

Altieres Del Sent

**PROPOSTA DE MODELO FUZZY DO MODELO DE FORÇAS
SOCIAIS PARA SIMULAÇÃO DE PEDESTRES EM SITUAÇÃO DE
EVACUAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Ciências
da Computação para a obtenção do Grau
de Mestre.

Orientador

Universidade ...: Prof. Dr. Mauro Roisen-
berg

Florianópolis

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sent, Altieres

Proposta de Modelo Fuzzy do Modelo de Forças Sociais
para Simulação de Pedestres em Situação de Evacuação /
Altieres Sent ; orientador, Mauro Roisenberg -
Florianópolis, SC, 2016.

103 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Ciência da Computação.

Inclui referências

1. Ciência da Computação. 2. Lógica Fuzzy. 3. Modelo de
Forças Sociais. 4. Simulação de Pedestres. I. Roisenberg,
Mauro. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. III.
Título.

Este trabalho é dedicado a minha família em especial aos meus pais e avós, que construíram a base na qual eu alcanço esta conquista

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer primeiramente a meu orientador, Mauro Roisenberg que teve muito trabalho em me tornar um mestre, sem esquecer todos os professores que me ajudaram nesta jornada.

Não poderia deixar de citar também meus companheiros de laboratórios e aulas e agora amigos Gabriel Moura, Diego Rodrigues, Douglas Schroeder e Mariana Dehon cujo companheirismo e discussões foi essencial para este trabalho.

Por último um agradecimento especial a duas pessoas que moram em outro país, mas cuja sua contribuição para a realização deste trabalho foi fundamental, Christian Gloor que forneceu o código fonte com o MFS implementado e Nouredine Tamani que foi um grande parceiro e instrutor durante minha primeira apresentação internacional na Fuzzy IEEE 2015.

Enquanto educação for um privilégio, disse-
minar ciência é um dever

RESUMO

A simulação de multidões de pedestres consiste na modelagem computacional e simulação do comportamento observado quando um grande número de pedestres se movimenta em ambientes determinados. O estudo destes comportamentos é de grande importância no desenvolvimento de edificações seguras e na prevenção de acidentes em situações de evacuação. Diversas abordagens têm sido propostas para a implementação destes modelos computacionais. Uma das mais difundidas é a técnica chamada Modelo de Forças Sociais (MFS) - *Social Force Model* do inglês. Esta técnica procura modelar as forças sociais de atração e repulsão entre pedestres e entre estes e o ambiente através de equações de forças oriundas da física de partículas. A avaliação destas equações em um ambiente de simulação mostra que o MFS é capaz de reproduzir uma série de comportamentos e fenômenos que ocorrem em situações reais de evacuação de multidões. Apesar de ser simples e com custo computacional adequado, o MFS é um modelo difícil de parametrizar e de estender e o fato de usar equações matemáticas torna o conhecimento sobre as intenções dos pedestres pouco interpretável. De forma a aprimorar esta abordagem, nesta dissertação é proposta a implementação *fuzzy* do Modelo de Forças Sociais para a simulação de pedestres em situação de evacuação. Esta implementação através de regras e conjuntos *fuzzy* representa melhor o conhecimento relacionado às intenções do pedestre, mas não altera outras características da abordagem

Palavras-chave: Sistemas Fuzzy ; Simulação de Multidões; Social Force Model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Movimento Unidirecional.	32
Figura 2	Movimento Bidirecional.	33
Figura 3	Movimento Tetradirecional.	34
Figura 4	Cruzamento de fluxo.	35
Figura 5	Passagem por Cantos.	35
Figura 6	Entrando e Saindo.	36
Figura 7	Randômico.	36
Figura 8	Formação de filas.	37
Figura 9	Ondas de Anda-e-Para	38
Figura 10	Manada.	38
Figura 11	Efeito <i>Zipper</i>	39
Figura 12	Efeito Mais-rápido-é-mais-devagar	39
Figura 13	Ângulo do vetor de interação conforme a velocidade relativa aumenta.	52
Figura 14	Sigmoidal.	56
Figura 15	Gaussiana.	57
Figura 16	Triangular.	57
Figura 17	Diagrama MFS.	64
Figura 18	Diagrama MFFS.	64
Figura 19	Funções de pertinência do <i>ÂnguloDeDireção</i>	66
Figura 20	Ângulo de direção das funções de pertinência.	67
Figura 21	Velocidade do pedestre.	68
Figura 22	Intensidade da Força de Desejo.	68
Figura 23	Distância do pedestre ao obstáculo.	69
Figura 24	Funções de pertinência da variável <i>VelocidadeRelativa</i> em m/s.	72
Figura 25	Funções de pertinência da variável <i>ÂnguloDeDireção</i> em percentual.	72
Figura 26	Funções de pertinência PERTO e LONGE.	74
Figura 27	Funções de pertinência DEVAGAR e RÁPIDO em m/s.	74
Figura 28	Funções de pertinência FRENTE e ATRÁS em radianos.	75
Figura 29	Funções de pertinência BAIXA e ALTA em Newtons.	75

Figura 30	Ângulo em graus.	77
Figura 31	VelocidadeRelativa em m/s.	77
Figura 32	Formação de filas.	80
Figura 33	Pedestres esperando na porta.	80
Figura 34	As salas perto do corredor principal são as últimas a evacuar..	81
Figura 35	Mudança abrupta de direção.	81
Figura 36	Mudança abrupta de direção.	82
Figura 37	MFFS.	84
Figura 38	MFS.	84
Figura 39	Histograma da distância média percorrida em metros, com simulações com dez pedestres.	84
Figura 40	MFFS.	85
Figura 41	MFS.	85
Figura 42	Histograma da distância média percorrida em metros, com simulações com trinta pedestres.	85
Figura 43	MFFS.	86
Figura 44	MFS.	86
Figura 45	Histograma da distância média percorrida em metros, com simulações com cem pedestres.	86
Figura 46	MFFS.	87
Figura 47	MFS.	87
Figura 48	Histograma da distância média percorrida em metros, com simulações com duzentos pedestres.	87
Figura 49	Evolução da média da distância percorrida por número de pedestres simulados.	88
Figura 50	MFFS.	89
Figura 51	MFS.	89
Figura 52	Histograma da média da velocidade em m/s, com simulações com dez pedestres.	89
Figura 53	MFFS.	90
Figura 54	MFS.	90
Figura 55	Histograma da média da velocidade em m/s, com simulações com trinta pedestres.	90
Figura 56	MFFS.	91
Figura 57	MFS.	91

Figura 58 Histograma da média da velocidade em m/s, com simulações com cem pedestres.....	91
Figura 59 MFFS	92
Figura 60 MFS	92
Figura 61 Histograma da média da velocidade em m/s, com simulações com duzentos pedestres.....	92
Figura 62 Evolução da média da velocidade em m/s por número de pedestres simulados.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Quadro de comparação de modelos de simulação	44
Tabela 2	Tabela comparativa dos modelos (σ = desvio-padrão, μ = média)	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	25
1.2	JUSTIFICATIVA	27
1.3	OBJETIVOS	28
1.3.1	Objetivo Geral	28
1.3.2	Objetivos Específicos	28
1.3.3	Organização do Texto	29
2	FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL	31
2.1	SIMULAÇÃO DE MULTIDÕES	31
2.1.1	Tipos de Movimento	31
2.1.1.1	Movimento Unidirecional (<i>Unidirectional flow</i>)	32
2.1.1.2	Movimento Bidirecional (<i>Bidirectional flow</i>)	32
2.1.1.3	Movimento Tetradirecional (<i>Four-directional flow</i>)	32
2.1.1.4	Cruzamento de Fluxo (<i>Crossing flows</i>)	33
2.1.1.5	Passagem por Cantos (<i>Turning corners</i>)	33
2.1.1.6	Entrando (<i>Entering</i>) e Saindo (<i>Exiting</i>)	34
2.1.1.7	Randômico (<i>Random</i>)	35
2.1.2	Fenômenos Auto-organizáveis	36
2.1.2.1	Formação de Filas (<i>Lane formation</i>)	37
2.1.2.2	Ondas de Anda-e-Para (<i>Stop-and-Go-waves</i>)	37
2.1.2.3	Turbulência (<i>Turbulence</i>)	38
2.1.2.4	Manada (<i>Herding</i>)	38
2.1.2.5	Efeito <i>Zipper</i> (<i>Zipper-effect</i>)	39
2.1.2.6	Mais-rápido-é-mais-devagar (<i>Faster-is-slower</i>)	39
2.1.3	Planejamento de Rota dos Pedestres	39
2.1.4	Modelos de Simulação Macroscópicos	40
2.1.4.1	Modelos Contínuos (<i>Continuum models</i>)	41
2.1.4.2	Modelo de Grafos (<i>Network models</i>)	41
2.1.5	Modelos de Simulação Microscópicos	41
2.1.5.1	Autômato Celular (<i>Celular automata</i>)	42
2.1.5.2	NOMAD	42
2.1.5.3	Modelo de Forças Sociais (<i>Social Force Model</i>)	43
2.1.5.4	Multiagente	43
2.1.6	Resultado da Análise Qualitativa dos Modelos	44
2.1.7	Modelo de Forças Sociais (<i>Social Force Model</i>)	45
2.1.7.1	Equação MFS	45
2.1.7.2	Força de Desejo (<i>Desired Force</i>)	46

2.1.7.3	Força de Obstáculo (<i>Obstacle Force</i>)	47
2.1.7.4	Força Social (<i>Social Force</i>)	49
2.1.7.5	Força Granular (<i>Granular Force</i>)	53
2.2	SISTEMAS <i>FUZZY</i>	54
2.2.1	Metodologias de Sistemas <i>Fuzzy</i>	54
2.2.1.1	Mamdani	55
2.2.1.2	Takagi-Sugeno	55
2.2.1.3	Comparação entre os dois sistemas	55
2.2.2	Conjuntos <i>Fuzzy</i>	56
2.2.3	Função de Pertinência	56
2.2.4	Variáveis <i>Fuzzy</i>	57
2.2.5	Regras <i>Fuzzy</i>	58
2.2.6	Fuzzificação	58
2.2.7	Inferência <i>Fuzzy</i>	58
2.2.8	T-Norma <i>Fuzzy</i>	59
2.2.8.1	Mínimo	59
2.2.8.2	Produto Algébrico	59
2.2.9	S-Norma ou T-Conorma <i>Fuzzy</i>	59
2.2.9.1	Soma Probabilística	60
2.2.9.2	Máximo	60
2.2.10	Desfuzzificação	60
2.2.11	Considerações sobre a interpretação das regras	61
2.3	ESTADO DA ARTE DE SIMULAÇÃO <i>FUZZY</i> DE PEDESTRES	61
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
3	PROPOSTA	63
3.1	IMPLEMENTAÇÃO <i>FUZZY</i> DA COMPONENTE FORÇA DE DESEJO	65
3.1.1	Regras do Ângulo da Força de Desejo	65
3.1.2	Regras de Intensidade da Força de Desejo	66
3.2	IMPLEMENTAÇÃO <i>FUZZY</i> DA COMPONENTE DE FORÇA DE OBSTÁCULO	69
3.3	IMPLEMENTAÇÃO <i>FUZZY</i> DA COMPONENTE DE FORÇA SOCIAL	70
3.3.1	Regras do Ângulo da Força Social	71
3.3.2	Regras <i>Fuzzy</i> da Intensidade de Mudança de Direção da Força Social	73
3.3.3	Intensidade da Força de Repulsão	76
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
4	RESULTADOS E EXPERIMENTOS	79
4.1	ANÁLISE QUALITATIVA	79

4.2	ANÁLISE QUANTITATIVA	81
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5	CONCLUSÃO	95
5.1	LIMITAÇÕES DO MODELO ATUAL	96
5.2	TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

As primeiras simulações de multidões foram desenvolvidas para prever comportamentos básicos humanos e gerar conhecimento sobre como as pessoas agem em situações normais, com o objetivo de melhor projetar áreas de muito movimento Hankin e Wright (1958). Paralelamente a esse estudo, foram feitos ensaios e experimentos relacionados com evacuação e situações de pânico Wolpert e Zillmann (1969).

De acordo com (HELBING; JOHANSSON, 2011), com o crescimento natural da população mundial e a sua migração para grandes centros, tornou-se cada vez mais comum a realização de grandes eventos, com grandes multidões. Grandes multidões requerem igualmente grandes edificações. Como observado em incidentes do passado, apenas seguir as normas de segurança não é suficiente na modelagem dessas grandes edificações. Uma modelagem de simulação faz-se necessária Helbing e Johansson (2011).

Além disso, as simulações de pedestres vêm sendo cada vez mais usadas em ambientes de realidade virtual e indústrias bilionárias, como as de jogos e filmes. Técnicas específicas de simulação de pedestres para jogos e filmes foram desenvolvidas para atender às necessidades da indústria Treuille, Cooper e Popović (2006), Aschwanden, Halatsch e Schmitt (2008).

Por esta razão, estudar o comportamento de multidões é cada vez mais importante, pois a população mundial continuará a crescer e a migrar para as cidades, aumentando a necessidade de projetar edificações que comportem a circulação de pessoas de forma adequada. Ao mesmo tempo, a necessidade de simular multidões para fins de entretenimento continuará a ser um foco de estudos e de interesse comercial Helbing e Johansson (2011).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Há uma variedade bastante expressiva de técnicas e modelos para simulação de pedestres e por causa desta variedade, faz-se necessário classificar as técnicas de simulação de pedestres Duives, Daamen e Hoogendoorn (2013).

A forma mais comum na literatura de classificar é entre o modelo macroscópico e o microscópico. Os modelos macroscópicos de simulação de pedestre procuram modelar a multidão em si, como se a multidão fosse um ser em si mesmo. A vantagem dessa modelagem é o custo: modelar um ser só, por mais complicado que seja, é barato computacionalmente e não cresce linearmente com o tamanho da multidão Duives, Daamen e Hoogendoorn (2013). Por outro lado, a abordagem microscópica procura modelar

cada indivíduo e tenta fazer os fenômenos de uma multidão emergirem dessa interação. A vantagem desse modelo é a precisão e acurácia, mas a desvantagem é o seu custo computacional mais elevado, sendo que o crescimento de custo computacional será no mínimo linear Duives, Daamen e Hoogendoorn (2013).

Existe uma incerteza elevada inerente à modelagem de comportamento humano. Essa incerteza pode levar à crença de que os pedestres precisam ser precisamente simulados e que modelos macroscópicos não são de grande valor, mas essa crença é equivocada Helbing e Johansson (2011). Modelos altamente precisos têm um custo computacional muito elevado que para fins estatísticos e para reprodução de fenômenos mais simples não se justificam Helbing e Johansson (2011). Por essa razão os modelos macroscópicos ainda são bastante usados. Os modelos macroscópicos, por seu baixo custo computacional, são usados não apenas no escopo exclusivo de simulação de pedestres para prevenção, mas também em aplicações de tempo real, como jogos, campo onde o baixo custo computacional é mais atrativo que a capacidade de modelar uma multidão heterogênea Treuille, Cooper e Popović (2006). Os modelos altamente precisos ficaram restritos a aplicações onde eles se justificam, como a simulação de grandes multidões em filmes, onde é exatamente o contrário que se precisa, uma multidão heterogênea e com movimentos sofisticados Lind (1999), Almeida, Rosseti e Coelho (2013).

Na presente dissertação, concentrou-se em um modelo que fosse o intermediário entre os dois extremos, pois um modelo simples demais e com baixo custo computacional não é interessante para modelar de forma precisa uma evacuação. Uma multidão necessita ter no mínimo uma pequena heterogeneidade para reproduzir estatisticamente o comportamento real, além disso, deve ser capaz de modelar comportamentos específicos em alguns pedestres, tais como pânico e ferimentos, de forma a poder se reproduzir e estudar as conseqüências desses comportamentos no resultado final do tempo de evacuação. Da mesma forma, não é interessante um modelo que necessite *hardware* especial e milhares de regras para conseguir simular satisfatoriamente uma multidão. Primeiro porque esses equipamentos não estavam disponíveis para a presente pesquisa. Segundo, porque requerer equipamento especial vai severamente restringir a pesquisa e aplicabilidade do modelo. Seguindo este método, procurando entre esses dois extremos estão vários modelos microscópicos e híbridos, com diversos níveis de precisão e custo computacional Papadimitriou, Yannis e Golias (2009).

O mais promissor desses modelos é o Modelo de Força Social. Esse modelo não é altamente preciso, nem tem um custo computacional elevado, mas tem precisão suficiente para simular vários fenômenos que acontecem em situações de pânico, como o 'quanto mais rápido, mais devagar' (do inglês

faster-is-slower), que acontece quando muitos pedestres estão desesperadamente tentando sair de uma área, e ao fazer isso eles aumentam o atrito entre si. Assim, a multidão em si anda mais devagar, chegando às vezes a parar Helbing e Johansson (2011).

Quando se aplica uma técnica computacional para simulação de multidões, fenômenos típicos que ocorrem em situações reais devem ser reproduzidos e observados no sistema simulado. Entre esses fenômenos, pode-se citar a formação de filas (*lane formation*), que é a tendência natural dos pedestres a formarem filas, a formação de manada (*herding*), que é a tendência do pedestre seguir a maioria ou a pessoa que está mais perto e assim por diante. Esses e outros fenômenos serão descritos detalhadamente no Capítulo 2. A capacidade de reprodução desses fenômenos é muito importante na avaliação dos sistemas de simulação, pois permitirá a análise de situações potenciais de risco e o projeto adequado dos ambientes.

1.2 JUSTIFICATIVA

O MFS é provavelmente a principal técnica hoje para simulação de pedestres, ela é uma técnica simples que por ter um desempenho adequado e boa capacidade de simulação se sobressai a outras técnicas. O crescimento assintótico é tipicamente $O(n^2)$, mas pode ser $O(n)$ se for implementada separando as áreas por seções, onde n é o número de pedestres Johansson (2004). Apesar disso ela usa equações diferenciais para descrever a força que os pedestres exercem, o que a torna difícil de parametrizar/estender, como quando se tenta simular a visibilidade do pedestre no meio da fumaça, pessoas tentando sair em grupo ou no caso de pedestres fugindo do fogo.

Não é produtivo começar um modelo de simulação sem levar em conta o conhecimento que o MFS tem em suas equações, portanto foi desenvolvido neste trabalho um novo modelo baseado no MFS.

Ao deparar-se com o problema de dificuldade de parametrização e extensão do modelo MFS, o uso de lógica *fuzzy* foi um candidato natural para tentar melhorar a interpretabilidade do modelo. *Fuzzy* vem sendo usada como uma técnica de tratar sistemas incertos Gaines (1978), Nasir et al. (2014) há décadas. A lógica *Fuzzy* também já foi usada para tratar a interpretabilidade de modelos "black-box" Rodrigues et al. (2014). A própria simulação de multidões se usa de *fuzzy* há pelo menos uma década. Já existem simulações de pedestres feitas com *fuzzy*. Embora essas simulações sejam bem realísticas, com destaque para a simulação feita na sequência de filmes do Senhor dos Anéis Gerdelan (2009) com o *software* comercial MASSIVE, elas também são computacionalmente caras, por possuir muitas regras *fuzzy*, por causa

disso o *software* requer uma GPU de alto desempenho para simular grandes multidões Massive (2015). Por isso um modelo que seja mais rápido e com menos regras é necessário. Como o MFS consegue simular vários fenômenos complexos em multidões usando poucas equações, fuzzificar o modelo MFS é uma boa alternativa para criar um modelo de simulação eficiente e de fácil parametrização, sem muitas regras e com desempenho adequado.

