

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
FAGNER DE ASSIS MOURA PIMENTEL

**REPRESENTAÇÃO DE CONHECIMENTO NO DOMÍNIO DA NAVEGAÇÃO  
SOCIAL EM ROBÔS DE SERVIÇO**

São Bernardo do Campo

2022

FAGNER DE ASSIS MOURA PIMENTEL

**REPRESENTAÇÃO DE CONHECIMENTO NO DOMÍNIO DA NAVEGAÇÃO  
SOCIAL EM ROBÔS DE SERVIÇO**

Tese de doutorado apresentada ao Centro Universitário FEI como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Orientado pelo Prof. Dr. Plínio Thomaz Aquino Junior.

São Bernardo do Campo

2022

Moura Pimentel, Fagner de Assis .

REPRESENTAÇÃO DE CONHECIMENTO NO DOMÍNIO DA  
NAVEGAÇÃO SOCIAL EM ROBÔS DE SERVIÇO / Fagner de Assis  
Moura Pimentel. São Bernardo do Campo, 2022.

202 p. : il.

Tese - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Plínio Thomaz Aquino Junior.

1. Robôs de serviço. 2. Regras sociais. 3. Navegação social. 4.  
Ontologia. I. Aquino Junior, Plínio Thomaz , orient. II. Título.

**Aluno:** Fagner de Assis Moura Pimentel

**Matrícula:** 517301-8

**Título do Trabalho:** Desenvolvimento, Otimização e Representação De Conhecimento No Domínio Da Navegação Social Em Robôs De Serviço Aplicados À Plataforma Robótica HERA.

**Área de Concentração:** Inteligência Artificial Aplicada à Automação e Robótica

**Orientador:** Prof. Dr. Plinio Thomaz Aquino Junior

**Data da realização da defesa:** 11/02/2022

**ORIGINAL ASSINADA**

**Avaliação da Banca Examinadora**

A banca foi realizada no dia 11 de fevereiro de 2022 com início às 8h00. O aluno realizou a apresentação com sucesso, seguida pela arguição pelos membros da banca. O aluno respondeu as questões de forma adequada demonstrando conhecimento pleno do tema. Foram sugeridas melhorias em relação ao texto para a versão final. A banca recomendou alteração do título da tese para "Representação de Conhecimento no Domínio da Navegação Social em Robôs de Serviço". A aprovação ocorreu por unanimidade.

São Bernardo do Campo,        /        /        .

**MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Plinio Thomaz Aquino Junior

Ass.: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Danilo Hernani Perico

Ass.: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Flavio Tonidandel

Ass.: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Junior

Ass.: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Paulo Roberto Ferreira Júnior

Ass.: \_\_\_\_\_

A Banca Examinadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

**VERSÃO FINAL DA TESE**

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS  
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Aos meus pais, irmãos, avós, amigos e todos  
que me apoiaram durante essa trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao término deste trabalho, deixo aqui meus sinceros agradecimentos:

A Deus pelos desafios e força que me foram proporcionados.

A meus familiares, em especial meus pais Francisco Pimentel e Neuza Pimentel e meus irmãos Wagner Pimentel e Magnar Pimentel pelo apoio, incentivo, carinho e confiança em todos os momentos. Aos meus velhos amigos Marcus Freire, Dernerval Júnior e Sóstenes dos Santos pelo apoio em momentos difíceis e especialmente a Eduardo Linhares pelo companheirismo. Agradeço a diversos outros amigos da Bahia pelo apoio mesmo estando longe: Fabiana Moura, Adailton Cerqueira, José Grimaldo, Bruno Vinicius, Juliana Fajardini, Henrique Vidal, Vitor Santos, Ayran Cruz, Mario Bortoli, Adriano Veiga, Flávio Sapucaia, Marlena Martins, Alan Deivite, Camila Laranjeira, Camila Pimentel, Elizabete Reis, entre tantos outros. Aos amigos que fiz na FEI e em São Paulo ao longo destes quatro anos: Rodrigo Tech, Douglas de Rizzo, Leonardo C. Neves, Bruno de Freitas, Thiago Meyer, Marina Gonbata, William Yagui, Kimberlin Cardoso, Guilherme Marostica, entre outros.

Agradeço também aos professores Plínio Aquino, Flávio Tonidandel, Reinaldo Bianchi e Danilo Perico pelas valiosas orientações tanto neste quanto em outros trabalhos realizados ao longo do período em que fiz parte do RoboFEI. A todos os demais professores e funcionários do Centro Universitário FEI que direta e indiretamente proporcionaram este momento. Por fim, agradeço à CAPES pela bolsa de estudos de doutorado que me foi concedida.

“ I can’t change the direction of the wind, but I can adjust my sails to always reach my destination.”

Jimmy Dean

## RESUMO

A navegação social é uma área de pesquisa que vem crescendo nos últimos anos. Entretanto, compartilhar ambientes com o ser humano de forma socialmente aceitável ainda é um desafio tanto no ambiente doméstico quanto comercial. A precisão e a segurança são características necessárias na navegação social e constituem um desafio, no entanto, o conforto humano é o principal objetivo nas interações que envolvem seres humanos. Como contribuições deste trabalho, é proposta a representação de conhecimento no domínio da navegação social utilizando ontologia, sendo utilizada aqui para gerar camadas de mapas semânticos para a navegação de robô social. Neste trabalho é apresentado o problema atual da navegação social em robôs de serviço, os principais conceitos relacionados com esta área, uma revisão do estado da arte e é proposto um modelo de navegação social utilizando ontologia como base para representação de conhecimento neste domínio. Portanto, este trabalho tem como objetivo, especificar uma nova ontologia que possa unificar e formalizar a representação de conhecimento no domínio da navegação social encontrados na literatura, enquanto otimiza de forma incremental os métodos utilizados em ontologia aplicada na navegação de robôs móveis. Este trabalho também traz o estudo comparativo de métodos, que estão diretamente ligados à segurança, à naturalidade dos robôs e ao conforto do ser humano. Também foi aplicado um estudo de caso incremental na plataforma *Home Environment Robot Assistant* (HERA) promovendo uma melhor navegação social. Vários ambientes, tipos de obstáculos, pessoas simuladas de forma estática e dinâmica utilizando modelos de força social, interagindo com outras pessoas e objetos foram avaliados, variando algoritmos de planejamento local e global, e mapas de custos. Aspectos de segurança e precisão em termos de tempo e espaço estimados, assim como o respeito ao espaço pessoal foram observados. Experimentos exaustivos foram realizados para cada método ou combinação de ambiente utilizando os parâmetros otimizados de cada método em um total de 84.120 experimentos. Com esses resultados, foi possível selecionar uma configuração para este sistema de navegação, enquanto o modelo de representação de conhecimento com ontologia foi desenvolvido. Nos experimentos reais foi possível observar a influência de uma navegação comum e de uma navegação social sobre o conforto do ser humano. Ao final deste estudo, é apresentada a estrutura atual da ontologia para navegação social como contribuição para a literatura e uma navegação otimizada com base nesta ontologia aplicada a plataforma robótica HERA.

Palavras-chave: Robôs de serviço; Regras sociais; Navegação social; Ontologia

## ABSTRACT

Social navigation is a research area that has been growing in recent years. However, sharing environments with humans in a socially acceptable way is still a challenge in both domestic and commercial environments. Accuracy and safety are necessary features in social navigation and constitute a challenge, however, human comfort is the main objective in interactions involving human beings. As contributions of this work, the knowledge representation in the domain of social navigation using ontology is proposed. It is used here to generate layers of semantic maps for social robot navigation. In this work, the current problem of social navigation in service robots is presented, the main concepts related to this area, a review of the state of the art and a model of social navigation using ontology as a basis for knowledge representation in this domain is proposed. Therefore, this work aims to specify a new ontology that can unify and formalize the representation of knowledge in the domain of social navigation found in the literature, while incrementally optimizing the methods used in ontology applied to mobile robot navigation. This work also brings the comparative study of methods, which are directly linked to safety, naturalness of robots and human comfort. An incremental case study was also applied on the *Home Environment Robot Assistant* (HERA) platform promoting better social navigation. Various environments, types of obstacles, statically and dynamically simulated people using *Social Force Model* (SFM), interacting with other people and objects were evaluated, varying local and global planning algorithms, and cost maps. Aspects of safety and accuracy in terms of estimated time and space, as well as respect for personal space were observed. Exhaustive experiments were performed for each method or environment combination using the optimized parameters of each method in a total of 84,120 experiments. With these results, it was possible to select a configuration for this navigation system, while the knowledge representation model with ontology was developed. In real experiments, it was possible to observe the influence of common navigation and social navigation on human comfort. At the end of this study, the current ontology structure for social navigation is presented as a contribution to the literature and an optimized navigation based on this ontology applied to the HERA robotic platform.

Keywords: Service Robots; Social Rules; Social Navigation; Ontology

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Os 10 grandes desafios da robótica . . . . .	17
Figura 2	– Exemplos de robôs sociais . . . . .	25
Figura 3	– Distâncias proxêmicas. . . . .	36
Figura 4	– Formações F. . . . .	38
Figura 5	– Esquema de navegação estendido para robôs de serviço móvel . . . . .	48
Figura 6	– Cenário simulado semelhante a um escritório . . . . .	49
Figura 7	– Representações de comportamentos proxêmicos . . . . .	52
Figura 8	– Camadas de navegação . . . . .	56
Figura 9	– Versão real e simulada da plataforma HERA. . . . .	59
Figura 10	– Ambientes simulados usados nos testes preliminares. . . . .	62
Figura 11	– Ambientes simulados usados na otimização. . . . .	63
Figura 12	– Ambientes simulados usados com pessoas estáticas. . . . .	65
Figura 13	– Ambientes simulados usados com pessoas dinâmicas. . . . .	66
Figura 14	– Representação do ambiente onde foram realizados os experimentos com voluntários. . . . .	67
Figura 15	– Roteiro dos experimentos. . . . .	72
Figura 16	– Tipos de navegação quando o destino é uma pessoa. . . . .	92
Figura 17	– Pontos de abordagem de pessoas . . . . .	93
Figura 19	– Trajetórias calculadas pelo planejadores em experimentos preliminares. . .	102
Figura 20	– Erro de localização nos experimentos simulados. . . . .	105
Figura 21	– Faixa etária dos voluntários nos experimentos reais. . . . .	117
Figura 22	– Familiaridade dos voluntários nos experimentos reais. . . . .	118
Figura 23	– Segurança Física dos voluntários nos experimentos reais. . . . .	118
Figura 24	– Naturalidade dos voluntários nos experimentos reais. . . . .	118
Figura 25	– Sociabilidade dos voluntários nos experimentos reais. . . . .	119
Figura 26	– Legibilidade dos voluntários nos experimentos reais. . . . .	119
Figura 27	– Conforto dos voluntários nos experimentos reais. . . . .	119
Figura 28	– Métricas <i>SII</i> , <i>SMC</i> e <i>PRC</i> nos experimentos reais. . . . .	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Conceitos . . . . .	23
Tabela 2	–	Classificação de robôs de serviço por áreas de aplicação e tipos de robôs. . . . .	26
Tabela 3	–	Revisão . . . . .	41
Tabela 4	–	Os componentes da plataforma HERA. . . . .	59
Tabela 5	–	Métodos na primeira etapa. . . . .	76
Tabela 6	–	Variáveis na primeira etapa. . . . .	76
Tabela 7	–	Métodos na segunda etapa. . . . .	77
Tabela 8	–	Variáveis na segunda etapa. . . . .	78
Tabela 9	–	Métodos na terceira etapa. . . . .	79
Tabela 10	–	Variáveis na terceira etapa . . . . .	79
Tabela 11	–	Métodos na quarta etapa. . . . .	80
Tabela 12	–	Variáveis na quarta etapa . . . . .	80
Tabela 13	–	Tipos de navegação do robô . . . . .	91
Tabela 14	–	Conjunto de experimentos, variáveis e quantidade de experimentos realizados em cada etapa da pesquisa. . . . .	99
Tabela 15	–	Resultados de experimentos da etapa 1 . . . . .	100
Tabela 16	–	Resultados de experimentos da etapa 2.1 . . . . .	105
Tabela 17	–	Resultados de experimentos da etapa 2.2 . . . . .	106
Tabela 18	–	Resultados de experimentos da etapa 2.3 . . . . .	108
Tabela 19	–	Resultados de experimentos da etapa 2.4 . . . . .	110
Tabela 20	–	Resultados de experimentos da etapa 2.5 . . . . .	111
Tabela 21	–	Resultados de experimentos da etapa 3(1-4), interações implícitas. . . . .	113
Tabela 22	–	Resultados de experimentos da etapa 3(1-4), interações explícitas. . . . .	114
Tabela 23	–	Resultados de experimentos da etapa 3.5. . . . .	114
Tabela 24	–	Resultados de experimentos da etapa 4(1-4), interações implícitas. . . . .	116
Tabela 25	–	Resultados de experimentos da etapa 4.5. . . . .	116
Tabela 26	–	Resultados de experimentos da etapa 5. . . . .	120
Tabela 27	–	Observação dos voluntários no final dos experimentos . . . . .	127
Tabela 28	–	Publicações . . . . .	137

## LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Roteiro dos experimentos realizados . . . . .	75
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS

<i>FR</i>	<i>Fail Rate</i>
<i>FR_A</i>	<i>Fail Rate by Abortion</i>
<i>FR_C</i>	<i>Fail Rate by Colision</i>
<i>FR_I</i>	<i>Fail Rate by Invasion</i>
<i>FR_SE</i>	<i>Fail Rate by space Exceeded</i>
<i>FR_TE</i>	<i>Fail Rate by Time Exceeded</i>
<i>PRC</i>	<i>Proxemic Coefficient</i>
<i>SGI</i>	<i>Group Social Index</i>
<i>SII</i>	<i>Individual Social Index</i>
<i>SMC</i>	<i>Smoothing Coefficient</i>
<i>SPC</i>	<i>Spatial Coefficient</i>
<i>SR</i>	<i>Success Rate</i>
<i>TEC</i>	<i>Temporal Coefficient</i>
<i>AMCL</i>	<i>Monte Carlo Localization Approach</i>
<i>API</i>	<i>Application Program Interface</i>
<i>BLP</i>	<i>Base Local Planner</i>
<i>CAAE</i>	<i>Certificado de Apresentação de Apreciação Ética</i>
<i>CORA</i>	<i>Core Ontology for Robotics and Automation</i>
<i>DWA</i>	<i>Dynamic Window Approach</i>
<i>EBand</i>	<i>Elastic Band</i>
<i>G10</i>	<i>Grupo de 10 Pessoas</i>
<i>G5</i>	<i>Grupo de 5 Pessoas</i>
<i>GC</i>	<i>Grupo em Formação Circular</i>
<i>GF</i>	<i>Grupo Face-a-Face</i>
<i>HAMP</i>	<i>Human Aware Motion Planner</i>
<i>HERA</i>	<i>Home Environment Robot Assistant</i>
<i>IA</i>	<i>Inteligência Artificial</i>
<i>IC</i>	<i>Individual com Cruzamento</i>
<i>IE</i>	<i>Individual Estático</i>
<i>IEE</i>	<i>Interações Espaciais Explicitas</i>

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEI	Interações Espaciais Implícitas
IF	Individual de Frente
IHR	Interação Homem-Robô
IO	Interação com Objeto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LARS	<i>Latin American Robotics Symposium</i>
LSTM	<i>Long Short Term Memory</i>
MD	Maratona Dinâmica
ME	Maratona Estática
PF	<i>Potencial Fields</i>
PHRAMP	<i>Potential Human Reaction Aware Motion Planner</i>
RAS	<i>Robotics and Automation Society</i>
RGBD	<i>Red-Green-Blue-Distance</i>
RM	Robô Móvel
RMP	<i>Robot Motion Planning</i>
RNS	<i>ROS Navigation Stack</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
RSM	Robô Social Móvel
SFM	<i>Social Force Model</i>
SUMO	<i>Suggested Upper Merged Ontology</i>
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
TDP	<i>Team Description Paper</i>
TEB	<i>Timed Elastic Band</i>
URDF	<i>Unified Robotic Description Format</i>
VFH	<i>Vector Field Histogram</i>
XACRO	<i>XML Macros</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	17
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivo	20
1.3	Contribuições	21
1.4	Organização das seções	22
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	23
2.1	Conceitos fundamentais	23
<b>2.1.1</b>	<b>Robôs sociais</b>	24
<b>2.1.2</b>	<b>Navegação</b>	27
<b>2.1.3</b>	<b>Navegação social</b>	31
<b>2.1.4</b>	<b>Ontologia</b>	38
2.2	Trabalhos relacionados	40
<b>2.2.1</b>	<b>Tópicos de Pesquisa na Literatura</b>	40
<b>2.2.1.1</b>	<i>Principais trabalhos e conceitos</i>	40
<b>2.2.1.2</b>	<i>Soluções propostas</i>	42
<b>2.2.1.3</b>	<i>Métricas utilizadas</i>	43
<b>2.2.1.4</b>	<i>Problemas em aberto</i>	43
<b>2.2.2</b>	<b>Trabalhos de baixa e média relevância</b>	44
<b>2.2.3</b>	<b>Trabalhos de alta relevância</b>	46
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	58
3.1	Materiais	58
<b>3.1.1</b>	<b>Hardware</b>	58
<b>3.1.2</b>	<b>Software</b>	58
<b>3.1.3</b>	<b>Ambientes de teste</b>	62
<b>3.1.3.1</b>	<i>Etapa 1 - Testes preliminares da navegação comum</i>	62
<b>3.1.3.2</b>	<i>Etapa 2 - Otimização de navegação comum</i>	62
<b>3.1.3.3</b>	<i>Etapa 3 - Navegação social - Pessoas estáticas</i>	64
<b>3.1.3.4</b>	<i>Etapa 4 - Navegação social - Pessoas dinâmicas</i>	64
<b>3.1.3.5</b>	<i>Etapa 5 - Ambiente real</i>	65
3.2	Métricas	67
3.3	Métodos	71

