

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação

Desenvolvimento de técnicas de acompanhamento para interação entre humano e uma equipe de robôs

Murillo Rehder Batista

Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Computação e Matemática Computacional (PPG-CCMC)

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Murillo Rehder Batista

Desenvolvimento de técnicas de acompanhamento para interação entre humano e uma equipe de robôs

Tese apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional. *VERSÃO REVISADA*

Área de Concentração: Ciências de Computação e Matemática Computacional

Orientadora: Profa. Dra. Roseli Aparecida Francelin Romero

USP – São Carlos
Fevereiro de 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi
e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)

B333d Batista, Murillo Rehder
Desenvolvimento de técnicas de acompanhamento
para interação entre humano e uma equipe de robôs /
Murillo Rehder Batista; orientador Roseli Aparecida
Francelin Romero. -- São Carlos, 2019.
127 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
Ciências de Computação e Matemática Computacional) --
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação,
Universidade de São Paulo, 2019.

1. Sistemas multirrobóticos. 2. Interação humano-
robô. 3. Proxêmica. I. Romero, Roseli Aparecida
Francelin, orient. II. Título.

Murillo Rehder Batista

Development of following techniques for interaction of
human and multi-robot teams

Doctoral dissertation submitted to the Institute of
Mathematics and Computer Sciences – ICMC-USP, in
partial fulfillment of the requirements for the degree of
the Doctorate Program in Computer Science and
Computational Mathematics. *FINAL VERSION*

Concentration Area: Computer Science and
Computational Mathematics

Advisor: Profa. Dra. Roseli Aparecida
Francelin Romero

USP – São Carlos
February 2019

*Este trabalho é dedicado às pessoas que, assim como eu,
ficam para trás ou para frente demais quando andam com os amigos,
assim ficando totalmente desconectadas da conversa.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque Ele sabe o quanto eu precisei recorrer nesse tempo, que não foi fácil.

À minha mãe, que ensinou os valores corretos, e aos meus irmãos, que eu sempre olhei como aqueles a atingir como meta.

À minha orientadora, que teve que ter bastante paciência com as minhas constantes dúvidas desde a minha graduação.

Um agradecimento imenso à equipe Warthog Robotics, que sem a colaboração não seria possível realizar os experimentos com robôs reais. Agradecimentos em particular à Heloisa, Pakita, Evandro, Lang, Lucas Nakata. O agradecimento se estende ao Futebol de Robôs como um todo, que me introduziu à pesquisa em Robótica.

Aos colegas de laboratório, que foram companhia constante no dia-a-dia.

Ao Douglas, pelas trocas de ideias.

Ao Henrique, pelo capacete.

Ao Nuno, ao Thauan e ao Amador, que me deram uma enorme assistência.

À CAPES, pela bolsa.

À Viviane, Maria Luiza e Sabrina, por todo o processo ainda em andamento de tratamento.

RESUMO

BATISTA, M. R. **Desenvolvimento de técnicas de acompanhamento para interação entre humano e uma equipe de robôs**. 2019. 129 p. Tese (Doutorado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2019.

A Robótica tem avançando significativamente nas últimas décadas, chegando a apresentar produtos comerciais, como robôs aspiradores de pó e quadricópteros. Com a integração cada vez maior de robôs em nossa sociedade, mostra-se necessário o desenvolvimento de métodos de interação entre pessoas e robôs para gerenciar o convívio e trabalho mútuo. Existem alguns trabalhos na literatura que consideram o posicionamento socialmente aceitável de um robô, acompanhando um indivíduo, mas não consideram o caso de uma equipe de robôs navegando com uma pessoa considerando aspectos de proxêmica. Nesta tese, são propostas várias estratégias de acompanhamento de um humano por um time de robôs social, que são bioinspiradas por serem baseadas em técnicas de inteligência coletiva e comportamento social. Experimentos simulados são apresentados visando comparar as técnicas propostas em diversos cenários, destacando-se as vantagens e desvantagens de cada uma delas. Experimentos reais permitiram uma análise da percepção das pessoas em interagir com um ou mais robôs, demonstrando que nenhuma diferença na impressão dos indivíduos foi encontrada.

Palavras-chave: Sistemas Multirrobo, Interação Humano-robô, Proxêmica.

ABSTRACT

BATISTA, M. R. **Development of following techniques for interaction of human and multi-robot teams** . 2019. 129 p. Tese (Doutorado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2019.

The field of Robotics have been advancing significantly on the last few decades, presenting commercial products like vacuum cleaning robots and autonomous quadcopter drones. With the increasing presence of robots in our routine, it is necessary to develop human-robot interaction schemes to manage their relationship. Works that deal with a single robot doing a socially acceptable human following behavior are available, but do not consider cases where a robot team walks with a human. In this thesis, it is presented a solution for social navigation between a human and a robot team combining socially aware human following techniques with a multi-robot escorting method, generating four bioinspired navigation strategies based on collective intelligence and social behavior. Experiments comparing these four strategies on a simulated environment in various scenarios highlighted advantages and disadvantages of each strategy. Moreover, an experiment with real robots was made to investigate the difference on perception of people when interacting with one or three robots, and no difference was found.

Keywords: Multi-Robot Systems, Human-Robot Interaction, Proxemics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagramas diferenciando a interação entre humanos (H) e robôs (R). À esquerda, uma interação entre um humano e dois robôs, enviando comandos distintos para cada robô; à direita, a interação é entre o humano e uma equipe de robôs. Adaptado de Yanco e Drury (2002).	42
Figura 2 – Diferentes modelagens para as zonas sociais. (a) círculos concêntricos; (b) modelagem anisotrópica; (c) elipses concêntricas; (d) modelagem considerando o lado dominante da pessoa. Adaptado de Rios-Martinez, Spalanzani e Laugier (2015).	46
Figura 3 – Contornos de uma FGA centrada em [0,0] (KIRBY, 2010).	47
Figura 4 – A F-formação, os indivíduos que a formam e os espaços correspondentes (KENDON, 2010).	49
Figura 5 – A formação de um p-espaço e seu o-espaço correspondente.	50
Figura 6 – Forças de a) atração; b) repulsão; c) combinação das duas forças (FARIA, 2006).	52
Figura 7 – Passagem por um corredor apertado a) sem oscilação; b) com oscilação. Adaptado de (KOREN; BORENSTEIN, 1991).	53
Figura 8 – Distâncias utilizadas para calcular a posição desejada para navegar lado-a-lado.	59
Figura 9 – A região em que robôs são considerados postos ao lado da pessoa.	64
Figura 10 – Imagem dos robôs andando com a pessoa utilizando a estratégia de <i>flocking</i> (esquerda) e normas sociais (direita) nos experimentos em escala micro.	66
Figura 11 – Imagem dos robôs andando com a pessoa utilizando a estratégia de <i>flocking</i> com a regra de navegação lado-a-lado (esquerda) e normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado (direita) nos experimentos em escala micro.	66
Figura 12 – O primeiro cenário de testes na escala micro.	67
Figura 13 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no primeiro cenário.	68
Figura 14 – Resultados das distâncias médias do primeiro cenário de teste na escala micro.	69
Figura 15 – Número médio de robôs navegando ao lado no primeiro cenário de teste na escala micro.	70
Figura 16 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no primeiro cenário de teste na escala micro.	70
Figura 17 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no primeiro cenário de teste na escala micro.	71

Figura 18 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no primeiro cenário de teste na escala micro.	71
Figura 19 – Média de deslocamentos angulares no primeiro cenário de teste na escala micro.	72
Figura 20 – O segundo cenário de testes na escala micro. A linha preta indica a trajetória percorrida pela pessoa.	73
Figura 21 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no segundo cenário.	73
Figura 22 – Resultados das distâncias médias do segundo cenário de teste na escala micro.	74
Figura 23 – Número médio de robôs navegando ao lado no segundo cenário de teste na escala micro.	75
Figura 24 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no segundo cenário de teste na escala micro.	75
Figura 25 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no segundo cenário de teste na escala micro.	76
Figura 26 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no segundo cenário de teste na escala micro.	76
Figura 27 – Média de deslocamentos angulares no segundo cenário de teste na escala micro.	77
Figura 28 – O terceiro cenário de testes na escala micro. A linha preta indica a trajetória percorrida pela pessoa.	77
Figura 29 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no terceiro cenário.	78
Figura 30 – Resultados das distâncias médias do terceiro cenário de teste na escala micro.	79
Figura 31 – Número médio de robôs navegando ao lado no terceiro cenário de teste na escala micro.	80
Figura 32 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado no terceiro cenário de teste na escala micro.	80
Figura 33 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no terceiro cenário de teste na escala micro.	81
Figura 34 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no terceiro cenário de teste na escala micro.	81
Figura 35 – Média de deslocamentos angulares no terceiro cenário de teste na escala micro.	82
Figura 36 – O quarto cenário de testes na escala micro. A linha preta indica a trajetória percorrida pela pessoa.	82
Figura 37 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no quarto cenário.	83
Figura 38 – Resultados das distâncias médias do quarto cenário de teste na escala micro.	84
Figura 39 – Número médio de robôs navegando ao lado no quarto cenário de teste na escala micro.	84

Figura 40 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado no quarto cenário de teste na escala micro.	85
Figura 41 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no quarto cenário de teste na escala micro.	85
Figura 42 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no quarto cenário de teste na escala micro.	86
Figura 43 – Média de deslocamentos angulares no quarto cenário de teste na escala micro.	86
Figura 44 – O quinto cenário de testes na escala micro.	87
Figura 45 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no quinto cenário.	88
Figura 47 – Número médio de robôs navegando ao lado no quinto cenário de teste na escala micro.	88
Figura 46 – Resultados das distâncias médias do quinto cenário de teste na escala micro.	89
Figura 48 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado no quinto cenário de teste na escala micro.	89
Figura 49 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no quinto cenário de teste na escala micro.	90
Figura 50 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no quinto cenário de teste na escala micro.	90
Figura 51 – Média de deslocamentos angulares no quinto cenário de teste na escala micro.	91
Figura 52 – Imagem dos robôs andando com a pessoa utilizando a estratégia de <i>flocking</i> (esquerda) e normas sociais (direita) nos experimentos em escala macro. . .	92
Figura 53 – Imagem dos robôs andando com a pessoa utilizando a estratégia de <i>flocking</i> com a regra de navegação lado-a-lado (esquerda) e normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado (direita) nos experimentos em escala macro.	93
Figura 54 – Resultados das distâncias médias do primeiro cenário de teste na escala macro.	93
Figura 55 – Número médio de robôs navegando ao lado no primeiro cenário de teste na escala macro.	94
Figura 56 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no primeiro cenário de teste na escala macro.	94
Figura 57 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no primeiro cenário de teste na escala macro.	95
Figura 58 – Resultados das distâncias médias do segundo cenário de teste na escala macro.	96
Figura 59 – Número médio de robôs navegando ao lado no segundo cenário de teste na escala macro.	97
Figura 60 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no segundo cenário de teste na escala macro.	97
Figura 61 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no segundo cenário de teste na escala macro.	98

Figura 62 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no segundo cenário de teste na escala macro.	98
Figura 63 – Instante inicial do terceiro cenário de testes na escala macro. O círculo vermelho maior é a pessoa que será acompanhada, os círculos azuis ao lado identificam a direção das pessoas, os demais círculos maiores representam outras pessoas e os pequenos losangos são os robôs.	99
Figura 64 – Resultados das distâncias médias do terceiro cenário de teste na escala macro.	100
Figura 65 – Número médio de robôs navegando ao lado no terceiro cenário de teste na escala macro.	101
Figura 66 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no terceiro cenário de teste na escala macro.	101
Figura 67 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no terceiro cenário de teste na escala macro.	102
Figura 68 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no terceiro cenário de teste na escala macro.	102
Figura 69 – As rodas do robô omnidirecional da equipe Warthog Robotics.	106
Figura 70 – Visualização da pose dos robôs através do programa WREye.	107
Figura 71 – Robô utilizados no experimento sem a base adicional (esquerda) e com a base impressa (direita).	109
Figura 72 – Configuração inicial dos experimentos com pessoas.	110
Figura 73 – Respostas às sete afirmações, separadas pelo número de robôs.	114
Figura 74 – Respostas à sexta afirmação e sua associação com o grau de experiência reportado, com separação entre um e três robôs.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre esta tese e trabalhos relacionados.	39
Tabela 2 – Constantes utilizadas nos experimentos em escala micro.	65
Tabela 3 – Constantes utilizadas nos experimentos em escala macro.	92
Tabela 4 – Média de aproximações críticas por cenário e estratégia.	104
Tabela 5 – P-valores das correlações em avaliação.	113

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	23
1.2	Organização desta Tese	24
2	TRABALHOS RELACIONADOS	25
2.1	Interação Humano Robô - HRI	25
2.1.1	<i>Proxêmica em HRI</i>	26
2.1.2	<i>Navegação conjunta de um robô com um indivíduo</i>	29
2.2	Sistemas multirrobóticos	32
2.2.1	<i>Sistemas multirrobóticos em HRI</i>	34
2.3	Considerações finais	38
3	FUNDAMENTOS	41
3.1	Taxonomias em HRI	41
3.2	Itens do tipo Likert	43
3.3	Proxêmica	44
3.3.1	<i>Espaços criados por um indivíduo</i>	45
3.3.1.1	<i>Zonas sociais através da Função Gaussiana Assimétrica</i>	46
3.3.2	<i>Espaços gerados por um grupo de pessoas</i>	48
3.3.2.1	<i>Formações entre indivíduos durante o deslocamento</i>	49
3.4	Campos potenciais	51
3.5	Considerações finais	52
4	ESTRATÉGIAS PROPOSTAS	55
4.1	Definições	55
4.2	Comportamentos em comum	56
4.3	Acompanhamento baseado em <i>flocking</i>	58
4.4	Acompanhamento baseado em <i>flocking</i> utilizando a regra de navegação lado-a-lado	58
4.5	Acompanhamento baseado em normas sociais	59
4.6	Acompanhamento baseado em normas sociais utilizando a regra de navegação lado-a-lado	60
4.7	Considerações finais	61

5	EXPERIMENTOS SIMULADOS	63
5.1	Critérios de Avaliação	63
5.2	Avaliações em escala micro	64
5.2.1	<i>Escala micro: primeiro cenário</i>	67
5.2.2	<i>Escala micro: segundo cenário</i>	72
5.2.3	<i>Escala micro: terceiro cenário</i>	74
5.2.4	<i>Escala micro: quarto cenário</i>	82
5.2.5	<i>Escala micro: quinto cenário</i>	86
5.3	Avaliações em escala macro	91
5.3.1	<i>Escala macro: primeiro cenário</i>	92
5.3.2	<i>Escala macro: segundo cenário</i>	95
5.3.3	<i>Escala macro: terceiro cenário</i>	98
5.3.4	<i>Discussão dos experimentos simulados</i>	102
5.4	Considerações finais	104
6	EXPERIMENTOS COM ROBÔS REAIS	105
6.1	Infraestrutura para os experimentos com robôs reais - software	106
6.2	Infraestrutura para os experimentos com robôs reais - hardware	108
6.3	Considerações iniciais sobre os experimentos em ambiente real	108
6.3.1	<i>Etapas dos experimentos</i>	109
6.4	Critérios de avaliação e hipóteses	112
6.5	Resultados	113
6.6	Discussão dos experimentos com robôs reais	116
6.7	Considerações finais	116
7	CONCLUSÃO	117
7.1	Trabalhos decorrentes do período como doutorando	118
7.2	Declaração sobre auxílios	119
	REFERÊNCIAS	121
ANEXO A	TERMO DE COMPROMISSO ASSINADO PELOS PARTICIPANTES NO EXPERIMENTO	127

INTRODUÇÃO

Um robô pode ser definido como uma máquina que tem recursos para interpretar o ambiente em que está inserido e agir de maneira adequada (ROMERO *et al.*, 2014). As pesquisas em Robótica têm como meta, entre outras, tornar robôs capazes de realizar tarefas que sejam repetitivas, perigosas ou inviáveis para humanos. Atualmente, várias aplicações advindas desta área de pesquisa estão disponíveis, como o robô aspirador Roomba (JONES, 2006) e o robô social NAO (GOUAILLIER *et al.*, 2009).

Algumas tarefas podem ser realizadas com maior desempenho se vários robôs forem utilizados ao mesmo tempo. Esta é a base de sustentação dos sistemas multirrobóticos. Substituindo um robô de maiores capacidades por vários robôs de capacidade reduzida, tem-se um desempenho muitas vezes superior pela robustez conferida pela presença de mais de um agente realizando a tarefa, maior alcance, redução de custo pelo uso de vários agentes robóticos de baixo custo, entre outros aspectos (STONE; VELOSO, 2000).

Este desempenho depende, entretanto, de mecanismos de *software* e de *hardware* que permitam a colaboração entre os robôs, ou seja, que auxilie os mesmos a realizar tarefas sem interferir negativamente no desempenho de seus vizinhos. Um exemplo de mau planejamento de sistemas multirrobóticos é a ocorrência de colisões entre dois robôs, em que ambos têm suas trajetórias interrompidas. Muitas vezes, o desempenho de uma tarefa realizada por vários robôs pode ser potencializado se os mesmos forem programados para interagirem entre si de maneira que um robô ajude nas ações de seu vizinho, podendo gerar um comportamento coletivo.

Um comportamento coletivo comum em sistemas com múltiplos robôs é a construção de formações entre os mesmos. Tais formações consistem em um posicionamento relativo entre os robôs para atender a uma funcionalidade específica. Exemplos como carregamento coletivo de objetos (WANG *et al.*, 2009) e escolha de agentes móveis (BATISTA, 2014) mostram que existem tarefas que dependem da ação de múltiplos robôs e, também, de tais formações para funcionarem adequadamente.

A medida que são desenvolvidos e integrados robôs no cotidiano, mostram-se necessários esforços na implementação de técnicas para gerenciar a interação entre pessoas e robôs. A área de estudo deste assunto chama-se Interação Humano-Robô (*Human-Robot Interaction*, HRI). [Veloso \(2014\)](#) afirmam que é necessário tratar esta interação considerando vários aspectos em trabalhos futuros, como a presença de múltiplos robôs e a possibilidade de auxílio mútuo entre pessoas e robôs, ou seja, tanto a pessoa pode ajudar o robô a realizar a tarefa como vice-versa.

Um outro aspecto que foi apontado é a navegação do robô em um ambiente juntamente com pessoas. Isto é visado porque um robô que presta serviços para uma pessoa e que interage com a mesma pode precisar, por exemplo, lhe guiar até algum local (ou vice-versa), servir como auxílio sensorial para pessoas deficientes, ou vir a realizar uma tarefa em conjunto com a pessoa ([ROSENTHAL; BISWAS; VELOSO, 2010](#)). Alguns trabalhos já foram realizados com o objetivo de fazer com que um robô de serviços acompanhe uma pessoa com a preocupação específica de não dificultar a navegação da pessoa e evitar que a pessoa não tenha confiança no acompanhamento do robô. [Morales, Kanda e Hagita \(2014\)](#), por exemplo, busca um acompanhamento de uma pessoa por um robô fazendo com que o mesmo tente andar ao lado da pessoa, e não simplesmente se posicionar atrás da mesma. [Hu, Wang e Ho \(2014\)](#) argumentam que robôs carregadores de objetos que podem ser requisitados pelo indivíduo a qualquer momento, como robôs carregadores de compras ou de ferramentas, são mais convenientes se posicionados à frente da pessoa.

Não basta fazer com que os robôs respondam a tarefas; é importante que a maneira que os robôs interajam com o indivíduo seja aceita pelo mesmo. A preocupação não deve estar unicamente na realização da ação, mas em atuar de modo que resulte na aceitação da colaboração do robô por parte do indivíduo. Um robô que consiga seguir uma pessoa mas não considere normas sociais pode enfrentar resistência da pessoa, seja por desconforto ou por falta de confiança.

Os métodos de acompanhamento social observados na literatura tipicamente consideram um único robô. À medida em que robôs inserem-se em nossa sociedade, é natural imaginar que sistemas multirrobóticos que atuem em formações apresentem-se em nosso cotidiano. É importante, portanto, considerar como estes agentes irão acompanhar um indivíduo de maneira socialmente aceitável, assim como no caso de um único robô.

Trabalhos em que um grupo de robôs é controlado de alguma forma por um humano são frequentemente vistos na literatura, seja na aplicação específica, como equipes de iniciativa mista para resgate ([CACACE; FINZI; LIPPIELLO, 2014](#)), ou com foco na estratégia para controlar a equipe de maneira prática ([AYANIAN et al., 2014](#)). Estes trabalhos geralmente abordam o problema considerando que o indivíduo e os robôs não precisem andar de maneira conjunta, ou mesmo no mesmo ambiente; os trabalhos de [Penders et al. \(2011\)](#) e ([GARRELL; SANFELIU, 2012](#)) são exceções, com uma equipe que acompanha indivíduos constantemente. Não há, entretanto, preocupação em verificar se o uso de múltiplos robôs para navegar com o

indivíduo ao invés de um único robô é conveniente ou se inibe a interação.

Um trabalho encontrado que trata do posicionamento socialmente aceitável de uma formação de robôs com pessoas e que avalia a percepção das mesmas é o de [Suzuki et al. \(2014\)](#), mas este trabalho têm limitações como o seguimento de uma trajetória pré-definida e a construção de formações ser limitada a manter os robôs em posições relativas fixas, sem soluções para situações em que a formação precisa se adaptar como corredores apertados ou curvas fechadas e a solução ser fechada para apenas dois robôs. Além disso, o conforto de navegação é medido sem considerar uma variação no número de robôs e envolve a percepção de estar navegando com pessoas, e não especificamente com as cadeiras de rodas. O trabalho de [Sato et al. \(2014\)](#) envolve a formação socialmente aceitável de dois robôs com um indivíduo, mas não chega a fazer uma avaliação de conforto e também está limitado a apenas dois robôs.

Nesta tese, o problema de navegação socialmente aceitável de uma equipe de robôs que acompanha um indivíduo é investigado. São apresentadas quatro estratégias de navegação bioinspiradas construídas a partir de conceitos de sistemas multirrobóticos e de proxêmica. Uma contribuição desta tese é, especificamente, o estudo e adaptação das técnicas desenvolvidas para a navegação de múltiplos robôs com a finalidade de respeitar normas sociais.

Para identificar diferenças de percepção de humanos em interagir com um robô ou com uma equipe de robôs, são feitos experimentos de navegação conjunta de robôs com pessoas reais para identificar se, por exemplo, a confiança da pessoa nos robôs é afetada quando se trata de uma equipe ao invés de um único robô. Esta comparação com pessoas é, também, uma das principais contribuições desta tese.

Dentre as possíveis aplicações da pesquisa apresentada, pode-se considerar a retirada de objetos que possam obstruir o caminho de pessoas com dificuldade de locomoção, o acompanhamento de um indivíduo que esteja com dificuldades de enxergar o ambiente ([PENDERS et al., 2011](#)), o carregamento e entrega de objetos para uma pessoa, estratégias de acompanhamento para robôs de tele-presença, dentre outras tarefas que um robô de serviço pode realizar e que podem ser distribuídas entre os mesmos. Considerando que os robôs interajam entre si e com outras pessoas, o plano proposto visa avançar nesta direção, considerando cenários em que um grupo de robôs esteja designado para acompanhar uma pessoa, seja chamado para ajudar uma pessoa, ou mesmo recorra a um indivíduo para ajudar a equipe de robôs a realizar uma tarefa.

1.1 Objetivos

O principal objetivo desta proposta de tese é propor técnicas de acompanhamento social bio-inspiradas que consideram um humano sendo acompanhado por um sistema multirrobótico, visto que técnicas de acompanhamento socialmente aceitável existentes na literatura são tipicamente elaborados considerando apenas um único robô. Para isso, é necessário considerar alguns problemas que são identificados através de observações objetivas, como dificuldade no

posicionamento dos robôs em regiões confortáveis.

O segundo objetivo é fazer a comparação de diferença de percepção de navegação entre um único robô e uma equipe de robôs. Esta etapa é avaliada através de critérios subjetivos, como um potencial desconforto que poderá ser sentido por uma pessoa que é acompanhada por um grupo de robôs.

1.2 Organização desta Tese

Esta tese está organizada do seguinte modo. No Capítulo 2, alguns trabalhos relacionados, com ênfase na navegação conjunta de robôs com um humano, são apresentados. No Capítulo 3, são descritos alguns conceitos e técnicas que servem como fundamentos para o desenvolvimento desta tese. No Capítulo 4, são apresentadas as técnicas de acompanhamento, de um humano por robôs, propostas neste trabalho. Os experimentos realizados em nível de simulação e resultados obtidos são descritos no Capítulo 5. A estrutura preparada para aplicar o que foi desenvolvido em robôs reais é apresentada, juntamente com os experimentos reais realizados, no Capítulo 6, juntamente com os resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo 7 são apresentações as conclusões e trabalhos futuros.

TRABALHOS RELACIONADOS

Neste Capítulo são descritos os principais trabalhos encontrados nas seguintes subáreas relacionadas a esta tese: interação humano-robô, sistemas multirrobóticos. Destacam-se os trabalhos de navegação conjunta de um robô com um indivíduo. Vale ressaltar o fato de que foram encontrados poucos trabalhos que tratam da formação socialmente aceitável de dois robôs com uma pessoa, e nenhum que considera três ou mais robôs ou a construção desta navegação adaptando uma técnica de formação de equipes de robôs como é feito nesta tese.

2.1 Interação Humano Robô - HRI

O trabalho de [Hasnain, Mostafaoui e Gaussier \(2012\)](#) apresenta um robô que busca estabelecer uma comunicação implícita através da sincronia de movimentação com o indivíduo. O robô aprende a mexer uma junta de acordo com o movimento dos braços de uma pessoa.

Esta estratégia foi testada para um robô navegando junto a uma pessoa. O robô tinha uma câmera acoplada, e através das imagens capturadas pela câmera era identificada a movimentação dos braços. Para tratar dificuldades na estimativa através da câmera causadas pela movimentação do próprio robô, redes neurais de mínimos quadrados foram adotadas para aprender padrões de movimento e realizar a compensação da movimentação do robô no processo de captura. O robô torna-se capaz de girar em torno de seu próprio eixo quando as redes neurais sinalizam um deslocamento à esquerda ou à direita do indivíduo. No caso desta tese, uma sincronia da movimentação do robô com a pessoa pode ser de grande auxílio para a aceitação dos robôs pela mesma.

[Torta et al. \(2014\)](#) apresentaram uma situação onde um robô humanoide tem que chamar a atenção de uma pessoa por meio de recursos como a fala, olhar fixo nos olhos da pessoa, acendendo luzes de LED a partir de seus olhos ou através de gestos com seu braço. O ambiente de testes consistiu em uma sala onde voluntários assistiam a programas de televisão, e um robô

NAO que buscou chamar a atenção da pessoa em determinados instantes. A reação da pessoa foi atingida mais rapidamente por meio de comandos de voz, com a estratégia de olhar diretamente para a pessoa tendo o pior desempenho. Não foi identificada uma relação entre o tempo de resposta e o ângulo em que o robô se aproxima da pessoa, fator mais relacionado com o que é estudado neste trabalho.

Kruse *et al.* (2013) apresentaram um estudo sobre navegação de robôs que interagem com pessoas. Três fatores foram apontados como principais para serem tratados: o conforto de navegação, diretamente associado no texto a fatores proxêmicos, a naturalidade de movimentação e a sociabilidade, ou seja, o respeito a normas sociais. O levantamento do estado da arte aponta para a realização de experimentos simulados preliminares para avaliar o posicionamento do robô seguidos de experimentos reais que avaliam a opinião das pessoas que interagem, assim como foi feito nesta tese.

Dragan *et al.* (2015) apresentaram um estudo sobre a movimentação de um braço robótico e a influência da mesma sobre a interação com o indivíduo. As ações são classificadas de acordo com o grau de legibilidade e de eficácia da ação do robô: ações funcionais são as que conseguem realizar a tarefa, mas não são ótimas em relação ao seu desempenho isoladamente, tampouco fáceis de interpretar; ações previsíveis não são facilmente interpretáveis pelo indivíduo caso este não saiba qual é a meta do robô, mas são otimizadas; ações legíveis, ou seja, de fácil interpretação, não são tão eficientes quanto as ditas previsíveis, mas facilitam a colaboração com o indivíduo. O trabalho identificou que a escolha de um movimento legível leva a reações de colaboração mais rápidas em uma tarefa conjunta com um humano, e portanto a uma tarefa colaborativa com melhor desempenho. Além disso, o movimento legível foi avaliado pelos participantes do experimento como mais previsível do que o movimento projetado como previsível.

Este último resultado em particular leva, também, à conclusão de que as pessoas consideram o gesto legível como sendo o mais eficiente, ao contrário do determinado pela métrica de tempo. Isto sugere que a sugestão de eficiência depende não somente do desempenho verdadeiro como de critérios subjetivos. Os autores apontam, porém, que esta associação depende de um esforço de predição da intenção; avaliadores que assistiram a vídeos dos testes consideraram, em média, a ação previsível como mais eficiente.

O fator de associação de movimentação traz como uma hipótese plausível a associação da estratégia de posicionamento dos robôs em relação ao indivíduo com o desempenho cooperativo e, também, com a percepção subjetiva dos usuários.

2.1.1 Proxêmica em HRI

O estudo do posicionamento entre um indivíduo e um robô, nomeado estudo de comunicação proxêmica, é uma maneira de investigar melhores estratégias de interação entre ambas as entidades. A proxêmica foi definida por Hall (1966) como o estudo da percepção e do uso do

espaço por seres humanos. Determina-se a comunicação proxêmica como aquela feita a partir do posicionamento entre indivíduos. Este tipo de comunicação pode ser observado em grupos de animais, que estabelecem distâncias fixas entre si de forma natural.

O trabalho de Hall determina que o alcance de um humano não se limita à sua pele; ele está definido por um conjunto de diferentes espaços de tamanho variável. A partir de dados coletados através de observações de indivíduos e de entrevistas, foram definidas quatro espaços, em ordem de distanciamento: íntimo, pessoal, social e público.

Cada ordem de distanciamento foi determinada considerando o impacto das informações sensoriais em cada distância; o campo íntimo envolve contatos de corpo inteiro e dificuldade em dimensionar adequadamente a imagem do rosto, enquanto a distância social não é significativamente impactada pelo odor do indivíduo próximo. O raio de alcance destas dimensões depende de fatores como a posição hierárquica dos envolvidos na interação e de fatores culturais.

No que diz respeito à influência da comunicação proxêmica na relação entre indivíduos, ou seja, como as posições relativas são utilizadas para comunicar algo, a área de interação humano-robô tem estudos de como um posicionamento adequado pode afetar a aceitação humana da convivência, seja para trabalho ou lazer, com robôs. [Kim e Mutlu \(2014\)](#) realizaram um estudo que investiga a relação do posicionamento combinado à condição hierárquica e ao tipo de tarefa conjunta. O aspecto hierárquico refere-se não somente à relações de poder (se um robô toma a iniciativa de liderança ou é apenas subordinado do indivíduo), mas também a se a tarefa é cooperativa ou competitiva.

O trabalho investigou cinco hipóteses relacionadas ao desempenho e à percepção do indivíduo:

- O desempenho e percepção humana serão melhores com robôs próximos (no caso deste trabalho, a 46 cm) do que com robôs distantes (120 cm);
- Participantes irão demonstrar maior satisfação com robôs que supervisionam a tarefa ao invés de robôs subordinados;
- Robôs colaborativos terão uma avaliação do indivíduo melhor do que robôs competitivos;
- A avaliação para robôs que supervisionam a tarefa será melhor para robôs próximos, enquanto que a situação contrária será observada para robôs subordinados;
- O desempenho e avaliação humana de robôs competitivos será melhor com os robôs mais distantes, e vice-versa com robôs cooperativos.

Os experimentos foram realizados com um robô humanoide que participava de um jogo com cartas em que o indivíduo deve tentar encontrar pares de cartas iguais, e perdia pontos

quando escolhia um par de cartas diferentes. O comportamento de supervisão ou de subordinação dava-se pela maneira que o robô se comunicava com o indivíduo.

Não foi encontrada uma relação forte entre a distância e as avaliações, mas foi identificada uma correlação entre a relação de poder e a distância, sugerindo fortemente a quarta hipótese apresentada. O efeito da proximidade resultou em um desempenho de realização de tarefa inferior com o robô mais próximo um segundo experimento, similar ao primeiro; a diferença, neste caso, estava na informação de que, em alguns experimentos, o robô competia com o indivíduo.

Uma diferença chave entre o que é proposto nesta tese e este trabalho com relação aos mecanismos de interação está no robô, que no caso é humanoide, enquanto os robôs que pretende-se adotar nesta tese não têm o formato humanoide. Além disso, o mesmo não terá recursos de comunicação verbal. É possível que estas características também afetem a relação proxêmica do humano que interaja com os robôs. O que é proposto nesta tese considera, de certo modo, robôs subordinados, visto que quem dita o caminho a ser tomado é a pessoa, e pode-se dizer que a interação visa estimular a aceitação dos robôs pela pessoa, assim fomentando a cooperação.

Os trabalhos que tratam de proxêmica na interação humano-robô tipicamente avaliam principalmente a impressão que o indivíduo teve em seu contato com o robô. Uma exceção é a do trabalho de [Mead e Matarić \(2017\)](#), que colocou em pauta especificamente a relação da posição e seu efeito na recepção dos sinais sociais (comandos de voz e através de gestos). Foi implementado um *framework* probabilístico que controla o robô de modo que o mesmo considere um posicionamento vantajoso para captar comandos de voz e de gestos de maneira adequada. São considerados tanto o modo que a pessoa emite o comando (em que região do espaço no caso de gestos, com que volume no caso de comandos por voz) como a situação em que o robô recebe essas instruções. Um método reativo foi comparado com o *framework* proposto, e os autores consideraram que o potencial de interação do método durante a navegação até a frente do indivíduo foi maior com o planejador.

[Houwelingen-Snippe et al. \(2017\)](#) avaliaram o efeito do desrespeito à zona pessoal da pessoa por um robô de telepresença. O experimento foi conduzido apresentando ao indivíduo hipotéticos candidatos a serem seus colegas de quarto através do robô; este robô se aproximaria da pessoa de maneira necessária para o experimento (distâncias que invadam ou que não invadam o espaço pessoal). Foi observado que, em média, as pessoas recuavam mais da aproximação do robô quando o mesmo invadia a zona social preestabelecida pelos autores. A hipótese levantada de que a aproximação excessiva afetaria a avaliação subjetiva sobre os candidatos não teve sustentação estatística.

[Kanda et al. \(2009\)](#) propuseram um modelo de aproximação de um robô móvel para chamar a atenção de uma pessoa a fim de oferecê-la ajuda. Tal modelo analisa o padrão de movimentação de uma pessoa para julgar as chances da mesma estar disposta a interagir. A predição da movimentação também é importante no ato da aproximação, que foi feito no trabalho

de modo que o robô posicione-se à frente da pessoa.

Nota-se novamente a preocupação com a aproximação diferenciada do robô em relação ao indivíduo, visando manter normas sociais para atingir melhores resultados de interação. O método depende de forte estruturação do ambiente, exigindo a presença de sensores *laser* nas imediações de atuação do robô para avaliar a movimentação das pessoas. O conceito de aproximação para interação tem como base principal a proxêmica, tal como neste trabalho.

Uma característica que é estudada quando consideram-se fatores proxêmicos é o padrão de movimentação de uma pessoa. [Satake et al. \(2009\)](#) coletaram observações de pessoas andando em um *shopping center* e fizeram um agrupamento destes dados para diferenciar pessoas “ocupadas” (sem interesse de olhar itens de uma loja) de potenciais clientes. O objetivo é aplicar esta classificação para definir se um robô deve ou não abordar uma pessoa para fazer propaganda de um produto. O trabalho também trata do modo de aproximação do robô; ele considera que é interessante o mesmo se aproximar de modo que sinalize interesse em estabelecer comunicação.

Um experimento associando a distância entre um humano e um robô a gestos e voz foi apresentado por [Mead e Matarić \(2014\)](#); nele, pessoas assistiram a um desenho animado e discutiram com outra pessoa ou com um robô este desenho através de gestos com as mãos e pela fala.

Uma observação interessante feita pelo trabalho é que a distância observada entre humanos estava de acordo com o visto na literatura, mas o mesmo não pôde ser dito sobre a distância humano-robô. Uma hipótese levantada pelos autores analisando alguns trabalhos prévios de outros pesquisadores é que aqueles artigos descreviam que instruções envolvendo proximidade dos robôs eram dadas às pessoas, enquanto que no trabalho deles as instruções dadas limitavam-se à aspectos da interação não-proxêmica. Foi levantada a hipótese (mas não estudada a fundo) de que o distanciamento diferente estava associado às instruções de interação, que não explicitavam a percepção de proximidade e a capacidade de gesticulação do robô.

2.1.2 Navegação conjunta de um robô com um indivíduo

Trabalhos que tratam do acompanhamento de um indivíduo por um robô tem, muitas vezes, um foco no *tracking*, ou seja, identificação da posição do indivíduo, por meio de câmeras. Deve-se isto à necessidade de identificar onde a pessoa está para possibilitar o acompanhamento. [Choi et al. \(2013\)](#) trabalharam com a identificação de indivíduos em condições que apresentam dificuldades, como quando a pessoa está sentada ou quando há uma oclusão parcial. A câmera RGB-D Kinect é utilizada para capturar imagens; a capacidade de extrair a profundidade da imagem que câmeras como esta têm permite que o sistema tenha condições de identificar a distância da pessoa, além de evitar que sejam considerados como o mesmo objeto dois elementos distintos, mesmo que estejam a distâncias significativamente grandes em relação à profundidade. O método é capaz de identificar vários indivíduos em uma única imagem através de um conjunto

de operações: segmentação da imagem em subamostras, onde cada amostra tem um grafo gerado a partir de pontos escolhidos aleatoriamente, combinação de subamostras, identificação de subamostras candidatas (combinadas ou não) e classificação através de máquinas de vetor de suporte (SVM) para identificar quais regiões candidatas contém indivíduos.

Os experimentos foram feitos através de imagens de uma base de dados pública com pessoas de pé olhando para a câmera a distâncias distintas em relação à câmera e alguns casos de oclusão, e de imagens de uma cafeteria capturadas por um robô móvel, envolvendo várias situações que apresentam dificuldade de identificação e pessoas em posições diferentes (sentadas, de perfil). Apesar de não ter ocorrido a aplicação em tempo real da identificação, mostra-se um trabalho que enfrenta os problemas que um método que permita a um robô seguir uma pessoa dispondo de uma câmera RGB-D.

O trabalho de [Vasconcelos et al. \(2013\)](#) utiliza, também, uma identificação de pessoas através de uma câmera RGB-D. A identificação também adotou um classificador SVM, mas a determinação das regiões a serem classificadas foi feita a partir de histogramas de gradiente. Houve uma preocupação na etapa de identificação de indivíduos em aplicar um filtro para evitar que ruídos façam com que o número de indivíduos identificados mude com frequência; o tratamento foi justificado como um recurso para que o robô não realize mudanças bruscas de velocidade.

Quando o obstáculo é um humano, o tratamento de desvio é diferente de quando é uma parede, com o objetivo de ser mais socialmente aceitável. A velocidade do robô é dependente do número de pessoas identificadas e da distância à pessoa mais próxima. O algoritmo de navegação considera que o raio do robô é maior do que o real para que sejam feitas manobras mais suaves. Uma outra motivação está na impossibilidade de reconhecimento do indivíduo quando o robô está muito próximo, pois a câmera não é capaz, a partir de certa proximidade, de reconhecer o corpo inteiro. Esta observação encoraja a manutenção de uma distância que não interfira nos recursos sensoriais, o que permite traçar um paralelo com observações próximas ([HALL et al., 1968](#)). A trajetória do robô foi previamente definida durante os experimentos. O robô foi capaz de navegar adequadamente, mas mostrou alguns picos de velocidade, o que os autores apontaram como consequência de ter sido considerado apenas o número de indivíduos no filtro, e não a distância.

[Alvarez-Santos et al. \(2012\)](#) aplicam o reconhecimento de pessoas para segui-las; um sensor de feixes *laser* é utilizado para identificar as pernas, enquanto uma câmera identifica o tronco. A combinação das duas informações dá a posição de cada pessoa identificada. Um desafio enfrentado no trabalho foi definir dentro de um conjunto de pessoas qual o robô deveria seguir. A identificação foi feita verificando qual a pessoa mais próxima da direção angular que é prevista como a posição da pessoa que deve ser seguida. A única informação descrita sobre o método de navegação é que o robô utilizou campos potenciais para desviar de obstáculos e seguir a pessoa. A combinação de sensores de feixes *laser* e câmeras também foi adotada por

Hoshino e Morioka (2011). A classificação da posição das pessoas é feita através de um filtro de partículas. Um algoritmo de agrupamento é aplicado nas partículas para ajudar a diferenciar pessoas distintas. O trabalho não especifica nenhuma estratégia de navegação do robô.