Uma tentativa similar ao desta dissertação já foi feita por (Nasir et al. (2014)). Esse outro modelo é um modelo de simulação que usa lógica *fuzzy*, onde a saída do MFS é a entrada das regras do sistema *fuzzy*, e a saída final do sistema *fuzzy* é a direção à qual o pedestre vai se dirigir.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Propor um Sistema de Modelagem de Comportamentos de Multidões composto por um conjunto de regras linguísticas e conjuntos *fuzzy* baseado ou inspirado pelo Modelo de Forças Sociais e que apresente capacidade e desempenho para simular os fenômenos observados em situações reais de evacuação de multidões.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Descrever as equações que compõem o Modelo de Forças Sociais;
2. Criar regras *fuzzy* que atendam a ideia expressa pelas fórmulas do MFS, e assim melhore a sua interpretabilidade, usando regras linguísticas Mamdani, tornando o modelo mais fácil de estender e configurar;
3. Realizar simulações em vários cenários e verificar se a velocidade média e a distância média percorrida estão estatisticamente similar ou igual ao modelo MFS;
4. Verificar se os fenômenos comuns e já documentados que são satisfatoriamente simulados em uma evacuação de multidão também são simulados no modelo *fuzzy* inspirado no MFS;
5. Verificar se o custo computacional do modelo criado permanece na mesma ordem de magnitude.

1.3.3 Organização do Texto

Os Capítulos desta dissertação estão organizados da seguinte maneira:

O Capítulo 2 procura trazer uma revisão do estado da arte, com o objetivo de situar o leitor e criar uma visão geral do problema que está sendo tratado. Dessa forma, pretende-se justificar porque o MFS foi escolhido como inspiração deste trabalho e ambientar o leitor nos conceitos de evacuação de multidões. Por último, uma breve revisão de lógica *fuzzy* é feita para ressaltar suas qualidades e justificar sua escolha como método para melhorar a interpretabilidade do MFS.

O Capítulo 3 tem como objetivo mostrar o modelo proposto. Nesse capítulo as regras dos sistemas e os parâmetros das funções de pertinência são apresentados e é explicado como as relações entre as variáveis do modelo MFS se traduzem em regras *fuzzy*.

O Capítulo 4 apresenta os experimentos e resultados obtidos com o método proposto, utilizando-se de dois tipos de análise, uma qualitativa e a outra quantitativa. Na qualitativa analisa-se a capacidade do modelo de reproduzir fenômenos citados na literatura e na quantitativa analisamos estatisticamente se a velocidade média e distancia média percorrida entre os dois modelos são significativamente iguais.

Ao final são apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas bem como uma discussão sobre as limitações do atual modelo e seu potencial.

2 FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL

Este Capítulo consiste em uma revisão na base teórica da simulação de multidões e nos conceitos de lógica *fuzzy* e sistemas *fuzzy*.

2.1 SIMULAÇÃO DE MULTIDÕES

Várias análises já foram produzidas nos diversos modelos de simulação de pedestres Duives, Daamen e Hoogendoorn (2013), Papadimitriou, Yannis e Golias (2009), Helbing e Johansson (2011), essas análises seguem duas linhas, a primeira é apresentar os modelos e descrever os conceitos, tais como os fenômenos, tipos de movimento e tipos de escolha de rota que são relevantes para cada modelo Papadimitriou, Yannis e Golias (2009). A outra forma é explicar os conceitos relacionados à simulação de multidões, para depois apresentar os modelos e relacioná-los com os fenômenos e tipos de movimento que são capazes de reproduzir e o tipo de escolha de rota usado nas pesquisas com esse modelo Helbing e Johansson (2011). Na presente dissertação é importante demonstrar qualitativamente qual o melhor modelo para servir como base de pesquisa, sendo assim, faz-se necessário adotar a segunda forma de apresentação, para que os conceitos já estejam expostos no momento de avaliar cada modelo. Portanto, serão primeiro apresentados os conceitos relacionados à multidão, para depois realizar-se uma análise qualitativa nos diversos modelos apresentados.

2.1.1 Tipos de Movimento

Os tipos de movimento são autoexplicativos e derivados do movimento natural dos pedestres, por essa razão diversos autores com trabalhos independentes chegaram a praticamente a mesma classificação. Saber quais tipos de movimentos um modelo é capaz de simular revela o quão genérico é esse modelo. Além disso, existem fenômenos que só emergem em tipos de movimentos específicos, saber quais são os tipos de movimento é importante no entendimento dos fenômenos.

2.1.1.1 Movimento Unidirecional (*Unidirectional flow*)

O movimento unidirecional é quando a multidão está apenas indo em uma direção. Situações como essa ocorrem em corredores, quando a multidão está entrando ou saindo de um evento, conforme demonstrado na Figura 1.

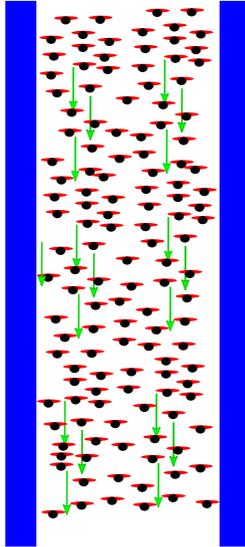


Figura 1 – Movimento Unidirecional.

2.1.1.2 Movimento Bidirecional (*Bidirectional flow*)

O movimento bidirecional trata-se de duas multidões dividindo o mesmo corredor e se movimentando em direções opostas. Ocorre principalmente em áreas de grande circulação como metrô. Nessas áreas os pedestres estão ao mesmo tempo entrando e saindo, usando o mesmo corredor, conforme demonstrado na Figura 2.

2.1.1.3 Movimento Tetradiirecional (*Four-directional flow*)

É o tipo de movimento que ocorre em um cruzamento, com quatro entradas, típico de ocorrer em centros comerciais de cidades, conforme de-

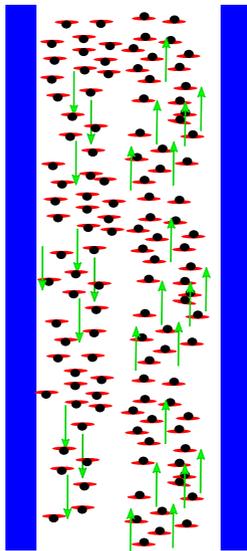


Figura 2 – Movimento Bidirecional.

monstrado na Figura 3.

2.1.1.4 Cruzamento de Fluxo (*Crossing flows*)

O cruzamento de fluxo ocorre nos mesmos lugares em que ocorre o movimento tetradirecional, mas neste tipo de movimento os pedestres estão andando em apenas duas direções Helbing e Johansson (2011), conforme demonstrado na Figura 4.

2.1.1.5 Passagem por Cantos (*Turning corners*)

Quando os pedestres estão virando um corredor, eles tendem a se aproximar dos cantos e isso muitas vezes cria situações de alta pressão que pode ferir um dos pedestres Duives, Daamen e Hoogendoorn (2013), conforme demonstrado na Figura 5.

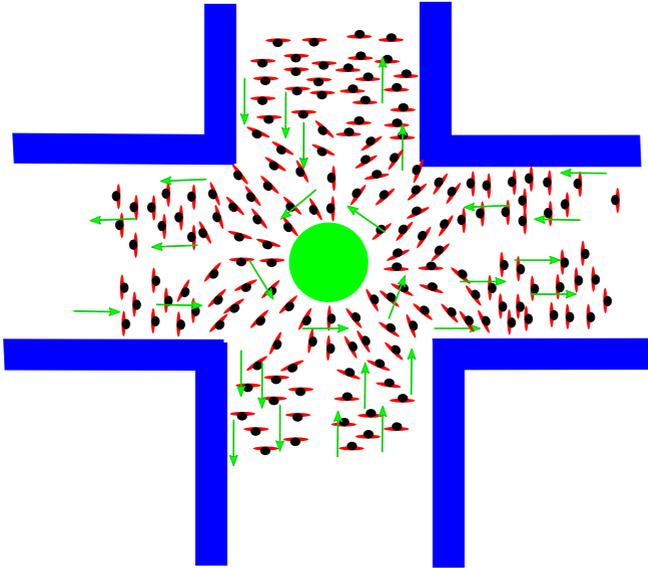


Figura 3 – Movimento Tetradirecional.

2.1.1.6 Entrando (*Entering*) e Saindo (*Exiting*)

Os movimentos de entrada e saída ocorrem quando várias pessoas se agrupam ao redor de uma porta ou passagem. Esse tipo de movimento é de particular interesse de estudo porque ao entrar em uma sala ou recinto, principalmente em momentos de grande comoção emocional como grandes *shows*, é comum ocorrerem acidentes. Ao saírem de um local as pessoas tendem a ignorar as saídas secundárias e se agrupar ao redor da principal. O movimento de saída/entrada é tão crítico que mesmo em situações de não pânico pode resultar em acidentes, o fato de o movimento ser lento pode levar as pessoas por impaciência a começar a empurrar, o que pode aumentar significativamente a pressão na frente da multidão, machucando e piorando a situação. Isso pode resultar em diversos acidentes conforme exposto por Helbing e Johansson (2011). O movimento de entrada/saída é demonstrado na Figura 6.

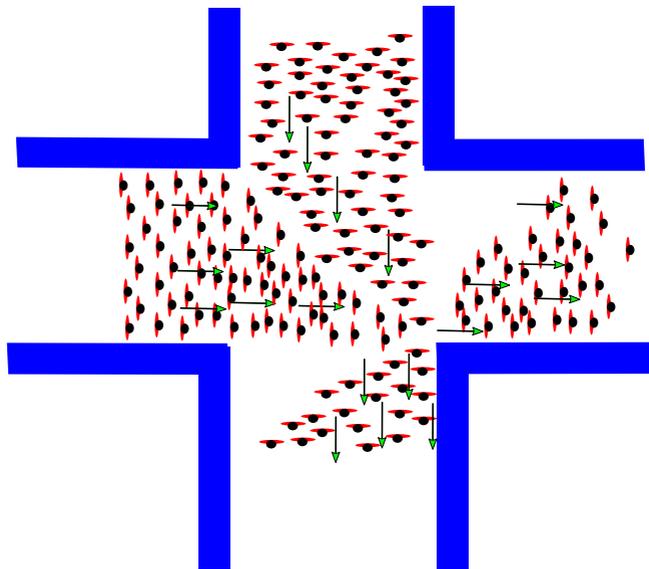


Figura 4 – Cruzamento de fluxo.

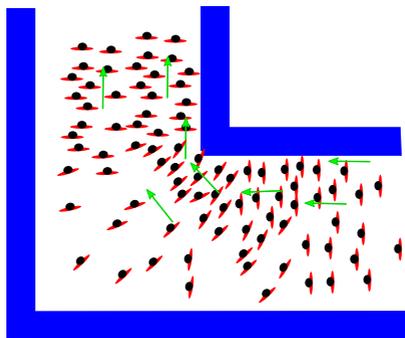


Figura 5 – Passagem por Cantos.

2.1.1.7 Randômico (*Random*)

O movimento randômico é quando os pedestres andam de objetivo em objetivo randomicamente, esse tipo de movimento ocorre em áreas onde os pedestres têm objetivos heterogêneos, como centros comerciais, onde eles ficam andando de loja em loja, dependendo do seu interesse. Esse tipo de mo-

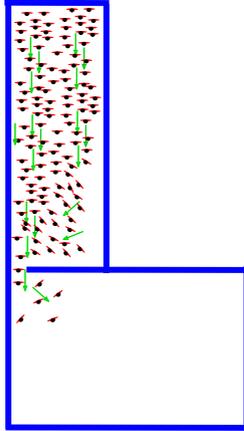


Figura 6 – Entrando e Saindo.

vimento é importante para verificar onde vai ser o gargalo de um determinado espaço, como prédios. O ponto onde houver gargalo de circulação vai ser o primeiro a congestionar. O movimento randômico é demonstrado na Figura 7.

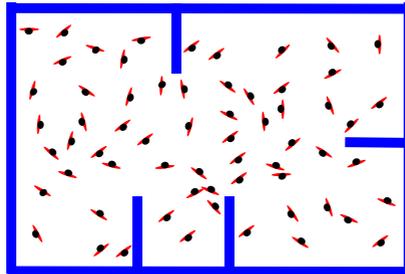


Figura 7 – Randômico.

2.1.2 Fenômenos Auto-organizáveis

Além dos tipos de movimentos, podem-se observar tipos distintos de movimentos agregados. Esses movimentos agregados são chamados de fenômenos auto-organizáveis na literatura. Foram encontrados seis tipos de fenômenos na literatura. Esses fenômenos são definidos como a formação espontânea de

um novo comportamento qualitativo através da interação não linear de muitos objetos Helbing e Johansson (2011) sem a intervenção de influências externas Camazine et al. (2002). Os fenômenos são usados para avaliar a capacidade de generalização de um modelo de simulação de pedestres.

2.1.2.1 Formação de Filas (*Lane formation*)

É normal em situações de grande densidade de pedestres, ou em que grupos de pedestres andem em direções contrárias, que se formem filas. Os pedestres naturalmente se organizam em filas como forma de otimizar a sua velocidade e esforço. Mudar de direção para ultrapassar o pedestre que está na sua frente, em uma situação de alta densidade, requer esforço e acaba reduzindo sua velocidade conforme explicado por Hoogendoorn e Daamen (2004), então os pedestres naturalmente preferem continuar numa direção fixa, conforme demonstrado na Figura 8.

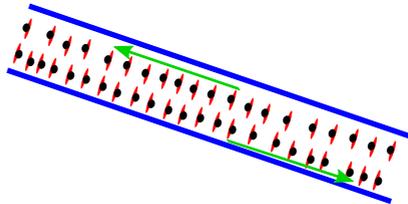


Figura 8 – Formação de filas.

2.1.2.2 Ondas de Anda-e-Para (*Stop-and-Go-waves*)

Em áreas de entrada ou saída, em situação de alta densidade, quando as pessoas se afunilam é comum ocorrer ondas de movimento, os pedestres se movimentam por um curto espaço e param ao encontrar pedestres parados. Eles permanecem parados até os pedestres na sua frente se movimentarem, quando então o ciclo de andar e parar dos pedestres se repete Helbing, Johansson e Al-Abideen (2007). Esse fenômeno pode ser ilustrado como um "gestionamento" de pessoas, conforme demonstrado na Figura 9.

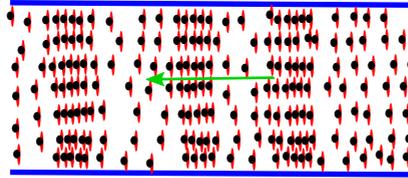


Figura 9 – Ondas de Anda-e-Para

2.1.2.3 Turbulência (*Turbulence*)

A Turbulência ocorre após a pressão na multidão aumentar, ela é uma etapa depois das ondas de Anda-e-Para, Helbing, Johansson e Al-Abideen (2007). Nesse estado, as pessoas começam a entrar em pânico ou se tornam impacientes nos momentos em que a multidão para de andar e tentam forçar a passagem entre os outros pedestres. Como todos os pedestres tentam fazer isso ao mesmo tempo, o resultado geral é um movimento caótico e turbulento.

2.1.2.4 Manada (*Herding*)

Em situações de baixa visibilidade ou alto estresse o pedestre tende a seguir o seu grupo ou a pessoa mais próxima a ele, mesmo que não seja conhecida, dando origem a um movimento de manada. O fenômeno de manada pode ocasionar tragédias porque os pedestres podem subutilizar saídas disponíveis e tornar a evacuação mais lenta, devido a este fato é importante que o modelo seja capaz de simular este fenômeno. A capacidade de simular este fenômeno demonstra capacidade de generalização Johansson, Helbing e Werner (2005). Este fenômeno é exemplificado na Figura 10.

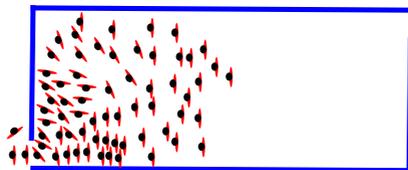


Figura 10 – Manada

2.1.2.5 Efeito *Zipper* (*Zipper-effect*)

O efeito *zipper* é um tipo de formação de fila, mas em vez de andar com duas filas na mesma direção, lado a lado, as pessoas em filas paralelas ficam uma na diagonal da outra. Essa estrutura lembra um *zipper* Hoogendoorn e Daamen (2005), Cristiani, Piccoli e Tosin (2014), conforme demonstrado na Figura 11.



Figura 11 – Efeito *Zipper*

2.1.2.6 Mais-rápido-é-mais-devagar (*Faster-is-slower*)

Devido ao atrito entre os corpos dos pedestres em gargalos (portas, saídas etc.), existe um limite máximo de pedestres por minuto que é possível passar pelo gargalo. Acima desse limite, a capacidade de movimentação da multidão vai caindo, muitas vezes parando, pois o pedestre tem menos espaço para movimentar os pés e não consegue resolver situações de conflito. Isto é bem comum em situações de pânico, quando todas as pessoas correm para a saída principal, ocasionando esse efeito. Ele é também chamado de "*freezing-by-heating effect*" Helbing e Johansson (2011), conforme demonstrado na Figura 12.

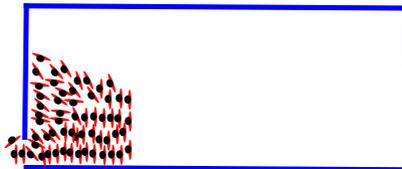


Figura 12 – Efeito Mais-rápido-é-mais-devagar

2.1.3 Planejamento de Rota dos Pedestres

A escolha de rota de um pedestre é uma linha de pesquisa por si só. Ela é uma parte essencial da simulação de movimento de multidões. Existem duas

características importantes em um modelo de simulação de planejamento de rota de pedestres, se esse modelo é capaz de dinamicamente alterar o objetivo global e se o modelo é capaz de adaptar a rota global. O primeiro refere-se a, por exemplo, um pedestre que queria ir ao cinema, mas decide ir a uma loja do *Shopping Center*. O segundo refere-se a um pedestre que com base em novas informações, decide ajustar sua rota, sem alterar o destino global. Por exemplo, um pedestre que a caminho de um centro comercial altera sua rota menos distante porque percebe que ela passa por uma rua que está interditada para um evento e cheia de outros pedestres, assim ele decide pegar um caminho mais longo, mas não congestionado.

Por mais que o planejamento de rota seja essencial para a simulação de multidões em geral, o presente trabalho não tem por objetivo tratar as diversas linhas de pesquisas relacionadas à simulação de multidões. Este trabalho está focado na reprodução dos fenômenos observados na literatura e apenas estes. Esses fenômenos não dependem de camadas mais profundas do comportamento humano, como planejamento, memória e decisão.

Dessa forma, o critério usado para a análise qualitativa não depende diretamente dessas características do planejamento de rota. Foi analisado se o modelo permite que seja usado um planejamento de rota com essas características, mesmo que no presente momento não o use. Dessa maneira, se for possível usar qualquer tipo de planejamento de rota em conjunto com a simulação de pedestres, qualquer pesquisa pode colocar o algoritmo de planejamento de rota com a melhor relação custo computacional *versus* realismo. Por exemplo, o MFS foi considerado com planejamento de rota porque é possível usar um algoritmo de planejamento de rota nele, não porque o MFS possua um algoritmo de planejamento de rota, já o modelo de grafos não, pois ele é tão macroscópico e abstrato, que não tem como se aplicar o conceito de rota de pedestre nele.

2.1.4 Modelos de Simulação Macroscópicos

Os modelos macroscópicos tentam simular a multidão em si, e não os pedestres. Eles são criados para simular grandes multidões com baixo custo computacional. Suas principais aplicações são jogos de computador e simulações de grandes proporções. Os modelos aqui foram retirados da literatura, principalmente dos trabalhos de (TREUILLE; COOPER; POPOVIĆ, 2006; DAAMEN, 2002).

2.1.4.1 Modelos Contínuos (*Continuum models*)

Modelos contínuos são sistemas macroscópicos onde são criados mapas de densidades dinamicamente e as pessoas são divididas em grupos. Assim, embora pareça que elas tenham um comportamento único, elas estão apenas seguindo o grupo delas. Esse modelo é de difícil parametrização, mas como os campos de densidade são pré-calculados, ele apresenta bom desempenho, podendo simular multidões de até um milhão de pessoas. É bastante usado pela indústria de jogos de computador para simular uma multidão indo de encontro a outra multidão ou para simular pedestres nas ruas Mao et al. (2010).

O Modelo Contínuo não é apropriado para todas as formas de comportamento. Por exemplo, ele não leva em conta o regime onde as pessoas estão tão próximas umas as outras que as forças de contato dominam. Ele também está limitado pelo requerimento que as pessoas se movam com um objetivo comum ((TREUILLE; COOPER; POPOVIĆ, 2006), p. 1667).