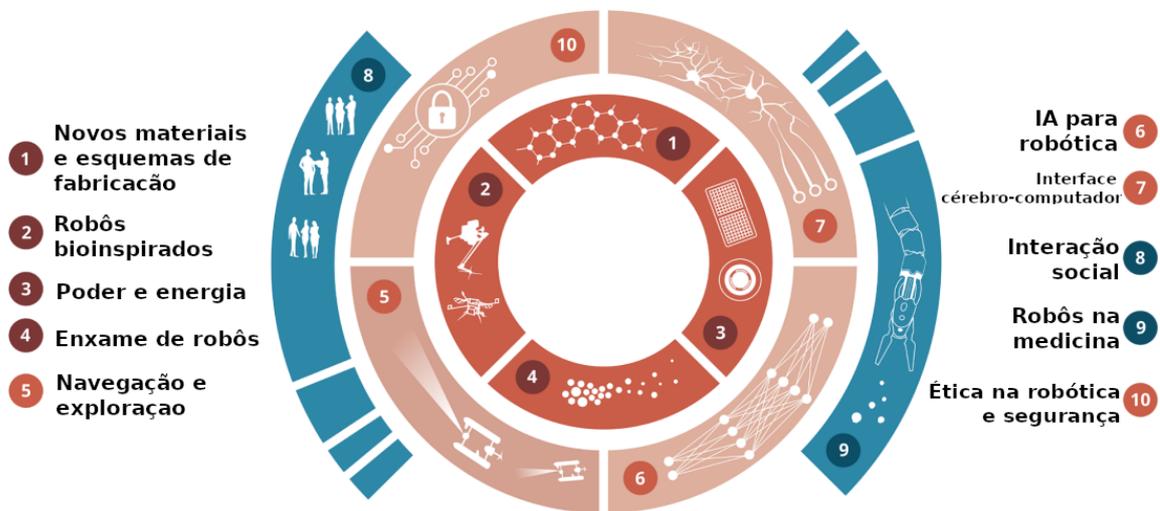
3.3.1	<b>Etapa 1 - Testes preliminares da navegação comum</b>	74
3.3.2	<b>Etapa 2 - Otimização de navegação comum</b>	76
3.3.3	<b>Etapa 3 - Navegação social - Pessoas estáticas</b>	78
3.3.4	<b>Etapa 4 - Navegação social - Pessoas dinâmicas</b>	79
3.3.5	<b>Etapa 5 - Ambiente real</b>	80
4	<b>Ontologia Social</b>	83
4.1	Especificação	83
4.2	Conceitualização	84
4.2.1	<b>Classe <i>Robot</i></b>	85
4.2.2	<b>Classe <i>Environment</i></b>	87
4.2.3	<b>Classe <i>Object</i></b>	88
4.2.4	<b>Classe <i>Local</i></b>	88
4.2.5	<b>Classe <i>Person</i></b>	89
4.2.6	<b>Classe <i>Formation</i></b>	90
4.3	Formalização	90
4.3.1	<b>Classes e atributos</b>	90
4.3.2	<b>Relações</b>	94
4.4	Implementação	95
4.4.1	<b>social_msgs</b>	96
4.4.2	<b>social_move_base</b>	96
4.4.3	<b>social_reasoning</b>	96
4.4.4	<b>social_layers</b>	97
4.5	Manutenção	97
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	98
5.1	Etapa 1: Navegação básica	98
5.2	Etapa 2: Otimização da navegação comum	102
5.2.1	<b>Conjunto I: Configuração simples</b>	103
5.2.2	<b>Conjunto II: Planejadores globais</b>	105
5.2.3	<b>Conjunto III: Planejadores locais</b>	107
5.2.4	<b>Conjunto IV: Fontes de observação</b>	108
5.2.5	<b>Conjunto V: Mapas semânticos</b>	109
5.3	Etapa 3: Navegação comum x social - Pessoas estáticas	111
5.4	Etapa 4: Navegação comum x social - Pessoas dinâmicas	113

5.5	Etapa 5: Navegação comum x social - Ambiente real . . . . .	115
5.6	Discussão dos Resultados . . . . .	121
<b>5.6.1</b>	<b>Etapa 1 . . . . .</b>	<b>121</b>
<b>5.6.2</b>	<b>Etapa 2 . . . . .</b>	<b>121</b>
<b>5.6.3</b>	<b>Etapas 3 e 4 . . . . .</b>	<b>124</b>
<b>5.6.4</b>	<b>Etapa 5 . . . . .</b>	<b>124</b>
<b>5.6.5</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>129</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>132</b>
6.1	Contribuições . . . . .	133
6.2	Limitações . . . . .	135
6.3	Trabalhos futuros . . . . .	135
6.4	Publicações e participações em eventos científicos . . . . .	136
	<b>ÍNDICE . . . . .</b>	<b>138</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE A – Estudo sobre o conforto enviado ao comitê de ética . . . . .</b>	<b>145</b>
	<b>APÊNDICE B – Relatório final enviado ao comitê de ética . . . . .</b>	<b>194</b>
	<b>APÊNDICE C – Parecer do comitê de ética . . . . .</b>	<b>198</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No artigo de 2018 da *Science Robotics*, intitulado “Os grandes desafios das ciências robóticas” (*The grand challenges of Science Robotics*) (YANG et al., 2018), são apresentados os dez grandes desafios da robótica ainda não resolvidos com impacto para os próximos 5 à 10 anos (Figura 1), segundo pesquisa realizada com especialistas da área. Alguns dos dez grandes desafios da robótica para a próxima década envolvem (5) navegação e exploração; (6) Inteligência Artificial (IA) para robótica; e (8) interação social.

Figura 1 – Os 10 grandes desafios da robótica.



Fonte: Adaptado de Yang et al., 2018.

Para realizar navegação e exploração, alguns requisitos são onipresentes, como o planejamento de trajetória, o desvio de obstáculos, a localização e o mapeamento de ambiente (LATOMBE, 2012). O robô também deve saber atuar em ambientes não mapeados e de natureza com pouca ou nenhuma compreensão (YANG et al., 2018). Segundo Yang et al. (2018), para a navegação, o grande desafio é lidar com falhas e ser capaz de adaptar, aprender e se recuperar. Um importante desafio da robótica móvel é a definição de funções de navegação que permitem que os robôs naveguem entre obstáculos em diferentes ambientes (LAVALLE, 2006), entretanto, a presença humana torna tais ambientes dinâmicos e incertos.

A navegação entre os seres humanos requer que os robôs entendam as atividades humanas e possam prever seus comportamentos de modo a adaptar suas trajetórias. Este é um problema de pesquisa que vem crescendo nos últimos anos e é chamado de navegação social (*Social Navigation*) ou navegação ciente do ser humano (*Human-Aware Navigation*) (TALEB-

POUR et al., 2016; KRUSE et al., 2013). Segundo a pesquisa feita por Kruse et al. (2013), a coexistência de robôs e humanos em um mesmo ambiente adiciona algumas novas dimensões e desafios à mobilidade, como a naturalidade e a sociabilidade do robô e o conforto do ser humano. A naturalidade está relacionada às semelhanças entre robôs e humanos no padrão de comportamento de baixo nível, enquanto a sociabilidade trata da adequação do robô a padrões socioculturais de alto nível e o conforto refere-se à supressão de aborrecimento ou estresse para o humano nas interações com o robô. Neste cenário, as pessoas não devem ser tratadas como simples obstáculos, pois existe um conjunto de regras sociais e culturais que ditam como as pessoas devem se mover e como elas se sentem em relação a outros elementos móveis no ambiente.

No campo da IA, combinar reconhecimento de padrões e raciocínio baseado em modelos é crucial para construir sistemas que possam ir além da correlação estatística, e começar a raciocinar sobre estruturas de mecanismos interdisciplinares e dinâmica de sistemas. O robô deve ser capaz de aprender não somente a partir de grande quantidade de dados, mas também com dados limitados. Segundo Yang et al. (2018), um dos desafios mais sólidos da IA é prover um mapeamento coerente e compreensivo dos mecanismos chave da inteligência humana em um software. Uma das grandes questões para a IA é a habilidade de realizar raciocínio social e moral sobre problemas do mundo real. Sistemas que demonstram raciocínio moral e social são almejados com o crescimento do poder da IA (YANG et al., 2018).

Em relação a interação social, para os pesquisadores entrevistados por Yang et al. (2018), os humanos são tão adaptados a reconhecer e interpretar comportamento social cotidiano que a complexidade do desafio que isso representa para o robô é subestimada. A interação social requer a construção e manutenção de modelos de pessoas, que incluam seus conhecimentos, crenças, metas, desejos e emoções. Yang et al. (2018) apontam 3 grandes desafios para construir robôs que interagem socialmente com pessoas: (1) modelagem de dinâmicas sociais, (2) aprendizado de normas sociais e morais, e (3) construção de uma teoria robótica sobre a mente humana (estado mental). Para Yang et al. (2018), a interação social é o maior desafio da robótica, em parte por conta da grande significância da demanda de percepção. Os sinais sociais como direção do olhar, expressão facial e entonação vocal são detalhes que acontecem de forma muito rápida e sutil e combinadas com outras ações. Além disso, os sinais sociais são altamente dependentes de contextos e determinados pela cultura. Robôs inseridos em ambientes com humanos precisam não somente se adaptar a diferentes culturas, mas também aprender as normas morais e sociais apropriadas. Novas ferramentas são necessárias para modelar a expectativa das

peças ao redor do robô e expandir o entendimento do robô sobre as consequências de suas próprias ações.

## 1.1 Motivação

Existem diversos desafios ligados à um robô social, o mais evidente é fazer com que o robô possua uma atuação segura e confortável para as pessoas no ambiente em que ele está inserido. Neste sentido, espera-se que o robô navegue em ambientes com diferentes regras sociais, de modo que essa navegação seja eficaz, segura e não cause desconforto, sendo socialmente aceita pelos seres humanos que compõem o ambiente.

Este trabalho, portanto, é motivado pelas dificuldades encontradas em tratar a navegação de um robô autônomo de serviço de forma eficaz, segura e confortável para humanos que interagem no mesmo contexto de uso. Um comportamento comum observado em pessoas que têm algum contato com este tipo de robô é não se aproximar do robô. Em testes preliminares com um robô de serviço, foi observado que esse comportamento ocorre pelo medo do robô machucá-los durante a navegação ou por desconforto porque o robô não apresenta um movimento natural. Segundo Marczal e Junior (2015), as pessoas possuem um comportamento orientado para o contexto que inclui a sua experiência ao longo do tempo, bem como as características do ambiente físico, social e cultural. Como o robô é reconhecido como um elemento do ambiente que possui comportamento autônomo, espera-se que apresente comportamento aderente ao contexto local (SANTOS et al., 2014). Este trabalho foca nos desafios de navegação social apresentados por Kruse et al. (2013) sobre naturalidade, sociabilidade e conforto.

A partir desta motivação, a pesquisa desta tese se baseia no mapeamento de modelos de navegação social existentes, para aprimoramento destes modelos utilizando conhecimento semântico, por intermédio de ontologias como representação do conhecimento que o robô possui do ambiente, das pessoas e de suas relações, para desenvolver comportamentos sociais relativos à navegação social.

Alguns exemplos de contextos onde este modelo pode ser aplicado são apresentados a seguir: Exemplo 1: Duas pessoas interagindo entre si frente a frente. Há espaço para que o robô passe entre elas, e este é o menor caminho entre a posição inicial do robô e seu destino. Neste caso, o robô deve inferir que passar entre pessoas que estão interagindo entre si, causa desconforto por estar quebrando uma determinada norma social ou invadindo um espaço pessoal e este comportamento deve ser evitado. Esse mesmo entendimento pode ser aplicado para situações

similares como interação de grupos de pessoas ou interação com objetos como uma televisão. Exemplo 2: O robô deve abordar uma pessoa que está de costas para ele, olhando para qualquer direção. Neste caso, o robô deve estar ciente que um ser humano se sente mais confortável quando é abordado de frente, dentro do seu campo de visão. Esse mesmo entendimento pode ser aplicado para situações em que o robô deve abordar grupos de pessoas, independente de como elas estão dispostas.

A falta de um sistema de representação de conhecimento padronizado, para o domínio da navegação social e que utilize conceitos dos modelos de navegação social atuais, ainda constitui uma lacuna nos processos de desenvolvimento desta área que não foi encontrada na literatura. Se utilizarmos representação de conhecimento como a ontologia para o domínio da navegação social, é possível ter um sistema de desenvolvimento incremental utilizando os conceitos já existentes na literatura e realizar melhorias conforme a necessidade observada em experimentos de interação espacial entre humanos e robôs, seguindo o ciclo de vida natural de construção e manutenção de ontologias. Portanto, com a aplicação destes experimentos é possível realizar avaliação e otimização em termos de eficácia, segurança e conforto dos modelos da navegação social já existentes, enquanto novas abordagens de desenvolvimento podem ser descobertas e documentadas de forma padronizada, a partir de resultados de simulações e experiências de voluntários e especialistas. Com o uso da ontologia, espera-se uma melhora gradual no conforto do ser humano que interage com o robô em diferentes cenários sociais.

Sendo assim, o problema aqui consiste em mapear modelos e conceitos utilizados para a navegação social, e utilizar seus conceitos para a construção de um sistema de representação de conhecimento para navegação social em forma de ontologia, enquanto otimiza estes modelos em experimentos incrementais com foco no conforto humano. Dada a grande variedade de possíveis estudos na área de navegação social, este trabalho se direcionou em termos de ineditismo para o desenvolvimento da sociabilidade selecionando e otimizando métodos já existentes, desenvolvimento de mapas de custo que representam interações sociais e representação de conhecimento sobre a navegação social usando ontologia.

## 1.2 Objetivo

Dado o problema da navegação social, onde o robô precisa compreender o ambiente, as pessoas e seu próprio comportamento de modo a planejar e executar seus movimentos de uma forma segura, legível, natural, social e confortável para o ser humano, o objetivo deste trabalho

é proporcionar uma nova ferramenta, chamada de ontologia social para representação de conhecimento no domínio da navegação social e desenvolver modelos e sistemas de navegação de robôs sociais móveis com foco no conforto humano em termos de interação espacial aplicada à plataforma robótica de assistência doméstica (*Home Environment Robot Assistant* - HERA) em ambientes internos. Com isso, o trabalho visa realizar colaboração nas áreas de pesquisa de IA, navegação e interação social.

Os objetivos específicos desta pesquisa envolvem:

- a) Desenvolvimento da ontologia, testes e comparação com o estado da arte em ambiente simulado e real.
- b) Apresentar uma metodologia de teste e métricas de avaliação em ambiente simulado e real com o de modo a facilitar e padronizar os testes realizados para navegação social usando a ontologia;
- c) Aumentar a receptividade humana em interações espaciais, selecionando planejadores, sensores e camadas de mapas de custo para tornar a navegação do robô mais segura e confortável para o ser humano a partir de informações da ontologia;
- d) Observar e analisar a influência do comportamento de um Robô Móvel (RM) (sem ontologia) com desvio de obstáculos em comparação com um Robô Social Móvel (RSM) (com ontologia) sobre o conforto humano em um ambiente real aplicando questionários apresentados a participantes do estudo e utilizar os resultados para a melhoria do comportamento de um robô em ambientes sociais;
- e) Comparar o método utilizado nesta tese utilizando ontologia com métodos apresentados no estado da arte;
- f) Propor melhorias no comportamento do robô usando ontologia, possibilitando a maximização do conforto das pessoas.

### 1.3 Contribuições

Foram realizados experimentos exaustivos com diversos ambientes, tipos de obstáculos, pessoas simuladas de forma estática e dinâmica, interagindo com outras pessoas e objetos, variando algoritmos de planejamento e mapas de custos locais e globais em ambientes simulados e real com uso de ontologia. Aspectos de segurança e precisão em termos de tempo e espaço estimados, navegação suave e respeito ao espaço pessoal foram observados.

Este estudo contribui com o seguinte:

- a) Metodologia apresentada para o desenvolvimento da navegação social que leva em consideração os diferentes tipos de objetos presentes no ambiente, bem como o conforto das pessoas que interagem com o robô utilizando ontologia;
- b) Desenvolvimento de cenários de teste para navegação aumentando gradativamente o nível de complexidade servindo de *baseline* para comparação com outros trabalhos;
- c) Avaliação e seleção de um conjunto de métodos e sensores mais adequados à plataforma robótica de navegação social;
- d) Introdução de novas métricas de avaliação que avaliam os coeficientes espaciais e temporais, além do nível de naturalidade e sociabilidade necessário para realizar a navegação social;
- e) Apresentação dos resultados de pesquisa sobre conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social.

A partir dessas contribuições, foi possível ampliar a fronteira do conhecimento com novos métodos de representação do ambiente em que o robô está inserido, tomadas de decisões usando ontologia, assim como na apresentação de novas métricas, metodologias e ambientes de teste.

#### 1.4 Organização das seções

Na seção 2 são apresentados os conceitos utilizados neste trabalho e os principais trabalhos relacionados. Na seção 3 são conhecidos os materiais, métodos e métricas utilizados neste trabalho com foco no desenvolvimento e otimização de uma navegação social aplicada à plataforma robótica de assistência doméstica (*Home Environment Robot Assistant* - HERA) em ambientes internos. O desenvolvimento da ontologia social é visto na seção 4. Na seção 5 são apresentados os experimentos, resultados e discussão dos resultados. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros são vistas na seção 6.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As próximas seções apresentam as definições de uma série de conceitos fundamentais usados ao longo deste trabalho. Em seguida é apresentado o estado da arte na navegação social.