Um trabalho que teve como prioridade a estratégia de acompanhamento foi apresentado por Gockley, Forlizzi e Simmons (2007). Os autores defendem que, para robôs que visam interagir com uma pessoa, a navegação lado-a-lado, ou seja, posicionando-se à esquerda ou à direita da pessoa, é mais conveniente. Eles não apresentaram, entretanto, um comportamento que fizesse este tipo de acompanhamento de fato. O estudo foi uma etapa inicial de investigação de percepção das pessoas sobre duas estratégias distintas de acompanhamento. A primeira fazia com que o robô tentasse ir em direção à pessoa, enquanto a segunda era o seguimento da mesma trajetória feita pelo indivíduo. As pessoas que visualizaram a navegação consideraram a primeira estratégia como mais natural. Foi apontado que os resultados apresentados foram colhidos da observação em terceira pessoa do acompanhamento, o que foi necessário por ser difícil para uma pessoa avaliar a movimentação de um robô que a segue por trás, ou seja, fora do seu campo de visão.

Kuderer e Burgard (2014) aplicaram de fato uma navegação lado-a-lado para um robô acompanhante, utilizando uma função de custo para estimar a posição do indivíduo considerando a presença do robô. Este trabalho estima uma trajetória a longo prazo do indivíduo, para que o robô tenha maior facilidade em manter seu posicionamento relativo à pessoa. A previsão a longo prazo é apontada como uma vantagem por ajudar a evitar problemas de mínimo local e para identificar situações em que não é possível ficar diretamente ao lado da pessoa, mas exige a existência de um mapa métrico.

Yeh *et al.* (2017) realizou o estudo do efeito da proxêmica na interação entre uma pessoa e um *drone*, que foi construído de modo a ser socialmente aceito, possuindo um rosto mostrado por um *tablet* e tendo voz. Uma diferença significativa para este estudo é que a distância tem que ser considerada em três dimensões distintas; ao invés da representação de zonas sociais através de uma circunferência, foi necessário adotar esferas. Uma observação importante foi que o barulho característico produzido pelo *drone* foi considerado um problema pelos participantes do experimento. O *drone* conseguiu realizar uma aproximação maior do que o que não dispunha de voz e de rosto.

O trabalho de (CHEN; ZHANG; ZOU, 2018) envolve a navegação de um robô em um ambiente com a presença de pessoas. O objetivo foi realizar uma navegação segura sem atrapalhar os indivíduos, seja evitando de passar bem à sua frente como evitando se deslocar no meio do centro de interação de um grupo de pessoas. Para modelar as zonas sociais, foram utilizadas funções Gaussianas assimétricas; este modelo foi utilizado para o acréscimo de custo de um planejador de trajetórias A*. Estas zonas sociais foram geradas com uma leve inclinação lateral para encorajar a passagem do robô à esquerda da pessoa, o que é considerado uma norma social no país dos autores, a China.

2.2 Sistemas multirrobo

Para que uma equipe de robôs $r^1 \dots r^n$ atue em conjunto e navegue como um único grupo, é importante que haja uma estratégia de formação, ou seja, de posicionamento entre os robôs que permita que os mesmos mantenham uma coesão como grupo e que realizem alguma tarefa em particular.

Um dos primeiros trabalhos sobre formação é o sobre os *boids* (REYNOLDS, 1987), em que um grupo de agentes virtuais navega em conjunto. Esta navegação surge a partir da combinação de três regras: aproximação para o centro do grupo, afastamento do agente vizinho mais próximo e alinhamento com os membros próximos. Apesar de não ser um trabalho advindo da área de Robótica, serviu como um ponto de partida para o desenvolvimento de técnicas de formação.

Reif e Wang (1999) apresentaram formações através de Campos Potenciais Sociais. Esta técnica permite que comportamentos de maior complexidade surjam da combinação de comportamentos simples. Com a aplicação adequada de forças atrativas e repulsivas, onde cada força tem uma força e um parâmetro de variação de acordo com a proximidade distintas, foi possível alcançar comportamentos em forma de formações, como a formação de agrupamentos, a proteção de agentes móveis e a formação de subgrupos.

(TAN *et al.*, 2004) gerenciaram a formação de uma equipe de robôs através de Diagramas Centroidais de Voronoi. O método é capaz de distribuir os robôs em um ambiente, resultando em uma cobertura de área que, sob uma regra de controle para evitar a dispersão dos robôs, mantém uma equipe de robôs coesa. A formação é robusta, permitindo a remoção ou acréscimo de robôs sem necessitar de uma regra específica para isto. O método exige, entretanto, que seja feita uma estimativa de centros de massa de um polígono de Voronoi.

Uma estratégia bastante utilizada para formação é adotar uma política líder-seguidor, ou seja, em que um robô determinado como líder comanda o direcionamento das formações e os demais, seguidores, acompanham sua trajetória. Weining *et al.* (2015) aplicam uma formação líder-seguidor para navegar em um ambiente desviando de obstáculos, fazendo com que o líder navegue até o local desejado enquanto os demais robôs têm como meta manter uma posição relativa pré-determinada do líder. O desvio de obstáculos é feito através da combinação do algoritmo *Vector Field Histogram*, que procura aberturas no caminho até uma meta, com uma variação do algoritmo BUG, que contorna obstáculos. A razão do uso desta estratégia é, também encontrar espaços por onde o robô seguidor possa seguir o líder quando há obstáculos entre eles. Encontrar espaços para o posicionamento é importante para este projeto porque há o interesse na manutenção de uma posição fixa ao lado da pessoa.

O trabalho de Vászrhelyi *et al.* (2014) utiliza os conceitos de *flocking* para comandar uma equipe de quadricópteros. Adaptações no comportamento base permitiram atingir formações em linha reta, anel e grade; tais formações foram mantidas mesmo com os robôs seguindo um

robô líder. Estas adaptações comportamentais foram feitas com o acréscimo de regras adicionais, ativadas dentro de condições específicas.

Uma aplicação de formação de robôs para carregar objetos foi apresentada por (WANG *et al.*, 2009). No cenário de aplicação apresentado, um grupo de robôs deve cercar um objeto de grande porte em comparação aos robôs posicionando-se ao redor do mesmo e empurrá-lo para uma posição qualquer. Os robôs são capazes de prever potenciais posições futuras que possam assumir, considerando que seja possível prever a movimentação do objeto. Este é um exemplo de aplicação que não seria possível utilizando um único robô, porque exige que o objeto esteja preso entre os robôs.

Um comportamento de formação visto em trabalhos que envolvem acompanhar algum objeto é o de escolta, onde robôs visam posicionar-se em volta do objeto a ser escoltado, e ajustam suas posições de acordo com a movimentação do mesmo. Neste texto, denomina-se escolta um comportamento da mesma natureza de técnicas líder-seguidor, em que existe uma meta de escolta (T) de trajetória desconhecida, que é tratada pelos robôs como líder, e a equipe de robôs tenta manter uma distância específica em relação a T . Tipicamente, os robôs formam um círculo ao redor da meta de escolta. A formação em anel apresentada por Vászrhelyi *et al.* (2014) pode ser considerada como um comportamento de escolta. A navegação conjunta de robôs com uma pessoa também pode ser pensada como uma escolta desta pessoa.

A escolta foi apresentada como base para apresentação de um método de controle baseado em espaço nulo (*null-space behaviorial*) por Antonelli, Arrichiello e Chiaverini (2008). Este mecanismo visa combinar adequadamente um conjunto de comportamentos. Para realizar a escolta, quatro comportamentos foram adotados: desvio de obstáculos, distribuição dos robôs em uma circunferência ao redor da meta de escolta, manutenção de centroide na posição da meta de escolta, e a formação de um polígono regular a partir da posição dos robôs. O método prevê a existência de obstáculos do ambiente, como paredes, mas não apresenta resultados considerando a existência dos mesmos.

A escolta para fins de captura de alvos sem conhecimento prévio da posição da meta foi o problema tratado por Montijano *et al.* (2013). Cada robô assume uma estimativa da posição de T por meio de modelos Gaussianos. Os autores afirmam que a estratégia de previsão pode causar falhas na captura através do padrão circular, apontando como solução manter uma formação elíptica ao redor da meta de escolta.

Mas *et al.* (2009) realiza a escolta através do conceito de espaço de *cluster*; ela determina que um grupo de robôs é representado por um único *cluster*, e que a movimentação de cada robô é feita em função dos atributos deste *cluster*. A escolta é alcançada através da movimentação do *cluster* dos robôs em direção à meta de escolta, o que faz estes robôs alcançarem o posicionamento da escolta. Variando a orientação do *cluster*, os robôs conseguem manter a escolta e realizar uma movimentação circular ao redor de T .

[Souza et al. \(2017\)](#) propuseram o uso de um sistema multirrobótico para tirar fotos de um objeto para uma reconstrução tridimensional do objeto através de fotogrametria. Uma técnica baseada em *flocking* e uma técnica baseada em Diagramas Centroidais de Voronoi (DCV) foram combinadas com uma força perpendicular ao vetor apontando do objeto até cada robô para que os agentes robóticos fossem capazes de girar ao redor do objeto mantendo distâncias regulares do mesmo. Foi concluído que a taxa de oclusão (quando um robô se posiciona entre outro robô e o objeto) do *flocking* foi menor, mas apresentou maior instabilidade na formação dos robôs.

2.2.1 Sistemas multirrobóticos em HRI

Destaca-se entre aspectos proxêmicos para os fins desta tese o posicionamento relativo de robôs móveis que cooperam com um indivíduo em movimento. Considere, como na Seção anterior, um conjunto de n robôs $R = \{r_1, \dots, r_n\}$ e uma meta de escolta ou de acompanhamento T .

Pode-se explicar formalmente o problema do posicionamento relativo a um indivíduo como um cenário de escolta; nela, um conjunto de agentes robóticos R deve seguir um outro robô, pessoa ou objeto qualquer procurando manter uma distância mínima. O comportamento resultante faz com que R torne-se um “satélite” de T .

A diferença entre o posicionamento em relação a um indivíduo para fins de interação social e um comportamento que simplesmente faz o robô seguir um agente está na necessidade de considerar fatores relevantes para a colaboração entre R e T ; no caso deste trabalho em particular, trata-se da consideração de fatores sociais para estimular a interação e torná-la mais confortável.

[Amraii, Chakraborty e Lewis \(2012\)](#) adotaram o controle de um robô líder para influenciar um enxame de robôs através da transmissão da direção na qual o enxame deve seguir. Duas abordagens distintas foram adotadas: imposição direta do comportamento definido pelo líder e passagem indireta da direção apontada pelo líder através de consenso de direcionamento dos robôs. A transmissão direta resultou em uma convergência mais rápida de direcionamento dos robôs, mas a adoção do consenso tornou a influência mais tolerante a ruídos.

A ideia de construir uma hierarquia entre os robôs através da definição de um líder que direciona os demais robôs é interessante para assumir o controle de um grupo de robôs de tamanho indefinido. No caso desta tese, o líder é o humano, e os robôs recebem uma influência direta em seus comportamentos através da movimentação do líder.

O trabalho de [Bashyal e Venayagamoorthy \(2008\)](#) apresenta um enxame de robôs que realiza a tarefa de localização de fontes de radiação em um ambiente. Os robôs navegam através do algoritmo de otimização por enxame de partículas (*PSO*), considerando que cada membro do enxame é uma única partícula. Foi visada a manutenção da independência do enxame, tornando a interação reduzida à teleoperação de um único robô, que foi guiado na direção em que o humano indicou que as chances de uma fonte de radiação existir seriam maiores.

Com isto, o enxame foi capaz de encontrar com maior rapidez seu alvo: em algoritmos de robótica de enxames, cada robô depende dos demais para suas tarefas, e o direcionamento de um robô influencia os demais. Observa-se neste trabalho que os robôs já conseguiriam realizar a tarefa independentemente do indivíduo, mas a ajuda de um operador humano acelerou a realização da tarefa.

O trabalho de [Oliveira, Batista e Romero \(2017\)](#) faz um estudo específico do uso de *beacons* para um indivíduo controlar remotamente um enxame de robôs. Foi estudado o quanto as pessoas utilizariam tanto *beacons* atrativos quanto repulsivos para controlar robôs em ambiente simulado, traçando um paralelo da atividade com um jogo eletrônico. De fato, foi observado que pessoas com experiência declarada em jogos eletrônicos foram capazes de realizar as trajetórias propostas com maior rapidez; entretanto, estes também utilizaram um número maior de *beacons*, o que foi apontado pelos autores como indesejado.

No trabalho de [Kato et al. \(2009\)](#), a tela de um aparelho mostra a posição dos robôs em uma determinada região, informação obtida por uma câmera acima dos robôs. Na região de atuação destes robôs, forças virtuais são aplicadas para gerenciar o direcionamento. Dentre os possíveis gestos, é adotado o arraste da tela com o dedo, que cria um “fluxo” vetorial que aplica uma força nos robôs. O toque em uma região anula as forças presentes na mesma, parando os robôs.

Um dos primeiros trabalhos em que uma equipe de robôs interage com humanos é o feito por [Martínez-García et al. \(2005\)](#), em que três robôs guiam um grupo de pessoas. Estes robôs as cercam, ditando a movimentação das mesmas à medida em que se movimentam. Os robôs mantiveram suas frentes voltadas às pessoas para que suas câmeras pudessem identificá-las.

Um trabalho em que uma equipe de robôs acompanha uma pessoa é visto no projeto GUARDIANS ([PENDERS et al., 2011](#)). Os robôs acompanham um bombeiro que realiza resgate em um galpão fechado, e o enviam informações sensoriais indicando a presença de obstáculos próximos. A ajuda é considerada importante porque os autores, em entrevistas com bombeiros, identificaram como dificuldade dos mesmos lidar com a fumaça do incêndio em galpões fechados, que dificulta a visão do bombeiro.

O projeto GUARDIANS considera uma situação interessante de interação entre humanos e uma equipe de robôs. A tarefa que os robôs realizam é, especificamente, auxiliar uma pessoa a navegar em condições difíceis. A proximidade entre os robôs pode ser ajustada pelo bombeiro, permitindo que uma área maior seja coberta ou que os robôs acompanhem com maior proximidade. O único aspecto de posicionamento considerado é a distância entre os robôs e a pessoa, sem a finalidade de atender a aspectos sociais. É possível que, no escopo da tarefa abordada, o posicionamento social não seja um aspecto impactante.

[Saez-Pons, Alboul e Penders \(2011\)](#) também utiliza uma formação entre um humano e uma equipe de robôs, que é obtida através de Campos Potenciais Sociais, uma generalização da

técnica de Campos Potenciais. A definição de “social” da técnica está associada à interação entre os robôs, considerando comportamentos emergentes da combinação de forças como agrupamento e formação de barreira. Assim como nesta tese, o ser humano é tratado como um agente diferenciado dos demais, atuando como líder e como chave para mudanças de comportamento. Se um robô estiver dentro de um alcance do indivíduo, ele mantém uma distância mínima desta pessoa; caso contrário, a distância mínima é mantida em relação aos demais robôs.

Apesar de não haver preocupação em lidar com fatores sociais da relação humano-robô, existe um tratamento diferenciado para a pessoa dentro da formação, e este fator está explicitamente associado a fatores proxêmicos.

Scheggi, Morbidi e Prattichizzo (2014) colocaram um bracelete vibrotátil em pessoas para receber informações de uma equipe de robôs. O dispositivo vibrava à medida em que os robôs apresentavam dificuldades em manter a formação, sinalizando ao indivíduo que era necessário reduzir a velocidade de navegação. Os robôs acompanhavam a pessoa realizando *tracking* a partir de uma câmera RGB-D. A abordagem não considera fatores sociais para o posicionamento, mas lida com a dificuldade de saber se os robôs estão conseguindo acompanhar o ritmo de movimentação de maneira bem sucedida. Foram avaliados fatores subjetivos da abordagem com relação especificamente ao uso do dispositivo vibrotátil através da atribuição de notas ao conforto e à percepção de informação, com bons resultados. Não foram feitas perguntas quanto ao conforto associado ao posicionamento dos robôs, que se mantiveram atrás do indivíduo.

Uma possível aplicação para sistemas multirrobóticos sociais é em cadeiras de rodas autônomas, que seguem um cuidador. Suzuki *et al.* (2014) apresentaram uma cadeira de rodas robótica que procura manter o robô ao lado do indivíduo para encorajar a comunicação entre o idoso na cadeira robótica e o cuidador. A experimentação foi feita considerando dois cuidadores e dois indivíduos em cadeiras robóticas navegando em conjunto. Três formações fixas foram testadas. Identificou-se que as formações de cadeiras de rodas na diagonal e lado-a-lado obtiveram melhor desempenho do que uma formação em linha. As principais diferenças desta tese e deste trabalho é que o trabalho assume que os robôs já conhecem uma trajetória pré-definida, enquanto nesta tese não há a necessidade de conhecimento prévio, e que a comparação de conforto não considerou a variação do número de robôs.

Apesar de ser um trabalho focado em estimular especificamente a conversação entre indivíduos e não é pensado como a interação com um robô, os conceitos de posicionamento relativo são convenientes para a interação entre um indivíduo e múltiplos robôs.

O trabalho de Sato *et al.* (2014) considera um sistema com duas cadeiras de rodas autônomas que navegam com um indivíduo. A formação é capaz de se adaptar a mudanças do ambiente, com a demonstração específica de um caso em que a formação tem que ser separada temporariamente por causa de uma parede. Os robôs se guiam a partir de um mapa do ambiente construído previamente. Entretanto, pouco é falado sobre como os robôs gerenciam

sua navegação para chegar até a posição desejada fora a utilização do mapa. As formações apresentadas no trabalho também estão limitadas a apenas dois robôs.

Um outro trabalho considera a navegação de uma cadeira de rodas robótica com um grupo de pessoas, visando posicionar a cadeira de rodas no centro da formação (ARAI *et al.*, 2014). O robô classifica se duas ou mais pessoas estão no mesmo grupo através da classificação da posição e movimentação das mesmas utilizando uma Máquina de Vetor Suporte (SVM). O desvio de obstáculos é feito através de uma técnica de campos potenciais especializada para robôs de direção diferencial. Outro aspecto que deve ser considerado é a presença de um ou mais indivíduos além do cuidador: para identificar todos os indivíduos próximos, um sensor laser é utilizado como sensor e um algoritmo de identificação é executado através de unidades de processamento gráfico de propósito geral (GPGPU).

Um trabalho que mostra preocupações com fatores proxêmicos para um sistema multirrobótico é o de Garrell e Sanfeliu (2012), que trata o problema de robôs-guia, assim como o de Martínez-García *et al.* (2005). Foi utilizada uma previsão da movimentação das pessoas através de um modelo de forças sociais, que é utilizado para tentar manter as pessoas dentro do grupo, mas não para estimular uma interação conjunta. Os robôs têm a tarefa específica de cercar as pessoas, evitando que elas saiam de sua região de cobertura, o que é feito tentando montar uma envoltória convexa em que os vértices são os robôs. Um dos robôs é o líder, conduzindo o trajeto, enquanto os demais ajudam a manter a formação humano-robô e recuperam indivíduos que se afastaram da formação.

Houve uma preocupação em identificar o conforto das pessoas considerando a posição de acompanhamento de um único robô para verificar posições de acompanhamento adequadas para manter a pessoa dentro da envoltória dos robôs, enquanto nesta tese pretende-se avaliar este conforto com vários robôs acompanhando. É observado pelos autores que um potencial trabalho futuro está em aplicar formações entre humanos e robôs para outros tipos de tarefa que envolvem a interação.

Fraune *et al.* (2015) realizaram um experimento em que pessoas interagiram com um ou com um grupo de três robôs coletores de lixo. Foram coletados dados sobre a análise em vídeo da interação das pessoas e o preenchimento sob consentimento dessas pessoas de um questionário. Foram avaliados, também, o impacto da adoção de um comportamento de aceno breve feito pelo robô através de um breve balanço da esquerda para a direita que serve como sinal para interação com pessoas e com os demais robôs e a diferença de resultados com a realização dos experimentos em lugares de culturas distintas: Estados Unidos e Japão. Os robôs foram controlados através de *tablets* por pessoas nos arredores, de modo que os participantes não soubessem que os robôs não eram autônomos. Apesar do experimento não ter envolvido uma navegação conjunta como feito nesta tese, ele investigou o impacto de haver um número maior de robôs.

Apesar de não ter identificado diferenças significativas nos questionários, ou seja, nas

métricas subjetivas apresentadas mediante análise do participante, o aumento no número de robôs levou a um maior número de interações, sendo possível que a razão pela qual a interação foi maior deve-se simplesmente ao maior número de fontes de interação. Foi observado, também, que as pessoas mostraram preferência pelo robô que emite o sinal quando está sozinho; entretanto, quando se trata de um grupo de robôs, a preferência é que eles não deem nenhum sinal. Os autores levantam a possibilidade de isto ter sido devido à percepção de que o grupo de robôs que faz tal sinalização foi visto como um grupo externo fechado, em particular por transmitir pistas sociais aos outros robôs, desencorajando a interação com agentes externos. Este resultado foi observado independentemente do país de realização do experimento.

2.3 Considerações finais

Neste Capítulo, um conjunto de trabalhos relacionados a esta tese foram descritos, com maior destaque àqueles diretamente utilizados e adaptados. A Tabela ?? faz uma comparação entre esta tese e alguns dos trabalhos descritos.

No próximo Capítulo, serão apresentados os conceitos e técnicas, que fornecem a base necessária para compreensão das técnicas proposta nesta tese.

Trabalho / característica	Navegação de uma pessoa com ao menos um robô	Navegação de uma pessoa com dois ou mais robôs	Tipo de formação com pessoas	Considera o conforto com dois robôs	Considera o conforto com três robôs ou mais	Comparação um robô x múltiplos robôs	Reconhecimento da pose da pessoa feito pelo próprio robô	Mais de uma pessoa
Esta tese	Sim	Sim	Formação em “V” (lado-a-lado com até dois robôs), navegação baseada em <i>flocking</i>	Sim	Sim	Sim	Não	Não
(GARRELL; SANFELIU, 2012)	Sim	Sim	Envoltória convexa	Não	Não	Não	Sim	Sim
(KUDERER; BURGARD, 2014)	Sim	Não	Lado-a-lado	Não	Não	Não	Sim	Não
(PENDERS <i>et al.</i> , 2011)	Sim	Sim	Escolta circular	Não	Não	Não	Sim	Não
(SUZUKI <i>et al.</i> , 2014)	Sim	Sim	Em linha, diagonal, ao lado	Sim	Não	Não	Sim	Sim
(FRAUNE <i>et al.</i> , 2015)	Não	Não	Não realiza	Sim	Sim	Sim	Não (teleoperados)	Sim

Tabela 1 – Comparação entre esta tese e trabalhos relacionados.

FUNDAMENTOS

Neste capítulo, alguns fundamentos e conceitos relacionados a interação humano-robô e proxêmica e métodos que servirão de base para as estratégias de acompanhamentos propostas nesta tese, são apresentados.

3.1 Taxonomias em HRI

Como área de pesquisa, a Interação Humano Robô pode ser definida como o estudo e implementação de sistemas robóticos que, de alguma maneira, interagem com pessoas. Esta interação pode ser remota, como em sistemas tele-operados, ou presencial, em que há um indivíduo no mesmo espaço que os robôs (GOODRICH; SCHULTZ, 2007).

A interação é dependente de mecanismos de comunicação entre robôs e indivíduos, sejam eles verbais ou não verbais. Enquanto a comunicação entre robôs pode ser feita através de dispositivos sem fio, a transferência de informação com seres humanos considera vários recursos distintos. Uma forma bastante comum é através de uma interface gráfica do usuário (GUI), que oferece um conjunto de comandos que podem ser enviados ao robô e, quando aplicável, oferecem uma visualização dos dados sensoriais deste robô.

Yanco e Drury (2002) apresentaram uma taxonomia para a HRI, combinando elementos das duas principais áreas relacionadas, que são a interação humano-computador e a robótica. São comentados, a seguir, as quatro taxonomias de maior proximidade e impacto com este trabalho.

A primeira taxonomia discorrida é o nível de autonomia do robô, cujo nível mais baixo é o de teleoperação, ou seja, quando o agente robótico é totalmente controlado pelo indivíduo, e o mais alto é de total autonomia. Considera-se pelo texto, por exemplo, que uma cadeira de rodas robótica cujos comandos em alto nível são definidos por um operador, mas que é capaz de gerenciar sua própria movimentação, é 75% autônoma, enquanto um robô especial totalmente controlado por controle remoto é 0% autônomo. Em sistemas colaborativos, existe um equilíbrio

entre a autonomia do robô e a influência humana; alguns trabalhos, como os de [Cacace, Finzi e Lippiello \(2014\)](#) e de [Das et al. \(2011\)](#), recorrem a sistemas onde este nível de autonomia é flexível: quando necessário, robôs são plenamente autônomos, mas um humano pode interferir com a passagem de tarefas e, em alguns casos, a teleoperação do robô. Estes sistemas robóticos são classificados como de iniciativa mista.

Como segunda taxonomia, é sugerida como critério a razão entre o número de robôs e o número de operadores humanos. Esta diferenciação é importante porque existem diferenças significativas em influenciar um único robô e uma equipe de robôs, e, em certos casos, um único robô tem que interagir com várias pessoas. No trabalho de [Penders et al. \(2011\)](#), três robôs interagem com um bombeiro; em trabalhos em que o número de robôs que podem receber comandos varia constantemente, como os de interação humano-enxame ([AMRAII; CHAKRABORTY; LEWIS, 2012](#)), pode ser necessário fazer uma estimativa do número de robôs.

O critério da razão humano-robô é estendido para classificar a interação entre os humanos e entre os robôs, levando a uma taxonomia complementar que classifica os modos de passagem de comando; o funcionamento do trabalho cooperativo entre uma pessoa e três robôs que não interagem entre si para distribuir tarefas é diferente da interação entre um humano e uma equipe de três robôs (Figura 1). A diferença fundamental está na visão dos robôs como uma única entidade em contraste à de vários agentes.

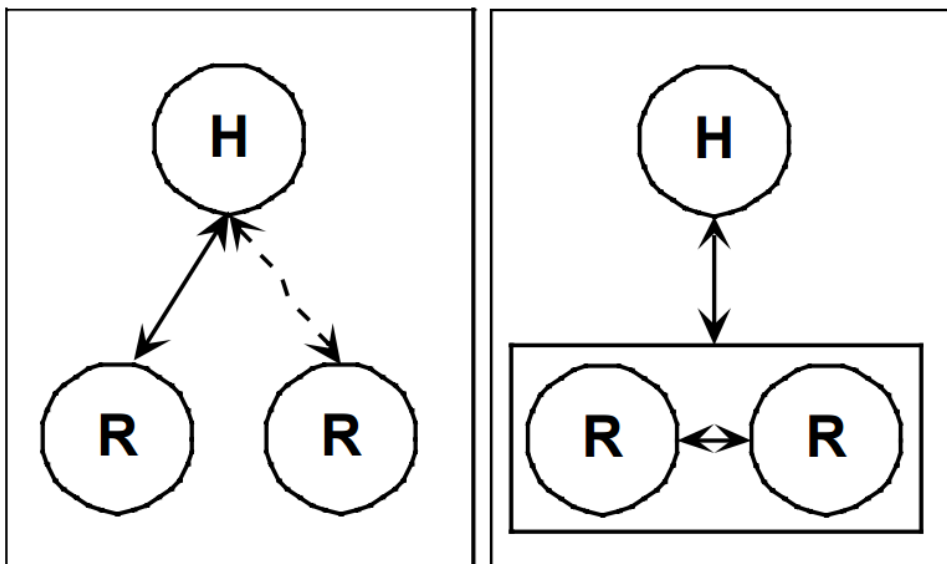


Figura 1 – Diagramas diferenciando a interação entre humanos (H) e robôs (R). À esquerda, uma interação entre um humano e dois robôs, enviando comandos distintos para cada robô; à direita, a interação é entre o humano e uma equipe de robôs. Adaptado de [Yanco e Drury \(2002\)](#).

A terceira taxonomia apresentada diz respeito à relação espacial e temporal dos robôs, ou seja, se ambos compartilham o mesmo espaço e atuam ao mesmo tempo. O trabalho apresentado por [Nardi e Iocchi \(2014\)](#) trata da existência de problemas que um robô não pode resolver sem a ajuda de uma pessoa. Um robô móvel que tenha como atuadores somente equipamentos

de locomoção (como rodas e esteiras), por exemplo, não é capaz de pegar um objeto, mas é capaz de carregá-lo se algum indivíduo pegar o objeto para ele. Ou seja, existem tarefas em que robôs e pessoas trabalham de maneira colaborativa. Foi aplicada uma rede de Petri para modelar a dependência entre ambos para a realização de tarefas. Há neste trabalho, portanto, um compartilhamento espacial e temporal.

Por fim, a quarta taxonomia apresentada refere-se à homogeneidade dos robôs envolvidos. Robôs homogêneos são mais facilmente controlados através de uma mesma interface, enquanto equipes de agentes heterogêneos apresentam robôs que são especializados para tarefas específicas.

Mumm e Mutlu (2011) apontaram três características que julgaram necessárias para que a interação humano-robô seja bem-sucedida: desenvolver afeição do indivíduo pelo robô antes de visar proximidade, procurar estabelecer comunicação através de sinais diversos (expressões faciais de um robô, por exemplo) caso não seja possível realizar isto de uma maneira mais direta, e a consideração de características individuais de cada pessoa. Dentro do escopo deste projeto, é possível considerar a primeira destas características, mas há uma importância maior na segunda, pois é necessário que uma equipe de robôs consiga sinalizar uma pessoa que ela está a seu serviço.

3.2 Itens do tipo Likert

São ditas técnicas de avaliação psicométricas aquelas que visam avaliar opiniões e percepções das pessoas que passaram por uma determinada experiência. Uma das formas mais comuns de avaliação psicométrica não somente na interação humano-robô mas também em áreas como as ciências sociais e educação são os itens do tipo Likert (JOSHI *et al.*, 2015). Tratam-se de afirmações (também referenciadas como itens) que o usuário deve preencher dentro de um conjunto (pontos) ordinal de possibilidades o quanto ele concorda com a afirmação. Uma afirmação relevante para a interação humano-robô seria, por exemplo, “*Sinto-me confortável diante do robô*”.

O número de pontos utilizados pode variar, mas costuma se encaixar no padrão de cinco ou de sete pontos. Os limiares de tais pontos expressam, assim, uma forte concordância ou discordância com a frase, enquanto um valor posicionado no meio significa uma neutralidade. Segundo joshi2015, existem registros de pesquisadores considerando tais intervalos como ordinais, assim como há os que interpretam como escalas.

A determinação de se raciocinar sobre uma interpretação ordinal ou escalar dá-se a partir da análise de quatro fatores: expectativa de coerência entre as respostas aos itens, se cada item mede um elemento distinto, se foram organizados em uma sequência lógica e o relacionamento entre as próprias afirmações. Se estes fatores forem atendidos, é possível interpretar como escalar, obtendo assim uma escala Likert. A interpretação escalar é recomendada para quando há um

interesse em avaliar cada resposta de afirmação como parte de uma resposta combinada; é possível, também, interpretar subconjuntos das afirmações como escalares e elementos isolados como ordinais. Uma justificativa para realizar esta análise interpretativa é a escolha do método estatístico para avaliação dos resultados; enquanto itens escalares requerem análises como o teste t de Student e ANOVA, itens ordinais requerem uma avaliação por métodos não paramétricos, como o teste de Wilcoxon ou o Kendall Tau (JOSHI *et al.*, 2015).

A partir de uma análise realizada por Gombolay e Shah (2016) em um conjunto de *papers* de uma conferência de Interação Humano Robô, observou-se que 58% dos trabalhos que realizaram experimentos com pessoas utilizaram a escala Likert como ferramenta de avaliação quantitativa. Noventa por cento destes trabalhos utilizaram ANOVA ou testes-t de Student, o que os autores consideraram inadequado do ponto de vista teórico por considerarem que a escala Likert deve ser interpretada como ordinal e não escalar. Através de simulações de Monte Carlo, Gombolay e Shah (2016) concluíram que os testes-t realizados em cima de resultados obtidos de escalas Likert e até mesmo de itens individuais provavelmente são válidos para análises de um único item, mas que a análise de múltiplos itens separadamente deve ser feita com cautela e com boas justificativas para tal devido a um maior risco de falsos positivos.

3.3 Proxêmica

A interação entre pessoas envolve tanto aspectos verbais como não-verbais (gestos, olhar). Dentro da categoria de interação não-verbal, encontra-se a proxêmica, que é descrita por Hall (1966) como “*the hidden dimension*” (a dimensão escondida), já que as pessoas não a percebem conscientemente. A proxêmica pode ser descrita como a ciência que estuda as relações espaciais entre indivíduos. Esta relação de posições faz parte de uma construção de percepção de cada pessoa, que é construída ao longo da vida de acordo com a cultura em que está inserida.

Hall observou que a diferença de proximidade entre pessoas de diferentes culturas levava a interpretações distintas; uma pessoa latino americana, por exemplo, mantém uma proximidade maior durante a conversação do que um alemão. A posição relativa afeta a recepção de sinais sensoriais: uma pessoa muito distante não consegue sentir o cheiro de um perfume; fala-se com um volume mais baixo quando se está mais próximo de uma pessoa. O posicionamento relativo molda, também, a percepção de grupos; um posicionamento específico de indivíduos em que eles andam lado-a-lado sinaliza juntamente com sinais como o foco de atenção igual e o volume de conversação, por exemplo, sinaliza que estão juntos, formando um grupo em especial. O posicionamento de comunicação e a percepção espacial durante o deslocamento no ambiente é de importância pivotal para esta tese, visto que o robô busca aceitação de um ser com maneiras particulares de percepção das coisas.

3.3.1 Espaços criados por um indivíduo

As pessoas não se limitam ao próprio corpo como limite externo de envolvimento, mas sim a zonas sociais implícitas. Hall (1966) fez uma divisão em quatro categorias de distância que representam um conjunto de círculos concêntricos que facilitam a classificação proxêmica individual, dando origem às zonas sociais.

- Distância íntima, que se situa desde o contato físico direto com a outra pessoa, podendo sentir a pele e os músculos;
- Distância pessoal, que se estende até distância em que os membros podem se encostar se esticados, e representa uma “bolha” de proteção estabelecida inconscientemente;
- Distância social, que é a estabelecida para conversas do dia-a-dia até a estabelecida para encontros formais. Tipicamente não se percebe o odor da pessoa a partir deste ponto;
- Distância pública, que corresponde às distâncias maiores, envolvendo o alcance de reconhecimento de pessoas que se aproximam e o distanciamento comum de autoridades.

É importante observar que estas distâncias foram estabelecida a partir de observações de pessoas dentro da cultura norte-americana, podendo haver diferenças significativas de percepção entre culturas distintas; a distância pessoal de um povo pode ser a distância social de outro. Essa diferença inclusive é extensamente discutida no trabalho de Hall, apontada como a razão pela qual ele percebeu a existência da proxêmica. O autor inclusive aponta que provavelmente há uma diferença significativa, por exemplo, em como povos árabes estruturam mentalmente seus espaços e a relação dos demais sentidos; uma percepção olfativa da outra pessoa, respirando próximo da mesma para sentir seu odor, não somente não é repulsiva como é esperada.

Hall defende a divisão em quatro distâncias dizendo que as três primeiras distâncias são observáveis entre alguns animais, enquanto a distância pública foi construída culturalmente pelo homem para atividades sociais públicas. Ele também aponta que a forma pela qual as pessoas interagem é instintivamente dependente da cultura em que a pessoa cresceu, sendo possível perceber tais diferenças mas sendo difícil desfazê-las de maneira voluntária.

Com o passar dos anos, formas distintas de se tratar as zonas sociais foram propostas na literatura, não se limitando ao formato de bolhas concêntricas. A *survey* de Rios-Martinez, Spalanzani e Laugier (2015) apresenta não somente um conjunto de formas alternativas de parametrizar as zonas sociais como apresenta outros tipos de espaço gerados pela proxêmica. Dentre os modelos apresentados, dois possuem importância em particular para esta tese: região anisotrópica e região Gaussiana. A Figura 2

A região anisotrópica considera a particularidade de que indivíduos ponderam de formas distintas objetos ou pessoas à sua frente em contraste a agentes ao lado ou atrás (HAYDUK, 1981), enquanto o uso de elipses concêntricas geradas por uma função decrescente é conveniente

para a aplicação de forças repulsivas, além de permitir a divisão em várias faixas de espaço concêntricas distintas em que o valor de distância relativo é igual (HELBING; MOLNAR, 1995). Ao longo do texto, para fins de clareza, tais faixas serão chamadas de curvas.

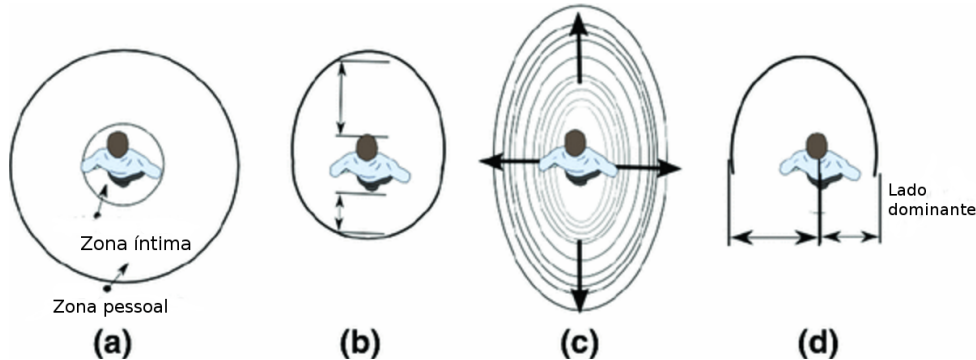


Figura 2 – Diferentes modelagens para as zonas sociais. (a) círculos concêntricos; (b) modelagem anisotrópica; (c) elipses concêntricas; (d) modelagem considerando o lado dominante da pessoa. Adaptado de Rios-Martinez, Spalanzani e Laugier (2015).

Um outro espaço pessoal citado por Rios-Martinez, Spalanzani e Laugier (2015) que também indica a importância de manter a frente de uma pessoa livre é o espaço de processamento de informação (EPI). O EPI se trata de um espaço em que o indivíduo planeja sua trajetória, considerando obstáculos e outras pessoas. O trabalho de Kitazawa e Fujiyama (2010) apresentou diversos modelos de representação deste espaço, com enfoque na representação do planejamento de pedestres a nível individual.

Os modelos vistos no trabalho incluem autômatos celulares, alcance visual e modelos que consideram um espaço desigual ao redor da pessoa. Este último modelo em particular tem como exemplo uma região similar às zonas sociais, tanto na representação de círculos concêntricos como na modelagem anisotrópica, que é justificada considerando que diferentes sentidos são considerados para identificar objetos e pessoas atrás, como a audição.

3.3.1.1 Zonas sociais através da Função Gaussiana Assimétrica

Kirby (2010) propôs uma modelagem conveniente para a construção de zonas sociais que combina as características de modelos anisotrópicos e de funções Gaussianas através do uso de duas metades de funções Gaussianas bidimensionais, chamadas de Função Gaussiana Assimétrica (FGA). Uma das metades é referente à frente da pessoa, enquanto a outra metade é apontada para a parte de trás. Os valores σ_f , σ_r e σ_s gerenciam o cálculo da FGA em relação à frente, atrás e ao lado de um agente m . A Figura 3 mostra um conjunto de curvas distintas de uma FGA.

Dado que m é representado espacialmente em um ambiente bidimensional pelas coordenadas lineares x_m e y_m e pela coordenada angular θ_m , uma FGA gerada a partir de si é representada por Ω_m . Dado um outro agente qualquer denominado n , diz-se que o valor da FGA

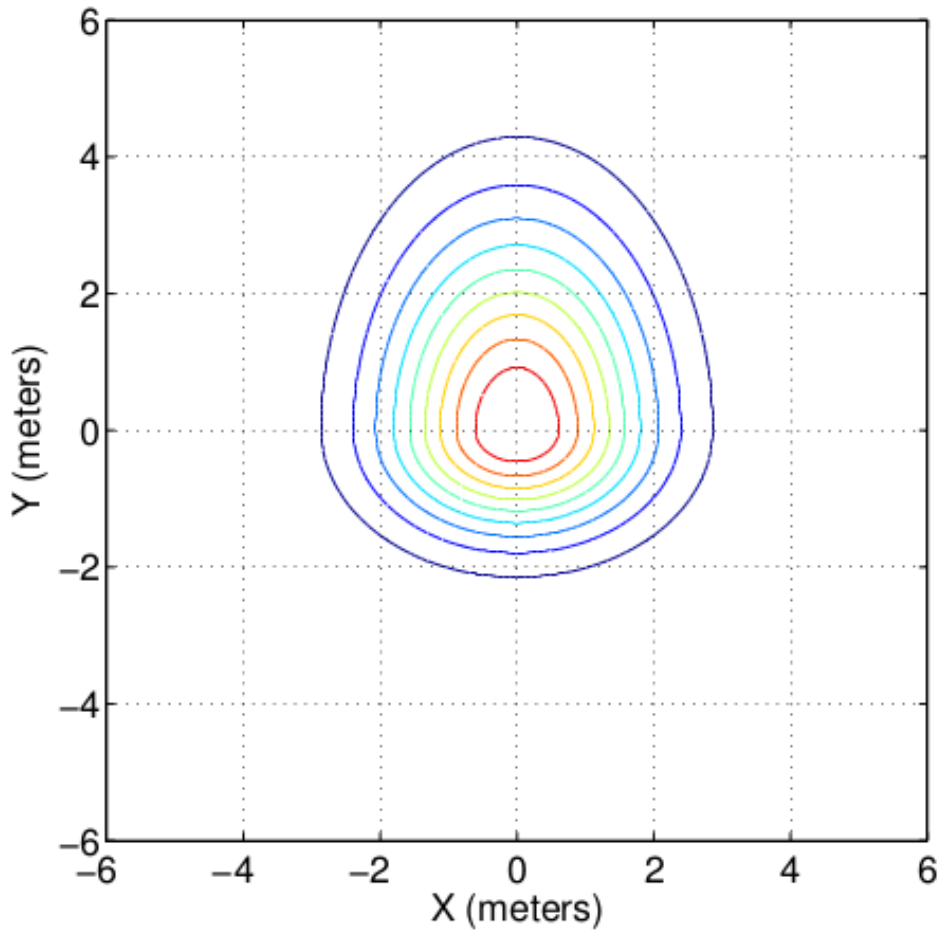


Figura 3 – Contornos de uma FGA centrada em [0,0] (KIRBY, 2010).