2.1.4.2 Modelo de Grafos (*Network models*)

O Modelo de grafos simula a multidão como uma fila de pessoas tentando passar por pontos de um grafo, onde as arestas do grafo são as intersecções como portas, elevadores, entradas para trens e escadas Daamen (2002). É um modelo que é incapaz de modelar quase todos os fenômenos observados em multidões, mas é uma boa ferramenta para tentar prever os pontos de alto trânsito de pessoas em grandes áreas. Com ele é possível, por exemplo, modelar o trânsito de pedestres em uma cidade, considerando as estações de ônibus, metrô e as ruas durante um mês. É um modelo que sacrifica a acurácia em troca da performance Duives, Daamen e Hoogendoorn (2013).

2.1.5 Modelos de Simulação Microscópicos

Os modelos microscópicos se preocupam em modelar o pedestre e tentar fazer os fenômenos observados emergirem das interações individuais de cada pedestre. Os modelos microscópicos possuem maior acurácia e capacidade de generalização do que os modelos macroscópicos, mas também possuem maior custo computacional Duives, Daamen e Hoogendoorn (2013).

Suas aplicações vão desde simulação de evacuação e planejamento de edificações, até animação de multidões em filmes Aschwanden, Halatsch e Schmitt (2008).

2.1.5.1 Autômato Celular (*Celular automata*)

Autômato celular foi proposto por von Neumann, na década de 1940. Anos depois foi publicado um livro sobre autômato celular Neumann (1966). Ele foi proposto como um modelo discreto e determinístico para reproduzir replicação de robôs. Basicamente, autômato celular divide todo o espaço em pequenas células, onde cada célula pode estar ocupada ou desocupada e a cada instante de tempo o pedestre pode estar ocupando uma célula ou não. O tempo também é discreto. Seu uso em simulação de pedestres começou com (BLUE; EMBRECHTS; ADLER, 1997).

Embora seja um modelo com baixo custo computacional, ele é um modelo discreto que restringe bastante a movimentação do pedestre, já que este só pode dar um passo de cada vez e pode apenas se movimentar dentro da grade de células, não simulando muito bem movimentos na diagonal. Além disso, a interação se dá de uma forma local, isto é, o pedestre normalmente só é afetado pelos pedestres ao seu redor. Essa suposição inerente a todos os autômatos celulares é uma simplificação muito grande do que acontece na realidade Pelechano e Malkawi (2008).

2.1.5.2 NOMAD

NOMAD é um modelo proposto por (HOOGENDOORN; BOVY, 2004; HOOGENDOORN, 2001) inspirado no MFS. NOMAD parte do pressuposto de que as equações do MFS descrevem desconforto ou custo, dessa maneira, o pedestre sempre está procurando uma forma de minimizar o seu custo/desconforto para cumprir a trajetória. Com base nisso, Hoogendoorn criou um modelo em que todo o movimento do pedestre, até mesmo seu planejamento de trajetória, é feito na tentativa de minimizar as funções de custo. Dessa forma, o modelo NOMAD generaliza a ideia do MFS para os níveis táticos e estratégicos. Na revisão feita por Duives, Daamen e Hoogendoorn (2013), o modelo NOMAD apresentou excelente capacidade de reproduzir os fenômenos que foram observados e descritos na literatura, mas apresentou alto custo computacional para grandes multidões ($n > 1000$).

2.1.5.3 Modelo de Forças Sociais (*Social Force Model*)

O modelo de forças sociais (MFS) foi proposto por (HELBING; MOLNAR, 1995). O MFS usa equações diferenciais para descrever as forças psicológicas que o pedestre sente. Essas forças podem ser interpretadas como o nível de desconforto que o pedestre está sentindo. O MFS sofreu algumas modificações desde a sua criação, mas a estrutura básica é a mesma. São 3 forças e a interação entre elas é que cria os fenômenos complexos. A força de desejo (*desired force*) é a força que atrai o pedestre em direção à saída. A força de obstáculo (*obstacle force*) é a força de repulsão que o pedestre sente em relação aos obstáculos (paredes, mesas, cadeiras). A força social (*social force*) é a força responsável pela repulsão entre os pedestres Parisi, Gilman e Moldovan (2009). Por último existe o termo aleatório (ϵ) que é um vetor de força gerada aleatoriamente e responsável por eliminar o determinismo do modelo. Esse termo representa a natureza incerta de modelar multidões e seus movimentos e torna o MFS um sistema estocástico Moussaïd et al. (2009), Helbing, Farkas e Vicsek (2000).

2.1.5.4 Multiagente

Sistema multiagente é um termo genérico para descrever diversos modelos que usam agentes se comunicando para atingir um determinado objetivo. Com respeito a modelar multidões, existe uma multitude de sistemas multiagentes. Foi encontrado na literatura autores que consideram o MFS um sistema multiagente ou têm usado o MFS como base, para se criar um sistema multiagente. Para esta análise, não será incluído o MFS como um sistema multiagente. Serão considerados apenas os modelos que se baseiam em diversas regras para produzir simulação de multidões, e não em modelos que usam equações diferenciais, mesmo que alguns autores considerem o MFS e os modelos derivados dele como multiagente Orazio et al. (2014) e Murphy, Brown e Sreenan (2013). O paradigma de multiagente realmente é o que tem mais poder de simular multidões, já que pode ser estendido para situações onde os pedestres ficam violentos ou entram em conflito com outros Wijermans (2011). A capacidade de modelar problemas complexos dos sistemas multiagentes é muito superior aos outros modelos microscópicos e macroscópicos. O principal problema dos sistemas multiagentes muito elaborados é o seu custo computacional. Na revisão feita por Duives, Daamen e Hoogendoorn (2013), por exemplo, o modelo multiagente de Wijermans (2011) teve como sua principal ineficiência em relação aos outros modelos o quesito custo computacional.

A enorme complexidade da modelagem de um agente, a necessidade de dados e regras para alimentar o sistema e o tempo computacional (embora de acordo com a Lei de Moore o poder de processamento continua aumentando) têm criado algumas dificuldades nessa abordagem [Multiagente] ((ALMEIDA; ROSSETI; COELHO, 2013), p. 6).

2.1.6 Resultado da Análise Qualitativa dos Modelos

Ao analisar os modelos, todos os que precisavam de *hardware* especial para rodar a simulação ou tinham custo computacional alto foram descartados. Assim os modelos NOMAD e Multiagentes foram desconsiderados. Após isso, foram verificados os modelos que tinham capacidade de generalizar a escolha de rota e podiam reproduzir os fenômenos descritos na literatura. Com base nesta análise, foi criado o Quadro 1, onde as características favoráveis presentes em um modelo são marcadas em cinza, e quando o modelo não é capaz de demonstrar essa característica é marcado em branco. Assim, conforme é possível observar no Quadro 1, o MFS foi o modelo que apresentou a melhor relação custo computacional *versus* capacidade de simulação. Na próxima Seção serão aprofundadas as equações do MFS. Serão explicadas as relações entre as variáveis do modelo para que assim as regras *fuzzy* sejam extraídas do conhecimento implícito nas equações.

Tabela 1 – Quadro de comparação de modelos de simulação

Fenôm./Model.	Contínuo	Grafos	Autômato	NOMAD	MFS	Agentes
Filas						
Anda-e-Para						
Turbulência						
Manada						
Zipper						
Rápido-é-dev.						
Rota						
Custo Comput.						

2.1.7 Modelo de Forças Sociais (*Social Force Model*)

Após análise dos diversos modelos usando o critério qualitativo conforme exposto no Quadro 1, chegou-se à conclusão de que o MFS tinha a melhor relação custo computacional *versus* capacidade de simulação. As fórmulas foram retiradas principalmente do trabalho (MOUSSAÏD et al., 2009), embora os trabalhos de (HELBING; FARKAS; VICSEK, 2000) e (HELBING; JOHANSSON, 2011) também influenciaram o modelo usado como base. No modelo usado como base têm-se quatro forças mais o termo aleatório. As primeiras três forças (desejo, obstáculo e social) representam as intenções psicológicas do pedestre. A última (força granular) representa a interação física quando um pedestre entra em contato com outro pedestre e o termo aleatório é um vetor de força relativamente pequeno cujo único propósito é tornar a simulação estocástica.

A escolha do MFS como modelo primordial deste trabalho foi feita a partir de critérios práticos. Não foram feitas análises qualitativas e tão pouco quantitativas das várias implementações propostas do modelo. Entre as várias versões do modelo MFS propostas, adotou-se como base uma versão disponibilizada por Gloor (2016) devido a esta ser de código aberto e já amplamente utilizada.

No MFS, se o pedestre está no seu cenário confortável, o resultado das equações diferenciais é zero. Por isso, o MFS pode também ser interpretado como uma medida de desconforto do pedestre, e o seu resultado como a quantidade de força que o pedestre deseja aplicar para que consiga voltar a uma situação confortável.

No MFS os pedestres são pequenos círculos em 2D, com tamanho variado e massa que se deslocam conforme uma série de forças. Essas forças, com exceção da força granular, não representam nenhuma interação física. As forças representam a intenção psicológica que o pedestre tem de desviar de um obstáculo ou pessoa. O MFS também não trata de nenhuma forma de planejamento de rotas. Algoritmos de rotas podem ser aplicados ao MFS, por isso foi incluído no quadro como um modelo que tem capacidade de receber planejamento de rotas, mas o modelo em si não tem essa capacidade embutida nele. O MFS apenas se preocupa com a parte operacional de desviar das pessoas e obstáculos próximos e encaminhá-las ao objetivo local.

2.1.7.1 Equação MFS

Para entender detalhadamente o MFS e como cada parâmetro e variável se relacionam dentro do modelo, será apresentada a fórmula geral e será gra-

dualmente explicado cada termo que o compõe. A equação geral do MFS é apresentado na fórmula 2.1

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \text{desejo}_i(\vec{x}_i, \vec{e}, \vec{v}_i, m_i) + \sum_{j \neq i} s_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij}) + \text{obstáculo}_{iw}(\vec{x}_i, \vec{x}_w, r_i) + \varepsilon \quad (2.1)$$

Onde:

i é o pedestre que está sendo calculado.

m_i é a massa do pedestre, v_i é a velocidade atual do pedestre e t é o tempo.

\vec{x}_i é o vetor com posição atual do pedestre i .

\vec{e} é o vetor com a posição para onde o pedestre deseja se movimentar.

\vec{v}_i é a velocidade atual do pedestre i .

\vec{x}_j é a posição atual de um dos outros pedestres, usada para calcular a força social.

\vec{v}_{ij} é a velocidade relativa do pedestre i em relação ao pedestre j .

r_{ij} é a soma dos raios do pedestre i , com o pedestre j .

\vec{x}_w é a posição do ponto do obstáculo mais perto do pedestre i .

r_i é o raio do pedestre i .

A função $\text{desejo}_i(\vec{x}_i, \vec{e}, \vec{v}_i, m_i)$ representa a força que compele o pedestre em direção à saída ou ao seu destino.

A função $s_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij})$ representa a força de repulsão que um pedestre sente em relação ao outro, sendo que essa força não é física, mas sim o instinto natural de evitar contato com outro pedestre e tentar desviar dele.

A função $\text{obstáculo}_{iw}(\vec{x}_i, \vec{x}_w, r_i)$ representa a força de repulsão do pedestre em relação ao obstáculo mais próximo dele no momento, que da mesma forma não é uma força física, mas o instinto natural de desviar de obstáculos.

ε é um termo randômico para quebrar o determinismo do modelo.

Ambas as funções $s_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij})$ e $\text{obstáculo}_{iw}(\vec{x}_i, \vec{x}_w, r_i)$ têm uma subfunção $g_i(d_{ij} - r_{ij}, \vec{e}_{ij}, \vec{v}_{ij})$ que calcula a força quando o pedestre entra em contato com outro pedestre ou um obstáculo. Essa força que representa o atrito físico é chamada de força granular. A força granular é apresentada e explicada na equação 2.19.

2.1.7.2 Força de Desejo (*Desired Force*)

A primeira força é a força de desejo (*Desired Force*). Para seu valor ser igual a zero, o pedestre precisa estar se movendo a uma velocidade desejada em direção ao objetivo local. Se o pedestre estiver acima ou abaixo da

velocidade, a equação resulta em um valor diferente de zero para desacelerar ou acelerar o pedestre até que ele atinja a velocidade de conforto. Se o pedestre estiver andando na direção errada, a força de desejo começará a alterar a direção de movimento do pedestre para que ele corrija sua direção e passe a andar em direção ao objetivo local.

A função $desejo_i(\vec{x}_i, \vec{e}, \vec{v}_i, m_i)$, expressa na equação (2.2) se preocupa apenas em atrair o pedestre em direção ao obstáculo com uma determinada velocidade e direção. Conforme o pedestre vai adquirindo a velocidade e direção desejada a força vai enfraquecendo. Essa dependência de direção e velocidade é dada pelo termo $-\vec{v}_i$ que é a velocidade atual, assim, conforme o pedestre vai adquirindo a velocidade desejada que é $v_i^0 \vec{e}_i^0$, ficará cada vez mais perto do ponto de conforto que é quando o valor do termo \vec{v}_i se torna igual ao valor do termo $v_i^0 \vec{e}_i^0$. Dessa maneira, quando o pedestre atingir o ponto de conforto, o termo $v_i^0 \vec{e}_i^0 - \vec{v}_i$ será igual a zero e consequentemente a força de desejo também será zero Moussaïd et al. (2009).

$$desejo_i(\vec{x}_i, \vec{e}, \vec{v}_i, m_i) = \frac{v_i^0 \vec{e}_i^0 - \vec{v}_i}{m_i \tau_i} \quad (2.2)$$

Onde:

O parâmetro \vec{x}_i é o vetor com a posição atual do pedestre.

O parâmetro \vec{e} é o vetor da posição aonde o pedestre i deseja ir.

O parâmetro \vec{v}_i é o vetor com a velocidade atual do pedestre i .

O parâmetro m_i é a massa do pedestre i .

A variável v_i^0 é a velocidade desejada pelo pedestre i .

A variável \vec{e}_i^0 é o vetor de direção normalizado, calculado conforme a Equação (2.3):

$$\vec{e}_i^0 = \frac{\vec{x}_i - \vec{e}}{\|\vec{x}_i - \vec{e}\|} \quad (2.3)$$

A constante τ_i é o tempo de relaxamento do pedestre i .

2.1.7.3 Força de Obstáculo (*Obstacle Force*)

A segunda força é a força de obstáculo. Para seu valor ser igual a zero, o pedestre precisa estar longe de obstáculos. À medida que o pedestre vai se aproximando a intensidade da força vai exponencialmente aumentando. A direção da força sempre será perpendicular ao obstáculo e na direção oposta ao obstáculo relativo ao pedestre, afastando o pedestre do obstáculo.

Para calcular a função $obstaculo_{iw}(\vec{x}_i, \vec{x}_w, r_i)$ é usada a fórmula(2.4):

$$obst\u00e1culo_{iw}(\vec{x}_i, \vec{x}_w, r_i) = [A_i \exp(\frac{r_i - d_{iw}}{B_i})] \vec{n}_{iw} + g_i(d_{ij} - r_{ij}, \vec{e}_{ij}, \vec{v}_{ij}) \quad (2.4)$$

O termo $[A_i \exp(\frac{r_i - d_{iw}}{B_i})]$ calcula a magnitude da inten\u00e7\u00e3o de desviar do obst\u00e1culo, onde A \u00e9 a constante de magnitude e B \u00e9 o raio de a\u00e7\u00e3o da for\u00e7a. Por exemplo, ao reduzir o par\u00e2metro B , a curva da fun\u00e7\u00e3o gerada ser\u00e1 mais abrupta e come\u00e7ar\u00e1 a crescer s\u00f3 quando o pedestre estiver bem perto do obst\u00e1culo, logo um B maior faz com que o valor final fique mais local. Um B maior faz com que a for\u00e7a fique mais distribu\u00edda. O par\u00e2metro r_i \u00e9 o raio do pedestre i . O termo $r_i - d_{iw}$ representa a dist\u00e2ncia real entre o pedestre i e o obst\u00e1culo w .

O vetor \vec{n}_{iw} \u00e9 o vetor direcional tangencial que faz o pedestre desviar do obst\u00e1culo. \u00c9 um vetor normalizado. Esse vetor \u00e9 a dire\u00e7\u00e3o da for\u00e7a que afasta o pedestre i do ponto mais pr\u00f3ximo ao obst\u00e1culo. Para calcular \u00e9 usada a f\u00f3rmula (2.5):

$$\vec{n}_{iw} = \frac{(\vec{x}_w - \vec{x}_i)}{\|\vec{x}_w - \vec{x}_i\|} \quad (2.5)$$

O par\u00e2metro \vec{x}_i \u00e9 a posi\u00e7\u00e3o central do c\u00edrculo que representa o pedestre i .

O par\u00e2metro \vec{x}_w \u00e9 a posi\u00e7\u00e3o do ponto do obst\u00e1culo w que est\u00e1 mais pr\u00f3ximo ao pedestre i . Para calcular \vec{x}_w , considerando que o obst\u00e1culo \u00e9 uma linha reta que inicia no ponto \vec{x}_{ws} e termina no ponto \vec{x}_{we} , utiliza-se a equa\u00e7\u00e3o (2.6):

$$\begin{aligned} \vec{r}_e &= \vec{x}_{we} - \vec{x}_{ws} \\ \vec{r}_p &= \vec{x}_i - \vec{x}_{ws} \\ \lambda &= (\vec{r}_p \cdot \vec{r}_e) / (\vec{r}_e \cdot \vec{r}_e) \\ \vec{x}_w &= \begin{cases} \text{se } \lambda \leq 0 & \vec{x}_{ws} \\ \text{se } \lambda \geq 1 & \vec{x}_{we} \\ \text{sen\u00e3o} & \vec{x}_{ws} + \lambda \vec{r}_e \end{cases} \end{aligned} \quad (2.6)$$

As vari\u00e1veis \vec{r}_e , \vec{r}_p e \vec{x}_w s\u00e3o apenas vari\u00e1veis internas da f\u00f3rmula para demonstrar com mais clareza o c\u00e1lculo de \vec{x}_w .

A vari\u00e1vel d_{iw} \u00e9 a dist\u00e2ncia entre os pontos \vec{x}_i e \vec{x}_w . Para se calcular a dist\u00e2ncia usa-se o m\u00f3dulo da diferen\u00e7a entre os pontos \vec{x}_i e \vec{x}_w , conforme a f\u00f3rmula(2.7):

$$d_{iw} = \|\vec{x}_w - \vec{x}_i\| \quad (2.7)$$

Onde:

O parâmetro \vec{x}_i é a posição central do círculo que representa o pedestre.

O parâmetro \vec{x}_w é a posição do ponto do obstáculo w que está mais próximo ao pedestre i . Para calcular, considerando que o obstáculo é uma linha reta que inicia no ponto \vec{x}_{ws} e termina no ponto \vec{x}_{we} utiliza-se a equação (2.6).

2.1.7.4 Força Social (*Social Force*)

A força social tem como objetivo evitar que o pedestre entre em contato com outro pedestre durante a movimentação. Os pedestres evitam entrar em contato porque isso reduz a velocidade e é considerado rude, mais ainda, o pedestre i não sabe a reação do outro pedestre j , que pode ser violenta. Assim sendo, a zona de conforto (segundo a força social) é aquela onde o pedestre i tem a percepção que o risco de entrar em contato com outro pedestre j é baixo ou nulo. A força social considera três coisas na hora de averiguar se existe chance de um pedestre entrar em contato com outro pedestre: a velocidade relativa, o ângulo de visão e a distância em relação ao outro pedestre. Essas três coisas precisam estar juntas para o pedestre se sentir desconfortável. Se o pedestre não sente que o outro pedestre está se aproximando (velocidade relativa), mesmo que esse outro pedestre esteja perto (distância) e na sua frente (ângulo de visão), ele não vai se sentir desconfortável.

