetivos em comum, essas versões do programa Fuga são modelos totalmente distintos, não se tratando absolutamente de uma simples evolução de versão¹³.

O modelo Fuga v. 2.0 foi integralmente elaborado na linguagem Python v. 3.4.2 utilizando o seu ambiente de desenvolvimento *Shell* padrão. A técnica de programação utilizada foi a procedural, onde o corpo do programa é constituído basicamente por uma sequência estruturada de funções.

O modelo Fuga v. 2.0 é formado por dois corpos de programas totalmente distintos e independentes no funcionamento. O primeiro programa é chamado **Fuga Path** e o segundo programa denominado **Fuga Move**. O programa Fuga Path é o responsável por se gerar as matrizes ambientes e as matrizes rotas preferenciais de movimentação. Essas são salvas na forma de um único arquivo ambiente na extensão txt. Esse arquivo é então lido pelo programa Fuga Move. De posse desses dados, o programa Fuga Move efetua a efetiva movimentação dos agentes no ambiente construído, apresentando os resultados em uma interface gráfica.

Ainda, o programa Fuga Path possui dois módulos distintos principais, o módulo **Fuga Cad** e o módulo **Fuga Grid**. O módulo Fuga Cad propicia a entrada do ambiente construído em si, ou seja, onde todos os parâmetros arquitetônicos do ambiente são manualmente transferidos para o programa em uma forma matricial. Já o módulo Fuga Grid gera sobre essa representação matricial do ambiente construído, vindo do módulo Fuga Cad, as rotas preferenciais de movimentação. A Figura 5.8 ilustra essa relação entre ambos os programas Fuga Path e Fuga Move.

¹³ Na versão anterior os agentes eram de formato quadrado e de tamanho único, as movimentações somente aconteciam em linha reta ou em ângulos de 90° (movimentações abruptas), o algoritmo de geração das melhores rotas era baseado em uma pesquisa pela VVN, somente realizava simulações em ambientes de um único pavimento, entre outros.

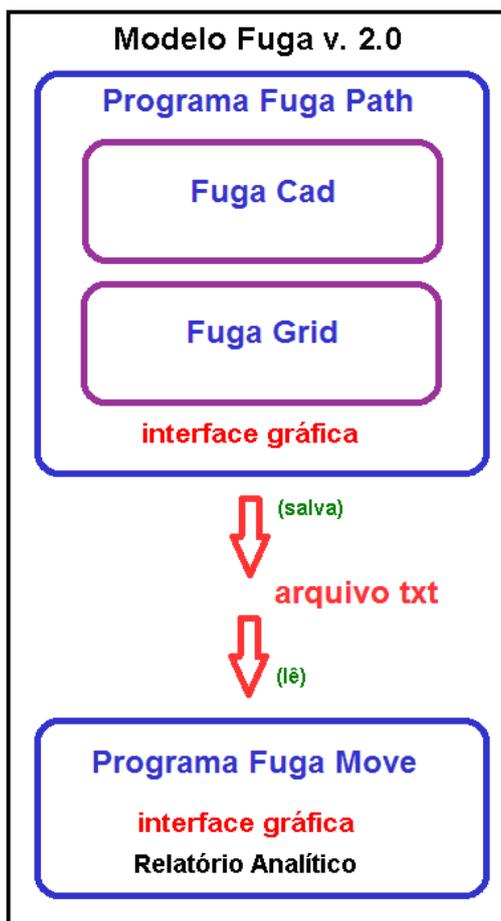


Figura 5.8: Estrutura básica do modelo Fuga v. 2.0 e a relação entre os programas Fuga Path e Fuga Move.

Assim, o módulo Fuga Cad do programa Fuga Path é o responsável pela representação do ambiente construído a ser simulado na forma matricial. Esta transformação do mundo real, com todos os seus parâmetros arquitetônicos, para um mundo virtual matricial, é realizada de forma totalmente manual pelo usuário dentro do próprio corpo do programa, através da introdução da Matriz Ambiente.

Tendo sido criada esta representação de um ambiente, ela fica permanentemente registrada na listagem do módulo Fuga Cad para ser acessada quando necessário. Assim o corpo deste módulo vai sendo incrementando a cada novo ambiente transformado. Para facilitar a geração de matrizes para a representação de ambientes mais sofisticados, foram criadas algumas funções de apoio, tais como *FazRetangulo*, *FazParede*, *FazSaida*, *FazPassagem*, *FazEscada*. Apesar de essas funções facilitarem enormemente a geração matricial do ambiente construído, todo esse processo ainda é manual e pouco intuitivo.

Já o módulo Fuga Grid gera, sobre o ambiente construído selecionado no módulo Fuga Cad, o arquivo ambiente na extensão txt que será lido pelo programa Fuga Move. Este arquivo contém diversas informações, dependendo de como gerado, tais como o próprio ambiente construído, as distâncias a serem percorridas entre cada uma das células da matriz até as saídas mais próximas, as distâncias entre cada uma das células até as obstruções mais próximas. Esse módulo Fuga Grid, diferentemente do Fuga Cad, é totalmente automático não dependendo de nenhuma intervenção humana, apenas a seleção do ambiente a ser simulado e dos critérios empregados na geração do arquivo txt.

É possibilitado que toda simulação tenha sua evolução visualmente acompanhada passo a passo por uma imagem estilizada do ambiente em vista de topo. Além disso, terminada a simulação, é gerado pelo programa Fuga Move um relatório analítico sintético com os tempos parciais e o tempo total de abandono. A Figura 5.9 apresenta um exemplo desse relatório final.

```

*****
PROGRAMA: FUGA MOVE 2.0.0018
MOVIMENTAÇÃO HUMANA EM UM AMBIENTE CONSTRUÍDO
AUTOR: HENRIQUE COSTA BRAGA
      bragaseg@yahoo.com.br
ORIENTADOR: PROF. GRAY FARIAS MOITA
COORIENTADOR: PROF. PAULO E.M. ALMEIDA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL
CEFET-MG
*****
                          RELATÓRIO FINAL DA SIMULAÇÃO
*****

Data/Horário: Sun Mar 11 10:07:20 2018
Arquivo Ambiente: FUGA Path 02_07_10.txt
Conjunto Saídas: único
Método Tomada Decisão: 2
N° Pessoas: 50
N° Iterações: 410
Tempo Total: 10.2 s
*****
                          RELATÓRIO ANALÍTICO DOS TEMPOS
*****

Primeira Pessoa: #45  0.075 s
Segunda Pessoa:  #17  0.400 s
Pessoa 5pct:    #42  1.375 s
Pessoa 10pct:   #8   2.300 s
Pessoa 25pct:   #18  3.425 s
Pessoa 50pct:   #9   5.500 s
Pessoa 75pct:   #7   7.250 s
Pessoa 90pct:   #24  8.100 s
Pessoa 95pct:   #34  8.775 s
Penúltima Pessoa: #34  8.775 s
Última Pessoa:  #25  10.250 s
*****

Continuar Simulando? (S/N)
n

Final do Processamento.          Obrigado !!!
*****

```

Figura 5.9: Exemplo de um relatório analítico final da simulação.

6 SISTEMA FUZZY

Pelo anteriormente apresentado, já são passíveis de serem realizadas simulações da movimentação humana em quaisquer ambientes construídos, onde os agentes irão seguir a rota preferencial indicada pelo algoritmo de busca aplicado até a saída mais próxima. Entretanto, sabe-se que estas simulações não serão realistas (BRAGA, 2012), pois as pessoas em uma situação real não irão necessariamente seguir este percurso idealizado rumo à saída, principalmente em condições de alta densidade populacional ou de emergência, ou quando tiverem seu caminho ideal bloqueado.

Assim, torna-se necessário um algoritmo adicional para emulação dinâmica de um processo de tomada de decisão humana para seleção de caminhos alternativos de movimentação. A lógica *fuzzy* (ALMEIDA, EVSUKOFF, 2003; BIONDE NETO et al., 2006; SIMÕES, SHAW, 2007) já foi, mesmo que de modo ainda preliminar, utilizada para a emulação do processo de tomada de decisão humana em simulações de sistemas multiagentes (BOULMAKOUL, MANDAR, 2011; BRAGA, 2012), mostrando-se potencialmente valorosa. Dessa forma, vai-se usar a lógica *fuzzy* para essa etapa de emulação, mas de modo integrado e mais realista das características psicofisiológicas das pessoas (Capítulo 5), de modo a serem obtidos resultados mais úteis para a verificação ou otimização de ambientes.

6.1 Seleção da Direção Preferencial de Movimentação

Estando num posicionamento qualquer, o agente poderá iniciar ou continuar um movimento na mesma direção e sentido que estava anteriormente, ou poderá mudar esse seu direcionamento. Será possível, a cada iteração do sistema *fuzzy*, a escolha entre até cinco possibilidades de movimentação preferencial em relação ao agente: 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 6.1 ilustra estas opções. Uma movimentação diferente, como para trás, é possível desde que feita em etapas ou desvios sucessivos (andar para trás diretamente não será possível).

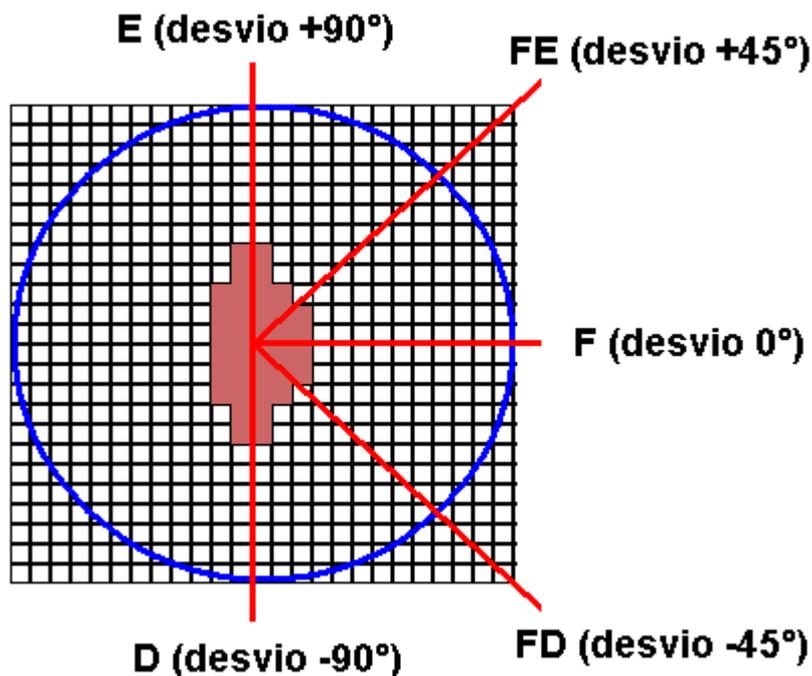


Figura 6.1: Um agente em um direcionamento qualquer e as cinco possibilidades de direções preferenciais possíveis a serem seguidas em relação ao posicionamento do agente.

Assim, se a direção de movimentação preferencial selecionada pelo sistema *fuzzy* for diferente da direção de movimentação momentânea, o agente irá procurar alterar seu direcionamento para a nova direção escolhida pelo sistema *fuzzy*. Entretanto, essa mudança de direção não se dá de forma brusca, mas respeitando os quesitos fisiológicos humanos já apresentados (Capítulo 5), como a velocidade do giro. 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 uma mudança para o novo direcionamento.

6.2 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*, *EP*, *EA* e *EE*, ou Efeito Rota, Efeito Parede, Efeito Agente e Efeito Estresse, respectivamente, conforme descrito a seguir.

6.2.1 *ER* – Efeito Rota

A *ER* é obtida comparando-se a direção de movimentação indicada pelo valor da matriz rota de fuga da casa do autômato, com a efetiva direção de movimentação que o autômato faria se movimentasse para esta casa vizinha sendo verificada.

Os valores de *ER* variam conforme a Tabela 6.1, onde $|\omega|$ é módulo do ângulo de defasagem entre a direção de movimentação em análise e a direção indicada pelo algoritmo BR.

Tabela 6.1: Variação de *ER* em função do módulo do ângulo de defasagem ($|\omega|$).

$ \omega $	<i>ER</i>
$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

6.2.2 *EP* e *EA* – Efeito Parede e Efeito Agente

São efeitos relacionados com a busca por uma zona de conforto físico ou mental (PAN, 2006), considerando o efeito dos obstáculos. O *EP* está relacionado com os obstáculos fixos como paredes e restrições de escada. Já o *EA* está relacionado com os obstáculos móveis, no caso outros agentes.

O cálculo de ambos é feito de forma independente, sendo que o valor da distância ao obstáculo fixo mais próximo é diretamente obtido pela matriz de distância aparente previamente calculada, e o valor da distância ao obstáculo móvel mais próximo por um algoritmo próprio. Os valores de *EP* ou *EA* variam conforme a Tabela 6.2, onde d_{ob} é distância da casa considerada do agente (seu elemento central) ao obstáculo mais próximo.

Tabela 6.2: Variação de *EP* (ou *EA*) em função da distância da casa considerada do agente ao obstáculo mais próximo (d_{ob}).

d_{ob}	<i>EP</i> (ou <i>EA</i>)
$d_{ob} \leq 60$ cm	0
60 cm $< d_{ob} \leq 90$ cm	0,25
90 cm $< d_{ob} \leq 1,2$ m	0,5
$1,2$ m $< d_{ob} \leq 1,6$ m	0,75
$d_{ob} \geq 1,6$ m	1

6.2.3 *EE* – Efeito Estresse

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 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 uma espécie de reforço no *ER*. Os valores de *EE* variam em função do nível de estresse conforme a Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Variação de *EE* em função do nível de estresse.

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

O nível de estresse individual também poderá ser modificado ao longo da simulação. Quando nenhuma informação for dada sobre o nível de estresse individual estabelecido em certa simulação, o *EE* deve ser considerado como sendo 0,5 (nível de estresse médio) e fixo durante toda a modelagem.

6.3 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 maiores *QR*.

Assim:

$$QR_k = f_{FUZZY}(\text{entradas}_k) \quad (6.1)$$

$$QR_{ke} = \max(QR_k) \quad (6.2)$$

e

$$ke = k \quad \forall_{QR_{ke}=QR_k} \quad (6.3)$$

Onde

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

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.

6.4 Sistema Fuzzy

6.4.1 Descrição

O sistema *fuzzy* foi implementado por meio do software Matlab (v. 7.9 2009b) usando o modelo de inferência Mamdani. Como já visto, o sistema *fuzzy*

desenvolvido é composto por quatro grandezas de entrada e uma grandeza de saída (Figura 6.2). 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 6.3).

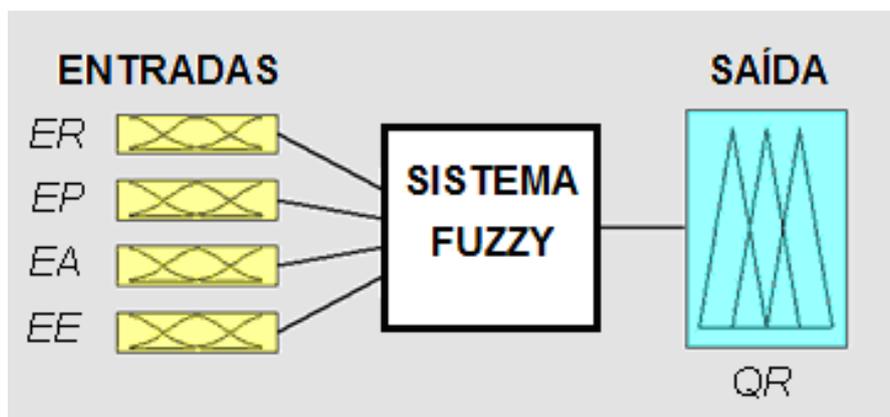


Figura 6.2: Sistema *Fuzzy* com a indicação (em amarelo) das quatro grandezas de entrada (*ER*, *EP*, *EA*, e *EE*) e em azul da grandeza de saída (*QR*).

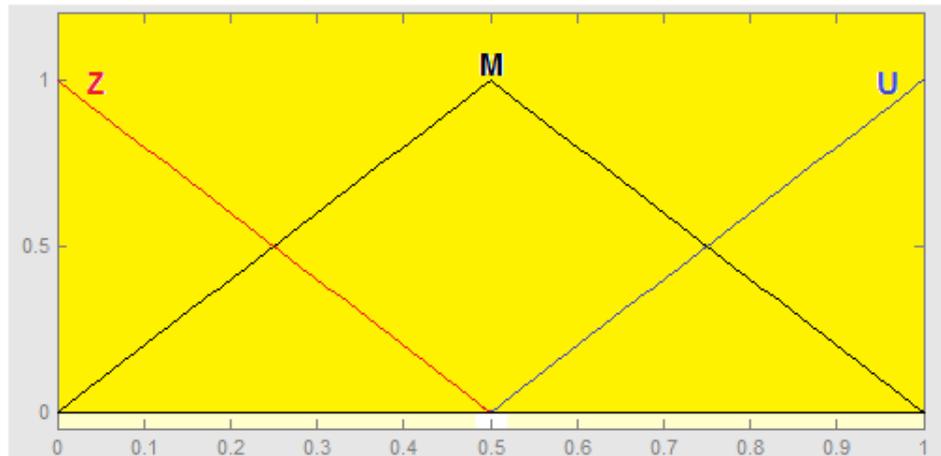


Figura 6.3: Representação das funções de pertinência e termos primários (*Z*, *M* e *U*) para todas as grandezas.

Na Figura 6.4 é listado o conjunto de regras *fuzzy*, normas e métodos para implicação, agregação e especificação utilizados em todas as simulações¹⁴.

¹⁴ Este conjunto de regras, normas e métodos foram empiricamente obtidos e ajustados, conforme qualidade subjetiva dos resultados apresentados em simulações.

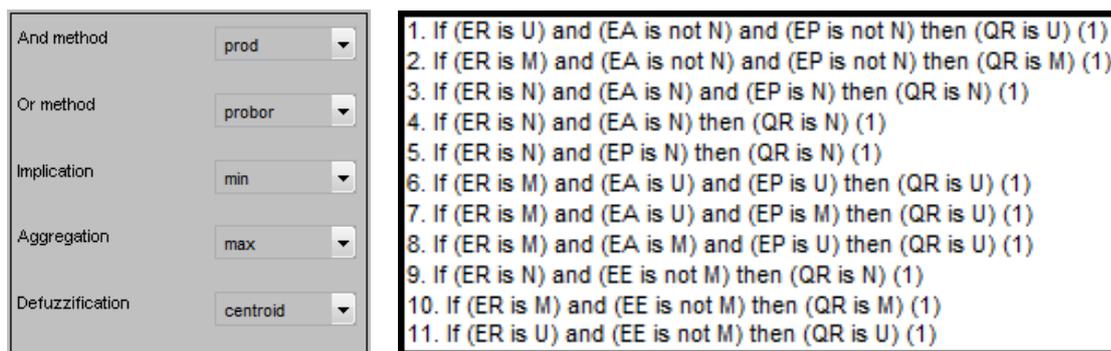


Figura 6.4: À esquerda a relação das normas e métodos empregados, e à direita o conjunto de regras *fuzzy* adotado.

Apenas como exemplo, apresentam-se na Figura 6.5 os gráficos da variação de *QR* em função de algumas grandezas de entrada e, na Figura 6.6, apresenta-se a visualização da uma etapa de inferência *fuzzy*, com o processo de disparo das regras e a conversão *fuzzy*-escalar (*defuzzification*) do sistema *fuzzy* implementado em algumas condições selecionadas (considerando todas as grandezas de entrada nulas, todas valendo 0,5 e todas unitárias).

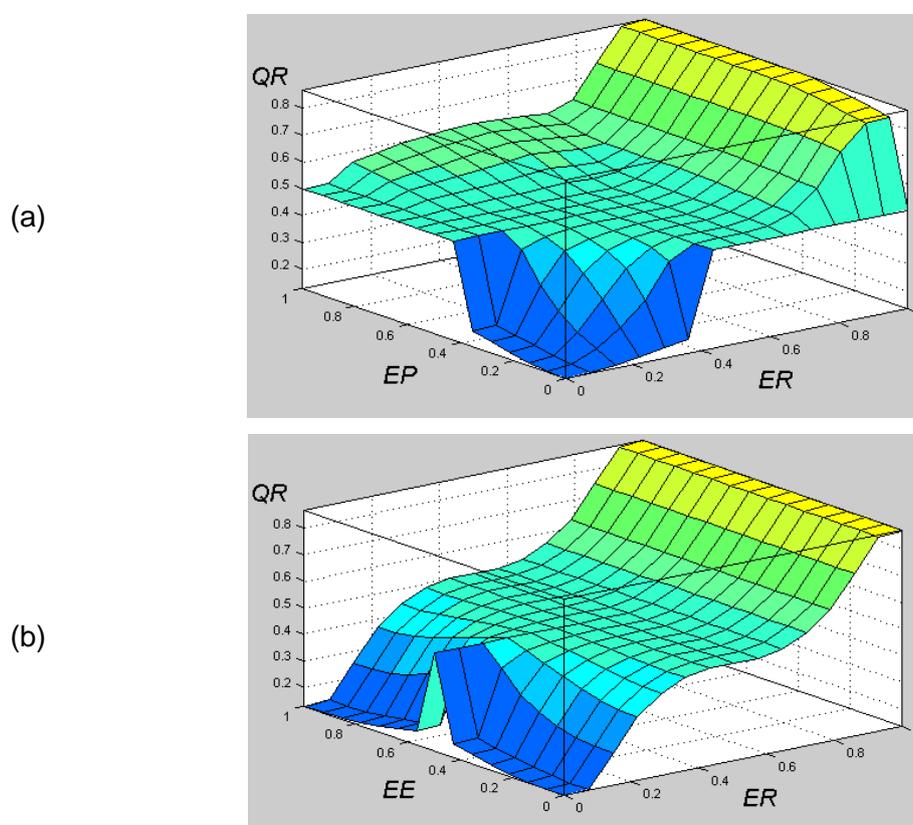


Figura 6.5: Variação do *QR* em função de grandezas de entrada. Em (a) em função de *ER* e *EP*, e em (b) em função de *ER* e *EE*.