Ω_m em n é $G_{m,n}$. A Equação 3.1 determina se n está à frente ou atrás de m , determinando qual o valor de σ utilizado (σ_{fr}).

$$\alpha = \text{atan}((y_m - y_n), (x_m - x_n)) - \theta_m - 0.5\pi \quad (3.1a)$$

$$\alpha' = \text{atan}(\sin(\alpha), \cos(\alpha)) \quad (3.1b)$$

$$\sigma_{fr} = \begin{cases} \sigma_f, & \text{if } \alpha' > 0 \\ \sigma_r, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.1c)$$

Com este valor selecionado, o valor de $G_{m,n}$ é calculado na Equação 3.2.

$$G^a = \frac{\cos(\theta_m)^2}{2\sigma_{fr}^2} + \frac{\sin(\theta_m)^2}{2\sigma_s^2} \quad (3.2a)$$

$$G^b = \frac{\sin(2\theta_m)^2}{4\sigma_{fr}^2} - \frac{\sin(2\theta_m)^2}{4\sigma_s^2} \quad (3.2b)$$

$$G^c = \frac{\sin(\theta_m)^2}{2\sigma_{fr}^2} + \frac{\cos(\theta_m)^2}{2\sigma_s^2} \quad (3.2c)$$

$$\Theta = G^a(x_m - x_n)^2 + 2G^b(x_m - x_n)(y_m - y_n) + G^c(y_m - y_n)^2 \quad (3.2d)$$

$$G_{m,n}^{\vec{r}} = e^{-(\Theta)} \quad (3.2e)$$

3.3.2 Espaços gerados por um grupo de pessoas

Quando uma pessoa realiza uma atividade qualquer, ela foca sua atenção em uma determinada porção do ambiente. Esta região pode ser chamada de espaço transacional (KENDON, 2010) e faz parte do que Lindner e Eschenbach (2011) denomina espaço de atividade, juntamente com o espaço que o indivíduo ocupa (espaço do agente) e uma porção do espaço externo que serve como *buffer*.

Existem espaços que não surgem a partir de um único indivíduo, mas de um grupo de pessoas. O O-espaço é uma região correspondente ao espaço transacional compartilhado entre todos os membros ou parte de um grupo. Este espaço surge da sobreposição de espaços transacionais. Ao redor do O-espaço, configura-se o P-espaço, a faixa em que os espaços de agente e seus eventuais pertences se posiciona. Em volta do P-espaço, há o espaço de *buffer* da formação, denominado R-espaço; trata-se de uma região em que a presença de um indivíduo alheio ao grupo é notado pelo mesmo. A aceitação de um membro no grupo depende da abertura de espaço no círculo do P-espaço e da conformidade de seus membros quando está no R-espaço. A Figura 4 exemplifica estes espaços. O posicionamento espacial dos indivíduos que resulta na geração destes espaços é chamado de F-formação.

As F-formações típicas para grupos de pessoas é a circular (vide Figura 4), que foi observada em várias culturas distintas (KENDON, 2010). Ela é conveniente pois todos os participantes da conversa têm acesso direto ao O-space correspondente de forma regular. As F-formações de dois indivíduos pode apresentar formas distintas. A mais comum quando não há um foco de interação específico é a formação em L, enquanto a formação frente-a-frente (*vis-a-vis*) considera o foco de atenção no relacionamento entre as duas pessoas. Uma formação frequente quando o foco de atenção é algo presente no ambiente é a formação lado-a-lado. Esta formação pode eventualmente ser combinada com a formação circular quando mais de duas pessoas estão interagindo, atingido uma formação em forma de ferradura. Apesar do nome de formação em ferradura, a formação resultante é frequentemente similar a de um semicírculo.

Até o momento, apenas foram apresentadas formações entre pessoas de posições fixas. A seguir, é apresentado um estudo de uma F-formação dos indivíduos quando os mesmos estão se locomovendo.



Figura 4 – A F-formação, os indivíduos que a formam e os espaços correspondentes (KENDON, 2010).

3.3.2.1 Formações entre indivíduos durante o deslocamento

Moussaïd *et al.* (2010) apresentaram um estudo da formação entre grupos de pessoas quando elas estão andando. O interesse dos autores está, também, em modelar este deslocamento para uso em simulações. Foram estudados centenas de grupos compostos por duas a quatro pessoas.

Do estudo das formações, concluiu-se que o número de pessoas influencia na velocidade de deslocamento: em média, quanto mais pessoas pertencem ao grupo, menor será sua velocidade. Naturalmente, a velocidade também foi menor em ambientes de maior densidade.

Para estudar as formações em si, foram considerados como dados o ângulo relativo e a distância entre duas pessoas. A comparação foi feita somente entre cada indivíduo e seu vizinho mais próximo à direita. Foi observado que a distância entre as pessoas torna-se menor e os ângulos mais distantes de 90 graus de acordo com o aumento de densidade do ambiente. Os ângulos entre grupos de duas pessoas foram em média bastante próximos de 90 graus, configurando em uma navegação lado-a-lado, enquanto grupos de três e de quatro pessoas formaram um padrão em forma de "V". As formações encontradas estão muito próximas das formações identificadas no trabalho de Kendon (2010); a formação em "V" aberta é similar a um semicírculo, assim como a de ferradura.

A F-formação em "V", apesar de não ser adequada aerodinamicamente, facilita a comunicação entre indivíduos durante o deslocamento (MOUSSAÏD *et al.*, 2010); pode-se enxergar a formação em "V" como uma versão em deslocamento da formação circular descrita anteriormente,

com as pessoas construindo um P-espço ao redor do O-espço correspondente presente no centro da formação, como pode ser visto na Figura 5.

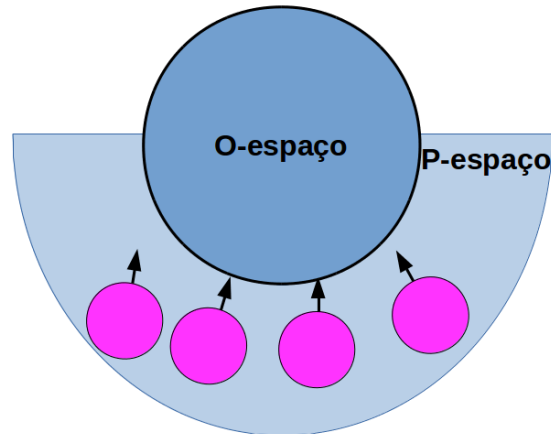


Figura 5 – A formação de um p-espço e seu o-espço correspondente.

Costa (2010) também realizou um estudo de grupos de pessoas andando juntas, identificando grupos de duas até oito pessoas. Além da formação em "V", foram observadas formações em escada, em "V" invertido e com todos os membros em paralelo. Foi observado que grupos de cinco pessoas se dividiam em subgrupos (grupos de 2-3 pessoas, de 1-4 pessoas), mantendo a observação prática feita por Kendon (2010).

O trabalho de navegação de cadeiras robóticas de Arai *et al.* (2014) também concluiu que a formação ideal para fomentar a interação entre dois usuários das cadeiras e dois cuidadores envolve a entrada de pessoas em um P-espço, gerando uma formação similar à apresentada na Figura 5.

No trabalho de (MOUSSAÏD *et al.*, 2010), além da análise que foi feita sobre as formações estabelecidas entre pessoas que andam em conjunto, também foi elaborado um modelo matemático da navegação de pedestres através da combinação de forças, que gera um comportamento de navegação para os agentes. Estes comportamentos são os seguintes:

- uma força \vec{F}_i^0 que guia o agente i na direção desejada;
- forças repulsivas aos demais robôs $\vec{F}_{i,j}$;
- forças repulsivas à parede \vec{F}_i^{parede} ;

- uma força referente ao grupo de pessoas que um determinado agente está junto \vec{F}_i^{grupo} .

As três primeiras forças já foram consideradas em um trabalho anterior dos autores sobre navegação de pedestres; a quarta e última força surgiu da necessidade de incrementar o modelo com o que foi observado sobre pessoas andando em grupos. A força \vec{F}_i^{grupo} é composta de três forças.

A primeira é uma força que recua a pessoa no sentido contrário de sua velocidade com o objetivo de manter as demais dentro do alcance visual; a segunda é uma força atrativa ao centro de massa do grupo que é ativada apenas quando a pessoa está a uma distância acima de um limiar; a terceira força é repulsiva aos outros robôs do grupo caso a distância seja menor do que um outro valor limiar.

3.4 Campos potenciais

(FARIA, 2006) define a técnica de campos potenciais como um método de planejamento de trajetórias de baixo custo computacional que combina forças virtuais que são exercidas nos robôs. Tais forças são representadas por vetores, e esta combinação de forças é feita através da soma destes vetores. Estes vetores podem ou não ter seus módulos dependentes de fatores do ambiente.

Para realizar a navegação de um robô de um ponto a outro em um ambiente desconhecido, ao menos duas forças são necessárias: a força atrativa (F_a), que guia o robô até uma posição desejada e a força repulsiva (F_r), que distancia o robô de eventuais obstáculos durante a trajetória.

A força atrativa consiste em um vetor de módulo constante (c_a) que aponta em direção à posição desejada para o robô, como visto na Equação 3.3. Δx e Δy são as distâncias nos eixos x e y da posição da meta e da pose do robô.

$$\begin{aligned} |\vec{F}_a| &= c_a \\ \angle \vec{F}_a &= \arctan(\Delta y, \Delta x) \end{aligned} \quad (3.3)$$

As força repulsivas, por sua vez, têm um vetor de módulo dependente da distância do robô até um dado obstáculo ($d_{r,i}$) que é multiplicado pela constante c_r (Equação 3.4). São somadas as forças repulsivas referentes a todos os obstáculos detectados. Para identificar estes obstáculos em tempo real, são utilizados sensores de distância (infravermelho, sonar, *laser*).

$$\begin{aligned} |\vec{F}_r^i| &= \frac{c_r}{d_{r,i}} \\ \angle \vec{F}_r^i &= \arctan(-\Delta y, -\Delta x) \\ F_r &= \sum_{i=0}^{n_{obst}} F_r^i \end{aligned} \quad (3.4)$$

A soma dos vetores de atração e de repulsão resulta em um vetor que irá guiar o robô (Equação 3.5). Tais forças são atualizadas a cada ciclo do algoritmo de controle do robô. A Figura 6 ilustra o campo vetorial gerado por essas forças. A soma de outros vetores para a geração de uma combinação com outros comportamentos gerados como vetores também é possível. Para alguns comportamentos, mostra-se interessante a possibilidade de estabelecer limites mínimos e máximos de distância para que um comportamento seja ativado, como por exemplo apenas ser atraído até uma determinada distância à meta ser atingida.

$$F_{total} = F_a + F_r \quad (3.5)$$

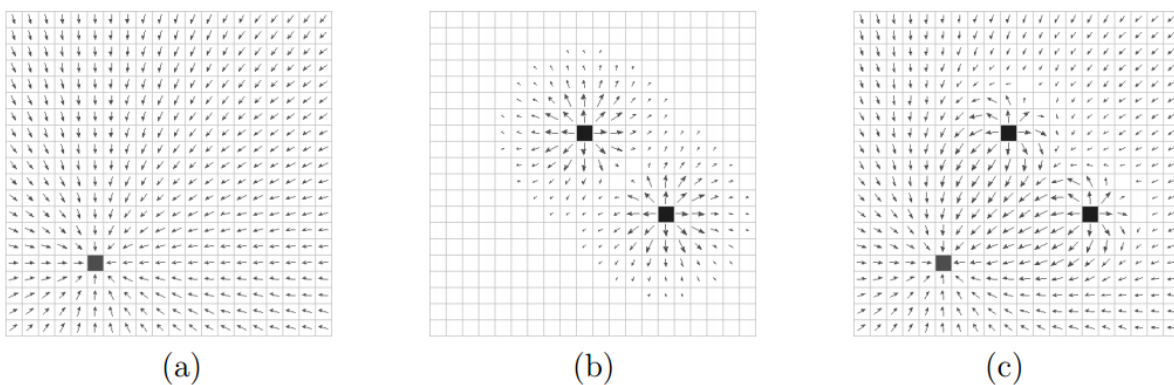


Figura 6 – Forças de a) atração; b) repulsão; c) combinação das duas forças (FARIA, 2006).

Os campos potenciais, entretanto, têm suas limitações. O trabalho de (KOREN; BORENSTEIN, 1991) aponta como a principal dificuldade a ocorrência de mínimos locais na trajetória em certas situações. Uma possível solução para este problema é utilizar um planejador global que seja capaz de encontrar um caminho. Outra possibilidade é o uso de heurísticas quando o robô cai em um mínimo local. Outra possibilidade é utilizar uma forma de geração do gradiente de forma diferente, como pelo uso de funções harmônicas (CONNOLLY; GRUPEN, 1993), mas assim como no caso do planejador global esta estratégia exige uma representação do ambiente disponível ao robô.

Outro problema reportado foi a ocorrência de oscilações do robô durante a trajetória quando obstáculos aparecem, em especial na travessia de passagens estreitas (Figura 7). Quando o robô se aproxima demais de um dos lados do corredor, uma força repulsiva grande é exercida por aquele lado, tendendo o robô a se aproximar excessivamente do outro canto do corredor.

3.5 Considerações finais

Neste Capítulo, foram apresentados trabalhos que servem de base para esta pesquisa. No próximo Capítulo, são explicados como os conceitos apresentados foram combinados e aplicados, gerando as estratégias de acompanhamento de um humano com robôs.

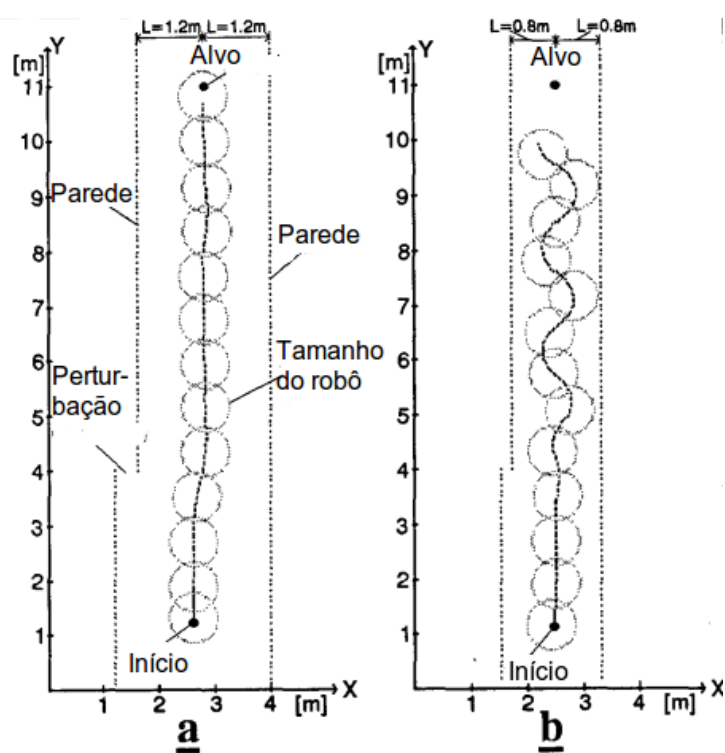


Figura 7 – Passagem por um corredor apertado a) sem oscilação; b) com oscilação. Adaptado de (KOREN; BORENSTEIN, 1991).

ESTRATÉGIAS PROPOSTAS

Neste Capítulo, são propostas quatro estratégias de acompanhamento socialmente aceitável, visando propiciar uma navegação de um humano com uma equipe de robôs de forma aceitável socialmente.

4.1 Definições

Para todas as estratégias, é considerada uma equipe de robôs $R = \{r^1 \dots r^n\}$ que navega em um espaço \mathbb{R}^2 . Cada robô r^n é representado por uma pose $[r_x^n, r_y^n, r_\theta^n]$ e realiza a sua navegação a partir de um conjunto de comportamentos $B = \{b_1^n \dots b_j^n\}$. Cada comportamento representa um vetor; a soma destes vetores resulta no comportamento final (Equação 4.1), ou seja, no vetor que irá direcionar as velocidades de roda de cada robô. Ao longo do texto, $|b|$ representa o componente linear do vetor e $\angle b$ o componente angular. Cada comportamento tem uma constante c pela qual o comportamento é multiplicado. A pessoa é representada por $h = [h_x, h_y, h_\theta]$.

$$B_a^n = \sum_{i=1}^j b_i^n c_i^n \quad (4.1)$$

Espera-se que a navegação atenda os seguintes critérios:

- Os robôs devem evitar entrar na zona íntima;
- A emergência de um subconjunto dos robôs que tenha acesso privilegiado ao foco de interação por manter-se ao lado da pessoa;
- Os robôs devem ser capazes de navegar com velocidade suficiente para alcançar a pessoa se a mesma estiver em deslocamento;
- Os robôs devem evitar posicionamentos à frente da pessoa;

- Colisões devem ser evitadas, especialmente com a pessoa;
- A navegação deve visar uma formação estável, especialmente quando a pessoa estiver em repouso.

As estratégias derivam de uma abordagem bioinspirada, pensada a partir das regras fundamentais do *flocking* (coesão, separação, alinhamento) e, para duas destas estratégias, um fator bioinspirado adicional, que são os aspectos proxêmicos, é considerado. As diferenças entre as abordagens estão em dois fatores: o modo que o posicionamento relativo do robô em relação ao indivíduo e, quando aplicável, uma regra de navegação lado-a-lado que se utiliza da mesma interpretação. Assim como no trabalho de [Moussaïd et al. \(2010\)](#), o comportamento resultante vem de uma soma de forças.

A escolha por um modelo de soma de vetores nos moldes dos campos potenciais foi feita pela simplicidade de combinação de comportamentos em um vetor único. Isto significa que os robôs estarão suscetíveis às dificuldades encontradas pelos métodos de campos potenciais ([KOREN; BORENSTEIN, 1991](#)). O fato da posição alvo dos robôs ser móvel, já que os mesmos terão posições dependentes da pose da pessoa, mitiga o problema de mínimos locais. Ao longo deste texto, as estratégias serão identificadas da seguinte maneira:

- Navegação baseada em *flocking* para o caso em que as zonas espaciais da pessoa são interpretadas como círculos (**flocking**);
- Navegação baseada em *flocking* utilizando uma regra de navegação lado-a-lado para dois robôs (**flocking com a regra de navegação lado-a-lado**);
- Navegação interpretando as zonas espaciais através das FGAs, denominada navegação por **normas sociais**;
- Navegação interpretando as zonas espaciais através das FGAs utilizando uma regra de navegação lado-a-lado para dois robôs (**normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado**).

4.2 Comportamentos em comum

Todos os métodos possuem em comum os comportamentos de repulsão aos robôs vizinhos (b_{rep}) e um comportamento de parede virtual. A repulsão consiste de vetores repulsivos inversamente proporcionais à distância (Equação 4.2). $\Delta_{n,i}$ representa a distância entre os robôs n e i .

$$b_{rep}^n = \sum_{i=1, i \neq n}^k \frac{r^n - r^i}{\Delta_{n,i}^2} \quad (4.2)$$

Um acréscimo de comportamento que é uma contribuição desta tese é o da parede virtual. O comportamento da parede virtual é uma estratégia para evitar que os robôs avancem à frente da pessoa e para incentivar o alinhamento de robôs ao lado da mesma; trata-se de uma força repulsiva aplicada aos robôs que estiverem à frente da pessoa, com exceção dada caso o robô esteja diretamente em sua trajetória. Para identificar a situação correta, calcula-se a pose do robô em relação a um eixo que inicia-se na pose da pessoa (P_x, P_y ; Equação 4.3) da mesma maneira que no trabalho de [Hu, Wang e Ho \(2014\)](#). Este comportamento não está relacionado com o desvio de paredes apresentado no trabalho de [Moussaïd et al. \(2010\)](#).

$$\begin{aligned} P_x^n &= (r_x^n - h_x) \cos(h_\theta) + (r_y^n - h_y) \sin(h_\theta) \\ P_y^n &= (r_x^n - h_x) \cos(h_\theta + 0.5\pi) + (r_y^n - h_y) \sin(h_\theta + 0.5\pi) \end{aligned} \quad (4.3)$$

As duas condições são $P_x^n > W_x$, onde W_x é uma constante de delimitação de frente, e o módulo de P_y^n ser maior do que W_y . Um robô em P_x negativo implica em estar atrás da pessoa; Um robô com P_x elevado e módulo de P_y baixo, caso não esteja a uma grande distância da pessoa significa que o robô está bem em frente a ela, e neste caso a parede virtual empurra o robô em uma das direções perpendiculares à frente da pessoa. O vetor é dado pela Equação 4.4. Quanto mais à frente o robô estiver, maior será a força da parede virtual.

$$\angle b_{wall} = \begin{cases} h_\theta + \pi, & \text{se } P_x^n + W_x > 0 \text{ e } |P_y^n| > W_y; \\ \theta_h + 0.5\pi, & \text{se } P_x^n + W_x > 0 \text{ e } 0 < P_y^n < W_y; \\ h_\theta - 0.5\pi & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.4a)$$

$$|b_{wall}^n| = \begin{cases} 0, & \text{if } P_x^n + W_x \leq 0; \\ P_x^n + W_x & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.4b)$$

Para os experimentos realizados na escala *micro*, em que um robô dotado de um conjunto de sonares é utilizado, os dados de distância capturados pelos mesmos também são contabilizados como repulsões. Um novo comportamento de repulsão b_{obst} é criado. Para a Equação 4.5, considere que $\tau_{n,s}$ é a distância medida pelo sensor s -ésimo do robô n , que θ_j é o ângulo do sensor relativo ao seu robô e que o_{max} é a medida de distância máxima que pode ser detectada.

$$b_{obst}^n = \sum_{j=1, \in j, \tau_{i,j} \geq o_{max}} \left[\frac{\cos(r_\theta^n + \theta_j)}{\tau_{n,j}^2} \right] \cdot \left[\frac{\sin(r_\theta^n + \theta_j)}{\tau_{n,j}^2} \right]. \quad (4.5)$$

Além destes comportamentos, um comportamento de alinhamento é aplicado aos robôs quando estiverem com o vetor de comportamentos resultante suficientemente baixo. Ele ajusta a velocidade angular dos robôs de modo que eles virem para a mesma direção que a pessoa.

4.3 Acompanhamento baseado em *flocking*

Tal como as regras de coesão e separação, existem comportamentos que mantêm o robô próximo de seu grupo evitando colisões. Para fins de simplificação, considera-se que o centro do grupo é a pessoa que está sendo acompanhada. Na prática, estes comportamentos visam a manutenção de uma distância mínima do robô em relação ao indivíduo. O comportamento de repulsão ao indivíduo (b_{reph}^n) é descrito na Equação 4.6b, enquanto a atração é definida pela Equação 4.6a. Δ_n representa a distância entre o robô n e o humano.

$$b_{att}^n = h - r^n \quad (4.6a)$$

$$b_{reph}^n = \frac{r^n - h}{\Delta_n^2} \quad (4.6b)$$

4.4 Acompanhamento baseado em *flocking* utilizando a regra de navegação lado-a-lado

A determinação de uma regra de navegação lado-a-lado mostra-se importante visto o que se conhece na literatura sobre navegação conjunta entre uma pessoa e um robô, que de modo geral considera este posicionamento como o mais adequado para acompanhamento socialmente aceitável. O posicionamento ao lado para múltiplos robôs apresentado inspirou-se tanto em trabalhos de navegação lado-a-lado típicos, como o de [Morales, Kanda e Hagita \(2014\)](#), como na estratégia de F-formação em “V” identificada no trabalho de ([MOUSSAÏD *et al.*, 2010](#)).

Considerando a navegação lado-a-lado com múltiplos robôs, surge também o problema de alocação dos robôs: não é razoável supor que todos os robôs estejam do lado do indivíduo. Para fins de praticidade, considera-se que até dois robôs podem ficar confortavelmente ao lado da pessoa: um à esquerda e o outro à direita. Também é considerado que os robôs que navegarão ao lado serão sempre os mesmos.

No Algoritmo 1, é determinado se o robô estará à esquerda ($\mathbb{L}^n = 1$) ou à direita ($\mathbb{L}^n = 0$). A função $sign()$ determina se o robô naquele momento está à esquerda (-1) ou à direita (1). No caso de haver um único robô navegando com a pessoa, o lado escolhido torna-se aquele que o robô já estiver em relação à mesma.

O comportamento de navegação lado-a-lado substitui a força atrativa por uma atração até um ponto à esquerda ou à direita do indivíduo, estando um pouco à frente da mesma. A Equação 4.7 identifica como é obtido o novo comportamento $b_{att}^n = [S_x^n, S_y^n]$ neste caso. D_s e D_f determinam a distância lateral e frontal desejadas em relação ao indivíduo. Um diagrama exemplificando as distâncias e valores para o cômputo do comportamento adequado está na

Algoritmo 1 – Definição do valor de \mathbb{L}^n

-
- 1: **procedimento** ENCONTRE_ $\mathbb{L}^n(n, j)$ \triangleright Índice do próprio robô e do outro robô seguidor ao lado
 - 2: $\mathbb{L}^n \leftarrow 0$
 - 3: **se** $sign(P_y^n) == sign(P_y^j)$ **então** \triangleright Se os robôs estão do mesmo lado, é mantido aquele com maior P_x
 - 4: **se** $P_x^n > P_x^j$ & $sign(P_y^j) == 1$ **então**
 - 5: $\mathbb{L}^n \leftarrow 1$
 - 6: **fim se**
 - 7: **senão se** $sign(P_y^j) == -1$ **então** \triangleright Se já estão em lados opostos, manter
 - 8: $\mathbb{L}^n \leftarrow 1$
 - 9: **fim se**
 - 10: **retorna** \mathbb{L}^n
 - 11: **fim procedimento**
-

Figura 8.

$$\begin{aligned} S_x^n &= h_x + (1 - 2\mathbb{L}^n)(D_s)\cos(h_\theta + 0.5\pi) + D_f\cos(h_\theta) - r_x^n, \\ S_y^n &= h_y + (1 - 2\mathbb{L}^n)(D_s)\sin(h_\theta + 0.5\pi) + D_f\sin(h_\theta) - r_y^n, \end{aligned} \quad (4.7)$$

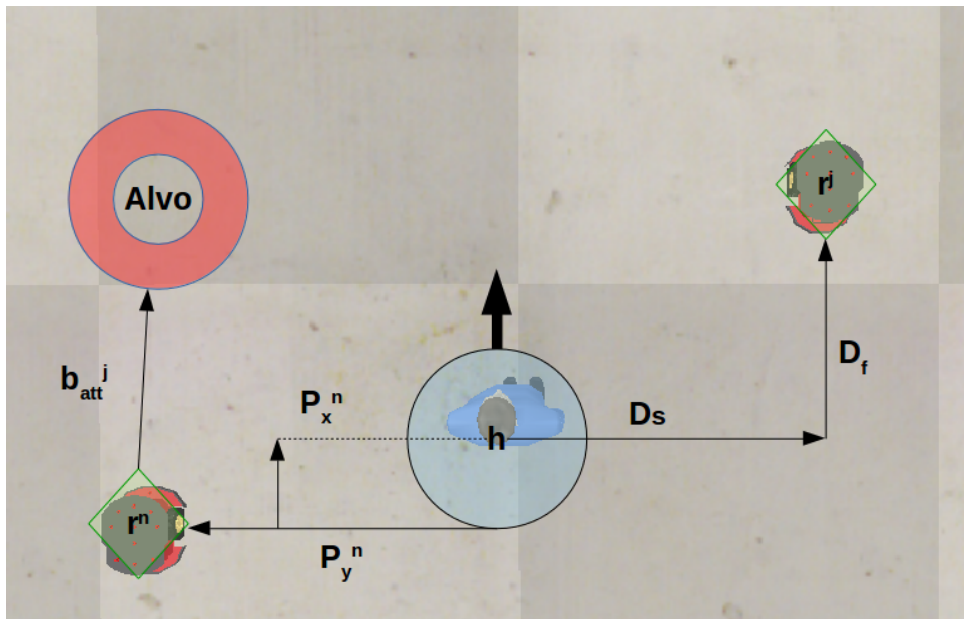


Figura 8 – Distâncias utilizadas para calcular a posição desejada para navegar lado-a-lado.

4.5 Acompanhamento baseado em normas sociais

A diferença fundamental entre os métodos é a forma que as regiões pessoais são tratadas. Enquanto o método anterior considera uma circunferência, este utiliza uma região em “forma de ovo” criada a partir da FGA. A força atrativa é obtida considerando tanto o valor da FGA na pose do robô (Equações 3.1 e 3.2) como em posições nas quatro direções cardinais, obtendo

um gradiente que indica a direção do vetor atrativo. As Equações 4.8a e 4.8b determinam esta direção, enquanto a intensidade de atração é obtida pelas Equações 4.8c e 4.8d; quando o valor de $G_{n,h}$ for maior do que o valor desejado (G_{curve}), a força será repulsiva.

$$\begin{aligned} r_{up}^n &= [r_x^n, r_y^n + \varepsilon] \\ r_{down}^n &= [r_x^n, r_y^n - \varepsilon] \\ r_{left}^n &= [r_x^n + \varepsilon, r_y^n] \\ r_{right}^n &= [r_x^n - \varepsilon, r_y^n] \end{aligned} \quad (4.8a)$$

$$\angle b_{att}^n = (G_{r_{up}^n, h} - G_{r_{down}^n, h}, G_{r_{right}^n, h} - G_{r_{left}^n, h}) \quad (4.8b)$$

$$|b_{att}^n| = \begin{cases} -5 \tan((G_{n,h} - G_{curve})(0.5\pi)) & \text{se } G_{n,h} < G_{curve} \\ -\tan((G_{n,h} - G_{curve})\eta) & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.8c)$$

$$\eta = \frac{\pi}{2 - 2G_{curve}} \quad (4.8d)$$

4.6 Acompanhamento baseado em normas sociais utilizando a regra de navegação lado-a-lado

A regra de navegação lado-a-lado também é baseada na FGA; a decisão de qual robô ficará de cada lado também é feita segundo o Algoritmo 1 e também resultará em uma posição ao lado e levemente à frente da pessoa. O objetivo deste método é guiar o robô em um contorno da FGA em uma direção dependente de sua pose relativa ao indivíduo e da pose do outro robô que navega lado-a-lado. Este método tem as seguintes características:

- Permite que o robô se desloque através de um contorno, tal como um método seguidor de linha;
- Combina a modelagem da FGA com a regra de escolha de lado da estratégia lado-a-lado do *flocking*;
- Prioriza o deslocamento de um robô que esteja do lado errado por baixo, evitando aproximação frontal excessiva ao indivíduo.

Define-se um ângulo de verificação Θ_n para determinar um semicírculo de centro na posição do robô. Uma faixa de valores angulares nas bordas deste círculo tem seu valor G calculado, e aquele valor mais próximo de G_{curve} tem seu ângulo selecionado para determinar a direção do vetor de atração. O Algoritmo 2 encontra o valor de Θ_n e, também, um redutor de velocidade P_{speed}^n para que o robô não ultrapasse o ponto desejado de parada.

Algoritmo 2 – Obtendo os valores de Θ_n, P_{speed}^n

```

1: procedimento ENCONTRAR_ $\Theta_n(n)$  ▷ Índice do próprio robô
2:    $P_x^{n'} \leftarrow P_x^n + D_f$ 
3:   se  $P_x^{n'} > 0$  então
4:      $\Theta_n \leftarrow h_\theta + \pi$ 
5:   senão se  $\mathbb{L}^n == 1$  então
6:      $\Theta_n \leftarrow \arctan(r_y^n - h_y, r_x^n - h_x) + 0.5\pi$  ▷ Girar no sentido horário
7:   senão
8:      $\Theta_n \leftarrow \arctan(r_y^n - h_y, r_x^n - h_x) - 0.5\pi$  ▷ Girar no sentido anti-horário
9:   fim se
10:   $C_{side} = 0$ 
11:  se  $((\mathbb{L}^n == 1) \text{ and } (P_y^n > 0)) \text{ or } ((\mathbb{L}^n == 0) \text{ and } (P_y^n < 0))$  então ▷ O robô está do lado certo?
12:     $C_{side} = 1$ 
13:  fim se
14:  se  $(P_x^{n'} > 0)$  or  $(C_{side} == 0)$  então
15:     $P_{speed}^n = 1$ 
16:  senão
17:     $P_{speed}^n = P_x^n$ 
18:  fim se
19:  return  $\Theta_n, P_{speed}^n$ 
20: fim procedimento

```

A checagem do arco buscando pelo valor mais próximo de G_{curve} é feita de acordo com as Equações 4.9a e 4.9b. A intensidade é calculada segundo a Equação 4.9c; o valor de η é calculado da mesma forma que visto na Equação 4.8d. Quando o robô está em um contorno de valor superior a G_{close} , a força repulsiva é intensificada para evitar ao máximo uma colisão com a pessoa.

$$\angle b_{att}^n = \underset{(i = -0.5\pi + h_\theta + \Theta_n)}{\overset{(i < 0.5\pi + h_\theta + \Theta_n)}{\operatorname{argmin}}} |G_{curve} - G_{I_i, h}| \quad (4.9a)$$

$$I_i = [r_x^n + \varepsilon \cos(i), r_y^n + \varepsilon \sin(i)] \quad (4.9b)$$

$$|b_{att}^n| = \begin{cases} P_{speed}^n & \text{se } G_{n, h} < G_{close}; \\ -\tan((G_{n, h} - G_{curve})\eta) & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.9c)$$

4.7 Considerações finais

Neste Capítulo, as quatro estratégias elaboradas foram apresentadas. São elas: acompanhamento baseado em *flocking*, acompanhamento baseado em *flocking* utilizando uma regra de navegação lado-a-lado, acompanhamento baseado em normas sociais e acompanhamento baseado em normas sociais utilizando uma regra de navegação lado-a-lado. Os experimentos

em ambiente de simulação, comparando as estratégias propostas e apresentando os resultados obtidos, são apresentados no Capítulo a seguir.

EXPERIMENTOS SIMULADOS

Neste Capítulo, são apresentados os experimentos simulados realizados. A avaliação feita nesta etapa é dividida em duas partes. A primeira parte trata de uma análise em escala *micro* das estratégias, incluindo detalhes de navegação como tratamento de direção diferencial e presença de obstáculos, enquanto a etapa de experimentos em escala *macro* apresenta experimentos sem restrições de movimento e com um número maior de robôs.

5.1 Critérios de Avaliação

Para avaliar as diferentes estratégias de acompanhamento da pessoa, é necessário definir critérios de avaliação. A avaliação do sistema será feita considerando critérios objetivos e subjetivos. Os critérios objetivos considerados são:

- Distância média entre cada robô e o humano;
- Médias das maiores e menores distâncias;
- Distância média entre cada robô que está sob regra de navegação lado-a-lado e o humano, quando a mesma for aplicada;
- Número de robôs invadindo a zona íntima da pessoa (a zona íntima será considerada aquela delimitada pela FGA de valor maior do que G_{close});
- Mudanças médias de direcionamento do robô (somente para o caso da análise *micro*). Calculada pela Equação 5.1;

$$AHC_i = \frac{\sum_{t=0}^{t < T} |\theta_i^t - \theta_i^{t-1}|}{T}; \quad (5.1)$$

- Número de robôs posicionados ao lado da pessoa (Figura 9). Obtido pela Equação 5.2.

$$SC^t = \sum_{i=0}^{i < n} C_i^t$$

$$C_i^t = \begin{cases} 1, & \text{se } \pi/2 - \theta_{side} < |\text{atan}(r_y^n - h_y, r_x^n - h_x) - h_\theta| < \pi/2 + \theta_{side} \text{ e} \\ & |h - r^n| < T_{side}; \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (5.2)$$

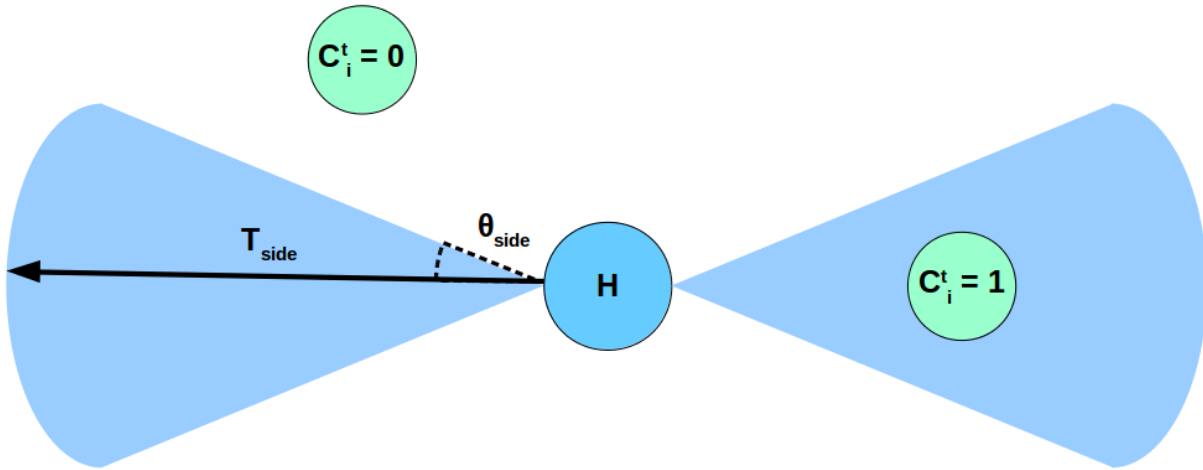


Figura 9 – A região em que robôs são considerados postos ao lado da pessoa.

Os critérios subjetivos serão uma série de afirmações avaliadas sob uma escala Likert de cinco pontos; tais afirmações são detalhadas na seção referente às avaliações com robôs reais.

5.2 Avaliações em escala micro

O objetivo dos experimentos em escala micro é avaliar possíveis dificuldades quando há restrições à navegação dos robôs. Eles foram realizados no simulador V-REP; os métodos foram implementados em C++ e o algoritmo se comunica com o V-REP através do ROS (*Robotic Operating System*). Os experimentos em escala micro consideram um número menor de robôs ($n=5$). Estes robôs são de direção diferencial, não tendo a possibilidade de se deslocar livremente; esta limitação é um fator chave para ser considerado contrastando os resultados dos micro e macro experimentos. Em cada cenário de teste, o indivíduo a ser seguido tem uma rota preestabelecida desconhecida pelos robôs. O humano no experimento é representado por um modelo pronto do V-REP: um agente humanoide que tem sua trajetória definida por curvas de Bézier (“*Bill on path*”).

O robô simulado é o *Pioneer3DX* (PIONEER, 2016), cujo sistema de navegação é o de direção diferencial. Nele, duas rodas independentes e paralelas entre si determinam a velocidade

da pessoa. Quando ambas as rodas possuem velocidade angular igual, o robô se desloca em linha reta; quando uma das rodas tem maior velocidade angular, o robô realiza uma curva; quando uma roda tem a velocidade igual à contrária da outra, o robô gira em torno do seu próprio eixo.

É necessária uma conversão das velocidades linear e angular obtidas da soma dos comportamentos para velocidades angulares de roda. A Equação 5.3 mostra como a conversão foi realizada. Assume-se que as rodas estão igualmente distantes do eixo do robô e que as duas rodas têm as mesmas proporções. O valor l é a distância da roda até o eixo do robô e r é o raio da roda (SILVA, 2010).

$$\begin{aligned}\varphi_i^{Esq} &= \frac{v_i - l\omega_i}{r} \\ \varphi_i^{Dir} &= \frac{v_i + l\omega_i}{r}\end{aligned}\quad (5.3)$$

A Tabela 2 apresenta os valores das constantes. Nesta tabela e nas demais apresentadas ao longo desta Seção, a estratégia 1 é a de *flocking*, a estratégia 2 é a de *flocking* com a sua regra de navegação lado-a-lado, a estratégia 3 é a de normas sociais e a estratégia 4 é a de normas sociais utilizando a regra de navegação lado-a-lado correspondente.

Tabela 2 – Constantes utilizadas nos experimentos em escala micro.