A força social pode ser dividida em duas outras forças: a força de repulsão e a força de mudança de direção. As forças de repulsão e de mudança de direção são praticamente idênticas, as duas diferenças são a direção, sendo a de repulsão desacelerando o pedestre e a de mudança de direção perpendicular a de repulsão. A outra diferença é a intensidade de força cujo os valores nos parâmetros n e n' fazem com que as duas forças tenham em algumas situações valores distintos.

A função $s_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij})$ é igual a:

$$soc_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij}) = r_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij}) + m_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij}) + g_i(d_{ij} - r_{ij}, \vec{e}_{ij}, \vec{v}_{ij}) \quad (2.8)$$

A função que calcula a força de repulsão (2.9) faz o pedestre desacelerar quando vê um outro pedestre na frente dele.

$$r_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij}) = -A \exp\left(\frac{r_{ij}-d}{B} - (nB\theta)^2\right) \vec{t}_{ij} \quad (2.9)$$

A função que calcula a força de mudança de direção (2.10) faz o pedestre mudar a sua direção para desviar de uma possível colisão.

$$m_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij}) = AK \exp\left(\frac{r_{ij}-d}{B} - (n'B\theta)^2\right) \vec{n}_{ij} \quad (2.10)$$

As funções 2.9 e 2.10 são bastante parecidas, possuem um termo de magnitude quase idêntico e um vetor de direção da força no final. O vetor de direção é a variável \vec{t}_{ij} no caso da repulsão e a variável \vec{n}_{ij} no caso da mudança de direção. Assim, para evitar repetição os termos e parâmetros repetidos serão explicados uma única vez.

O parâmetro \vec{x}_i é a posição atual do pedestre i que é o pedestre que está sendo atualmente considerado no cálculo da força.

O parâmetro \vec{x}_j é a posição do pedestre j . O pedestre j é o outro pedestre que está no raio de ação da força social do pedestre i .

O parâmetro \vec{v}_{ij} é a velocidade relativa do pedestre i em relação ao pedestre j . Ela é calculada na equação (2.11):

$$\vec{v}_{ij} = (\vec{v}_i - \vec{v}_j) \quad (2.11)$$

Onde \vec{v}_i é a velocidade vetorial do pedestre i e \vec{v}_j é a velocidade vetorial do pedestre j .

A variável B tem dupla finalidade dentro do termo $\frac{r_{ij}-d}{B}$. A primeira finalidade da variável B indica o raio de ação da força: quanto menor o B , menor será o raio de ação da força e mais rápido ela vai decrescer a partir do centro. A segunda finalidade da variável B é dentro do termo $B\theta$, onde ela contrabalança o efeito decrescente do ângulo que tem valor zero quando o pedestre j está exatamente na frente do pedestre i . Assim, um B maior diminui o ângulo de visão do pedestre e um B igual a zero faz a força social se distribuir igualmente por todos os ângulos de visão. Ela é o produto da constante γ e do módulo do vetor de interação \vec{D}_{ij} , conforme demonstrado na equação(2.12):

$$B = \gamma \|\vec{D}_{ij}\| \quad (2.12)$$

O vetor \vec{D}_{ij} é o vetor de interação, ele considera a velocidade atual do pedestre i e a sua interação com a direção em relação ao pedestre j . Ele é calculado com $\vec{D}_{ij} = \lambda(\vec{v}_i - \vec{v}_j) + \vec{e}_{ij}$ onde a constante λ indica o quanto a velocidade vai influenciar no vetor de interação. \vec{v}_i é a velocidade atual do pedestre i , \vec{v}_j é a velocidade do outro pedestre j e \vec{e}_{ij} é o vetor de direção do pedestre i em relação ao j , conforme a equação 2.13

$$\vec{D}_{ij} = \lambda \vec{v}_{ij} + \vec{e}_{ij} \quad (2.13)$$

O vetor \vec{e}_{ij} é o vetor de direção que aponta do pedestre i para o j . Ele é calculado normalizando a diferença entre o vetor \vec{x}_j e o \vec{x}_i , conforme a equação 2.14.

$$\vec{e}_{ij} = \frac{(\vec{x}_j - \vec{x}_i)}{\|\vec{x}_j - \vec{x}_i\|} \quad (2.14)$$

O ângulo em radianos θ é o ângulo entre o vetor de interação (\vec{D}_{ij}) e o vetor de direção (\vec{e}_{ij}). Ele varia de $-\pi$ (totalmente à direita) até π (totalmente à esquerda), o valor zero seria o ângulo exatamente em frente. A melhor forma de calcular esse ângulo em 2D é usando a função $atan(x, y)$ que retorna o ângulo absoluto. Conforme a equação(2.15):

$$\begin{aligned} \theta_i &= atan(D[1], D[2]) \\ \theta_e &= atan(e[1], e[2]) \\ \theta_a &= \theta_e - \theta_i \\ \theta &= \begin{cases} \theta_a + 2\pi & \text{se } \theta_a < -\pi \\ \theta_a - 2\pi & \text{se } \theta_a > \pi \end{cases} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Serão agora explicados os itens que são únicos da força repulsiva e de mudança de direção.

A constante n' (Repulsiva) e n (Mudança de direção) são constantes que refletem a dependência da força em relação ao ângulo, conforme experimentos realizados por (MOUSSAÏD et al., 2009). Em geral n é menor do que n' , refletindo uma maior dependência angular da força de repulsão. Isto é, o pedestre tem uma tendência maior a mudar de direção do que de desacelerar para evitar um contato, só desacelerando em situações extremas Moussaïd et al. (2009).

A variável K , que aparece apenas na equação da mudança de direção, é o valor do sinal da função $m_{ij}(\vec{x}_i, \vec{x}_j, \vec{v}_{ij}, r_{ij})$ que reflete a decisão do pedestre de virar à direita ou à esquerda, dependendo do seu ângulo em relação ao outro pedestre. Os únicos valores possíveis são 1(esquerda) e -1(direita).

$$K = \frac{\theta}{|\theta|} \quad (2.16)$$

O vetor \vec{t}_{ij} é o vetor de interação normalizado que aponta a direção

para onde o pedestre irá se encaminhar, conforme a equação(2.17):

$$\vec{t}_{ij} = \frac{\vec{D}_{ij}}{\|\vec{D}_{ij}\|} \quad (2.17)$$

É importante notar que esse vetor é a direção da força de desaceleração. Assim sendo, a equação do vetor de interação que é a soma dos vetores \vec{e}_i e \vec{v}_{ij} , ao ser normalizada, pode ser interpretada como uma média entre os ângulos dos vetores. Se interpretarmos o ângulo do vetor \vec{e}_i como o ângulo 0 e o vetor \vec{v}_{ij} como 1, podemos notar que o ângulo vai subindo de 0 para 1 conforme a intensidade da velocidade vai aumentando. Mesmo que o ângulo seja diferente a função de relação entre os dois quase não se altera, conforme demonstrado na Figura 13.

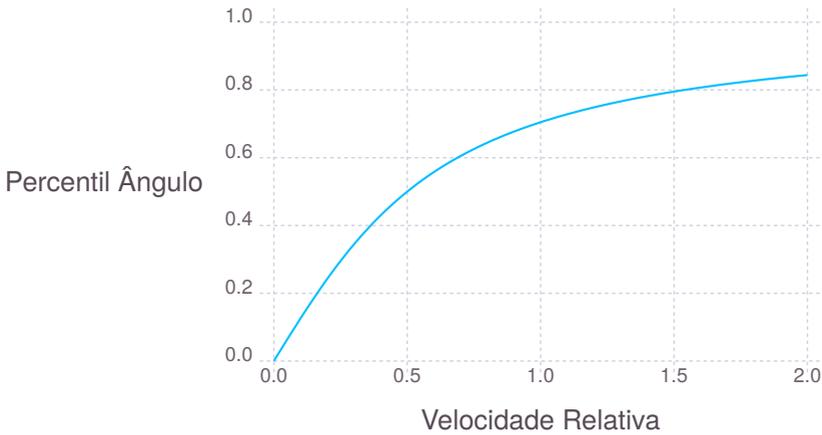


Figura 13 – Ângulo do vetor de interação conforme a velocidade relativa aumenta.

O vetor \vec{n}_{ij} aponta para a direção onde o pedestre i irá se mover para desviar do pedestre j . Ele sempre aponta para a esquerda. O que faz a direção da força de mudança de direção apontar para a direita é a variável K com valor (-1). O vetor \vec{n}_{ij} é exatamente a direção de \vec{t}_{ij} virado 90° à esquerda, assim basta fazer uma troca com os valores dentro do vetor \vec{t}_{ij} , conforme a equação(2.18):

$$\vec{n}_{ij} = [-t_{ij}[2], t_{ij}[1]] \quad (2.18)$$

2.1.7.5 Força Granular (*Granular Force*)

Em áreas muito populosas ou em situações de pânico as forças psicológicas não são suficientes para fazer os pedestres não tocar nos obstáculos ou em outras pessoas. Nessas situações as intenções/forças psicológicas não são as únicas em ação. Os pedestres começam a se empurrar e o atrito entre eles diminui a velocidade da multidão Helbing, Farkas e Vicsek (2000). Essa força de natureza física é modelada pela força granular (Equação 2.19):

$$g_i(d_{ij} - r_{ij}, \vec{e}_{ij}, \vec{v}_{ij}) = g_i(d_r)[rep_i(d_r, \vec{e}_r) + fric_i(d_r, \vec{e}_r, \vec{v}_r)] \quad (2.19)$$

Onde:

O parâmetro d_r é a distância real entre pedestres ($d_r = d_{ji} - r_i - r_j$) ou entre pedestres e a parede ($d_r = d_{iw} - r_i$).

O parâmetro \vec{v}_r é a velocidade relativa entre pedestres ($\vec{v}_r = \vec{v}_i - \vec{v}_j$) ou entre pedestres e um obstáculo ($\vec{v}_r = \vec{v}_i$).

O parâmetro e_r é direção de repulsão entre dois pedestres $\vec{e}_r = \vec{e}_{ij}$ ou entre dois pedestres e um obstáculo $\vec{e}_r = \vec{e}_{iw}$.

A função de sinalização de contato $g_{ij}(d_r)$ é zero quando a distância é positiva e $-d_{ij}$ quando é negativa. Quando o valor da função de sinalização não é zero o pedestre i está em contato com outro pedestre, ou o pedestre i está em contato com um obstáculo. A função de sinalização de contato é calculada pela Equação 2.20:

$$g(d_r) = \begin{cases} 0 & \text{se } d_r > 0 \\ (-d_r) & \text{senão} \end{cases} \quad (2.20)$$

A função repulsora $rep_i(d_r)$ faz o pedestre i se mover para trás e parar de ocupar o mesmo espaço que o pedestre j ou que um obstáculo. A função repulsora está representada na equação 2.21:

$$rep_i(\vec{e}_r) = k_e(\vec{e}_r) \quad (2.21)$$

Onde:

A constante k_e é uma constante muito alta. Na literatura é sugerido o valor de $1.2 * 10^5$ Helbing, Farkas e Vicsek (2000).

A função de atrito $rep_i(d_r, \vec{e}_r, \vec{v}_r)$ simula o atrito quando o pedestre i está em contato com outro pedestre ou obstáculo. A função de fricção é

calculada pela equação 2.22:

$$fric_i = k_s (\vec{v}_{ij} \cdot \vec{s}_{ij}) \vec{s}_{ij} \quad (2.22)$$

Onde:

A constante k_s é uma constante muito alta, cujo valor sugerido é o valor $2.4 * 10^5$ Helbing, Farkas e Vicsek (2000).

O vetor $\vec{s}_r = [-e_{ij2}, e_{ij1}]$ é perpendicular ao vetor \vec{e}_r e aponta para a esquerda. O vetor retornado pela função de fricção vai virar para a esquerda ou para a direita por causa do termo $(\vec{v}_{ij} \cdot \vec{s}_{ij})$ que muda o sinal dependendo da direção do movimento.

2.2 SISTEMAS FUZZY

A lógica *fuzzy* é uma forma de lógica multivalorada que foi proposta por Zadeh (1965). Ela usa graus de verdade para descrever a vagueza em suas proposições.

Sistemas de inferência *Fuzzy* processam a lógica *fuzzy* em três etapas:

1. Fuzzificação, que transforma variáveis *crisp* em variáveis *fuzzy*.
2. Inferência, que usa as regras *fuzzy* para calcular os valores dos conjuntos das variáveis de saída usando os valores das variáveis de entrada.
3. Desfuzzificação, que transforma as variáveis de saída *fuzzy* em um valor *crisp* de saída.

Cada variável *fuzzy* possui dois ou mais conjuntos que descrevem o grau de verdade. Cada conjunto é relacionado com uma função que o descreve. Essa função é chamada de função de pertinência.

As regras linguísticas de sistemas *fuzzy* expressam explicitamente o conhecimento e tornam fáceis de entender, parametrizar e estender.

Nas próximas Subsecções será explicado cada um dos conceitos de sistema *fuzzy*.

2.2.1 Metodologias de Sistemas *Fuzzy*

A abordagem das regras linguísticas *Fuzzy* não está restrita a uma metodologia. As duas mais comuns são a Mamdani e a Takagi-Sugeno. Serão discutidas as vantagens e desvantagens desses dois modelos para esclarecer porque o método Mamdani é mais adequado para a presente pesquisa.

2.2.1.1 Mamdani

O sistema de inferência *fuzzy* Mamdani foi proposto por Mamdani (1974). O sistema Mamdani usa regras linguísticas no formato:

Este modelo tem como vantagem sua maior interpretabilidade, todas as variáveis são descritas de forma linguística. A sua desvantagem é o maior custo computacional em relação aos outros modelos como o Takagi-Sugeno Kaur e Kaur (2012), Ross (2009).

2.2.1.2 Takagi-Sugeno

O sistema de inferência Takagi-Sugeno foi proposto por (TAKAGI; SUGENO, 1983). As regras são no formato "SE x é A e y é B então $f(x,y)$ ", onde $z = f(x,y)$ é uma função polinomial que descreve saída associada à inferência de uma regra *fuzzy*. Takagi-Sugeno tem menos custo computacional e sua implementação é mais fácil de otimizar. A desvantagem é a interpretabilidade Ross (2009). É difícil extrair um valor semântico de uma função polinomial.

2.2.1.3 Comparação entre os dois sistemas

Após uma análise qualitativa, verificando quais regras teriam maior interpretabilidade, foi concluído que a metodologia Takagi-Sugeno pouco melhoraria a interpretabilidade do modelo MFS. Embora a metodologia Takagi-Sugeno possua menor custo computacional, no presente trabalho o custo computacional não é o objetivo, e sim a interpretabilidade. A preocupação com o custo computacional é apenas de continuar a ter um custo computacional adequado, mas não é o objetivo deste trabalho diminuir o custo computacional, apenas não aumentar em mais que uma ordem de magnitude. Além disso, usar o modelo Takagi-Sugeno em conjunto com o MFS já foi tentado por Zhu, Liu e Tang (2008), com pouca melhoria na interpretabilidade.

2.2.2 Conjuntos *Fuzzy*

Ao criar a lógica *fuzzy*, Zadeh (1965) cria o conceito de conjuntos *fuzzy*. Na lógica clássica, um elemento ou está em um conjunto (valor um) ou não está (valor zero). Na lógica *fuzzy*, um determinado elemento pode estar simultaneamente em vários conjuntos *fuzzy* com graus de pertencimento que variam entre zero e um.

Para descrever o grau de pertencimento a um conjunto é usada uma função de pertinência. A função de pertinência será explicada na próxima Subseção.

2.2.3 Função de Pertinência

Uma função de pertinência descreve a relação entre o grau de pertencimento(y) e o valor *crisp*(x) de um conjunto *fuzzy*. A escolha de tipo de função de pertinência varia conforme o problema.

Este trabalho usou três tipos de função de pertinência, Sigmoidal, Gaussiana e Triangular, apresentadas nas equações 2.23, 2.24 e 2.25 que estão também representadas visualmente nas figuras 14, 15 e 16,.

$$\text{sigmf}(x) = 1.0 / (1.0 + e^{-\text{slope} * (x - \text{inflection})}) \quad (2.23)$$

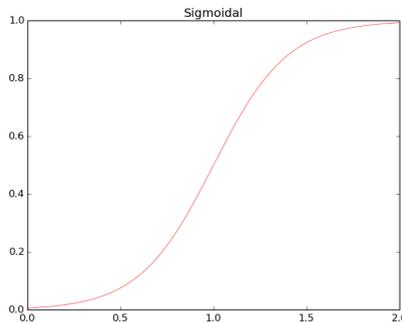


Figura 14 – Sigmoidal.

$$\text{gaussmf}(x) = e^{-((x-c)^2/2s^2)} \quad (2.24)$$

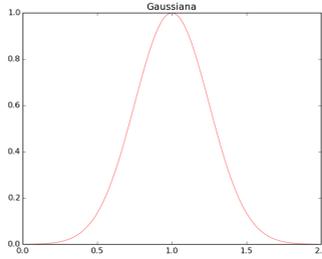


Figura 15 – Gaussiana.

$$\text{triangmf}(d_r) = \begin{cases} 0 & \text{se } (x < a) \vee (x > c) \\ 1 & \text{se } x == b \\ (x - a)/(b - a) & \text{se } x < b \\ (c - x)/(c - b) & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.25)$$

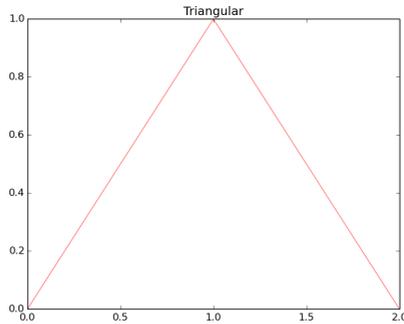


Figura 16 – Triangular.

2.2.4 Variáveis *Fuzzy*

Zadeh define variável linguística como uma variável cujos valores são palavras ou sentenças em uma linguagem natural ou artificial Zadeh (1975). As variáveis são formadas por conjuntos *fuzzy*, cada um descrevendo as partes desta variável.

2.2.5 Regras Fuzzy

As regras *fuzzy* expressam as relações entre as variáveis de entrada e a de saída. É com base nessas regras que é feita a inferência *fuzzy*. As regras *fuzzy* no sistema Mamdani são no formato:

”se Variável_{entrada} é CONJUNTO_{fuzzy} então Variável_{saída} é CONJUNTO_{fuzzy}”

Por exemplo, as regras para tentar resolver um problema de atribuição de gorjeta dependendo da qualidade do serviço e da comida, poderiam ser assim:

se Serviço é RUIM e Comida é MAL-FEITA
então Gorjeta é BARATA

se Serviço é BOM
então Gorjeta é MÉDIA

se Comida é MAIS-OU-MENOS
então Gorjeta é MÉDIA

se Serviço é EXCELENTE e Comida é DELICIOSA
então Gorjeta é GENEROSA

2.2.6 Fuzzificação

Fuzzificação é o processo de calcular o grau de pertencimento a cada um dos conjuntos *fuzzy*, baseado no valor *crisp*.

2.2.7 Inferência Fuzzy

Inferência *fuzzy* é o processo de calcular o grau de pertencimento das variáveis de saída baseado nas variáveis de entrada, usando a relação entre as duas descrita pelas regras linguísticas. Os operadores E e OU da lógica clássica são substituídos pelos operadores T-Norma e S-Norma, respectivamente. A inferência é feita em três etapas. A primeira etapa é aquela onde é feita a união dos valores dos conjuntos das variáveis de entrada em cada

uma das regras. Após isso, o valor final da união das variáveis de entrada na regra é atribuído para as variáveis de saída em suas respectivas regras, que depois são unidas na terceira etapa da inferência, onde é montado um conjunto *fuzzy* que é a resposta *fuzzy* das regras. Esse conjunto *fuzzy* é posteriormente desfuzzificado.

2.2.8 T-Norma *Fuzzy*

T-Norma é uma generalização da operação E da lógica clássica. Existem vários tipos de T-Norma descritos na literatura, descrever os diversos tipos de T-Norma vai além do escopo deste trabalho. Aqui será focado em explanar os tipos mais usados em pesquisa e serão explicados quais foram escolhidos para a presente pesquisa. Estes são o Mínimo(2.26) e o Produto algébrico (2.27). Nota-se que em ambos, se for colocado os valores 0 e 1, as funções retornam exatamente igual à operação lógica E.