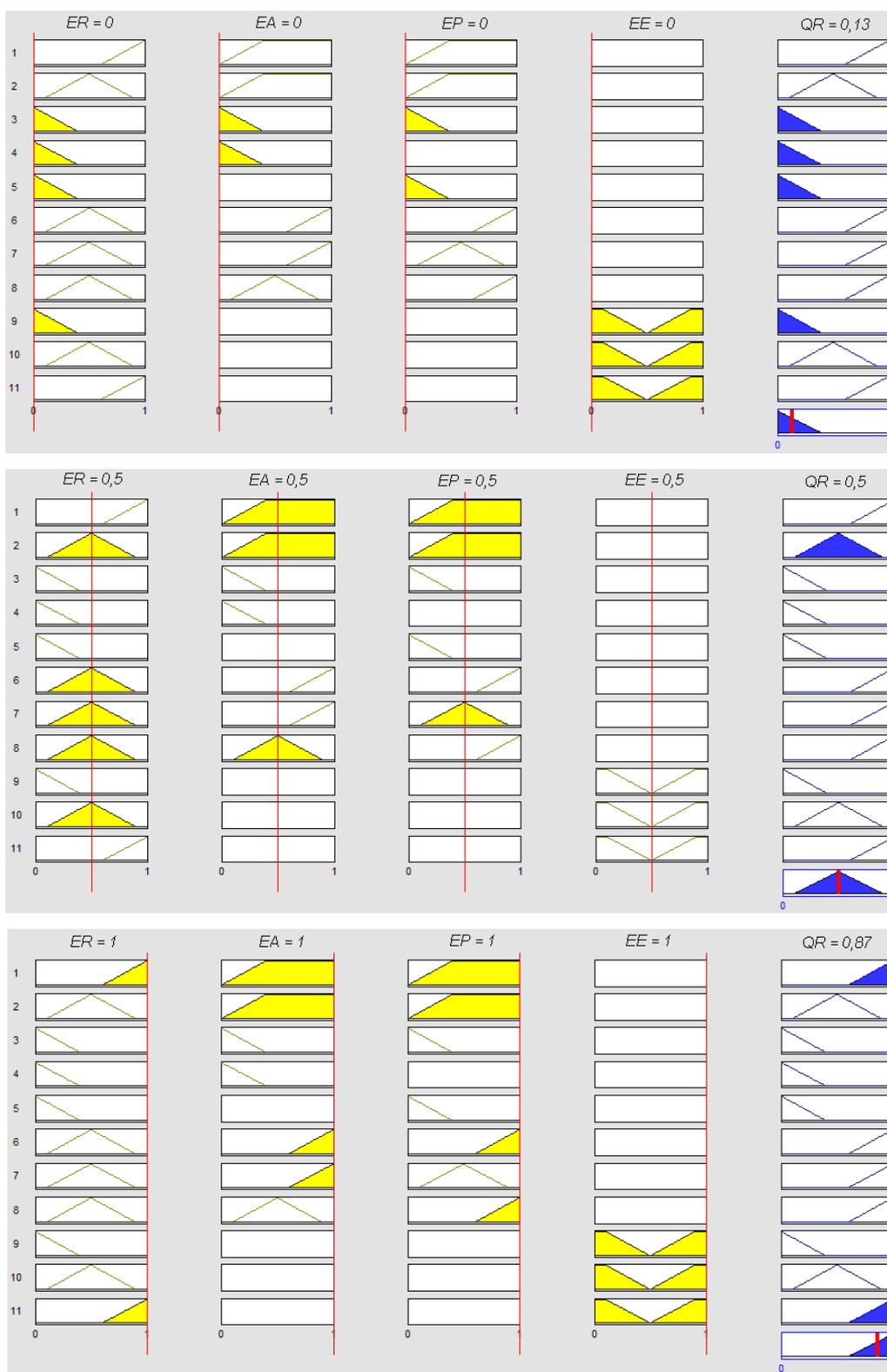


Figura 6.6: Exemplos da etapa de inferência *Fuzzy*, com o disparo das regras e especificação do valor de saída (acima com todas as grandezas de entrada nulas, no centro todas valendo 0,5 e abaixo todas unitárias).

Assim, o sistema *fuzzy* está completamente descrito, mas ainda interno ao Matlab.

6.5 A Matriz *Fuzzy*

Apesar do sistema *fuzzy* já se encontrar desenvolvido, o mesmo se encontra unicamente dentro do Matlab. Deve-se então ser feita a transposição do sistema *fuzzy*, ou de todo o conhecimento que ele possui, para dentro do corpo do programa Fuga, de modo que possa ser efetivamente usado nas simulações, mas também de modo eficiente, para que a performance do programa Fuga seja a melhor possível. Para isso, serão utilizados os conceitos de Tabela *Fuzzy* e de Matriz *Fuzzy*.

6.5.1 Definição

Apesar da lógica *fuzzy* já ter sido empregada na simulação da movimentação de pessoas, seu uso neste contexto se limita rigorosamente ao meio acadêmico, enquanto outras formas de emprego da lógica *fuzzy* já se encontram empregados efetivamente em aplicações profissionais, como no controle de processos industriais (SIMÕES, SHAW, 2007). A simulação multiagente no contexto não acadêmico se faz atualmente por outras técnicas que normalmente não empregam a lógica *fuzzy* (THOMPSON, MARCHANT, 1995a; PELECHANO et al., 2008).

Um dos fatores que pode estar contribuindo para a dificuldade da aplicação da lógica *fuzzy* na modelagem multiagente fora do contexto acadêmico é a sua velocidade de processamento. Como visto anteriormente, um sistema *fuzzy* engloba uma série de operações em todas as suas etapas, tais como a conversão escalar para *fuzzy*, todo o processamento da máquina de inferência e sua associação ao banco de regras, assim como a conversão final de *fuzzy* para escalar (Figura 2.6).

Todo este processo tem certa sofisticação, portanto um tempo de processamento considerável. Considerando uma aplicação em um controle de processo, por exemplo, o tempo computacional gasto para um ciclo completo de uma tomada de decisão *fuzzy* pode ser na prática considerado desprezível, portanto não é limitador do seu uso. Entretanto, uma modelagem multiagente pode envolver milhares de

agentes, ou mais, onde cada agente pode precisar realizar individualmente vários ciclos de processamentos *fuzzy* completos a cada segundo. Neste caso, o tempo de processamento, ou custo computacional, se torna um ponto negativo à utilização desta ferramenta fora do contexto acadêmico, onde a performance têm uma importância mais destacada.

Assim, torna-se interessante o emprego de alguma técnica para se acelerar o tempo de processamento *fuzzy*, mas sem ocasionar perda da qualidade. Uma ideia central está em se captar todo o conhecimento *fuzzy* de um processamento padrão, e então o simular por outra forma de representação que apresente resultados similares, mas que tenha um tempo de processamento computacional muito inferior. Dessa maneira, a lógica *fuzzy* poderá ser utilizada na modelagem multiagente, mesmo que indiretamente, sem prejuízo da qualidade, mas com também alta velocidade de processamento.

Uma possibilidade seria a utilização direta dos dados do sistema *fuzzy* na forma de uma simples tabela, a Tabela *Fuzzy* – TF. Idealmente esta TF deve ficar na memória dinâmica do computador, para redução no tempo de pesquisa, o que será uma grande vantagem. Uma questão a ser considerada é que as grandezas de entrada podem eventualmente ter variações contínuas, ou seja, algum critério deverá ser adotado para a geração da TF nesta situação.

Esta TF teria tantas colunas quantas fossem as grandezas de entrada e de saída. Assim, por exemplo, supondo quatro grandezas de entrada e uma grandeza de saída, com uma combinação possível de 1.000 diferentes valores possíveis para as grandezas de entrada, a TF formada teria 5 colunas e 1.000 linhas, ou 5.000 campos. A utilização de todo o conhecimento *fuzzy* nessa tabela será muito mais rápida que a realização de todo um processamento *fuzzy* a cada consulta. Entretanto, mesmo essa tabela pode ser otimizada, de modo a facilitar enormemente a pesquisa sobre a mesma além de ter seu tamanho reduzido, utilizando para isso o conceito da Matriz *Fuzzy* - MF.

A Matriz *Fuzzy* é uma matriz que possui somente os valores da(s) saída(s). Cada uma das grandezas de entrada é tratada diretamente como uma das dimensões da matriz. Sabendo-se dos valores em cada dimensão (grandezas de entrada), se obtêm diretamente o valor da saída (pesquisa direta). Assim, a MF, além de possibilitar grande velocidade na obtenção dos resultados, também propicia economia na memória para seu armazenamento. No exemplo anterior, por exemplo, se ao invés da TF se usar a MF, haverá uma redução do tamanho da base de dados de 5.000 campos para somente 1.000 campos.

Entretanto, para isso será necessário converter os valores de cada grandeza de entrada da TF no seu equivalente índice da matriz MF. A Figura 6.7 ilustra este processo de obtenção do valor de saída através de uma MF.

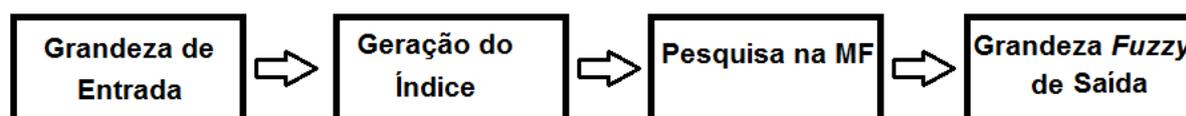


Figura 6.7: Etapas de processo de obtenção de um valor de saída através de uma MF.

Alternativamente à MF, podem-se também empregar outras representações, como uma linha ou Vetor *Fuzzy* - VF, onde todas as saídas estão ordenadas em uma única linha, mas de forma concatenada, para que se possa facilmente converter as dimensões de entrada em um endereço nesta linha. Ressalta-se que o VF ou a MF são equivalentes, sendo apenas representações distintas dos mesmos dados. Entretanto, nesse trabalho, vai-se adotar exclusivamente a MF, pois essa possibilita a pesquisa mais direta sobre o banco de dados do conhecimento *fuzzy*.

Comparando os resultados de performance para a utilização da técnica da MF em detrimento do uso direto do sistema *fuzzy* convencional no modelo *fuzzy* adotado na etapa de tomada de decisão humana, obteve-se uma redução do tempo de

processamento computacional em cerca de 140 vezes, sem prejuízo nos resultados (BRAGA et al., 2016d).

6.5.2 Aplicação Prática da Tabela *Fuzzy*

No caso específico da aplicação prática do sistema *fuzzy* deste trabalho, tem-se quatro grandezas de entrada e uma grandeza de saída. Todas as grandezas de entrada (*ER*, *EP*, *EA*, *EE*) podem possuir cinco possíveis valores empiricamente selecionados (0; 0,25; 0,5; 0,75 e 1). Assim, a respectiva MF terá o tamanho de 5 x 5 x 5 elementos, ou seja, com apenas 625 campos todo o conhecimento *fuzzy* obtido no sistema desenvolvido está integralmente representado. Como as grandezas de entradas são discretas, não haverá erros de arredondamento entre o sistema *fuzzy* e a respectiva MF. Na Tabela 6.4 têm-se, como exemplo, partes da tabela *fuzzy* gerada pelo sistema *fuzzy* no Matlab.

Tabela 6.4: Partes da tabela *fuzzy* gerada pelo sistema no Matlab.

<i>ER</i>	<i>EP</i>	<i>EA</i>	<i>EE</i>	<i>QR</i>
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

Essa tabela *fuzzy* gerada no Matlab é então salva como um arquivo tipo “txt”, que é 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 é utilizado pelo programa Fuga sempre que se fizer necessário uma tomada de decisão *fuzzy* pelo agente sendo simulado. Assim, somente essa matriz *fuzzy* será efetivamente incluída no programa Fuga, de forma a se reduzir o efetivo tempo de processamento gasto numa tomada de decisão *fuzzy*.

Especificamente para o caso desse trabalho, na matriz *fuzzy* gerada, cada uma das quatro grandezas de entrada é tratada como uma das dimensões dessa matriz, que internamente conterá apenas os valores de *QR* (grandezas de saída). A Tabela 6.5 ilustra a conversão dos valores da grandeza de entrada para o respectivo valor da dimensão da matriz *fuzzy*.

Tabela 6.5: Conversão do valor discreto das grandezas de entrada para a respectiva dimensão da matriz *fuzzy*.

Valor da grandeza de entrada do sistema <i>fuzzy</i> (<i>ER, EP, EA, EE</i>)	Valor da respectiva dimensão da matriz <i>fuzzy</i> (<i>dER, dEP, dEA, dEE</i>)
0	0
0,25	1
0,5	2
0,75	3
1	4

Os valores das dimensões da matriz *fuzzy* da Tabela 6.5 podem ser, alternativamente, obtidos em função do valor da grandeza de entrada do sistema *fuzzy* pela Equação 6.4:

$$dEi = 4 \times Ei \quad (6.4)$$

Sendo que

E_i é o valor de grandeza de entrada de quaisquer tipos $\{ER, EP, EA, EE\}$ apresentada na tabela *fuzzy*; e

dE_i é o respectivo valor da dimensão equivalente a essa grandeza de entrada na matriz *fuzzy*.

Exemplo:

- suponha-se que se deseje dentro do programa Fuga saber o valor de QR para quando as grandezas de entrada tiverem os seguintes valores: $ER = 0,75$; $EP = 0$; $EA = 0$; e $EE = 1$.

Pela Equação (6.1), o valor de QR deveria ser calculado pela agora Equação (6.5), realizando-se todo o processamento *fuzzy* convencional.

$$QR_k = f_{Fuzzy}(0,75; 0; 0; 1) \quad (6.5)$$

Entretanto, ao invés disso, e de posse da MF, vai-se utilizar apenas o seguinte comando de leitura, $QR = MF [(dER); (dEP); (dEA); (dEE)]$, ou ainda, pelo seguinte comando direto, onde as dimensões são obtidas das quatro grandezas de entrada:

$$QR = MF [(4 \times ER); (4 \times EP); (4 \times EA); (4 \times EE)] \quad (6.6)$$

Assim, todo o sofisticado processamento *fuzzy* é substituído pelo simples comando direto $QR = MF [3; 0; 0; 4]$, que responderá praticamente de pronto, e será obtido o respectivo valor de QR que, nesse caso, é de 0,589.

Dessa maneira, todo o conhecimento *fuzzy* foi devidamente incorporado no programa Fuga na forma de uma matriz, estando esta prontamente disponível na memória dinâmica para quaisquer consultas durante as simulações.

7 A EFETIVA MOVIMENTAÇÃO

7.1 Tempo para uma Tomada de Decisão

Apesar do relógio interno do programa considerar como sendo de 0,025 s o tempo transcorrido a cada iteração (Seção 5.5), cada agente necessita, pela natureza humana, de certo tempo mínimo para que possa fazer uma tomada de decisão e reagir adequadamente enquanto se movimenta. Este tempo não deve ser confundido com o t_{pr} ou tempo de pré-reação (ver Seção 5.4).

Existe o tempo de reação simples (TRS), relacionado com o reflexo, que “representa o nível de coordenação neuromuscular, no qual os estímulos visuais, auditivos ou táteis são decodificados pelo corpo através de diferentes processos físico-químicos e mecânicos” (VAGHETI et al., 2007). Existe, também, o tempo de reação ao movimento (TRM), de valor superior ao TRS, pois, além do simples reflexo, requer o tempo necessário para a realização de um movimento mais sofisticado.

Tanto o TRS quanto o TRM variam de pessoa para pessoa, assim como de acordo com a sua idade, seu estado de saúde, seu estado pessoal (por exemplo, pessoas alcoolizadas, mesmo que levemente, tem o tempo de reação muito incrementado), do estado de atenção, do condicionamento para a tarefa, além de ser influenciada pelos fatores ambientais (iluminação, ruídos, temperatura, etc.). O nível de estresse também influencia nestes tempos de reação.

Estudos realizados em atletas condicionados indicam, para o TRS, valores na ordem de 0,2 s (VAGHETI et al., 2007). Behm et al. (2004) indicam que, para jovens saudáveis, o TRS seja na ordem de 0,3 s, enquanto o TRM na ordem de 0,4 s. Já estudos no âmbito de direção de veículos consideram razoável supor como sendo de 1 s o tempo mínimo para uma efetiva tomada de ação em função a um estímulo (SOUZA FILHO, 2010).

Adicionalmente, como já mencionado, o NE, além de influenciar o sistema *fuzzy* pela alteração do peso da grandeza de entrada ER, também irá influenciar no tempo de reação efetivo (TRE) individual. Baseado no princípio do “U” invertido (STAAL, 2005), será adotado que esta influência se dará conforme a Equação 7.1:

$$TRE = TRM \times PNE \quad (7.1)$$

Sendo que

TRM = Tempo Reação ao Movimento; sendo uma variável de entrada do modelo (normalmente será considerada como sendo de 0,5 s, mas cujo valor poderá ser livremente previamente determinado para todo o grupo ou mesmo individualmente); e

PNE = Peso NE dado pela Tabela 7.1, em função do nível de estresse.

Tabela 7.1: Variação do Peso NE (PNE) em função do nível de estresse.

Nível de estresse	Peso NE (PNE)
Muito baixo	2,0
Baixo	1,5
Médio	1,0
Alto	1,5
Muito alto	2,0

Assim, apesar do relógio padrão de 0,025 s, cada agente somente passa por uma nova tomada de decisão *fuzzy* ao transcorrer o seu respectivo TRE. Para isto, é criada uma variável denominada de tempo transcorrido (TT), independente para cada agente, que no início de cada simulação é feito nulo.

7.2 Fluxograma de Decisão

A Figura 7.1 apresenta o fluxograma esquemático de decisão relativo à movimentação do agente.

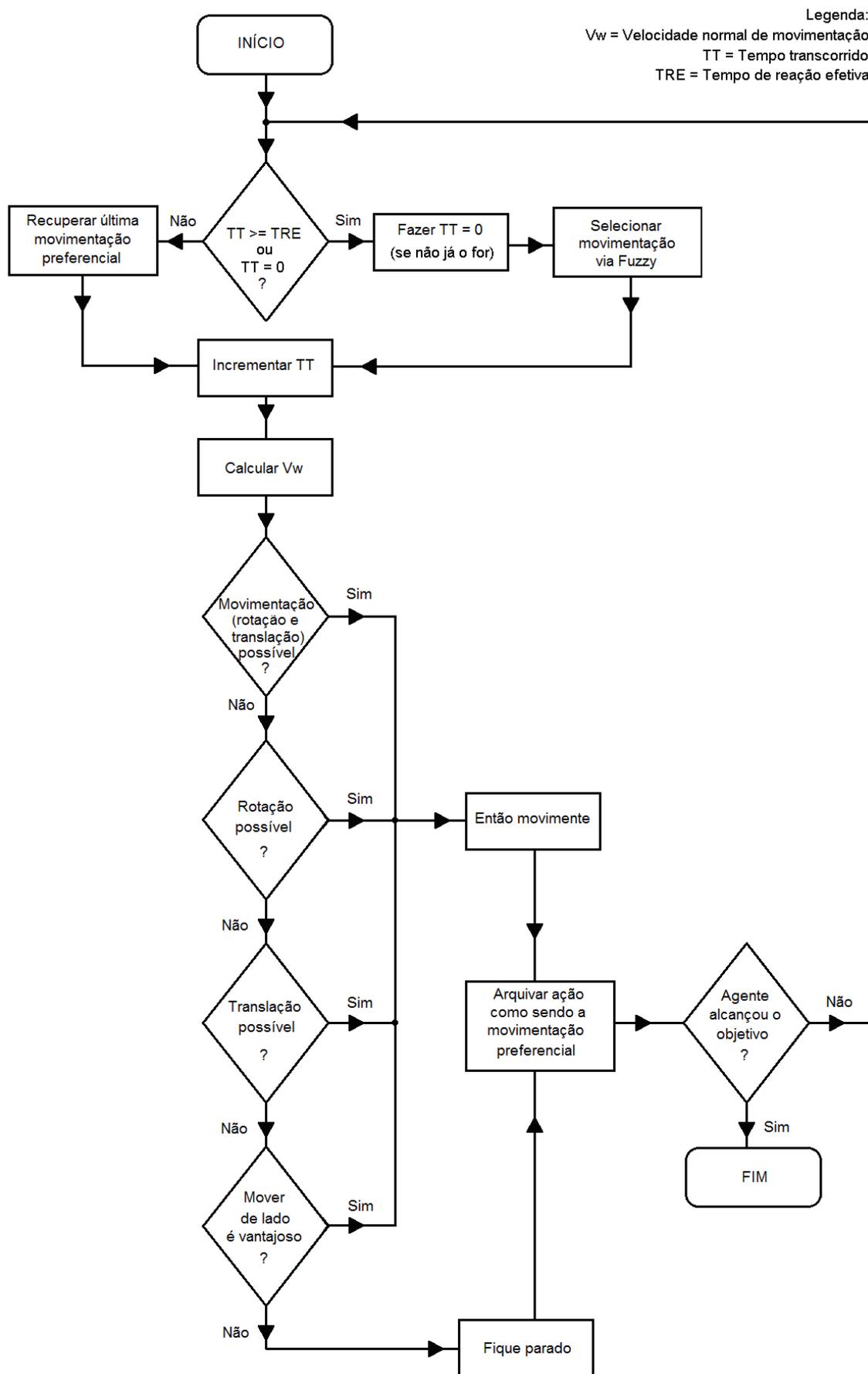


Figura 7.1: Fluxograma de decisão relativo à movimentação de cada agente.

Pela Figura 7.1, nota-se claramente que o sistema *fuzzy*, apesar de ter uma importância fundamental pela seleção da movimentação preferencial inicial, é apenas parte do processo decisório, que envolve muitas outras etapas.

7.3 Ordem de Verificação dos Agentes

Antes da simulação da movimentação propriamente dita, os agentes são individualmente gerados, onde seu posicionamento e orientação, assim como todas as suas características como tamanho, NE e TRE iniciais são estabelecidos. A geração dos agentes é feita de modo seqüencial, onde cada agente terá associado a si um número identificador, denominado de número de ordem (NO), que permanecerá fixo durante toda a simulação.

Por exemplo, em uma simulação com inicialmente dez agentes, o primeiro agente gerado terá como seu número NO o valor 1, o segundo agente gerado terá como seu número NO o valor 2, e assim por diante, até que o último agente gerado tenha como seu número NO o valor 10. Somente depois que todos os agentes são gerados, e concomitantemente ordenados, é que a simulação da movimentação realmente se inicia.

Quando da simulação da movimentação, a cada iteração completada, cada agente é analisado individualmente, conforme fluxograma de decisão (Figura 7.1), sempre na mesma sequência do seu número NO. Assim, o agente de NO 1 será analisado primeiro, e, terminado a sua análise, será então verificado individualmente o agente de NO 2, e assim por diante, até que todos os agentes passem, um a um e na sequência de seu número NO, pelo fluxograma decisório. Terminado a análise de todos os agentes, se inicia uma nova iteração onde todos os agentes serão novamente analisados, sempre na mesma sequência de seu número NO.

Se um agente atingir o objetivo inicialmente estabelecido, como, por exemplo, uma saída, ele é eliminado do ambiente e não é mais analisado para fins de

movimentação, mas a ordem seqüencial continua inalterada para todos os demais agentes.

7.4 Seleção da Primeira Movimentação Preferencial

Imediatamente após a geração de todos os agentes, no efetivo início da simulação da movimentação, o primeiro agente (número NO 1) irá realizar uma tomada de decisão *fuzzy*, com a seleção do caminho inicialmente preferencial (ao começar a simulação, a variável TT é nula para todos os agentes).