Parâmetro/Estratégia	1	2	3	4
c_{att}	2			
c_{rep}	0.5			
c_{obst}	0.5			
c_{reph}	10			
c_{wall}	5			
σ_f	-		4	
σ_r	-		1.33	
σ_s	-		1.33	
G_{curve}	-		0.2	
G_{close}	-		0.4	
D_s	-	1.0 m	-	
D_f	-	0.5 m	-	0.5 m
W_x	-1.5 m	2 m	-1.5 m	2 m
W_y	1.0 m			
T_{side}	3.0 m			
θ_{side}	$\pi/6$			
Max_{speed}	3 m/s			
Velocidade linear do humano	0.1 m/s			

Os cenários utilizados para os testes foram criados pensando em diversas situações que podem ocorrer na navegação de robôs com pessoas. Cinco cenários foram considerados para os experimentos:

1. Um cenário em que o indivíduo está parado;

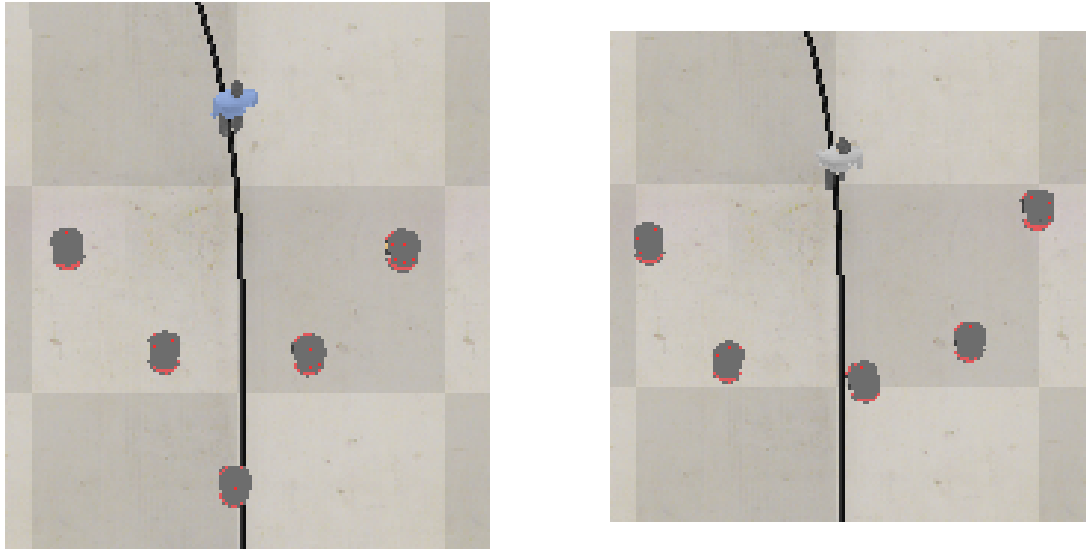


Figura 10 – Imagem dos robôs andando com a pessoa utilizando a estratégia de *flocking* (esquerda) e normas sociais (direita) nos experimentos em escala micro.

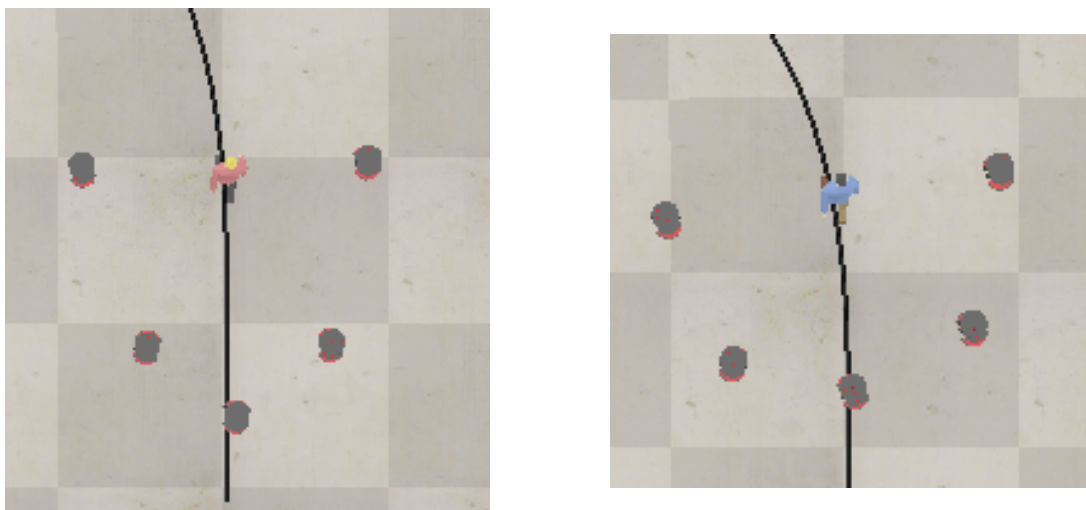


Figura 11 – Imagem dos robôs andando com a pessoa utilizando a estratégia de *flocking* com a regra de navegação lado-a-lado (esquerda) e normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado (direita) nos experimentos em escala micro.

2. Um cenário em que o indivíduo realiza uma trajetória de curvas abertas;
3. Um cenário em que o indivíduo realiza uma trajetória de curvas fechadas;
4. Um cenário em que o indivíduo anda em linha reta, atravessando um corredor;
5. Um cenário similar ao primeiro, mas com a pessoa de frente para os robôs.

As Figuras 10 e 11 mostram as quatro estratégias navegando com a pessoa no segundo cenário, no início de uma curva suave. Note que os robôs utilizando a estratégia de *flocking* sem a regra de navegação lado-a-lado mostram dificuldade em ocupar os espaços ao lado da pessoa. Cada quadrado no padrão xadrez do chão corresponde a 2.5 metros.

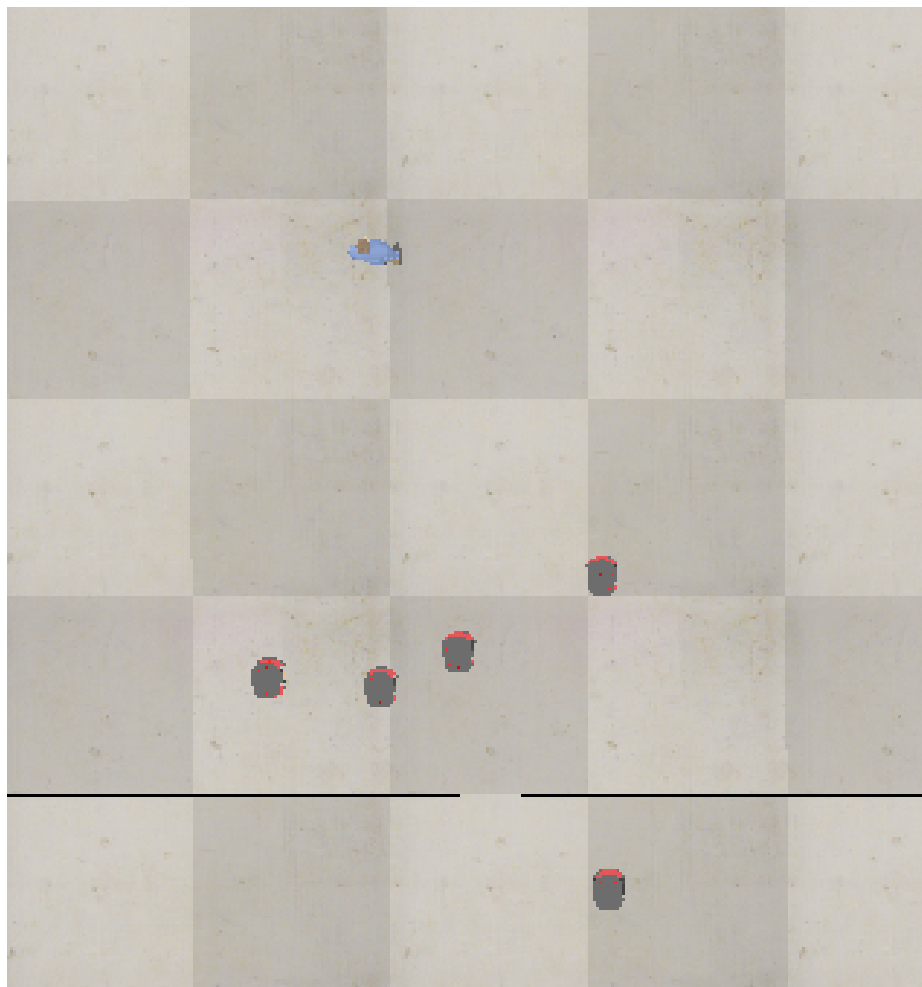


Figura 12 – O primeiro cenário de testes na escala micro.

5.2.1 Escala micro: primeiro cenário

O objetivo do primeiro cenário é avaliar isoladamente a aproximação e a convergência dos robôs, sem que a pessoa se desloque (Figura 12). Todos os demais cenários possuem esta etapa de aproximação.

A Figura 13 mostra a estratégia de normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado se aproximando da pessoa e atingindo as posições estáveis ao redor da mesma n primeiro cenário.

As médias das distâncias em função do tempo no primeiro cenário são mostradas na Figura 14 na cor **azul**, destacando também as médias das menores (em **amarelo**) e maiores distâncias (em **vermelho**). Quando aplica-se, são mostradas, também, as distâncias médias de robôs que estão sob regra de navegação lado-a-lado (em **preto**). Estas cores são mantidas como padrão para as demais Figuras ao longo deste texto que lidam com as médias das distâncias. As médias das distâncias foram similares, com uma convergência um pouco mais rápida da estratégia de normas sociais sem regra de navegação lado-a-lado.

Através de diagramas de caixa, apresentam-se os dados sobre média de robôs lado-a-lado, invasão do espaço pessoal e de deslocamentos angulares. A Figura 15 representa a média de

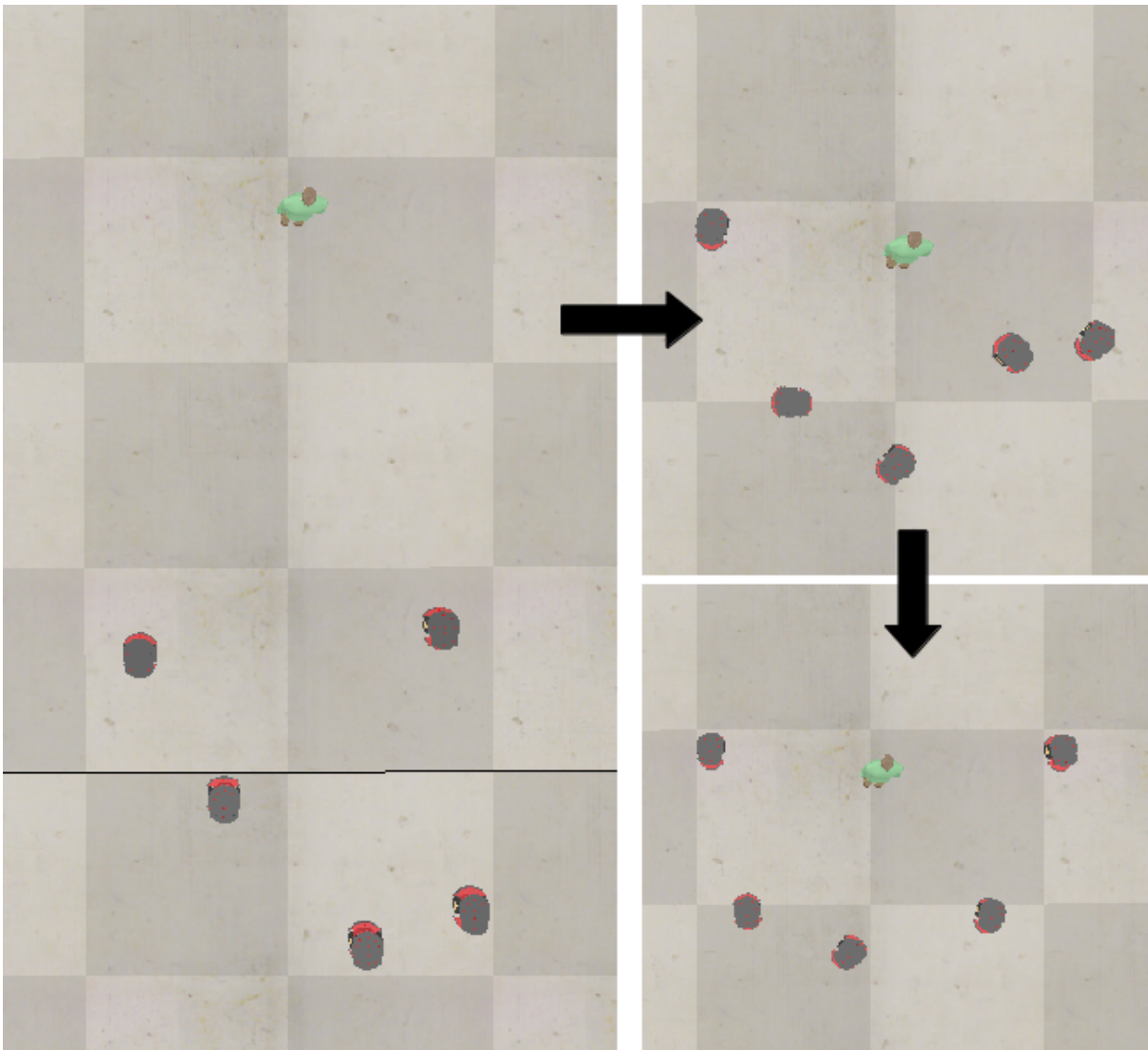


Figura 13 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no primeiro cenário.

robôs que se posicionaram ao lado da pessoa segundo a Equação 5.2. Nota-se que a mediana foi menor no caso da estratégia utilizando normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado foi adotada do que a estratégia de normas sociais sem a regra lado-a-lado. Um fator que pode explicar isto é que o limiar da parede virtual é mais restritivo quando regras de navegação lado-a-lado são utilizadas, fazendo com que seja difícil robôs que não estão sob as regras de navegação ao lado da pessoa alcançarem tal posição relativa.

A Figura 16 mostra o mesmo valor considerando apenas robôs utilizando a regra de navegação lado-a-lado, ou seja, apenas mostra resultados dos dois robôs que receberam regras específicas de navegação lado-a-lado. O uso de normas sociais resultou em médias menores com variância consideravelmente maior, o que significa que em alguns experimentos, dependendo do posicionamento inicial dos robôs, a regra de navegação lado-a-lado demorou para conseguir posicionar o robô correspondente.

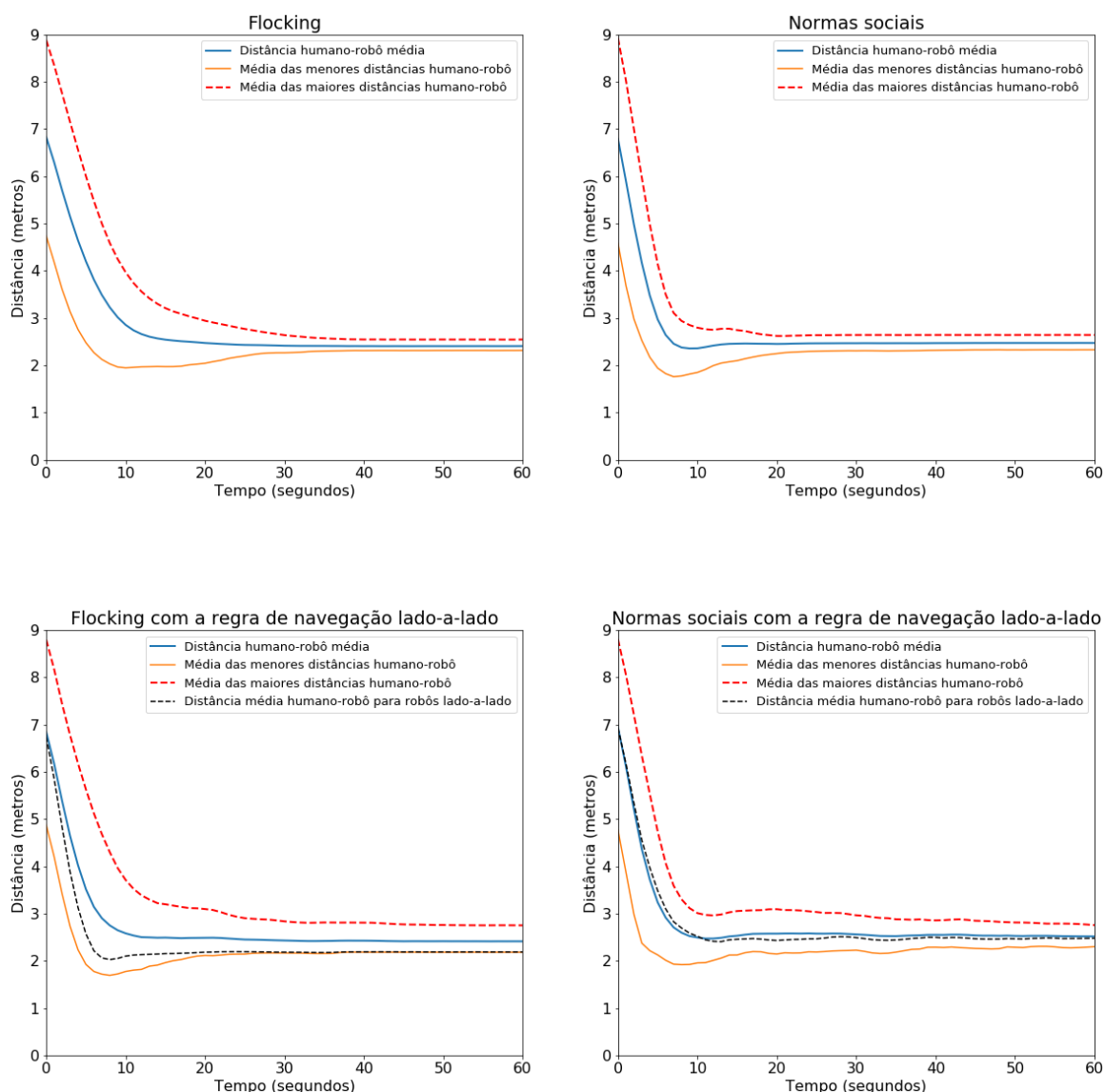


Figura 14 – Resultados das distâncias médias do primeiro cenário de teste na escala micro.

A Figura 17 indica a média de invasões do espaço pessoal do indivíduo pelos robôs. Nota-se que a mediana para o caso de *flocking* sem regras de navegação lado-a-lado corresponde a 0, indicando que muitos dos experimentos feitos não apresentaram invasão. As medianas tiveram desempenho parecido, com uma maior variabilidade nos casos em que regras de navegação lado-a-lado foram utilizadas. Comparando com os resultados utilizando somente os robôs sob a regra de navegação lado-a-lado (Figura 18), nota-se que a mediana quando as normas sociais são utilizadas é igual a zero, o que indica que a maior parte dos experimentos não teve invasões e que elas foram menos frequentes utilizando a estratégia lado-a-lado das normas sociais, mas uma quantidade menor de experimentos teve algum grau de invasão parecido com as médias encontradas com o *flocking*.

A Figura 19 mostra o deslocamento angular médio dos robôs durante o percurso. Destacam-se pelas medianas maiores e maiores variâncias as abordagens que usam uma regra de

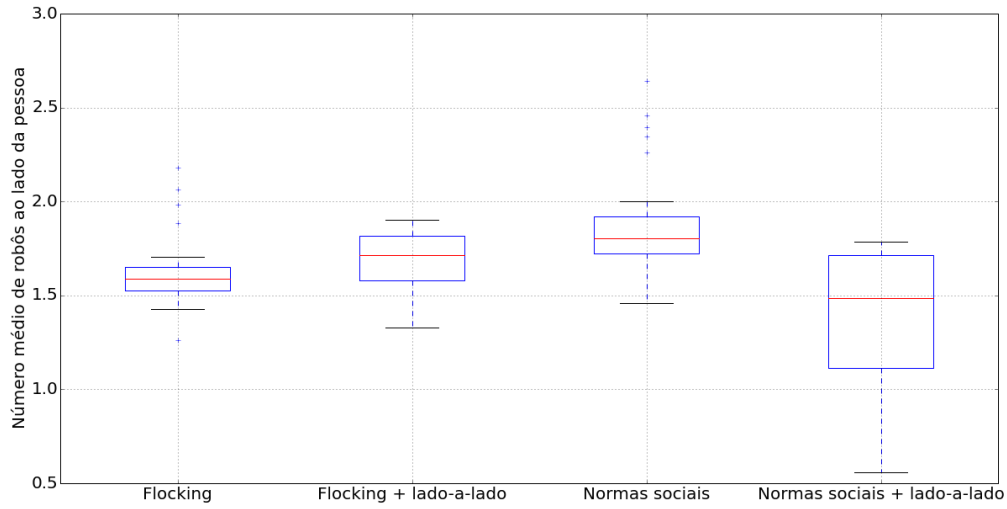


Figura 15 – Número médio de robôs navegando ao lado no primeiro cenário de teste na escala micro.

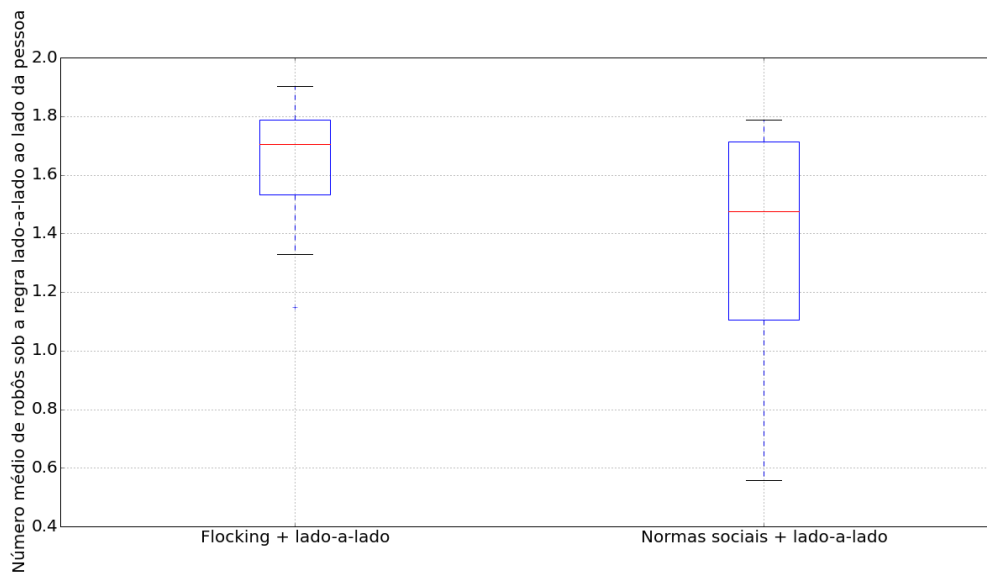


Figura 16 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no primeiro cenário de teste na escala micro.

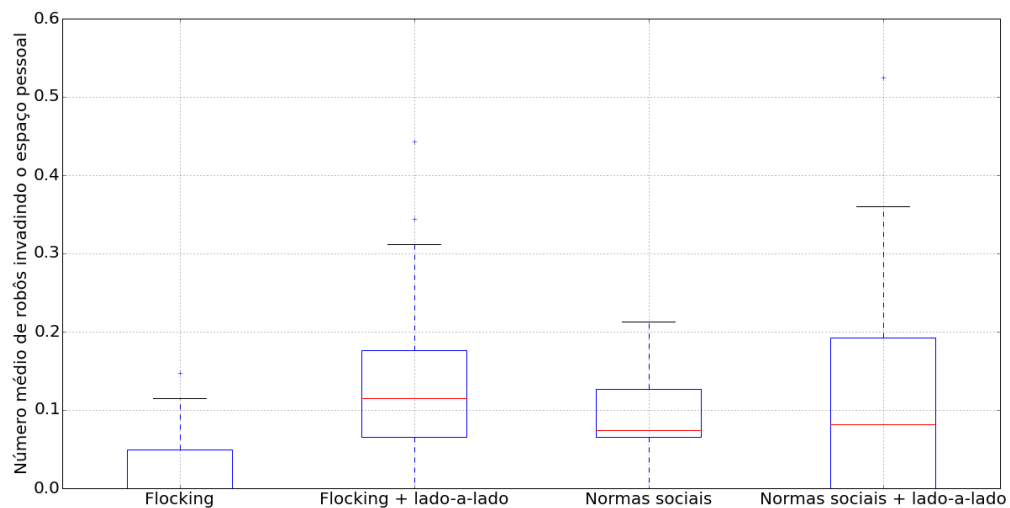


Figura 17 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no primeiro cenário de teste na escala micro.

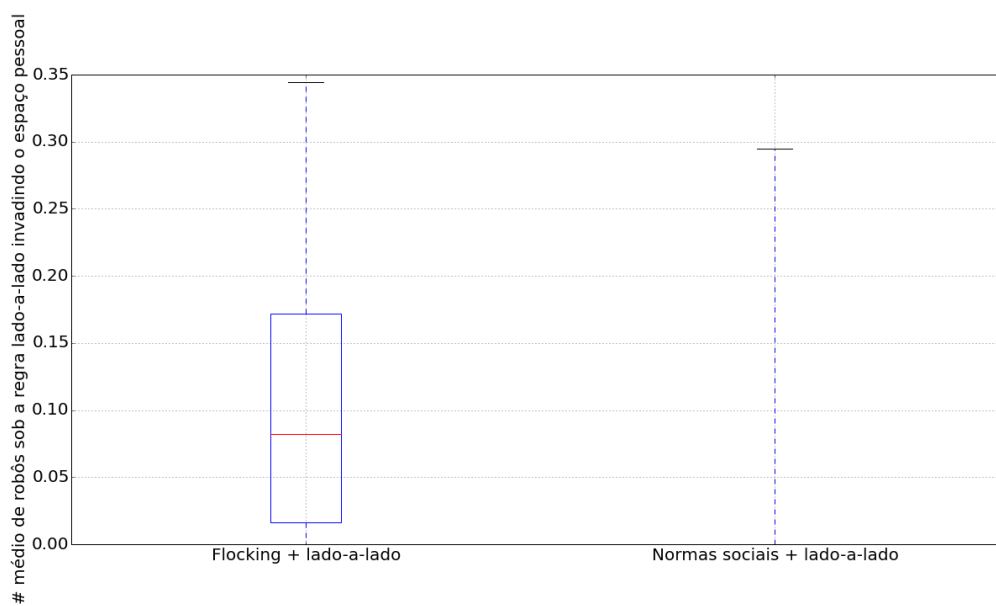


Figura 18 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no primeiro cenário de teste na escala micro.

navegação lado-a-lado, em especial a que utiliza normas sociais.

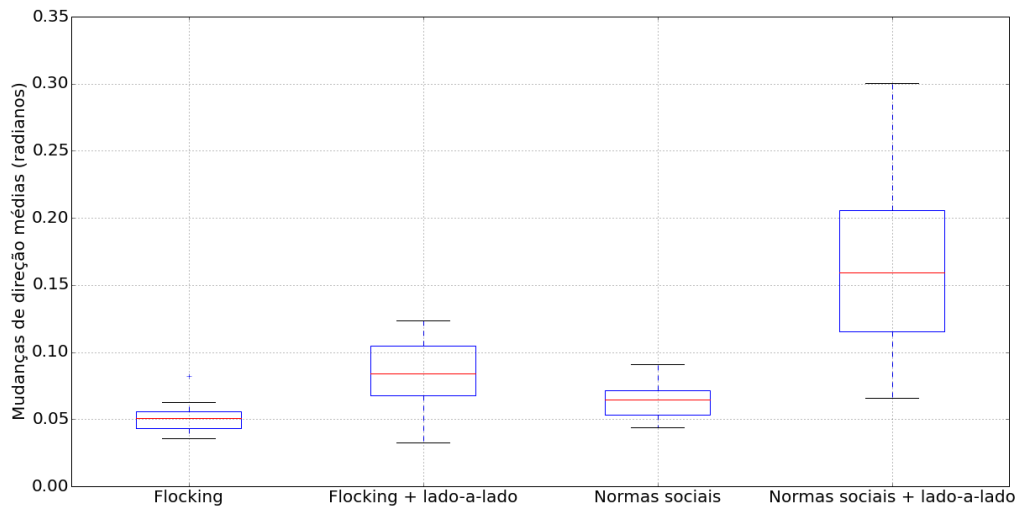


Figura 19 – Média de deslocamentos angulares no primeiro cenário de teste na escala micro.

5.2.2 Escala micro: segundo cenário

O segundo cenário propõe não somente que a pessoa se desloque, mas que ela tenha que realizar curvas suaves, que não devem interferir significativamente na formação dos robôs (Figura 20). Ele representa uma situação de deslocamento mais ideal para a direção diferencial do que o terceiro cenário, com curvas fechadas. A pessoa espera 20 segundos antes de iniciar a caminhada e fica parada após completar o percurso.

Os robôs foram capazes de manter a formação durante o percurso (Figura 21).

De acordo com as médias das distâncias (Figura 22), nota-se que o uso de regras de navegação lado-a-lado resultou em uma maior estabilidade das menores distâncias, mantendo os robôs lado-a-lado como os mais próximos da pessoa. Há uma grande aproximação das maiores e menores médias de distâncias quando a pessoa para de andar no caso do *flocking* e um distanciamento no começo no instante que a pessoa começa a andar, sugerindo que os robôs não foram capazes de manter suas distâncias médias de quando a pessoa estava parada a partir do momento que a ela começava a andar.

A Figura 23 mostra que o uso de regras de navegação lado-a-lado resultou em um aumento da média de robôs ao lado da pessoa, com uma diferença significativamente maior quando tratava-se do uso das estratégias de *flocking*. Especifica-se na Figura 24 a média somente para robôs sob a regra de navegação lado-a-lado, com uma pequena vantagem da estratégia de *flocking*.

A média de invasões do espaço pessoal é mostrada pela Figura 25. Uma característica

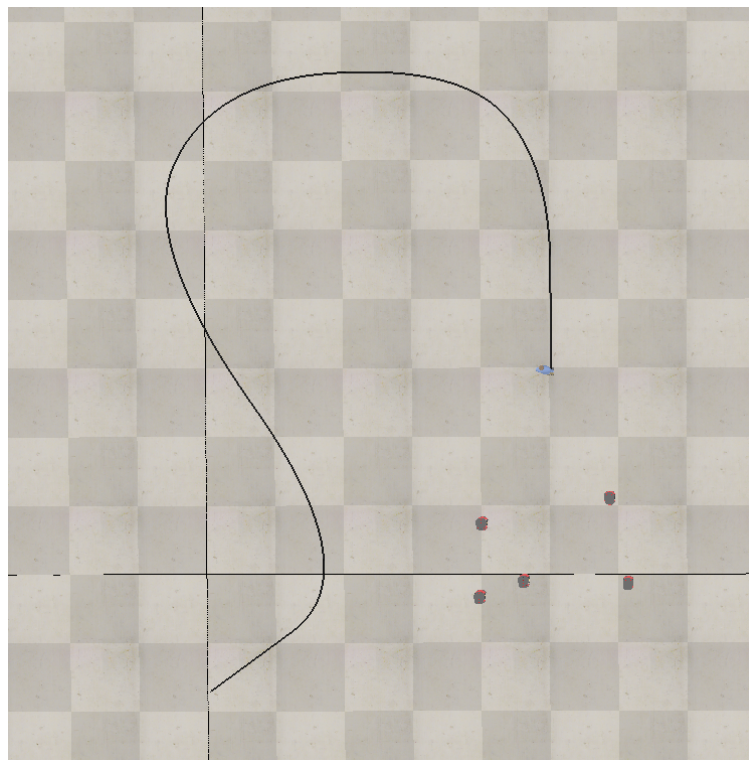


Figura 20 – O segundo cenário de testes na escala micro. A linha preta indica a trajetória percorrida pela pessoa.

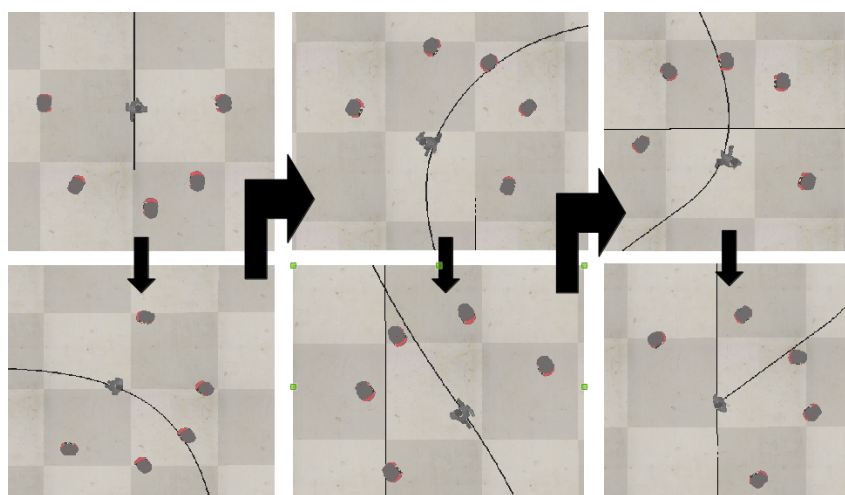


Figura 21 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no segundo cenário.

notável é que apesar da navegação da pessoa e da realização de curvas estas médias foram menores do que no primeiro cenário. O melhor desempenho nesta métrica foi o do uso de *flocking* sem regra de navegação lado-a-lado, que também foi a estratégia com o menor número de robôs lado-a-lado. Apesar de ter demonstrado um número de robôs ao lado da pessoa alto, a estratégia de normas sociais sem a regra de navegação lado-a-lado teve as maiores médias de invasão.

A Figura 26, que mostra as invasões somente de robôs que utilizaram as regras de

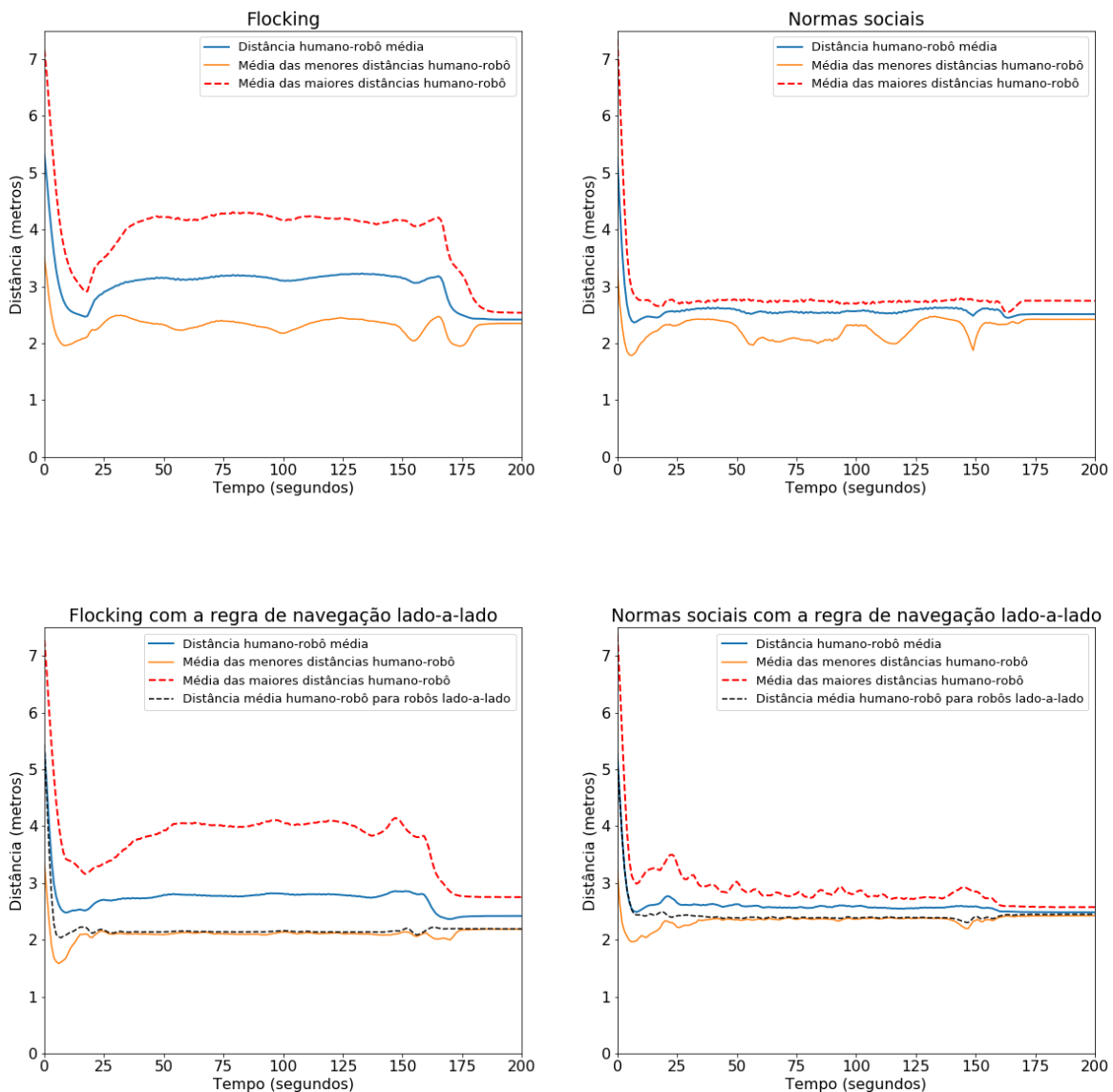


Figura 22 – Resultados das distâncias médias do segundo cenário de teste na escala micro.

navegação lado-a-lado, indica nem todas as invasões registradas foram de robôs sob a regra de navegação lado-a-lado, e que a frequência de invasões foi mais uma vez menor utilizando normas sociais.

A Figura 27 mostra as mudanças de orientação médias. O *flocking* teve resultados superiores neste quesito, assim como o não uso de regras de navegação lado-a-lado. O *boxplot* da regra social com navegação lado-a-lado indica que houve grande amplitude de resultados, o que pode significar uma maior sensibilidade às posições iniciais dos robôs.

5.2.3 Escala micro: terceiro cenário

O terceiro cenário desafia tanto a reorganização dos robôs devido às curvas fechadas como foi montado para expressar as dificuldades de realizar este acompanhamento com robôs

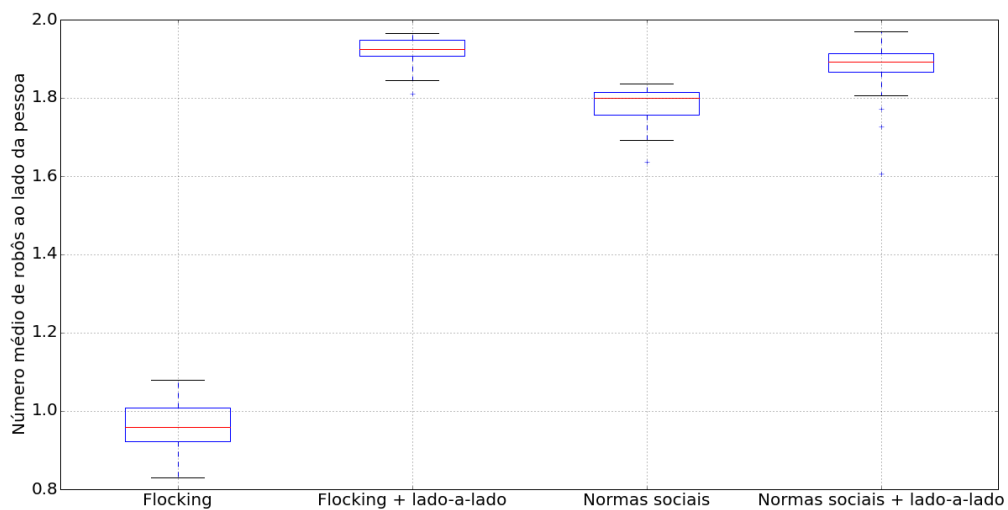


Figura 23 – Número médio de robôs navegando ao lado no segundo cenário de teste na escala micro.

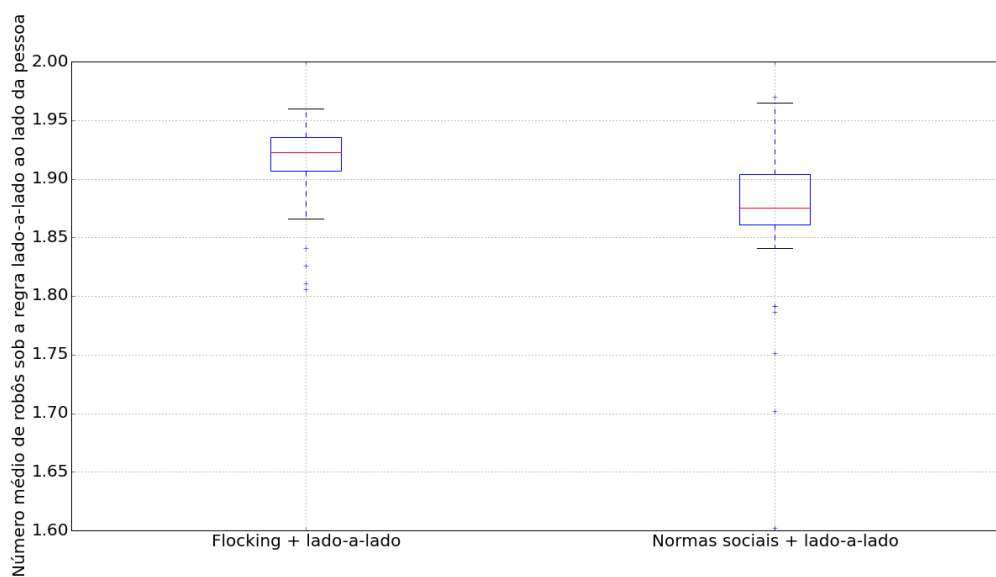


Figura 24 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no segundo cenário de teste na escala micro.