### 2.1 Conceitos fundamentais

Nesta seção serão apresentados os tipos de robôs utilizados neste estudo, começando pelos robôs de serviço, dando uma visão geral sobre os robôs sociais e definindo o RSM, que é o objeto de interesse deste estudo (seção 2.1.1). Tendo em vista a capacidade de mobilidade dos robôs sociais, nesta sessão também são apresentados conceitos utilizados no campo na navegação de robôs móveis (seção 2.1.2), passando por planejamento de trajetórias, espaço de configuração do ambiente e tipos de mapeamento. Adicionalmente são apresentados conceitos de navegação social (seção 2.1.3), passando por robótica social, interação humano-robô, interações espaciais, normas e regras sociais, conforto, teoria proxêmica e *Social Force Model*. Por fim, são apresentados conceitos relacionados a ontologia para representação de conhecimento (seção 2.1.4), o que é, para que serve, como se constrói uma ontologia e suas derivações na robótica. A Tabela 1 mostra os conceitos que serão apresentados ao longo desta seção.

Tabela 1 – Conceitos

Robótica	Robótica móvel	Interação humano-Robô
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Robô</li> <li>- Robô móvel</li> <li>- Robô colaborativo</li> <li>- Robô de serviço</li> <li>- Robô de serviço pessoal</li> <li>- Robô de serviço profissional</li> <li>- Robô social móvel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Espaço de configuração</li> <li>↔ Mapeamento</li> <li>  ↔ Mapas de custo</li> <li>  ↔ Mapas métricos</li> <li>  ↔ Mapas geométricos</li> <li>  ↔ Mapas semânticos</li> <li>↔ Expansão de obstáculos</li> <li>- Planejamento de trajetórias</li> <li>↔ Abordagem global</li> <li>↔ Abordagem local</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interações</li> <li>↔ Verbal</li> <li>↔ Não verbal</li> <li>↔ Espacial</li> <li>- Navegação social</li> <li>↔ Segurança física</li> <li>↔ Segurança psicológica</li> <li>- Proxêmica</li> <li>- Modelo de força social</li> <li>- Normas e regras sociais</li> <li>↔ Conforto</li> <li>↔ Naturalidade</li> <li>↔ Sociabilidade</li> <li>↔ Legibilidade</li> <li>- Formações F</li> </ul>
↓	↓	↓
Ontologia		

Fonte: Autor

### 2.1.1 Robôs sociais

Os robôs de serviço representam um verdadeiro desafio devido à grande quantidade de problemas que precisam ser resolvidos para que possam executar de forma confiável e segura as funções para as quais foram projetados. Para isso, o robô deve ser capaz de entender comandos, identificar obstáculos móveis e fixos em tempo real para desviar de obstáculos a tempo, enquanto navega em ambientes conhecidos ou não, reconhece e manipula objetos, dentre outras tarefas que possam ser solicitadas.

Em contraste com os robôs de serviço, para Hegel et al. (2009), os robôs sociais foram desenvolvidos explicitamente para a interação de humanos e robôs para apoiar uma interação semelhante à humana. Em primeiro lugar, implica que o robô se comporte socialmente dentro de um contexto e, segundo, implica que o robô tenha uma aparência que expresse explicitamente ser social, em um aspecto específico para qualquer usuário. Deste ponto de vista, um robô social contém uma interface social.

Para Cynthia L Breazeal (2002), um robô sociável é capaz de se comunicar e interagir com os humanos, entender e se relacionar conosco, de forma pessoal. Este robô também deve ser capaz de nos compreender e de compreender a si mesmo em termos sociais. Para que um robô sociável estabeleça e mantenha relacionamentos com humanos individualmente, o robô deve entender as pessoas, e as pessoas devem ser capazes de entender intuitivamente o comportamento do robô da mesma forma que compreendem o comportamento de outras pessoas.

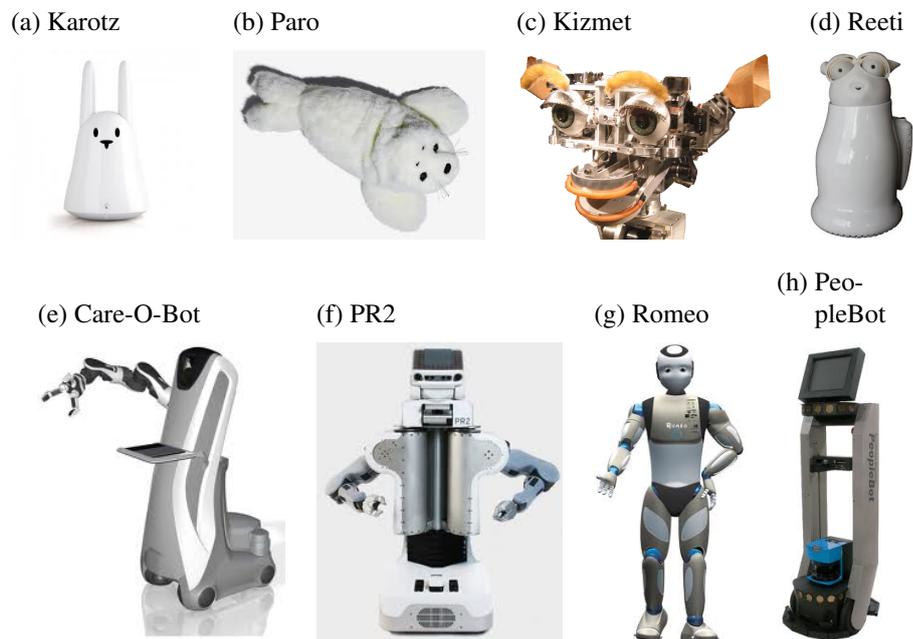
Para Bartneck e Forlizzi (2004), um robô social é um robô autônomo ou semi autônomo que interage e se comunica com humanos seguindo as normas comportamentais esperadas pelas pessoas com quem o robô deve interagir. Comunicação e interação com humanos é um ponto crítico nesta definição.

Cynthia Breazeal (2003) define quatro classes de robôs sociais: (1) Socialmente evocativo que contam com a tendência antropomorfização; (2) Interface social que fornecem uma interface “natural”, com sinais sociais e comunicação semelhantes às humanas; (3) Socialmente receptivo que são robôs socialmente passivos, mas que podem se beneficiar da interação onde são necessários modelos mais profundos de competências sociais humanas do que robôs de interface social e (4) Sociável, que se envolvem proativamente com os humanos a fim de satisfazer objetivos sociais internos (impulsos, emoções, etc.). Esses robôs requerem modelos profundos de cognição social.

Fong, Nourbakhsh e Dautenhahn (2002) complementa essa lista com mais três classes: (5) Situados socialmente que estão rodeados por um ambiente social ao qual eles percebem e reagem, assim como devem ser capazes de distinguir entre outros agentes sociais e vários objetos no ambiente; (6) Integrado socialmente que: (a) estão situados em um ambiente social e interagem com outros agentes e humanos; (b) estruturalmente acoplado ao seu ambiente social; e (c) pelo menos parcialmente ciente das estruturas interacionais humanas; por fim (7) Socialmente inteligente que mostram aspectos da inteligência social de estilo humano, baseados em modelos profundos de cognição humana e competência social.

Portanto, os robôs sociais são uma classe dos robôs de serviço projetados para interagir e ajudar pessoas em suas vidas cotidianas, tanto na esfera doméstica quanto comercial. Esta categoria de robôs possui uma vasta quantidade de formas e estruturas (ver Figura 2) e suas aplicações são numerosas, como limpeza, inspeção, construção, resgate e segurança, entretenimento, assistência, transporte e logística (Tabela 2).

Figura 2 – Exemplos de robôs sociais: estáticos (a, b, c e d) e móveis (e, f, g, e h).



Fontes: (a) karotz, s.d., (b) paro, s.d., (c) kismet, s.d., (d) reeti, s.d., (e) Care-O-bot, 2022, (f) pr2, s.d., (g) romeo, s.d., e (h) peoplebot, s.d.

Os sistemas de robôs sociais capazes de prestar assistência aos seres humanos devem abordar não só temas de investigação de robótica tradicionais (planejamento de movimento, navegação e manipulação), mas também devem possuir habilidades de interação com humanos. De particular interesse desta tese estão os robôs sociais designados a dividir o espaço de convivência e ter variados graus de interação com um ou mais usuários humanos. Nesse contexto, o

Tabela 2 – Classificação de robôs de serviço por áreas de aplicação e tipos de robôs: robôs de serviço para uso pessoal/doméstico

1-6	Tarefas domésticas
1	Robô companheiro/assistente/humanoide
2	Robô para aspiração, limpeza de chão
3	Robô para aparar grama
4	Robô para limpar de piscina
5	Robô para limpar janelas
6	Outros
7-10	Entretenimento
7	Robô brinquedo
8	Robô para multimídia/telepresença
9	Robô para educação e pesquisa
10	Outros
11-13	Assistência à idosos e deficientes
11	Cadeira de rodas robotizada
12	Dispositivos para ajuda e assistência
13	Outras funções de assistência
14	Transporte pessoal
15	Segurança de casa & vigilância
16	Outros robôs pessoais / Robôs domésticos

Fonte: Adaptada de IFR, 2017.

interesse está nos robôs similares ao Care-O-Bot, PR2, Romeo ou PeopleBot, vistos na Figura 2. Esses robôs (diferentes de outros robôs como Karotz, Paro ou Reeti que são pequenos e estáticos) são aproximadamente do tamanho de uma pessoa e foram projetados para se mover em ambientes de grandes dimensões, independente de seus atuadores de navegação serem rodas ou pernas. Partindo dessa diferenciação, esse tipo de robô será tratado daqui por diante como Robô Social Móvel (RSM).

Neste trabalho, são utilizados os conceitos apresentados na organização para padronização internacional (*International Organization for Standardization - ISO*) 8373 (ROBOTS... , 2012) para definir um RSM. Essa ISO tem como escopo a definição de vocabulário com relação a robôs e operação de dispositivos robóticos em ambientes industriais e não industriais. Assim sendo, um RSM será referenciado daqui para frente como um robô móvel, colaborativo, inteligente e de serviço pessoal ou profissional, capaz de realizar interação homem-robô com autonomia. A seguir são apresentados os conceitos encontrados na ISO 8373 (ROBOTS... , 2012):

- a) **Robô:** Mecanismo atuador programável em dois ou mais eixos com um grau de autonomia, movendo-se dentro do seu ambiente, para executar tarefas pretendidas;

- b) **Robô móvel:** Robô capaz de viajar sob seu próprio controle.
- c) **Robô colaborativo:** Robô projetado para interação direta com um humano;
- d) **Robô inteligente:** Robô capaz de executar tarefas detectando seu ambiente e/ou interagindo com fontes externas e adaptando seu comportamento;
- e) **Robô de serviço:** Robô que executa tarefas úteis para humanos ou equipamentos, excluindo aplicações de automação industrial;
- f) **Robô de serviço pessoal:** Robô de serviço usado para uma tarefa não comercial, geralmente por leigos (robô doméstico, cadeira de rodas automatizada, robô auxiliar de mobilidade pessoal e robô de exercícios para animais de estimação);
- g) **Robô de serviço profissional:** Robô de serviço usado para uma tarefa comercial, geralmente operado por um operador devidamente treinado (robô de limpeza para locais públicos, robô de entrega em escritórios ou hospitais, robô de combate a incêndio, robô de reabilitação e robô cirúrgico em hospitais);
- h) **Interação humano-Robô:** Trocas de informações e ações entre humanos e robôs para realizar uma tarefa por meio de uma interface de usuário;
- i) **Autonomia:** Capacidade de executar as tarefas pretendidas com base no estado atual e na detecção, sem intervenção humana.

### 2.1.2 Navegação

O problema em planejamento de trajetórias consiste em, dadas as posições inicial e final de um robô, descobrir uma sequência de movimentos para que ele saia da primeira e chegue à segunda posição sem colidir com outros robôs, humanos, ou obstáculos fixos ou móveis. Segundo LaValle (2006), planejamento de trajetória engloba três principais áreas do conhecimento: (i) a robótica, (ii) a Inteligência Artificial (IA) e (iii) a teoria do controle. Na área de robótica, o foco está em projetar algoritmos que geram movimentos eficientes por processamento de modelos geométricos. O campo tem crescido, incluindo complicações como incertezas, vários obstáculos e dinâmica. Na área de IA, o foco está em projetar sistemas que utilizam modelos de teoria de decisão para calcular ações apropriadas para o planejamento de trajetórias. Nesta área, o planejamento originalmente significava uma busca por uma sequência de operadores lógicos ou ações que transformam um estado de mundo inicial em um estado final desejado. Atualmente, o planejamento se estende além disso e inclui muitas ideias de teoria de decisão como o processo de decisão de Markov, informações sobre o estado imperfeito e de teoria dos jogos. Por último,

na área de teoria de controle, o foco está em algoritmos que calculam trajetórias viáveis para sistemas, com alguma cobertura adicional de retroalimentação e otimização. Apesar da teoria de controle, tradicionalmente, ter se preocupado com questões como retroalimentação, estabilidade e otimização, teve um crescente interesse em projetar algoritmos para encontrar trajetórias viáveis para sistemas não-lineares.

Os aspectos do planejamento de trajetórias segundo Latombe (2012) são divididos em parâmetros de entrada, parâmetros de saída e coordenação de movimentos. Os Parâmetros de entrada consistem na descrição do ambiente, ou seja, fornece as propriedades físicas e geométricas dos objetos inseridos no espaço de trabalho do robô e suas relações espaciais. No caso dos robôs sociais, as informações podem ser obtidas por sensoriamento e podem ser divididas em: (i) Conhecimento Completo onde o planejamento pode ser totalmente gerado previamente e depois executado; (ii) Conhecimento Incompleto onde alguma intervenção no planejamento é necessária ao longo da execução do movimento; e por fim (iii) Incerteza bem definida onde planos robustos para antecipação de eventualidades são necessários, sendo nesta última, onde os robôs sociais se encaixam. Os parâmetros de saída determinam a sequência de movimentos que o robô deve executar. A coordenação de movimentos é responsável pela interação com humanos, obstáculos móveis e outros robôs.

De acordo com Fox, Burgard e Thrun (1997), as abordagens de previsão de colisão para robôs móveis podem ser divididas em duas categorias: global e local. Técnicas globais, como roteiros, decomposição de células e métodos de campo potencial, geralmente assumem que um modelo completo do ambiente e do robô está disponível. A vantagem das abordagens globais reside no fato de que uma trajetória completa do ponto de partida ao ponto de destino pode ser calculada. No entanto, essas abordagens não são adequadas para evitar obstáculos rapidamente, pois neste caso, as abordagens locais (FOX; BURGARD; THRUN, 1997) são mais adequadas.

Os planejadores locais mais comuns encontrados na literatura são o *Base Local Planner* (BLP) ou Trajectory Rollout (GERKEY; KONOLIGE, 2008) e o *Dynamic Window Approach* (DWA) (FOX; BURGARD; THRUN, 1997). Eles são planejadores que fornecem controle para uma base móvel em um espaço 2D. Usando um mapa, o planejador cria trajetórias cinemáticas para um robô se mover de um ponto inicial a um ponto final. O planejador DWA difere do planejador Base na maneira como controla o espaço discretizado. Enquanto o planejador local da Base verifica todos os estados de simulação futuros (GERKEY; KONOLIGE, 2008), o planejador local do DWA verifica apenas os espaços imediatamente após o estado atual.

Outros planejadores conhecidos são a *Elastic Band* (EBand) (QUINLAN; KHATIB, 1993) e a *Timed Elastic Band* (TEB) (RÖSMANN et al., 2013). Esses tipos de planejadores usam o conceito de bolha que é definido como um subconjunto de localização máxima para uma área livre, em uma determinada configuração e que permite ao robô se mover em todas as direções sem causar uma colisão (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011). A bolha é gerada usando o modelo simplificado do robô em conjunto com as informações disponíveis no mapa. A bolha no EBand leva em consideração as forças dos objetos e as forças internas tentando minimizar a energia. Portanto, o EBand é um planejador que gera um caminho deformável e livre de colisões. Ele deforma o caminho gerado em tempo real, mantendo o robô longe de obstáculos, e continua a deformar conforme as mudanças nos obstáculos são detectadas. Isso permite que o robô se adapte a um obstáculo que se move inesperadamente. O TEB usa o mesmo princípio do EBand, no entanto, concentra-se na otimização do tempo. O TEB também trabalha com a minimização da função custo ao invés de aplicar as forças (RÖSMANN et al., 2013).

Outros métodos que podem ser utilizados são os campos potenciais (*Potential Fields* - PF) e o histograma de campo vetorial (*Vector Field Histogram* - VFH). Os métodos de PF, determinam a direção assumindo que os obstáculos impõem forças negativas no robô e que o destino impõe uma força positiva. Esses métodos são extremamente rápidos e geralmente consideram apenas o pequeno subconjunto de obstáculos próximo ao robô (FOX; BURGARD; THRUN, 1997). Entretanto, esses métodos geralmente falham ao encontrar trajetórias entre obstáculos muito próximos. Eles também podem produzir comportamento oscilatório em corredores estreitos. O VFH usa uma representação da grade de ocupação para modelar o ambiente do robô, que é gerado e atualizado continuamente usando sensores de proximidade. As informações de ocupação são transformadas em descrição do histograma do espaço livre ao redor do robô, usado para calcular a direção do movimento e velocidade do robô (FOX; BURGARD; THRUN, 1997).

Segundo Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), a localização é um importante componente da navegação. Para se localizar, o robô deve determinar sua posição no ambiente a partir de seus sensores e mapas previamente estabelecidos.

O espaço de configuração (LAVALLE, 2006; LATOMBE, 2012) é um conceito importante dentro da área de planejamento de trajetórias. Sua formulação tem como meta transformar o problema de planejamento de trajetória de um objeto bidimensional em um problema de trajetória de um ponto. Para isso ela segue o seguinte processo:

- a) Representar o robô como uma coordenada de um de seus vértices ou de seu centro;
- b) Expandir os obstáculos no espaço de configuração usando a forma do robô;
- c) Encontrar um caminho para o problema transformado.