Após essa tomada de decisão *fuzzy*, o valor de TT será, para esse primeiro agente, incrementado do valor do tempo do relógio (0,025 s). É, então, calculado a V_w (velocidade de normal de movimentação) para esse agente, conforme descrito na Seção 5.3. Considerando o incremento do tempo do relógio, a velocidade v_w e as restrições físicas de giro, uma nova posição desejada para o agente é definida. Se essa nova posição for possível (não haver conflitos físicos não permitidos), a movimentação (eventualmente, rotação e translação) é realizada. Sendo a movimentação realizada, o caminho inicialmente escolhido pela tomada de decisão *fuzzy* para esse agente é arquivado como sendo sua meta de deslocamento preferencial.

Entretanto, em não sendo possível a movimentação inicialmente idealizada devido a alguma restrição física, vai-se verificar se outra movimentação interessante, mesmo se não a idealmente selecionada pelo tomada *fuzzy* de decisão, é possível. A primeira opção de movimentação alternativa a ser verificada é de fazer somente a rotação. Se for possível se realizar a rotação indicada na tomada de decisão *fuzzy* inicial, essa movimentação de rotação é realizada, sendo então essa a nova efetiva movimentação preferencial arquivada para esse agente. Entretanto, novamente, sendo essa rotação impossível de ser realizada devido a algum conflito físico, vai-se verificar se a translação indicada na tomada de decisão *fuzzy* inicial é possível. Se for a possível somente se realizar a translação, essa movimentação de translação é realizada, sendo então essa a nova efetiva movimentação preferencial arquivada para esse agente.

Contudo, novamente, sendo essa translação também impossível de ser realizada, vai-se verificar se uma movimentação para o lado é **vantajosa**. Se for vantajosa, o agente irá se mover lateralmente para o lado mais interessante.

Se essa movimentação para o lado é realizada, então essa movimentação para o lado é arquivada como sendo a nova movimentação preferencial para esse agente. Mas, se essa movimentação não for possível ou não for vantajosa, como todas as opções indicadas no fluxograma da Figura 8.1 foram tentadas sem sucesso, o agente irá permanecer em repouso, sendo essa situação de permanecer parado arquivado como sendo sua nova “movimentação” preferencial.

Assim, o agente NO 1 tem uma movimentação preferencial (mesmo que seja permanecer em repouso) estabelecida, arquivada e efetivada. Quando realizada, a movimentação resulta, na prática, em unicamente se atualizar as matrizes onde o posicionamento do agente é efetivado pela alteração dos valores em seus campos correspondentes ao posicionamento do agente em verificação. Porém, nenhuma atualização das interfaces gráficas é realizada nesse momento, apenas dos valores na matriz de posições.

7.5 Continuação do Laço

Terminado esse ciclo completo para o primeiro agente, todo um novo ciclo é realizado para o segundo agente, e assim por diante, até que todos os agentes tenham sido verificados. Findo este ciclo de verificação para todos os agentes conforme sequência do número NO de cada um, todos os agentes terão para si nesse momento, arquivadas, certa movimentação preferencial, que também foi efetivada pela atualização imediata dos valores na matriz de posições.

Além disso, terminado esse ciclo, o tempo TT também estará incrementado do valor do relógio para todos os agentes. Entretanto, adicionalmente, ao se encerrar esse primeiro ciclo de verificação das eventuais novas posições e orientações de todos os

agentes, a interface gráfica do programa Fuga é finalmente atualizada em conjunto para todos os agentes.

Feito isso, considera-se completo todo o ciclo desta iteração. Após esse momento, uma nova iteração de inicia, onde cada agente é novamente verificado, respeitando a sequência do seu número NO. Entretanto, uma nova tomada de decisão *fuzzy* só será novamente efetivada para cada agente se o novo TT para esse agente for superior ou igual ao TER estabelecido para esse agente. Se não for, a movimentação a ser definida como preferencial será a anteriormente arquivada para esse agente.

Contudo, se o valor do TT for igual ou superior ao valor de TRE para um agente, uma nova etapa de decisão *fuzzy* é realizada especificamente para esse agente. Nesse caso, o valor de TT para esse agente é novamente feito nulo, sendo posteriormente incrementado do valor do relógio a cada novo ciclo de verificação.

Assim, o ciclo é continuamente realizado até que todos os agentes atinjam o seu objetivo previamente definido. Quando isso acontecer, encerra-se a simulação.

8 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

8.1 Fundamentação

A verificação e validação do modelo e sua implementação são fatores essenciais para se determinar a confiabilidade dos resultados produzidos por simulações (RONCHI et al., 2013). No contexto da proteção contra incêndios, a verificação é definida como sendo “o processo de determinar que a implementação do método de cálculo representa com precisão a descrição conceitual do desenvolvedor do método de cálculo e a solução para o método de cálculo”, e validação como sendo “o processo de determinar o grau em que um método de cálculo é uma representação precisa do mundo real a partir da perspectiva das utilizações previstas para o método de cálculo” (ISO, 2008)¹⁵.

Um processo de verificação e validação por meio de comparações com situações reais, apesar do alto valor intrínseco, é muito difícil de ser realizado. Assim, muitas comparações são feitas com dados obtidos ou de situações de normalidade ou de exercícios de evacuações (OLSSON, REGAN, 2001; KO et al., 2007, SCHADSCHNEIDER et al., 2009a, IBRAHIM et al., 2019). Diversos sistemas de visão computacional foram desenvolvidos para facilitar estas análises (JACQUES JUNIOR et al., 2010; ZHANG, SEYFRIED, 2014). Estas comparações e dados obtidos são de grande relevância, mas o comportamento humano em treinamento pode ser bem diferente do comportamento em uma situação real (Figura 8.1), além de estarem sujeitas a grande variabilidade nos resultados devida à falta, ou dificuldade, de padronização.

¹⁵ Traduções livres.

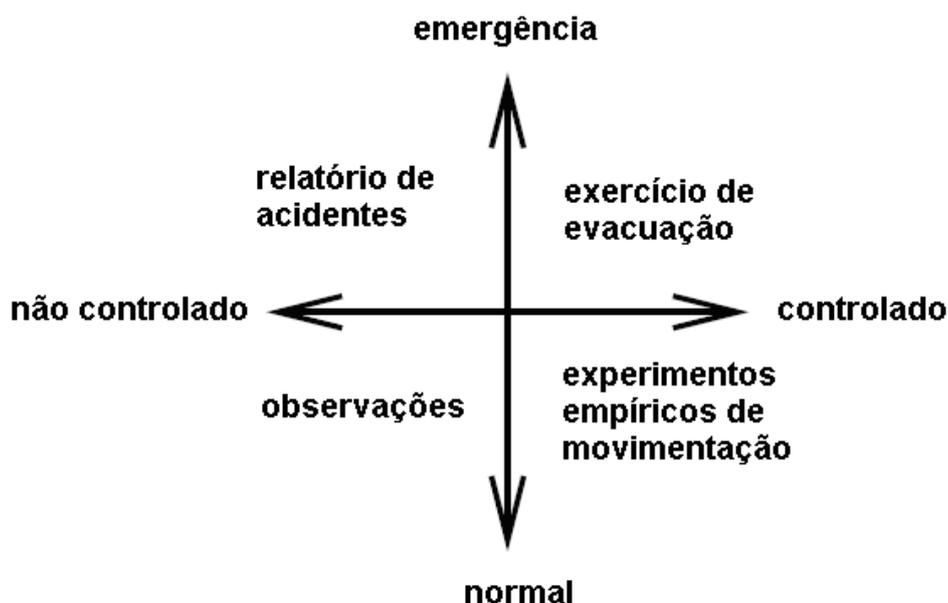


Figura 8.1: Classificação esquemática dos dados de diversos processos de evacuação.

Fonte: adaptado de Schadschneider et al. (2009a).

Adicionalmente, é comum autores utilizarem modelos de outros pesquisadores já estabelecidos para comparação (SCHADSCHNEIDER et al., 2009a; BRAGA, 2012). Entretanto, pode ocorrer uma razoável divergência entre as modelagens e o motivo destas diferenças não é de fácil detecção, já que não raramente os modelos possuem pontos obscuros e diferentes considerações na sua configuração (ROGSCH et al., 2009). Na Figura 8.2 se apresenta um exemplo de comparação entre os resultados do tempo de evacuação obtido para um ambiente simples entre diversos modelos.

Para resolver ou pelo ao menos minimizar esta questão, a NIST - *National Institute of Standards and Technology* (RONCHI et al., 2013) publicou um protocolo formal de verificação e validação de modelos para evacuação de ambientes, seguindo uma metodologia consistente e abrangente. Esse protocolo NIST foi desenvolvido a partir de um guia elaborado pela IMO – *International Maritime Organization* (2007). Lubás et al. (2014) analisaram o protocolo NIST, considerando o mesmo como sendo uma iniciativa valorosa, relevante e consistente, tendo adicionalmente apresentado algumas sugestões no sentido de se expandir um pouco mais o escopo dos testes.

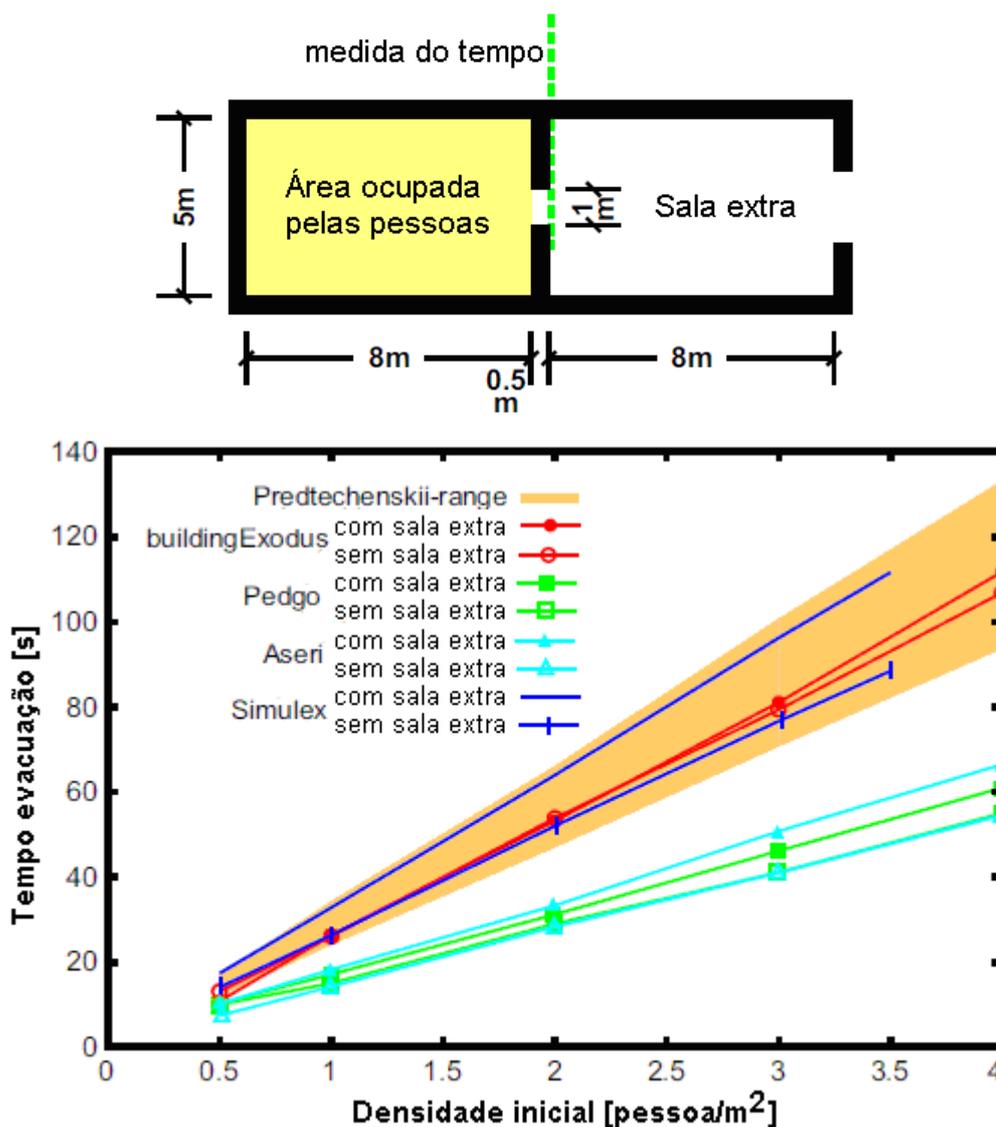


Figura 8.2: Comparação entre diferentes modelos para simulação de um ambiente simples.

Fonte: adaptado de Rogsch *et al.* (2009).

Pelo protocolo de validação e verificação da NIST, os modelos são avaliados por meio de cinco componentes: o tempo de pré-evacuação; a velocidade de deslocamento; a utilização das saídas; a disponibilidade das rotas; e as condições e restrições ao escoamento.

Entretanto, a maioria desses critérios não se aplica ao modelo desse trabalho, nem de maneira geral à maioria dos modelos, servindo, o protocolo portanto mais como um direcionamento a seguir. Reconhece-se, entretanto, que o protocolo NIST proposto em 2013 é um importante primeiro passo para futuros desenvolvimentos.

Neste trabalho, a verificação e a validação do modelo desenvolvido são realizadas por meio de diversas simulações. São feitos alguns ensaios padronizados para se verificar o efetivo comportamento dos algoritmos, pela comparação com resultados de simulações fornecidas na literatura para outros modelos, e por alguns ensaios baseados no protocolo NIST.

8.2 Ensaios

8.2.1 Velocidade Fixa Linear

Esse é um ensaio dos mais simples, mas de importância fundamental. Esse teste inicial visa verificar se a velocidade linear de deslocamento especificada é igual à velocidade efetivamente calculada em uma simulação. O cálculo da velocidade efetiva é realizado pela razão entre a distância percorrida em linha reta por um único agente até a saída e o tempo total transcorrido, fornecido pela simulação, para que esse agente abandone o ambiente.

Inicialmente, será considerada uma linha reta no ambiente cuja rota ideal de deslocamento também se comporta como linha reta na Matriz Ambiente (durante o deslocamento somente se altera a coluna, mantendo a linha). Para isso, um agente sozinho em um corredor reto e sem obstruções internas (para se evitar a influência de outros agentes ou obstáculos fixos) de 4 m de largura e 65 m de comprimento vai se deslocar até a saída. O agente estará sempre posicionado inicialmente no centro do corredor em relação à largura do mesmo. São realizadas simulações com os agentes estando a uma distância da saída de 10 m, 20 m, 40 m e 60 m da saída.

A velocidade de deslocamento do agente foi previamente especificada antes de cada simulação, sendo mantida fixa ao longo da mesma. Foram realizadas simulações com as velocidades de deslocamento de 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s. Na Figura 8.3 está a representação do corredor e na Tabela 8.1 os resultados encontrados.

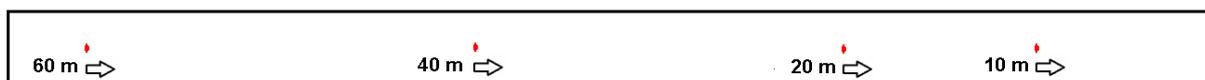


Figura 8.3: Representação dos agentes (em vermelho) posicionados a diversas distâncias da saída (em laranja) em um corredor reto de 4 m de largura e 65 m de comprimento.

Tabela 8.1: Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após a simulação de abandono dos ambientes da Figura 8.3.

Velocidade de deslocamento (m/s)				
Especificada	Calculada nas simulações			
	Distância da saída (m)			
	10	20	40	60
0,5	0,501	0,500	0,500	0,500
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000
1,5	1,498	1,501	1,500	1,500
2,0	2,000	2,000	2,000	2,000

Esses resultados da Tabela 8.1 indicam que o erro na movimentação em linha reta, coincidente com a linha da Matriz Ambiente, é muito pequeno, podendo ser desprezado. Outro ponto importante é que o erro não aumenta com a distância (na verdade parece até diminuir). Os pequenos erros encontrados nas velocidades de 0,5 e 1,5 m/s provavelmente são devidos a arredondamentos na discretização.

8.2.2 Velocidade Fixa Angular

Feito essa primeira parte, torna-se agora necessário a verificação do erro também considerando uma movimentação em linha reta no ambiente, mas cuja rota ideal de deslocamento se comporta não mais como uma linha única na Matriz Ambiente (linha e coluna variando). Esse é um teste importante para se verificar o efeito causado pelo posicionamento do ambiente sobre a Matriz Ambiente. Conforme visto anteriormente (Seção 3), esse erro pode ser muito significativo para os algoritmos de busca pelas variações de Moore e Von Neumann, tendo sido por isso necessário o desenvolvimento e implementação do algoritmo BR.

Para isso, um agente sozinho em um ambiente na forma de um quadrado de 500 m^2 de área e sem obstruções internas vai se deslocar até a saída. A saída do ambiente está posicionada em um dos cantos. O agente estará sempre posicionado sobre a diagonal do quadrado que passa pela saída (45°), ou sobre a semi-diagonal ($22,5^\circ$). São realizadas simulações com os agentes estando a uma distância da saída de 5 m, 10 m, 20 m (para ambas as inclinações) e de 30 m (para a inclinação de 45°). Como feito anteriormente, a velocidade de deslocamento do agente também foi previamente estabelecida, sendo mantida fixa ao longo de cada simulação, com as velocidades de deslocamento de 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s e 2,0 m/s. Na Figura 8.4 está a representação do ambiente e na Tabela 8.2 os resultados encontrados.

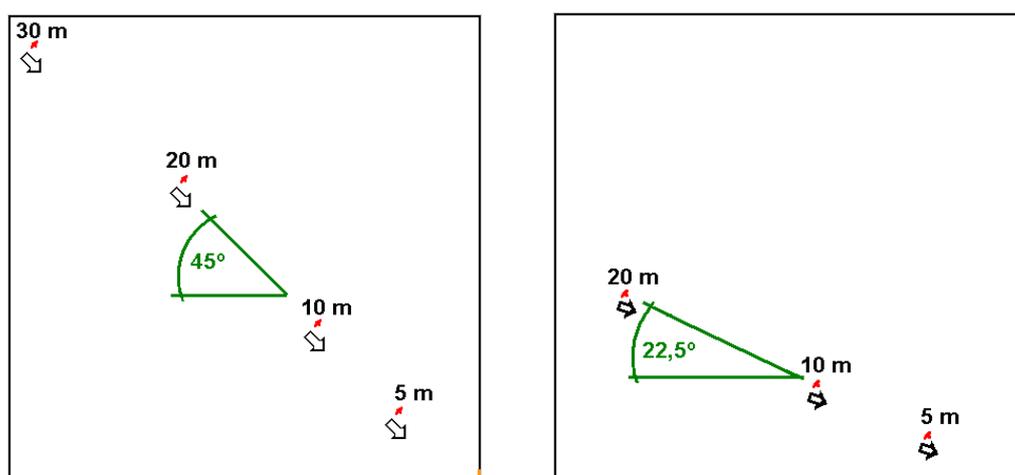


Figura 8.4: Representação dos agentes (em vermelho) posicionados a diversas distâncias da saída (em laranja) sobre a diagonal do ambiente (à esquerda), ou a $22,5^\circ$ na Matriz Ambiente (à direita), em salão quadrado com 500 m^2 de área.

Tabela 8.2: Comparação entre a velocidade de deslocamento especificada e a calculada após a simulação de abandono do ambiente da Figura 8.4.

Velocidade de deslocamento especificada (m/s)	Velocidade de deslocamento calculada (m/s)							
	Distância da saída (m) e ângulo de movimentação							
	5		10		20		30	
	22,5°	45°	22,5°	45°	22,5°	45°	22,5°	45°
0,5	0,504	0,505	0,503	0,504	0,501	0,502	-	0,501
1,0	1,010	1,011	1,007	1,008	1,005	1,007	-	1,004
1,5	1,512	1,514	1,511	1,511	1,507	1,508	-	1,504
2,0	2,018	2,020	2,009	2,010	2,005	2,007	-	2,003

Esses resultados da Tabela 8.2 indicam que os erros na movimentação em linha reta em angulações de 45° e 22,5° das linhas da Matriz Ambiente são pequenos. No pior caso (distância de 5 m) o erro aproximado encontrado foi em torno de +1%, e no melhor caso (distância de 30 m), o erro aproximado encontrado foi de + 0,2%. Apesar de esses erros serem superiores aos encontrados na Tabela 8.1, podem ser considerados pequenos, principalmente quando se considera os erros de até + 40% obtidos na determinação da distância percorrida encontrada por outros algoritmos que não o BR. Apesar de não ser significativa a diferença entre os erros nas duas inclinações verificadas, o percurso a 22,5° apresentou um erro sistematicamente um pouco inferior ao apresentado pela inclinação de 45°.

Além disso, assim como ocorreu anteriormente, o erro não aumenta com a distância (na verdade diminui com o aumento da distância). Esse é uma característica relevante, pois indica que magnitude do erro (ou da sua maior parte) não é devido ao algoritmo BR empregado, pois se fosse esse erro tenderia a aumentar (ou pelo menos ficar fixo) com a distância percorrida, e sim relacionada à natureza inerente da discretização do ambiente.

8.2.3 Comparação com Simulex

Repetiu-se o experimento realizado por Ko (2003) também com o uso do Simulex. Ko (2003) utilizou ambientes quadrados com áreas internas de 500, 1000 e 2000 m² e sempre com uma população de 1003 agentes, com distribuição uniforme dos agentes. Foram criados dentro do programa Fuga esses mesmos ambientes e se repetiu a simulação de Ko, mas com a distribuição inicial dos agentes sendo aleatória a cada simulação, que foram realizadas cinco vezes para cada ambiente. Na Figura 8.5 se tem uma imagem do ambiente de 500m² gerada, fornecida por Ko (2003), e pelo programa Fuga v. 2.0. Na Tabela 8.3 se tem uma comparação entre os valores obtidos para o tempo de evacuação no Simulex por Ko e os valores encontrados pelo programa Fuga.

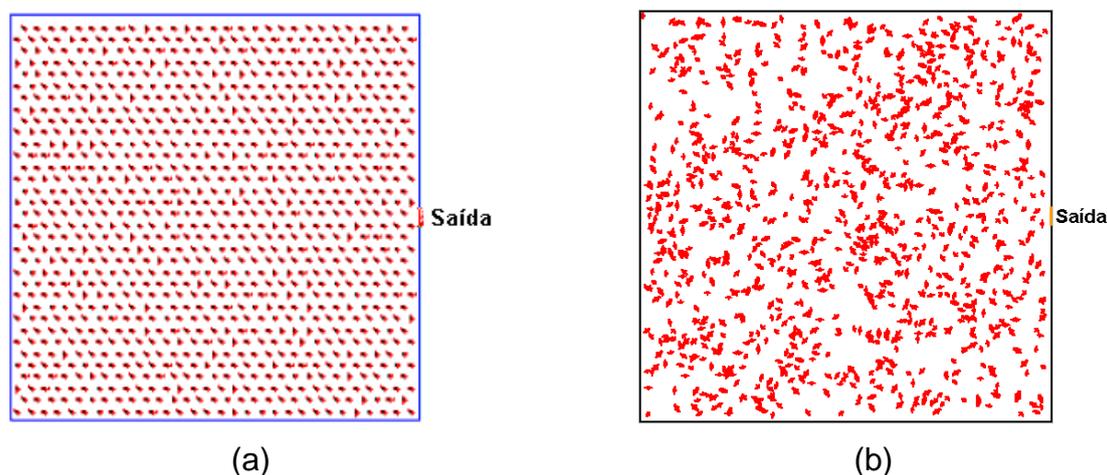


Figura 8.5: Em (a) imagem inicial da simulação de Ko (2003), e em (b) imagem inicial de uma simulação no programa Fuga (ambiente quadrado de 500 m²).