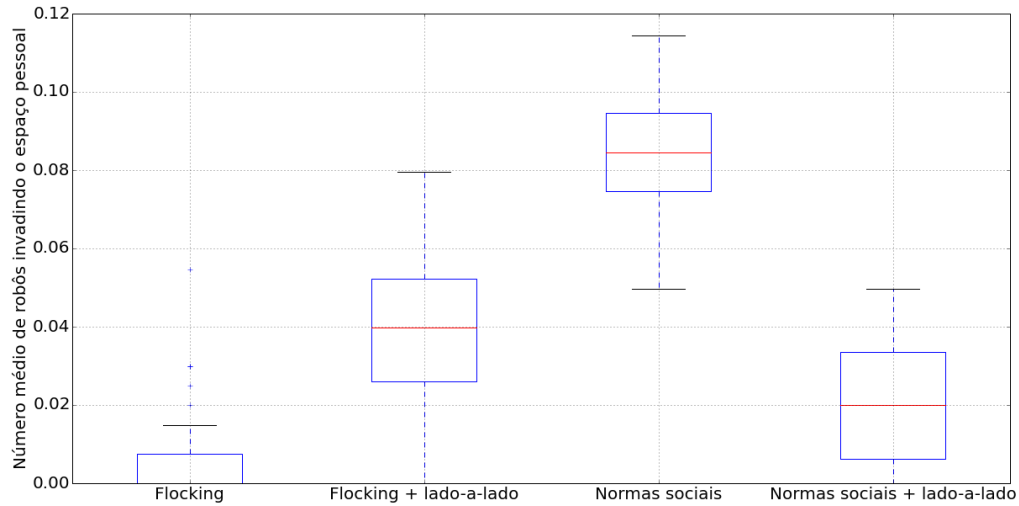


Figura 25 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no segundo cenário de teste na escala micro.

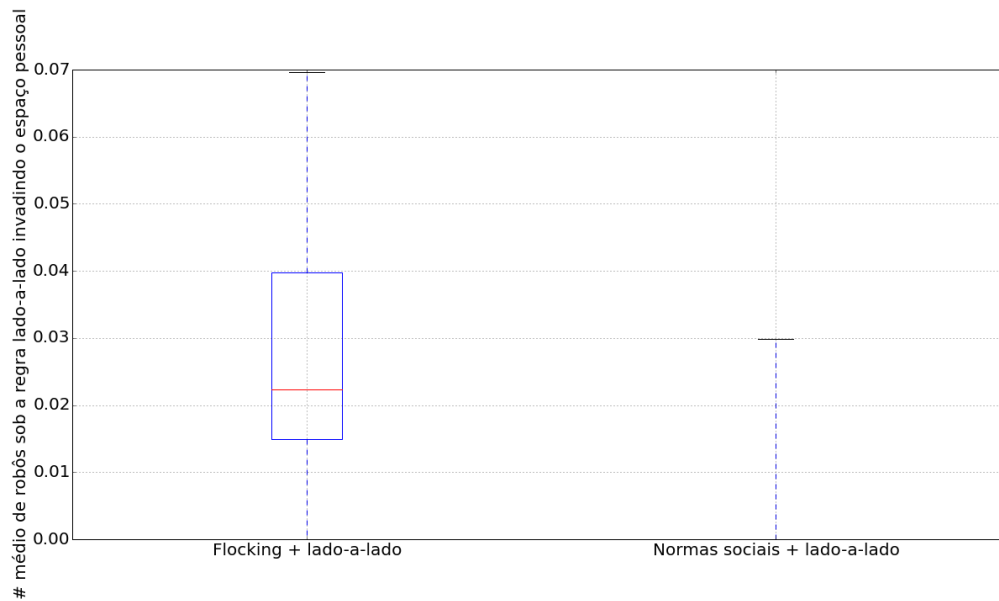


Figura 26 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no segundo cenário de teste na escala micro.

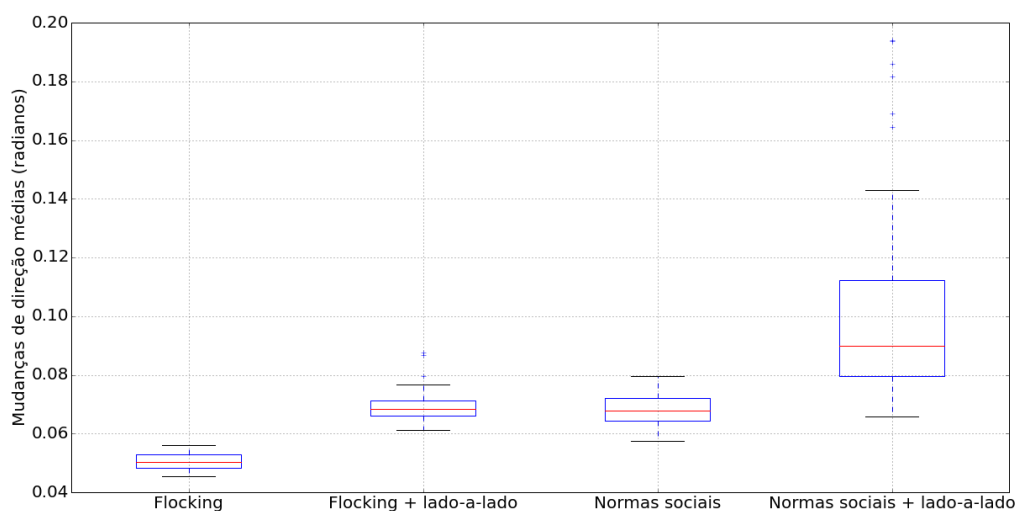


Figura 27 – Média de deslocamentos angulares no segundo cenário de teste na escala micro.

de direção diferencial (Figura 28). No caso deste cenário, configurou-se a curva para que ela fosse o mínimo curvada possível, gerando uma trajetória basicamente composta de linhas retas e viradas bruscas. Quando a curva é muito fechada, as posições relativas dos robôs mudam drasticamente, exigindo reorganização da formação. Isto afeta em especial àqueles que seguem a regra de navegação lado-a-lado, que podem precisar trocar de lado na hora em que a pessoa vira.

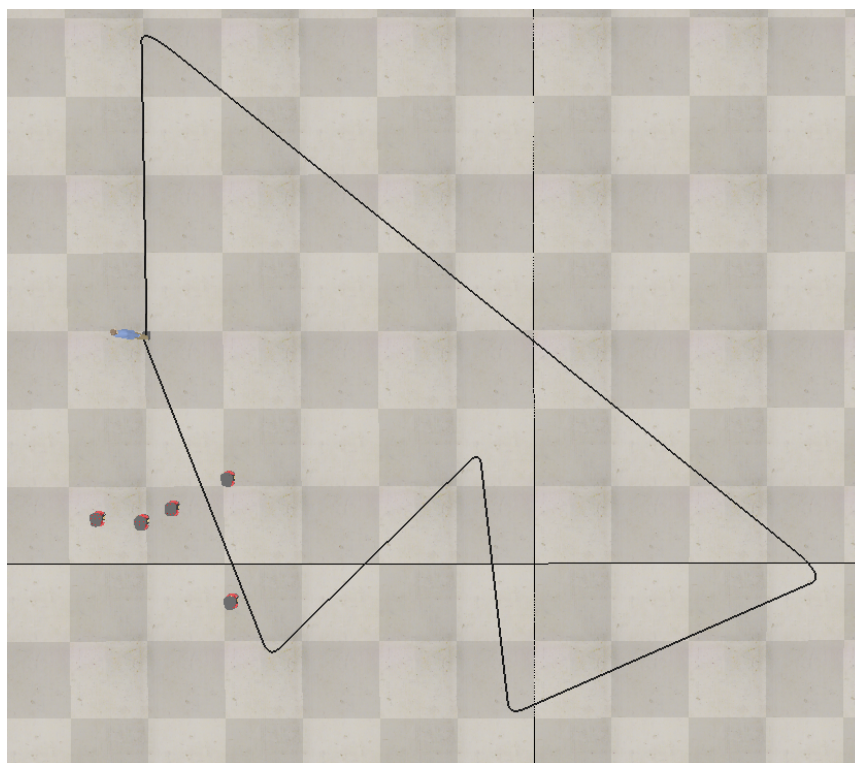


Figura 28 – O terceiro cenário de testes na escala micro. A linha preta indica a trajetória percorrida pela pessoa.

Os robôs foram obrigados a se reorganizar frequentemente, como pode ser observado na Figura 29.

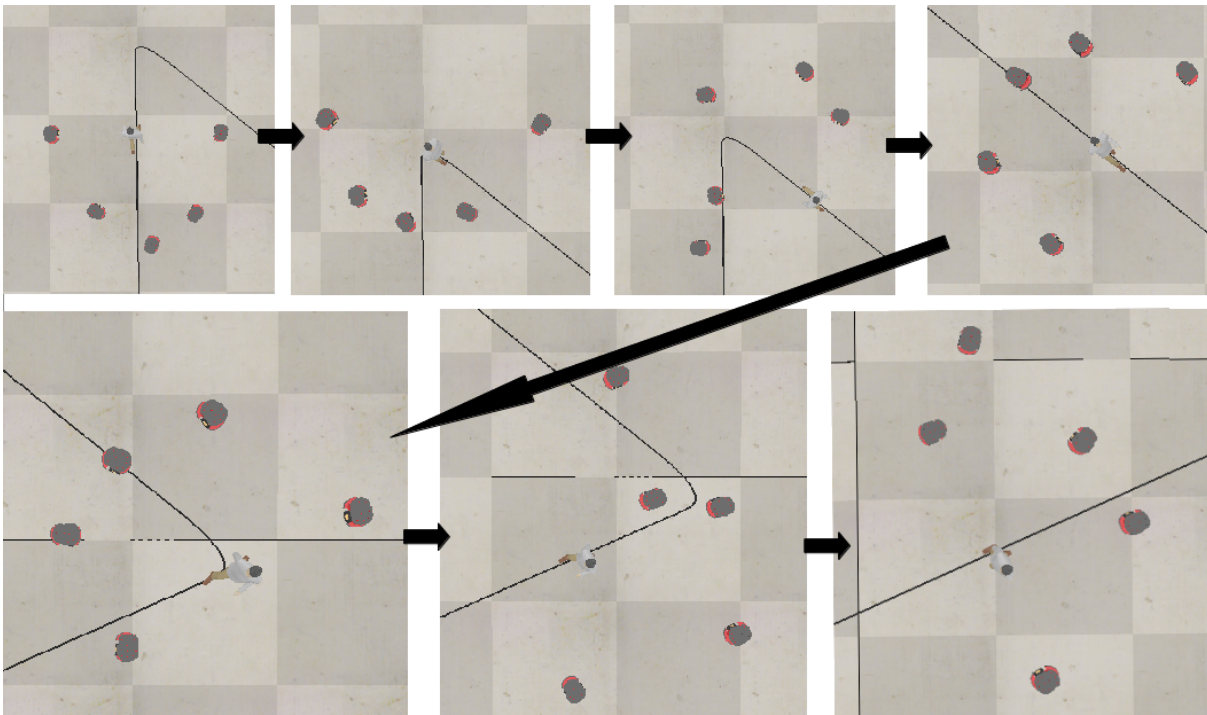


Figura 29 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no terceiro cenário.

A Figura 30 apresenta as médias de distâncias. Os instantes mais altos das médias de distância dos robôs mais distantes e dos que seguem a regra de navegação lado-a-lado evidenciam os momentos em que o indivíduo realiza as curvas, assim como os vales dos demais atributos. Nota-se, novamente, uma diferença nas médias das distâncias no caso do *flocking* quando a pessoa está em repouso em comparação com a pessoa em movimento. As recaídas do valor das distâncias menores foram mais tênues tanto utilizando normas sociais quanto usando as regras de navegação lado-a-lado para dois robôs. A recuperação das distâncias originais antes das curvas foram mais rápidas sem o uso de navegação lado-a-lado.

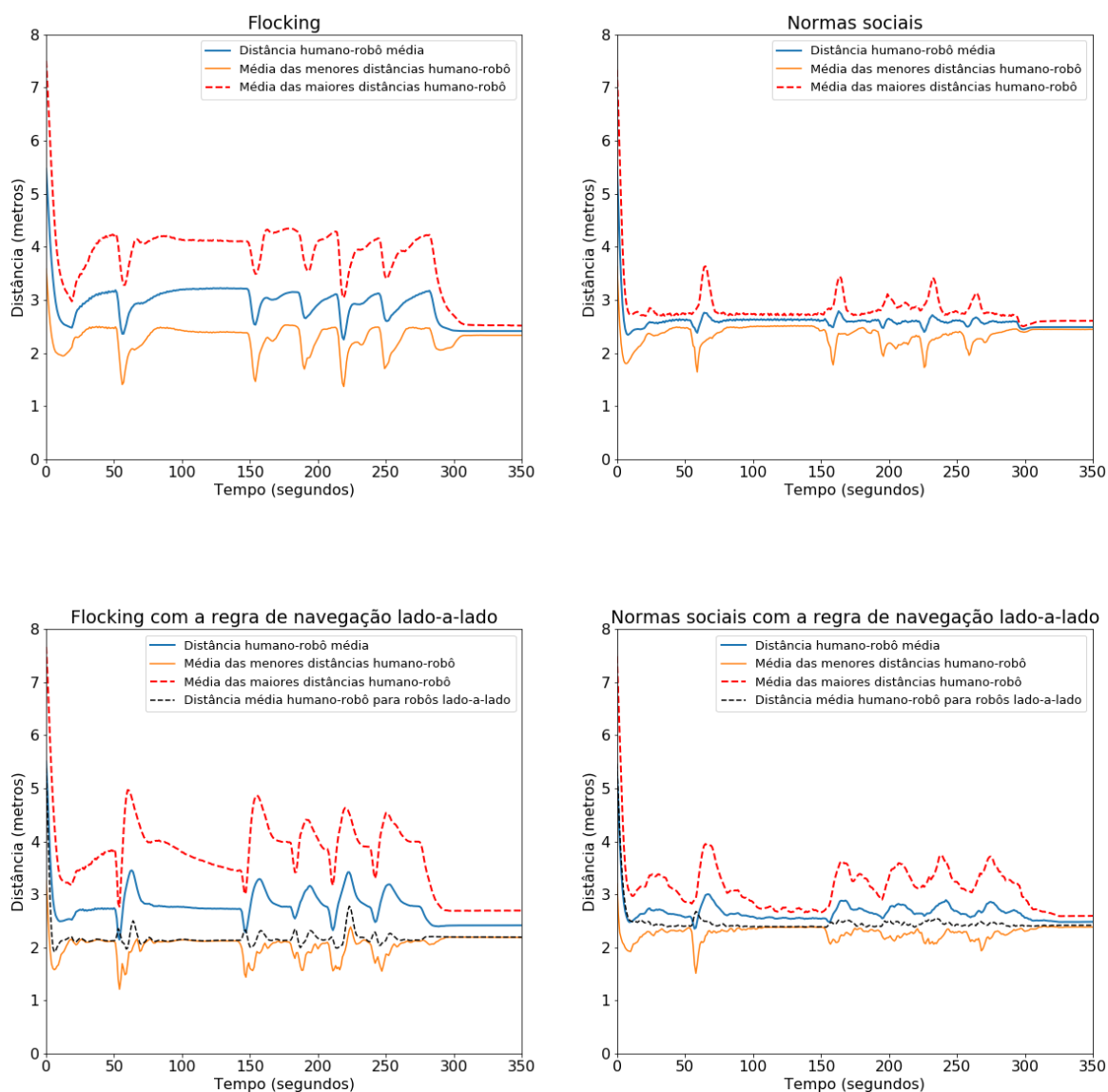


Figura 30 – Resultados das distâncias médias do terceiro cenário de teste na escala micro.

A média de robôs ao lado da pessoa variou significativamente em cada estratégia (Figura 31). Nota-se que o número foi mais uma vez significativamente mais baixo com o *flocking* sem regras de navegação lado-a-lado. A Figura 32 mostra que os robôs sob a regra de navegação lado-a-lado atingiram suas posições desejadas por um período de tempo maior na abordagem do *flocking*.

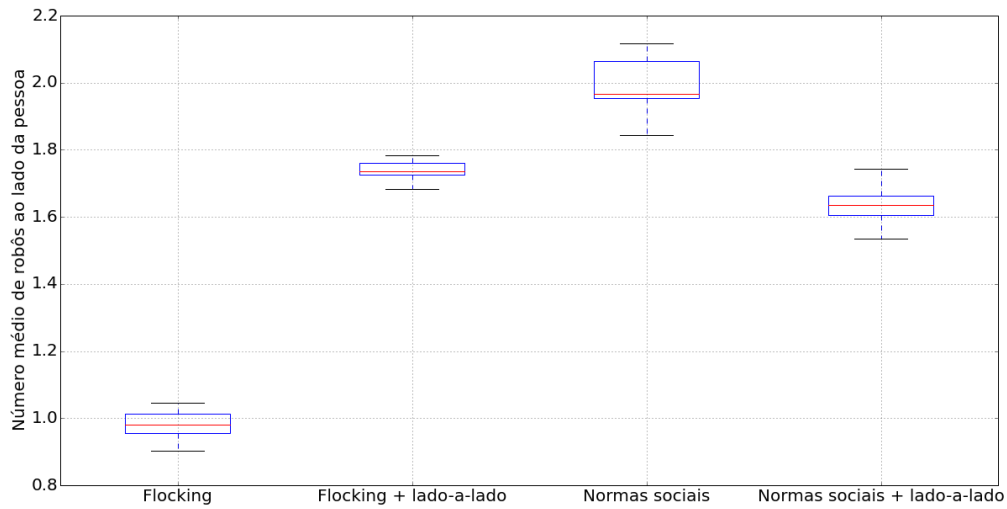


Figura 31 – Número médio de robôs navegando ao lado no terceiro cenário de teste na escala micro.

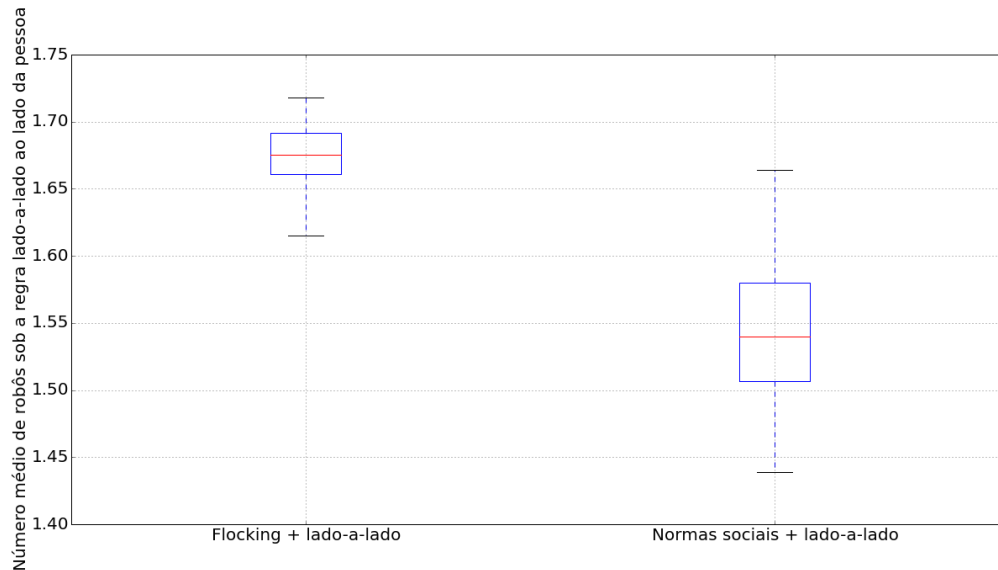


Figura 32 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado no terceiro cenário de teste na escala micro.

A Figura 33 mostra o número médio de robôs invadindo o espaço pessoal. Mesmo tendo uma média de robôs ao lado da pessoa significativamente menor, a estratégia de *flocking* sem regra de navegação lado-a-lado apresentou médias de invasões parecidas com o obtido pelas normas sociais com as regras de navegação lado-a-lado ativadas.

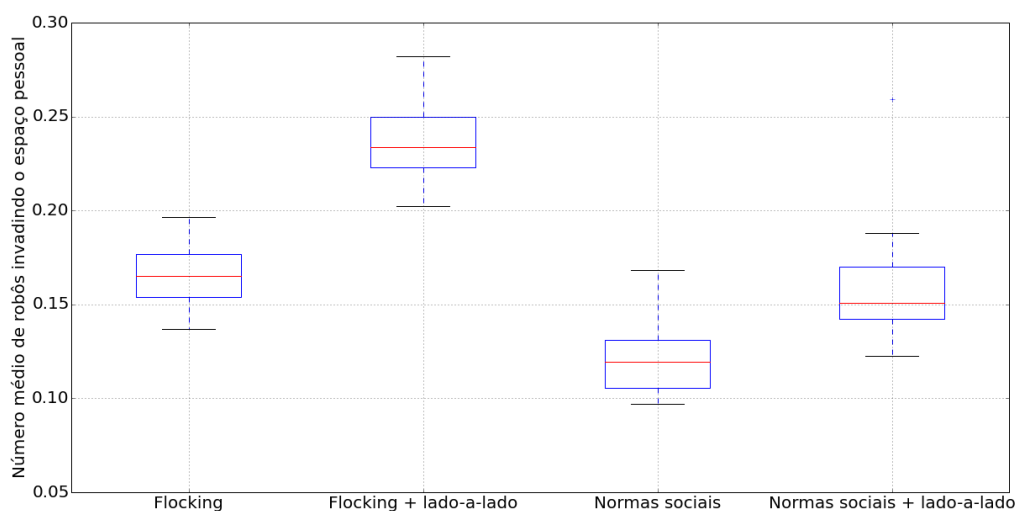


Figura 33 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no terceiro cenário de teste na escala micro.

Na Figura 34, são mostradas as invasões realizadas pelos dois robôs sob a regra de navegação lado-a-lado. Nota-se que as invasões utilizando normas sociais apresentaram médias baixas em comparação ao *flocking*. A característica de realização de uma trajetória por trás da pessoa para o reposicionamento permitiu esta vantagem às normas sociais apesar da maior demora para alcançar a posição desejada.

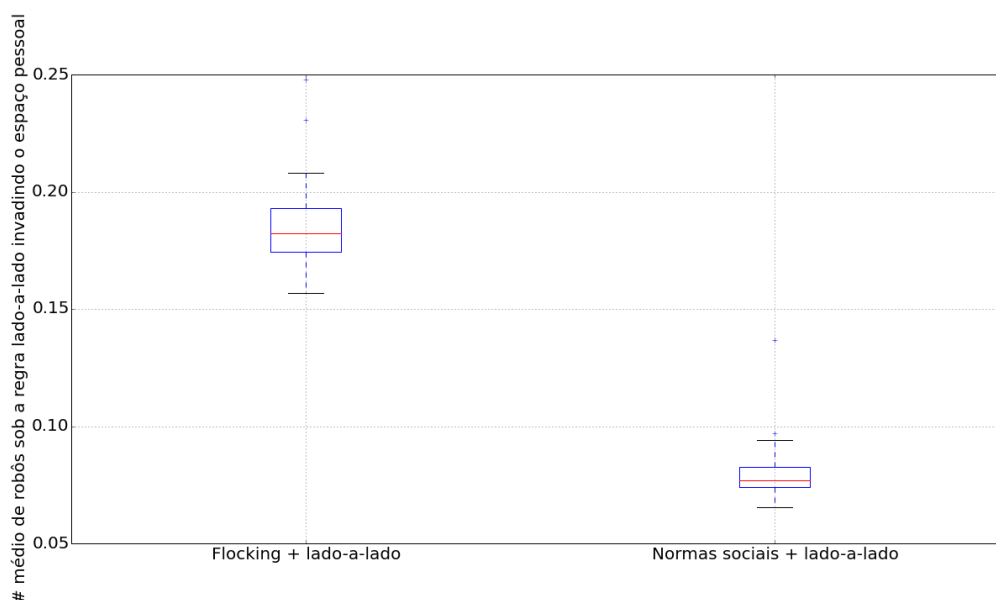


Figura 34 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no terceiro cenário de teste na escala micro.

A Figura 35 mostra que, mais uma vez, foram necessárias mais curvas nas normas sociais com regra de navegação lado-a-lado.

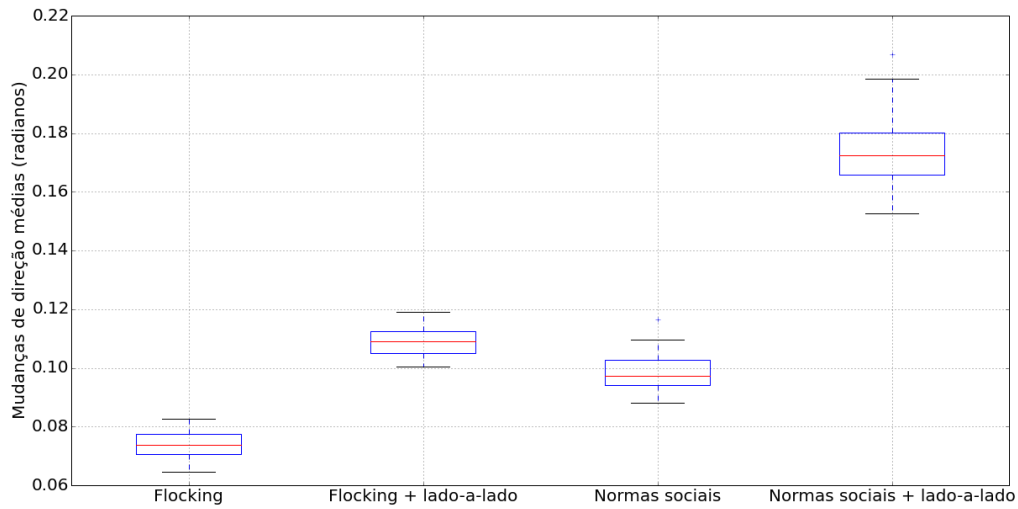


Figura 35 – Média de deslocamentos angulares no terceiro cenário de teste na escala micro.

5.2.4 Escala micro: quarto cenário

O quarto cenário não apresenta curvas, mas oferece um desafio de travessia de corredor, que exige atravessar um espaço apertado, emergindo a necessidade do comportamento de desvio de obstáculos (Figura 36).

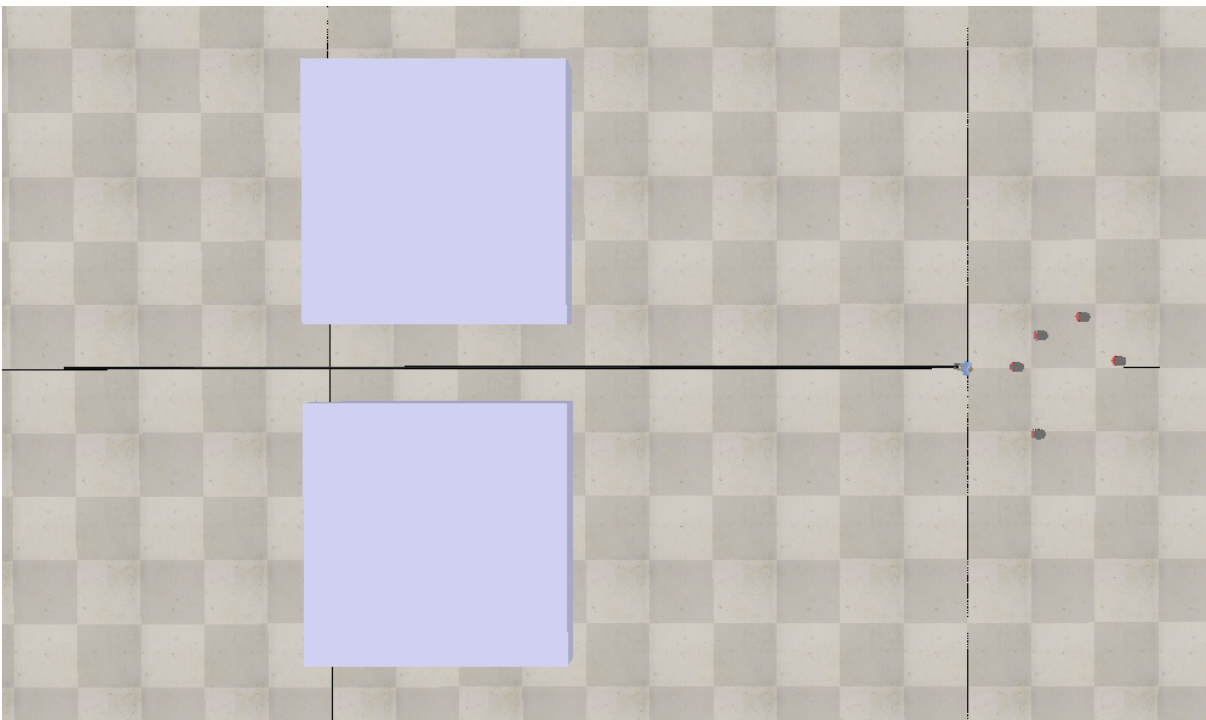


Figura 36 – O quarto cenário de testes na escala micro. A linha preta indica a trajetória percorrida pela pessoa.

A Figura 37 mostra a etapa de travessia do corredor. Apesar de afetados pelas oscilações dos campos potenciais, os robôs obtêm sucesso em atravessar o trecho.

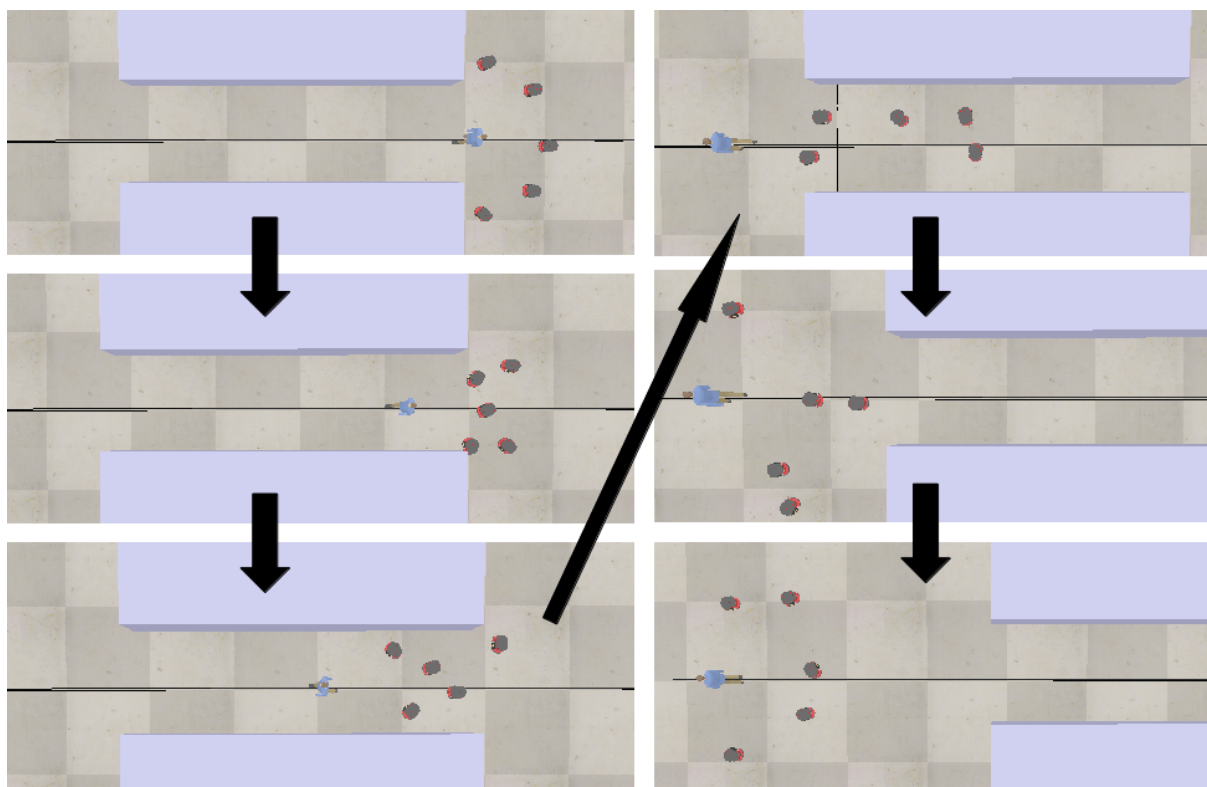


Figura 37 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no quarto cenário.

Na Figura 38, estão as médias das distâncias em função do tempo. As distâncias médias apresentaram elevações durante a travessia do corredor, o que era esperado, com a exceção das médias das menores distâncias. Os picos foram mais elevados sob o uso do *flocking*; nestas estratégias, a distância média dos robôs que visam andar lado-a-lado esteve mais próxima das médias mais baixas, enquanto nas normas sociais este acompanhamento foi mais próximo da media geral das distâncias.

As médias de robôs ao lado da pessoa foram similares no caso das duas abordagens que utilizam as normas sociais (Figura 39). Mais uma vez, nota-se que estas médias são menores quando o *flocking* sem regra de navegação lado-a-lado é utilizado. Na Figura 40, nota-se uma queda na presença de robôs de regra de navegação lado-a-lado ao lado da pessoa, o que é natural visto que durante grande parte do percurso não foi possível aos robôs manter-se nesta posição. Assim como no cenário anterior, as normas sociais apresentaram maior variabilidade de médias e mediana menor.

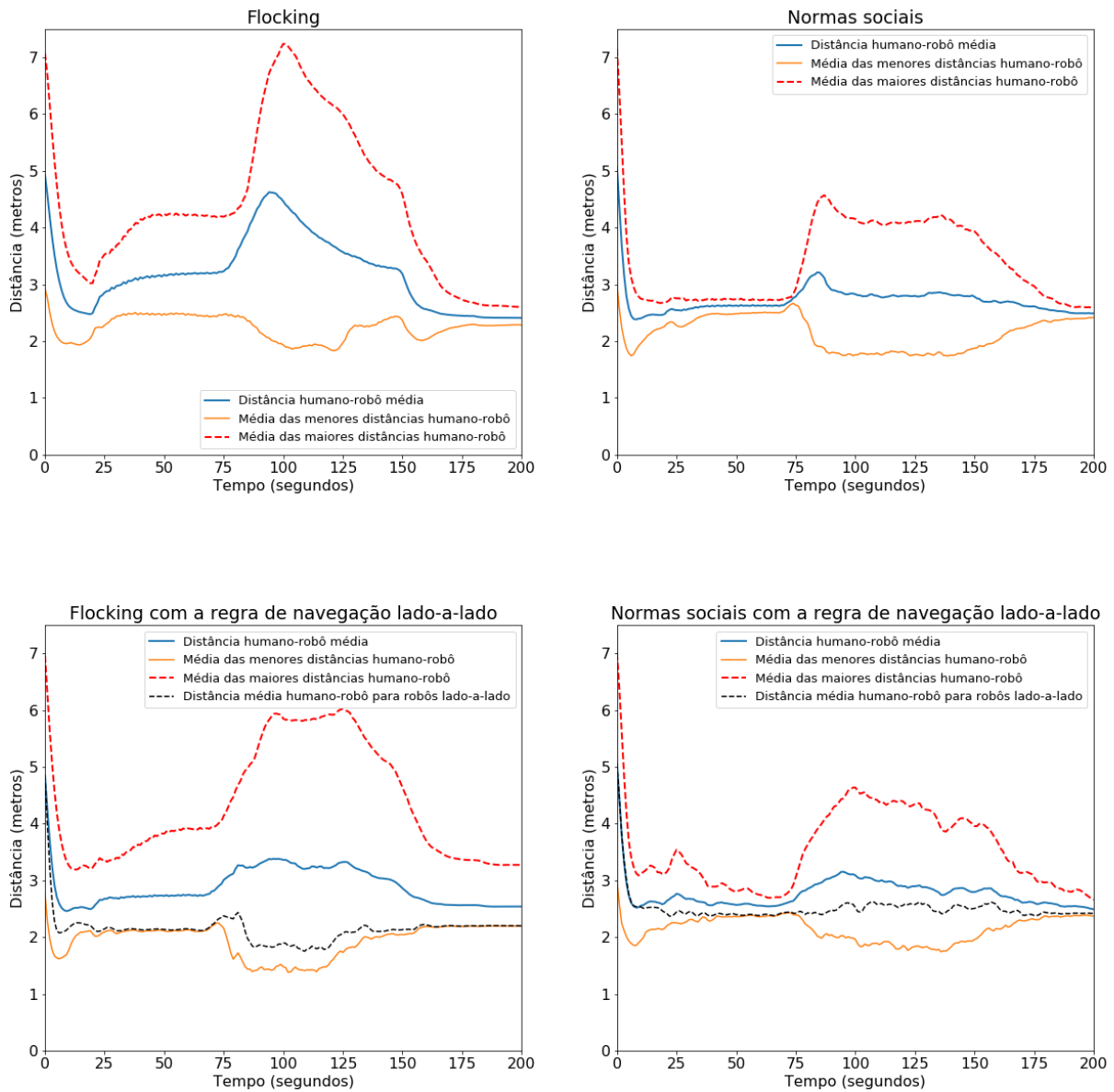


Figura 38 – Resultados das distâncias médias do quarto cenário de teste na escala micro.

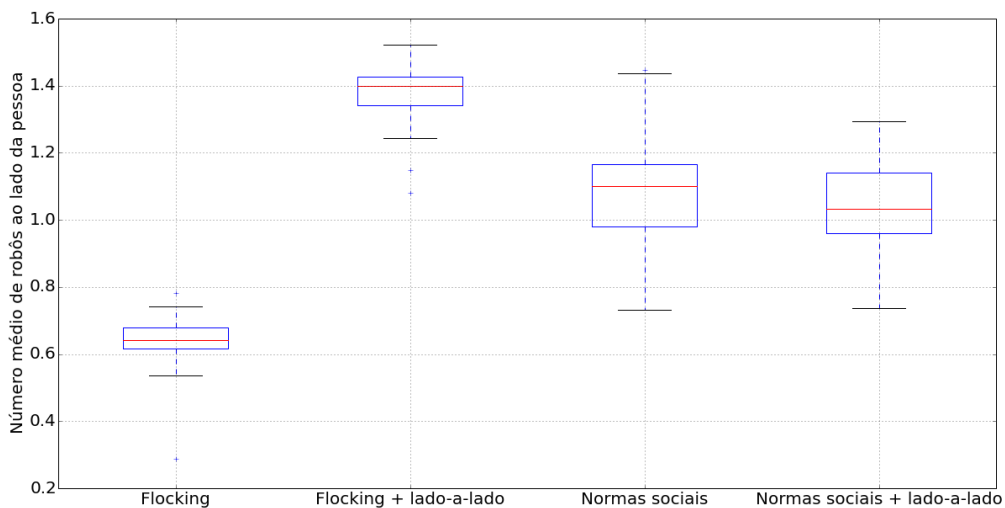


Figura 39 – Número médio de robôs navegando ao lado no quarto cenário de teste na escala micro.

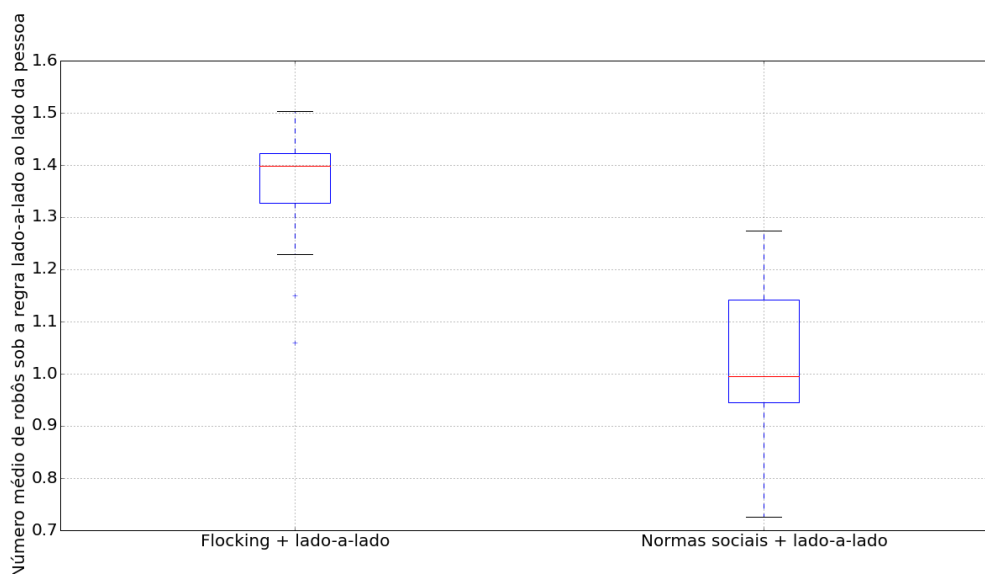


Figura 40 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado no quarto cenário de teste na escala micro.

A Figura 41 apresenta as médias de invasões ao espaço pessoal. Assim como nos cenários anteriores, o *flocking* apresentou valores baixos sem a regra de navegação lado-a-lado. As médias de invasão foram em média maiores do que nos cenários anteriores.