2.2.8.1 Mínimo

$$\top_{\min}(a, b) = \min(a, b) \quad (2.26)$$

2.2.8.2 Produto Algébrico

$$\top_{\text{prod}}(a, b) = a * b \quad (2.27)$$

2.2.9 S-Norma ou T-Conorma *Fuzzy*

S-Norma é o par da T-norma que inverte a ordem da operação que atribui $1-x$ para x no intervalo $[0, 1]$, ou seja, ela é o complementar da T-Norma, o equivalente à operação OU. Dado uma determinada T-Norma, sua S-Norma complementar será $\perp(a, b) = 1 - \top(1 - a, 1 - b)$

2.2.9.1 Soma Probabilística

A soma probabilística é o complementar do produto algébrico, conforme detalhado a seguir:

$$\perp_{sum}(a, b) = 1 - \top_{prod}(1 - a, 1 - b)$$

$$\perp_{sum}(a, b) = 1 - ((1 - a)(1 - b))$$

$$\perp_{sum}(a, b) = 1 - (1 - b - a + ab)$$

$$\perp_{sum}(a, b) = 1 - 1 + b + a - ab$$

$$\perp_{sum}(a, b) = b + a - ab$$

Logo, a soma probabilística é a função 2.28

$$\perp_{sum}(a, b) = a + b - ab \quad (2.28)$$

2.2.9.2 Máximo

O máximo é o complementar do mínimo, conforme detalhado a seguir:

$$\perp_{max}(a, b) = 1 - \top_{min}(1 - a, 1 - b)$$

Note que $x = 1 - (1 - x)$ para qualquer x no intervalo $[0, 1]$, logo o valor retornado pela função $\perp_{max}(a, b)$ sempre será a ou b . Também nota-se que o valor retornado pela função \min sempre será por definição o menor valor. O menor valor na equação $\min(1 - a, 1 - b)$ quando ambos a e b estão no intervalo $[0, 1]$ é aquele que mais se aproxima de 1. Logo, será retornado o complemento do maior número entre a e b , esse complemento ao ser subtraído de 1 retornará o valor do maior número entre a e b . Retornar o maior número entre dois números é exatamente a definição da função max , logo, o complementar do mínimo é a equação 2.29.

$$\perp_{max}(a, b) = max(a, b) \quad (2.29)$$

2.2.10 Desfuzzyficação

Após a inferência *fuzzy*, os valores do sistema *fuzzy* precisam ser convertidos de volta em valores *crisp* para serem usados no sistema *fuzzy*. Existem diversas técnicas de desfuzzyficação, mas aquela que captura cada valor dos conjuntos *fuzzy* e retira a média de cada um deles é a técnica de centro de gravidade. Para calcular o centro de gravidade, em uma figura com densidade constante, se decompõe a figura em figuras onde é possível calcular facilmente o centro de gravidade e depois se divide a soma do centro de massa multiplicado pela área, pela área total da figura, conforme a fórmula 2.30,

uma técnica bastante comum é o cálculo do centro de massa integrando a área, porém computacionalmente cara é dividir a figura em pequenos retângulos, ao longo do eixo que se deseja calcular o centro de massa:

$$centerOfMass = \frac{\sum a_i c_{ix}}{\sum a_i} \quad (2.30)$$

Onde a_i é a área de uma figura e c_{ix} é o centro de gravidade dessa mesma figura no eixo x .

2.2.11 Considerações sobre a interpretação das regras

Devido à forma com que as regras *fuzzy* trabalham, sistemas de inferência *fuzzy* são usados em diversos campos de pesquisa e tecnologia aplicada para providenciar um método simples e computacionalmente eficiente de lidar com uma diversa gama de problemas. *Fuzzy* tem tantas áreas de atuação que de acordo com Dubois e Prade (1997) as funções de pertinência podem ser interpretadas em três diferentes formas semânticas: similaridade, preferência ou incerteza. Similaridade quer dizer quão parecido uma determinada informação é em relação ao seu respectivo conjunto *fuzzy* e é usada em análise de *cluster fuzzy* e sistemas relacionados. Preferência é o quão viável é uma escolha e é usada em engenharia. Incerteza é a vagueza, o grau de possibilidade. A interpretação de vagueza é usada em sistemas especialistas e em inteligência computacional.

Estas interpretações não são mutuamente exclusivas, mas ajudam a mostrar o objetivo de um sistema de inferência *fuzzy*. Um modelo *fuzzy* preocupado com simulação de pedestres, por exemplo, pode ser interpretado como um sistema de preferência que demonstra a melhor escolha de rota que satisfaz o desejo por sentir conforto, mas o mesmo modelo também poderia ser interpretado como um modelo que trata a incerteza intrínseca no comportamento de pedestres.

2.3 ESTADO DA ARTE DE SIMULAÇÃO FUZZY DE PEDESTRES

Não foram encontradas muitas pesquisas usando *fuzzy* para simular pedestres e usando o MFS. Os únicos dois trabalhos encontrados foram Zhu, Liu e Tang (2008) e Nasir et al. (2014), Nasir, Nahavandi e Creighton (2012). O primeiro não apresentou novos conceitos, apenas utilizou-se de regras Takagi-Sugeno para tentar fuzzificar o modelo, mas não eliminou as equações diferenciais. Os últimos dois apresentaram resultados bem promissores ao usar a

saída do MFS como entrada para um sistema *fuzzy*, com regras Mamdani, de decisão de mudança de rota. Eles demonstraram não somente que *fuzzy* pode contribuir para a simulação de multidões como também que ele pode apresentar resultados melhores, usando aprendizado de máquina, que o próprio MFS, quando comparado com dados reais. O resultado obtido por Nasir et al. (2014) também usou um aprendizado de máquina que não procura otimizar a interpretabilidade das regras e reduzir o número delas. O total de regras usado foi de 216, só para a escolha da rota local.

No campo de aplicações comerciais, o que pode ser considerado estado da arte é o software MASSIVE, o software segundo a própria companhia é capaz de simular milhares de pedestres, usando um sistema multi-agente que utiliza *fuzzy* extensivamente, mas o software não trabalha com nenhum modelo inspirado no MFS e fuzzificado.

Como se pode observar no estudo do estado da arte, foi concluído que um modelo inspirado no MFS, usando *fuzzy*, preocupado com o custo computacional e em usar a quantidade mínima de regras possível, pode contribuir para criar um modelo onde as informações contidas nas equações do MFS sejam explicitamente escritas e possam ser atualizadas e estendidas para reproduzir comportamentos onde o MFS ainda não consegue ser realista. Além disso, este modelo tem o potencial de ser melhor que o próprio MFS, visto que pode se aproveitar de aprendizado de máquina para ajustar as funções de pertinência conforme já demonstrado por Nasir et al. (2014).

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo apresentou-se a fundamentação conceitual do MFS, explicaram-se como as equações matemáticas descrevem as intenções psicológicas dos pedestres e como dela se originam, no próximo Capítulo será apresentado o modelo proposto que trata o problema da interpretabilidade do modelo.

3 PROPOSTA

Durante a pesquisa e experimentos relacionados com a modelagem de pedestres usando lógica *fuzzy* várias ideias foram testadas e avaliadas. A ideia que se apresentou mais promissora foi usar o MFS como base para a geração de regras e conjuntos *fuzzy* que reproduzissem as mesmas intenções psicológicas modeladas pelas equações do MFS. Ao fazer isso, espera-se criar um modelo composto por um conjunto de regras linguísticas que apresente características de uma maior interpretabilidade ao mesmo tempo em que possibilite sua extensão para modelar novos tipos de comportamento humano. Ao modelar cada componente do MFS como um conjunto reduzido de regras *fuzzy*, espera-se que não haja um aumento substancial do custo computacional para execução do modelo, pois isso poderia representar uma condição crítica para a utilização desse novo modelo, o qual será chamado de Modelo *Fuzzy* de Forças Sociais (MFSS).

Para atingir este objetivo e mostrar a aplicabilidade da ideia, todas as forças do MFS foram codificadas como uma série de regras *fuzzy*. A Força Social foi dividida em três pequenos sistemas *fuzzy* (ângulo, intensidade e desaceleração), a Força de Desejo foi dividida em dois (ângulo e intensidade), a Força de Obstáculo foi colocada em apenas um sistema *fuzzy* que trata a intensidade. A força granular é uma interação física e como não trata as intenções dos pedestres não foi traduzida para um sistema *fuzzy*. A Força de Obstáculo não precisou de ângulo porque ela é sempre perpendicular ao obstáculo.

A ideia geral do que foi modificado no MFS para criar o MFSS é apresentado nos diagramas 17 e 18.

Neste trabalho as funções de pertinência foram calibradas empiricamente. Primeiro foram plotadas as equações e foi analisado cada parâmetro e sua relação com o resultado da equação. Dessa relação entre as variáveis foram criadas as regras *fuzzy*. Depois foram plotadas as regras *fuzzy* derivadas dessa relação e as funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* foram ajustadas até parecer o máximo possível com o plote original. Quando a segunda parte falhava, voltava-se à primeira etapa, até ser possível entender qual relação entre as variáveis não havia sido previamente observada e ajustavam-se as regras de acordo. No terceiro passo, a força *fuzzy* era substituída no modelo original e era observado se o MFS continuava a se comportar corretamente. Foi repetido esse processo para todas as forças psicológicas. Quando acabado, o modelo gerado tinha a capacidade e as limitações similares ao MFS, mas usando regras linguísticas *fuzzy* ao invés de equações.

No modelo desenvolvido foi utilizado o produto algébrico como t-

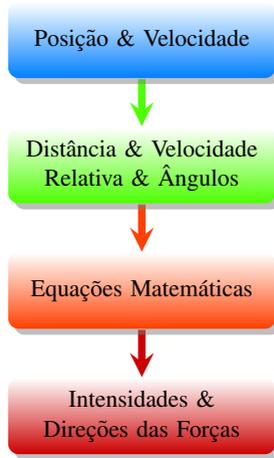


Figura 17 – Diagrama MFS.



Figura 18 – Diagrama MFFS.

norma porque foi observado em nossos experimentos que ele resulta em uma transição entre as regras mais suave.

Todos os parâmetros foram empiricamente ajustados.

Em conformidade com os trabalhos anteriores do MFS foi usado o sistema métrico.

3.1 IMPLEMENTAÇÃO FUZZY DA COMPONENTE FORÇA DE DESEJO

Para se sentir confortável o pedestre deseja duas coisas: se mover na direção do seu objetivo e estar com uma velocidade desejada de conforto, nem tão rápida, nem tão devagar. Então, as regras *fuzzy* foram separadas em dois conjuntos: um conjunto de regras para controlar a intensidade da força exercida sobre o pedestre para que ele atinja a velocidade desejada; e um segundo conjunto de regras que controla a direção da força aplicada sobre o pedestre para que ele se mova na direção desejada. Serão apresentados ambos os sistemas *fuzzy* e depois será feito uma discussão sobre o significado semântico e operacional de cada conjunto de regras.

3.1.1 Regras do Ângulo da Força de Desejo

Os conjuntos ESQUERDA-ATRÁS e DIREITA-ATRÁS representam um grande desconforto e por essa razão eles são relacionados respectivamente com os conjuntos FORTEMENTE-À-DIREITA e FORTEMENTE-À-ESQUERDA, assim o pedestre terá uma mudança abrupta de direção. De forma oposta, os conjuntos ESQUERDA-FRENTE e DIREITA-FRENTE representam um desconforto pequeno e o pedestre irá suavemente ajustar sua direção quando esses conjuntos forem ativados, conforme é possível observar no conjunto de regras a seguir:

se ÂnguloDeDireção é ESQUERDA-ATRÁS
então ÂnguloDeVirada é FORTEMENTE-À-DIREITA

se ÂnguloDeDireção é ESQUERDA-FRENTE
então ÂnguloDeVirada é FRACAMENTE-À-DIREITA

se ÂnguloDeDireção é FRENTE
então ÂnguloDeVirada é CENTRO

se ÂnguloDeDireção é DIREITA-FRENTE
então ÂnguloDeVirada é FRACAMENTE-À-ESQUERDA

se ÂnguloDeDireção é DIREITA-ATRÁS
então ÂnguloDeVirada é FORTEMENTE-À-ESQUERDA

A variável de entrada *ÂnguloDeDireção* é dividida em cinco conjuntos gaussianos, cada um representando o intervalo dos ângulos. Os valores

negativos são à esquerda e os valores positivos à direita em relação à direção desejada de movimentação. A configuração dos conjuntos é:

ESQUERDA-ATRÁS, $c = -\pi$ e $s = 0.2\pi$,

ESQUERDA-FRENTE, $c = -0.5\pi$ e $s = 0.2\pi$,

FRENTE, $c = 0$ e $s = 0.2\pi$,

DIREITA-FRENTE, $c = 0.5\pi$ e $s = 0.2\pi$,

DIREITA-ATRÁS, $c = \pi$ e $s = 0.2\pi$.

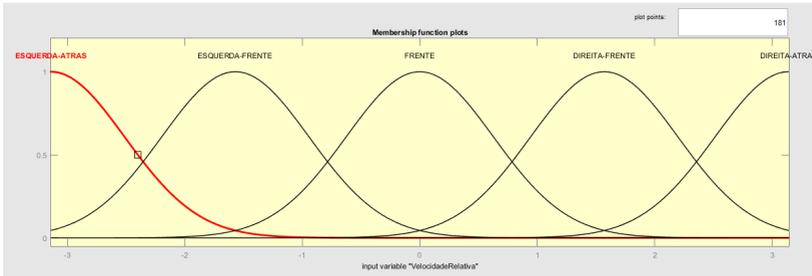


Figura 19 – Funções de pertinência do $\hat{\text{AnguloDeDireção}}$.

A variável de saída $\hat{\text{AnguloDeVirada}}$ é dividida em cinco conjuntos triangulares, cada um representa a extensão do ângulo, onde valores negativos são ângulos à esquerda, e positivos são ângulos à direita em relação à velocidade atual. A configuração dos conjuntos *fuzzy* da variável é:

FORTEMENTE-À-ESQUERDA, $a = -1.5\pi$ e $c = -0.5\pi$,

FRACAMENTE-À-ESQUERDA, $a = -\pi$ e $c = 0$,

CENTRO, $a = -0.5\pi$ e $c = 0.5\pi$,

FRACAMENTE-À-DIREITA, $a = 0$ e $c = \pi$,

FORTEMENTE-À-DIREITA, $a = 0.5\pi$ e $c = 1.5\pi$.

onde $b = (a + c)/2$ para todos os conjuntos e a força é medida em Newtons.

3.1.2 Regras de Intensidade da Força de Desejo

Os conjuntos MUITO-DEVAGAR e MUITO-RÁPIDA representam que a velocidade atual do pedestre está muito distante da velocidade pretendida e quer alterar sua velocidade o mais rápido possível. A sua correlação com os conjuntos FORTE-POSITIVO e FORTE-NEGATIVO reflete essa abrupta mudança de velocidade. De forma contrária, os conjuntos DEVAGAR e RÁPIDA refletem uma pequena diferença de velocidade, assim a força para ajustar a velocidade é menor, resultando numa transição suave, conforme de-

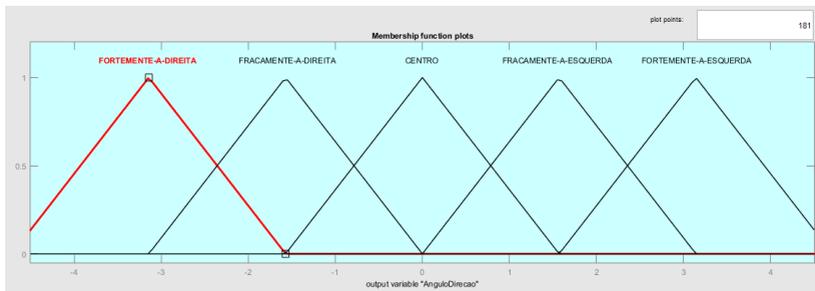


Figura 20 – Ângulo de direção das funções de pertinência.

monstrado no conjunto de regras a seguir.

se *VelocidadePedestreEmRelaçãoDesejada* é MUITO-DEVAGAR
então *IntensidadeForça* é FORTE-POSITIVO

se *VelocidadePedestreEmRelaçãoDesejada* é DEVAGAR
então *IntensidadeForça* é POSITIVO

se *VelocidadePedestreEmRelaçãoDesejada* é CORRETA
então *IntensidadeForça* é ZERO

se *VelocidadePedestreEmRelaçãoDesejada* é RÁPIDA
então *IntensidadeForça* é NEGATIVO

se *VelocidadePedestreEmRelaçãoDesejada* é MUITO-RÁPIDA
então *IntensidadeForça* é FORTE-NEGATIVO

A variável de entrada *VelocidadePedestreEmRelaçãoDesejada* é dividida em cinco gaussianas (Figura 21), cada uma representando a extensão da velocidade em relação à velocidade desejada (v_i^0). Os valores são representados percentualmente porque a velocidade desejada pode variar de pedestre para pedestre.

A equação 3.1 calcula o valor normalizado da velocidade desejada. Valores negativos se referem a velocidades abaixo da desejada e valores positivos se referem aos valores acima da velocidade desejada. O valor zero ocorre quando o pedestre está exatamente na velocidade desejada.

$$VelocidadePedestreEmRelaçãoDesejada = \frac{\|\vec{v}_i\|}{v_i^0} - 1 \quad (3.1)$$

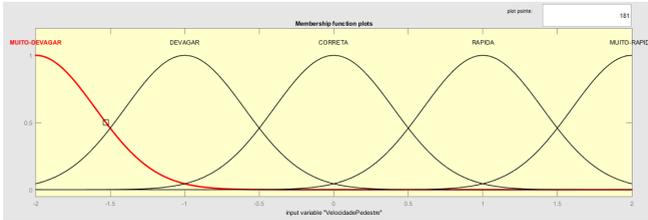


Figura 21 – Velocidade do pedestre.

A configuração dos conjuntos que compõem a variável *VelocidadePedestreEmRelaçãoDesejada* é:

MUITO-DEVAGAR, $c = -2$ e $s = 0.4$,

DEVAGAR, $c = -1$ e $s = 0.4$,

CORRETA, $c = 0$ e $s = 0.4$,

RÁPIDA, $c = 1$ e $s = 0.4$,

MUITO-RÁPIDA, $c = 2$ e $s = 0.4$.

A variável de saída *IntensidadeForça* foi dividida em cinco conjuntos triangulares (Figura 22), cada um representando a mudança de velocidade em relação à atual velocidade. A configuração dos conjuntos que forma a variável *IntensidadeForça* é:

FORTE-NEGATIVO $a = -3$ e $c = -1$,

NEGATIVO, $a = -2$ e $c = 0$,

ZERO, $a = -1$ e $c = 1$,

POSITIVO, $a = 0$ e $c = 1$,

FORTE-POSITIVO, $a = 1$ e $c = 3$.

Onde $b = (a + c)/2$ para todos os conjuntos.

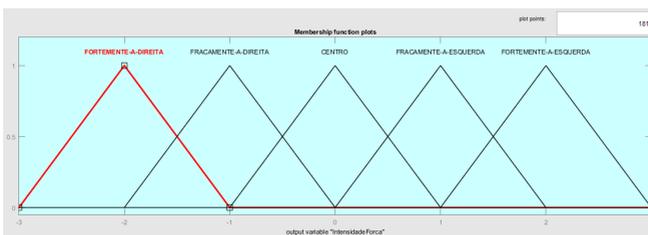


Figura 22 – Intensidade da Força de Desejo.