Tabela 8.3: Comparação entre os tempos para total evacuação obtidos pelos programas Simulex (KO, 2003) e Fuga (população de 1003 pessoas).

Cenário	Área (m ²)	Densidade (agentes/m ²)	Tempo Evacuação (s)	
			Ko (2003)	Fuga v. 2.0 ⁽¹⁾
1	500	2,0	506	515
2	1000	1,0	537	546
3	2000	0,5	538	545

(1) posicionamento e orientação inicial dos agentes aleatórios, mas um agente sempre localizado no ponto mais distante.

Comparando os resultados entre si, se verifica para este teste que os valores obtidos por Ko estão dentro faixa de valores obtida no programa Fuga para o tempo de escape total, considerando o desvio padrão. Adicionalmente, mesmo com a área dos cenários desse teste variando enormemente entre si, não ocorreu uma proporcional elevação no tempo de escape, indicando ser a capacidade de passagem das pessoas pela saída o elemento limitador, e não o posicionamento inicial ou a orientação dos agentes.

8.2.4 Comparação com Outros Modelos

Repetiu-se o experimento proposto por Rogsh et al. (2007) utilizado para comparação de diversos modelos, que se constitui da evacuação de uma sala retangular de 8 m x 5 m com uma saída única de 1 m (Figura 8.2). Os valores obtidos pelo programa Fuga estão indicados em destaque na Figura 8.6, sendo os dos demais autores (ROGSH et al., 2007) em tons de cinza.

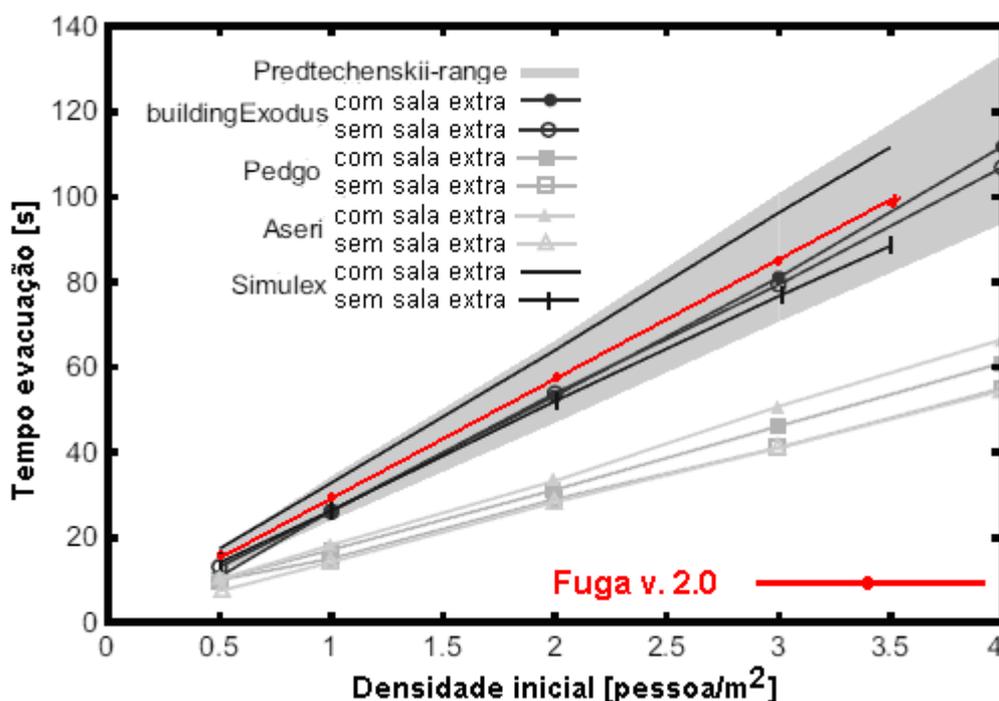


Figura 8.6: Comparação entre diferentes modelos para simulação de um ambiente simples (Figura 8.2), incluindo os resultados obtidos pelo programa Fuga v. 2.0.

Os valores encontrados pelo programa Fuga estão dentro da faixa de valores (que, ressalta-se, definitivamente não é pequena) encontradas na literatura, estando visualmente nesse experimento pouco acima dos valores indicados pelo programa buildingExodus e dentro da faixa de variação do programa Simulex. No programa Fuga, devido a sua concepção, não há diferença entre seus resultados pela adição ou não de uma sala extra.

8.2.5 Verificação do Efeito do Tempo de Pré-Evacuação

Como indicado pelo protocolo NIST, é requerido que o modelo tenha habilidade de ajustar um perfil adequado conforme a necessidade da distribuição do tempo de pré- evacuação (ou pré-reação), TPR, entre a população simulada. No programa Fuga, o TPR é tratado como uma variável, sendo previamente estabelecido pelo usuário, antes da simulação, para cada agente, tanto de forma determinística como aleatória. Na Figura 8.7 se mostra um exemplo do impacto do TPR sobre uma simulação.

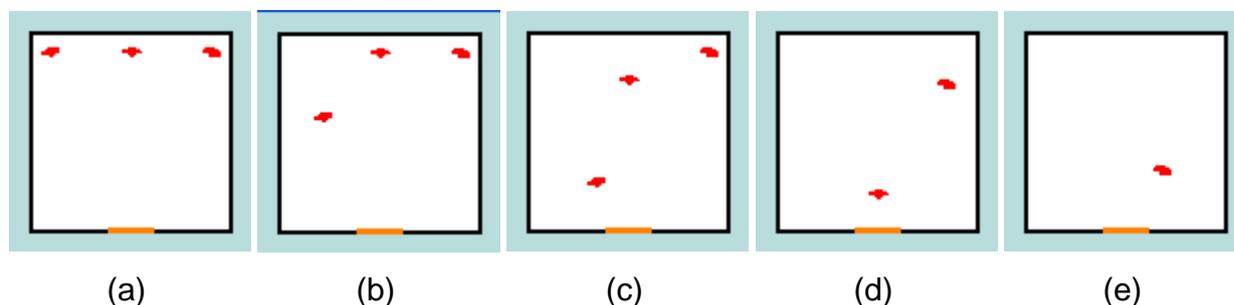


Figura 8.7: Imagens sequenciais de uma simulação do abandono de um ambiente por três agentes com diferentes tempos de pré-reação.

Na Figura 8.7a se tem os três agentes no seu posicionamento inicial da simulação. Iniciada a simulação, o agente mais a esquerda se direciona rumo à saída, ficando esse agente mais adiantado em relação aos demais agentes, que continuam parados (Figura 8.7b). Continuando a simulação, o agente mais a esquerda mantém sua dianteira, mas o agente central também inicia seu movimento de abandono, enquanto que o agente mais à direita continua parado (Figura 8.7c). No momento da simulação indicado pela Figura 8.7d, o agente mais a esquerda já abandonou o ambiente, o agente central já está quase na saída, mas agora o agente mais à direita também inicia sua movimentação. Por fim, na Figura 8.7e o agente central também já

abandonou o ambiente, enquanto finalmente o agente inicialmente mais a direita se aproxima da saída.

Esse grande descompasso entre os agentes nessa simulação aconteceu devido ao diferente valor do TPR previamente estabelecido de cada um, a saber:

$$\text{TPR}_{ae} \ll \text{TPR}_{ac} \ll \text{TPR}_{ad} \quad (8.1)$$

Onde

TPR_{ae} é o tempo de pré reação para o agente inicialmente à esquerda;

TPR_{ac} é o tempo de pré reação para o agente inicialmente central; e

TPR_{ad} é o tempo de pré reação para o agente inicialmente mais à direita.

Assim, nesse ensaio se demonstrou que o TPR pode ser no programa Fuga livremente escolhido para cada agente. Entretanto, sempre que em qualquer simulação o TPR não estiver claramente previamente identificado, o mesmo deve ser considerado como sendo nulo para todos os agentes.

8.2.6 Verificação da Velocidade de Deslocamento em Grupo

Essa é uma análise também requerida pelo protocolo NIST, onde são sugeridas várias análises distintas nas mais diversas situações de movimentação para se verificar o efeito das pessoas entre si sobre a velocidade de deslocamento. Para isso, nesse ensaio realizaram-se simulações do abandono de um ambiente formado por um corredor reto de 40 m de comprimento e 4 m de largura, onde a saída se encontra somente em um dos lados do corredor. As simulações são realizadas para populações iniciais de 1, 10, 50, 100, 500, 750 e 1000 agentes. Foram consideradas simulações com todos os agentes tanto se deslocando na velocidade fixa de 1 m/s ou na velocidade variável, em função do agente à frente, mas máxima de 1 m/s.

O posicionamento inicial dos agentes é aleatório a cada simulação, mas todos inicialmente voltados de frente para a saída. Para se evitar o efeito da possibilidade de todos os agentes ficarem inicialmente mais próximos à saída (particularmente

mais relevante nas simulações com menos agentes), sempre em cada simulação pelo menos um agente estará posicionado no centro do corredor no ponto oposto à saída. Na Figura 8.8 se apresenta a imagem inicial das simulações. Os tempos totais de evacuação obtidos estão indicados na Tabela 8.4.

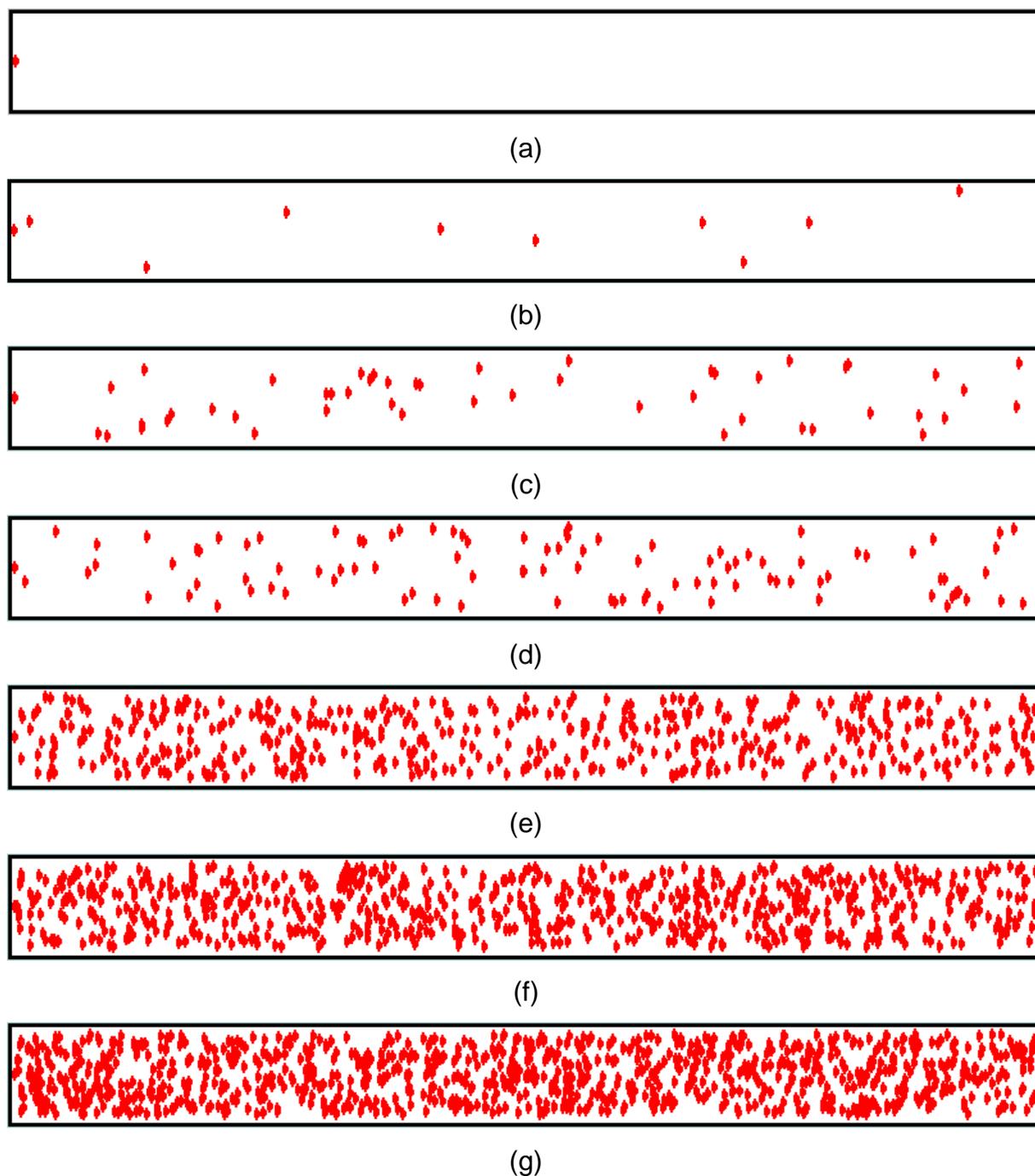


Figura 8.8: Imagens da disposição inicial da simulação do abandono de um corredor de 40 m de comprimento por 4 m de largura, por 1, 10, 50, 100, 500, 750 e 1000 agentes, respectivamente as imagens (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g).

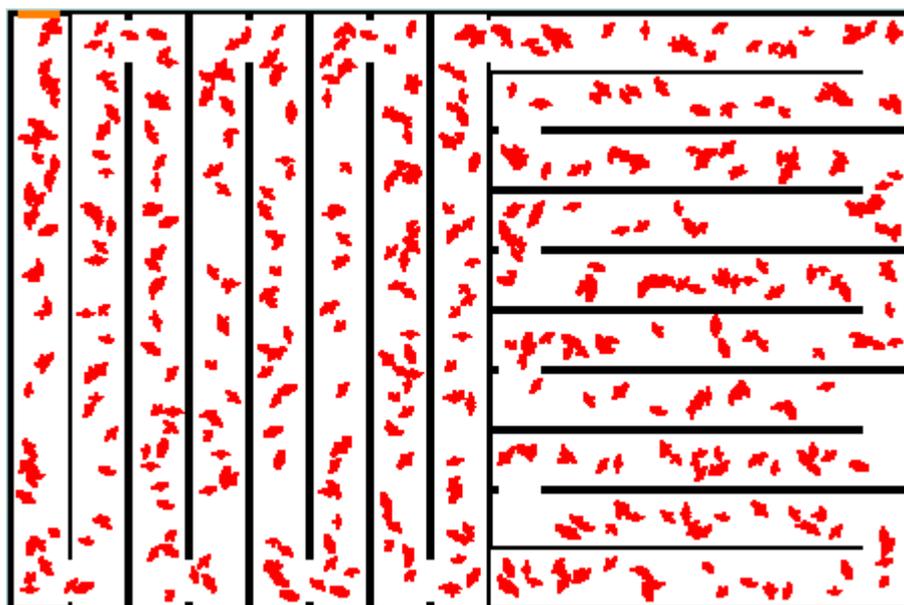
Tabela 8.4: Tempos totais de evacuação obtidos para o abandono do ambiente corredor de 40 m de comprimento e 4 m de largura para diversas populações (Figura 8.8).

		População (agentes)						
		1	10	50	100	500	750	1000
Densidade populacional inicial (pessoa/m ²)		0,01	0,06	0,31	0,63	3,13	4,69	6,25
Vel. Máx. fixa	Tempo total de evacuação (s)	40	40	40,4	40,7	43,8	53,8	67,5
	Velocidade média (m/s)	1,0	1,0	0,99	0,98	0,91	0,74	0,59
Vel. variável	Tempo total de evacuação (s)	40	40	41,0	44,9	125,4	156,0	209,7
	Velocidade média (m/s)	1,0	1,0	0,98	0,89	0,32	0,26	0,19

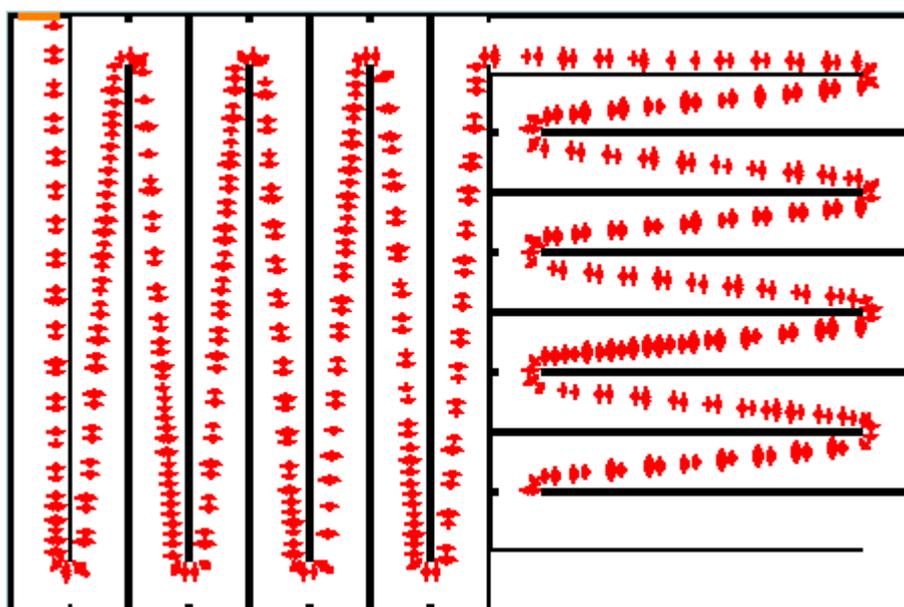
Conforme apresentado, para baixas populações o tempo de evacuação foi coerente com a velocidade de deslocamento pré-estabelecida. Entretanto, para populações maiores, houve um significativo aumento no tempo total de evacuação (ou redução na velocidade média de deslocamento). A manutenção da velocidade de deslocamento para baixas populações é um ponto positivo, indicando que não houve erros na representação da velocidade pela modelagem, e a redução da velocidade em maiores densidades é coerente com o modelo, dado a influência dos agentes entre si.

8.2.7 Verificação do Contorno de Objetos Durante a Movimentação

Para se realizar a verificação do comportamento dos agentes durante o contorno de objetos fixos (um quina de parede, por exemplo), gerou-se um ambiente formado por múltiplos corredores em ziguezague. O objetivo é verificar qualitativamente eventuais incoerências no perfil de deslocamento e/ou conflitos com as paredes. Na Figura 8.9 se apresentam a imagem inicial de uma simulação de abandono desse ambiente e também uma imagem retirada durante a simulação, assim como recortes de alguns pontos selecionados para se ilustrar o efetivo comportamento dos agentes.



(a)



(b)



(c)

Figura 8.9: Imagens da simulação do abandono de 500 pessoas em ambiente com múltiplos corredores em ziguezague. Em (a) na posição inicial, em (b) em um momento durante o abandono, e em (c) recortes de imagens selecionadas de (b). Saídas em laranja.

Nota-se que os agentes se ordenaram rumo à saída, seguindo a rota de menor distância. Percebe-se também pelas imagens a inexistência de conflitos físicos (interpenetração) dos agentes entre si e com as paredes, e que o contorno das quinas é realizado sem maiores problemas ou dificuldades, sendo os agentes capazes de realizar o seu giro no ambiente (rotação) com seu consequente redirecionamento.

8.2.8 Verificação da Seleção e Uso da Saída

Esse tipo de teste também é recomendado pelo protocolo NIST, apesar de não se aplicar a maioria dos modelos. No caso do programa Fuga, cada agente sempre vai se direcionar para a saída previamente estabelecida, em detrimento das demais, mesmo que sejam mais vantajosas. Esse é um comportamento já estabelecido desde a concepção do programa. Entretanto, apenas para se ilustrar essa particularidade, são realizadas simulações onde os agentes, mesmo estando próximos de uma saída, vão desprezá-la e buscar uma outra saída mais distante, mas que foi previamente estabelecida como sendo o objetivo a ser alcançado para aquele agente.

A Figura 8.10 ilustra essas simulações. Na Figura 8.10a tem-se o ambiente utilizado, que possui formato quadrado de 20 m de lado com duas saídas em lados opostos e onde 200 agentes estão inicialmente distribuídos aleatoriamente ao longo do ambiente. Já as Figuras 8.10(b-c-d) foram obtidas durante três distintas simulações do abandono desse ambiente. Na simulação ilustrada pela Figura 8.10b, os agentes se direcionam para a saída mais vantajosa para cada um deles (a localizada mais perto). Na simulação ilustrada pela Figura 8.10c, os agentes se direcionam somente para uma das saídas (no caso, em uma vista de topo, a saída acima), desprezando a outra mesmo que essa seja vantajosa para muitos deles. Por fim, na Figura 8.10d, os agentes já se direcionam para a outra saída (no caso, em uma vista de topo, a saída abaixo), similarmente à simulação representada na Figura 8.10c, desprezando a outra saída, mesmo que ela seja mais vantajosa.