Obstáculos são considerados objetos que sobrepõem determinadas configurações no espaço de configurações (ou espaço de trabalho) do robô, obstruindo o caminho. Uma técnica bastante utilizada para representação destas obstruções é a expansão de obstáculos (LAVALLE, 2006). Com ela, o robô é reduzido a um ponto e os obstáculos são expandidos com base na forma do robô. Esta técnica facilita o estudo das configurações que o robô pode assumir, e ajuda na construção e visualização dos caminhos livres dentro do espaço de configuração.

Outro conceito importante é o mapa de custos ou grade de ocupação (ELFES, 1989), que consiste em uma matriz de pesos usada por um sistema de navegação para armazenar informações probabilísticas sobre obstáculos (GERKEY; KONOLIGE, 2008). Em uma grade de ocupação, o ambiente é representado por uma grade discreta onde cada célula é preenchida (parte do objeto) ou mantida vazia (parte do espaço livre) (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011). É comumente usado para armazenar informações localmente em um mapeamento métrico para evitar obstáculos de curto prazo e globalmente para planejamento de rotas de longo prazo.

Segundo Kostavelis et al. (2016b), a modelagem de ambiente em termos de mapeamento métrico constitui a base para a maioria das aplicações robóticas. Especificamente, para que um robô seja capaz de navegar com eficiência, um mapa métrico consistente deve ser construído. A maioria das técnicas de mapeamento para robôs fornece apenas mapas geométricos, onde as pessoas são consideradas obstáculos. Eles não contêm informações sobre a direção em que as pessoas estão olhando, se estão tendo uma conversa ou apenas estão próximas umas das outras, ou como as pessoas estão se movendo. Portanto, existem várias técnicas que permitem a um robô adquirir uma representação mais humana de seu ambiente (BARTNECK et al., 2020).

Segundo Kostavelis et al. (2016b), apesar dos avanços no mapeamento métrico, para que um robô compreenda o ambiente da mesma forma que um ser humano, considera-se a formação de mapas acrescida de atributos semânticos envolvendo conceitos humanos, como tipos de cômodos, objetos e sua disposição espacial. Um atributo obrigatório para os futuros robôs. O mapeamento semântico (KOSTAVELIS; GASTERATOS, 2015) é uma descrição qualitativa dos arredores do robô, com o objetivo de aumentar as capacidades de navegação e o planejamento de tarefas, bem como preencher a lacuna na Interação Homem-Robô (IHR).

### 2.1.3 Navegação social

Os sistemas de robôs sociais capazes de auxiliar os seres humanos devem abordar não apenas os tópicos tradicionais de pesquisa em robótica (planejamento do movimento, navegação e manipulação), mas também devem ter habilidades de interação humana e raciocínio sobre o conhecimento de domínio social. Os robôs sociais projetados para compartilhar o espaço de convivência e ter graus de interação com um ou mais usuários humanos, como encontros sociais e compartilhamento do mesmo espaço social são de maior interesse na navegação social. Duffy et al. (1999) propõe o termo robótica social como uma representação mais genérica para interação humano-robô, que engloba colaboração, comunicação, cooperação, coordenação, comunidades, identidade e relacionamentos, com modelos comportamentais reativos e proativos.

Segundo Bartneck et al. (2020), a Interação Homem-Robô (IHR) é o esforço que reúne ideias de uma ampla gama de disciplinas. Engenharia, ciência da computação, robótica, psicologia, sociologia e *design*, contribuem com estudos sobre como as pessoas interagem com os robôs. A IHR está na mesma linha dessas disciplinas. Para projetar robôs com os quais as pessoas queiram interagir, o desenvolvedor precisa ter um bom entendimento da interação social humana. Para Bartneck et al. (2020), na IHR, a maioria dos algoritmos de planejamento de caminho que funcionam bem para contornar obstáculos, resultará em comportamento socialmente impróprio quando testados perto de pessoas.

As interações espaciais estão relacionadas com a navegação social. Na navegação social, o objetivo é fazer com que um robô deixe de ter um comportamento de um simples Robô Móvel (RM) com desvio de obstáculos, onde ele apenas se preocupa em não colidir com os obstáculos no ambiente, e passa a se comportar como um Robô Social Móvel (RSM), onde as pessoas e o contexto do ambiente são levados em consideração, de modo a não apenas evitar as colisões, mas também maximizar o conforto das pessoas próximas ao robô. As interações espaciais podem ser divididas em dois tipos: Interações Espaciais Explícitas (IEE), relacionadas a ações de abordagens do robô em um ser humano ou grupo de humanos e Interações Espaciais Implícitas (IEI), relacionadas a forma com que o robô simplesmente navega e compartilha o mesmo ambiente com o ser humano.

Segundo Mateus et al. (2019), quando as pessoas pensam em um robô interagindo com outra pessoa, o que vem à mente é um robô que pode falar com ela ou entregar algum objeto. No entanto, o movimento em si é de grande importância em um contexto social (por exemplo, quando um robô é solicitado a buscar um item), ou simplesmente quando um comportamento

de navegação normal precisa ser ajustado de acordo com as regras sociais, para não incomodar as pessoas. O estudo da navegação do robô na presença de pessoas é denominado navegação social (*Social Navigation*) ou navegação ciente do ser humano (*Human-Aware Navigation*).

Segundo Changan Chen et al. (2019), para navegar por uma multidão densa de maneira socialmente compatível, os robôs precisam entender o comportamento humano e cumprir suas regras de cooperação. Na navegação social, o espaço pessoal humano é representado por um mapa de custos com células de alto custo em torno de um humano. Para Chik et al. (2019) a navegação social é diferente da navegação convencional, pois considera a segurança humana, a comodidade e a suavidade do caminho na busca de um caminho ideal para o robô, sem comprometer a eficiência da navegação.

Para Kruse et al. (2013), a navegação social é a interseção entre a pesquisa sobre a IHR e o planejamento do movimento do robô. Um robô móvel deve ser capaz de navegar livremente em seu ambiente e deve tratar de problemas comuns relacionados à navegação autônoma, como modelo de mundo, localização, planejamento de movimento e controle de movimento. No entanto, a coexistência de robôs e humanos em um mesmo ambiente adiciona algumas novas dimensões à mobilidade, como conforto e sociabilidade. Para robôs móveis comuns, a mobilidade geralmente pode ser resumida como o cálculo de movimentos que são seguros e ideais, como a distância percorrida que deve ser, de preferência, a menor possível. Se apenas a prevenção de colisão for levada em consideração ao decidir sobre uma localização e planejamento de trajetórias ideais, é possível criar um comportamento no robô que seja considerado desconfortável, rude ou inadequado (BARTNECK et al., 2020). Somado a ideia de navegação social, o planejamento de trajetória deve ser realizado de modo que o robô também não cause nenhum tipo de desconforto para o ser humano (KRUSE et al., 2013). As pessoas não devem ser vistas como simples obstáculos, pois existe um conjunto de regras sociais e culturais que regem a forma como as pessoas se movem, como, por exemplo, sempre se aproximar de uma pessoa pela frente.

Para Sprute, Tönnies e König (2019), a navegação social de robôs é um aspecto essencial para aumentar a aceitação de robôs de serviço em ambientes centrados no ser humano, por exemplo, ambientes domésticos. Os robôs precisam navegar de uma forma aceitável de acordo com as convenções, presença e necessidades dos usuários.

De acordo com Rios-Martinez, Spalanzani e Laugier (2015), navegação social é a estratégia apresentada por um robô social que identifica e segue as convenções sociais em termos de gestão do espaço, a fim de preservar uma interação segura e confortável com os seres humanos.

O comportamento resultante é previsível, adaptável e facilmente compreendido pelos humanos. A noção de segurança abordada aqui é a física, ou seja, evitar colisões que possam prejudicar seres humanos ou o próprio robô (RIOS-MARTINEZ; SPALANZANI; LAUGIER, 2015). Dois aspectos surgem relacionados à mobilidade de um robô social: o primeiro é determinar o movimento apropriado, onde este deve ser o mais natural possível, e o segundo é a interação através da movimentação, onde esta deve ser a mais social possível, e ambos devem colaborar para maximizar o conforto humano.

Para Xuan-Tung Truong e Ngo (2017), ao implantar os robôs em ambientes sociais, a primeira e mais importante questão é que o robô deve evitar não apenas obstáculos regulares, mas também humanos, enquanto navega com segurança em direção a um determinado objetivo. Neste contexto, a segurança humana no que diz respeito à navegação de robôs pode ser classificada em duas categorias: 1) segurança física e 2) segurança psicológica. A primeira categoria é manter uma distância física mínima entre o robô e os humanos. A segunda categoria no contexto da interação social humano-robô implica que o robô móvel não pode causar estresse e desconforto aos humanos durante sua navegação e interação.

Outros dois conceitos importantes para a navegação social são as regras e normas sociais. As regras sociais são leis escritas que orientam o comportamento de modo a manter a disciplina e a ordem. Assim, torna-se claro que as regras são diretrizes provenientes da autoridade e que precisa de adesão dos membros da organização. As regras destinam-se a assegurar o bom funcionamento de uma organização e também a prevenir o caos e os contratemplos. Há disposições para lidar com violações dessas regras, como a punição que é medida para os infratores. Já as normas sociais são as leis não escritas em uma sociedade que rege as ações e comportamentos dos seus membros. As pessoas que não respeitam as normas sociais podem receber sanções com diversos graus de importância. Se uma alguém não respeita a velocidade quando está dirigindo, ela tende a pagar uma multa. Se uma pessoa não cede o seu assento no ônibus para alguém idoso, pode ser que as pessoas presentes no veículo desaprovem esse comportamento. As pessoas também conhecem o comportamento que se espera delas e também as ações e comportamentos que devem evitar em todas as circunstâncias. Normas e ausência de normas afetam de forma ampla o comportamento humano. Normas sociais podem ser vistas como declarações que regulam o comportamento e atuam como controles sociais informais. Elas são geralmente baseadas em alguns graus de consenso e são reforçadas por sanções sociais.

Para Johnson e Kuipers (2018), normas sociais variam de princípios morais e éticos profundamente arraigados sobre mentir, roubar, etc., à convenções sociais, como dirigir do lado

direito da estrada (ou do lado esquerdo no Reino Unido e Japão). Em todo este espectro, as normas sociais são a maneira da sociedade de influenciar seus membros individuais para longe da maximização da utilidade individual egoísta e em direção a comportamentos que produzem maiores benefícios para toda a sociedade.

Para Dewantara e Miura (2016), um sistema de navegação de robô convencional geralmente se preocupa com a geração de um caminho (seguro e mais curto). No entanto, essa preocupação às vezes não diz respeito ao conforto humano. Em uma navegação social, o conforto humano se torna uma grande preocupação do que apenas o caminho mais curto. Conforto é uma condição psicológica em que um ser humano se sente seguro, apoiando-se na ausência de uma sensação de intimidação ou ameaça por algo. Ter espaço suficiente para realizar sua atividade atual ou futura é crucial.

O conforto do ser humano é um tópico estudado há vários anos no campo da IHR e da navegação social (KRUSE et al., 2013; TRUONG; YOONG; NGO, 2017; RIOS-MARTINEZ; SPALANZANI; LAUGIER, 2015). Cada vez mais se observa robôs sociais dividindo o mesmo espaço que o ser humano em hospitais, aeroportos, restaurantes, escolas e em nossas casas. Portanto, o interesse neste tópico pela comunidade científica vem aumentando nos últimos anos com a inserção cada vez maior de robôs nestes ambientes sociais.

Segundo Fong, Nourbakhsh e Dautenhahn (2003), o nível de conforto dos humanos interagindo com o robô é um mecanismo psicológico que se enquadra no desenvolvimento dos robôs sociais. A interação social pode ser projetada para tornar os humanos mais confortáveis, pois compartilham um espaço com o robô, da mesma maneira que a interação social apropriada ocorre entre humanos que compartilham um espaço, melhorando assim a sociabilidade no ambiente.

Em Kruse et al. (2013), os autores dividem os principais fatores da navegação social em conforto, naturalidade e sociabilidade. O conforto reflete o estado de espírito em relação à segurança e ao bem-estar. É uma medida complexa a ser avaliada, pois envolve a percepção do contexto, os sinais sociais, as micro expressões e a análise temporal do comportamento humano. Ao mesmo tempo, essa medida é muito importante como uma resposta a um robô social. A naturalidade reflete o comportamento de um robô, que busca se comportar o mais próximo possível dos humanos. Por fim, a sociabilidade reflete a maneira como o robô deve se comportar em ambientes sociais. Espera-se que as pessoas em um ambiente social sigam uma certa regra social, incluindo regras de distanciamento social.

Segundo Duffy et al. (1999), sociabilidade implica a existência de relações interativas. Um agente capaz de comportamento interativo e comunicativo é considerado social. Ser social está ligado à compreensão e, em alguns casos, imitando a atividade humana e a sociedade e cultura envolvente, que molda os valores, normas e padrões sociais. Os robôs sociais devem estar cientes das regras e normas sociais humanas e conceder privilégios a eles em todos os momentos. Quando possível, o robô deve estar ciente de seu próprio papel social, seu conhecimento de mundo e o que ele não sabe. Para Duffy et al. (1999), a simples existência de dois robôs autônomos no mesmo ambiente força aspectos do contato social, seja ele direto ou indireto. Entretanto, para Bartneck e Forlizzi (2004), robôs que apenas interagem e se comunicam com outros robôs não seriam considerados robôs sociais, pois falta o elemento humano.

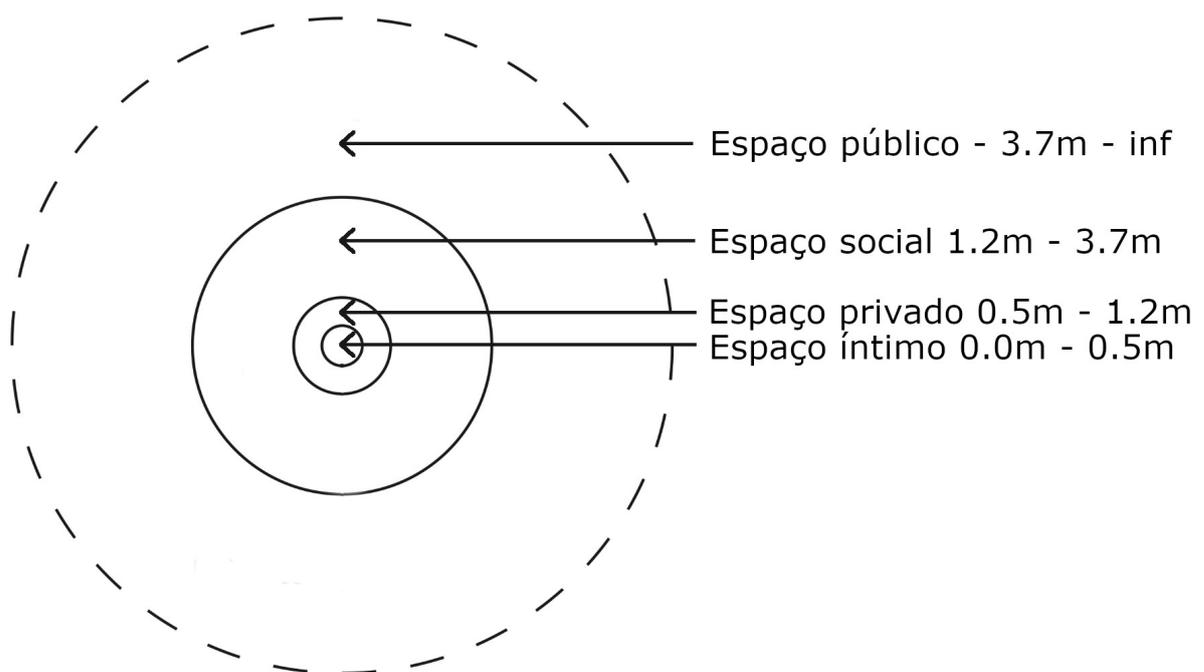
Para Kostavelis et al. (2016b), o tópico emergente da navegação social lida com robôs operando em ambientes complexos, considerando a conveniência dos humanos estarem presentes. Portanto, a administração do espaço sobre os humanos e sua reação ao interagirem entre si precisam ser compreendidos e modelados. A próxima etapa é a adoção de um comportamento humano consciente, enquanto o robô realiza atividades de navegação dentro do ambiente explorado. No entanto, durante a movimentação do robô é essencial considerar estratégias de navegação que facilitem a comodidade dos indivíduos presentes e aumentem a segurança. Por um lado, a segurança pode ser alcançada até um ponto usando os sensores do robô para evitar obstáculos típicos. Por outro lado, a resposta à conveniência do ser humano durante a operação do robô em um ambiente doméstico decorre das ciências sociais, onde o antropólogo Edward T. Hall (HALL, 1910) designou a teoria proxêmica.

Espera-se que as pessoas em um ambiente social sigam uma certa regra social, incluindo regras de distância. Os principais temas estudado na área de navegação social, neste sentido, são a teoria proxêmica (HALL, 1910) e modelos de força social (*Social Force Model - SFM*) (HELBING; MOLNAR, 1995).

A teoria proxêmica proposta por Hall (1910), é o estudo da manipulação e interpretação dinâmica do comportamento social humano que são controlados por regras socioculturais em encontros sociais. Este estudo define regras culturais e zona de intimidade, zona pessoal, zona social e zona pública (figura 3). Para permitir a interação humano-robô socialmente aceita, um robô deve ter a capacidade de compreender e respeitar este conceito. A proxêmica preocupa-se com a interpretação, manipulação e dinâmica do comportamento espacial em encontros sociais e leva em consideração representações físicas (ex: distância e orientação) ou psicológicas (ex: quantidade de contato visual ou simpatia) (MEAD; MATARIĆ, 2016).