Os principais ajustes que podem ser feitos nessa força são nas variáveis de saída. Ajustando o tamanho dos conjuntos e os seus centros de gravidade, pode-se aumentar a força e fazer uma desaceleração ou mudança de direção

ser mais rápida ou mais devagar. A variável de entrada que calcula a intensidade da força pode ser ajustada caso seja detectado que o pedestre tenha uma definição diferente do que é rápido ou devagar. A variável de entrada de direção dificilmente precisará ser ajustada porque ela trata o ângulo e as definições de trás, frente, esquerda e direita são bem definidas.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO FUZZY DA COMPONENTE DE FORÇA DE OBSTÁCULO

A Força de Obstáculo é baseada unicamente na distância entre o pedestre e o obstáculo mais próximo. Como já explicado anteriormente na seção 2.1.7, sua direção é sempre perpendicular ao obstáculo, e por essa razão não houve a necessidade de elaborar regras *fuzzy* para controlar a direção de atuação dessa força sobre o pedestre. Por ser uma força repulsiva entre o pedestre e o obstáculo mais próximo, apenas sua intensidade foi controlada utilizando apenas duas regras *fuzzy* bastante simples:

se Distância é PERTO
então IntensidadeForça é ALTA

se Distância é LONGE
então IntensidadeForça é BAIXA

Foi utilizado função de pertinência sigmoidal para os conjuntos que formam a variável *Distância* (Figura 23), *PERTO* e *LONGE* e triangular para os conjuntos *ALTA* e *BAIXA* da variável de saída *IntensidadeForça*. Os parâmetros para a variável *Distância* são:

PERTO, $slope = -75.0$, $inflection = 0.1$,

LONGE, $slope = 25.0$, $inflection = 0.3$.

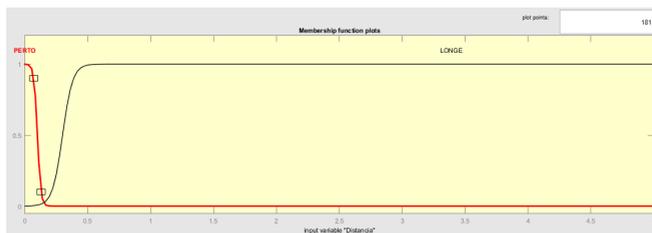


Figura 23 – Distância do pedestre ao obstáculo.

A variável de saída, que representa a intensidade com que a força repulsiva age no pedestre é dividida em dois conjuntos com função de per-

tinência triangular. As configurações dos conjuntos são:

BAIXA, $a = -3$, $b = 0$ e $c = 3$,

ALTA, $a = 2.99$, $b = 3$ e $c = 3.01$.

A força é medida em Newtons.

A força decresce exponencialmente com a distância e o ângulo é sempre perpendicular ao obstáculo. É uma força local, somente afetando distâncias menores do que 30cm . Para gerar esse efeito foram necessárias apenas duas regras *fuzzy*. O centro de gravidade do conjunto *ALTA* é o pico da força e o centro de gravidade *BAIXA* precisa ser zero.

Se, por exemplo, é detectado que um determinado tipo de obstáculo causa uma reação mais forte do que anteriormente detectado nos outros tipos de obstáculo pode-se alterar o centro de gravidade do conjunto *ALTA* para refletir essa nova característica. As variáveis de entrada também podem ser ajustadas para fazer a Força de Obstáculo ser mais ou menos local (*inflection*), ou mais ou menos abrupta (*slope*).

3.3 IMPLEMENTAÇÃO FUZZY DA COMPONENTE DE FORÇA SOCIAL

A Força Social calcula um vetor de força a partir da distância, velocidade relativa e ângulo. Foi necessário separar o conhecimento implícito nas equações da Força Social em três séries de regras *fuzzy* para tratar a interação social. Esses conjuntos de regras são a direção do vetor de interação (Equações 3.2 e 3.3), a intensidade da mudança de direção (Equação 3.4) e a intensidade da desaceleração (Equação 3.5). A intensidade da força é o tamanho do desconforto que o pedestre está sentindo, o ângulo é a direção que o pedestre deseja ajustar e a força de desaceleração se faz necessária porque o pedestre prefere mudar de direção do que desacelerar, assim a força social calculada pelos sistemas *fuzzy* é a soma das forças de desaceleração e de mudança de direção, conforme demonstrado na equação 3.6.

Como a força de desaceleração é indiretamente dependente da intensidade de força de mudança de direção, em vez de repetir o conjunto de regras com parâmetros diferentes, foi criado apenas um conjunto de regras que retorna a intensidade percentual da força de desaceleração em relação à força de mudança de direção.

O ângulo é expresso em radianos e transformado em um vetor direcional com as funções de seno e cosseno, que por sua vez é multiplicado pela intensidade da força e somado com a força de desaceleração, conforme a equação 3.3.

$$\hat{\text{ângulo}}_t = \text{fuzzyEngine}_{\text{vetorDeIteracao}}(\text{velocidadeRelativa}) \quad (3.2)$$

$$\vec{t} = \overrightarrow{[\cos(\hat{\text{ângulo}}_t), \sin(\hat{\text{ângulo}}_t)]} \quad (3.3)$$

$$\text{imd} = \text{fuzzyEngine}_{\text{intensidadeMudançaDeDireção}}(\hat{\text{ângulo}}, \text{distância}, \text{velocidadeRelativa}) \quad (3.4)$$

$$\text{desaceleração}\% = \text{fuzzyEngine}_{\text{desaceleração}}(\text{imd}) \quad (3.5)$$

$$\text{forçaSocial} = \text{desaceleração}\% \text{imd} \vec{t} + \overrightarrow{[t[2], -t[1]]} \text{imd} \quad (3.6)$$

3.3.1 Regras do Ângulo da Força Social

O ângulo da Força Social sempre estará situado entre o ângulo do vetor de direção e o vetor de velocidade relativa. Conforme a velocidade relativa aumenta, o ângulo ficará mais próximo do valor do ângulo da velocidade relativa e mais longe do ângulo de direção. Refletindo esse conhecimento implícito nas equações do MFS, foram criadas as regras a seguir:

se *VelocidadeRelativa* é *FRACA*
então *ÂnguloDeDireção*
é *PERTO-DA-DIREÇÃO-DO-PEDESTRE*

se *VelocidadeRelativa* é *MÉDIA*
então *ÂnguloDeDireção*
é *ENTRE-A-DIREÇÃO-DO-PEDESTRE-E-DA-VELOCIDADE-RELATIVA*

se *VelocidadeRelativa* é *FORTE*
então *ÂnguloDeDireção*
é *PERTO-DA-DIREÇÃO-DA-VELOCIDADE-RELATIVA*

A variável de entrada *VelocidadeRelativa* foi dividida em *FRACA*, *MÉDIA* e *FORTE*. O tipo de função de pertinência é gaussiana, com parâmetros:

FRACA, $c = 0, s = 0.4$,

MÉDIA, $c = 1, s = 0.4$,

FORTE, $c = 2$, $s = 0.4$.

A velocidade relativa é medida em metros por segundo.

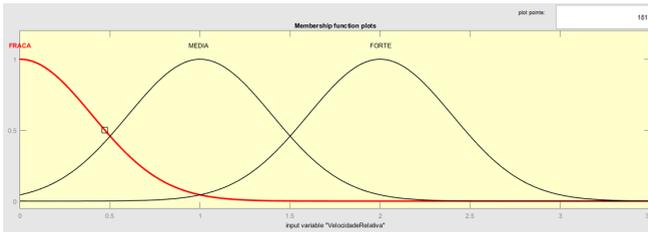


Figura 24 – Funções de pertinência da variável *VelocidadeRelativa* em m/s.

A variável de saída *ÂnguloDeDireção* também foi dividida em três conjuntos, *PERTO – DA – DIREÇÃO – DO – PEDESTRE*, *ENTRE – A – DIREÇÃO – DO – PEDESTRE – E – DA – VELOCIDADE – RELATIVA* e *PERTO – DA – DIREÇÃO – DA – VELOCIDADE – RELATIVA*. O tipo de função de pertinência é a triangular, com parâmetros:

PERTO – DA – DIREÇÃO – DO – PEDESTRE, $a = -0.5$, $b = 0.0$ e $c = 0.5$,

ENTRE – A – DIREÇÃO – DO – PEDESTRE – E – DA – VELOCIDADE – RELATIVA, $a = 0.0$, $b = 0.5$ e $c = 1.0$,

PERTO – DA – DIREÇÃO – DA – VELOCIDADE – RELATIVA, $a = 0.5$, $b = 1.0$ e $c = 1.5$.

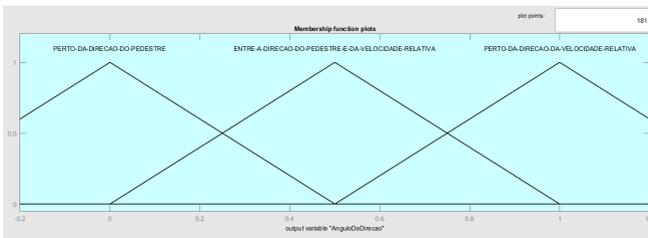


Figura 25 – Funções de pertinência da variável *ÂnguloDeDireção* em percentual.

O ângulo do vetor de interação estará sempre situado entre o ângulo da velocidade relativa (\vec{v}_{ij}) e o ângulo do vetor apontando do pedestre i para o j (\vec{e}_{ij}), ou também chamado vetor de direção. Conforme a velocidade relativa aumenta, a direção do ângulo do vetor de interação vai do ângulo do vetor de direção para o ângulo do vetor da velocidade relativa. Em conformidade

com isso, foi construído um sistema *fuzzy* que tem como entrada a velocidade relativa e como saída um percentual entre zero e um. Esse valor é multiplicado pela diferença entre os ângulos do vetor da velocidade relativa (\vec{v}_{ij}) e do vetor de direção (\vec{e}_{ij}) e somado ao ângulo do vetor de direção (\vec{e}_{ij}). O ângulo final é o ângulo de desaceleração invertido, porque o ângulo de desaceleração precisa apontar do pedestre j para o i , assim evitando contato e não indo em direção a ele. O ângulo é calculado e um vetor normalizado é gerado com as funções cosseno e seno, e invertido multiplicando-se por -1 . Foi preferível fazer dessa forma porque a alternativa seria inverter ambos os vetores \vec{e}_{ij} e \vec{v}_{ij} .

Nesse sistema de inferência *fuzzy*, a variável de saída descreve um intervalo entre dois ângulos. Se for detectada uma situação onde o ângulo está fora desse intervalo, o centro de gravidade das funções de pertinência das variáveis de saída precisa ser alterado para valores acima de um e/ou abaixo de zero, para corresponder ao novo comportamento. A variável de entrada precisa ser alterada caso se queira uma mudança entre os intervalos mais abrupta ou caso haja uma tendência mais forte para um dos ângulos.

3.3.2 Regras Fuzzy da Intensidade de Mudança de Direção da Força Social

Para sentir desconforto o pedestre precisa sentir que o outro pedestre está perto, indo em sua direção e no seu campo de visão. Dessa forma temos as seguintes regras:

se Distância é LONGE
então IntensidadeForçaDeMudançaDeDireção é BAIXA

se VelocidadeRelativa é DEVAGAR
então IntensidadeForçaDeMudançaDeDireção é BAIXA

se Ângulo é ATRÁS
então IntensidadeForçaDeMudançaDeDireção é BAIXA

se Distância é ALTA
e VelocidadeRelativa é RÁPIDA
e Ângulo é FRENTE
então IntensidadeForçaDeMudançaDeDireção
é ALTA

A variável *Distância* foi dividida em dois termos, *LONGE* e *PERTO* (Figura 26). O tipo de função de pertinência utilizado foi o sigmoidal. Os parâmetros foram os seguintes:

LONGE, $slope = 1$, $inflection = 2.5$,

PERTO, $slope = -1.8$, $inflection = 2.5$.

A distância é medida em metros.

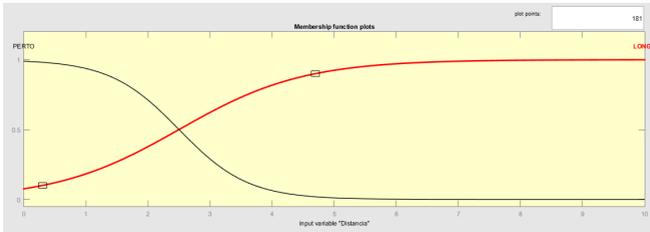


Figura 26 – Funções de pertinência PERTO e LONGE.

A *VelocidadeRelativa* foi dividida nos conjuntos *DEVAGAR* e *RÁPIDO* (Figura 27). O tipo de função de pertinência é também uma sigmoidal com parâmetros:

RÁPIDO, $slope = 1$, $inflection = 2.4$,

DEVAGAR, $slope = -6.0$, $inflection = 1.7$.

A velocidade é medida em metros por segundo.

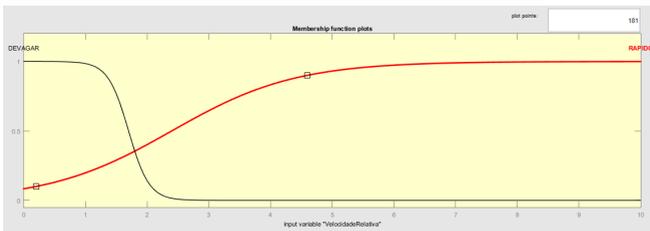


Figura 27 – Funções de pertinência DEVAGAR e RÁPIDO em m/s.

A variável ângulo foi dividida nos conjuntos *ATRÁS* e *FRENTE* (Figura 28). O tipo de função de pertinência é gaussiana, com os parâmetros:

FRENTE, $c = 0$, $s = 0.25\pi$,

ATRÁS, $s = 0.35\pi$, $c = \pi$.

O ângulo no modelo é em radianos, mas é apresentado em graus na Figura 28.

A variável de saída *IntensidadeForçaDeMudançaDeDireção* foi dividida em *ALTA* e *BAIXA* (Figura 29). O tipo de função de pertinência é

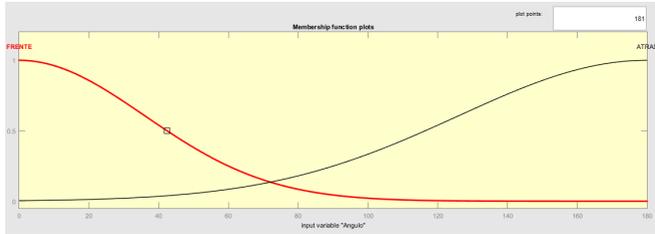


Figura 28 – Funções de pertinência FRENTE e ATRÁS em radianos.

triangular, com os parâmetros:

BAIXA, $A = -0.8$, $B = 0.0$ e $C = 0.8$,

ALTA $A = 0.6$, $B = 0.8$ e $C = 1.0$.

A intensidade da força é medida em Newtons.

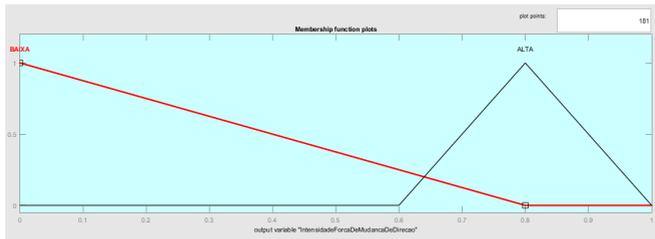


Figura 29 – Funções de pertinência BAIXA e ALTA em Newtons.

Os conjuntos *BAIXA* e *ALTA* têm um significado parecido com o significado dos conjuntos *BAIXA* e *ALTA* das regras da Força de Obstáculo *fuzzy*. *ALTA* é o pico da força, *BAIXA* é o ponto mais baixo, que é zero. Alterando o centro de gravidade desses conjuntos, consegue-se alterar a intensidade e a extensão da força. Os conjuntos *LONGE*, *DEVAGAR* e *ATRÁS* estão atrelados à ideia de nenhum desconforto ou nenhuma força, assim, se algum desses conjuntos está sendo satisfeito, a força tenderá a ir a zero. Um ângulo *ATRÁS* significa que o pedestre i não pode ver o pedestre j , assim, mesmo se o pedestre estiver perto, ou com uma velocidade relativa alta, ele não será afetado pelo pedestre j e não irá sentir nenhum tipo de desconforto. Algo similar acontece com a distância *DISTANTE*. Se o pedestre está longe, mesmo que esteja rápido ou no campo de visão, o pedestre não sentirá que entrará em colisão com o outro pedestre, nessa situação ele estará confortável o suficiente para não se importar com o pedestre j e a força tenderá a ser zero. Por último, se o pedestre está perto e no ângulo de visão, mas a velocidade relativa entre

os dois é zero ou negativa (*DEVAGAR*), não há motivo para o pedestre sentir nenhum desconforto, já que ambos não estão se aproximando um do outro. Para o pedestre sentir desconforto é necessário que os outros três conjuntos estejam ativos, ou seja, que o pedestre esteja perto (*Distância é PERTO*), que esteja no campo de visão (*Ângulo é FRENTE*) e que esteja com uma velocidade relativa positiva (*VelocidadeRelativa é RÁPIDA*).

Alterando o *inflection* e o *slope* nos conjuntos das variáveis de entrada, é possível alterar a velocidade de variação da força e seu raio de ação. . Pode-se, por exemplo, simular um pedestre que sente os efeitos da Força Social em distâncias maiores se for aumentado o *slope* dos conjuntos da variável *Distância*.

A variável de saída será usada para um vetor de mudança de direção que é perpendicular ao vetor calculado pelo sistema de regras *fuzzy* que calcula o ângulo da Força Social. Para chegar ao valor final é necessário somar o vetor de mudança de direção com o vetor de desaceleração que terá sua força calculada no seu próprio sistema.

3.3.3 Intensidade da Força de Repulsão

A intensidade da força de repulsão e a intensidade da força de mudança de direção são fortemente relacionadas, por essa razão, em vez de criar um novo conjunto de regras *fuzzy* para a intensidade da repulsão, que seria exatamente igual ao de mudança de direção, mas com parametrização das funções de pertinência diferente, foi criado um conjunto de regras no qual apenas as variáveis que afetam essa relação são consideradas, as variáveis que afetam a relação são o ângulo e a velocidade relativa:

se $\hat{\text{Ângulo}}$ é AO-LADO e $\text{VelocidadeRelativa}$ é RÁPIDA
então $\text{IntensidadeForçaDeRepulsão}$
é MUITO-MENOR-QUE-INTENSIDADE-MUDANÇA-DE-DIREÇÃO

se $\hat{\text{Ângulo}}$ é FRENTE ou $\text{VelocidadeRelativa}$ é DEVAGAR
então $\text{IntensidadeForçaDeRepulsão}$
é IGUAL-INTENSIDADE-MUDANÇA-DE-DIREÇÃO

A variável de entrada $\hat{\text{Ângulo}}$ (Figura 30), que é o valor *crisp* de saída da força do primeiro conjunto de regras, foi dividida em dois conjuntos *fuzzy*, *AO – LADO* e *FRENTE*. O tipo de função de pertinência é gaussiana, com parâmetros:

$$\begin{aligned} \text{AO – LADO, } c = 90, s = 32, \\ \text{FRENTE, } c = 0, s = 25.6. \end{aligned}$$

O ângulo é medido em radianos.

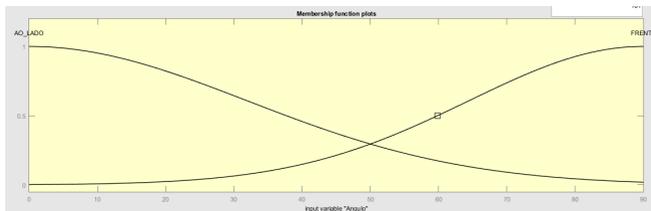


Figura 30 – Ângulo em graus.

A variável de entrada *VelocidadeRelativa* (Figura 31) também foi dividida em *DEVAGAR* e *RÁPIDO*. O tipo de função de pertinência é gaussiana, com parâmetros:

DEVAGAR, $c = 0$, $s = 0.96$,

RÁPIDO, e $c = 3$, $s = 0.96$.

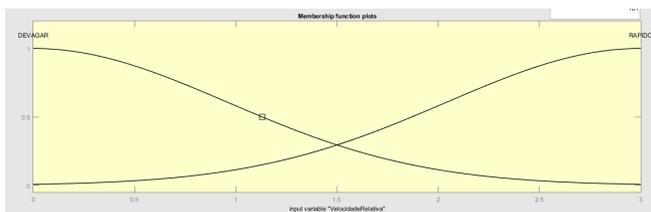


Figura 31 – *VelocidadeRelativa* em m/s.