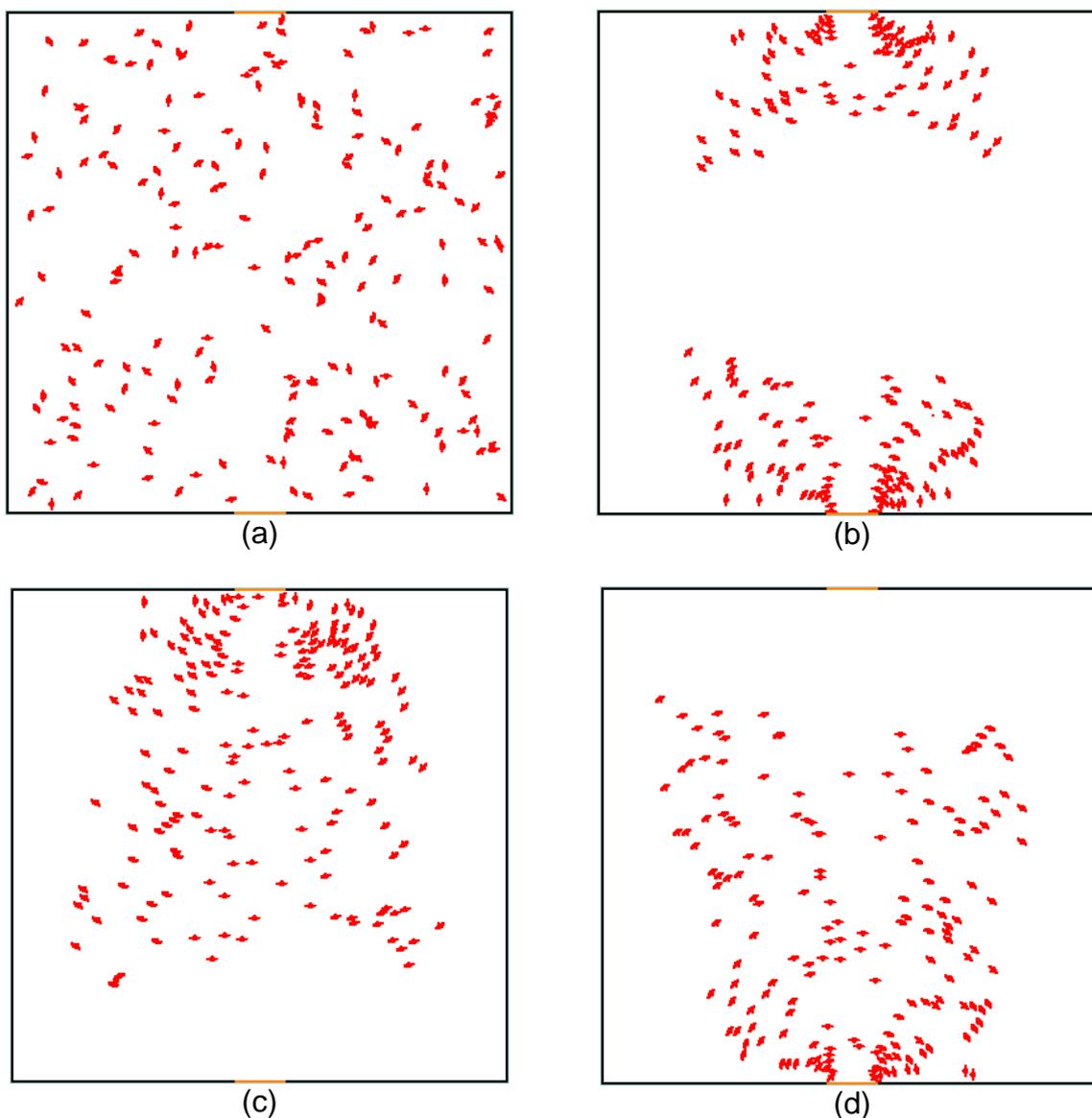


Figura 8.10: Imagens da simulação do abandono de 200 pessoas em ambiente quadrado (20 m de lado) com duas saídas em lados opostos (em laranja). Em (a) em uma posição aleatória inicial, em (b), (c) e (d) em momentos equivalentes em simulações distintas (respectivamente agentes buscando a saída mais próxima, a saída acima e a saída abaixo – vista de topo).

Isso foi possível, pois o programa Fuga gera automaticamente três diferentes matrizes com rotas preferenciais. Em cada simulação os agentes utilizaram como referência apenas uma destas diferentes matrizes de rotas preferenciais, desprezando as outras, tendo, portanto, objetivos diferenciados a serem alcançados.

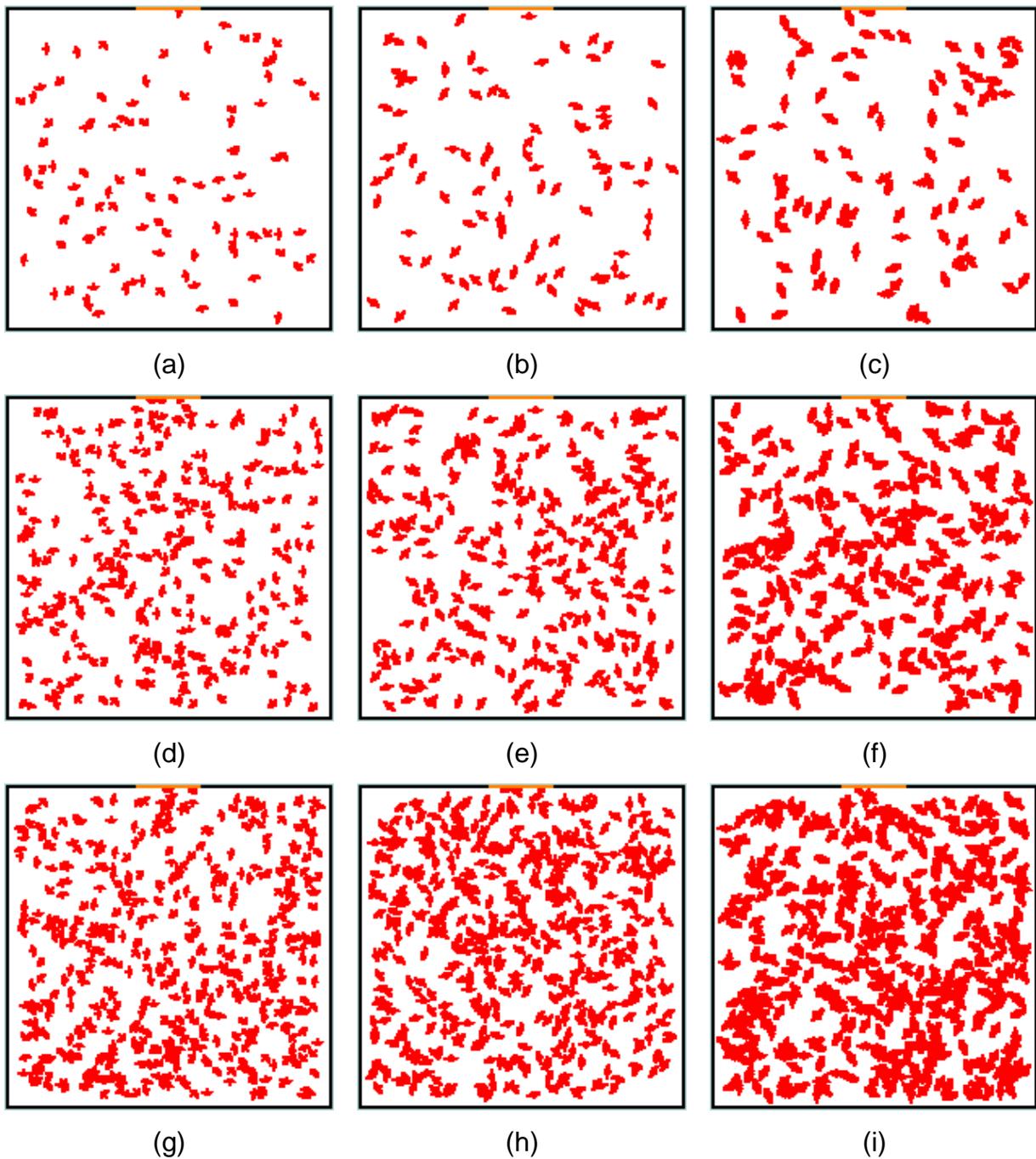
8.3 Verificação de Efeitos Estocásticos

A lógica do modelo ora desenvolvido é determinística, mas muitas grandezas de entrada podem conter componentes aleatórias. Associe-se isso ao grande número de agentes e suas várias relações, e os resultados específicos de uma simulação dificilmente podem ser exatamente previstos. Assim, torna-se necessário um estudo para se verificar, pelo menos de modo geral, alguns dos impactos dessa *praxis* estocástica das simulações.

O conjunto de ensaios será realizado em um ambiente quadrado com 10 m de lado e uma única saída no centro de um dos lados. São consideradas saídas de 2, 4 e 8 m e populações de 100, 300 e 500 agentes. Nesse primeiro conjunto de ensaios, todos os agentes são de tamanho pequeno (Seção 5.1), com velocidade máxima de 1,5 m/s. Posteriormente, esses ensaios são repetidos com agentes do tamanho médio, grande e aleatório.

Terminada essa etapa, os ensaios para os agentes de tamanho médio e velocidade máxima de 1,5 m/s são repetidos (todas as saídas e populações), com os agentes também posicionados aleatoriamente, mas já no direcionamento ideal. E, finalizando, é realizada uma nova sequência de simulações dos agentes de tamanho médio, com posicionamento e orientação aleatórios, considerando todas as larguras de saídas e populações, mas com a velocidade máxima de cada agente variando aleatoriamente entre 1 e 2 m/s.

Independente da configuração, todas as simulações foram repetidas dez vezes. Nas Figuras 8.11 e 8.12 apresentam-se imagens para ilustrar algumas dessas simulações em seu estado inicial, e nas Tabelas 8.5, 8.6, 8.7 e 8.8 apresentam-se os tempos totais de evacuação e desvio padrão para todas as configurações de simulações efetuadas. A Figura 8.13 contribui no entendimento da Tabela 8.5.



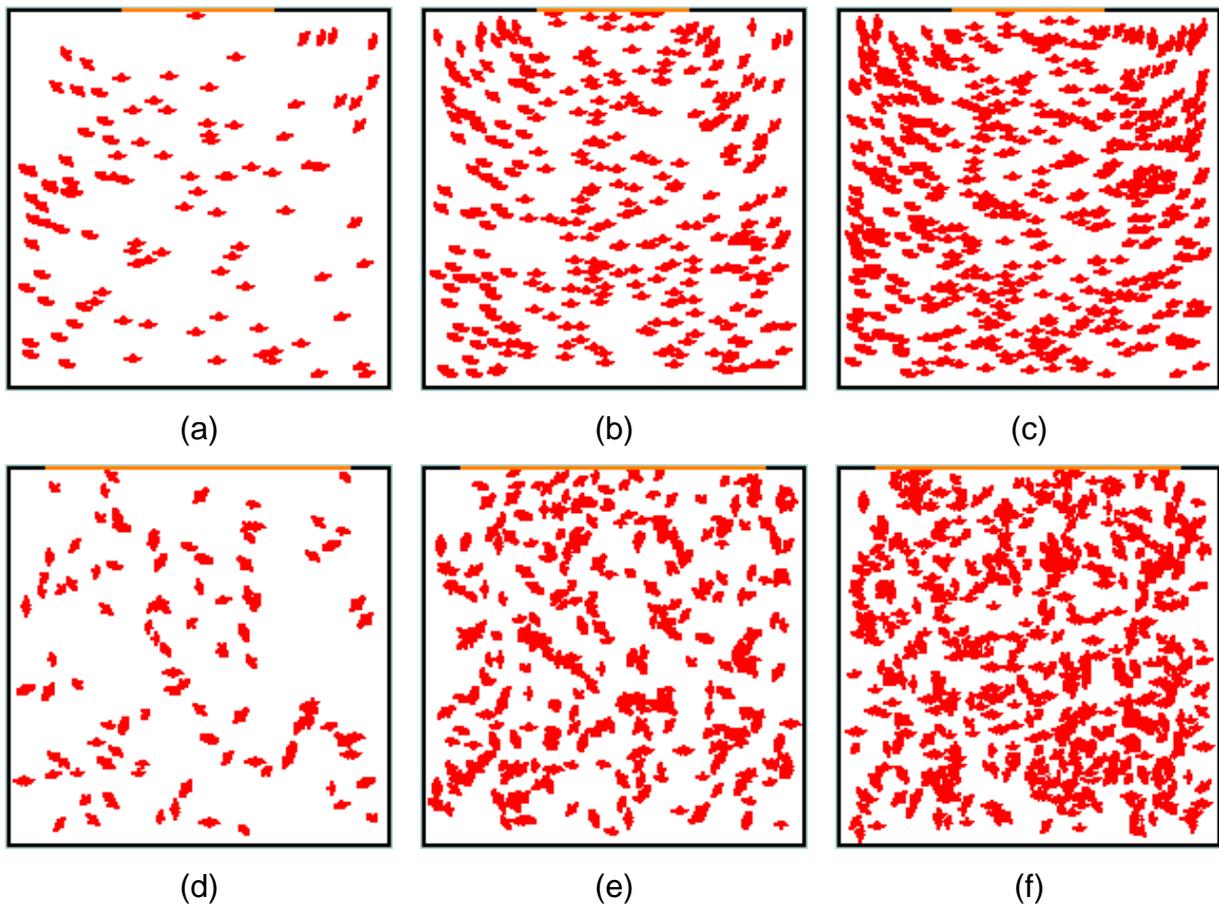
Legenda:

Tamanho dos agentes: (a), (d) e (g) pequenos; (b), (e) e (h) médios; e (c), (f) e (i) grandes.

Número de agentes: (a), (b) e (c) 100; (d), (e) e (f) 300; e (g), (h) e (i) 500.

Saída com largura de 2 m (em laranja), agentes com posicionamento e orientação aleatórias.

Figura 8.11: Imagens do instante inicial de algumas das simulações de abandono do ambiente quadrado com uma saída no centro de um dos lados.



Legenda:

Largura das saídas: (a), (b) e (c) 4 m; (d), (e) e (f) 8 m.

Orientação dos agentes: (a), (b) e (c) ideal; (d), (e) e (f) aleatória.

Número de agentes: (a) e (d) 100; (b) e (e) 300; e (c) e (h) 500.

Tamanho dos agentes: (a), (b) e (c) médio; (d), (e) e (f) aleatórios.

Agentes com posicionamento aleatório.

Figura 8.12: Imagens complementares do instante inicial de algumas das simulações de abandono do ambiente quadrado com uma saída (em laranja) no centro de um dos lados.

Tabela 8.5: Valores do tempo total de escapes obtidos com a variação da largura da saída, da população e do tipo do agente (velocidade máxima de 1,5 m/s e orientação inicial aleatória).

Largura da saída (m)	População	Tipo agente	Vel. máxima (m/s)	Orientação	Tempo total escape (s)
2	100	pequeno	1,5	aleatória	29,0 ± 1,4
2	300	pequeno	1,5	aleatória	77,6 ± 2,4
2	500	pequeno	1,5	aleatória	134,1 ± 3,5
4	100	pequeno	1,5	aleatória	20,3 ± 1,8
4	300	pequeno	1,5	aleatória	56,2 ± 2,4
4	500	pequeno	1,5	aleatória	96,1 ± 3,9
8	100	pequeno	1,5	aleatória	10,9 ± 1,1
8	300	pequeno	1,5	aleatória	19,2 ± 1,0
8	500	pequeno	1,5	aleatória	26,8 ± 2,0
2	100	médio	1,5	aleatória	31,8 ± 1,9
2	300	médio	1,5	aleatória	92,8 ± 8,4
2	500	médio	1,5	aleatória	145,0 ± 6,1
4	100	médio	1,5	aleatória	22,6 ± 2,1
4	300	médio	1,5	aleatória	64,2 ± 3,2
4	500	médio	1,5	aleatória	104,0 ± 7,2
8	100	médio	1,5	aleatória	13,3 ± 2,1
8	300	médio	1,5	aleatória	23,2 ± 1,4
8	500	médio	1,5	aleatória	35,8 ± 3,1
2	100	grande	1,5	aleatória	36,2 ± 1,6
2	300	grande	1,5	aleatória	102,5 ± 4,3
2	500	grande	1,5	aleatória	171,9 ± 4,7
4	100	grande	1,5	aleatória	26,4 ± 2,4
4	300	grande	1,5	aleatória	77,7 ± 0,9
4	500	grande	1,5	aleatória	125,0 ± 3,9
8	100	grande	1,5	aleatória	13,6 ± 1,2
8	300	grande	1,5	aleatória	29,2 ± 2,6
8	500	grande	1,5	aleatória	44,0 ± 0,9

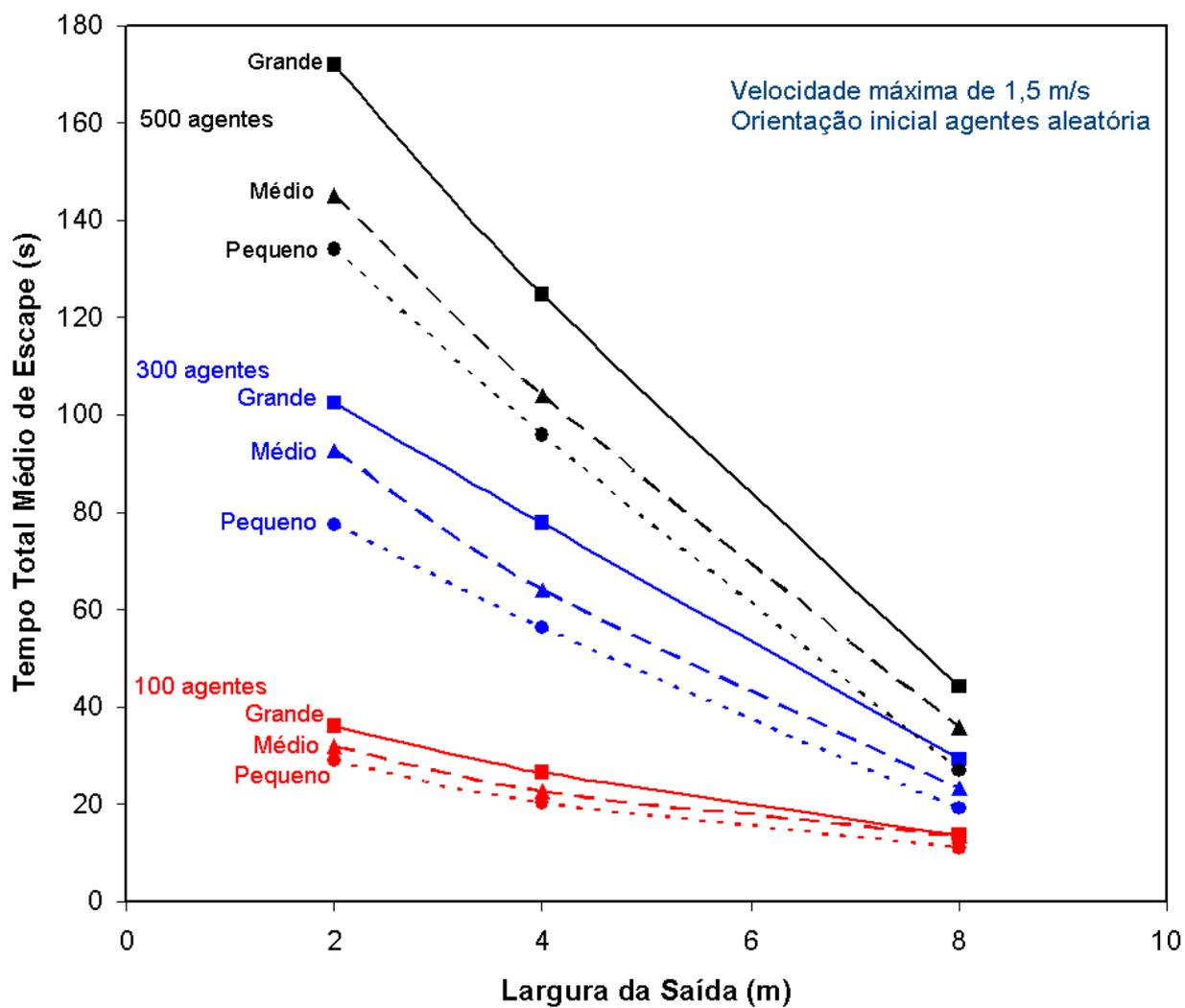


Figura 8.13: Gráfico com o valor do tempo total médio de escape obtido em função da largura da saída, da população e do tipo do agente (ver Tabela 8.5).

Tabela 8.6: Valores do tempo total de escapes obtidos com a variação da largura da saída e da população (tipo de agente médio, velocidade máxima de 1,5 m/s e orientação inicial ideal).

Largura da saída (m)	População	Tipo agente	Vel. máxima (m/s)	Orientação	Tempo total escape (s)
2	100	médio	1,5	ideal	30,9 ± 1,7
2	300	médio	1,5	ideal	90,1 ± 3,1
2	500	médio	1,5	ideal	142,8 ± 4,8
4	100	médio	1,5	ideal	23,0 ± 1,6
4	300	médio	1,5	ideal	64,7 ± 2,3
4	500	médio	1,5	ideal	108,7 ± 3,1
8	100	médio	1,5	ideal	13,0 ± 1,4
8	300	médio	1,5	ideal	23,8 ± 2,0
8	500	médio	1,5	ideal	35,4 ± 1,3

Tabela 8.7: Valores do tempo total de escapes obtidos com a variação da largura da saída e da população (tipo de agente médio, velocidade máxima aleatória e orientação inicial aleatória).

Largura da saída (m)	População	Tipo agente	Vel. máxima (m/s)	Orientação	Tempo total escape (s)
2	100	médio	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	36,9 ± 2,0
2	300	médio	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	98,6 ± 4,2
2	500	médio	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	156,1 ± 2,7
4	100	médio	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	23,9 ± 2,6
4	300	médio	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	73,4 ± 4,3
4	500	médio	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	117,8 ± 3,
8	100	médio	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	14,3 ± 1,8
8	300	médio	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	27,4 ± 1,8
8	500	médio	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	41,1 ± 0,2

Tabela 8.8: Valores do tempo total de escapes obtidos com a variação da largura da saída e da população (tipo de agente aleatório, velocidade máxima aleatória e orientação inicial aleatória).

Largura da saída (m)	População	Tipo agente	Vel. máxima (m/s)	Orientação	Tempo total escape (s)
2	100	aleatório	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	32,9 ± 0,5
2	300	aleatório	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	95,7 ± 4,1
2	500	aleatório	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	160,7 ± 8,5
4	100	aleatório	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	27,3 ± 2,6
4	300	aleatório	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	74,5 ± 5,7
4	500	aleatório	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	120,9 ± 7,7
8	100	aleatório	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	14,1 ± 2,2
8	300	aleatório	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	27,7 ± 1,9
8	500	aleatório	Aleatória entre 1 e 2	aleatória	39,5 ± 3,5

Pela análise das Tabelas 8.5 a 8.8, verifica-se que:

- considerando todas as simulações, obteve-se um desvio padrão médio de 4,7% no valor do tempo total de escape dos cenários;
- quanto menor a população e maior a largura da saída, maior o desvio padrão na determinação do tempo máximo de escape;
- para determinada configuração, o tempo de escape é proporcional à população do ambiente;
- considerando uma determinada velocidade máxima comum a todos, quanto maior o tamanho do agente maior será o tempo de escape nos cenários observados. A diferença é tanto maior quanto maior for a população;

- nesses ensaios, nenhuma diferença significativa dos tempos máximos de escape em função da orientação inicial foi verificada (diferenças dentro do intervalo dos desvios padrões);
- considerar uma velocidade máxima de valor médio de 1,5 m/s em agentes de tamanho médio, mas cujas velocidades individuais dos agentes variem entre 1 e 2 m/s, propicia um tempo de escape maior do que o obtido com uma velocidade máxima também de 1,5 m/s em agentes de tamanho médio, mas fixa para todos os agentes. Isso parece indicar que os agentes mais lentos acabam criando um efeito retardante extra;
- considerar, também, uma velocidade máxima de valor médio de 1,5 m/s, mas cujos agentes também tem tamanho variável, não propiciou uma alteração extra significativa no tempo de escape em relação à essa mesma distribuição de velocidades mas com agentes de tamanho médio.

9 APLICAÇÃO PRÁTICA – ESTUDO DO CASO DA BOATE KISS

9.1 Detalhamento do Ambiente

Neste momento, com o modelo implementado e verificado, uma infinidade de importantes aplicações práticas podem ser realizadas. Entretanto, para se ilustrar seu uso, selecionou-se o estudo de um caso que pelas suas dimensões causou grande comoção nacional, já anteriormente brevemente tratado (Capítulo 1), a tragédia da Boate Kiss (SILVA et al., 2013; BRONDANI et al., 2016; BRAGA, MOITA, 2017). Esse tipo de ocupação, independentemente dessa tragédia, pode ser considerado como crítico em termos de segurança (DUVAL, 2006).