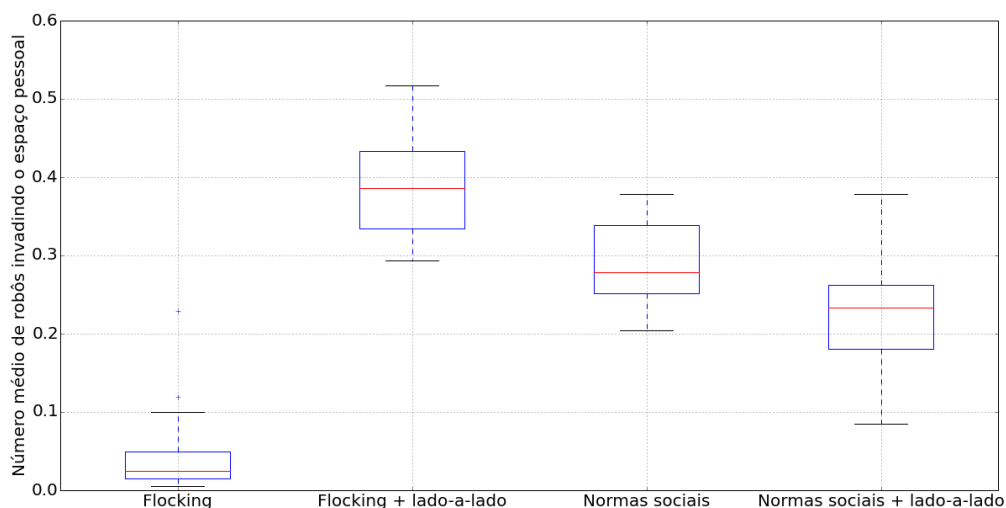


Figura 41 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no quarto cenário de teste na escala micro.

Para o caso dos robôs que estão sob a regra de navegação lado-a-lado (Figura 42), a média foi mais uma vez maior para o *flocking*.

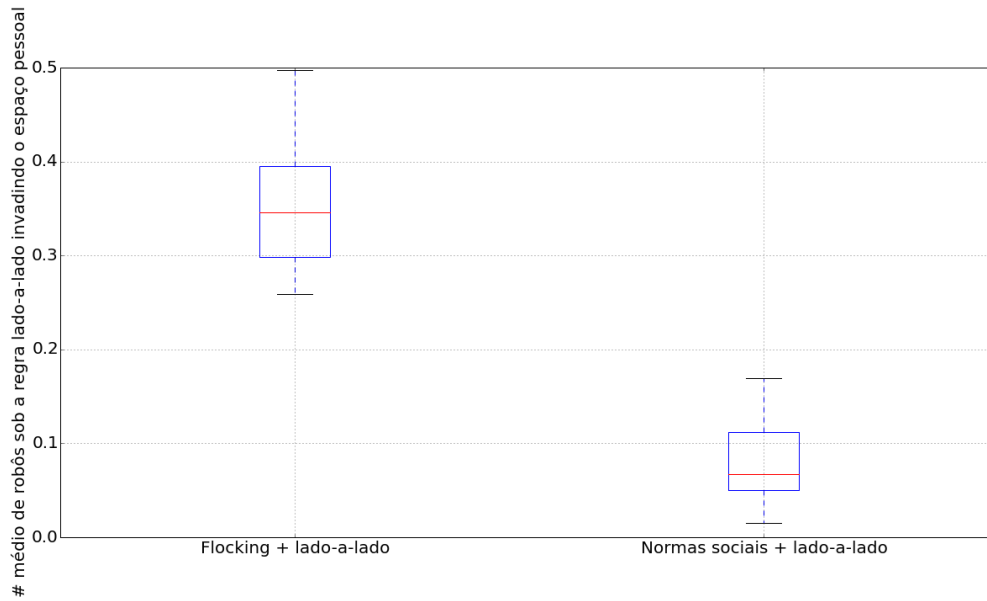


Figura 42 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no quarto cenário de teste na escala micro.

O mesmo padrão de média de deslocamentos angulares encontrado nos cenários anteriores foi mantido no quarto cenário (Figura 43).

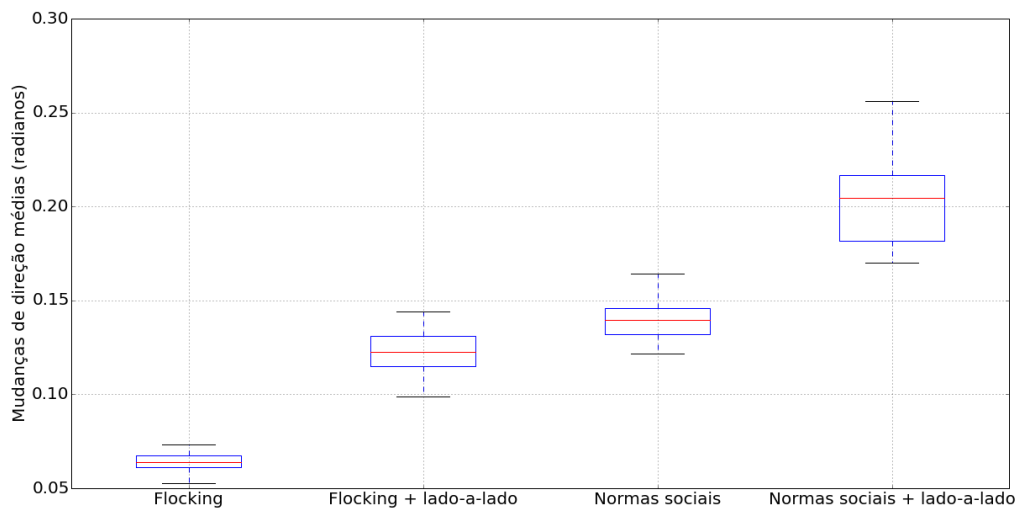


Figura 43 – Média de deslocamentos angulares no quarto cenário de teste na escala micro.

5.2.5 Escala micro: quinto cenário

O quinto cenário é similar ao primeiro cenário (Figura 44), com a diferença crucial de que a pessoa está de frente para os robôs. Este cenário é importante porque a aproximação frontal é uma forma natural de chegada de robôs para abordar uma pessoa.



Figura 44 – O quinto cenário de testes na escala micro.

Olhando a estratégia de normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado, nota-se que os robôs evitam a aproximação diretamente à frente da pessoa (Figura 45).

A Figura 46 mostra as médias das distâncias em função do tempo. As estratégias levaram entre 30 e 40 segundos para atingir a convergência das distâncias. No caso dos experimentos utilizando regras de navegação lado-a-lado, os robôs mais próximos da pessoa convergiram suas distâncias mais rapidamente no caso do *flocking*.

A abordagem frontal da pessoa apresentada pelo quinto cenário apresentou resultados diferentes do demais em relação ao número de robôs ao lado da pessoa (Figura 47). Neste caso, as médias utilizando o *flocking* apresentaram-se similares ao visto no primeiro cenário. Na Figura 48, que representa somente a média de robôs sob a regra lado-a-lado, manteve-se o padrão de maior demora para chegar às posições desejadas e de maior variabilidade das médias no caso das normas sociais.

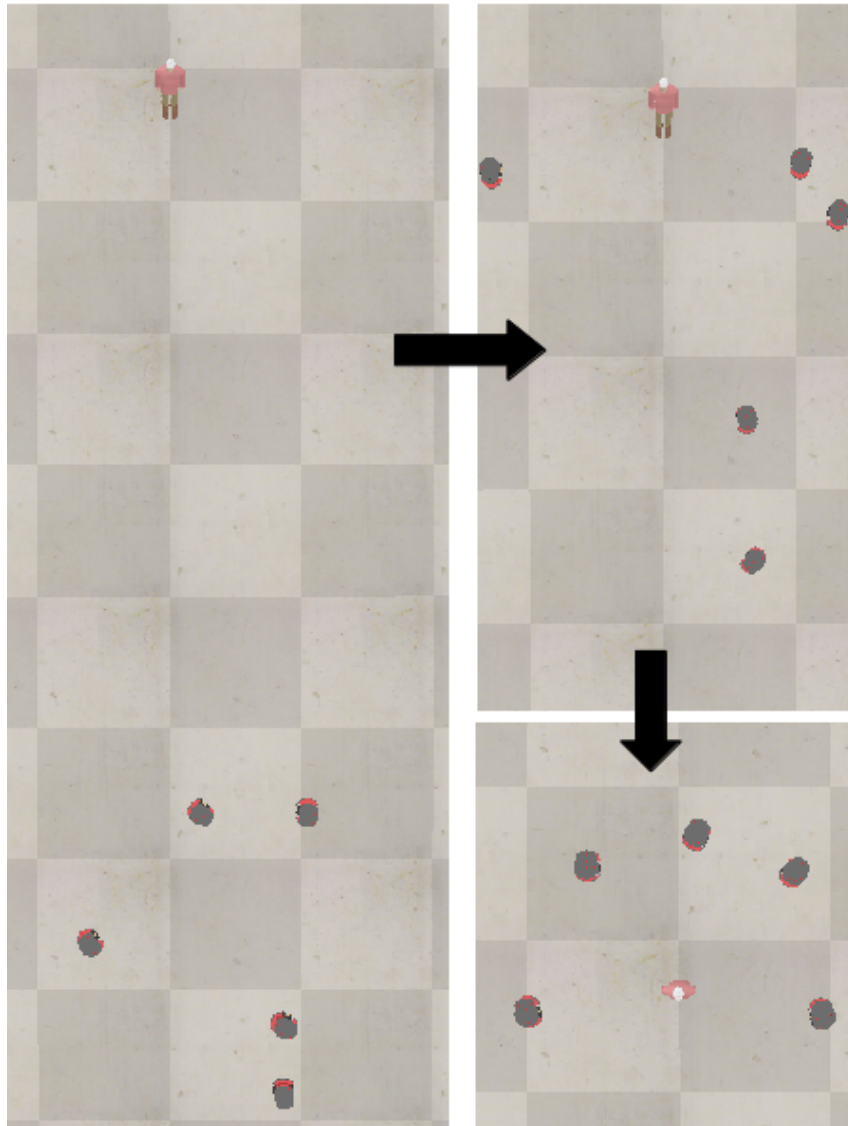


Figura 45 – Etapas de navegação da estratégia que utiliza normas sociais e a regra de navegação lado-a-lado no quinto cenário.

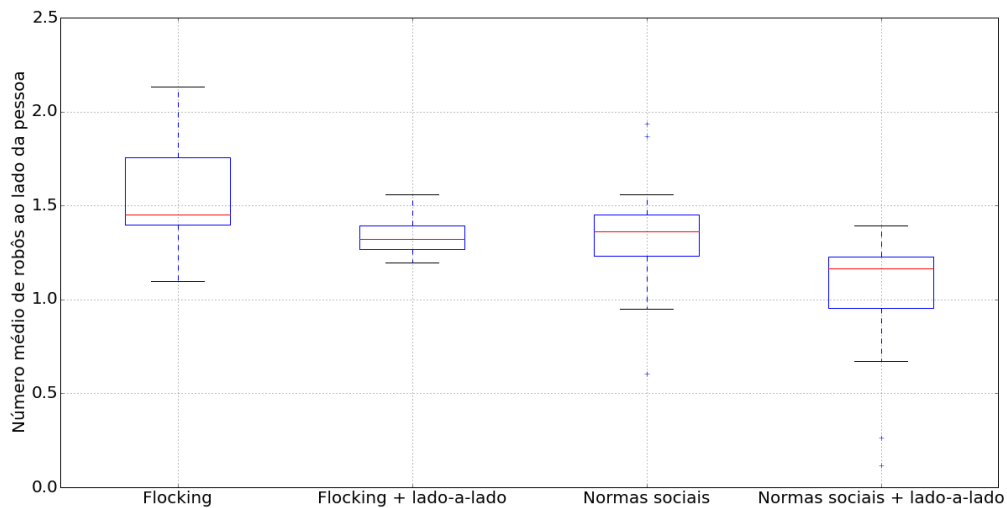


Figura 47 – Número médio de robôs navegando ao lado no quinto cenário de teste na escala micro.

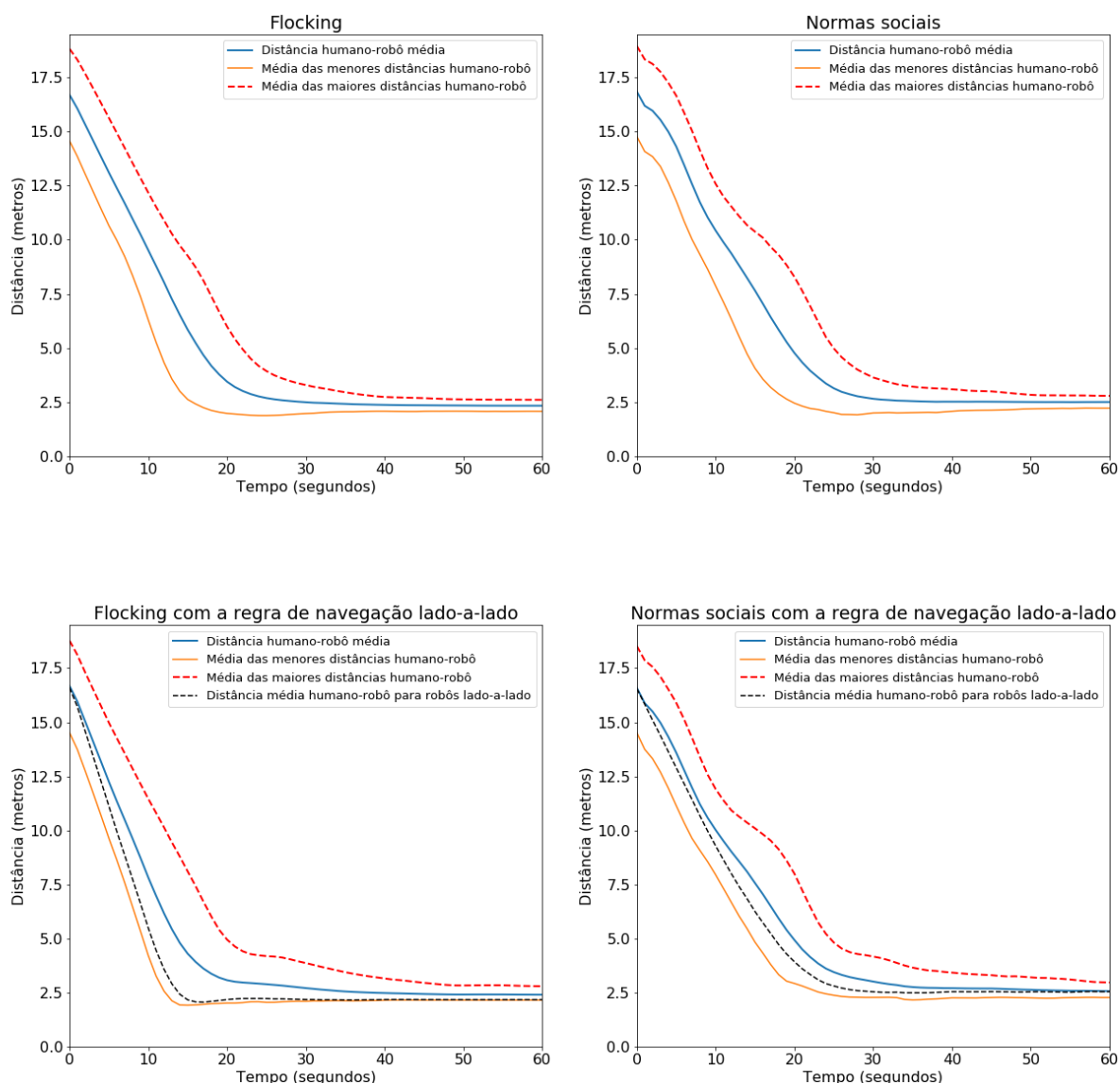


Figura 46 – Resultados das distâncias médias do quinto cenário de teste na escala micro.

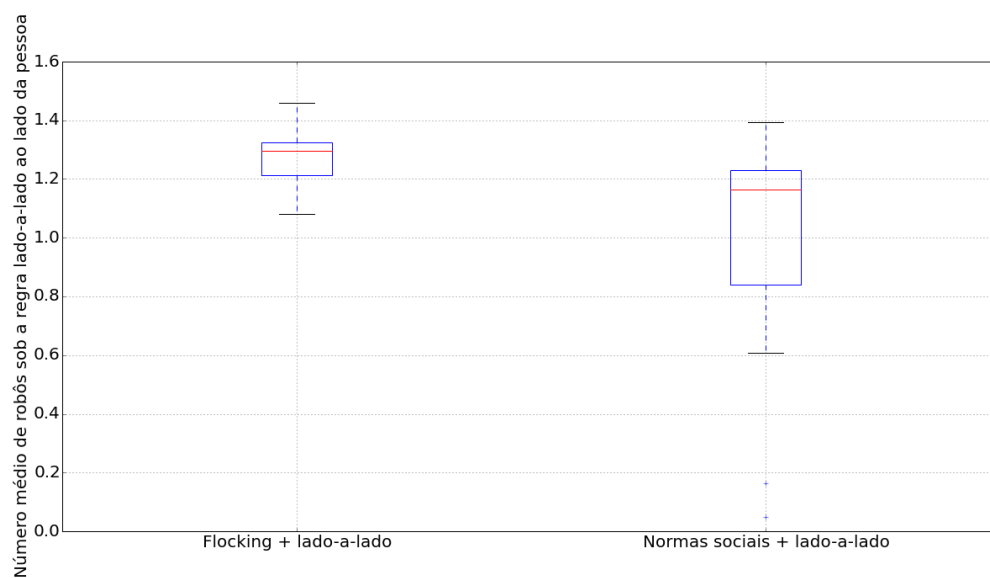


Figura 48 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado no quinto cenário de teste na escala micro.

A Figura 49 apresenta as médias de invasões ao espaço pessoal. O *flocking* sem o uso de regras lado-a-lado apresentou valores não somente consideravelmente mais altos como com alta variação. As normas sociais foram melhor sucedidas, também, neste cenário, chegando a uma mediana igual a zero no caso da adoção de regras de navegação lado-a-lado por dois robôs. Considerando somente os robôs que utilizam a regra lado-a-lado (Figura 50), a mediana do *flocking* foi maior, mas alguns poucos casos utilizando normas sociais apresentaram valores maiores, o que pode ter sido provocado pelas forças repulsivas dos demais robôs durante a aproximação.

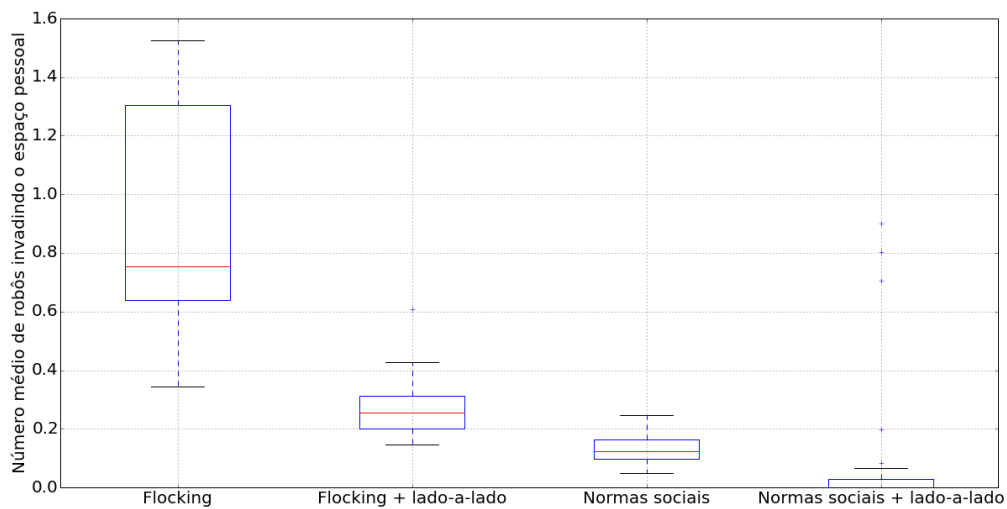


Figura 49 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no quinto cenário de teste na escala micro.

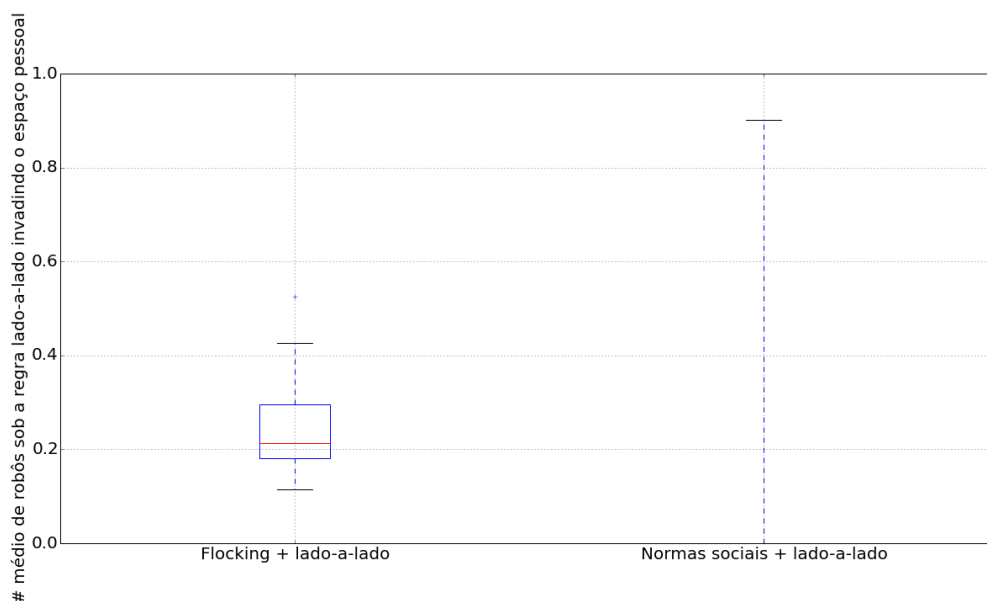


Figura 50 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no quinto cenário de teste na escala micro.

O uso de regras de navegação lado-a-lado não afetou significativamente o número médio de deslocamentos angulares (Figura 51), mas houve mais uma vez valores maiores no caso das normas sociais.

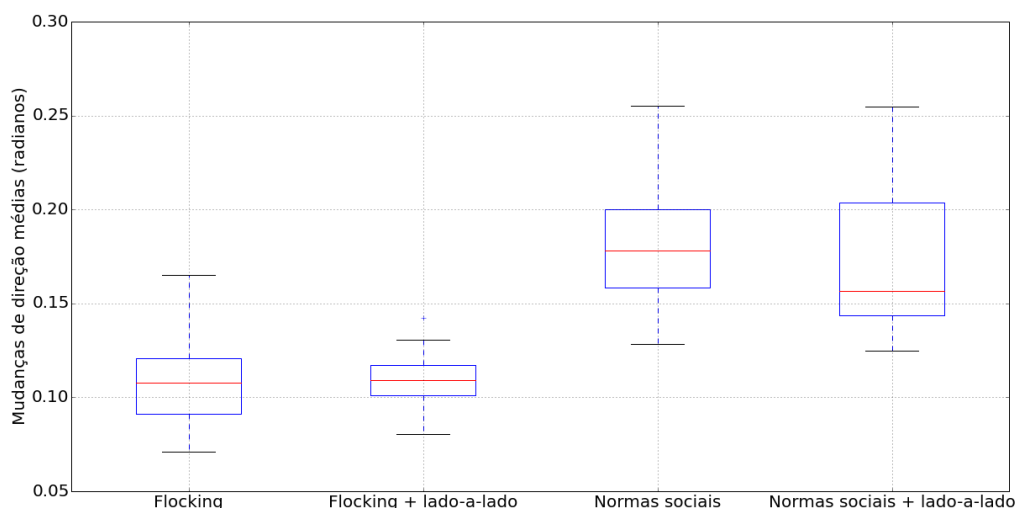


Figura 51 – Média de deslocamentos angulares no quinto cenário de teste na escala micro.

5.3 Avaliações em escala macro

As avaliações em escala macro têm como objetivo analisar, principalmente, a formação dos agentes robóticos quando não há restrição de navegação e quando o número de robôs é grande, mostrando que as estratégias são escaláveis. Estes experimentos foram realizados a partir da biblioteca *PyGame*, da linguagem de programação Python (SHINNERS, 2011); trata-se de uma biblioteca multimídia que utiliza o SDL (*Simple DirectMedia Layer*) para trabalhar com imagens e sons. O ambiente simulado utilizado foi adaptado do trabalho de Oliveira, Batista e Romero (2017).

Os robôs são representados como um ponto em duas dimensões. Cada robô navega modificando sua pose para aquela imediatamente resultante da soma de seus comportamentos em cada iteração; sendo assim, o ângulo de cada robô é desconsiderado nesta etapa. A pessoa também é representada por um ponto bidimensional, mas esta possui um ângulo para representar que a pessoa está olhando em alguma direção.

A Tabela 3 apresenta as constantes adotadas para estes experimentos. Os valores $\sigma_{f,r,s}$ são elevados porque o ambiente de simulação foi construído em uma escala em centímetros.

As Figuras 52 e 53 mostram as estratégias navegando com a pessoa. O círculo grande vermelho representa a pessoa, e sua direção é dada pela posição relativa do círculo azul. Os círculos pequenos verdes são os robôs, enquanto os círculos pequenos vermelhos são robôs sob

Tabela 3 – Constantes utilizadas nos experimentos em escala macro.

Parâmetro/Estratégia	1	2	3	4
c_{att}	5		3	
c_{rep}	0.2			
c_{reph}	-		2	
c_{vis}	1			
σ_f	-		150	
σ_r	-		50	
σ_s	-		50	
G_{curve}	-		0.4	
G_{close}	-		0.8	
D_s	10 cm		-	
D_f	70 cm			
W_x	30 cm	80 cm	30 cm	80 cm
W_y	0			
T_{side}	10 m			
θ_{side}	0.125π			
Max_{speed}	0.6 m/s			
Velocidade linear do humano	0.03 m/s			

a regra de navegação lado-a-lado.



Figura 52 – Imagem dos robôs andando com a pessoa utilizando a estratégia de *flocking* (esquerda) e normas sociais (direita) nos experimentos em escala macro.

5.3.1 Escala macro: primeiro cenário

No primeiro cenário, os robôs são posicionados atrás da pessoa, e ela iniciará parada por três segundos, andará em linha reta por quatro segundos e, por fim, ficar parada por mais três segundos. Os resultados das distâncias médias são mostrados na Figura 54 para cada uma das configurações testadas. A convergência da distância dos robôs que acompanharam lado-a-lado de acordo com a estratégia de normas sociais atingiu a convergência mais rapidamente que seu comportamento equivalente utilizando *flocking*. As distâncias médias mantiveram-se estáveis a partir dos 3 segundos de simulação, mantiveram-se durante a caminhada mostraram leves oscilações na parada posterior.

O número médio de robôs posicionados ao lado da pessoa foi maior utilizando normas sociais (Figura 55). Houve um pequeno aumento no valor médio quando a regra de navegação



Figura 53 – Imagem dos robôs andando com a pessoa utilizando a estratégia de *flocking* com a regra de navegação lado-a-lado (esquerda) e normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado (direita) nos experimentos em escala macro.

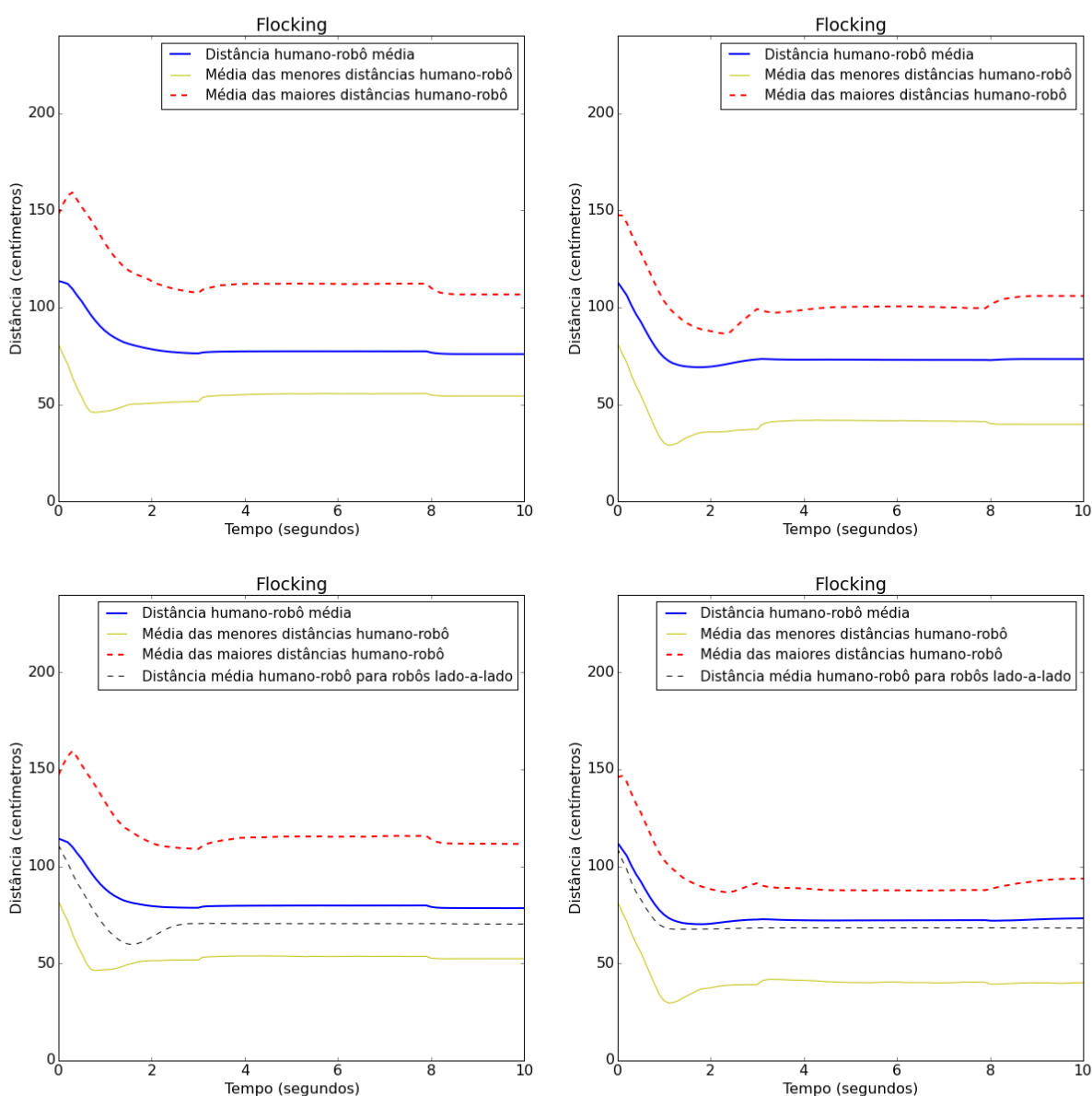


Figura 54 – Resultados das distâncias médias do primeiro cenário de teste na escala macro.

lado-a-lado foi utilizada no caso das normas sociais, mas não no caso do *flocking*. A diferença proporcional é pequena sobretudo pelo grande número de robôs utilizados no experimento.

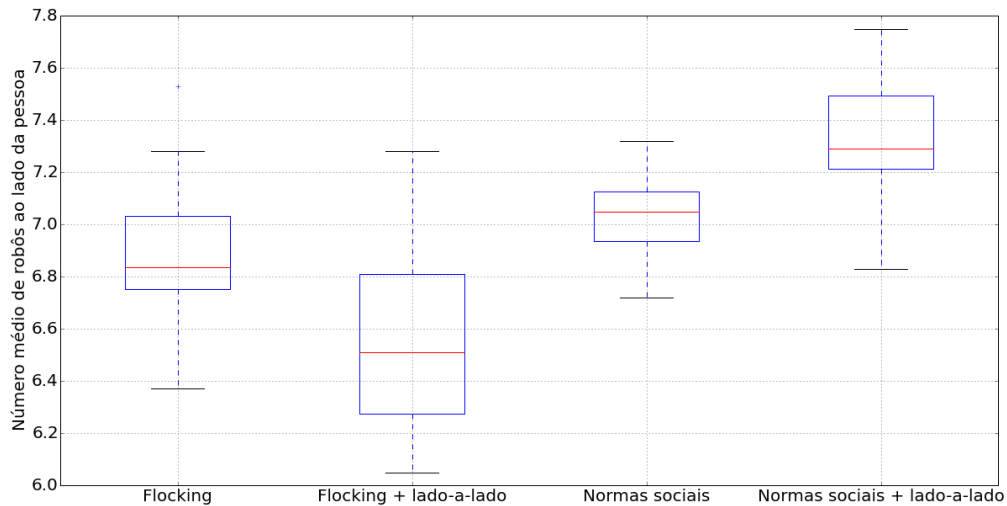


Figura 55 – Número médio de robôs navegando ao lado no primeiro cenário de teste na escala macro.

Considerando apenas os dois robôs que utilizam a regra de navegação lado-a-lado (Figura 56), os valores médios foram levemente maiores utilizando *flocking*, repetindo o que foi observado nos experimentos de escala micro.

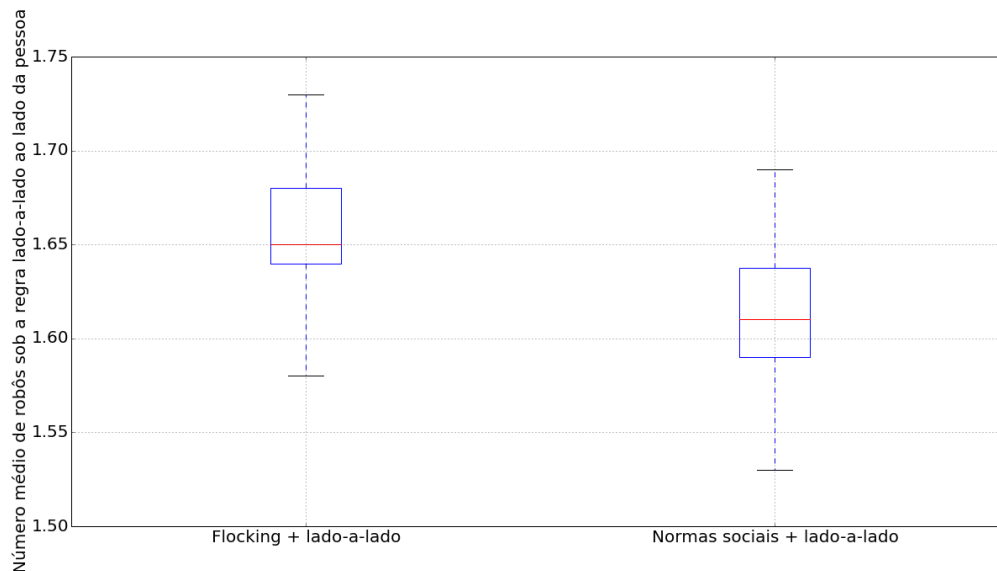


Figura 56 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no primeiro cenário de teste na escala macro.

As médias de invasão do espaço pessoal (Figura 57) indicam poucas invasões utilizando normas sociais, mas medianas iguais a zero nos casos de *flocking*. Quando a regra lado-a-lado do *flocking* é utilizada, não ocorreu nenhuma invasão; apesar da mediana igual a zero, a amplitude

dos valores foi maior e as maiores médias de invasão ocorreram no caso do flocking sem regra de navegação lado-a-lado. Nenhuma invasão de robôs utilizando as regras lado-a-lado ocorreu nestes experimentos.

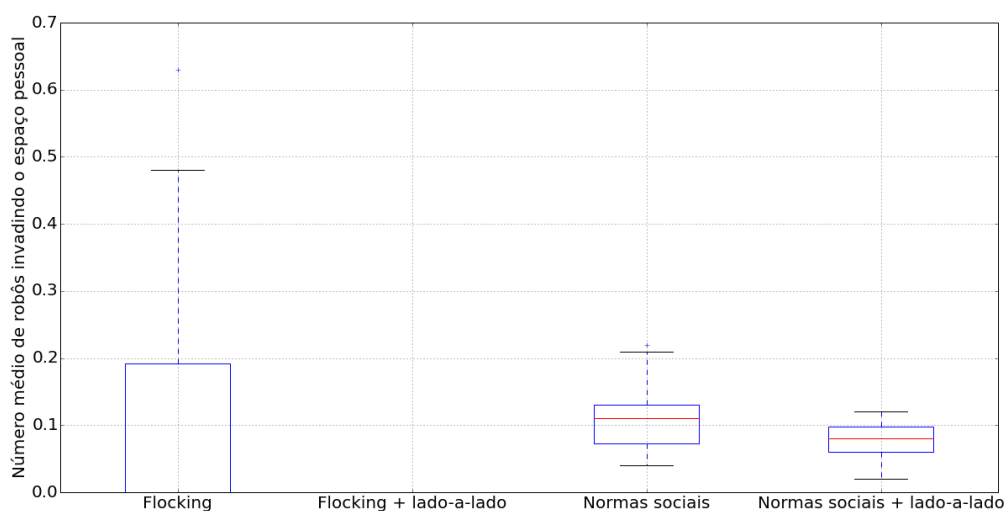


Figura 57 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no primeiro cenário de teste na escala macro.

5.3.2 Escala macro: segundo cenário

No segundo cenário, uma pessoa anda com velocidades linear fixa e angular mudando de acordo com o tempo; a velocidade angular é invertida depois de $t=5$ segundos, retornando à velocidade angular anterior em $t=10$ segundos. O experimento se encerra depois de $t=15$ segundos. As médias das maiores e menores distâncias foram similares (Figura 58).

Uma queda da média das maiores distâncias mais brusca pode ser observada nos primeiros instantes de navegação quando normas sociais são adotadas; a mudança de velocidade angular não afetou significativamente as convergências das menores distâncias e das distâncias médias gerais. A menor distância média e a distância média dos robôs sob a regra lado-a-lado apresentaram uma queda brusca nos instantes iniciais dos experimentos quando o *flocking* utilizou regras de navegação ao lado do indivíduo.

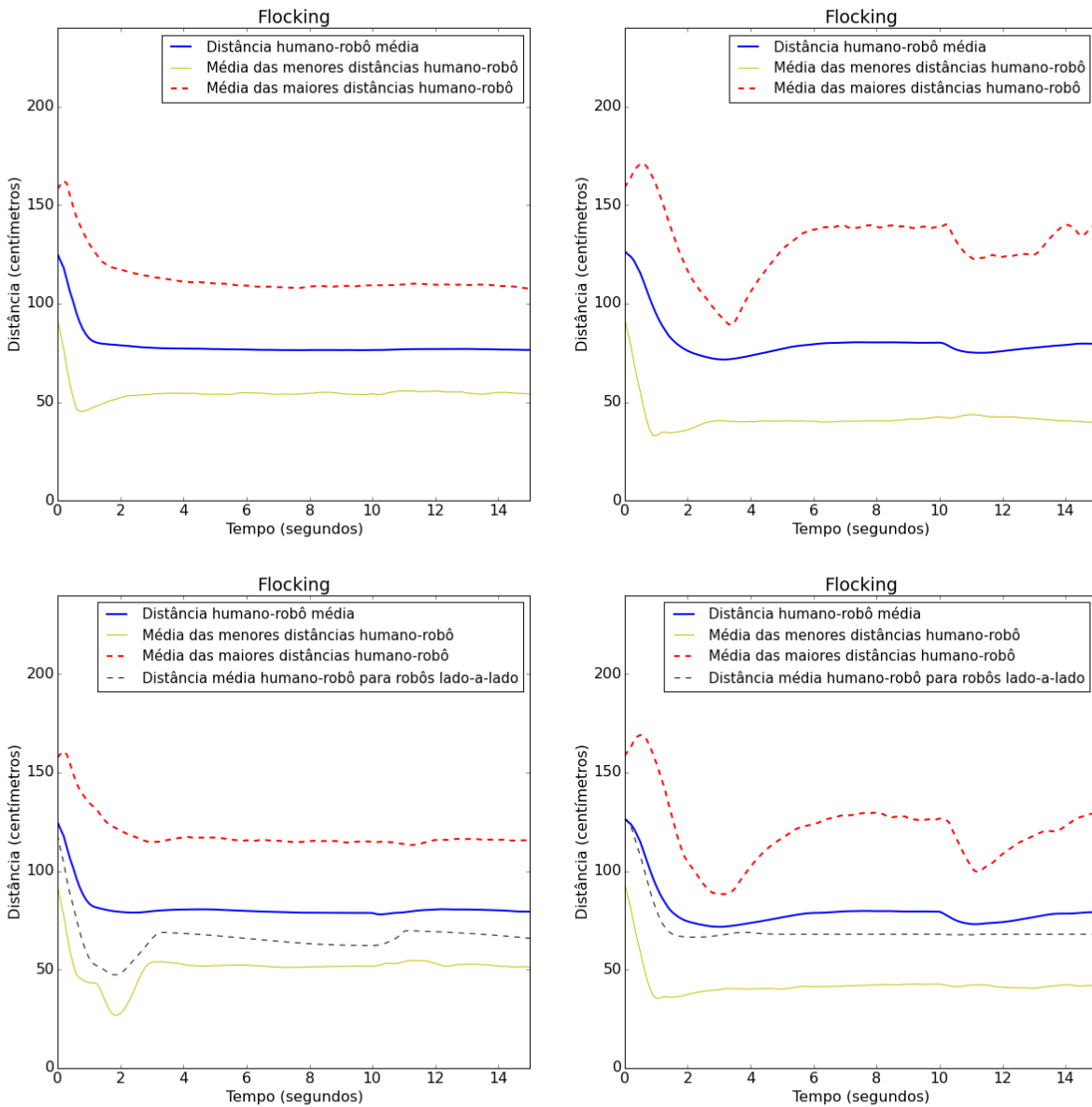


Figura 58 – Resultados das distâncias médias do segundo cenário de teste na escala macro.