De acordo com Hall (1974), o comportamento proxêmico não é transcultural e a experiência sensorial desejada de cada participante humano que interage, varia ao redor do mundo. Segundo Xuan Tung Truong e Ngo (2018a), as proxêmicas podem ser estendidas para um espaço social dinâmico que é um espaço de interação entre dois humanos, grupo de humanos, ou humano e objeto de interesse, e pode ser generalizada como um campo potencial que permite que o robô não se aproxime dos seres humanos dentro dessa zona e nem cause desconforto. Essa zona é incorporada ao sistema de planejamento de rotas garantindo conforto e segurança física e psicológica. No entanto, a distância de interação entre as pessoas não é o único elemento analisado, o lugar onde as interações ocorrem, também é importante para as normas sociais. Robôs que não respeitam o espaço pessoal, causarão reações negativas ou rejeição por parte do usuário (BARTNECK et al., 2020).

Figura 3 – Distâncias proxêmicas.



Fonte: Adaptada de Bartneck et al., 2020.

Para Chik et al. (2019), humano prefere manter uma distância proxêmica de outros humanos para fins de segurança e conforto, onde o espaço pessoal humano pode ser representado por um mapa de custos. Os mapas de custos proxêmicos atuais funcionam bem na definição do limite proxêmico, para manter a distância proxêmica homem-robô. A teoria da proxêmica, que descreve a convenção social humana e seu conceito correlato, são frequentemente usados para desenvolver o robô social. Para Patompak et al. (2017) ainda é um desafio formalizar esta teoria social no modelo matemático para representações sociais centradas em robôs.

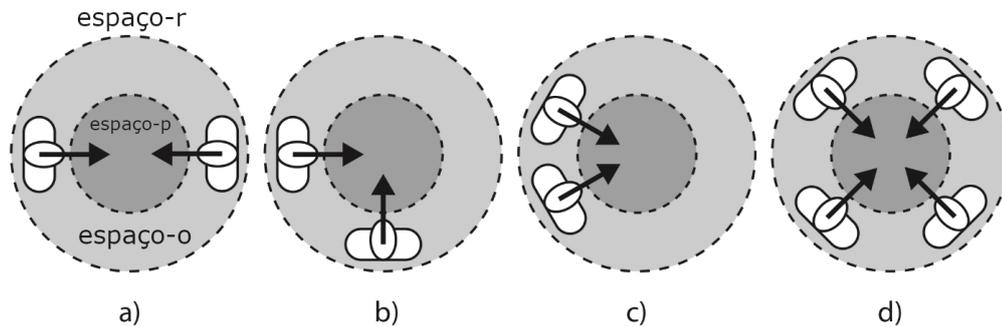
Por outro lado, o *Social Force Model* (SFM) sugere que o movimento de um pedestre, pode ser influenciado pelas motivações dessa pessoa para realizar certas ações (HELBING; MOLNAR, 1995). Essa força deve representar o efeito do ambiente (por exemplo, outros pedestres ou fronteiras) no comportamento do pedestre. Porém, a força social não é exercida pelo meio ambiente no corpo de um pedestre, mas pode-se dizer que um pedestre age como se estivesse sujeito a forças externas (HELBING; MOLNAR, 1995).

Um requisito essencial para a colaboração entre humanos e robôs é que o robô deixe suas intenções claras, legíveis e previsíveis para os humanos próximos (DRAGAN; LEE; SRINIVASA, 2013). Para Mavrogiannis, Thomason e Knepper (2018), legibilidade é quando uma pessoa compreende intuitivamente as intenções do robô. Segundo Dragan, Lee e Srinivasa (2013), a legibilidade é frequentemente descrita como o efeito de movimentos previsíveis ou esperados, enquanto previsibilidade, por outro lado, refere-se à qualidade da expectativa de correspondência do movimento legível, como movimento que permite um observador inferir com confiança o objetivo de uma ação após observar uma parte dessa ação. Quanto mais rápido isso acontece, mais legível é a ação.

Para Spexard et al. (2007), uma das competências que um robô social deve ter é uma consciência de Interação. Este termo é definido como o estado de um agente que é "capaz de perceber aspectos estruturais e/ou dinâmicos importantes de uma interação que observa ou em que ele próprio está envolvido" (SPEXARD et al., 2007). No entanto, para que um robô se torne ciente da interação, este robô precisa estar ciente do ambiente físico em que está inserido e de sua localização. Spexard et al. (2007) chama isso de consciência espacial, sendo definido como a capacidade do robô de perceber, entender seu ambiente espacial e fazer inferências para seu próprio comportamento a partir desse conhecimento.

Kendon (1990) apresenta os conceitos das formações F (*F-Formations*), vistas na figura 4. Essas formações são criadas por meio do posicionamento de duas ou mais pessoas em relação umas às outras, de modo que as áreas do espaço para as quais elas focam sua atenção sejam as mesmas. O espaço entre essas pessoas, que é aquele ao qual elas têm acesso igual, direto e exclusivo, é denominado Espaço O (*O-space*). Diz-se que os próprios participantes do grupo ocupam o espaço P (*P-space*) e estão rodeados pelo espaço R (*R-space*). As pessoas podem modificar suas posições para manter este espaço ou incluir outros participantes na conversa em grupo.

Figura 4 – Formações F. a) Formação face a face. b) Formação em L. c) Formação lado a lado. d) Formação circular.



Fonte: Adaptado de Bartneck et al., 2020.

#### 2.1.4 Ontologia

Uma ontologia é um conjunto de definições de tipos propriedades e relacionamentos de entidades em um domínio particular (GRUBER, T., 2009). Robôs e humanos compartilharem um vocabulário com definições claras e precisas de seus termos é uma condição indispensável para poder utilizar e compartilhar conhecimento na robótica (PRESTES et al., 2013). Esse conhecimento pode ser representado como uma rede semântica ou grafos. Ambos são capazes de representar os relacionamentos semânticos entre os conceitos. Adicionalmente, os robôs de serviço são designados para completar tarefas de serviço semi ou totalmente automáticas em ambientes específicos, além de também interagir com seres humanos e entender as intenções humanas para permitir a colaboração social (LIM; SUH; SUH, 2010). O uso de conhecimento do robô na forma de ontologia é utilizado no campo da robótica para realizar mapeamento, localização, visão cognitiva, interação homem-robô e desenvolvimento de robôs inteligentes (LIM; SUH; SUH, 2010).

Toda base de informação, sistema baseado em conhecimento ou agente que possua algum nível de inteligência é comprometido com alguma conceitualização implícita ou explícita do mundo (GRUBER, T. R., 1993). Uma ontologia é uma especificação explícita de uma conceitualização (GRUBER, T. R., 1993). Guarino, Oberle e Staab (2009) definem a ontologia como um tipo especial de objeto de informação ou artefato computacional. Uma ontologia computacional reúne significados para modelos formais de estrutura de sistema que possuem entidades relevantes e relacionamentos que emergem a partir da informação que é de alguma forma útil para nosso propósito (GUARINO; OBERLE; STAAB, 2009). Por fim, a especificação de um vocabulário representacional está no domínio de discurso compartilhado, ou seja,

definições de classe, relações, funções e outros objetos é chamado de ontologia (GRUBER, T. R., 1993).

A ontologia é composta por três partes principais: as classes, as propriedades e os relacionamentos. As classes são conjuntos de conceitos que compartilham propriedades e relacionamentos. Estas classes também podem conter subclasses. As propriedades ou atributos, descrevem conceitos com informações adicionais. Já os relacionamentos, especificam a forma como cada classe se relacionam umas com as outras.

Segundo Thomas R Gruber (1993), ontologias são desenvolvidas para suportar compartilhamento e reuso de representação de conhecimento formal através de sistemas de IA. Elas são projetadas para definir um vocabulário onde o conhecimento pode ser compartilhado e representado (GRUBER, T. R., 1993). A representação do conhecimento é baseada na conceitualização de uma visão simplificada e abstrata do mundo que se deseja representar para algum propósito (GRUBER, T. R., 1993).

Uma ontologia pode ser criada totalmente nova ou pode-se estender uma ontologia preexistente de forma que ela seja adaptada para o novo domínio de aplicação (GRUBER, T. R., 1993). Ela é utilizada como base para o raciocínio automatizado e para garantir interoperabilidade semântica em compartilhar informações entre sistemas de computadores (PRESTES et al., 2013).

Schlenoff et al. (2012) tratam sobre a criação de uma ontologia para robótica pela sociedade de robótica e automação (*Robotics and Automation Society - RAS*) do instituto de engenheiros elétricos e eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*). O RAS é uma sociedade que apoia o desenvolvimento e a troca de conhecimento científico nas áreas de robótica e automação, incluindo questões teóricas e aplicadas como por exemplo a definição de ontologia voltadas para robótica e automação. Essa ontologia é capaz de definir mais precisamente os conceitos de representação do conhecimento de um robô, facilitar a integração de dados mais eficiente e transferência de conhecimento entre sistemas robóticos. O grupo é dividido em 4 subgrupos voltados para metodologias de ontologia superior, robôs autônomos, robôs de serviço e robôs industriais.

Prestes et al. (2013) introduz um conjunto de ontologias que complementa o *Core Ontology for Robotics and Automation (CORA)* com noções de *design* industrial e posicionamento e atualizações para promover representação ontológicas das partes do robô. Prestes et al. (2013) apresentam 4 noções principais dentro do domínio da robótica e automação chamado *Core Ontology for Robotics and Automation (CORA)* que são: dispositivos, robôs, grupo de robôs, e

sistema robótico. O CORA foi baseado no *Suggested Upper Merged Ontology* (SUMO), uma ontologia que define as principais categorias de descrição ontológica para o mundo. Outras 3 ontologias dão suporte ao CORA: CORAX, RPARTS e POS. O CORAX é uma ontologia que inclui conceitos relacionados a associação entre *design*, interação e ambiente que não são cobertos pelo SUMO. O RPARTS trata das especificações dos tipos e partes de um robô. O POS estende o SUMO e complementa o CORA pela especificação de conceitos principais relacionados a entendimento de posição orientação e pose em sistema de coordenada.

## 2.2 Trabalhos relacionados

Esta seção apresenta o estado da arte em modelos e sistemas de navegação de robôs sociais móveis com foco no conforto humano em termos de interação espacial. A tabela 3 mostra os critérios de busca utilizados para a realização da revisão bibliográfica deste trabalho. Os métodos usados na revisão foram de leitura de resumo verificando os critérios de inclusão e exclusão realizando anotações, leitura de introdução e conclusão verificando critérios de qualificação do trabalho e dividindo por prioridade, e por fim a leitura do artigo completo realizando a síntese do mesmo e extração de informações sobre as questões levantadas (Vistas na tabela 3).

### 2.2.1 Tópicos de Pesquisa na Literatura

Ao longo dos trabalhos apresentados nesta revisão de literatura, foram estudados diversos pontos de interesse que servem para compor o desenvolvimento deste trabalho e responder às questões de pesquisa propostas na tabela 3. A seguir é apresentado um compilado dos principais trabalhos.

#### 2.2.1.1 Principais trabalhos e conceitos

Sobre navegação comum, Marder-Eppstein et al. (2010) apresenta uma navegação robusta de robô em ambiente de escritório. Enquanto Macenski et al. (2020) apresenta um trabalho mais recente sobre o mesmo tema. Pandey e Alami (2010) desenvolve um planejamento global usando diagrama Voronoi.

Sobre navegação social Luber et al. (2012) trata sobre a navegação social utilizando proximicas. Kruse et al. (2013) apresenta uma visão geral da navegação social e conceitos chave

Tabela 3 – Revisão

Tópico:	Modelos e sistemas de navegação de robôs sociais móveis com foco no conforto humano em termos de interação espacial.
Fontes:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Web Of Science</i><sup>1</sup></li> <li>• <i>IEEE Xplorer</i><sup>2</sup></li> <li>• <i>ACM Digital Library</i><sup>3</sup>.</li> </ul>
Crítérios de inclusão:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aspectos que envolveram o uso ou criação de modelos de navegação social.</li> </ul>
Crítérios de exclusão:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ambiente externo</li> <li>• Ambientes sem humanos</li> <li>• Aspectos da receptividade humana que não estão ligados à navegação</li> <li>• Sistemas semi-autônomos</li> <li>• Sistemas automotivos autônomos</li> <li>• Sistemas que não usam robôs móveis</li> </ul>
Questões:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Q1) Quais trabalhos desenvolvem ou utilizam soluções para a navegação social?</li> <li>• (Q2) Quais os principais conceitos que são abordados nestes trabalhos?</li> <li>• (Q3) Quais são as soluções propostas?</li> <li>• (Q4) Quais as métricas utilizadas para avaliar os trabalhos?</li> <li>• (Q5) Quais problemas ainda estão abertos?</li> </ul>

Fonte: Autor

como conforto, naturalidade, interações espaciais explícitas e implícitas enquanto Kruse et al. (2014) trata sobre legibilidade. Oli, L'Esperance e Gupta (2013) trata da influência da navegação social sobre o comportamento humano e sobre previsões de movimento. Lu, Allan e Smart (2013) aborda o uso de mapas de custo para navegação social. Li, Islas Ramirez e Chetouani (2014) realiza planejamento na navegação social. Charalampous, Kostavelis e Gasteratos (2016) apresenta um mapeamento social e reconhecimento de ações com proxêmica para modelar zonas sociais. Charalampous, Kostavelis e Gasteratos (2017) trata sobre uma revisão de navegação social com foco em tipos de mapeamento. Ferrer et al. (2017) realiza a navegação social no andar lado a lado e utiliza modelo de força social para previsão de intenção do ser humano. Por fim, Xuan Tung Truong e Ngo (2016, 2017) e Xuan-Tung Truong e Ngo (2017) desenvolve uma navegação social com uma pessoa ou grupo de pessoas paradas e movimento em diversas situações diferentes.

Alguns trabalhos tratam de percepção, onde Park et al. (2016) apresenta uma classificação e previsão de intenções humanas em multidão. Mead e Mataric (2017) realizam aplicação de proxêmicas para percepção de sinais sociais. Pfeiffer et al. (2018) tratam de aprendizado e previsão do comportamento.

Lim, Suh e Suh (2010) apresenta a aplicação de ontologia na robótica de serviço. Enquanto Calisi e Nardi (2009) trata sobre métricas de avaliação de desempenho em navegações de robôs.

### **2.2.1.2 Soluções propostas**

Em relação às soluções propostas nos trabalhos relacionados, várias delas representam a fronteira da navegação social atualmente e serviram de inspiração para o desenvolvimento desta tese.

Inicialmente foram observados trabalhos que exploram a robustez de uma navegação comum, levando em consideração objetos de difícil percepção em ambientes cotidianos como um escritório. Conforme visto em Marder-Eppstein et al. (2010) e Macenski et al. (2020), esses trabalhos exploram como tratar do obstáculos pequenos, ambientes apertados e os testes são realizados em ambiente simulado e real. Verificou-se que os métodos de planejamento de trajetórias utilizando DWA foram bastante utilizados, embora trabalhos mais recentes, como o (MACENSKI et al., 2020), sugeriram o uso do TEB como método de planejamento. Em (PANDEY; ALAMI, 2010) também é realizada uma diferenciação de objetos comuns e desconhecidos, pessoas, grupos de pessoas e convenções sociais.

Em relação a navegação social, em (KRUSE et al., 2013) é apresentado um robô real em situações específicas de interação e são realizados testes automatizados em ambiente simulado com alteração de medidas que supostamente influenciam no conforto do ser humano. Em (KRUSE et al., 2014), os autores realizam testes em ambiente real e simulado com resultados semelhantes, e tratam do conceito de legibilidade onde considera que o ser humano tem consciência do movimento do robô. A base para o desenvolvimento de uma camada de mapa de custos sociais para este trabalho foi inspirada em (LU; HERSHBERGER; SMART, 2014), que trata da criação de diversos tipos de mapas de custo semântico para navegação social. A integração em ambiente comum e navegação social foi inspirada em (TRUONG, X. T.; NGO, 2018a, 2016) que trata de um *framework* dividido em duas partes, navegação comum e extensão para uma navegação social. Observou-se também o desenvolvimento de modelos de navegação social, levando em consideração a proximidade (LUBER et al., 2012; BERA et al., 2017), em um ambiente com uma ou mais pessoas. (OLI; L'ESPERANCE; GUPTA, 2013) desenvolve um modelo de desvio de obstáculos baseado em SFM para tentar descobrir a influência da navegação sobre o comportamento humano a partir de pessoas que são classificados como cientes e não cientes

do movimento do robô. As cientes tentam desviar colisão e as não cientes possui risco de colisão. (LI; ISLAS RAMIREZ; CHETOUANI, 2014) também se utiliza deste princípio e leva em consideração que o humano é um agente reacionário capaz de influenciar na navegação, assumindo de forma otimista que o ser humano pode realizar evitar colisão. (CHARALAMPOUS; KOSTAVELIS; GASTERATOS, 2016) trata do reconhecimento de ações para modelar zonas sociais.

### **2.2.1.3 Métricas utilizadas**

Todos esses trabalhos contribuíram para desenvolver a metodologia apresentada e compor um cenário de testes e avaliação com métricas que exploram tanto aspectos de completude de navegação comum, quanto de conforto para navegação social nunca antes utilizados em outros trabalhos. Calisi e Nardi (2009) inspirou o desenvolvimento das métricas utilizadas para avaliar os experimentos apresentados neste estudo. O trabalho de Xuan-Tung Truong e Ngo (2017) também forneceu algumas métricas úteis, sendo utilizado o índice de sociabilidade e índice de conforto, além de medidas de segurança físicas e psicológicas. Em Ferrer et al. (2017) os seres humanos davam um *feedback* com controle remoto sobre o grau de conforto sentido nos experimentos.

### **2.2.1.4 Problemas em aberto**

Alguns trabalhos apresentam desafios ainda presentes na navegação social. Estes desafios constituem o espaço de contribuição ainda em aberto presente nesta área do conhecimento.

Kruse et al. (2013) afirma que é fácil medir eficiência de segurança, tempo e consumo de energia do robô, o desafio está em medir o conforto, a naturalidade e a sociabilidade que são subjetivos e dependem do contexto, além disso, o tempo e a preparação do laboratório e de pessoas para os experimentos também é um desafio, assim como o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação. Para Kruse et al. (2014), o conceito de legibilidade ainda não foi estudado a fundo na literatura sobre navegação social.