Para auxiliar na visualização do ambiente, apresenta-se na Figura 9.1 uma visão em perspectiva da boate, e na Figura 9.2 uma vista estilizada de topo da Boate Kiss, com diversas imagens complementares obtidas de vários pontos de observação.



Figura 9.1: Imagem em perspectiva da Boate Kiss.

Fonte: IGP-RS (LUIZ, 2015).



Figura 9.2: Planta de topo estilizada da Boate Kiss (sem escala), complementada por diversas imagens obtidas de vários pontos de observação.

Fonte: adaptado de Braga e Moita (2017).

Todas as imagens complementares da Figura 9.2 foram obtidas após a tragédia, exceto pela Figura 9.2(a) tirada antes. Essa Figura 9.2(a) apresenta uma enorme fila

de pessoas do lado de fora da boate esperando para entrar na mesma, ilustrando como o local era popular. A Figura 9.2(b) apresenta imagens das portas intermediárias vistas de fora. A Figura 9.2(c) mostra vários jovens civis que mesmo após terem saído do ambiente, de forma voluntária e com muitos poucos e improvisados recursos, se revezaram na tentativa de se quebrar a parede externa da boate e assim se criarem rotas alternativas de abandono. Infelizmente, ninguém foi salvo por esse procedimento.

A Figura 9.2(d) apresenta, novamente, as portas intermediárias, vistas de dentro, mas sem as barras incluídas no leiaute pelos proprietários do estabelecimento, pois essas barras foram, apesar de estarem firmemente afixadas ao chão, arrancadas do seu local pela multidão em fuga. Além disso, uma das folhas da porta intermediária interna estava fechada no momento da tragédia. A Figura 9.2(e) apresenta o caminho seguido, intencionalmente ou não, por muitos dos ocupantes rumo aos banheiros, mesmo estando essas pessoas praticamente de frente para a saída. Isso pode ter acontecido porque na escuridão da boate causada pela fumaça, algumas luzes vindas dos banheiros ficaram visíveis e chamaram a atenção (cerca de 180 corpos foram retirados dos banheiros e arredores).

A Figura 9.2(f) mostra uma imagem interna do banheiro masculino, onde grande quantidade de corpos foram encontrados (não havia nenhuma janela ou abertura adicional nos banheiros). A Figura 9.2(g) apresenta o palco secundário, onde é possível visualizar que não foi atingido pelo fogo (esse foi um incêndio pobre em oxigênio e o *flashover*¹⁶ não chegou a acontecer). As Figuras 9.2(h-i-j) apresentam algumas imagens do salão intermediário. A Figura 9.2(k) apresenta o palco principal, onde o incêndio começou (tudo neste palco foi destruído). A Figura 9.2(l) mostra o bar interno na frente do palco principal, e a Figura 9.1(m) uma imagem da parte interna do mezanino.

¹⁶ *Flashover* é o fenômeno da “inflamação generalizada de propagação rápida, que, devido a capa de gás aquecido que se forma junto ao teto durante a fase de crescimento do fogo, irradia calor para os materiais combustíveis localizados longe da origem do fogo, aquecendo-os e produzindo a pirólise, que gera gases combustíveis que se aquecem até a temperatura de ignição e se inflamam, ficando toda a área envolvida em chamas simultaneamente.” (BRENTANO, 2010, p. 91).

A Figura 9.2(n) apresenta parte da rota para a saída localizada do lado do mezanino, e a Figura 9.2(o) a saída para a área de entrada localizada logo após o caixa onde são feitos os pagamentos das comandas. A Figura 9.2(p) apresenta imagem do teto de um segundo mezanino localizado logo acima do caixa, onde se pode notar que o teto foi totalmente impregnado com fuligem. Ainda, a Figura 9.2(q) mostra uma visão aérea da boate, onde três áreas escuras podem ser vistas. Duas dessas áreas são relativas às fontes primária e secundária de ignição, e a terceira, perto da Rua Andradas, indica o ponto onde houve grande concentração de gases quentes (esses gases seguiram a rota de saída, e subiram para o mezanino superior, devido à inexistência de caminhos alternativos de escape para os mesmos).

Por fim, na Figura 9.2 existem três setas vermelhas na região da saída. Essas três setas indicam os pontos de abandono mais críticos, considerando o leiaute real da boate antes da tragédia. Esses são os elementos que realmente controlam e limitam o fluxo de pessoas, pelo menos num primeiro momento após o início da tragédia. Para uma melhor visualização, na Figura 9.3 essa região da entrada da boate se apresenta mais bem destacada.

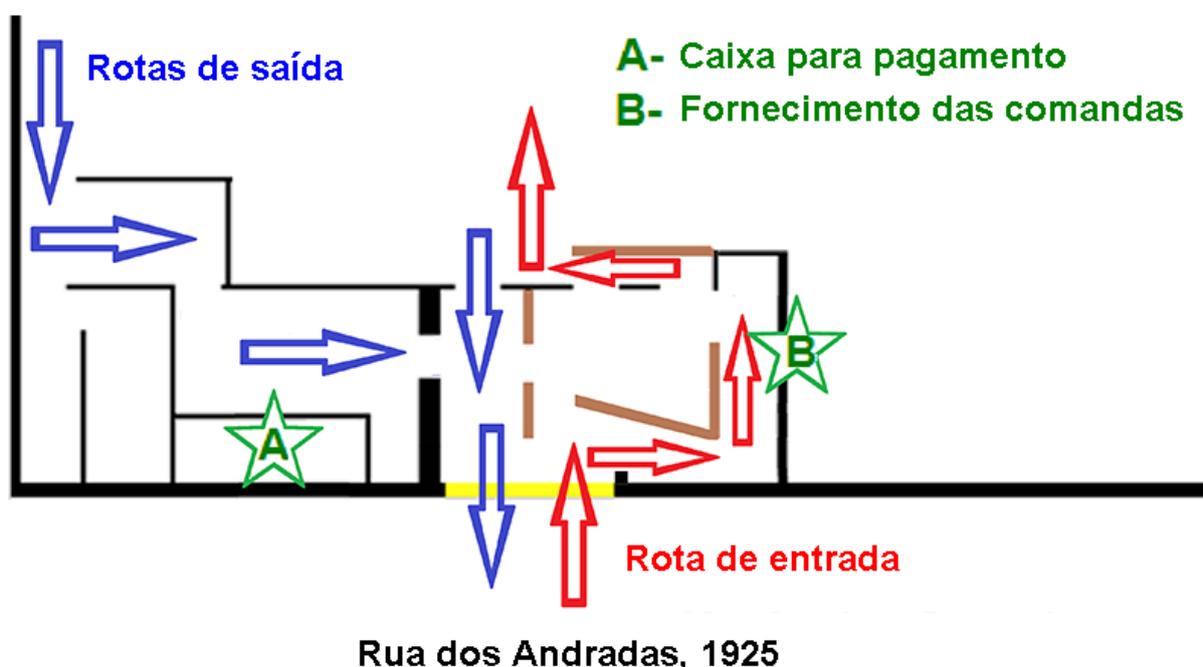


Figura 9.3: Representação esquemática da região de entrada e saída da Boate Kiss (paredes e portas fechadas em preto, barras em marrom e saída em amarelo).

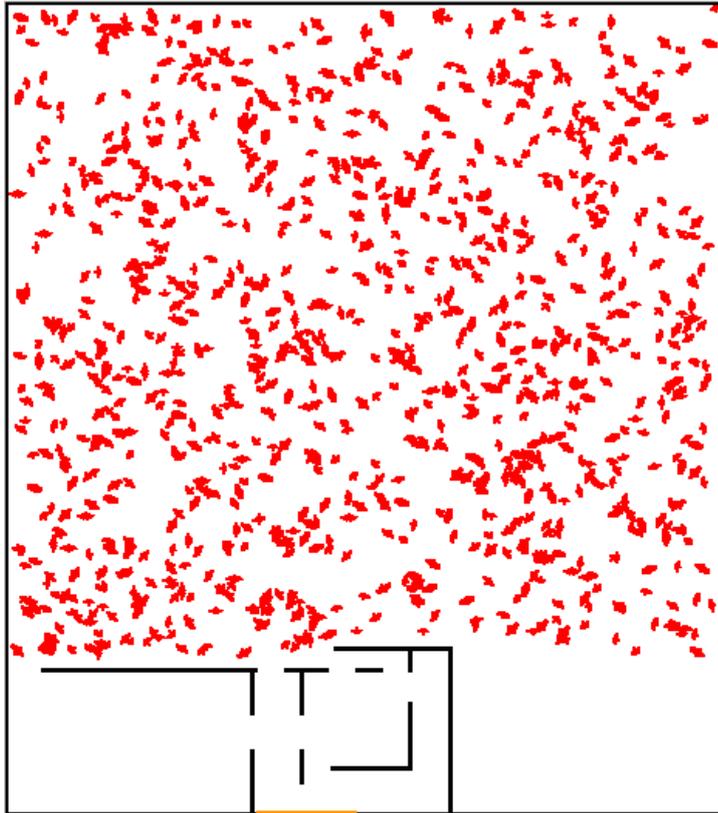
Na Figura 9.3, as setas em vermelho indicam a rota de entrada e as setas em azul as rotas de saída. Pelas setas em vermelho, pode-se observar que as pessoas eram, ao entrar na boate, uma a uma direcionadas pelas barras, a seguir rumo ao balcão, onde receberiam a comanda no qual todo o consumo realizado no estabelecimento seria registrado. Já para sair, existem duas rotas. A rota em azul mais a esquerda é para a saída em definitivo, quando as pessoas passariam obrigatoriamente pelo caixa onde fariam o devido acerto da comanda. A rota em azul mais a direita era somente para casos especiais, tais como para a saída de funcionários ou de pessoas rumo ao fumódromo (improvisado sobre o passeio exterior). Todo esse processo de entrada e saída era devidamente acompanhado e assistido por funcionários orientados a o manter em devido funcionamento, visando o controle tanto do acesso ao estabelecimento como do pagamento das comandas.

9.2 Simulações

Dentro do programa Fuga, ambientes simplificados da Boate Kiss foram gerados e diversas simulações realizadas. Em todas as simulações, o *EE* – Efeito Estresse considerado será de 1 (muito alto estresse) para todos os agentes, e sempre haverá um agente posicionado no ponto mais distante da saída no início. Inicialmente, foi simulada uma evacuação completa da boate por 1000 agentes (população plausível de ter realmente estado na boate no momento da tragédia), de tamanhos (pequeno, médio e grande), posicionamentos e orientações iniciais aleatórios, mas todos estando após a área de entrada. As obstruções causada pelos diversos obstáculos da área de entrada ou saída foram consideradas.

A Figura 9.4 ilustra essas simulações, onde em (a) se tem uma imagem do ambiente no instante inicial da simulação, e em (b) em um momento intermediário. Nota-se, na Figura 9.4(b), a formação de dois fluxos distintos de escoamento (setas azuis), onde somente um agente em cada passagem efetivamente consegue seguir para a saída (apenas eventualmente dois agentes conseguem seguir em paralelo no fluxo mais à esquerda). Todo o restante da população tende a se concentrar no início dessas rotas de encaminhamento, que se tornam, assim, perigosos pontos de congestionamento.

(a)



(b)

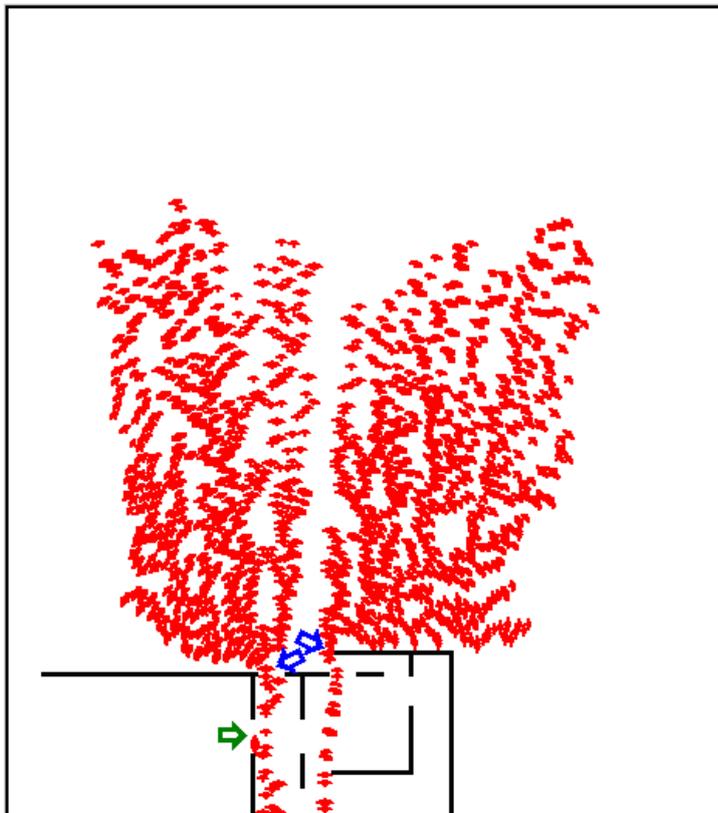


Figura 9.4: Ambiente simplificado da Boate Kiss. Em (a) no instante inicial da simulação (1000 agentes), e em (b) ilustrando um momento intermediário da simulação.

Adicionalmente, ainda na Figura 9.4(b), nota-se que a rota de encaminhamento que vem da área do setor do caixa de pagamento (seta verde) foi subutilizada. Assim, considerando de modo prático que no máximo três pessoas conseguem sair ao mesmo tempo da boate, tem-se que a efetiva largura funcional da saída de emergência nesta configuração é de apenas 3 UP – Unidade de Passagem¹⁷, ou seja, de 1,65 m. Nesse cenário, o tempo total de evacuação obtido na simulação foi de 416 s. Esse tempo pode ser inclusive superior ao tempo usual para ocorrência do ponto de queima generalizada (*flashover*), que é tipicamente curto (POON, 1988; CBMGO, 2014).

Certamente em uma situação de comportamento não adaptativo¹⁸ (PAN et al., 2007) ou impaciente (IBRAHIM et al., 2017), como a que efetivamente aconteceu, uma tragédia se daria, pois absolutamente não há nenhuma condição das pessoas esperarem tranquilamente a liberação de espaço para fuga. Esse real tamanho da largura da rota de saída de 1,65 m é muito menor que o calculado como sendo o mínimo legalmente requerido pela ABNT 9077, que é de 4,4 m (ou 8 UP).

Adicionalmente, foram realizadas outras simulações com o programa Fuga visando se determinar qual a efetiva largura de saída de emergência necessária para que a tragédia não acontecesse naquela magnitude, ou seja, $ASET > RSET$ ¹⁹. A largura da saída considerada irá variar entre 1,65 m a 23 m (Figura 9.5). Ainda, assim como na simulação anterior, nesse novo experimento serão também 1000 agentes com posicionamento e orientação aleatórios, mas sempre posicionados atrás da área de entrada, com velocidade máxima de 1,5 m/s. Como o objetivo é determinar a influência da largura de uma saída de emergência hipotética, nenhuma espécie de obstrução interna será considerada no ambiente, para que essa obstrução interna não afete as simulações. Os resultados obtidos estão na Tabela 9.1.

¹⁷ Conforme ABNT 9077, 1 UP equivale a 0,55 m.

¹⁸ Quando a multidão se comporta aparentemente de modo confuso e desorganizado.

¹⁹ ASET - *Available Safe Egress Time* e RSET - *Required Safe Egress Time* (KINATEDER et al., 2015).

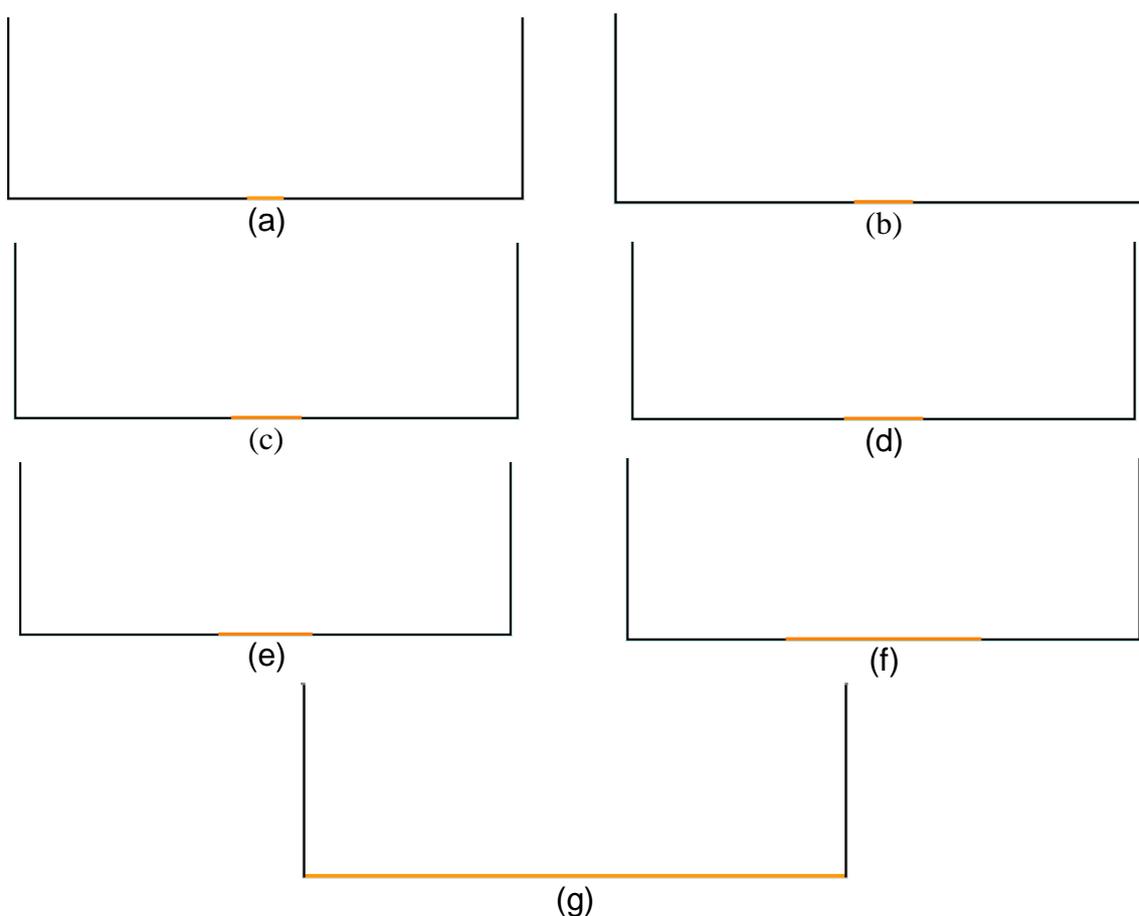


Figura 9.5: Imagens de parte da frente do ambiente, que fica para a Rua Andradas, com as diversas saídas consideradas (em laranja). Em (a) 1,65 m, em (b) 2,50 m, em (c) 3,2 m, em (d) 3,6 m, em (e) 4,4 m, em (f) 8,8 m, e em (g) 23 m.

Tabela 9.1: Tempo total de abandono para diversas larguras de saídas de emergência para o ambiente da Boate Kiss sem obstruções internas.

Largura da saída (m)	Tempo total de abandono (s)
1,65	423,3
2,5	313,4
3,2	244,4
3,6	218,3
4,4	180,5
8,8	89,2
23	37,1

Dessa forma, conforme as simulações, para que o tempo de abandono seja pelo menos similar ao ASET, estimado em 90 s (BRAGA, MOITA, 2017), seria necessária uma saída de emergência de pelo ao menos 8,8 m, ou seja, o dobro da largura prescrita pela ABNT 9077. Em relação ao ambiente da Boate Kiss, verifica-se, portanto, que a largura de saída prescrita pela ABNT 9077 é insuficiente para se garantir uma saída segura para os seus ocupantes numa evacuação nas condições da tragédia. Porém, ressalta-se que as alterações provocadas no leiaute da região de entrada da boate agravaram ainda mais a situação.

Portanto, apresentou-se uma aplicação prática de grande relevância, onde tanto o ambiente real simplificado quanto o ambiente modificado foram simulados, trazendo informações importantes para uma melhor compreensão da tragédia e assim facilitar a prevenção de outras similares.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do corpo desse trabalho diversas discussões e considerações já foram sistematicamente realizadas em todos os capítulos. Em relação ao questionamento feito quando da caracterização do problema (Seção 1.2), verificou-se que o dimensionamento das saídas de emergência é de suma importância no projeto de um ambiente. Uma saída de emergência mal dimensionada ou inadequadamente localizada pode isoladamente tornar o ambiente perigoso.

Entretanto, verificou-se que, apesar da sua importância, somente as saídas de emergência não são capazes de isoladamente dar toda a segurança a um ambiente. A adoção de medidas complementares de segurança no planejamento global é de extrema relevância, como, por exemplo, o rigoroso controle da densidade populacional, o controle dos materiais de acabamento, e a existência de mecanismos eficientes para exaustão da fumaça, onde aplicáveis.

Ainda sobre o questionamento inicial, se um modelo é capaz de auxiliar o projetista na concepção de ambientes construídos mais seguros, responde-se que sim, tal modelo implementado na forma de um programa computacional é capaz de servir como uma eficiente ferramenta de suporte ao projeto arquitetônico, desde que devidamente planejado e empregado.

Adicionalmente, ressalta-se que todos os objetivos específicos inicialmente propostos também foram formalmente atingidos, conforme a seguir:

10.1 Cumprimento dos Objetivos Específicos

A fundamentação teórica conceitual sobre a aplicação da ergonomia como sendo um paradigma relevante para estudos relacionados à movimentação humana e sua natureza complexa foi devidamente realizada (Seção 2.1), inclusive resultando em uma publicação específica para essa descrição (BRAGA et al., 2017b).

Foram devidamente implementados computacionalmente e detalhados os algoritmos de busca e exploração que realizam pesquisa sobre a primeira vizinhança de Von Neumann e Moore (Seção 3.2), como descrito em Braga et al. (2016c).

Foi desenvolvido, implementado computacionalmente e detalhado um algoritmo de busca e exploração, denominado de Busca Referenciada – BR, cujos resultados qualitativos e quantitativos demonstraram-se de qualidade superior dos demais algoritmos tratados (VVN e VM), colocando-o como sendo o estado da arte dessa área do conhecimento (Seção 3.3), inclusive resultando em uma publicação específica para sua descrição (BRAGA et al., 2016a).

Os algoritmos de busca e exploração foram expandidos de forma a operarem em ambiente construídos de qualquer configuração, incluindo de múltiplos andares e várias saídas, tornando a aplicação do programa de grande valor prático pela abrangência de ambientes que podem ser simulados (Capítulo 4), conforme descrito em Braga et al. (2016b; 2017a).