Na Figura 59, mostra-se o número médio de robôs ao lado da pessoa. Os resultados indicam melhora nas médias quando o *flocking* foi a estratégia utilizada. As médias de robôs ao lado contando somente com aqueles que seguem a regra de navegação lado-a-lado, mostradas na Figura 60, foram baixas, o que ocorreu porque o robô externo à curva realizada pelo robô não teve velocidade suficiente para acompanhar o deslocamento, um problema apresentado por ambas as estratégias.

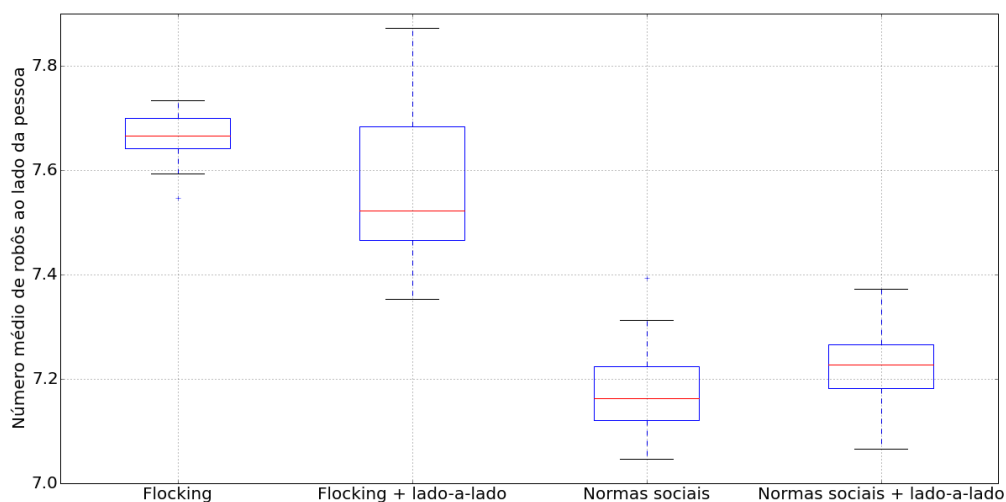


Figura 59 – Número médio de robôs navegando ao lado no segundo cenário de teste na escala macro.

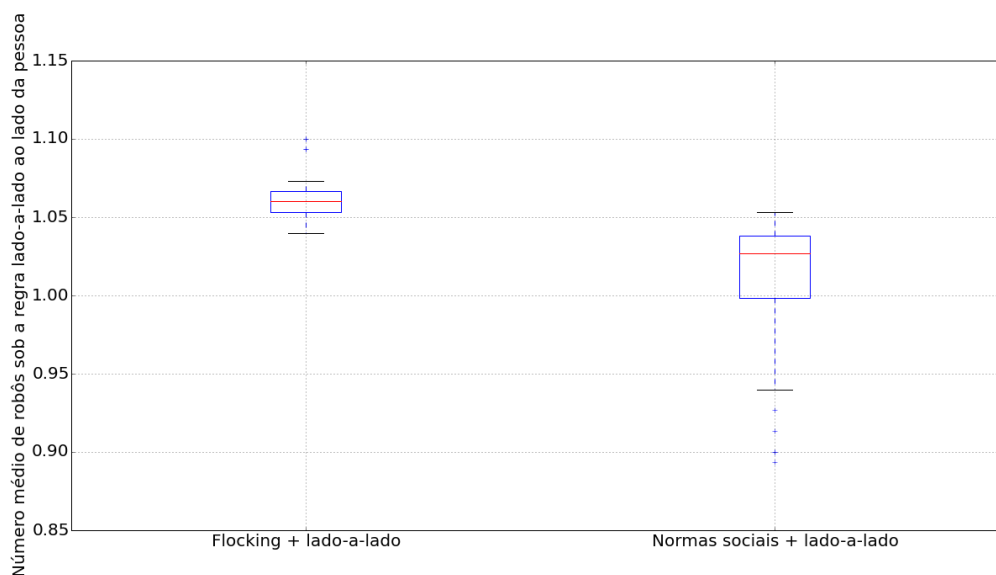


Figura 60 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no segundo cenário de teste na escala macro.

As médias de invasões ao espaço pessoal, apresentadas na Figura 61, foram maiores utilizando o *flocking*, especialmente sem o uso de regras de navegação lado-a-lado. As médias de invasão do *flocking* também foram, em média maiores considerando apenas os robôs sob a regra lado-a-lado (Figura 62), apesar de ambas apresentarem grande variabilidade. Nota-se pelos valores, também, que os robôs seguindo a regra lado-a-lado representaram uma fração pequena do número de invasões total.

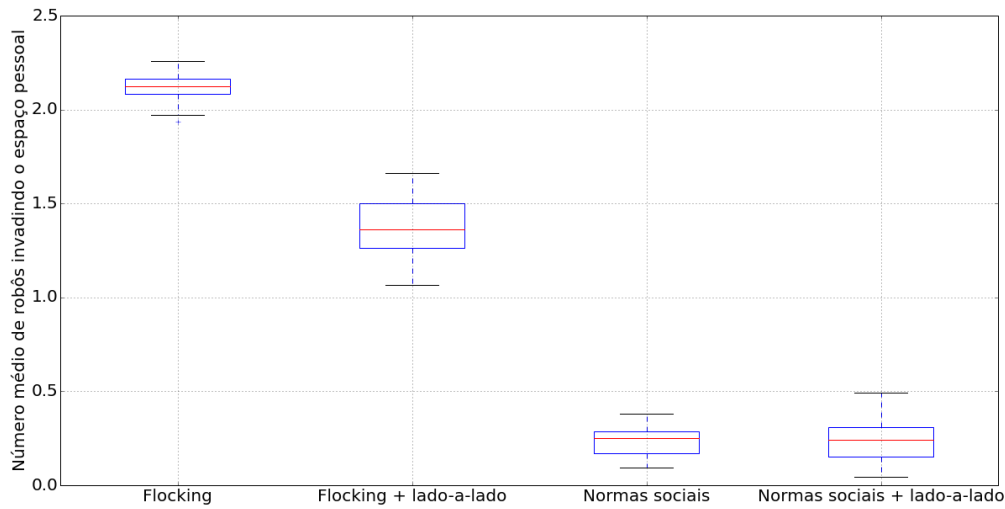


Figura 61 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no segundo cenário de teste na escala macro.

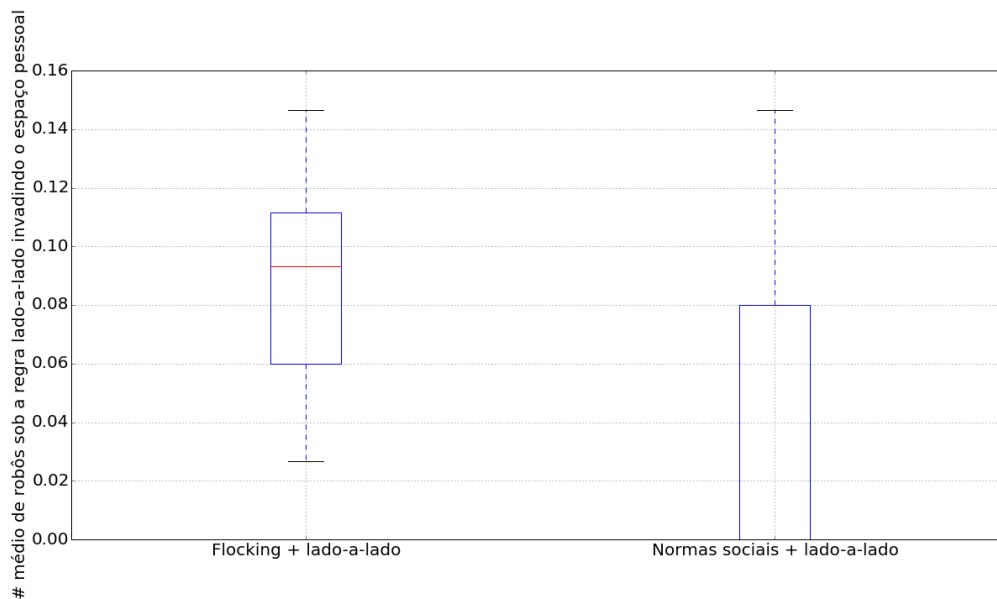


Figura 62 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no segundo cenário de teste na escala macro.

5.3.3 Escala macro: terceiro cenário

O terceiro cenário inicializa os robôs de frente para um indivíduo que anda em frente durante toda a trajetória; próximos de seu caminho, aparecem três pessoas paradas viradas em direção à sua trajetória. Os robôs recebem uma força repulsiva destas pessoas equivalente à aplicada pelo próprio indivíduo, variando de acordo com a estratégia utilizada (repulsão simples no caos do *flocking* e a FGA no caso das normas sociais). O cenário é ilustrado na Figura 63.



Figura 63 – Instante inicial do terceiro cenário de testes na escala macro. O círculo vermelho maior é a pessoa que será acompanhada, os círculos azuis ao lado identificam a direção das pessoas, os demais círculos maiores representam outras pessoas e os pequenos losangos são os robôs.

A Figura 64 apresenta as médias das distâncias em função do tempo. As médias gerais foram mais estáveis utilizando normas sociais. Picos das maiores médias ocorreram no caso das normais sociais no início da simulação, mas estes valores tornaram-se menores que aqueles apresentados pelo *flocking* durante a travessia.

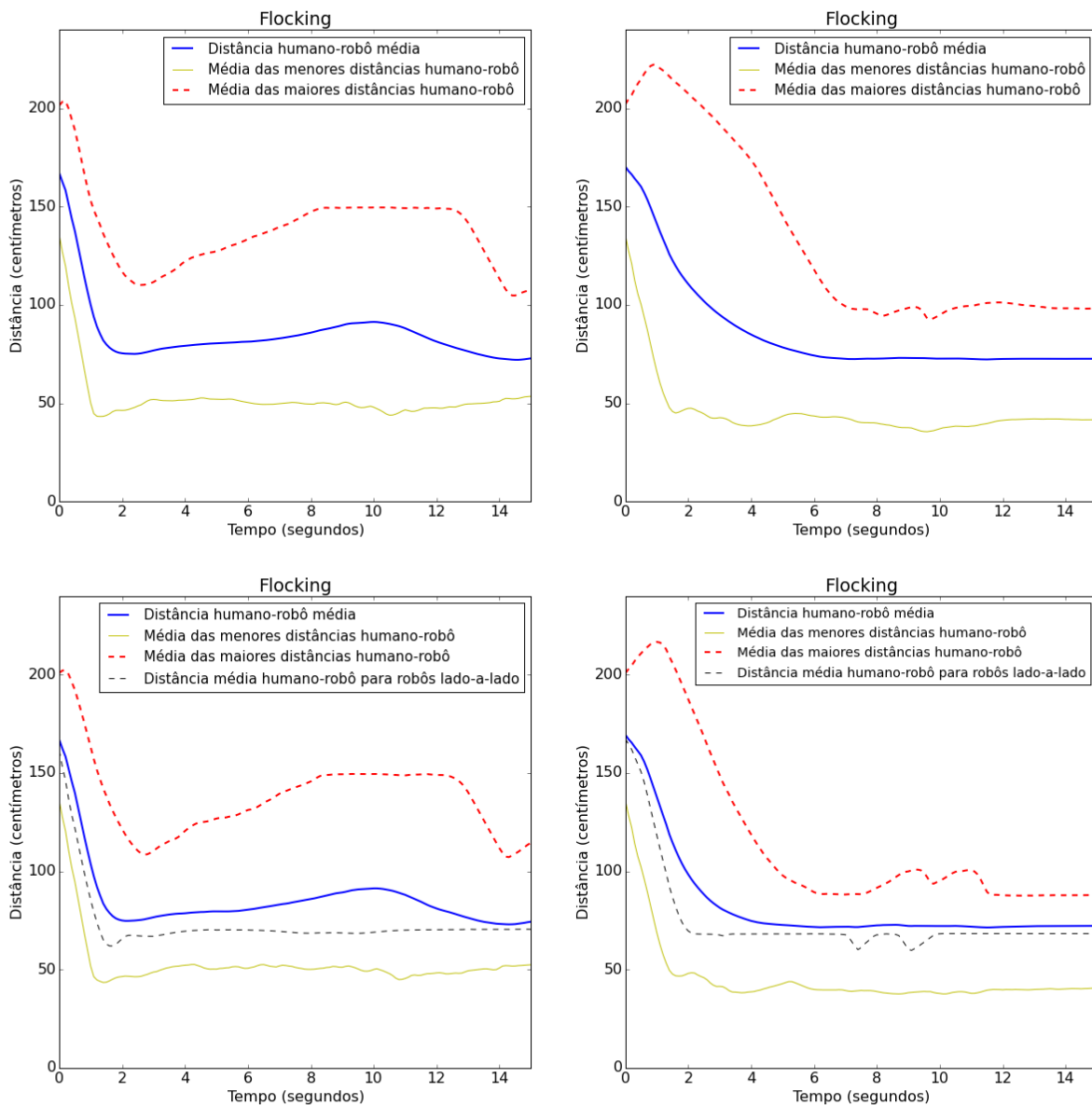


Figura 64 – Resultados das distâncias médias do terceiro cenário de teste na escala macro.

A Figura 65, que apresenta o número médio de robôs que se posicionaram ao lado da pessoa, mostrou que este número foi maior utilizando as normas sociais e as regras de navegação ao lado do indivíduo. Considerando somente os robôs que obedecem a regras de navegação ao lado da pessoa (Figura 66), o resultado foi mais uma vez melhor utilizando *flocking*, com grande amplitude de resultados apresentada pelas normas sociais.

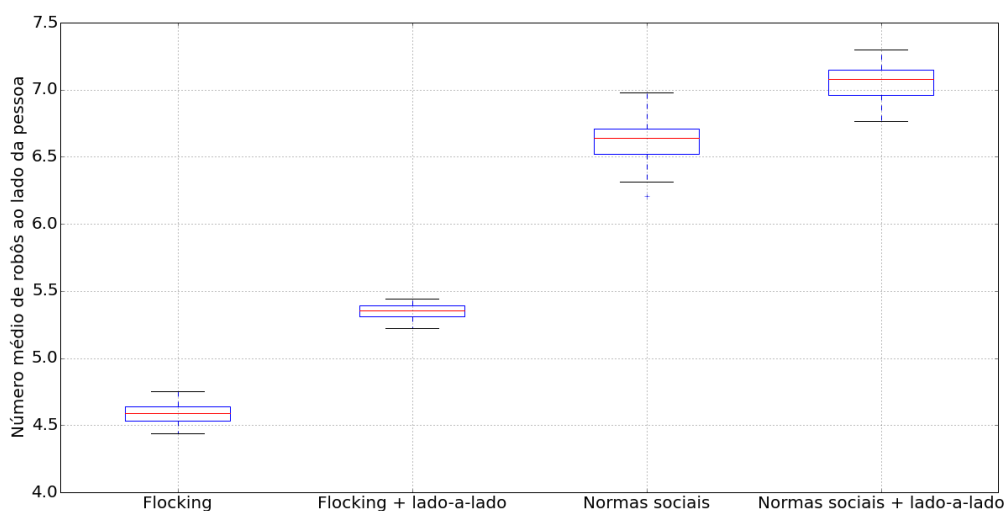


Figura 65 – Número médio de robôs navegando ao lado no terceiro cenário de teste na escala macro.

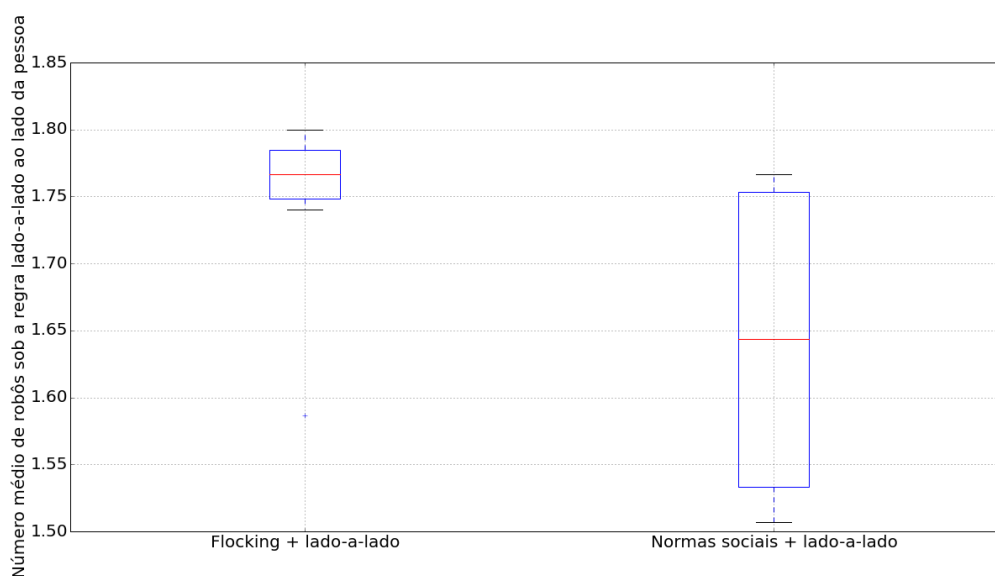


Figura 66 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado navegando ao lado no terceiro cenário de teste na escala macro.

A Figura 67 mostra as médias de invasão ao espaço pessoal realizadas pelos robôs. Foram raras as invasões quando as normas sociais foram utilizadas, e a média de invasões foi consideravelmente grande utilizando o *flocking*, especialmente com a parede virtual mais avançada em relação à pose do indivíduo que é utilizada sem as regras de navegação lado-a-lado. Considerando somente os robôs sobre regra de navegação lado-a-lado, as médias de invasão do *flocking* foram em média baixas e infrequentes utilizando o *flocking* e não ocorreram utilizando normas sociais (Figura 68).

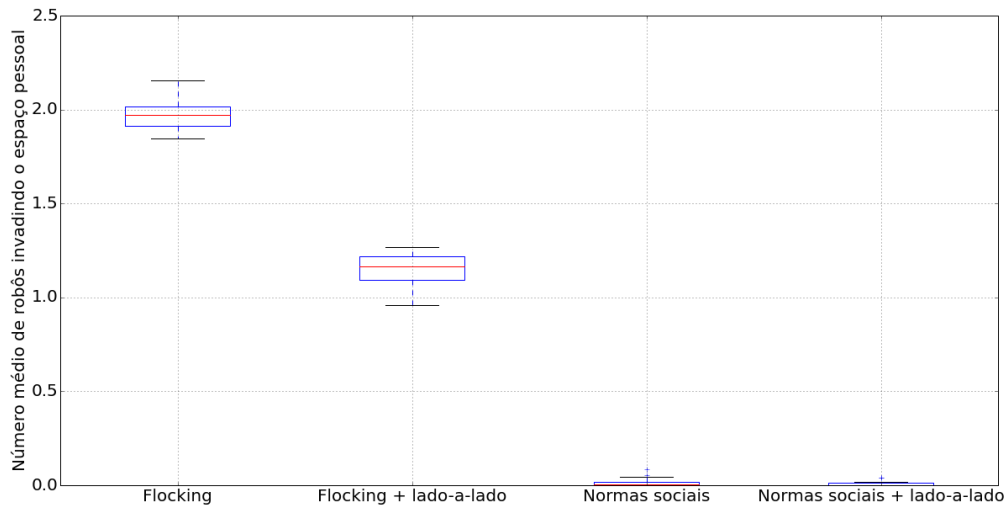


Figura 67 – Número médio de robôs invadindo o espaço pessoal no terceiro cenário de teste na escala macro.

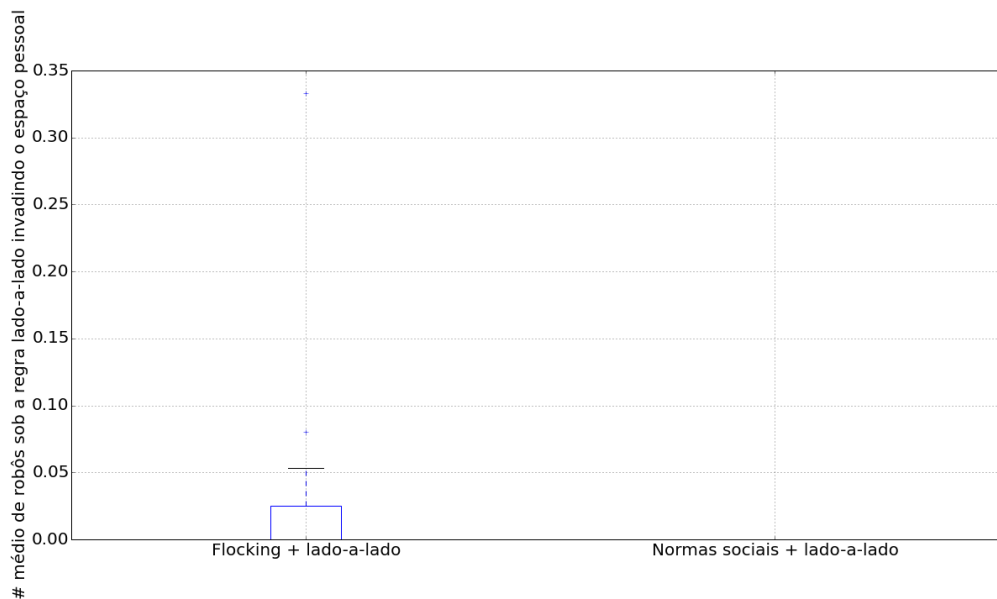


Figura 68 – Número médio de robôs sob a regra lado-a-lado invadindo o espaço pessoal no terceiro cenário de teste na escala macro.

5.3.4 Discussão dos experimentos simulados

Com suas diferenças de performance, todas as estratégias foram capazes de acompanhar o indivíduo nas diferentes trajetórias apresentadas. Considerando as estratégias que utilizam regras de navegação lado-a-lado, de modo geral, o *flocking* apresentou melhores médias de robôs lado-a-lado, o que ocorreu devido à volta que o robô seguidor ao lado precisa realizar nos experimentos com normas sociais, mas também apresentou uma média maior de invasões.

O cuidado com este fator é crucial para evitar aproximações que afetem a percepção da pessoa ou mesmo que impeçam a livre movimentação da mesma. É importante realizar o contraste entre os melhores resultados em evitar invasões de espaço pessoal das normas sociais, que estende-se à análise específica dos robôs sob a regra de navegação lado-a-lado, com o alcance mais rápido das posições desejadas no caso do *flocking*, já que uma potencial percepção negativa deve ocorrer nas dificuldades de ambas as estratégias, mas as invasões do espaço pessoal podem resultar em colisões com a pessoa, que são falhas de maior gravidade. Este contraste foi o fator decisivo pela escolha de uma estratégia utilizando normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado para os experimentos com pessoas reais.

Os resultados também indicam que a estratégia de normas sociais exigiu mais deslocamentos angulares do que o *flocking*, o que sinaliza uma maior fragilidade às limitações de navegação impostas pela direção diferencial. Contudo, não é possível indicar que isto tenha afetado a capacidade de alcance da posição lateral pelos robôs sob a regra de navegação lado-a-lado, visto que os resultados indicaram vantagem do *flocking* neste sentido tanto nos experimentos em escala micro quanto nos em escala macro.

Uma observação interessante nos experimentos em escala macro foi a alteração entre as médias de distâncias quando o indivíduo andava, que ocorreram em maior intensidade utilizando *flocking*, o que indica que as normas sociais apresentaram maior facilidade para manter as distâncias relativamente iguais e evitar extremos entre as distâncias. As normas sociais também apresentaram menores diferenças entre as menores e maiores médias se comparadas ao *flocking*.

O comportamento que melhor ilustra esta diferença é o *flocking* sem a regra de navegação lado-a-lado nos experimentos em escala micro, que nos três experimentos envolvendo a movimentação da pessoa obteve as menores médias de robôs ao lado da pessoa e ao mesmo tempo as menores médias de invasão do espaço pessoal em dois destes três cenários. Isto ocorreu porque as forças do *flocking* fizeram com que os robôs ficassem a maior parte do tempo atrás da pessoa, com uma taxa de alcance ao lado da pessoa menor. Esta diferença não ocorreu nos experimentos de escala micro com a pessoa parada, e também não ocorreu nos experimentos em escala macro; neste caso em particular, no segundo e no terceiro cenário, foi a estratégia com a maior média de invasões ao espaço pessoal.

O segundo e o terceiro experimentos em escala micro apresentaram aumentos das maiores distâncias no meio do percurso. No segundo cenário, ocorreu com as estratégias que utilizaram normas sociais, enquanto no terceiro ocorreu com as estratégias utilizando *flocking*. No caso do segundo cenário, isso pode ter ocorrido pelo constante ajuste provocado pela região da FGA sendo “chacoalhada” pelas viradas constantes, enquanto que no terceiro cenário a ocorrência se deu enquanto o indivíduo atravessava a região com outras pessoas, o que pode ser indicativo de que houve maior dificuldade do *flocking* de ajustar a trajetória aos obstáculos humanos, mesmo com o posicionamento das pessoas sendo na direção da trajetória da pessoa, o que deve ter trazido uma região repulsiva maior no trajeto pelas FGAs.

A menor distância registrada durante os experimentos da escala micro entre a pessoa e os robôs foi de 0.6716 metros, distância insuficiente para a ocorrência de colisões entre estas entidades. A menor distância robô-robô registrada foi de 0.423 metros, que dependendo das circunstâncias pode ser próxima o suficiente para a ocorrência de eventuais colisões, visto que o robô tem 0.455 metros de comprimento; esta distância pode ser alcançada por dois robôs que estejam um do lado do outro sem acontecer colisões, o que significa que, pelos dados coletados, não há garantia de ocorrência ou não de colisões entre os robôs.

A Tabela 4 mostra as médias de aproximações críticas, ou seja, a média de ocorrências em função do tempo de distâncias entre dois robôs menores ou iguais a 0.455 metros. Apresentando a dificuldade do corredor apertado, o terceiro cenário apresentou um número maior de médias, e é possível que a maior exigência de deslocamento angular aos robôs sob a regra de navegação lado-a-lado e normas sociais tenha sido a causa da média significativamente maior da mesma no terceiro cenário.

Tabela 4 – Média de aproximações críticas por cenário e estratégia.

Cenário/Estratégia	1	2	3	4
Cenário 1	0	0	0	0.2666
Cenário 2	0	0.0666	0	0.0666
Cenário 3	0	0.2333	0.8333	2.8333
Cenário 4	0	0	0	0.1333
Cenário 5	0	0	0	0.1333

5.4 Considerações finais

Neste Capítulo, foram apresentados e discutidos os experimentos feitos em ambiente de simulação. As quatro estratégias propostas foram avaliadas e comparadas. A avaliação foi considerada em escala micro e macro. A avaliação do sistema foi realizada considerando critérios objetivos. No Capítulo a seguir, os experimentos com robôs reais são descritos, os quais permitiram avaliar a percepção das pessoas quando estavam sendo acompanhadas por robôs.

EXPERIMENTOS COM ROBÔS REAIS

O objetivo dos experimentos com robôs reais, ao contrário do que foi visado nos testes em simulação, é fazer uma comparação de percepção das pessoas e não uma avaliação de métodos de navegação distintos. Visando evitar que os robôs invadam demasiadamente o espaço pessoal do indivíduo que acompanham, o que poderia acarretar em colisões, foi escolhida a estratégia de normas sociais com regra de navegação lado-a-lado. Devido às restrições de navegação por conta do espaço físico disponível para a realização destes experimentos, o grupo de robôs será menor ($n=3$).

Os testes reais foram feitos utilizando a estrutura de um time de futebol de robôs da categoria *IEEE Small Size League* (SSL), da equipe Warthog Robotics, que é ligada ao Laboratório de Aprendizado de Robôs (LAR) (LANG *et al.*, 2015). Os robôs desta categoria são de forma cilíndrica, com 15 centímetros de altura e 18 centímetros de diâmetro, e tem movimentação omnidirecional através de quatro rodas, ou seja, possui a capacidade de se deslocar em qualquer direção independente de seu ângulo. A Figura 69 mostra como são posicionadas as rodas deste robô para que seja possível se deslocar em qualquer direção.

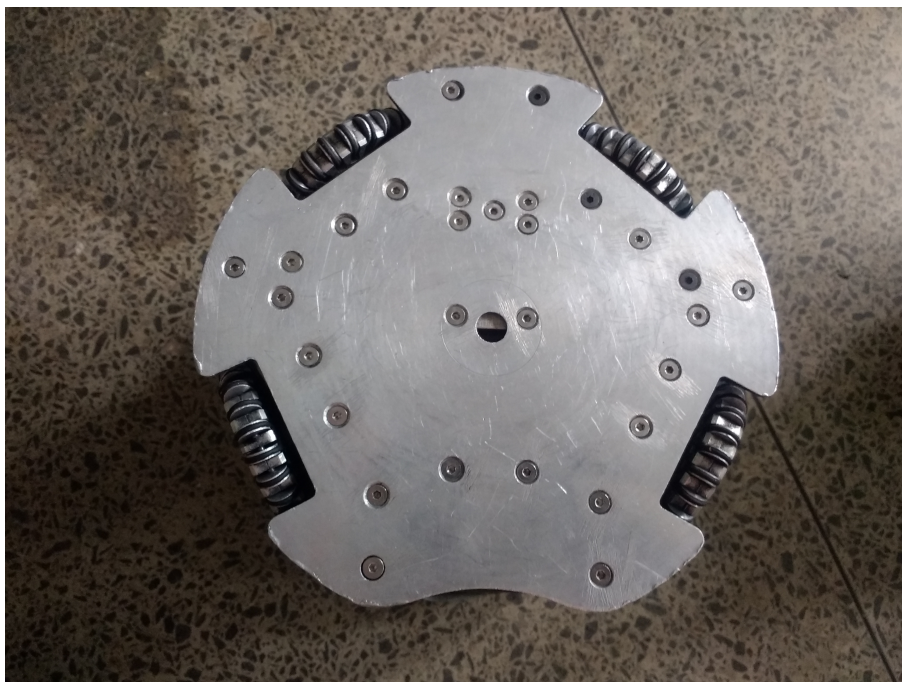


Figura 69 – As rodas do robô omnidirecional da equipe Warthog Robotics.

Os fatores principais pelos quais estes robôs foram escolhidos, além da disponibilidade dos mesmos à pesquisa, são a agilidade exigida por robôs de futebol, a maior liberdade de movimentação trazida pela omnidirecionalidade e a existência de um conjunto de *softwares* e algoritmos para o controle dos mesmos.

6.1 Infraestrutura para os experimentos com robôs reais - software

Para controlar um robô da categoria SSL através dos *softwares* da equipe Warthog Robotics, foi necessário o uso de diversos programas. O envio de comandos da estratégia para os robôs depende dos seguintes *softwares*:

- Um programa central gerenciador dos demais programas (WRBackbone);
- Um programa encarregado de obter as poses dos robôs (WREye, Figura 70) ;
- Um programa que envia as instruções aos robôs (WRStation);
- Um gerenciador de partidas (ssl-refbox);
- A estratégia de controle dos robôs, que recebe as poses dos robôs e retorna velocidades de roda.

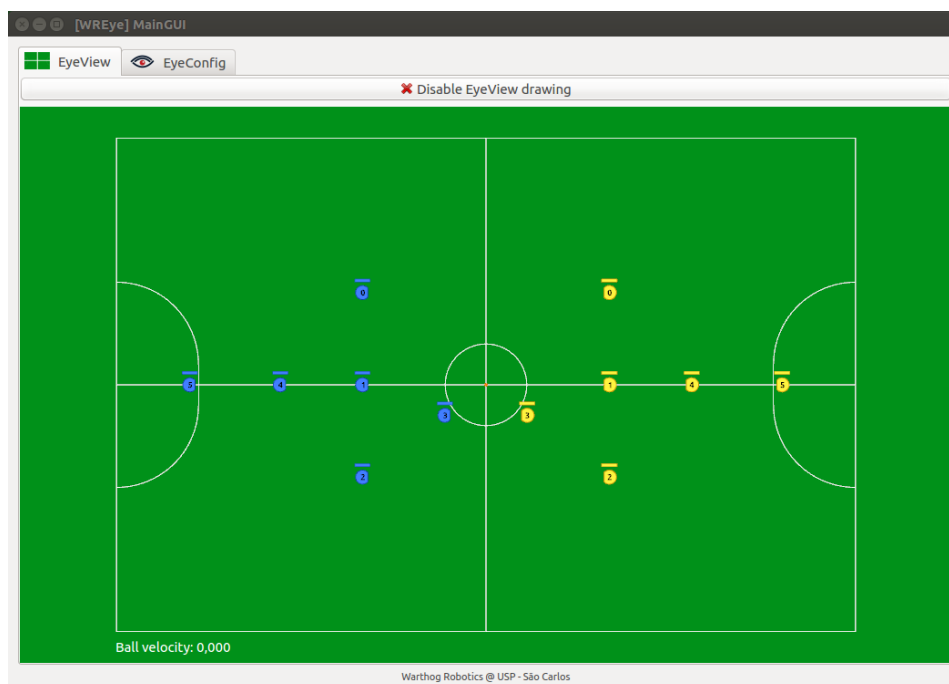


Figura 70 – Visualização da pose dos robôs através do programa WREye.

Inicialmente, pretendia-se utilizar as câmeras RGB utilizadas para identificar a pose dos robôs como ferramenta de localização dos mesmos e do indivíduo; no entanto, notou-se a possibilidade de bloqueio do campo de visão da câmera pela pessoa. Para evitar este problema, optou-se pelo uso do sistema *Vicon Tracker* (VICON, 2018), que identifica marcadores posicionados nos objetos através de quatro câmeras infravermelho e posterior triangulação através de um *software*.

O uso do *Vicon Tracker* exigiu que houvesse alguma maneira do WREye capturar a informação de posição estimada pelo *Vicon Tracker*. Também mostrou-se necessário considerar que o WREye depende da informação de uma câmera ou de um *software* de simulação. A solução encontrada se deu em duas partes: o desenvolvimento de um programa que processasse a informação do *Vicon Tracker*, chamado de WRVicon, e a adaptação do WREye para receber esta informação do WRVicon.

Para manter o funcionamento do WREye sem a câmera, decidiu-se capturar dados de um ambiente simulado, o *grSim* (PARSIAN, 2018), e sobrescrever as poses recebidas deste simulador por aquelas identificadas pelo WRVicon. Isso tornou necessário executar tanto o *grSim* quanto um programa de comunicação com o simulador (WRSimActor). A estratégia recebeu do WREye tanto a pose dos robôs e da pessoa identificados pelo *Vicon Tracker* quanto a pose em ambiente de simulação dos demais robôs. Para fins de conveniência com a estrutura da estratégia de controle dos robôs, foi considerado que a pessoa seria o robô número 3 da equipe azul, enquanto os robôs são pertencentes à equipe amarela.

6.2 Infraestrutura para os experimentos com robôs reais - hardware

Para que os robôs fossem identificados pelo *Vicon Tracker*, foi necessário acoplar nos mesmos três marcadores, configurados em um padrão triangular. Para a identificação da pessoa, um capacete com três marcadores é utilizado. O ambiente é retangular e vazio, tendo apenas a pessoa e o(s) robô(s). Experimentos utilizando mais de um robô foram feitos utilizando três robôs, sendo que dois estão sob a regra de normas sociais utilizando a regra lado-a-lado e o robô restante está suscetível às forças da parede virtual.

Os robôs receberam, também, uma base feita de ácido polilático (PLA) através de impressão 3D de 25 centímetros de altura para aumentar suas dimensões, visto que os robôs são de pequeno porte, deixando o robô com uma altura de 40 centímetros. Esta estrutura consiste em uma base inferior que conecta a estrutura ao robô, três treliças e uma base superior que recebe os marcadores. Esta base foi projetada pela própria equipe Warthog Robotics. Originalmente, a estrutura proposta receberia mais andares para elevar mais a altura do robô; entretanto, observou-se que a colocação de dois andares afetou demasiadamente o centro de gravidade do robô, correndo o risco de tombar durante a navegação. Por esta razão, apenas um andar foi mantido. A Figura 71 mostra uma comparação das alturas do robô com e sem a base.

6.3 Considerações iniciais sobre os experimentos em ambiente real

Um fator inicial a ser considerado foi a escolha da estratégia de navegação. Avaliando o desempenho das estratégias nos cenários simulados e ponderando tanto o quanto os robôs apresentaram dificuldades para navegar nos experimentos de escala micro, com direção diferencial, como a vantagem de se posicionar robôs ao lado da pessoa e considerando especialmente o quarto cenário de testes em escala micro, que envolveu várias curvas fechadas, foi escolhida a estratégia de normas sociais utilizando a regra de navegação lado-a-lado, que teve as menores médias de invasão do espaço pessoal entre as estratégias com a regra de navegação lado-a-lado.

Foi necessário, também, obter permissão de um comitê de ética antes da realização dos experimentos. Foi apresentado a este comitê todo o procedimento e os objetivos do experimento. O pedido ao comitê de ética foi submetido no dia 14 de Agosto de 2018 e aprovado no dia 23 de Outubro de 2018. Um pedido anterior a este foi feito em 2017, mas dificuldades em identificar o problema apontado no sistema Plataforma Brasil atrasaram o processo deste outro pedido.

Explicou-se que o único risco que um participante poderia correr é o de tropeçar em um dos robôs e cair. Por medidas adicionais de segurança, foi requisitado aos participantes do experimento que os mesmos entrassem no ambiente apenas com calçados fechados, como tênis e



Figura 71 – Robô utilizados no experimento sem a base adicional (esquerda) e com a base impressa (direita).

botas.

O procedimento de preparar os formulários e de ligar, desligar e reposicionar os robôs foi realizado por um assistente, de modo a permitir ao responsável se concentrar na sua função de introduzir as pessoas ao experimento, instruir a pessoa sobre que movimentos realizar e iniciar os algoritmos de navegação.

6.3.1 Etapas dos experimentos

A realização do experimento deu-se em seis etapas. Primeiramente, foi entregue um Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) que explica o experimento e potenciais riscos ao participante. Foram assinadas pelo responsável pelo experimento e pelo participante duas cópias do documento, com uma ficando sob poder do participante e a outra pertencendo ao responsável.

A segunda etapa foi a de introdução ao experimento. A pessoa foi introduzida à sala onde foram realizados os experimentos, que é dividida em duas partes: uma metade com os computadores que se comunicam com o Vicon Tracker, o computador que executava os *softwares*

de controle necessários e um computador que apresenta questionários, e outra metade que tem o campo, os três robôs posicionados em uma reta, as câmeras infravermelho e o capacete. O indivíduo, no caso, entra na sala pela primeira metade e é conduzido até a segunda metade da sala. A Figura 72 mostra a configuração inicial do participante e dos três robôs no ambiente. Os robôs ficam dispostos em linha reta perpendicular à direção da pessoa, estando esta reta a 180 cm da pessoa. Cada robô fica inicialmente a 80 cm de seus vizinhos. Com uma observação do comportamento dos robôs em relação à pessoa em repouso, os robôs sob a regra de navegação lado-a-lado visaram ficar a 90 cm da pessoa; o robô que não estava sob esta regra manteve uma distância de 120 cm.



Figura 72 – Configuração inicial dos experimentos com pessoas.

Já no ambiente dos robôs, a pessoa coloca o capacete e se posiciona de acordo com uma marcação no campo, olhando em direção aos robôs. São, então, passadas instruções ao indivíduo. Ressalta-se que a tarefa dos robôs é acompanhar a pessoa, e pede-se para evitar olhar para os lados sem virar o corpo todo, pois a identificação através do capacete levaria o robô a pensar que a pessoa virou o corpo todo, afetando seu comportamento. Foram, então, explicados os comandos que seriam dados:

- Passos para trás ou para frente;
- Passos laterais para a esquerda ou para a direita;
- Girar 90 graus para a esquerda ou para a direita;
- Girar 180 graus.

Após a explicação, o instrutor retirou-se do ambiente dos robôs, indo para a primeira parte da sala, e pediu ao assistente para ligar um ou três robôs, dependendo de qual experimento seria realizado primeiro. A ordem de execução destes experimentos foi definida revezando entre ambos os cenários sem o conhecimento do participante. Inicia-se, então, a terceira parte, que é a navegação com o robô (ou os robôs). A sequência de instruções foi criada e testada previamente para garantir que os robôs não saíssem do alcance das câmeras infravermelho. As instruções são as seguintes, nesta ordem:

- Um passo à frente;
- Um passo para trás;
- Giro de 90 graus para a esquerda;
- Andar de lado para a direita;
- Andar de lado para a esquerda;
- Giro de 90 graus para a direita;
- Um passo à frente;
- Giro de 180 graus;
- Giro em direção ao instrutor.

Foi dado um tempo aproximado de cinco segundos entre cada instrução, de modo a dar tempo aos robôs de se organizarem caso fosse necessário a um dos robôs de navegação ao lado dar a volta por trás da pessoa. Tomou-se cuidado para não esperar tempo demais, pois a situação de o robô não conseguir dar a volta a tempo também é considerada uma característica a ser avaliada pelos participantes em suas percepções.

Após a realização das instruções, o instrutor para o *software* de navegação e pede ao indivíduo para que retire o capacete, deixando-o no chão, e em seguida o conduz até a primeira metade da sala para a quarta parte do experimento, que é o preenchimento do formulário; explica-se o conteúdo do formulário na subseção seguinte. O formulário foi feito através do Google Forms, permitindo que o preenchimento seja salvo em nuvem.