Para Xuan-Tung Truong e Ngo (2017), a maioria dos trabalhos da literatura atualmente, trata apenas de uma pessoa no ambiente em pé ou movendo linearmente e falta um modelo para situações genéricas. Xuan-Tung Truong e Ngo (2017) afirma que a teoria proxêmica, apesar de muito útil, não investiga características psicológicas, dinâmicas, idade, gênero entre outras e que

novas formas de avaliação de conforto precisam ser investigadas, assim como novos métodos de navegação social também precisam ser investigados.

Para Pfeiffer et al. (2018), ambientes de multidão ainda é um desafio. Charalampous, Kostavelis e Gasteratos (2017) diz que percepção e desvio de obstáculos dinâmicos são grandes problemas atuais, e que novas formas de realizar mapeamento social é um grande desafio. Para Calisi e Nardi (2009) ainda faltam ferramentas para avaliar sistemas de movimento de robôs.

Esta tese foca nos problemas relacionados a medir eficiência e segurança do robô; medir o conforto, a naturalidade, a legibilidade e a sociabilidade; desenvolvimento de uma metodologia de avaliação; e aplicações em situações genéricas. A seguir, são apresentados os trabalhos da literatura conforme o grau de relevância para essa tese.

### 2.2.2 Trabalhos de baixa e média relevância

Os trabalhos de baixa relevância apresentam os temas da navegação social, porém ainda estão em fase inicial de pesquisa, tratam de sistemas semi autônomos, emoções artificiais, acompanhamento guiado e aplicação em carros autônomos.

Em Sebastian, Banisetty e Feil-Seifer (2017) foi apresentada uma modificação do pacote ROS chamado `nav_core`<sup>4</sup> para usar a navegação social. Os testes foram realizados em ambientes simulados. Por fim, apresenta também uma arquitetura para o sistema de navegação social.

Obo e Yasuda (2018) apresenta um *framework* para navegação social através do desenvolvimento de um controlador fuzzy para realizar multitarefas em um ambiente de multidão, como um desafio. Eles planejam, em um trabalho futuro, construir um modelo mais realista e implementá-lo em um robô real.

No que diz respeito à navegação em ambientes de multidão, Park et al. (2016) apresenta um plano baseado nas intenções do ser humano. Trata da classificação das intenções humanas e da previsão de movimentos futuros em um ambiente dinâmico compartilhado entre robô e ser humano. Possui uma fase de treinamento *offline*, com testes realizados em ambientes simulados e reais, mas não foram realizados testes com robôs reais navegando.

Em Bera et al. (2017), um algoritmo em tempo real para navegação social foi apresentado. Os testes são realizados em ambientes simulados com dezenas de pedestres. O trabalho utiliza o conceito de proxêmica e distâncias interpessoais.

<sup>4</sup>[http://wiki.ros.org/nav\\_core](http://wiki.ros.org/nav_core)

O trabalho de Kostavelis et al. (2016a) tem como objetivo introduzir uma solução de planejamento de trajetória global ciente de humanos que possa considerar a presença de humanos em ambientes domésticos dinâmicos. São utilizados mapas semânticos hierárquicos para ajudar na solução e teoria das proximidades.

Dondrup e Hanheide (2016) utilizam mapa de custo de velocidade para realização de navegação social ao invés de tratar o ser humano como um obstáculo especial. A abordagem é utilizada em conjunto com DWA como planejador local, com testes realizados em ambiente simulado e real em um robô não holonômico.

O trabalho de Charalampous, Emmanouilidis e Gasteratos (2014) trata de mapeamento social e criação de zonas de conforto ao redor do ser humano utilizando imagens RGBD e proximidades.

O trabalho de Honig et al. (2018) é uma revisão que apresenta um *framework* para construção de um caminho sistemático para incorporar considerações sociais no desenvolvimento de robôs que seguem pessoas.

O trabalho de Kidokoro et al. (2013) apresenta 3 modelos que compõem a navegação social: fluxo de pedestres, interação de pedestres e conforto de caminhada com testes realizados em ambiente simulado e real.

O trabalho de Garrell et al. (2017) apresenta uma aplicação de SFM para navegação social em robôs aéreos. Ele adapta o SFM para ambientes 3D, realiza testes em ambientes reais e simulados e apresenta uma nova métrica de avaliação que não depende de *feedback* humano.

Turnwald et al. (2016) utilizam a teoria dos jogos para realizar navegação social. A teoria dos jogos fala sobre estudo de conflito e cooperação entre tomadores de decisões inteligentes racionais. Esta teoria foi escolhida, pois possui formulação matemática que incorpora o racional sobre possibilidade de ações dos outros e suas consequências. Dois possíveis caminhos são apontados neste trabalho para a modelagem da navegação social: o primeiro assume que as decisões são tomadas simultaneamente; o segundo assume que as decisões são tomadas de forma sequencial.

Mavrogiannis, Thomason e Knepper (2018) tratam do desenvolvimento de um *framework* de planejamento de trajetória com objetivo de deixar claro quais as intenções do robô para o ser humano. O trabalho usa os conceitos de legibilidade. Os testes são realizados em ambientes simulados.

Com esses trabalhos, foi possível observar que muitos autores se dedicaram nos últimos anos sobre o tema de navegação social. Eles abordam lógica *fuzzy*, ambiente de multidão,

percepção de intenções dos humanos, dentre outros. Estes trabalhos demonstram que o tema de navegação social vem crescendo nos últimos anos e apontam caminhos que podem ser seguidos como utilização de SFM e ambientes simulados nos experimentos.

### 2.2.3 Trabalhos de alta relevância

Um dos trabalhos mais relevantes encontrado na literatura é o de Kruse et al. (2013), que apresenta a navegação social como uma interseção das pesquisas em IHR e *Robot Motion Planning*. Na navegação, a interação com os humanos acontece tanto para a realizar o movimento do robô quanto para guiar os seres humanos. O trabalho apresenta conceitos de interação explícita, que acontece quando o robô causa uma reação no ser humano de forma intencional, e interações implícitas, quando uma reação é causada de forma não intencional, e a simples presença do robô em um ambiente pode causar esse tipo de interação. No trabalho de Kruse et al. (2013), a revisão teórica é dividida em três categorias, apresentando trabalhos relacionados à conforto, naturalidade e sociabilidade. Sobre as avaliações dos métodos, os autores afirmam que é fácil definir avaliação para medir eficiência, segurança, tempo, consumo de energia, caminho percorrido e colisão. Entretanto, o desafio está em medir o conforto, a naturalidade e a sociabilidade que são subjetivas e dependentes de contexto. O tempo requerido para a preparação do laboratório, do robô e das pessoas envolvidas nos experimentos torna a obtenção de resultados significativos impraticável. São propostas duas formas de avaliação: (1) O robô real em ambiente com pessoas em situações específicas de interação e (2) experimentos automatizados em simulador com alterações de medidas que supostamente influenciam no conforto. Contudo, para os autores, uma metodologia de avaliação consistente ainda é um desafio para a navegação social.

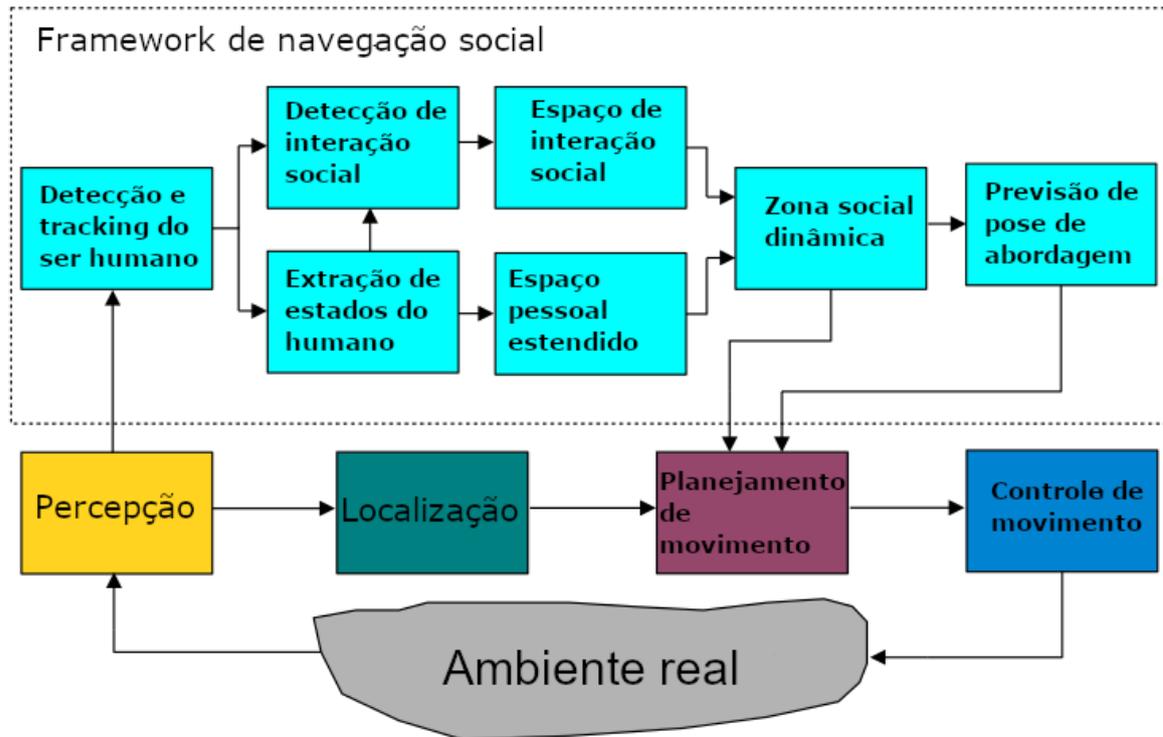
Entre os artigos altamente relevantes, o autor Truong *et al.* (TRUONG, X. T.; NGO, 2016; TRUONG; YOONG; NGO, 2017; TRUONG, X. T.; NGO, 2017, 2018a) foi o mais colaborativo no desenvolvimento de um modelo de navegação social. Os trabalhos de (TRUONG, X. T.; NGO, 2016) tratam sobre zonas sociais dinâmicas para navegação social. O trabalho propõe uma *framework* segura, confortável e eficiente para navegação social levando em consideração a posição, orientação, movimento e posição das mãos das pessoas. Ele também faz aplicação de zona social dinâmica em planejamento de trajetória convencional, apresenta novos índices de conforto e segurança com foco nas zonas sociais dinâmicas e divide a segurança em física e psicológica. Os autores apresentam alguns problemas de navegação social observados

em outros trabalhos, por exemplo, a maioria dos trabalhos trata de apenas uma pessoa no ambiente, humanos em pé ou casos específicos com humanos sentados ou movendo-se linearmente e a falta de um modelo de situações genéricas. O trabalho valoriza os conceitos de índice de segurança, sociabilidade e conforto. Medidas de segurança física e psicológica são utilizadas, bem como comportamentos socialmente aceitos de robôs com humanos. Os testes são realizados em ambiente simulado com gazebo e ROS e ambiente real. Xuan Tung Truong e Ngo (2017) apresentam um modelo de navegação social proativo que leva em consideração a interação entre humano-objetos e humanos-humanos em grupos sociais. Os testes são realizados em ambientes simulados e real.

A estrutura unificada para navegação social de Xuan Tung Truong e Ngo (2018a) é construída sobre a navegação convencional e pode ser dividida em duas partes: (1) navegação convencional e (2) extensão para navegação social. O desenvolvimento do *framework* de navegação social está dividido em 5 partes conforme mostrado na Figura 5: (A) detecção e rastreamento humanos, (B) extensão do espaço pessoal, (C) interação do espaço social, (D) zona social dinâmica e (E) estimativa e previsão de pose de abordagem para detecção e rastreamento humano usando fusão de sensor a *laser* para detecção de perna e sensor 3D para detecção de corpo. A extensão do espaço social é dividida em duas áreas, a parte frontal correspondendo ao campo de visão e a parte posterior. O espaço de interação social é dividido em duas partes: (1) detecção de grupos sociais e (2) modelagem de grupos sociais. A zona social dinâmica é um espaço de interação entre dois humanos, grupo de humanos ou humano e objeto de interesse. Essa zona pode ser generalizada como um campo potencial que permite ao robô não se aproximar de humanos dentro e não causar desconforto a eles. A zona social dinâmica é utilizada para no sistema de planejamento de rotas garantindo conforto e segurança física e psicológica. A estimativa da postura de aproximação segue duas condições: estar fora da zona social dinâmica e dentro da área de visão frontal. A abordagem de previsão de pose também é dividida em duas partes: (1) prever a posição futura da pessoa e (2) estimar a nova postura de abordagem.

Os testes em (TRUONG, X. T.; NGO, 2018a) foram realizados com base nas funções do mapa de custos, simulando o robô disponível no laboratório utilizando o DWA como técnica de planejamento local. O robô utilizado nos testes possui 2 rodas diferenciais. Três índices de conforto e segurança humana baseados em proximica e validação do comportamento do robô foram apresentados. Finalmente, os testes foram realizados com 10 tipos diferentes de situações sociais (figura 6), onde o robô deve navegar sequencialmente para abordar indivíduos estáticos, dinâmicos e grupos de humanos em várias situações sociais: 1) um grupo de duas pessoas mo-

Figura 5 – Esquema de navegação estendido para robôs de serviço móvel, consistindo em duas partes principais: 1) um esquema de navegação convencional e 2) navegação social (na cor ciano).

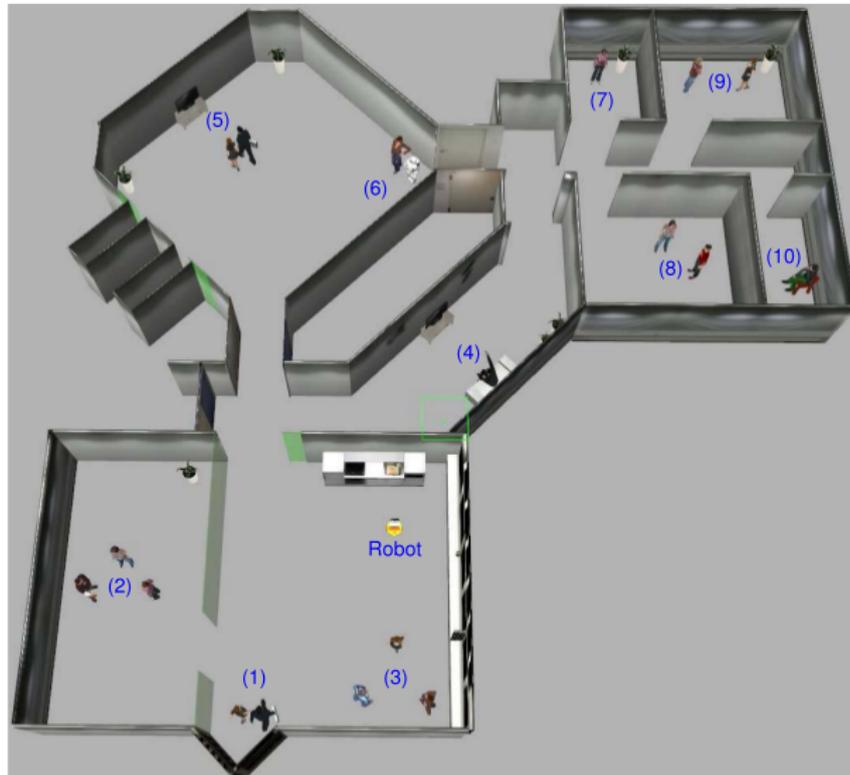


Fonte: Adaptado de Xuan Tung Truong e Ngo, 2018a

vendo para frente; 2) um grupo de três pessoas paradas formando um grupo aberto; 3) um grupo de três pessoas paradas formando um grupo fechado; 4) uma pessoa sentada assistindo televisão; 5) um grupo de duas pessoas assistindo televisão; 6) uma pessoa se movendo lado a lado com um objeto; 7) uma pessoa parada; 8) um grupo de duas pessoas paradas em formação de V; 9) um grupo de duas pessoas paradas frente a frente; e 10) uma pessoa sentada. O ambiente simulado apresenta 3 tipos de testes: simulação 1, utilizando apenas humanos retratados com objetos estáticos (navegação convencional); simulação 2, usando zona social dinâmica; e simulação 3, utilizando o *framework* de abordagem humana proposto pelos autores. O ambiente real também possui 3 tipos de teste: teste 1, onde o robô deve se aproximar de um humano ou grupo de humanos todos em pé; teste 2, onde o robô se aproxima do humano ou grupo de humanos em movimento; e teste 3, onde há um humano ou grupo de humanos interagindo com um objeto de interesse.

Por fim, o trabalho de Xuan Tung Truong e Ngo (2018a) apresenta três conclusões importantes: (1) A teoria proxêmica apresenta fundamentos de aproximação em humanos em ambientes sociais, entretanto, não investiga aspectos psicológicos das pessoas e conforto psico-

Figura 6 – Cenário simulado semelhante a um escritório com salas, portas, corredores, paredes, objetos e seres humanos. Três pessoas em movimento, duas pessoas sentadas e 13 pessoas em pé são distribuídas nesta fase.



Fonte: Xuan Tung Truong e Ngo, 2018a.

lógico, também não avalia a dinâmica, gestos, cultura, idade, gênero entre outras características do ser humano; (2) Novas formas de avaliação do conforto humano precisam ser investigados; (3) Novos métodos de navegação social também precisam ser investigados para poder integrar características do comportamento humano com a navegação do robô.

O trabalho de Charalampous, Kostavelis e Gasteratos (2016) propõe um método de mapeamento social utilizando mapas 3D, reconhecimento de ações e teoria proxêmica. O trabalho é construído com mapas sociais que incorporam reconhecimento de ações humanas para modelar as zonas sociais no espaço de trabalho do robô para determinar o comportamento navegacional em ambientes domésticos com atividades humanas. As principais contribuições dos trabalhos foram a construção de mapa social com reconhecimento de ações humanas em um contexto dependente de zonas sociais, integração deste contexto dependente de zonas sociais com regras proxêmicas e realização de navegação de robôs de forma eficiente.