Uma modelagem humana ergonomicamente embasada de modo mais completo, considerando uma representação humana mais realista, com três possibilidades para o tamanho dos agentes e possibilitando sua caracterização individual, inclusive permitindo a realização de movimentos tanto de translação como de rotação no ambiente foi devidamente desenvolvida, assim como também é explicitado o modo como é realizado o efetivo tratamento da estrutura espacial híbrida (Capítulo 5). Esses resultados resultaram em uma publicação específica para sua apresentação (BRAGA et al., 2017c).

Foi devidamente desenvolvido e implementado dentro do Matlab, fazendo-se o uso das novas premissas ergonômicas modeladas, um sistema *fuzzy* que emula a tomada de decisão humana para a escolha das rotas preferenciais de movimentação rumo aos objetivos (Capítulo 6), conforme descrito em Braga et al. (2017d). Ainda, todo o conhecimento *fuzzy* previamente estabelecido no Matlab foi devidamente transferido para o corpo do programa em linguagem Python, sem ocorrer perdas na qualidade dos dados e com grande ganho de performance, resultando inclusive em uma publicação específica para seu detalhamento (BRAGA et al., 2016d).

Foi elaborado, implementado computacionalmente e detalhado o fluxograma decisório da movimentação humana, considerando tanto a lógica *fuzzy* quanto o conceito de tempo de reação humana (Capítulo 7).

O novo modelo desenvolvido (Fuga 2.0) foi também verificado e validado (Seções 8.1 a 8.3) por meio de simulações específicas visando conhecer como alguns dos principais parâmetros das simulações efetivamente se comportam, e também por meio de comparações com resultados de simulações obtidas na literatura.

O comportamento estocástico do modelo e da variação dos resultados em função de alguns parâmetros da configuração das simulações foi verificado por meio de diversas simulações em um ambiente quadrado com 10 m de lado (Seção 8.4).

Uma aplicação prática, no caso a tragédia da Boate Kiss, foi estudada de modo mais aprofundado, sendo realizado nesse ambiente algumas simulações da movimentação humana, tanto no ambiente original quanto modificado (Capítulo 9). Resultados parciais desse estudo sobre a tragédia da Boate Kiss e sua relação com a legislação brasileira foram inclusive publicados (BRAGA, MOITA, 2017).

10.2 Contribuições

Realizaram-se nesse trabalho contribuições ao estado da arte, destacando-se as seguintes:

- o detalhamento do algoritmo BR de busca e exploração, desenvolvido e implementado nesse trabalho, é inédito. Sabe-se que algoritmos com essa mesma qualidade (ou similar) já foram desenvolvidos anteriormente, mas seu detalhamento sempre foi restrito aos seus autores. Assim o desenvolvimento do algoritmo BR se deu de forma independente e autônoma, pois não há na literatura maior aprofundamento do mesmo ou de equivalente, e o seu desenvolvimento e sua livre divulgação ora realizada é uma das contribuições desse trabalho à comunidade;

- a utilização do conceito de tabela *fuzzy* na modelagem multiagente no contexto da movimentação humana visando o incremento da velocidade de tomada de decisões *fuzzy*, sem perda na qualidade das informações;
- a elaboração do referencial teórico para uma abordagem ergonômica da movimentação humana com possibilidade de surgimento de fenômenos complexos;
- o desenvolvimento de um modelo de movimentação humana com grande detalhamento, incluindo uma resolução de 5 cm na discretização dos ambientes e agentes, possibilidade de movimentação em translação e rotação, realização de tomada de decisão com lógica *fuzzy* envolvendo grandezas comportamentais, considerar o tempo de pré-reação ao movimento, se trabalhar com agentes diferenciados (tanto em relação aos seus aspectos físicos quanto comportamentais), e ainda de se modelar ambientes de qualquer geometria interna ou externa e inclusive de várias saídas, com um tratamento híbrido da estrutura espacial;
- estabelecer os desvios qualitativos e quantitativos sobre as rotas de movimentação preferencial fornecidas pela aplicação dos algoritmos de busca e exploração de Von Neumann e Moore.
- questionar de modo embasado a base legal (ABNT 9077) sobre o dimensionamento das saídas de emergência de ambientes do tipo “casa de shows” (ocupações da categoria F-6 da ABNT)

Tudo isso dito, a principal contribuição está na aplicação conjunta de todos esses conceitos de modo a se ter uma ferramenta computacional capaz de efetivamente auxiliar o projetista ou responsável para concepção ou manutenção de ambientes construídos mais seguros para seus ocupantes, servindo de complemento à aplicação direta das normas prescritivas estabelecidas.

10.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Considerando a possibilidade do uso do programa Fuga v. 2.0 nas mais diferentes situações visando auxiliar no projeto arquitetônico dos ambientes, é importante que o mesmo seja de uso mais amigável. Um ponto crítico está na transformação do projeto do ambiente construído real para sua versão matricial. Atualmente esse procedimento é todo manual e não muito intuitivo. Essas características podem dificultar a utilização do programa.

É verdade que essas são questões de caráter mais tecnológico, o modelo científico foi desenvolvido e está devidamente implementado (objetivo do trabalho). Entretanto, o ideal seria a compatibilização do programa Fuga com algum programa já estabelecido de projeto arquitetônico, como o Autocad, por exemplo. O objetivo seria fazer que o programa Fuga, módulo Fuga Grid, pudesse ler um projeto diretamente do Autocad e gerar automaticamente a versão matricial do mesmo necessária para a realização das simulações, sem nenhuma interferência humana.

Outra sugestão de melhoria futura está na interconexão desse programa com outros programas que analisam demais aspectos de uma emergência dessa natureza em um ambiente construído, como a evolução de um incêndio e da propagação da fumaça. É verdade que esse não é um objetivo simples de ser alcançado, mas é grande relevância esforços nesse sentido.

Adicionalmente, outra sugestão que merece ser destacada está relacionada ao algoritmo BR desenvolvido. Esse algoritmo possui uma qualidade que simplesmente não tem como ser aprimorada significativamente, tornando-o interessante para aplicações de alto nível. Entretanto a sua velocidade de aplicação é passível de ser muito melhorada. Assim, um novo estudo do algoritmo BR visando sugerir modificações que acelerem sua evolução sobre o ambiente, sem afetar sua qualidade, se torna também de grande relevância.

Por fim, além disso, no modelo do programa Fuga v. 2.0, existem aspectos que podem e merecem ser futuramente aprimorados, tais como:

- a possibilidade de se variar a velocidade de movimentação em função do tipo do piso;
- diferenciação da velocidade de movimentação em função do aclave (ou declive), quando os agentes se movimentarem por sobre escadas ou rampas;
- introduzir a possibilidade da realização de comunicação (troca de informações) entre os agentes;
- permitir a formação de grupos coesos;
- incorporar o uso de elevadores nas edificações;
- introdução de pessoas portadoras de necessidades especiais (cadeirantes, por exemplo);
- permitir estudos relacionados à acessibilidade dos ambientes, e
- permitir a interação com outros programas relacionados, que gerem informações complementares sobre, por exemplo, a evolução de um incêndio, da temperatura, da fumaça, da ocorrência do *flashover*, entre outros, o que possibilitaria a geração de ambientes mais realistas para as simulações.

REFERÊNCIAS

ABICALIL, F. S. **Controle com Lógica Fuzzy e Neurofuzzy aplicada à análise e programação de robôs móveis com visualização e simulação 3D**. Rio de Janeiro: UERJ, 2007, 108 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional).

ABLEY, S. **Walkability tools research: variables, collection and methodology**. Nova Zelândia: Land Transport New Zealand, 2007, 65 p.

AGUIRRE, E.; GONZÁLEZ, A. Fuzzy behaviors for mobile robot navigation: design, coordination and fusion. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 25, 2000, p. 255-289.

ALMEIDA, P. E. M.; EVSUKOFF, A. G. Sistemas Fuzzy. In: REZENDE, S. O. (coord.). **Sistemas inteligentes: Fundamentos e Aplicações**, Cap. 7, Manole, 2003, p. 169-202.

AMMERAAL, L., ZHANG, K. **Computação Gráfica para Programadores Java**. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 217p.

ANDAYESH, M.; SADEGHPOUR, F. A. Comparative Study of Different Approaches for Finding the Shortest Path on Construction Sites. **Procedia Engineering**, v. 85, 2014, p. 33–41.

ARIGONY, M. M., MEINERZ, S. L., VIANNA, M. R., ZANELLA, G. G., SOUSA, L. **Relatório Final - Inquérito Policial nº 94/2013/150501**. Santa Maria: 1ª Delegacia de Polícia de Santa Maria - RS, 22 de março de 2013, 188 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9050:2004 – Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaço e equipamentos urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 97 p.

_____. **ABNT NBR 9077:2001 – Saídas de emergência em edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001, 40 p.

AVERILL, J. D. et al. Federal Investigation of the evacuation of the World Trade Center on september 11, 2001. In: **Pedestrian and evacuation dynamics 2005**. Nova York: Springer-Verlag, 2007, 12 p.

BABRAUSKAS, V. **Performance-based building codes: what will happen to the levels of safety?** Issaquah: Fire Science and Technology, 1999, 7 p.

BANERJEE, A.; MAURYA, A. K.; LÄMMEL, G. A Review of Pedestrian Flow Characteristics and Level of Service over Different Pedestrian Facilities, **Collective Dynamics**, v. 3, 2018, 52p.

BEHM, D. G., BAMBURY, A., CAHILL, F.; POWER, K. Effect of acute static stretching on force, balance, reaction time, and movement time. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 36, n. 8, 2004, p. 1397-1402.

BIONDI NETO, L.; COELHO, P. H. G.; AMARAL, J. L. M.; MELLO, M. H. C. S. Minicurso de sistema especialista nebuloso. In: XXXVIII SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2006, Goiânia. **Anais...**, Goiânia: Editora UGF, 2006. p. 2508-2543.

BLAIR, A. J. **The effect of stair width on occupant speed and flow of high rise buildings**. Maryland: University of Maryland, 2010. 81 p. Dissertação (Master of Science).

BOCCARA, N. **Modeling complex systems**, Springer, 2004. 397 p.

BONARINI, A., BASSO, F., Learning to compose fuzzy behaviors for autonomous agents. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 17, 1997, p. 409-432.

BONARINI, A., MATTEUCCI, M., RESTELLI, M. Concepts and fuzzy models for behavior-based robotics, **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 41, 2006, p. 110-127.

BONITESE, K. V. **Segurança contra incêndio em edifício habitacional de baixo custo estruturado em aço**. Belo Horizonte: Pós Graduação em Construção Civil: UFMG, 2007. 253 p. Dissertação de Mestrado.

BOULMAKOUL, A.; MANDAR, M. Fuzzy Ant Colony Paradigm for Virtual Pedestrian Simulation. **The Open Operational Research Journal**, n. 5, 2011, p. 19-29.

BRAGA, H. C. **Simulação da movimentação de pessoas em situações de emergência com lógica Fuzzy**: aspectos ergonômicos e computacionais. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2012, 189 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional).

BRAGA, H. C.; MOITA, G. F. On the Boate Kiss Fire and the Brazilian Safety Legislation - What we can learn. **Collective Dynamics**, v. 2, p. 1-21, 2017.

BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. 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 ...**, Hefei, 2016a. v. 1. p. 306-312.

_____. Algoritmos de busca e exploração aplicados em ambientes construídos de múltiplos pavimentos. In: XII Simpósio de Mecânica Computacional, 2016, Diamantina. **Anais ...**, Belo Horizonte: ABMEC, 2016b. v. 1. p. 71-78.

_____. 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, p. 20-40, 2016c.

_____. O Uso da Lógica Fuzzy para Suporte à Tomada de Decisões em Modelagens de Sistemas Multiagentes. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia - RIPE**, v. 2, 2016d, p. 124-137.

_____. Mapas de distâncias para a segurança contra incêndio em edifícios de interesse social. **PARC : Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, p. 32, 2017a.

_____. Abordagem Ergonômica da Movimentação Humana, sua Natureza Complexa e Aspectos para sua Simulação. **ERGODESIGN & HCI**, v. 5, p. 1-13, 2017b.

_____. 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 ...**, 2017c. v. 1. p. 1435-1444.

_____. Emulação com Lógica Fuzzy da tomada de decisão humana na simulação da movimentação humana em um ambiente construído. In: XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2017, Florianópolis. **Anais ...**, 2017d. v. único.

_____. Simulação com Lógica Fuzzy da Movimentação Bidirecional de Pessoas com Formação de Rios de Escoamento e do Empacotamento Humano. **Abakós**, v. 6, p. 19, 2017e.

_____. The Influence of the Location of Emergency Exits over the Distance to be Covered to the Exits of an Environment. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 219-232, 2019.

BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; CAMARGO, F.; ALMEIDA, P. E. M. 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, 2014, p. 61-77.

BRENTANO, T. **A Proteção Contra Incêndios no Projeto de Edificações**. 2ª ed., Porto Alegre: Brentano. 2010, 632 p.

BRONDANI, S. A.; PRADO, A. L. C.; SANTOS, M. A. JOSÉ, T. S. Boate Kiss: definição de um método para avaliação da percepção do ambiente da tragédia. In: 1º CONAERG – Congresso Internacional de Ergonomia Aplicada, 2016, Recife. **Anais ...**, São Paulo: Blucher Engineering Proceedings, 2016, v. 1, 12 p.

BRYAN, J. L.; MILKE, J. A. **The determination of behavior response patterns in fire situations**, Project People II. Final report –health care. Maryland: University of Maryland: NBS. 1981, 304 p. NBS-GCR-81-343.

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.

CARATTIN, E., BRANNIGAN, J. D. Lost in abstraction: the complexity of real environments vs the assumptions of models. Fire and Evacuation Modeling Technical Conference (FEMTC), 2014. In: **Anais ...**, Maryland, 2014, 12 p.

CASTRO, M. L. A.; CASTRO, R. O., Autômatos Celulares: implementações de Von Neumann, Conway e Wolfram. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 3, n. 3, 2008. p. 89-106.

CHUI, X.; SHI, H. A*-based Pathfinding in Modern Computer Games. **International Journal of Computer Science and Network Security**. v. 11, n. 1, 2011, p. 125–130.

CLARET, A. M.; MATTEDI, D. L. Estudo da prescritividade das normas técnicas brasileiras de segurança contra incêndio. **Rem: Revista da Escola de Minas**, v. 64, n. 3, 2011, p. 265-271.

COELHO, A. L. **Modelação matemática da evacuação de edifícios sujeitos à acção de um incêndio**. Volume I. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997, 404 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil).

_____. Modelação matemática da evacuação de edifícios sujeitos à acção de um incêndio. Volume II - Anexos. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997, 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil).

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA. **O código de ética começa por você, profissional**. 8ª ed., Brasília: CONFEA, 2013, 75 p.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE GOIÁS. **Norma Técnica 02/2014** – Conceitos básicos de segurança contra incêndio, 2014, 32p.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. **IT 08** - Saídas de emergência em edificações. 3ª ed., Belo Horizonte: CBMMG, 2017.

CROSSLAND, R. “[M]ultitudinous and minute”: early twentieth-century scientific, literacy and psychological representations of the mass. **Journal of Literature and Science**, v. 6, n. 2, 2013, p. 1-16.

CUCCI NETO, J. **Aplicações da engenharia de tráfego na segurança dos pedestres**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996, 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes).

DANIELLOU, F.; SIMARD, M.; BOISSIÈRES, I. **Facteurshumains et organisationnels de la sécurité industrielle**: um état de l’art. Toulouse: FonCSI. 2010, 124 p. Numéro 2010-2 des Cahiers de la Sécurité Industrielle.

DELLING, D. et al. Engineering Route Planning Algorithms. In: LERNER, J.; WAGNER, D.; ZWEIG, K. A. (Ed.). **Algorithmics of Large and Complex Networks**: design, analysis, and simulation. Springer, 2009. p. 117–139. LNCS 5515.

DIJKSTRA, E. W. A Note on Two Problems in Connexion. **Numerische Mathematik** 1, 1959, p. 269–271.

DUVAL, R. F. **NFPA case study**: nightclub fires. Quincy: NFPA, 2006, 42 p.

- GOLDSTONE, R.; ROBERTS, M. E. Self-organized trail systems in groups of humans. **Complexity**, v. 11, n. 8, 2006, p. 43-50.
- GONZÁLEZ, S. S.; SAURIN, T. A. Princípios para gestão de procedimentos em sistemas sócio-técnicos complexos, **Ação Ergonômica**, v. 8, n. 1, 2013, p. 48-62.
- GORRINI, A.; VIZZARI, G.; BANDINI, S. Age and Group-driven Pedestrian Behaviour: from observations to simulations. **Collective Dynamics**, v. 1, 2016, 16p.
- GOUVEIA, A. M. C., ETRUSCO, P. Tempo de escape em edificações: os desafios do modelamento de incêndio no Brasil, **REM - Revista da Escola de Minas**, v. 55, n. 4, 2002, p. 257-261.
- GRANT, C. B. Theory of complex communication, **Ação Ergonômica**, v. 1, n.3, 2002, p. 21-37.
- HALL, S. J. **Biomecânica básica**. 4ª ed., Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2005.
- HART, P. E.; NILSSON, N. J.; RAPHAEL, B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. **IEEE Transactions of System Science and Cybernetics**, v. 4, n. 2, 1968, p. 100–107.
- HELBING, D.; FARKAS, I. e VICSEK, T. Simulating dynamical feature of escape panic. **Nature**, v. 407, 2000, p. 487-490.
- HELBING, D.; et al. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. In: **Pedestrian and Evacuation Dynamics**, Berlim Heidelberg: Springer, 2002, p. 21-58.
- HELBING, D., FARKAS, I. J., VICSEK, T., Feb 2000. Freezing by heating in a driven mesoscopic system. **Phys. Rev. Lett.**, v. 84, 2000, p. 1240–1243.
- HELBING, D., MOLNÁR, P. Social force model for pedestrian dynamics. **Phys. Rev.**, E 51, 1995, p. 4282–4286.
- HELBING, D.; MUKERJI, P. Crowd disaster as systemic failures: analysis of the Love Parade disaster. **EPJ Data Science**. 2012, v. 1, n. 7, 40 p.
- IBRAHIM, A. M.; VENKAT, I.; WILDE, P. Uncertainty in a Spatial Evacuation Model. **Physica A**, n. 479, 2017, p. 485-497.
- IBRAHIM, A. M.; VENKAT, I.; WILDE, P. The Impact of Potential Crowd Behaviours on Emergency Evacuation: an evolutionary game-theoretic approach. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 22, n. 1, 2019, 15p.
- IIDA, I. Ergonomia no projeto de edifícios e espaços públicos. In: **Ergonomia: Projeto e Produção**, 2a ed., Edgard Blücher, São Paulo, SP, 2010, p. 582 – 591.
- IMAI, T.; MOORE, S. T.; RAPHAN, T; COHEN, B. Interaction of the body, head, and eyes during walking and turning. **Experimental Brain Research**, v. 136, n. 1, 2001, p. 1-18.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships**. 2007, 46 p. MSC/Circ.1238.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **Fire safety engineering – assessment, verification and validation of calculation methods**. ISO, 2008, 38 p. ISO 16730.

JACQUES JUNIOR, J. C. S.; MUSSE, S.R.; JUNG, C.R. Crowd analysis using computer vision techniques: a survey. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 27, 2010, p. 66-77.

KINATEDER, M. T.; KULIGOWSKI, E. D.; RENEKE, P. A.; PEACOCK, R. D. Risk perception in fire evacuation behavior revisited: definitions, related concepts, and empirical evidence. **Fire Science Reviews**, v. 4, n. 1, 2015, p. 1-26.

KIRCHNER, A.;SCHADSCHNEIDER, A. Simulation of evacuation process using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics, **Physica A**, n. 312, 2002, p. 260-276.

KNAUSS, P. A Cidade como Sentimento: história e memória de um acontecimento na sociedade contemporânea – o incêndio do Gran Circus Norte-Americano em Niterói, 1961. **Revista Brasileira de História**, v. 27, n. 53. 2007, p. 25-54.

KO, S. Y. **Comparision of evacuation times using Simulex and EvacuationZ base on trial evacuations**. Nova Zelândia: University of Canterbury, 2003. 155 p. Dissertação (Master in Engineering in Fire Engineering).

KO, S., SPEARPOINT, M., TEO, A. Trial evacuation of an industrial premises and evacuation model comparison. **Fire Safety Journal**, v. 42, 2007, p. 91-105.

KOBES, M.; HELSLOOT, I.; VRIES, B.; POST, J. Building safety and human behavior in fire: a literature review. **Fire Safety Journal**. v. 45, 2010, p. 1-11.

KOENIG, S., LIKHACHEV, M., LIU, Y. e FURCY, D. Incremental heuristic search in AI. **AI Magazine**, v. 25, n. 2, 2004, p. 99-112.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; BIANCHI, G.; PAIVA, V. T. Methods that May Stimulate Creativity and Theis Use in Architectural Design Education. **International Journal of Technology and Design Education**, v. 20, n. 4, 2010, p. 453–476.

KRETZ, T., GRÜEBOHM, A., KAUFMAN, M., MAZUR, F., SCHRECKENBERG, M. Experimental study of pedestrian counterflow in a corridor. **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, n. 10, 2006. P10001.

KULIGOWSKI, E. D. Predicting human behavior during fires. **Fire Technology**, v. 49, n. 1, 2013, p. 101-120.

KULIGOWSKI, E. D.; PEACOCK, R. D. **A review of building evacuation models**. NIST, 2005. 156 p. Tecchnical Note 1471.

- KULIGOWSKI, E.; PEACOCK, R. D.; AVERILL, J. Modeling the Evacuation of the World Trade Center Towers on September 11, 2001. **Fire Technology**, v. 49, n. 1, 2013.
- KULIGOWSKI, E. D.; PEACOCK, R. D.; WIESS, E.; HOSKINS, B. Stair evacuation of people with mobility impairments. **Fire and Materials**, 2014.
- LAND TRANSPORT NEW ZEALAND. **Pedestrian planning and design guide**. Wellington: LNTZ, 2007. 200 p.
- LE BON, G. **The crowd**: a study of the popular mind. London: Fisher Unwin, 1986, 129 p. (tradução do original em francês de 1985, reimpresso por Kitchener: Batoche Books, 2001).
- LIGHTFOOT, T. J.; MILNE, G. J. Modelling Emergent Crowd Behaviour. In: AUSTRALIAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE, 1, 2003, Canberra. **Anais...** Canberra, 2003. p. 159– 169.
- LUBÁS, R., MYCEK, M., PORZYCKI, J., WAS, J. Verification and validation of evacuation models – methodology expansion proposition. **Transportation Research Procedia**, v. 2, 2014, p. 715-723.
- LUH, P. B.; WILKIE, C. T.; CHANG, S.; MARSH, K. L.; OLDERMAN, N. Modeling and optimization of buildings emergency evacuation considering blocking effects on crowd movement. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 9, n. 4, 2012, p. 687-700.
- LUIZ, M.: **Dois anos depois, veja 24 erros que contribuíram na tragédia da Boate Kiss**. G1 RS, 2015. <<http://g1.globo.com/rs/riogrande-do-sul/noticia/2015/01/dois-anos-depois-veja-24-erros-que-contribuiram-para-tragedia-na-kiss.html>>. Acessado em 10 out 2017.
- LUNDIN, J. Development of a framework for quality assurance of performance-based fire safety designs. **Journal of Fire Protection Engineering**, v. 15, n.1, 2005, p. 19-42.
- MA, J., LO, S. M., SONG, W. G., WANG, W. L., ZHANG, J., LIAO, G. X. Modeling pedestrian space in complex building for efficient pedestrian traffic simulation. **Automation in Construction**, v. 20, 2013, p. 25-36.
- MACHI JÚNIOR, A. et al., Segurança contra incêndio em unidades básicas de saúde. **Journal of Human Growth and Development**, v. 24, n. 2014, p. 93-97.
- MANETIN, L., MANZONI, S., VIZZRI, G., OHTSUKA, K., SHIMURA, K. Towards an agent-based proxemic model for pedestrian and group dynamic. In: 11th Workshop Nazionale “Dagli Oggetti agli Agenti” (WOA 2010), 2010, Rimmi. **Anais ...**, Rimmi: CEUR-WS, 2010, 9 p., v. 621.
- MATURANA, H.; VARELA, F. J. **A árvore do conhecimento**: as bases biológicas da compreensão humana. 8ª ed., São Paulo: Palas Athena, 2010. 288 p.