A variável de saída *IntensidadeForçaDeRepulsão* também foi dividida em *MUITO – MENOR – QUE – INTENSIDADE – MUDANÇA – DE – DIREÇÃO* e *IGUAL – INTENSIDADE – MUDANÇA – DE – DIREÇÃO*. O tipo de função de pertinência é triangular, com parâmetros:

MUITO – MENOR – QUE – INTENSIDADE – MUDANÇA – DE – DIREÇÃO, $a = -13.5$, $b = 0.0$ e $c = 13.5$,

IGUAL – INTENSIDADE – MUDANÇA – DE – DIREÇÃO, $a = 0.9$, $b = 1.0$ e $c = 1.1$.

A necessidade de tratar diferentemente a desaceleração e a mudança de direção ocorre porque o pedestre mostra uma tendência de mudar de direção e evitar desacelerar. Isso foi observado por Moussaïd et al. (2009) e, por essa razão, nas fórmulas do MFS (Equações 2.9 e 2.10) $n < n'$. Como as duas fórmulas são exatamente iguais, tirando os parâmetros n e n' , a desaceleração pode ser considerada semidependente da força de mudança de direção. A

partir do ângulo e da velocidade relativa é possível calcular a relação entre as duas forças.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo apresentou-se a proposta do modelo de *fuzzy* de forças sociais (MFFS), foi explicado como cada um dos aspectos que o MFS original tenta modelar foi transformado em regras *fuzzy*. Após implementar este modelo, foi realizada uma série de testes para a análise do MFFS. No próximo Capítulo será apresentado o resultado desses testes.

4 RESULTADOS E EXPERIMENTOS

De forma a validar o modelo criado e testar a proposta descrita no Capítulo 3 implementaram-se um simulador de pedestre Sent (2014a) e uma biblioteca de inferência *fuzzy* Sent (2014b). Tanto o simulador quanto a biblioteca foram desenvolvidos na linguagem Julia Julia (2014). Testes realizados durante o desenvolvimento revelaram que a linguagem Julia apresentava um desempenho computacional superior às mesmas linguagens *script*, como *matlab*, *python* Julia (2014) e por permitir uma prototipação muito mais rápida que outras linguagens de similar desempenho computacional (C++,C). Nesta implementação procurou-se, sempre que possível, otimizar o tempo de execução da simulação. Para reduzir o tempo de execução, a biblioteca *fuzzy* foi otimizada, usando a capacidade de metaprogramação da linguagem Julia para gerar uma função por sistema *fuzzy*. Essa função processa todos os três passos de um sistema *fuzzy* (fuzzyficação, inferência e desfuzzyficação) em uma única chamada, evitando chamadas de função desnecessárias e otimizando a *cache* do processador. Todos os parâmetros do sistema *fuzzy* são armazenados como constantes dentro dessa função e, por último, na desfuzzyficação, o centroide é calculado diretamente, sem nenhum processo de integração, dessa forma evita uma estrutura de repetição que requer muito mais ciclos de processamento. Ao fazer isso, o custo computacional do MFFS ficou na mesma ordem de magnitude que o do MFS. O custo total varia conforme a simulação, mas está entre 10% e 50% acima do custo MFS.

Para validar o modelo e sua habilidade de produzir comportamento de pedestres, o modelo foi submetido a dois tipos de teste, o qualitativo e o quantitativo. No teste qualitativo foi observado se o MFFS é capaz de reproduzir os mesmos fenômenos que o MFS. No quantitativo, foram feitas várias simulações com ambos os modelos na mesma configuração inicial e foi comparado se os modelos apresentam numericamente o mesmo resultado.

4.1 ANÁLISE QUALITATIVA

Foi testado o modelo MFFS em dois cenários. Um é uma simulação de evacuação em um corredor que se abre e depois se estreita, conforme mostrado na Figura 32 (a) e o outro é uma simulação de seiscentos e quarenta pedestres saindo de uma edificação. A edificação tem dezesseis salas, cada sala com quarenta pessoas, conforme pode ser observado na Figura 32 (b). A Figura (a) mostra os pedestres se espalhando quando saem de um corredor

muito apertado e entram em espaço aberto. Quando os pedestres tentam entrar no corredor de novo, há formação de filas em ambos os lados. É possível também visualizar o vídeo da simulação do MFFS (SENT, 2014c) e comparar com o da simulação do MFS (SENT, 2014d).

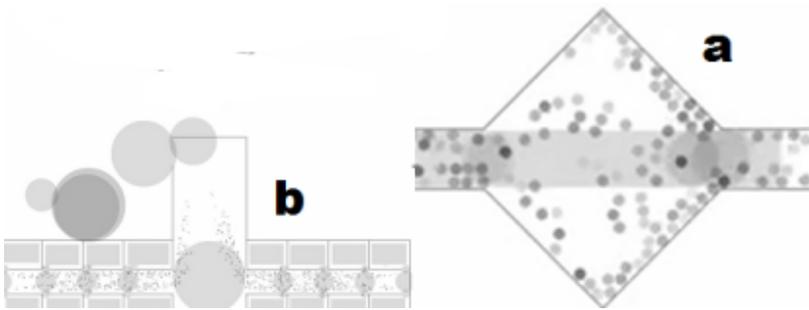


Figura 32 – Formação de filas

Quando o cenário é simulado usando MFFS é possível observar facilmente a formação de filas e o efeito "quanto-mais-rápido-mais-devagar". O pedestre também diminui sua velocidade para evitar contato com outros pedestres. Isso é possível observar porque os pedestres estão todos esperando na porta, e só acontece quando a força social e a força de desejo estão configuradas corretamente, conforme mostra a Figura 33.

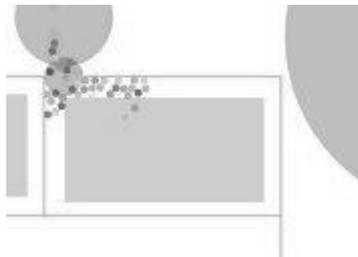


Figura 33 – Pedestres esperando na porta.

Pode-se observar que quando os pedestres tentam sair do conjunto de salas, ao longo do corredor, as salas localizadas no final evacuem primeiro, enquanto as salas que estão mais perto do corredor principal são as últimas. Isso acontece por causa da grande quantidade de pessoas saindo do recinto ao mesmo tempo e passando pelos corredores, bloqueando o avanço dos pedestres, conforme pode ser vista na Figura 34. Na Figura 34 são apresentados os

primeiros momentos da simulação acima dos últimos. Nos primeiros momentos todas as salas estão cheias, mas no último, somente as salas localizadas no final é que estão ainda com pedestres dentro.

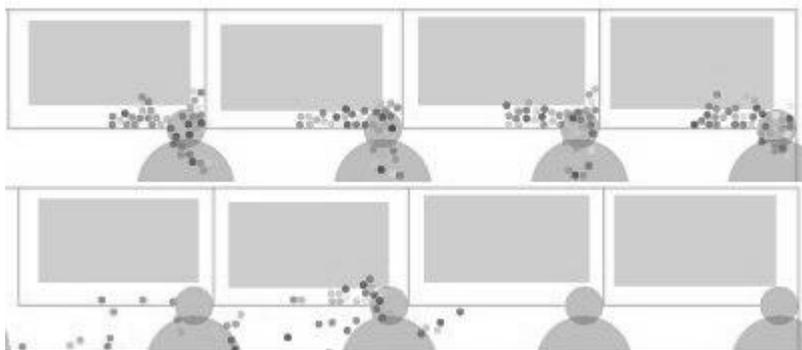


Figura 34 – As salas perto do corredor principal são as últimas a evacuar.

Também é possível notar que quando os pedestres mudam de forma abrupta de direção, eles começam a esbarrar uns nos outros. Esse efeito também acontece em áreas lotadas. Isso foi colocado em evidências na Figura 35 e 36, onde linhas foram desenhadas para acompanhar a direção aproximada dos pedestres em cada lugar.

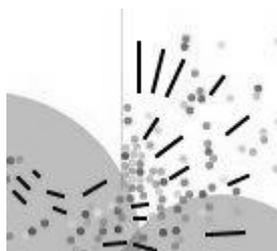


Figura 35 – Mudança abrupta de direção.

4.2 ANÁLISE QUANTITATIVA

A análise quantitativa visa verificar se estatisticamente os modelos são parecidos o suficiente que possam ser usados indistintamente sob um ponto de vista estatístico.

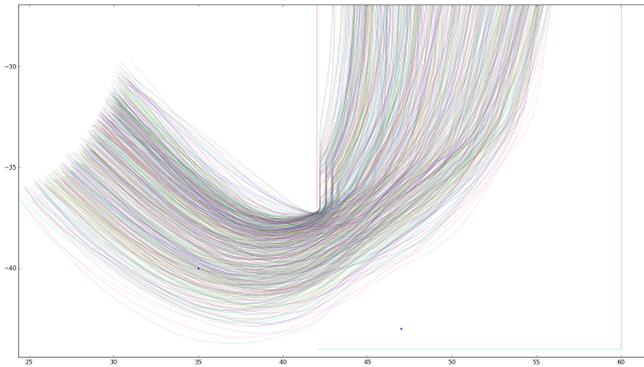


Figura 36 – Mudança abrupta de direção.

Tabela 2 – Tabela comparativa dos modelos (σ = desvio-padrão, μ = média)

N° Pedestres		10		30		100		200	
Mod.	Var.	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ
MFS	Dist.	2.57	8.68	2.58	8.77	2.76	9.16	3.02	9.63
	Vel. M.	.150	.997	.175	.852	.203	.408	.174	.233
MFFS	Dist.	2.58	9.29	2.66	9.48	2.99	10.2	3.35	10.9
	Vel. M.	.119	.822	.129	.4886	.1470	.187	.152	.145

Para verificar se o modelo atual atinge essa expectativa, foi efetuado um teste numa cena de simulação bem simples, uma sala de cem metros quadrados e uma porta de um metro de largura por onde os pedestres tentam sair. Esse mesmo cenário foi simulado com dez, trinta, cem e duzentos pedestres. Cada um desses ambientes foi simulado cem vezes com uma distribuição aleatória de pedestres para os dois modelos, totalizando oitocentas simulações. Ao final foi extraída a distância percorrida, em conjunto com a velocidade média de cada pedestre, disso foi extraída a média e o desvio padrão. O resultado é apresentado na tabela 2, nos histogramas 39, 42, 45, 48, 52, 55, 58 e 61 e no das evoluções das distâncias e velocidades médias 49 e 62

Observa-se que, apesar dos resultados apontarem uma variação da velocidade média e da distância média percorrida pelos pedestres entre os dois

modelos de menos que metade do desvio-padrão, os resultados obtidos são suficientemente semelhantes para suportar a utilização da proposta MFFS como substituta do modelo MFS.

Esta análise quantitativa é de forma nenhuma abrangente o suficiente para ser feita uma conclusão definitiva, mas demonstra que mesmo com as funções de pertinência calibradas empiricamente o modelo *fuzzy* (MFFS) apresenta resultados equivalentes ao do MFS. Considerando que o modelo MFFS pode ser mais aperfeiçoado como aprendizado de máquina, tornando-o ainda mais similar ao modelo MFS, a análise atual é suficiente para demonstrar que o MFFS tem potencial como um modelo de simulação de pedestres.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Capítulo foi apresentado como foi analisado o modelo MFFS, depois de feita essa análise, foi possível realizar algumas conclusões do MFFS, as quais serão apresentadas no próximo Capítulo.

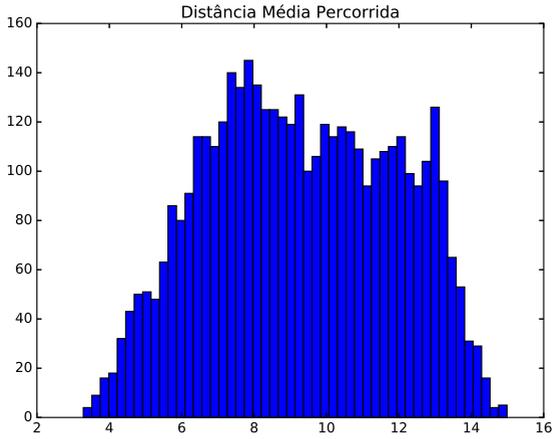


Figura 37 – MFFS

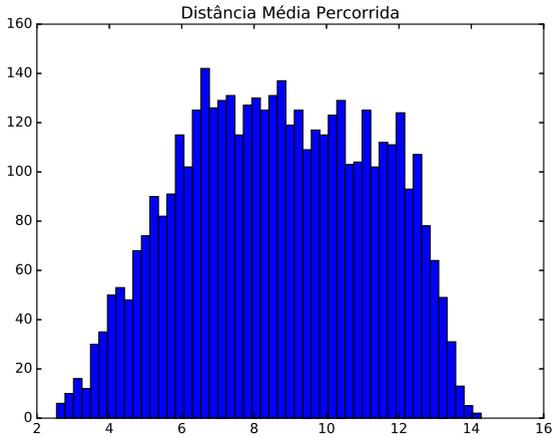


Figura 38 – MFS

Figura 39 – Histograma da distância média percorrida em metros, com simulações com dez pedestres.

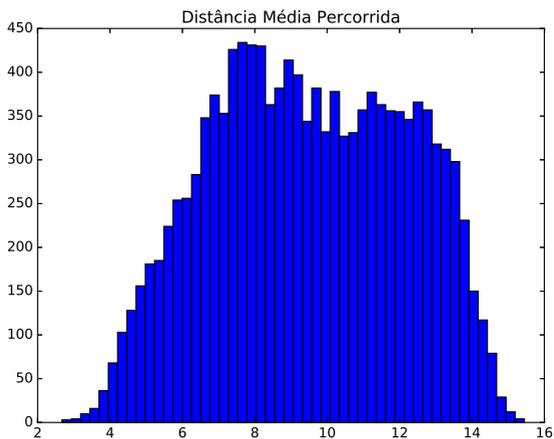


Figura 40 – MFFS

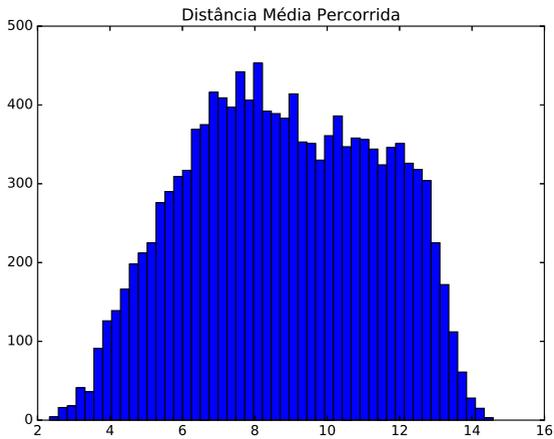


Figura 41 – MFS

Figura 42 – Histograma da distância média percorrida em metros, com simulações com trinta pedestres.

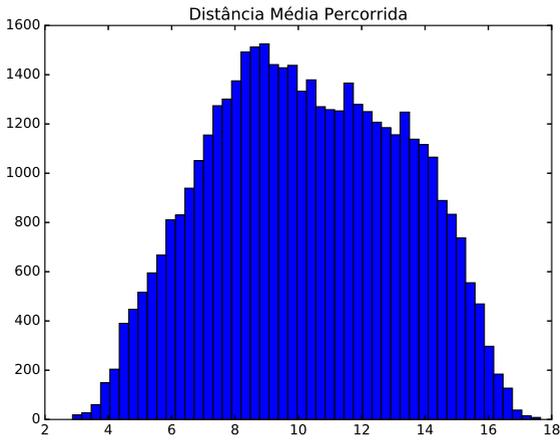


Figura 43 – MFFS

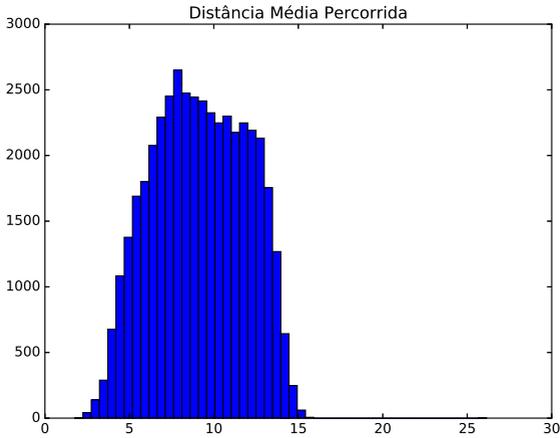


Figura 44 – MFS

Figura 45 – Histograma da distância média percorrida em metros, com simulações com cem pedestres.

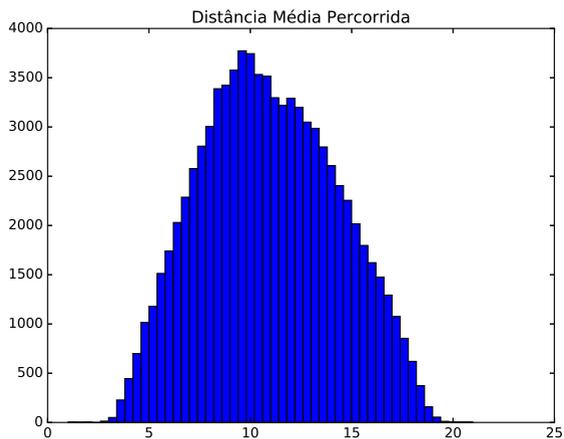


Figura 46 – MFPS

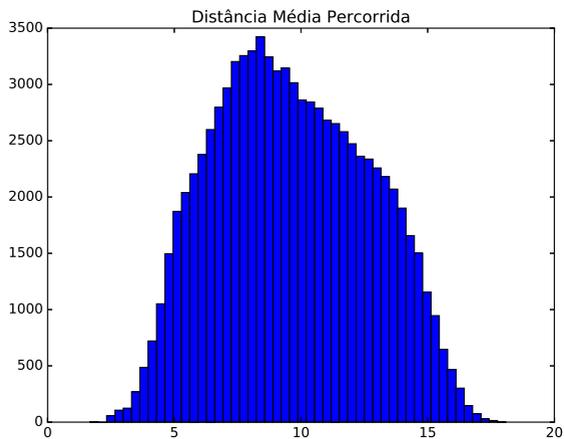


Figura 47 – MFS

Figura 48 – Histograma da distância média percorrida em metros, com simulações com duzentos pedestres.

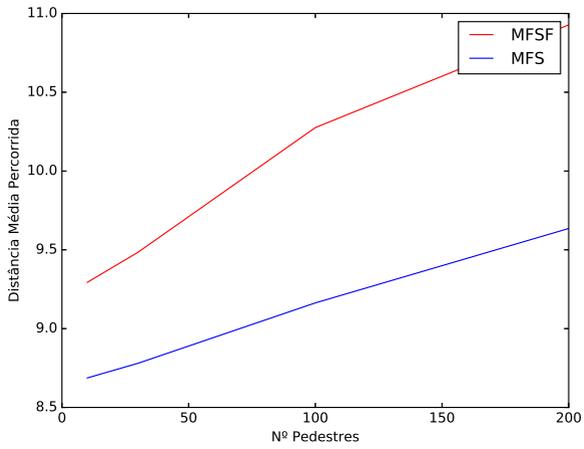


Figura 49 – Evolução da média da distância percorrida por número de pedestres simulados.