Pandey e Alami (2010) apresentam o desenvolvimento de um *framework* para navegação social com planejamento global usando diagrama de Voronoi. Faz diferenciação de objetos co-

muns, desconhecidos, pessoas e grupo de pessoas e racionamento de alto nível para tratamento de convenções sociais. Tem como objetivo a construção de um sistema de navegação de robô móvel que possibilite extração automática de informação global e local sobre planejamento de trajetórias, tomada de decisão dinâmica sobre regras e convenções sociais, replanejamento levando em consideração as convenções sociais e trata objetos, pessoas e grupo de pessoas de forma diferente. A metodologia utilizada foi: (1) extração de estrutura do ambiente, (2) aplicação de regras diferentes como convenções sociais geral e guias de aproximação social, (3) adaptação seletiva das regras, (4) construção de árvores de decisão, (5) lidar com humano dinâmico, (6) lidar com obstáculos previamente desconhecidos, (7) gerar caminho suaves, e (8) realizar prova de convergência.

O trabalho de Li, Islas Ramirez e Chetouani (2014) apresenta uma melhoria do *Human Aware Motion Planner* (HAMP) intitulado *Potential Human Reaction Aware Motion Planner* (PHRAMP). O HAMP tem como objetivo encontrar um planejamento de movimentação que otimize a função de custo do qual não somente inclui o custo relacionado ao robô, mas também relacionado ao ser humano. O novo *framework* PHRAMP leva em consideração que o ser humano é um agente reacionário e pode influenciar na navegação do robô levando em consideração as reações potenciais do ser humano para a construção dos planejadores do movimento do robô. O trabalho introduz o conceito de planejamento de movimento ciente de reação potencial humana. Ele apresenta um *framework* para esta abordagem e assume de forma otimista que o ser humano sempre pode reagir às ações do robô. Essa abordagem otimista tenta identificar as ações potenciais do ser humano e reagir de acordo com elas, assumindo que o ser humano é um agente cooperativo. É apresentado um *framework* de minimização de custo potencial utilizado para o desenvolvimento do trabalho de PHRAMP. Os testes são realizados em ambiente simulado e mostra a comparação de abordagem levando em consideração o movimento potencial do ser humano para evitar a colisão com o robô e levando em consideração que o ser humano não saia do lugar para evitar a colisão do robô, sendo o primeiro caso uma visão otimista, da qual o trabalho trata.

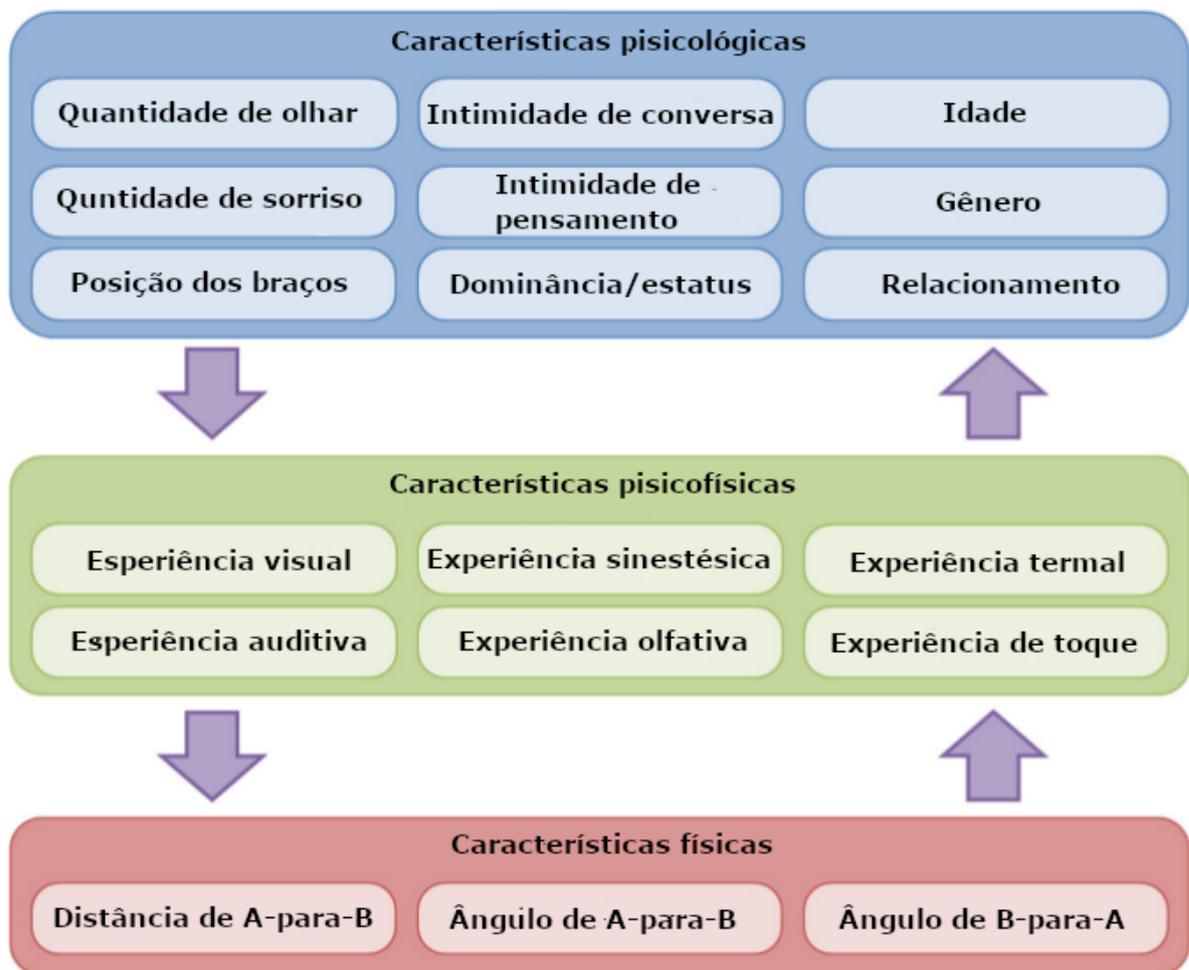
O trabalho de Ferrer et al. (2017) trata de um *framework* para a navegação social com foco em andar lado a lado com o ser humano em ambiente de multidão, em áreas urbanas de modo natural e seguro. O trabalho estende o modelo de força social e define o que é um andar lado a lado em ambiente de robô de serviço. O trabalho leva em consideração os conceitos de extensão do modelo de força social, onde o robô é capaz de exercer uma força não física capaz de influenciar a navegação do ser humano. Ele utiliza conceitos de predição de intencionalidade

capazes de prever a intenção de movimentação do ser humano. Por fim, leva em consideração técnicas de aprendizado. Considera também 3 forças para o modelo de força social estendida: (1) pessoa-pessoa, (2) pessoa-obstáculo, e (3) pessoa-robô. Os experimentos são feitos com seres humanos, dando *feedback* sobre o grau do conforto usando um controle remoto.

O trabalho de Mead e Mataric (2017) trata sobre a aplicação da teoria de proxêmicas, o uso social de espaço. O trabalho apresenta um *framework* computacional baseado em proxêmicas e modelos probabilísticos baseados em dados para sinais sociais, como eles são produzidos e percebidos pelo robô. São utilizadas 3 características de representação vistas na Figura 7: (1) físicas, (2) psicofísicas e (3) psicológicas. As características físicas são relacionadas a como o espaço é utilizado por um ou mais corpos, e utiliza parâmetros espaciais de baixo nível como distância e orientação. As características psicológicas tratam com a relação entre 2 ou mais agentes e relações interpessoais de alto nível. As características psicofísicas estão relacionadas com percepção e produção de estímulo social por 2 ou mais agentes. O desenvolvimento do trabalho é dividido em 3 partes: (1) extração de características de distância e orientação do ser humano; (2) desenvolvimento do controlador reativo do proxêmicas; e (3) construção do planejador de trajetória baseado em mapa de custo, para maximização da autonomia de reconhecimento de fala e gesto durante percurso do robô até o destino. O trabalho acaba focando nas características psicofísicas do *framework* para proxêmicas de humano-robô. Foca também na maneira em que percepções de fala e gesto são produzidas pela pessoa e percebidas pelo ser humano. Isso ajuda na predição de desempenho e medida de autonomia para os sistemas de reconhecimento de fala e gestos.

O trabalho de Pfeiffer et al. (2018) trata de utilização de treinamento para previsão de comportamento usando dados reais em ambiente com objetos estáticos espalhados utilizando modelo de *Long Short Term Memory* (LSTM) para treinamento usando redes neurais. A grande contribuição do trabalho é o uso de LSTM para previsão de trajetória humana. Utiliza redes neurais recorrentes e funde 3 canais de informações: (1) velocidade dos pedestres, (2) informações de obstáculos estáticos em forma de grade de ocupação, e (3) informações de pedestres ao redor. O trabalho apresenta testes em ambientes reais e simulados. Os resultados são mais eficientes comparados com outros trabalhos que tratam de previsão de movimentos, entretanto o ambiente de multidão ainda é um desafio. O trabalho, por fim, apresenta previsão com acurácia alta, mas ainda precisa ser integrado com uma plataforma móvel em ambiente real e com presença de multidão.

Figura 7 – Representações de comportamentos proxêmicos: De cima para baixo, características psicológicas ditam a experiência psicofísica (sensorial) desejada de cada agente interagente, manifestada fisicamente através da manipulação do espaço por meio de mudanças na posição e orientação interagentes. De baixo para cima, essas mudanças físicas em pose afetam a experiência sensorial psicofísica, que, por sua vez, afeta a relação psicológica, fechando assim o *loop* em representações de comportamentos proxêmicos.



Fonte: Adaptado de Mead e Mataric, 2017.

O trabalho de Kruse et al. (2014) tem como objetivo avaliar a utilidade do modelo de custo adaptado chamado *context cost* em ambientes reais e dinâmicos. Nas experiências foi utilizado o ROS com o robô PR2 e o planejador global HAMP para prover planejamento de trajetória ciente de humano. O planejador local foi usado o algoritmo de *way point following* sem desvio de obstáculo global. Ele realiza testes em ambiente simulado e real com resultados semelhantes. O trabalho trata do conceito de legibilidade dentro da navegação social, onde o robô considera que o humano tem consciência do movimento do robô ou não. O ser humano pode estimar o comportamento do robô e isto é levado em consideração na racionalidade do

robô. Este conceito não foi levado em consideração a fundo no estado da arte sobre navegação social até então. O trabalho diferencia a legibilidade de previsibilidade, e leva em consideração a direção do movimento e o caminho como sinais sociais, além de definir legibilidade como a naturalidade guiada pelos sinais sociais de direção do movimento e caminho.

O trabalho de Oli, L'Esperance e Gupta (2013) leva em consideração a navegação do robô influenciando no comportamento humano. Ele usa a previsão do movimento humano para o planejamento de trajetória. É um modelo de desvio de obstáculos para pessoas baseado em forças sociais. O interesse deste trabalho está em descobrir a influência da navegação do robô sobre o comportamento humano, para isso foi desenvolvido um modelo que prevê o comportamento do humano baseado no movimento de ambos, robô e humano. O trabalho resolve o problema do congelamento do robô, onde um robô fica parado por não ter movimentação suficientemente segura próximo a um humano. Ele trata o humano como um ser reativo às ações do robô, podendo este mudar de posição e trajetória a partir das ações que o robô toma. O trabalho também salienta que nem todos os humanos seguem o modelo de previsão e por isso é preciso tomar cuidado. As pessoas são classificadas como cientes e não cientes da presença do robô no ambiente. As cientes normalmente tentam desviar do robô, enquanto as não cientes possuem grande risco de colisão. A classificação normalmente é feita com a direção do olhar como sinal social. O trabalho combina modelo de comportamento de movimentação humana com abordagem do tipo DWA. Ele leva em consideração dois comportamentos humanos, se a navegação não for obstruída ou interrompida por algum elemento externo e continua o planejamento atual, caso contrário muda a rota. A grande contribuição deste trabalho é o planejamento de trajetória levando em conta o movimento que o humano faz para evitar a colisão com o robô utilizando um método reativo, rápido e que incorpora o conceito de que o humano pode estar ciente do robô ou não. São realizados 3 testes em ambientes simulados, o primeiro com humano esperando o robô se mover, o segundo em uma situação de corredor, e o terceiro em um espaço de multidão. Os autores planejam futuramente realizar testes em ambiente real.

Charalampous, Kostavelis e Gasteratos (2017) apresentam uma revisão sobre as recentes descobertas e tendências sobre a navegação social. O artigo começa dando uma visão geral sobre o desenvolvimento da navegação nos últimos anos, passando pela navegação comum onde o robô deve apenas ir de um ponto a outro sem se preocupar com seres humanos, mapeamento métrico, mapeamento semântico e mapeamento social como ferramentas importantes para a navegação social. Ele descreve níveis de percepção robótica, foco em métodos relacionados com navegação social, disponibilidade de base de dados públicos para comparação destes métodos

assim como problemas em aberto para serem resolvidos relacionados com a operação de robôs próximos ao humano. O trabalho também trata do mapeamento semântico, assim como processamento de linguagem natural e processamento de sinais e gestos como pontos importantes para a navegação social. O artigo é dividido em mapas métricos básicos, mapas semânticos e mapas sociais utilizando sinais sociais. Estes 3 tipos de mapeamento são retratados em ambientes internos e externos. O mapeamento social também trata de mecanismos de previsão, métodos de extração de informação do corpo humano e tratamento de contexto. O trabalho apresenta *benchmarks* e base de dados públicos para mapeamento métrico, semântico e social. Para os autores, a camada de percepção é um desafio fundamental, assim como desenvolvimento de novas métricas e mapeamento semântico. Os tópicos mais importantes são descrição de características na área de percepção, otimização e mapeamento de métricas para avaliação. Os problemas em aberto apresentam questionamentos sobre desvios de obstáculos dinâmicos, discute sobre formas de avaliar técnicas de mapeamento social, discute se o mapeamento social pode ser adequado para ambientes de multidão.

A pesquisa intitulada "*The office marathon: Robust navigation in an indoor office environment*" (MARDER-EPPSTEIN et al., 2010) apresenta um estudo de navegação robusta para robôs móveis em ambientes de escritório. Ela apresenta um problema no qual os robôs são capazes de evitar obstáculos e paredes com sensores a *laser*, mas têm dificuldade em evitar obstáculos além do alcance do *laser*. O artigo explora como tratar obstáculos 3D e pequenos obstáculos no caminho do robô. O desafio era evitar obstáculos com uma estrutura 3D nada trivial, além de navegar por ambientes apertados como corredores e portas. O autor usa o tempo de autonomia na tarefa de navegação autônoma como prova da robustez do sistema de navegação. Para avaliar a competência de navegação, o robô foi confrontado com alguns testes, tanto em ambientes simulados como reais. O robô completou as tarefas de navegação em ambientes simulados e reais, evitando pequenos obstáculos de até 6 cm de altura.

Mais recentemente, foi publicado o trabalho intitulado "*The Marathon 2: A Navigation System*" (MACENSKI et al., 2020), no qual são estudadas as tendências atuais da robótica para criar um novo sistema de navegação, baseado nas experiências de pesquisadores que trabalham com o framework ROS. Entre as novidades estão o controlador *Timed Elastic Band* e uma estrutura para fusão de sensores. Neste trabalho, o robô percorreu aproximadamente 60 km, durante os experimentos, utilizando o novo *framework* ROS2.

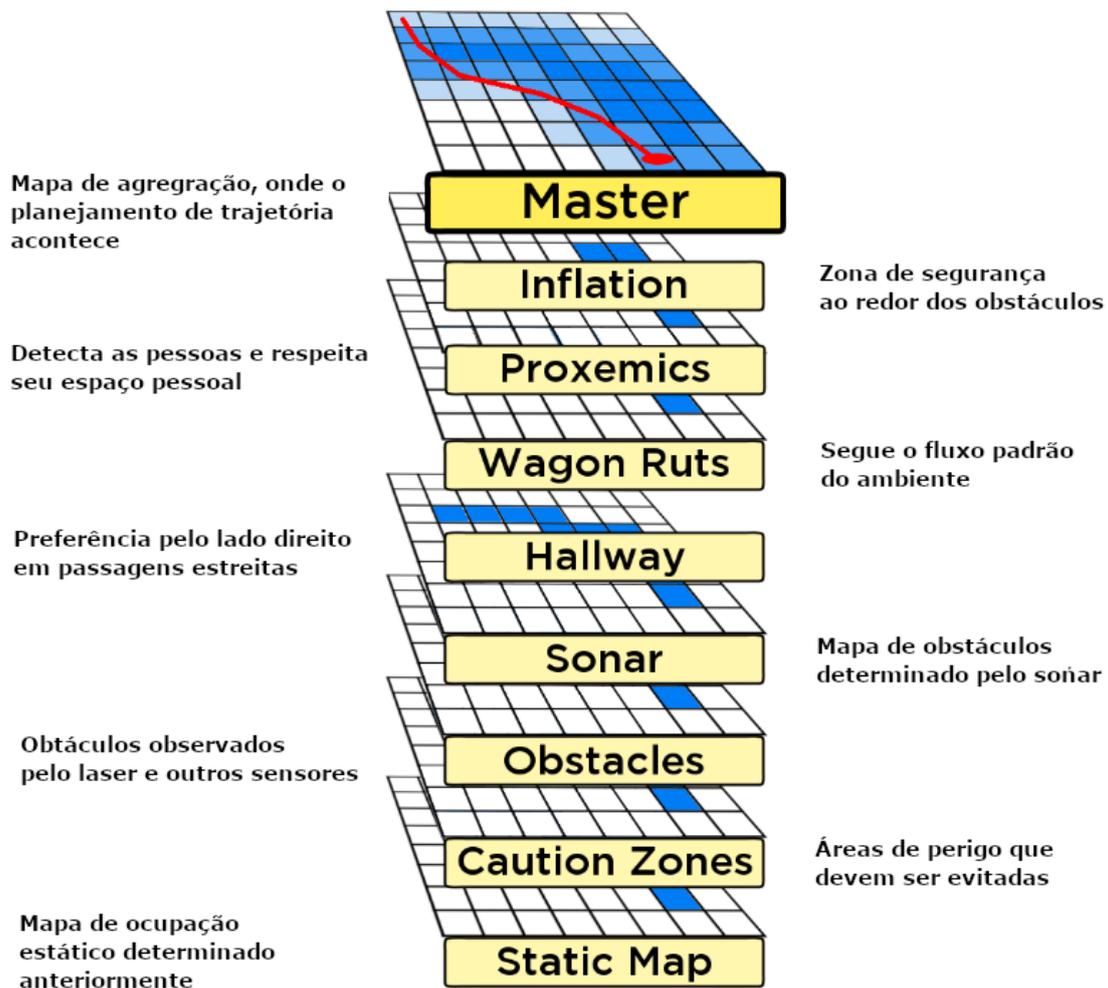
O trabalho de Lu, Allan e Smart (2013) trata de otimização de função de custo para navegação social utilizando ROS. Em (LU; HERSHBERGER; SMART, 2014), os autores de-

envolvem e implementam um mapa de custos de camadas semânticas (Figura 8). Os autores afirmam que não basta que o robô evite obstáculos apenas para impedir colisões. É necessário tratar os obstáculos de forma diferente, dependendo da natureza de cada obstáculo. Existem vários cenários que levam em consideração o espaço pessoal humano, onde o caminho mais curto nem sempre é o melhor. O trabalho divide as camadas do mapa de custos em classes, sendo as principais: a camada padrão e a camada de interações humano-robô. O padrão é derivado de mapas de custos comuns usados na literatura e consiste em uma camada de mapa estático, representando o mapa estático do ambiente; camadas de obstáculos, representando os obstáculos identificados pelos sensores; camada de voxel, também relacionada aos obstáculos detectados em representação 3D; e camada de inflação, responsável por inflar obstáculos, criando uma região livre de colisões. As camadas de interação homem-robô, compostas por uma camada proxêmica, representam a proxêmica ao redor de cada pessoa; a camada do corredor é responsável por fazer o robô preferir traçar rotas à direita de um ser humano, pois esta é uma regra social presente em algumas culturas. Esta abordagem de mapa de custos em camadas, permite uma ampla variedade de representação do comportamento robótico relacionado às regras sociais.