Uma observação necessária é que os questionários para experimentação com um robô foram apresentados no singular, enquanto os utilizados para os experimentos com múltiplos robôs tiveram os itens apresentados no plural. Isto foi feito para evitar o enviesamento das avaliações.

A quinta e a sexta partes do experimento consistem na repetição da terceira e quarta partes com a configuração de robôs restante (um ou três robôs). Após a conclusão da sexta parte, o indivíduo retira-se da sala para a entrada de um novo participante.

Um vídeo demonstrando o experimento com um único robô pode ser visto no link <<https://www.youtube.com/watch?v=cf1rDIh8Rik>>; o mesmo experimento utilizando três robôs é mostrado no link <<https://www.youtube.com/watch?v=Gqi8YPPDIXs>>.

6.4 Critérios de avaliação e hipóteses

Para os critérios qualitativos, foi considerado um questionário composto de cinco itens do tipo Likert de cinco pontos (discordo fortemente, discordo, neutro, concordo, concordo fortemente) e de perguntas diversas. As afirmações elaboradas foram as seguintes:

1. A distância do(s) robô(s) em relação a mim foi adequada;
2. O(s) robô(s) restringe(m) meus movimentos;
3. O(s) robô(s) é(são) confiável(confiáveis);
4. O(s) robô(s) cumpriram bem sua tarefa;
5. O(s) robô(s) me seguiram o tempo todo;
6. O(s) robô(s) paravam junto comigo quando eu parava;
7. Eu me senti confortável interagindo com o(s) robô(s).

O processo de construção de afirmações considerou tanto aspectos de percepção de conforto quanto de percepção de eficiência. Pelo número de perguntas não ser particularmente grande e pelas diferentes características extraídas de cada pergunta, optou-se por não combinar itens em escalas Likert, o que significa que os dados foram interpretados como ordinais (JOSHI *et al.*, 2015). As afirmações 3, 4 e 7 avaliam percepções gerais dos robôs, enquanto as afirmações 1, 2, 5 e 6 avaliam propriedades mais específicas.

Constam também do questionário as seguintes perguntas:

- Idade;
- Gênero;
- Experiência prévia com robôs (cinco níveis de resposta, indo de nenhuma familiaridade à grande familiaridade).

As principais hipóteses investigadas são a existência de correlação entre qualquer uma das características avaliadas nos itens Likert e o número de robôs. A hipótese nula, em cada caso, é de que não há influência do número de robôs nas percepções relacionadas das pessoas. Também foram levantadas como hipóteses as correlações entre cada item Likert e o grau de

Tabela 5 – P-valores das correlações em avaliação.

Afirmção	P-valor do número de robôs	P-valor do grau de experiência
1	0.7656	0.4619
2	0.0549	0.2484
3	0.3405	0.2373
4	0.5297	0.5253
5	0.7728	0.4397
6	0.1048	0.0297
7	0.4922	0.1832

experiência com robôs; o encontro de uma correlação levou a uma investigação posterior para avaliar se houve impacto do número de robôs utilizados nesta correlação. As análises consideram significância para $p < 0.05$.

Considerando a análise estatística, dado que as informações dos itens Likert são de escala ordinal e que cada pessoa fez tanto o experimento com um robô quanto com três robôs, configurando os testes como pareados, foi realizado o teste de Wilcoxon para as hipóteses de correlação dos itens Likert com o número de robôs.

Para as hipóteses de correlação entre cada item Likert e o grau de experiência das pessoas, que também é um dado ordinal de cinco pontos, foi escolhido o teste coeficiente Tau de Kendall, que é uma opção não-paramétrica para avaliar a correlação entre dois atributos.

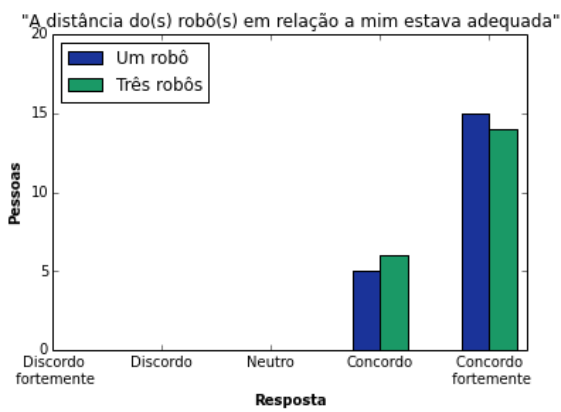
6.5 Resultados

Os dados obtidos nos formulários vieram de uma população de 20 pessoas, de idade entre 20 e 31 anos, sendo 18 homens e 2 mulheres. A distribuição do grau de experiência foi relativamente ampla, com uma maior frequência A Tabela 5 apresenta o p-valor de cada hipótese.

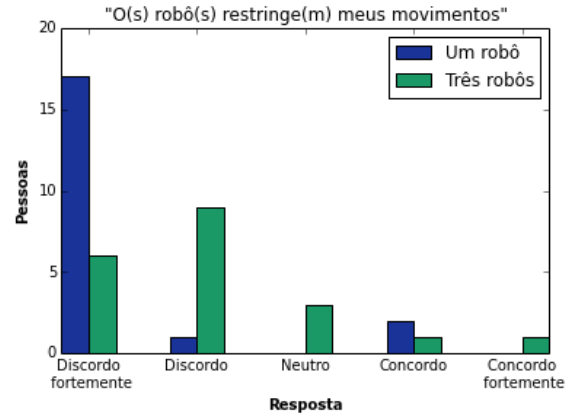
Ao contrário do esperado, não foi possível descartar a hipótese nula para nenhuma das correlações entre as afirmações avaliadoras de desempenho e o número de robôs utilizados. É importante considerar, entretanto, que há uma tendência à significância na correlação entre a segunda afirmação e o número de robôs utilizados, cujo p-valor ficou próximo de 0.05. Esta proximidade da significância também deve ser discutida porque o p-valor quando utilizado o teste t de Student, que é frequentemente usado para avaliar escalas Likert, apresentou um p-valor inferior a 0.05.

A Figuras 73 mostra a comparação das respostas a cada item Likert, discernindo entre um e três robôs. Nota-se que a avaliação feita pelos participantes sobre a navegação foi, em âmbito geral, positiva.

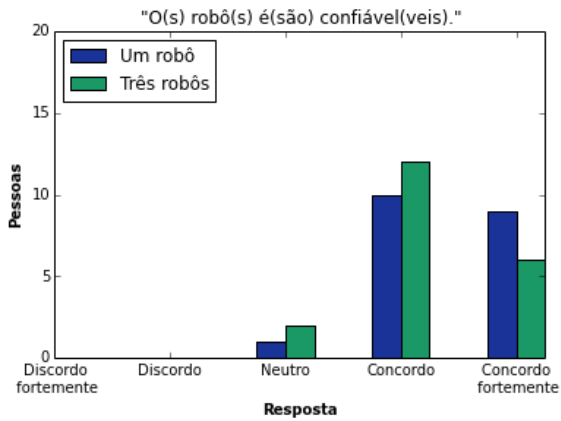
Considerando a correlação das afirmações com o grau de experiência, foi possível descartar a hipótese nula na sexta afirmação, que é sobre a percepção de o robô parar juntamente



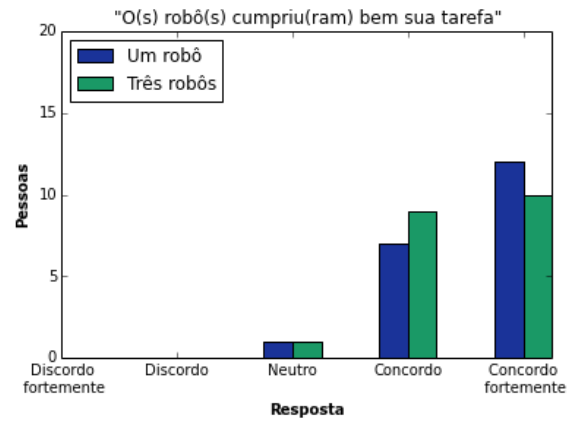
(a) Respostas à primeira afirmação.



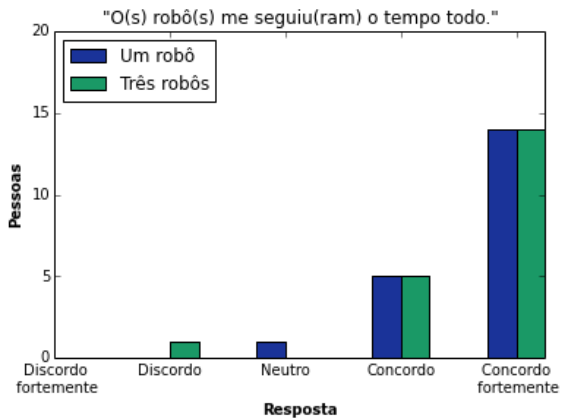
(b) Respostas à segunda afirmação.



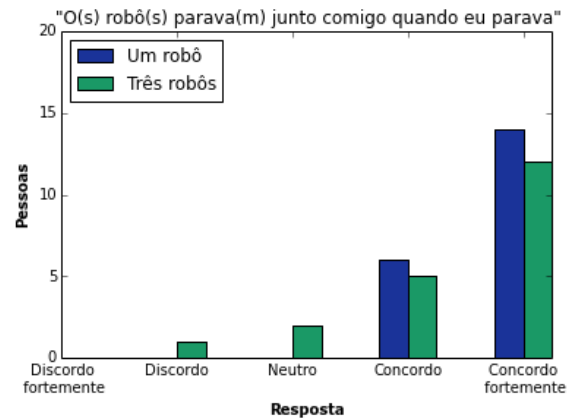
(c) Respostas à terceira afirmação.



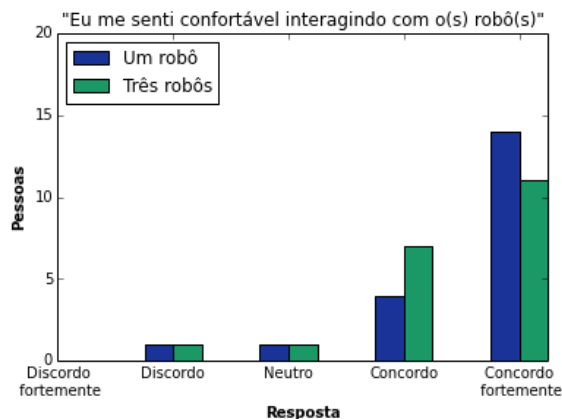
(d) Respostas à quarta afirmação.



(e) Respostas à quinta afirmação.



(f) Respostas à sexta afirmação.



(g) Respostas à sétima afirmação.

Figura 73 – Respostas às sete afirmações, separadas pelo número de robôs.

A única observação realizada em relação à navegação com um único robô foi positiva: “Com apenas um robô fica melhor a percepção e acompanhamento do mesmo”.

6.6 Discussão dos experimentos com robôs reais

De modo geral, os robôs foram bem-sucedidos em acompanhar pessoas, independentemente do número de robôs, se considerado como critério o questionário. O número de robôs maior não chegou a afetar esta percepção significativamente. Um destaque deve ser dado, entretanto, à segunda afirmação, cujo p-valor na correlação com o número de robôs sugere uma tendência à significância, que talvez fosse atingida com um número maior de experimentos.

Os comentários abertos de aspectos negativos da navegação com os robôs, porém, foram todos relacionados aos testes utilizando uma equipe de robôs. Estas observações foram relacionadas à aproximação excessiva de algum dos robôs à pessoa e à impossibilidade de enxergar todos os robôs o tempo todo. Destas, a segunda é consequência direta do comportamento de parede virtual, que envia o robô que não está sob a regra de navegação lado-a-lado a instrução de ir para trás da pessoa. É possível que tenha ocorrido algum viés por parte das pessoas de avaliar positivamente para “agradar” o pesquisador, o que é possível em uma avaliação subjetiva.

A única correlação que atingiu significância estatística, a da sexta afirmação com o grau de experiência dos participantes, deu-se, provavelmente, com a inexperiência com o que seriam os comportamentos e estados do robô, dificultando a percepção do que seria o momento adequado para o robô parar; é interessante observar que isso independeu do uso de um grupo de robôs, que durante os experimentos resultou em algumas situações em que a pessoa está parada e um dos robôs sob a regra de navegação lado-a-lado tenha que dar a volta por trás.

A análise dos experimentos com robôs reais teve algumas limitações. Dentre elas, destaca-se a falta de espaço para locomoção no ambiente, que exigiu um *script* de navegação de trajetórias bastante curtas e que evitassem que os robôs saíssem do alcance das câmeras infravermelho. Também é importante observar que os robôs não tinham características típicas de um robô social, como feições humanas e gestos, e que são de pequeno porte. É possível que robôs de maior altura e com características visuais humanas alterassem o resultado da percepção humana.

6.7 Considerações finais

Neste Capítulo, foram apresentados os experimentos realizados com robôs reais, incluindo resultados e discussão. No próximo Capítulo, serão apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi estudado o problema da navegação socialmente aceitável apresentando quatro estratégias. Elas foram capazes de acompanhar, em ambiente de simulação, um indivíduo em trajetórias diversas, cada uma apresentando sua devida vantagem em algumas características. Duas destas estratégias foram construídas a partir de princípios de *flocking* e duas utilizaram a Função Gaussiana Assimétrica para gerenciar espaços, sendo que duas estratégias foram construídas inserindo uma política de navegação ao lado do indivíduo, que permitiu a dois robôs decidirem qual deles ficará de que lado da pessoa por conta própria. Elas foram denominadas por *flocking*, *flocking* com uma regra de navegação lado-a-lado, normas sociais e normas sociais com uma regra de navegação lado-a-lado.

A avaliação das estratégias de navegação foi feita tanto considerando métricas de navegação típicas como médias de distâncias e deslocamentos angulares quanto observando propriedades já apontadas na literatura como interessantes para robôs que acompanham pessoas. Mais especificamente, evitar a invasão do espaço pessoal e a manutenção de robôs ao lado da pessoa, compartilhando de um foco de atenção e estimulando a interação.

Experimentos para validar as estratégias propostas foram feitos em nível de simulação e utilizando robôs reais. Os experimentos simulados foram realizados em escala micro e macro. Cinco cenários foram construídos para os experimentos em escala micro, enquanto que para a escala macro foram utilizados três cenários. Para os experimentos reais, foi necessário a montagem de um cenário real, constituído por um conjunto de câmeras infra-vermelho, por três robôs de pequeno porte omnidirecionais e o software de controle desses robôs. Foi necessário também a inserção de uma estrutura sobre esses robôs para que ficassem mais altos e maior visibilidade para as pessoas.

Em nível de simulação, foi observado que todas as estratégias foram capazes de acompanhar o indivíduo, independentemente do número de robôs e das trajetórias realizadas. Mostrou-se que a estratégia de *flocking* com a regra de navegação lado-a-lado tem uma velocidade de conver-

gência mais rápida dos robôs que procuram o lado da pessoa que a equivalente utilizando normas sociais. Mas há, em compensação, um aumento no número de invasões do espaço pessoal, motivo pelo qual a estratégia de normas sociais com a regra de navegação lado-a-lado foi escolhida para a realização dos experimentos em robôs reais.

Considerando os experimentos com robôs reais, foi realizada uma avaliação da percepção das pessoas, analisando a diferença quando um robô e quando três robôs eram utilizados. O experimento deu-se pela realização de um conjunto de movimentos realizados por uma pessoa, que os robôs acompanharam. Um questionário de itens Likert foi utilizado para esta avaliação. Quando aplicada uma das estratégias propostas à navegação com pessoas reais, isto é, com a regra de acompanhamento de normas sociais utilizando a política de navegação lado-a-lado, ela mostrou-se bem aceita pelos participantes, tanto considerando um quanto com três robôs. Apesar de não terem sido identificadas diferenças estatisticamente significativas de percepção, houve uma tendência à significância na correlação entre o número de robôs e a afirmação relacionada à sensação de restrição de movimentos, característica que este trabalho recomenda atenção especial para investigações futuras.

Além disso, as observações feitas pelos participantes apontaram como fatores relevantes o risco de colisão da pessoa com o robô e a capacidade de enxergar todos os robôs ao mesmo tempo, o que também é algo a ser considerado para novas pesquisas.

Em relação a trabalhos futuros, existe muito o que ser investigado no tópico de navegação socialmente aceitável de uma equipe de robôs, incluindo o teste com diferentes robôs, com variações de altura e de aparência. Também é de interesse investigar formas dos robôs serem capazes de identificar a pessoa que deve seguir sem a ajuda de um sistema centralizado que lhes forneçam esta informação. Também há espaço para estudos para melhorar os métodos de navegação elaborados, inserindo características como previsão de pose, seleção de robôs para navegação lado-a-lado e navegação com grupos de pessoas. Outro tema pertinente é investigar como a navegação conjunta da equipe de robôs pode ajudar a cooperação para trabalhos conjuntos em que pessoas passem comandos para os robôs e vice-versa.

7.1 Trabalhos decorrentes do período como doutorando

Durante o período de escrita da tese, o aluno teve três trabalhos relacionados à sua pesquisa aprovados em conferências.

- BATISTA, M. R. ; ROMERO, R. A. F. ; MACHARET, D. G. . A Study on the Effect of Human Proxemics Rules in Human Following by a Robot Team. In: SBR-LARS 2017, 2017, Curitiba-PR. Proceedings of LARS/SBR 2017. Palo Alto - CA: IEEE, 2017.
- OLIVEIRA, TARCISIO L. ; BATISTA, MURILLO R. ; Romero, Roseli A. F. . Analysis of human-swarm interaction through potential field manipulation. In: 2017 Latin Ameri-

can Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), 2017, Curitiba. 2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), 2017.

- SOUZA, A. ; BATISTA, M. R. ; RAAD, R. ; ROMERO, R. A. F. . Coordinate Multi-robotic System for Image Taking and Visualization via Photogrammetry. In: SBR-LARS 2017, 2017, Curitiba-PR. Proceedings of LARS/SBR 2017. Palo Alto - CA: IEEE, 2017.

Um artigo foi recentemente submetido a um periódico: ROMERO, R. A. F. ; MACHARET, D. G., "Socially Acceptable Navigation of People with Multi-robot Teams", submetido ao JINT - Journal of Intelligent Systems and Robotics.

Outros trabalhos não diretamente relacionados também foram publicados durante o período desta tese:

- TOZADORE, D. C. ; BATISTA, M. R. ; PINTO, A. H. M. ; RANIERI, C. M. ; ROMERO, R. A. F. . Tablets and Humanoid Robots as Engaging Platforms for Teaching Languages. In: SBR-LARS 2017, 2017, Curitiba-PR. Proceedings of LARS/SBR 2017. Palo Alto - CA: IEEE, 2017.
- BATISTA, MURILLO REHDER ; PINTO, ADAM HENRIQUE MOREIRA ; Romero, Roseli Aparecida Francelin . Addressing Escorting by Behavior Combining Using Multiple Differential Drive Robots. In: 2015 12th Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2015 3rd Brazilian Symposium on Robotics (LARSSBR), 2015, Uberlândia. 2015 12th Latin American Robotics Symposium and 2015 3rd Brazilian Symposium on Robotics (LARS-SBR). p. 187-191.

7.2 Declaração sobre auxílios

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ-SANTOS, V.; PARDO, X. M.; IGLESIAS, R.; CANEDO-RODRIGUEZ, A.; REGUEIRO, C. V. Feature analysis for human recognition and discrimination: Application to a person-following behaviour in a mobile robot. **Robotics and autonomous systems**, v. 60, n. 8, p. 1021–1036, 2012. Citado na página 30.
- AMRAII, S. A.; CHAKRABORTY, N.; LEWIS, M. Studying Direct and Indirect Human Influence on Consensus in Swarms. In: **AAAI Fall Symposium: Human Control of Bioinspired Swarms**. [S.l.: s.n.], 2012. Citado nas páginas 34 e 42.
- ANTONELLI, G.; ARRICHIELLO, F.; CHIAVERINI, S. The Entrapment/Escorting Mission. **IEEE Robotics and Automation Magazine**, v. 15, n. 1, p. 22–29, 2008. Citado na página 33.
- ARAI, M.; SATO, Y.; SUZUKI, R.; KOBAYASHI, Y.; KUNO, Y.; MIYAZAWA, S.; FUKUSHIMA, M.; YAMAZAKI, K.; YAMAZAKI, A. Robotic wheelchair moving with multiple companions. In: **IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 513–518. Citado nas páginas 37 e 50.
- AYANIAN, N.; SPIELBERG, A.; ARBESFELD, M.; STRAUSS, J.; RUS, D. Controlling a team of robots with a single input. In: **Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1755–1762. Citado na página 22.
- BASHYAL, S.; VENAYAGAMOORTHY, G. K. Human swarm interaction for radiation source search and localization. In: **IEEE Swarm Intelligence Symposium**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–8. Citado na página 34.
- BATISTA, M. R. **Rede neural hierárquica para aprendizado de enxames de robôs em tempo real**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2014. Citado na página 21.
- CACACE, J.; FINZI, A.; LIPPIELLO, V. A mixed-initiative control system for an Aerial Service Vehicle supported by force feedback. In: IEEE. **Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on**. [S.l.], 2014. p. 1230–1235. Citado nas páginas 22 e 42.
- CHEN, W.; ZHANG, T.; ZOU, Y. Mobile robot path planning based on social interaction space in social environment. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 15, n. 3, p. 1729881418776183, 2018. Citado na página 31.
- CHOI, B.; MERIÇLI, C.; BISWAS, J.; VELOSO, M. Fast human detection for indoor mobile robots using depth images. In: **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1108–1113. Citado na página 29.
- CONNOLLY, C. I.; GRUPEN, R. A. The applications of harmonic functions to robotics. **Journal of Robotic Systems**, v. 10, n. 7, p. 931–946, 1993. Citado na página 52.
- COSTA, M. Interpersonal distances in group walking. **Journal of Nonverbal Behavior**, v. 34, n. 1, p. 15–26, 2010. Citado na página 50.

- DAS, J.; MAUGHAN, T.; MCCANN, M.; GODIN, M.; REILLY, T. O.; MESSIÉ, M.; BAHR, F.; GOMES, K.; PY, F.; BELLINGHAM, J. G. *et al.* Towards mixed-initiative, multi-robot field experiments: Design, deployment, and lessons learned. In: **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 3132–3139. Citado na página 42.
- DRAGAN, A. D.; BAUMAN, S.; FORLIZZI, J.; SRINIVASA, S. S. Effects of Robot Motion on Human-Robot Collaboration. In: **Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 51–58. Citado na página 26.
- FARIA, G. **Uma Arquitetura de controle inteligente para múltiplos robôs**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006. Citado nas páginas 13, 51 e 52.
- FRAUNE, M. R.; KAWAKAMI, S.; SABANOVIC, S.; SILVA, P. R. S. D.; OKADA, M. Three's company, or a crowd?: The effects of robot number and behavior on hri in japan and the usa. In: **Robotics: Science and Systems**. [S.l.: s.n.], 2015. Citado nas páginas 37 e 39.
- GARRELL, A.; SANFELIU, A. Cooperative social robots to accompany groups of people. **The International Journal of Robotics Research**, v. 31, n. 13, p. 1675–1701, 2012. Citado nas páginas 22, 37 e 39.
- GOCKLEY, R.; FORLIZZI, J.; SIMMONS, R. Natural person-following behavior for social robots. In: **Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 17–24. Citado na página 31.
- GOMBOLAY, M.; SHAH, A. Appraisal of statistical practices in hri vis-à-vis the t-test for likert items/scales. In: **Proceedings of the AAAI fall symposium on artificial intelligence for human-robot interaction (AIHRI)**. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 44.
- GOODRICH, M. A.; SCHULTZ, A. C. Human-robot interaction: a survey. **Foundations and trends in human-computer interaction**, v. 1, n. 3, p. 203–275, 2007. Citado na página 41.
- GOUAILLIER, D.; HUGEL, V.; BLAZEVIC, P.; KILNER, C.; MONCEAUX, J. O.; LAFOURCADE, P.; MARNIER, B.; SERRE, J.; MAISONNIER, B. Mechatronic design of nao humanoid. In: **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 769–774. Citado na página 21.
- HALL, E. T. *The hidden dimension*. Doubleday & Co, 1966. Citado nas páginas 26, 44 e 45.
- HALL, E. T.; BIRDWHISTELL, R. L.; BOCK, B.; BOHANNAN, P.; JR, A. R. D.; DURBIN, M.; EDMONSON, M. S.; FISCHER, J.; HYMES, D.; KIMBALL, S. T. *et al.* Proxemics [and comments and replies]. **Current anthropology**, p. 83–108, 1968. Citado na página 30.
- HASNAIN, S. K.; MOSTAFAOUI, G.; GAUSSIÉ, P. A synchrony-based perspective for partner selection and attentional mechanism in human-robot interaction. **Paladyn, Journal of Behavioral Robotics**, v. 3, n. 3, p. 156–171, 2012. Citado na página 25.
- HAYDUK, L. A. The shape of personal space: An experimental investigation. **Canadian Journal of Behavioural Science/Revue canadienne des sciences du comportement**, v. 13, n. 1, p. 87, 1981. Citado na página 45.
- HELBING, D.; MOLNAR, P. Social force model for pedestrian dynamics. **Physical review E**, v. 51, n. 5, p. 4282, 1995. Citado na página 46.

- HOSHINO, F.; MORIOKA, K. Human following robot based on control of particle distribution with integrated range sensors. In: **IEEE/SICE International Symposium on System Integration**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 212–217. Citado na página 31.
- HOUWELINGEN-SNIPPE, J. van; VROON, J.; ENGLEBIENNE, G.; HASELAGER, P. Blame my telepresence robot: joint effect of proxemics and attribution on interpersonal attraction. In: **Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2017 26th IEEE International Symposium on**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 162–168. Citado na página 28.
- HU, J.-S.; WANG, J.-J.; HO, D. M. Design of Sensing System and Anticipative Behavior for Human Following of Mobile Robots. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 4, p. 1916–1927, 2014. Citado nas páginas 22 e 57.
- JONES, J. L. Robots at the tipping point: the road to irobot roomba. **Robotics & Automation Magazine, IEEE**, v. 13, n. 1, p. 76–78, 2006. Citado na página 21.
- JOSHI, A.; KALE, S.; CHANDEL, S.; PAL, D. Likert scale: Explored and explained. **British Journal of Applied Science & Technology**, v. 7, n. 4, p. 396, 2015. Citado nas páginas 43, 44 e 112.
- KANDA, T.; GLAS, D. F.; SHIOMI, M.; HAGITA, N. Abstracting people's trajectories for social robots to proactively approach customers. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 25, n. 6, p. 1382–1396, 2009. Citado na página 28.
- KATO, J.; SAKAMOTO, D.; INAMI, M.; IGARASHI, T. Multi-touch interface for controlling multiple mobile robots. In: **CHI'09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 3443–3448. Citado na página 35.
- KENDON, A. Spacing and orientation in co-present interaction. In: **Development of Multi-modal Interfaces: Active Listening and Synchrony**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–15. Citado nas páginas 13, 48, 49 e 50.
- KIM, Y.; MUTLU, B. How social distance shapes human–robot interaction. **International Journal of Human-Computer Studies**, v. 72, n. 12, p. 783–795, 2014. Citado na página 27.
- KIRBY, R. **Social Robot Navigation**. Tese (Doutorado) — Robotics Institute, Carnegie Mellon University, May 2010. Citado nas páginas 13, 46 e 47.
- KITAZAWA, K.; FUJIYAMA, T. Pedestrian vision and collision avoidance behavior: Investigation of the information process space of pedestrians using an eye tracker. In: **Pedestrian and evacuation dynamics 2008**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 95–108. Citado na página 46.
- KOREN, Y.; BORENSTEIN, J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. In: **Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 1991. p. 1398–1404. Citado nas páginas 13, 52, 53 e 56.
- KRUSE, T.; PANDEY, A. K.; ALAMI, R.; KIRSCH, A. Human-aware robot navigation: A survey. **Robotics and Autonomous Systems**, Elsevier, v. 61, n. 12, p. 1726–1743, 2013. Citado na página 26.
- KUDERER, M.; BURGARD, W. An approach to socially compliant leader following for mobile robots. In: **Social Robotics**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 239–248. Citado nas páginas 31 e 39.

- LANG, R. G.; BERNARDO, A. M.; OLIVEIRA, G. C. de; MENEZES, H. B.; RAMOS, L. C.; ROQUE, L. G.; SILVA, I. N. da; ROMERO, R. A. Description of the Warthog Robotics SSL 2015 Project. 2015. Citado na página 105.
- LINDNER, F.; ESCHENBACH, C. Towards a formalization of social spaces for socially aware robots. In: **International Conference on Spatial Information Theory**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 283–303. Citado na página 48.
- MARTÍNEZ-GARCÍA, E.; AKIHISA, O.; YUTA, S. *et al.* Crowding and guiding groups of humans by teams of mobile robots. In: IEEE. **Advanced Robotics and its Social Impacts, 2005. IEEE Workshop on**. [S.l.], 2005. p. 91–96. Citado nas páginas 35 e 37.
- MAS, I.; LI, S.; ACAIN, J.; KITTS, C. Entrapment/escorting and patrolling missions in multi-robot cluster space control. In: **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 5855–5861. Citado na página 33.
- MEAD, R.; MATARIĆ, M. Perceptual models of human-robot proxemics. **Proceedings of ISER**, 2014. Citado na página 29.
- MEAD, R.; MATARIĆ, M. J. Autonomous human–robot proxemics: socially aware navigation based on interaction potential. **Autonomous Robots**, Springer, v. 41, n. 5, p. 1189–1201, 2017. Citado na página 28.
- MONTIJANO, E.; PRIOLO, A.; GASPARRI, A.; SAGUES, C. Distributed entrapment for multi-robot systems with uncertainties. In: **IEEE Annual Conference on Decision and Control**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 5403–5408. Citado na página 33.
- MORALES, Y.; KANDA, T.; HAGITA, N. Walking Together: Side by Side Walking Model for an Interacting Robot. **Journal of Human-Robot Interaction**, v. 3, n. 2, p. 51–73, 2014. Citado nas páginas 22 e 58.
- MOUSSAÏD, M.; PEROZO, N.; GARNIER, S.; HELBING, D.; THERAULAZ, G. The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics. **PloS one**, v. 5, n. 4, p. e10047, 2010. Citado nas páginas 49, 50, 56, 57 e 58.
- MUMM, J.; MUTLU, B. Human-robot proxemics: physical and psychological distancing in human-robot interaction. In: **Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 331–338. Citado na página 43.
- NARDI, L.; IOCCHI, L. Representation and Execution of Social Plans through Human-Robot Collaboration. In: **Social Robotics**. [S.l.: s.n.], 2014, (Lecture Notes in Computer Science, v. 8755). p. 266–275. Citado na página 42.
- OLIVEIRA, T. L.; BATISTA, M. R.; ROMERO, R. A. Analysis of human-swarm interaction through potential field manipulation. In: **Latin American Robotics Symposium (LARS) and Brazilian Symposium on Robotics (SBR)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado nas páginas 35 e 91.
- PARSIAN. **GitHub - RoboCup-SSL/grSim**. 2018. Disponível em: <<https://github.com/RoboCup-SSL/grSim>>. Citado na página 107.
- PENDERS, J.; ALBOUL, L.; WITKOWSKI, U.; NAGHSH, A.; SAEZ-PONS, J.; HERBRECHTSMEIER, S.; EL-HABBAL, M. A robot swarm assisting a human fire-fighter. **Advanced Robotics**, v. 25, n. 1-2, p. 93–117, 2011. Citado nas páginas 22, 23, 35, 39 e 42.

- PIONEER. **Pioneer p3dx documentation**. 2016. Disponível em: <<http://www.mobilerobots.com/Libraries/Downloads/Pioneer3DX-P3DX-RevA.sflb.ashx>>. Acesso em: 2016-03-15. Citado na página 64.
- REIF, J. H.; WANG, H. Social potential fields: A distributed behavioral control for autonomous robots. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 27, n. 3, p. 171–194, 1999. Citado na página 32.
- REYNOLDS, C. W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In: **14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques**. [S.l.: s.n.], 1987. p. 25–34. Citado na página 32.
- RIOS-MARTINEZ, J.; SPALANZANI, A.; LAUGIER, C. From proxemics theory to socially-aware navigation: A survey. **International Journal of Social Robotics**, v. 7, n. 2, p. 137–153, 2015. Citado nas páginas 13, 45 e 46.
- ROMERO, R. A.; PRESTES, E.; OSÓRIO, F.; WOLF, D. Robótica móvel. **São Paulo: LTC**, 2014. Citado na página 21.
- ROSENTHAL, S.; BISWAS, J.; VELOSO, M. An effective personal mobile robot agent through symbiotic human-robot interaction. In: **Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 915–922. Citado na página 22.
- SAEZ-PONS, J.; ALBOUL, L.; PENDERS, J. Experiments in cooperative human multi-robot navigation. In: **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–4. Citado na página 35.
- SATAKE, S.; KANDA, T.; GLAS, D. F.; IMAI, M.; ISHIGURO, H.; HAGITA, N. How to approach humans?-strategies for social robots to initiate interaction. In: **ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 109–116. Citado na página 29.
- SATO, Y.; SUZUKI, R.; ARAI, M.; KOBAYASHI, Y.; KUNO, Y.; FUKUSHIMA, M.; YAMAZAKI, K.; YAMAZAKI, A. Multiple robotic wheelchair system able to move with a companion using map information. In: **ACM. Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction**. [S.l.], 2014. p. 286–287. Citado nas páginas 23 e 36.
- SCHEGGI, S.; MORBIDI, F.; PRATTICCHIZZO, D. Human-robot formation control via visual and vibrotactile haptic feedback. **IEEE Transactions on Haptics**, v. 7, n. 4, p. 499–511, 2014. Citado na página 36.
- SHINNERS, P. **Pygame**. 2011. Disponível em: <<https://www.pygame.org/>>. Citado na página 91.
- SILVA, P. M. d. S. P. **Movimentação autónoma de robôs móveis de baixo custo, com base no sistema NXT da Lego**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, 2010. Citado na página 65.
- SOUZA, A. R. de; RAAD, R.; BATISTA, M. R.; ROMERO, R. A. F. Coordinate multi-robotic system for image taking and visualization via photogrammetry. In: **Latin American Robotics Symposium (LARS) Brazilian Symposium on Robotics (SBR)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado na página 34.

- STONE, P.; VELOSO, M. Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective. **Autonomous Robots**, Springer, v. 8, n. 3, p. 345–383, 2000. Citado na página 21.
- SUZUKI, R.; YAMADA, T.; ARAI, M.; SATO, Y.; KOBAYASHI, Y.; KUNO, Y. Multiple robotic wheelchair system considering group communication. In: **International Symposium on Visual Computing**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 805–814. Citado nas páginas 23, 36 e 39.
- TAN, J.; XI, N.; SHENG, W.; XIAO, J. Modeling multiple robot systems for area coverage and cooperation. In: **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 2568–2573. Citado na página 32.
- TORTA, E.; HEUMEN, J. van; PIUNTI, F.; ROMEO, L.; CUIJPERS, R. Evaluation of Unimodal and Multimodal Communication Cues for Attracting Attention in Human–Robot Interaction. **International Journal of Social Robotics**, p. 1–8, 2014. Citado na página 25.
- VÁSÁRHELYI, G.; VIRÁGH, C.; SOMORJAI, G.; TARCAI, N.; SZORENYI, T.; NEPUSZ, T.; VICSEK, T. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots. In: **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 3866–3873. Citado nas páginas 32 e 33.
- VASCONCELOS, P.; PEREIRA, H.; MACHARET, D.; NASCIMENTO, E. Fast human detection for indoor mobile robots using depth images. In: **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1108–1113. Citado na página 30.
- VELOSO, M. A Few Issues on Human-Robot Interaction for Multiple Persistent Service Mobile Robots. In: **AAAI Fall Symposium Series**. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 22.
- VICON. **Vicon Tracker**. 2018. Disponível em: <<https://www.vicon.com/products/software/tracker>>. Citado na página 107.
- WANG, Z.; MATSUMOTO, H.; HIRATA, Y.; KOSUGE, K. A path planning method for dynamic object closure by using random caging formation testing. In: **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 5923–5929. Citado nas páginas 21 e 33.
- WEINING, L.; TAO, Z.; JUN, Y.; XUEQIAN, W. A formation control approach with autonomous navigation of multi-robot system in unknown environment. In: **Control Conference (CCC), 2015 34th Chinese**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 5230–5234. Citado na página 32.
- YANCO, H. A.; DRURY, J. L. A taxonomy for human-robot interaction. In: **Proceedings of the AAAI Fall Symposium on Human-Robot Interaction**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 111–119. Citado nas páginas 13, 41 e 42.
- YEH, A.; RATSAMEE, P.; KIYOKAWA, K.; URANISHI, Y.; MASHITA, T.; TAKEMURA, H.; FJELD, M.; OBAID, M. Exploring proxemics for human-drone interaction. In: **Proceedings of the 5th International Conference on Human Agent Interaction**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 81–88. Citado na página 31.

TERMO DE COMPROMISSO ASSINADO PELOS PARTICIPANTES NO EXPERIMENTO

O anexo a partir da página seguinte mostra o termo de compromisso assinado por cada participante do experimento. Observe que originalmente era previsto um experimento inicial que trataria somente da aproximação dos robôs até a pessoa sem que a mesma se deslocasse, mas este experimento foi descartado.

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Título do estudo: Desenvolvimento de técnicas de acompanhamento para cooperação entre humanos e sistemas multirrobóticos

Pesquisador(a) responsável: Roseli Aparecida Francelin Romero/ Murillo Rehder Batista

Instituição / Departamento: Universidade de São Paulo – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação

Endereço do(a) pesquisador(a) responsável: Av. Trab. São-Carlense, 400, Centro, São Carlos, SP – CEP 13-566590

Telefone do(a) pesquisador(a) responsável para contato: 16 – 3373-9661

Local da coleta de dados: USP - São Carlos

Prezado(a) voluntário(a):

☺ Você está sendo convidado(a) a responder às perguntas deste roteiro de entrevista de forma totalmente **voluntária**;

☺ Antes de concordar com a participação nesta pesquisa e responder este roteiro, é muito importante que você compreenda as informações e instruções contidas neste documento.

☺ Os pesquisadores deverão responder a todas as suas dúvidas antes que você se decida se autoriza a sua participação;

☺ Você tem o direito de **desistir** de participar da pesquisa a qualquer momento, sem nenhuma penalidade e sem que isso lhe acarrete qualquer ônus ou consequência.

Objetivo do estudo: A pesquisa “Desenvolvimento de técnicas de acompanhamento para cooperação entre humanos e sistemas multirrobóticos” está sendo realizada pelo aluno de Doutorado em Computação Murillo Rehder Batista, sob orientação da professora Dra. Roseli Aparecida Francelin Romero do Curso de Computação do Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. Tal pesquisa tem como objetivo avaliar a percepção de um indivíduo quando ele caminha junto a robôs móveis.

Procedimentos: A participação nesta pesquisa consistirá em interagir com um ou mais robôs, caminhando no ambiente juntamente aos robôs. O participante irá colocar um capacete com marcadores para ter sua posição identificada pelos robôs. Cada indivíduo participará de experimentos de aproximação dos robôs ou de navegação conjunta. O experimento de aproximação avaliará distâncias desejadas pelas pessoas, durando cerca de dois minutos por participante. O experimento de navegação envolverá caminhar em um ambiente vazio por cerca de três minutos. Após a realização do experimento, cada participante será levado para outra sala para preencher um questionário.

Benefícios: Participar dos experimentos trará a oportunidade de ter contato prévio com uma tecnologia que espera-se ser popularizada no futuro.

Riscos: Há risco do participante tropeçar em um dos robôs, que são de pequeno porte, e cair, apesar de remoto.

Sigilo: O nome do estudante será mantido em sigilo, assim como outras informações pessoais. Os resultados deste trabalho científico estarão sob o cuidado dos pesquisadores, podendo ser divulgados em congressos e artigos, resguardando-se o sigilo quanto a qualquer informação pessoal a seu respeito.

Indenização e ressarcimento: É garantida indenização em casos de danos comprovadamente decorrentes da sua participação na pesquisa, por meio de decisão judicial ou extrajudicial. Não há qualquer valor econômico, a receber ou a pagar, pela sua participação.

Ciência e de acordo do participante (sujeito da pesquisa):

Ciente e de acordo com o que foi anteriormente exposto pelo(a) pesquisador(a), eu _____, RG: _____, estou de acordo com a participação neste estudo assinando este consentimento em duas vias, ficando com a posse de uma delas.

São Carlos, ____/____/____

Assinatura do sujeito de pesquisa

Ciência e de acordo do pesquisador responsável:

Asseguro ter cumprido as exigências da resolução 466/2012 CNS/MS e complementares na elaboração do protocolo e na obtenção deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido. Asseguro, também, ter explicado e fornecido uma cópia deste documento ao participante. Informo que o estudo foi aprovado pelo CEP perante o qual o projeto foi apresentado e pela CONEP, quando pertinente. Comprometo-me a utilizar o material e os dados obtidos nesta pesquisa exclusivamente para as finalidades previstas neste documento ou conforme o consentimento dado pelo participante. Declaro que assinei 2 vias deste termo, ficando com 1 via em meu poder.

São Carlos, ____/____/____

Assinatura pesquisador responsável pelo projeto