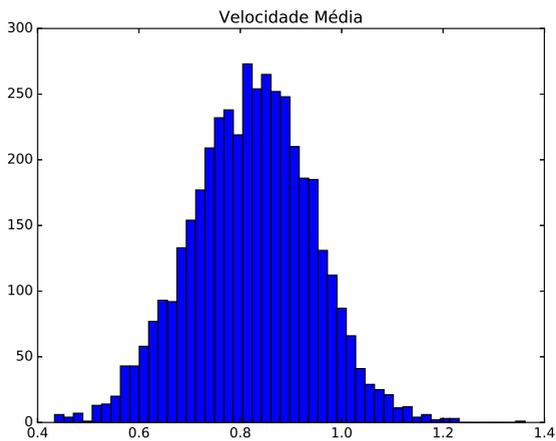


Figura 50 – MFFS

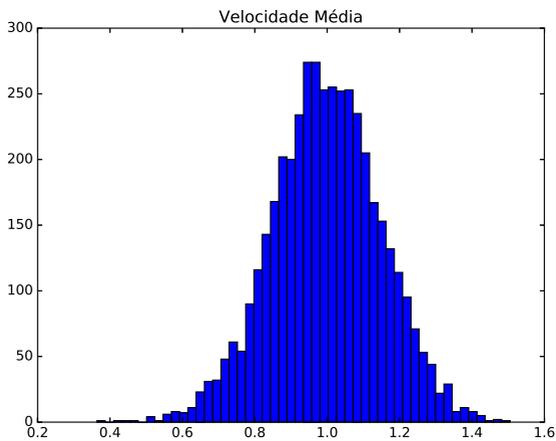


Figura 51 – MFS

Figura 52 – Histograma da média da velocidade em m/s, com simulações com dez pedestres

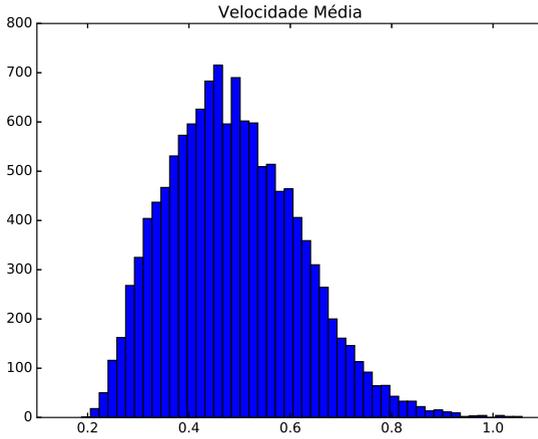


Figura 53 – MFFS

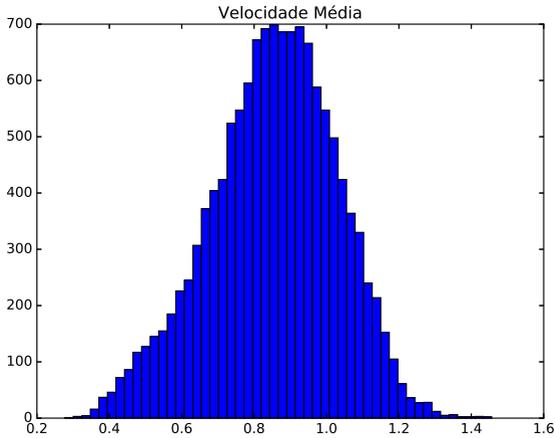


Figura 54 – MFS

Figura 55 – Histograma da média da velocidade em m/s, com simulações com trinta pedestres.

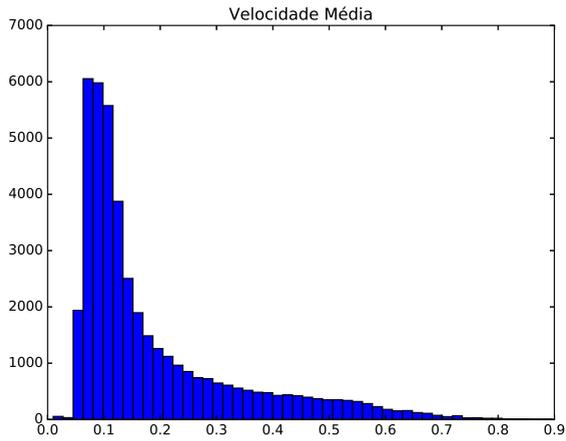


Figura 56 – MFFS

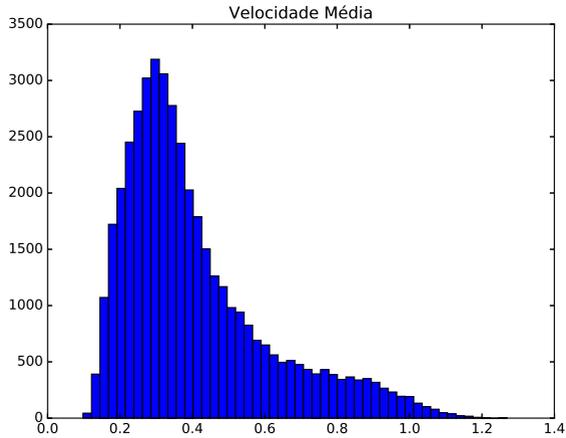


Figura 57 – MFS

Figura 58 – Histograma da média da velocidade em m/s, com simulações com e sem pedestres.

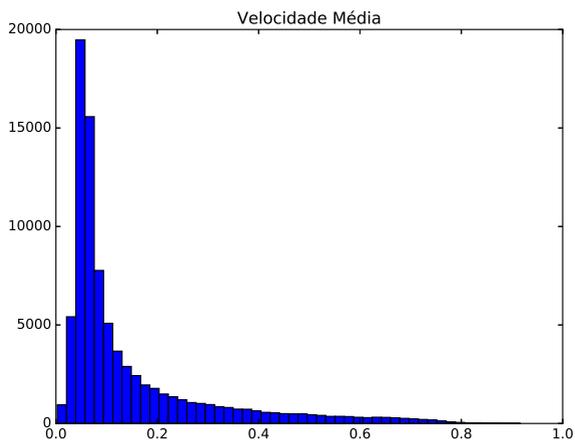


Figura 59 – MFFS

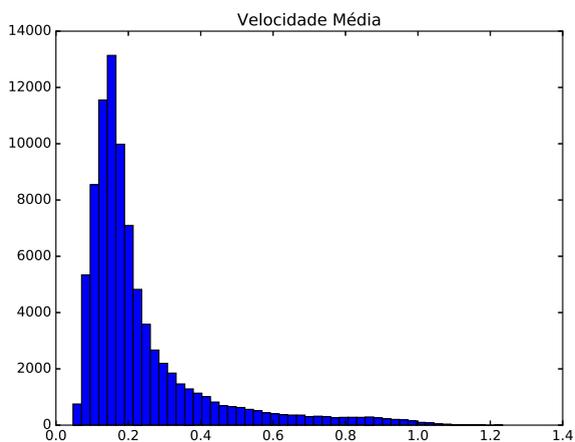


Figura 60 – MFS

Figura 61 – Histograma da média da velocidade em m/s, com simulações com duzentos pedestres.

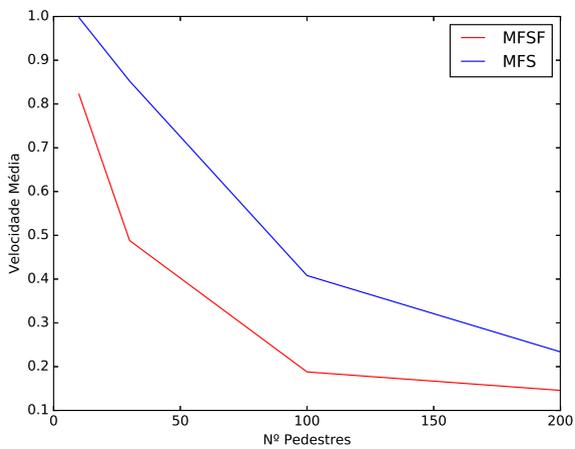


Figura 62 – Evolução da média da velocidade em m/s por número de pedestres simulados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um novo modelo de simulação de pedestres em situação de evacuação baseado no modelo MFS e usando sistema de inferência Mamdani para melhorar a interpretabilidade por parte do usuário e facilitar aspectos de flexibilidade, de forma a permitir a adição de novos comportamentos. O código-fonte deste trabalho foi publicado em Sent (2014a), para que outros pesquisadores possam testar e estender o MFFS[R1].

Apesar de as equações matemáticas do modelo MFS ser capazes de fornecer um arcabouço formal para simulação das intenções psicológicas dos pedestres em situações de aglomeração e evacuação, a semântica do conhecimento expresso pelas equações não fica evidente para muitos usuários. Assim, neste trabalho decidiu-se modelar o conhecimento implícito nas equações do MFS através de regras *fuzzy* Mamdani para melhorar sua interpretabilidade. As regras foram criadas de forma empírica analisando as relações entre as variáveis do modelo MFS. Assim, usando regras *fuzzy* linguísticas foi diminuído o espaço entre o conhecimento contido nas equações matemáticas e o conhecimento realmente expresso explicitamente. O modelo apresentado nesta dissertação usa regras linguísticas *fuzzy* para diminuir a complexidade aparente. As funções de pertinência também foram ajustadas empiricamente.

O modelo consiste de apenas vinte e duas regras *fuzzy* e nos experimentos realizados apresentou comportamento similar, mas não igual ao exibido pelo modelo MFS, tanto no que se refere à capacidade de reproduzir a interação entre cada pedestre e os elementos do ambiente, quanto nas mudanças de velocidade média e distancia média percorrida. O modelo demonstra que usando regras linguísticas *fuzzy*, consegue-se remover a complexidade desnecessária do MFS sem aumentar significativamente o custo computacional. O fato de usar relativamente poucas regras torna o conhecimento contido no modelo fácil de ser interpretado. Ao analisar qualitativamente também se notou que fenômenos comuns como formação de filas estão presentes. Ao efetuar a análise quantitativa, notou-se que há uma diferença entre os modelos, essa diferença pode ser diminuída com uma melhor parametrização do modelo. Portanto, é possível concluir que o modelo MFFS consegue ser similar qualitativamente, mas ainda precisa melhorar qualitativamente e é possível concluir, pelos resultados preliminares, que o modelo MFFS oferece potencial de substituir o modelo MFS caso seja melhorado. Dessa forma, o modelo MFFS apresenta uma maior facilidade de estender, parametrizar e entender, tornando possível estendê-lo para expressar comportamentos e problemas que previamente seriam muito complexos usando o MFS.

5.1 LIMITAÇÕES DO MODELO ATUAL

O modelo atual não procurou melhorar o MFS, apenas adaptá-lo para melhorar a interpretabilidade, sendo assim, o modelo atual sofre das mesmas limitações do modelo MFS, por exemplo, o modelo atual não consegue considerar que os pedestres andem em grupo. O modelo atual também usa um sistema de planejamento de rota bem primitivo, logo, é possível melhorar esta parte do modelo.

O método de ajuste empírico, baseado apenas na observação humana apresentou resultados satisfatórios, mas é uma forma incompleta de abordar o problema. Um problema multidimensional como este precisa usar de outras técnicas para aumentar a confiança de que o número de regras, as funções de pertinências e as relações entre as variáveis estão bem descritas. Estas outras técnicas podem até não apresentar resultados melhores, mas precisam ser ao menos empregadas, para verificar se a abordagem usada no presente trabalho foi a melhor.

O custo computacional em número de operações de ponto flutuante foi mantido no mínimo, será difícil conseguir grandes melhorias nessa área. Entretanto, o algoritmo empregado usa apenas um núcleo de processamento e não tenta acelerar usando a placa de vídeo.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, ressalta-se que é possível que, aplicando técnicas de aprendizado de máquina usando dados de pedestres reais como treinamento, podem-se melhorar os resultados, fazendo com que o MFFS possa ter uma capacidade de generalização ainda melhor que o MFS. Também é importante citar, que, mesmo sem a redução do custo computacional, o tempo de processamento pode ser reduzido com uso de tecnologias de paralelização e uso da placa de vídeo, como é usado pelo *software* MASSIVE Massive (2015), Yilmaz, Isler e Çetin (2009). A quantidade de pessoas que é possível simular satisfatoriamente também pode ser aumentada usando a mesma tecnologia.

Também se sugere que novos tipos de comportamento sejam descritos usando regras *fuzzy*, assim vamos poder expandir a capacidade do modelo MFFS. Atualmente tanto o MFS quando o MFFS não conseguem simular, por exemplo, pessoas andando em grupo e pedestres com dificuldade de visão. Ambos os problemas podem ser resolvidos criando mais regras *fuzzy*. Previamente seria necessário criar equações matemáticas para descrever esse comportamento. Entretanto, com o modelo MFFS é possível descrever esses com-

portamentos usando regras *fuzzy* Mamdani. Dessa maneira, o modelo pode ser expandido mantendo sua interpretabilidade e facilidade de interpretação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. E.; ROSSETI, R. J.; COELHO, A. L. Crowd simulation modeling applied to emergency and evacuation simulations using multi-agent systems. **arXiv preprint arXiv:1303.4692**, 2013.
- ASCHWANDEN, G.; HALATSCH, J.; SCHMITT, G. Crowd simulation for urban planning. In: **Proceedings of eCAADe**. [S.l.: s.n.], 2008. v. 2008.
- BLUE, V.; EMBRECHTS, M.; ADLER, J. Cellular automata modeling of pedestrian movements. In: **IEEE. Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on**. [S.l.], 1997. v. 3, p. 2320–2323.
- CAMAZINE, S. et al. Self-organization in biological systems. Princeton University Press, 2002.
- CRISTIANI, E.; PICCOLI, B.; TOSIN, A. **Multiscale modeling of pedestrian dynamics**. [S.l.]: Springer, 2014.
- DAAMEN, W. Simped: a pedestrian simulation tool for large pedestrian areas. In: **Conference Proceedings EuroSIW**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 24–26.
- DUBOIS, D.; PRADE, H. The three semantics of fuzzy sets. **Fuzzy sets and systems**, Elsevier, v. 90, n. 2, p. 141–150, 1997.
- DUIVES, D. C.; DAAMEN, W.; HOOGENDOORN, S. P. State-of-the-art crowd motion simulation models. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier, v. 37, p. 193–209, 2013.
- GAINES, B. R. Fuzzy and probability uncertainty logics. **Information and Control**, Elsevier, v. 38, n. 2, p. 154–169, 1978.
- GERDELAN, A. **Auto-Training Animated Character Motion: A Rule-Base Tuning Hybrid Fuzzy-Genetic Algorithm**. [S.l.], 2009.
- GLOOR, C. **A Microscopic Pedestrian Crowd Simulation System**. 04 2016. [Http://pedsim.silmaril.org/documentation/](http://pedsim.silmaril.org/documentation/).
- HANKIN, B.; WRIGHT, R. Passenger flow in subways. **OR**, JSTOR, p. 81–88, 1958.
- HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 407, n. 6803, p. 487–490, 2000.

- HELBING, D.; JOHANSSON, A. Pedestrian, crowd and evacuation dynamics. In: **Extreme Environmental Events**. [S.l.]: Springer, 2011. p. 697–716.
- HELBING, D.; JOHANSSON, A.; AL-ABIDEEN, H. Z. Dynamics of crowd disasters: An empirical study. **Physical review E**, APS, v. 75, n. 4, p. 046109, 2007.
- HELBING, D.; MOLNAR, P. Social force model for pedestrian dynamics. **Physical review E**, APS, v. 51, n. 5, p. 4282, 1995.
- HOOGENDOORN, S.; DAAMEN, W. Self-organization in walker experiments. In: **Traffic and Granular Flow**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 121–132.
- HOOGENDOORN, S. P. **Normative pedestrian flow behavior theory and applications**. [S.l.], 2001.
- HOOGENDOORN, S. P.; BOVY, P. H. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 38, n. 2, p. 169–190, 2004.
- HOOGENDOORN, S. P.; DAAMEN, W. Pedestrian behavior at bottlenecks. **Transportation Science**, INFORMS, v. 39, n. 2, p. 147–159, 2005.
- JOHANSSON, A. Pedestrian simulations with the social force model. **Chalmers University of Technology**, 2004.
- JOHANSSON, A.; HELBING, D.; WERNER, T. Self-organized pedestrian crowd dynamics experiments, simulations, and design solutions. **Transportation Science**, v. 39, n. 1, 2005.
- JULIA. **Julia**. 11 2014. [Http://julialang.org/](http://julialang.org/).
- KAUR, A.; KAUR, A. Comparison of mamdani-type and sugeno-type fuzzy inference systems for air conditioning system. **International journal of soft computing and engineering**, v. 2, n. 2, p. 2231–2307, 2012.
- LIND, J. **Massive: Software engineering for multiagent systems**. Citeseer, 1999.
- MAMDANI, E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In: **IET. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**. [S.l.], 1974. v. 121, n. 12, p. 1585–1588.

- MAO, T. et al. Parallelizing continuum crowds. In: **ACM. Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology**. [S.l.], 2010. p. 231–234.
- MASSIVE. **Massive 8 press release**. 08 2015.
[Http://www.massivesoftware.com/massive8.0-press-release.html](http://www.massivesoftware.com/massive8.0-press-release.html).
- MOUSSAÏD, M. et al. Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, The Royal Society, v. 276, n. 1668, p. 2755–2762, 2009.
- MURPHY, S. Ó.; BROWN, K. N.; SREENAN, C. The evacsim pedestrian evacuation agent model: development and validation. In: SOCIETY FOR MODELING & SIMULATION INTERNATIONAL. **Proceedings of the 2013 Summer Computer Simulation Conference**. [S.l.], 2013. p. 38.
- NASIR, M. et al. A genetic fuzzy system to model pedestrian walking path in a built environment. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Elsevier, v. 45, p. 18–34, 2014.
- NASIR, M.; NAHAVANDI, S.; CREIGHTON, D. Fuzzy simulation of pedestrian walking path considering local environmental stimuli. In: IEEE. **Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2012 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2012. p. 1–6.
- NEUMANN, J. V. **Theory of Self-Reproducing Automata**. Champaign, IL, USA: University of Illinois Press, 1966.
- ORAZIO, M. D. et al. Agent-based model for earthquake pedestrians evacuation in urban outdoor scenarios: Behavioural patterns definition and evacuation paths choice. **Safety science**, Elsevier, v. 62, p. 450–465, 2014.
- PAPADIMITRIOU, E.; YANNIS, G.; GOLIAS, J. A critical assessment of pedestrian behaviour models. **Transportation research part F: traffic psychology and behaviour**, Elsevier, v. 12, n. 3, p. 242–255, 2009.
- PARISI, D. R.; GILMAN, M.; MOLDOVAN, H. A modification of the social force model can reproduce experimental data of pedestrian flows in normal conditions. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 388, n. 17, p. 3600–3608, 2009.
- PELECHANO, N.; MALKAWI, A. Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. **Automation in construction**, Elsevier, v. 17, n. 4, p. 377–385, 2008.

RODRIGUES, D. G. et al. Generating interpretable mamdani-type fuzzy rules using a neuro-fuzzy system based on radial basis functions. In: **IEEE. Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2014 IEEE International Conference on** [S.l.], 2014. p. 1352–1359.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

SENT, A. D. **Fuzzy Social Force Model**. 11 2014.
<https://github.com/altieresdelsent/FSFM>.

SENT, A. D. **Julia Fuzzy**. 11 2014.
<https://github.com/altieresdelsent/JuliaFuzzy>.

SENT, A. D. **MFFS Video**. 11 2014.
<https://www.youtube.com/watch?v=PvmGnC2QbII>.

SENT, A. D. **MFS Video**. 11 2014.
<https://www.youtube.com/watch?v=DE87pxkDZPk>.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Derivation of fuzzy control rules from human operators control actions. In: **Proceedings of the IFAC symposium on fuzzy information, knowledge representation and decision analysis**. [S.l.: s.n.], 1983. v. 6, p. 55–60.

TREUILLE, A.; COOPER, S.; POPOVIĆ, Z. Continuum crowds. In: **ACM. ACM Transactions on Graphics (TOG)**. [S.l.], 2006. v. 25, n. 3, p. 1160–1168.

WIJERMANS, F. E. H. **Understanding crowd behaviour: simulating situated individuals**. [S.l.]: University of Groningen, 2011.

WOLPERT, J.; ZILLMANN, D. The sequential expansion of a decision model in a spatial context. **Environment and Planning**, v. 1, n. 1, p. 91–104, 1969.

YILMAZ, E.; ISLER, V.; ÇETIN, Y. Y. The virtual marathon: Parallel computing supports crowd simulations. **IEEE computer graphics and applications**, IEEE, n. 4, p. 26–33, 2009.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and control**, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. **Information sciences**, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 199–249, 1975.

ZHU, B.; LIU, T.; TANG, Y. Research on pedestrian evacuation simulation based on fuzzy logic. In: IEEE. **Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, 2008. CAID/CD 2008. 9th International Conference on.** [S.l.], 2008. p. 1024–1029.