MAZUR, F.; SCHRECKENBERG, M. Simulation and Optimization of Ground Traffic on Airports using Cellular Automata, **Collective Dynamics**, 2018, 22p.

MEACHAM, B. J. **The evolution of performance-based codes and fire safety design methods**. Bethesda: NIST, 1998, .56 p. NIST-GCR-98-761.

MINAS GERAIS, **Decreto 44.746**. Regulamenta a Lei 14130/01. 29 de fevereiro de 2008.

MINAS GERAIS, **Decreto 46.595**. Altera o Decreto 44.746/2008 que regulamenta a Lei 14130/01. 10 de setembro de 2014.

MINAS GERAIS, **Lei 14130/2001**. Dispõe sobre a prevenção contra incêndio e pânico no Estado de Minas Gerais, 19 de dezembro de 2001.

MORI, M., TSUKAGUCHI, H. A new method for evaluation of level of service in pedestrian facilities. **Transportation Research Part A: General**, v. 21, n. 3, 1987, 223 – 234.

MOUSSAÏD, M., HELBING, D., THERAULAZ, G. How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters, **PNAS**, v. 108, n. 17, 2011, p. 6884-6888.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. Performance-based options. In: NFPA. **Fire Code**: 2015 Edition, Cap. 5, 2014, p. 52-56.

NG, C. M. Y., CHOW, W. K. A brief review on the time line concept in evacuation, **International Journal on Architectural Science**, v. 7, n. 1, 2006, p. 1-13.

NUNES, I. L. Handling human-centered systems uncertainty using fuzzy logics – a review. **The Ergonomics Open Journal**, v. 3, 2010, p. 38-48.

OLSSON, P. A., REGAN, M. A. A comparison between actual and predicted evacuation times. **Safety Science**, v. 38, 2001, p. 139-145.

ONO, R. Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 1, 2007, p. 97-113.

OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: Harbra, 1986. 490 p.

PAN, X. et al. A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. **AI and Society**, v. 22, n. 2, 2007, p. 113-132.

PANERO, J.; ZELNIK, M. **Las dimensiones humanas en los espacios interiores**. 8ª ed., México: G. Gili, 1998. 320 p.

PEACOCK, R. D. (ed.). **Summary of NIST/GSA cooperative research on the use of elevators during fire emergencies**. BUKOWSKI, R.W.; KLOTE, J.H. KULIGOWSKI, E.D., NIST, 2009, 349 p. NIST 1620.

PELECHANO, N.; ALLBECK J.; BADLER N. **Virtual crowds**: methods, simulation, and control. Morgan & Claypool Publishers, 2008, 176 p.

- PELECHANO, N.; ALLBECK J.; KAPADIA, M.; BADLER N. I. Simulating Heterogeneous Crowds with Interactive Behaviors. CRC Press, 216, 266 p.
- PEREIRA, L. A. **Estudo do tempo de evacuação total em ambientes gerais via autômatos finitos**. Belo Horizonte: Departamento de Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 63 p. Dissertação (Mestrado em Estatística).
- PEREIRA, L. A. **Modelos de evacuação emergencial via autômatos celulares com mudança de rotas e campos de grupos**. Belo Horizonte: Departamento de Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. 118 p. Tese (Doutorado em Estatística).
- POON, L. S. Predicting Time of Flashover. **Fire Safety Science**, AOFST 3, 1988, p. 283-294.
- PREDTECHENSKII, V. M.; MILINKII, A. I. **Planning for foot traffic flow in buildings**. New Delhi: American Publishing, 1978, 240 p. (tradução do original em russo de 1969).
- RASBASH, D. J., RAMACHANDRAN, G., KANDOLA, B., WATTS, J.M., LAW, M. **Evaluation of fire safety**. Wiley, 2004, 463 p.
- REGAN, M. A., OLSSON, P. A. A comparison between actual and predicted evacuation times. **Safety Science**, v. 38, 2001, p. 139-145.
- RODRIGUES, F. C.; BONITESE, K. V. Segurança contra incêndio em edifício de baixo custo estruturado em aço usando os softwares Smartfire e Buildingexodus, In: Jornadas Sudamericanas De Ingenieria Estructural, 33, Santiago, 2008. **Anais ...**, Santiago, 2008, 14 p.
- ROGSCH, C., KLINGSCH, W., SEYFRIED, A., WEIGEL, H. 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, 2009, p. 395-400.
- ROGSCH, C. The Influence of Moore and von-Neumann Neighbourhood on the Dynamics of Pedestrian Movement. **Traffic and Granular Flow '15**. 1ed.: Springer International Publishing, 2016, v. 1, p. 129-136.
- ROJAS, R. Fuzzy Logic, In: **Neural Networks: a Systematic Introduction**. Cap. 11, Springer-Verlag, Berlim, 1996, p. 297-318.
- RONCHI, E., KULIGOWSKI, E. D., RENEKE, P. A., PEACOCK, R. D., NILSSON, D. **The process of verification and validation of building fire evacuation models**. NIST, 2013, 84 p. Technical Note 1822.
- RONCHI, E.; NILSSON, D. Fire Evacuation in High-rise Building: a review of human behaviour and modeling research. **Fire Science Review**, v. 2, n. 7, 2013, 21 p.
- RUCKER, R. **The lifebox, the seashell and the soul**. New York: Thunder's Mouth Press. 2005, 149 p.

- RUSSELL, S.; NORVIG, P. Busca com informação e exploração. In: **Inteligência Artificial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004. cap. 4, p. 94–133. 11^o reimpressão.
- SARMADY, S.; HARON, F.; TALIB, A. Z. Simulation of pedestrian movements using fine grid cellular automata model. In: 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UK-Sim), **Anais ...**, Chicago: IEEE, 2010, p. 428-433.
- SARMENTO, L. C. Tragédia no Circo. **Fatos e Fotos**, v. 1, n. 48, 30 de dez., 1961, p. 1-21.
- SCHADSCHNEIDER, A.; KLINGSCH, W.; KLUPFEL, H.; KRETZ, T.; ROGSCH, C.; SEYFRIED, A. Evacuation dynamics: empirical results, modeling and applications. In: MEYERS, B. (ed.). **Encyclopedia of Complexity and System Science**. Berlin: Springer, 2009a. v. 5, p. 3142-3176.
- SCHADSCHNEIDER, A. et al. Fundamentals of pedestrian and evacuation dynamics. In: BAZZAN, A.L.C.; KLÜGL, F. (ed.) **Multi-agent systems for traffic and transportation engineering**, Cap. 6, Hershey, 2009b, p. 124-154.
- SCHADSCHNEIDER, A. I'm a football fan ... get me out of here. **Physics World**, julho, 2010, p. 21-25.
- SEYFRIED, A., STEFFEN, B., KLINGSCH, W., BOLTES, M. The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. **Journal of Statistical Mechanics: theory and experiment**, v. 2005, 2005, 13 p.
- SEYFRIED, A., STEFFEN, B., KLINGSCH, W., LIPPERT, T., BOLTES, M. **The fundamental diagram of pedestrian movement revisited** - empirical results and modelling, 2007, p. 305–314. TGF 2007
- SEYFRIED, A., PASSON, O., STEFFEN, B., BOLTES, M., RUPPRECHT, T., KLINGSCH, W. New insights into pedestrian flow through bottlenecks. **Transportation Science**, v. 43, n. 3, 2009, p. 395–406.
- SHI, J., SHI, W., REN, A. An integrated model for the fire safety of large space buildings, **Advances in Structural Engineering**, v. 14, n. 5, 2011, p. 763-776.
- SILVA, V.; COELHO FILHO, H. S. Índice de segurança contra incêndio para edificações. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, 2007, p. 103-121.
- SILVA FILHO, L. C. P. (Coord.); et al. **Análise do sinistro na boate Kiss, em Santa Maria, RS**. Porto Alegre: CREA-RS, 2013, 31 p.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem Fuzzy**, 2a ed., Ed. Blucher, 2007, 186 p.
- SNIEDOVICH, M. Dijkstra's Algorithm Revisited: the dynamic programming connexion. **Control and Cybernetics**, v. 35, n. 3, 2006, p. 599–620.
- SOBRAL, E. Brasil aspira lei federal de proteção contra incêndio. **Revista Incêndio**, n. 93, 2013, p. 34- 40.

SOLTANI, A. R., TAWFIK, H., GOULERMAS, J. Y., FERNANDO, T. Path planning in construction sites: performance evaluation of the Dijkstra, A*, and GA search algorithms. **Advanced Engineering Informatics**, v. 16, n. 4, 2002, p. 291-303.

SOUZA FILHO, P. A. **Segurança de Frotas e Seus Operadores**, Belo Horizonte: Universidade FUMEC - Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho. 2010, 22 p.

STAAL, M. A. **Stress, cognition and human performance**: a literature review and conceptual framework. NASA, 2004. 171 p.

STILL, G. K. **Crowd dynamics**. Warwick : Department of Mathematics of University of Warwick, 2000. 280 p. Tese (Doctor of Philosophy in Mathematics).

STOUT, B. Smart Moves: intelligent pathfinding. **Game Developer Magazine**. out./nov. 1996, p. 28–35.

SUD, A.; GAYLE, R.; ANDERSEN, E.; GUY, S.; LIN, M.; MANOCHA, D. Real-time path planning in dynamic virtual environments using multiagent navigation graphs, **IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics**, v. 14, n. 3, maio, 2008, p. 526-538.

TAVARES, R. M., SILVA, A. C. P., DUARTE, D. Códigos Prescritivos x Códigos Baseados no Desempenho: qual é a melhor opção para o contexto do Brasil? XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais ...**, Curitiba, 2002, 8p.

THOMPSON, A. M. **The navigation system of the JPL Robot**. NASA: Pasadena, 1977, 37 p. JPL Publication 77-20.

THOMPSON, P.; MARCHANT, E. W. Computer model of the evacuation of large building populations, **Fire Safety Journal**, v. 24, n. 2, 1995, p. 131-148.

_____. Testing and application of the computer model “SIMULEX”. **Fire Safety Journal**, v. 24, n. 2, 1995, p. 149-166.

THOMPSON, P.; NILSSON, D.; BOYCE, K.; McGRATH, D. Evacuation models are running out of time. **Fire Safety Journal**, v. 78, 2015, p. 251-261.

TONÉIS, C. N. **Matemática Aplicada aos Games**: uma abordagem teórica e prática para desenvolvedores. São Paulo: ArteSam, 2015, 255 p.

TREVISAN, M., JESUS, I. J. **Ação civil pública para condenação por atos de improbidade administrativa**. Santa Maria: Promotorias de Justiça de Santa Maria, 2013, 49 p.

UNITED KINGDOM. **Fire safety risk assessment**: open air events and venues. London: Department for Communities and Local Government, 2007, 117 p.

VAGHETTI, C. A., ROESLER, H., ANDRADE, A. Tempo de reação simples auditivo e visual em surfistas com diferentes níveis de habilidade: comparação entre atletas profissionais, amadores e praticantes. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v.13, n. 2, 2007, p. 81-85.

VALENTIN, M. V. **Saídas de emergência em edifícios escolares**. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo: USP, 2008, 362 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura).

VIDAL, M. C.; BONFATTI, R. J.; CARVÃO, J. M. Ação Ergonômica em Sistemas Complexos: proposta de um método de interação orientada em situação - a conversação. **Ação Ergonômica**, v. 1, n. 3, 2002, p. 39-64.

VIDAL, M. C.; CARVALHO P. V. R. **Ergonomia cognitiva**: raciocínio e decisão no trabalho. Rio de Janeiro: EVC, 2008. 192 p.

VIEL, É. **A marcha humana, a corrida e o salto**: biomecânica, investigações, normas e disfunções. Barueri: Manole, 2001. 277 p.

VILELA, R. A. G.; IGUTI, A. M.; ALMEIDA, I. M. Culpa da vítima: um modelo para perpetuar a impunidade nos acidentes de trabalho. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 20, n. 2, 2004, p. 570-579.

WANG, J.; SUN, J. Principals aspects regarding to the emergency evacuation of large scale crowds: a brief review of literatures until 2010. **Procedia Engineering**, v. 71, 2014, 6 p.

WONG, R. **How enforcement officials deal with performance-based fire safety design in Hong Kong**. MIFireE, 2008, 34 p.

XIONG, H.; YAO, P.; GUO, X.; CHU, C.; WANG, W. Impact of traffic sign on pedestrians walking behavior. **Mathematical Problems in Engineering**, 2015, 10 p. Article ID 826152.

YUE-WEN, F.; MENG, L.; JIA_HONG, L. XIAO-QIAN, H. Optimal acceleration-velocity-bounded trajectory planning in dynamic crowd simulation. **Journal of Applied Mathematics**, v. 2014, 2014, 12 p.

WOLFRAM, S. Cellular automata as models of complexity, **Nature**, v. 311, 1984. p. 419-424.

ZADEH, L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 3, n. 1, 1973, p. 28-44.

ZHANG, J. **Pedestrian fundamental diagrams**: comparative analysis of experiments in different geometries. Jülich: Forschungszentrums Jülich, 2012, 103 p. IAS Series (v. 14).

ZHANG, J.; SEYFRIED, A. Comparison of intersecting pedestrian flows based on experiments. **Physica A**, v. 405, 2014, p. 316-325.

APÊNDICE – PUBLICAÇÕES E PARTICIPAÇÕES

Apresenta-se a relação das principais contribuições científicas já publicadas (artigos completos em periódicos, capítulo de livros, artigos completos em anais) e participações de destaque oriundas dessa pesquisa até o momento:

A: Artigos completos publicados em periódicos:

- A1: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. The Influence of the Location of Emergency Exits over the Distance to be Covered to the Exits of an Environment. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 219-232, 2019.
- A2: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Mapas de distâncias para a segurança contra incêndio em edifícios de interesse social. **PARC : Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 8, p. 32, 2017.
- A3: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E.M. Simulação com Lógica Fuzzy da Movimentação Bidirecional de Pessoas com Formação de Rios de Escoamento e do Empacotamento Humano. **Abakós**, v. 6, p. 19, 2017.
- A4: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Abordagem Ergonômica da Movimentação Humana, sua Natureza Complexa e Aspectos para sua Simulação. **ERGODESIGN & HCI**, v. 5, p. 1-13, 2017.
- A5: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F. On the Boate Kiss Fire and the Brazilian Safety Legislation - What we can learn. **Collective Dynamics**, v. 2, p. 1-21, 2017.
- A6: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. 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, p. 20-40, 2016.
- A7: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E.M. O Uso da Lógica Fuzzy para Suporte à Tomada de Decisões em Modelagens de Sistemas Multiagentes. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia - RIPE**, v. 2, p. 124-137, 2016.
- A8: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; CAMARGO, F.; ALMEIDA, P. E. M. 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, 2014.

B: Capítulos de livros publicados

- B1: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Brazilian Legislation and the Boate Kiss Tragedy: computational modelling of evacuation. **Traffic and Granular Flow '15**. 1ed.: Springer International Publishing, 2016, p. 345-352.
- B2: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Simulation of People Flow by a New Fuzzy Discrete Automata Model and an Ergonomic Approach. **Traffic and Granular Flow '15**. 1ed.: Springer International Publishing, 2016, p. 137-144.

C: Trabalhos completos publicados em anais de congressos

- C1: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E.M. Implementação de alguns fatores ergonômicos físicos e cognitivos para a simulação da movimentação humana. In: 16° Ergodesign - Congresso Internacional de Ergonomia e Usabilidade de Interfaces Humano Tecnológica, 2017, Florianópolis. **Anais ...**, 2017. v. 1. p. 1435-1444.
- C2: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E.M. A movimentação humana em um ambiente construído como um sistema ergonômico complexo. In: 16° Ergodesign - Congresso Internacional de Ergonomia e Usabilidade de Interfaces Humano Tecnológica, 2017, Florianópolis. **Anais ...**, 2017. v. 1. p. 1369-1378.
- C3: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E.M. Emulação com Lógica Fuzzy da tomada de decisão humana na simulação da movimentação humana em um ambiente construído. In: XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2017, Florianopolis. **Anais ...**, 2017. v. único.
- C4: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. O espaço pessoal para a movimentação humana e sua influência no perfil de deslocamento em um ambiente construído. In: 18º Congresso Brasileiro de Ergonomia, 2016, Belo Horizonte. **Anais ...**, Rio de Janeiro: ABERGO, 2016. p. 1-7.
- C5: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Ética no projeto arquitetônico: uma aplicação do nível de serviço e do diagrama fundamental pedestre. In: 18º Congresso Brasileiro de Ergonomia, 2016, Belo Horizonte. **Anais ...**, Rio de Janeiro: ABERGO, 2016. p. 1-7.
- C6: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Algoritmos de busca e exploração aplicados em ambientes construídos de múltiplos pavimentos. In: XII Simpósio de Mecânica Computacional, 2016, Diamantina. **Anais ...**, Belo Horizonte: ABMEC, 2016. v. 1. p. 71-78.
- C7: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E.M. Computational Modeling of Boate Kiss Evacuation and the Verification of Influence of Internal Barriers and Design and of Population Density. In: The 12th World Congress on Computational

- Mechanics & The 6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics, 2016, Seoul. **Anais ...**, Seoul, 2016. v. 1. p. 1191-1196.
- C8: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Can the average distance to be covered to the nearest exit be used as a complementary safety parameter in a building ?. In: 8th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics - PED 2016, 2016, Hefei - China. **Anais ...**, Hefei, 2016. v. 1. p. 408-412.
- C9: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Considerations about the personal space for human movement. In: 8th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics - PED 2016, 2016, Hefei - China. **Anais ...**, Hefei, 2016. v. 1. p. 413-417.
- C10: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. 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 ...**, Hefei, 2016. v. 1. p. 306-312.
- C11: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, PAULO E. M. Abordagem Ergonômica da Movimentação Humana: o diagrama fundamental pedestre em condições de normalidade. 1º Encontro Interestadual de Engenharia de Produção - I EINEPRO, 2015, São João da Barra - RJ. EINEPRO 2015. Campos: UCAM, 2015. **Anais ...**, v. 1. p. 1-12.
- C12: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Análise Comparativa de Algoritmos de Busca para Simulação e Modelagem do Melhor Caminho Inicial de Percurso em um Ambiente Construído. In: 1º Encontro Interestadual de Engenharia de Produção - I EINEPRO, 2015, São João da Barra - RJ. **Anais ...**, Campos, 2015. v. 1. p. 1-12.
- C13: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Redução dos riscos de acidentes na movimentação humana: efeito do distanciamento das saídas de emergência. In: 1º Encontro Interestadual de Engenharia de Produção - I EINEPRO, 2015, São João da Barra - RJ. **Anais ...**, Campos, 2015. v. 1. p. 1-11.
- C14: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. Algoritmo para geração do menor caminho discreto suave a ser percorrido até a saída de um ambiente. In: XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2015, Rio de Janeiro. **Anais ...**, Rio de Janeiro, v. 1.
- C15: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. A distância média a ser percorrida pelos ocupantes até a saída de emergência como um parâmetro complementar de segurança de edificações. In: XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2015, Rio de Janeiro. **Anais ...**, Rio de Janeiro, v. 1.
- C16: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F. Modelagem computacional com Lógica Fuzzy da movimentação de pessoas: determinação de aspectos ergonômicas cinemáticos. In: XI Simpósio de Mecânica Computacional (SIMMEC) e II Encontro Mineiro de

Modelagem Computacional (EMMCOMP), 2014, Juiz de Fora - MG. **Anais ...**, Juiz de Fora: UFJF, 2014. v. 1. p. 1-15.

C17: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F. Modeling with Fuzzy Logic the dynamic of people flow during the evacuation of constructed environments dimensioned according to the brazilian legislation. In: 11th World Congress on Computational Mechanics, 2014, Barcelona/Espanha. **Anais ...**, Barcelona: CIMNE, 2014. v. V. p. 6458-6467.

C18: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F. Potencialidades da Lógica Fuzzy para a simulação da movimentação bidirecional de pessoas: a formação de rios de escoamento e do empacotamento. In: XXXV CILAMCE- Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, 2014, Fortaleza. **Anais ...**, Fortaleza: UFC, 2014. v. 1. p. 1-15.

C19: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; CARDOSO, R. T. N. Simulação computacional associada à otimização para automação do processo de posicionamento de saídas de emergência no projeto de ambientes construídos mais seguros. In: 6º. Seminário Nacional de Sistemas Industriais e de Automação - SSIA, 2013, Belo Horizonte. **Anais ...**, Belo Horizonte: CEFET-MG, 2013. v. 1. p. 1-10.

C20: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; CAMARGO, F.; ALMEIDA, P. E. M. Ergonomia Aplicada ao Design Arquitetônico: modelagem computacional com Lógica Fuzzy para a simulação da movimentação de pessoas. In: IV Congresso Latinoamericano de Ergonomia, 2013, Quito. **Anais ...**, Quito, 2013. v. 1. p. 128-137.

C21: BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; CAMARGO, F.; ALMEIDA, P. E. M. Influência do posicionamento e do dimensionamento da saída de emergência na segurança: modelagem computacional com Lógica Fuzzy de um ambiente simétrico. In: XXXIV Iberian Latin American Congress on Computational Methods In Engineering, 2013, Pirenópolis - GO. **Anais ...**, Goiânia - GO: UFG, 2013. v. 1. p. 1-17.

D: Participações de destaque em eventos científicos

D1: 9th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics
PED 2018
Lund, Suécia
Agosto, 2018
Membro do Comitê Científico Internacional

D2: 8th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics
PED 2016
Hefei, China
Outubro, 2016
Membro do Comitê Científico Internacional
Chairman convidado – Seção Técnica 1