Sobre ontologia, o trabalho de Lim, Suh e Suh (2010) intitulado “*Ontology Based unified robot knowledge for service robot in indoor environment*”, apresenta um *framework* dividido em duas partes. A primeira é a descrição de conhecimento e a segunda a associação do conhecimento. A descrição inclui a compreensão integrada do robô derivado de conhecimento de baixo nível relativos à percepção de características, partes de objetos, mapas métricos e comportamentos primitivos, assim como conhecimento de alto-nível sobre conceitos de percepção de objetos, mapas semânticos, tarefas e contextos. A associação de conhecimento usa uma interface lógica que permite que o raciocínio seja realizado mesmo com somente parte da informação disponível. Segundo Lim, Suh e Suh (2010), o conhecimento do robô é uma ferramenta chave que permite que o robô de serviço tenha sucesso nas tarefas em ambientes reais. Lim, Suh e Suh (2010) apresenta em seu trabalho, uma ontologia para robôs de serviço inteligente para especificar conhecimentos que seja compartilhado através de vários campos da robótica.

Em Calisi e Nardi (2009) uma especificação de métricas para avaliar o desempenho de navegação do robô é apresentada. Neste trabalho, os autores utilizam o conceito de trajetória como uma sequência contínua de estados seguindo um plano específico e o conceito de caminho como uma curva geométrica que o robô descreve em um espaço de configuração. Apenas a forma da curva é considerada e as métricas são aplicadas sobre esses dois conceitos. O trabalho

Figura 8 – Camadas de navegação.



Fonte: Adaptado de Lu, Hershberger e Smart, 2014

apresenta o problema de um sistema de movimentação de robôs que deve considerar a avaliação do tempo de execução de uma tarefa de navegação do robô, o modelo do robô utilizado, o que implica restrições dinâmicas e cinemáticas, o modelo do ambiente e como estão as informações sobre o ambiente. Como fatores críticos, devem ser avaliados as características de trajetória e problemas relacionados à física e a escolha do sistema de movimento que afeta o estado do mundo, como a velocidade do robô e sua posição final.

Em Calisi e Nardi (2009), os autores também dividem o problema de navegação em dois subproblemas. O primeiro está relacionado ao destino do robô, onde o desafio é ir para uma posição específica ou para uma posição próxima a um objeto ou pessoa. O segundo problema está relacionado à física, em que o robô precisa manter uma navegação segura e confortável ao mesmo tempo em que planeja uma trajetória suavizada. Segundo Calisi e Nardi (2009), se a trajetória não for suave, torna-se mais difícil aplicar o controle no mundo real, pois o robô pode

ser danificado com movimentos bruscos e isso resulta em um comportamento menos aceito socialmente.

Os experimentos em (CALISI; NARDI, 2009) foram realizados em diferentes ambientes, algoritmos de planejamento de caminhos e tipos de mapeamento, concluindo que ainda faltam ferramentas para avaliar sistemas de movimentação de robôs. Apresenta passos para uma padronização da avaliação dos sistemas de navegação em tarefas de movimento puro. Para os autores, mapear e localizar são tarefas que podem ser avaliadas separadamente.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia de desenvolvimento aplicada nesta tese. Nas próximas seções serão listados os materiais usados para a realização dos experimentos na pesquisa (seção 3.1), quais as métricas para avaliação dos experimentos (seção 3.2), e por fim, quais os procedimentos realizados (seção 3.3).

#### 3.1 Materiais

A sessão de materiais é dividida em duas partes. A primeira parte com os materiais de hardware, onde é apresentado a configuração da máquina, onde foram realizados os experimentos simulados e a configuração do robô HERA, utilizado como estudo de caso nesta tese, e a segunda parte onde são apresentados o conjunto de softwares utilizados.

##### 3.1.1 Hardware

Para a realização dos experimentos simulados, foi utilizada um computador *desktop* DELL XPS 8500 com 8 processadores intel® Core™ i7-3770 CPU @ 3.40GHz, 12GB de memória RAM, Sistema operacional Ubuntu 18.04 LTS (Bionic Beaver) 64 bits e placa gráfica NVIDIA GeForce GT640.

Em ambiente real, foi utilizada a plataforma robótica de assistência doméstica (*Home Environment Robot Assistant* - HERA) (TECHI et al., 2020) visto na figura 9, tanto sua versão real quanto simulada. A plataforma HERA foi desenvolvido pela equipe RoboFEI@home<sup>1</sup> no Centro universitário FEI<sup>2</sup>. As partes que compõem o robô podem ser vistas na tabela 4:

##### 3.1.2 Software

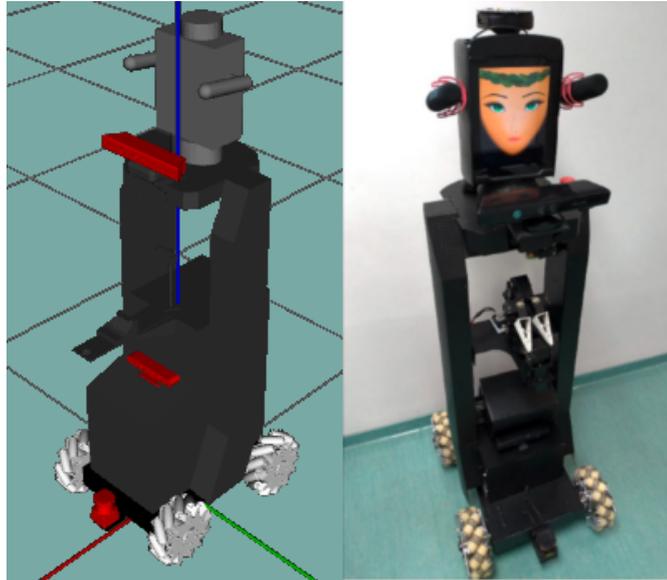
As principais ferramentas utilizadas ao longo do trabalho foram o Gazebo (9.0.0) utilizado nos experimentos simulados e o *Robot Operating System* (ROS) na versão Melodic para desenvolvimento dos módulos do robô.

---

<sup>1</sup><http://robofei.aquinno.com/athome/>

<sup>2</sup><https://portal.fei.edu.br/>

Figura 9 – Versão real e simulada da plataforma HERA. Na versão simulada (lado esquerdo), os sensores robóticos usados neste estudo podem ser vistos em vermelho.



Fonte: Autor.

Tabela 4 – Os componentes da da plataforma HERA (versão 2020 (TECHI et al., 2020)).

Controle:	Mini PC Zotak ZBOX-EN-1060K, Intel® Core™ i5 7500 CPU, 8GB RAM e placa gráfica GeForce GTX 1060	
	Sensores:	Atuadores:
Base:	1 Laser Hokuyo UTM-30LX, 1 Laser Hokuyo URG-04LX-UG01, e 1 câmera de profundidade Asus Xtion pro.	1 Base Omnidirecional ( <i>Mecanum Wheel Vectoring Robot - IG52 DB</i> ).
Torso:	1 Botão de Emergência.	1 Manipulador com 7 graus de liberdade.
Cabeça:	1 câmera RGB de profundidade Microsoft Kinect, 1 Multi-sensor Matrix Creator, e 2 Microfones direcionais RODE VideoMic GO.	1 Apple Ipad (3ª geração) servindo como um <i>display</i> para interação da face.

Fonte: Autor.

O Gazebo<sup>3</sup> é um simulador dinâmico 3D com habilidade de eficientemente e corretamente simular populações de robôs em ambientes complexos internos e externos. Similar à *engines* de jogos, o Gazebo oferece simulação de física com um alto grau de fidelidade, um conjunto de sensores e interfaces para usuários e programas. Os principais usos do Gazebo incluem testes de algoritmos para robótica, criação de robôs e realização de testes em cenário realístico. Suas principais características incluem a utilização de *engines* de física, uma rica biblioteca de modelos de robôs e ambientes, uma grande variedade de sensores e interface gráfica.

<sup>3</sup><http://gazebosim.org/>

O ROS<sup>4</sup> é um *framework* que auxilia na escrita de software para robôs. Ele possui uma coleção de ferramentas, bibliotecas e convenções com o objetivo de simplificar a criação de programas para tarefas complexas e robustas em robôs, independente da plataforma.

A plataforma HERA utiliza o ROS como ferramenta de comunicação entre seus módulos. A seguir são apresentados os pacotes de ROS implementados especificamente para a plataforma HERA. As principais linguagens de programação utilizadas na implementação foram o C++ e o Python por serem robustas e poderosas. O Python é utilizado na maior parte desta tese, entretanto nas aplicações que necessitam de interação com o Gazebo, o C++ foi escolhido por ter uma *Application Program Interface* (API) mais robusta com o simulador.

A seguir são apresentados os pacotes de ROS desenvolvidos e utilizados nesta tese.

Pacotes específicos da plataforma HERA:

- a) **hera\_description**<sup>5</sup> - Modelo de descrição e simulação escrito em formato de descrição robótica unificado (*Unified Robotic Description Format* - URDF) e Macros de XML (*XML Macros* - XACRO)<sup>6</sup>;
- b) **hera\_nav**<sup>7</sup> - Implementação da Pilha de Navegação do ROS (RNS)<sup>8</sup> (*ROS Navigation Stack* - RNS);
- c) **hera\_bringup**<sup>9</sup> - Arquivos de inicialização para operar a plataforma.

Aqui é apresentado o conjunto de pacotes do RNS especializados na navegação de uma base móvel:

- a) **gmapping**:<sup>10</sup> é um pacote capaz de prover mapeamento e localização simultânea baseado em um sensor *laser*;
- b) **map\_server**:<sup>11</sup> é um pacote do ROS que fornece informações sobre o mapa gerado pelo *gmapping* e que pode ser utilizado pelo robô para navegação;
- c) **amcl**:<sup>12</sup> é um sistema de localização probabilístico para um robô móvel em um ambiente 2D. Ele implementa o método de localização adaptativo de Monte Carlo que usa um filtro de partículas para rastrear as posições do robô em um mapa conhecido;

---

<sup>4</sup><http://www.ros.org/>

<sup>5</sup>[https://gitlab.com/fpimentel/hera/hera\\_description](https://gitlab.com/fpimentel/hera/hera_description)

<sup>6</sup><http://wiki.ros.org/urdf>

<sup>7</sup>[https://gitlab.com/fpimentel/hera/hera\\_nav](https://gitlab.com/fpimentel/hera/hera_nav)

<sup>8</sup><http://wiki.ros.org/navigation>

<sup>9</sup>[https://gitlab.com/fpimentel/hera/hera\\_bringup](https://gitlab.com/fpimentel/hera/hera_bringup)

<sup>10</sup><http://wiki.ros.org/gmapping>

<sup>11</sup>[http://wiki.ros.org/map\\_server](http://wiki.ros.org/map_server)

<sup>12</sup><http://wiki.ros.org/amcl>

- d) **move\_base**:<sup>13</sup> provê a implementação de uma ação que dado uma posição no mundo (*goal*), o robô tentará alcançar essa posição com uma base móvel. O *move\_base* combina planejamento global e local para realizar a tarefa de navegação.

Aqui são apresentados também os pacotes de ROS implementados para o desenvolvimento desta pesquisa<sup>14</sup>:

- a) **social\_worlds** - Ambientes de simulação modelados no Gazebo utilizados para explorar as capacidades de atuação de um robô social em diversos cenários;
- b) **social\_move\_base** - Um pacote que executa sobre o *move\_base*, presente na pilha de navegação do ROS, sua função é receber comandos de navegação com um nível maior de complexidade e traduzir para o *move\_base* servindo assim como uma camada de interface entre o robô social e o *move\_base*. Ao invés do robô social enviar uma pose de destino, requisitada pelo *move\_base*, o robô envia uma identificação do destino, o pacote então identifica se o destino é um local ou uma pessoa, e determina a pose de destino mais adequada que o robô se dirigir;
- c) **social\_layers** - Define as camadas de navegação social utilizadas para construir o planejamento da trajetória do robô, sendo construída em cima do *costmap\_2D*<sup>15</sup> do ROS e se baseia no trabalho de (LU; HERSHBERGER; SMART, 2014).
- d) **social\_reasoning** - Constrói e publica a representação do conhecimento necessário para as interações sociais. Utiliza informações das pessoas, objetos e locais, armazenando as informações em um banco de dados;
- e) **social\_msgs** - Possui o conjunto de mensagens utilizadas pelos pacotes anteriores.

Por fim, as ferramentas de terceiros utilizados nesta pesquisa:

- a) **PedSim** - Pacote para ROS que simula pedestres utilizando modelo de força social (HELBING; MOLNAR, 1995). Este pacote é útil para experimentos de navegação de robô com cenas com multidão que são difíceis de adquirir na prática;
- b) **Protègè** - Um editor e interface gráfica para construção de ontologias em código aberto e gratuito para a construção de sistemas inteligentes. Essa ferramenta é utilizada para construir soluções baseadas no conhecimento em áreas diversas como biomedicina, comércio eletrônico e modelagem organizacional.

<sup>13</sup>[http://wiki.ros.org/move\\_base](http://wiki.ros.org/move_base)

<sup>14</sup><https://github.com/orgs/Social-Droids>

<sup>15</sup>[http://wiki.ros.org/costmap\\_2d](http://wiki.ros.org/costmap_2d)

### 3.1.3 Ambientes de teste

Alguns cenários em ambientes simulados foram preparados para a realização dos testes desta tese. A seguir, são apresentados cada um dos ambientes usados em cada etapa do estudo (implementados no pacote *social\_worlds*) e a representação do ambiente onde foram realizados os experimentos reais com voluntários.

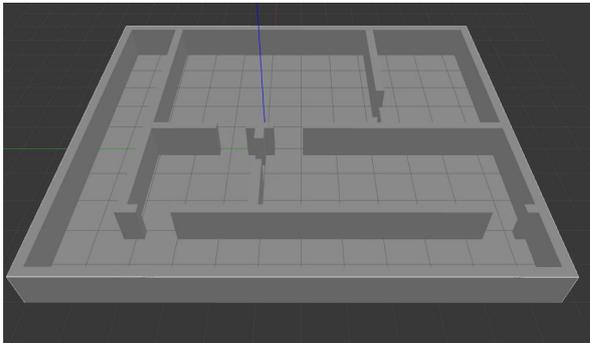
#### 3.1.3.1 Etapa 1 - Testes preliminares da navegação comum

Para a primeira etapa, os seguintes cenários foram utilizados para avaliar e otimizar a navegação comum:

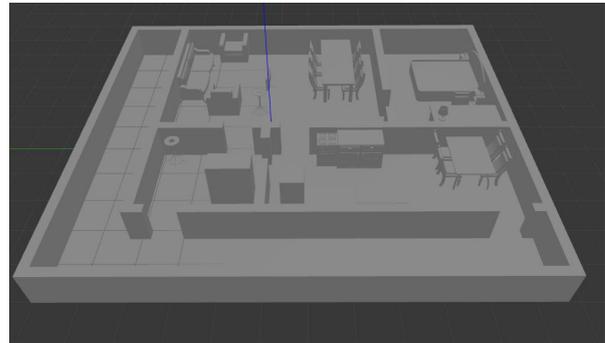
- a) **Cenário 1:** Ambiente simulado sem objetos - Tem como objetivo avaliar a navegação em um ambiente estático sem objetos;
- b) **Cenário 2:** Ambiente simulado com objetos estáticos - Tem como objetivo avaliar a navegação com objetos 3D que estão fora do alcance do *laser*.

Figura 10 – Ambientes simulados usados nos testes preliminares.

(a) Ambiente sem mobília



(b) Ambiente com mobília



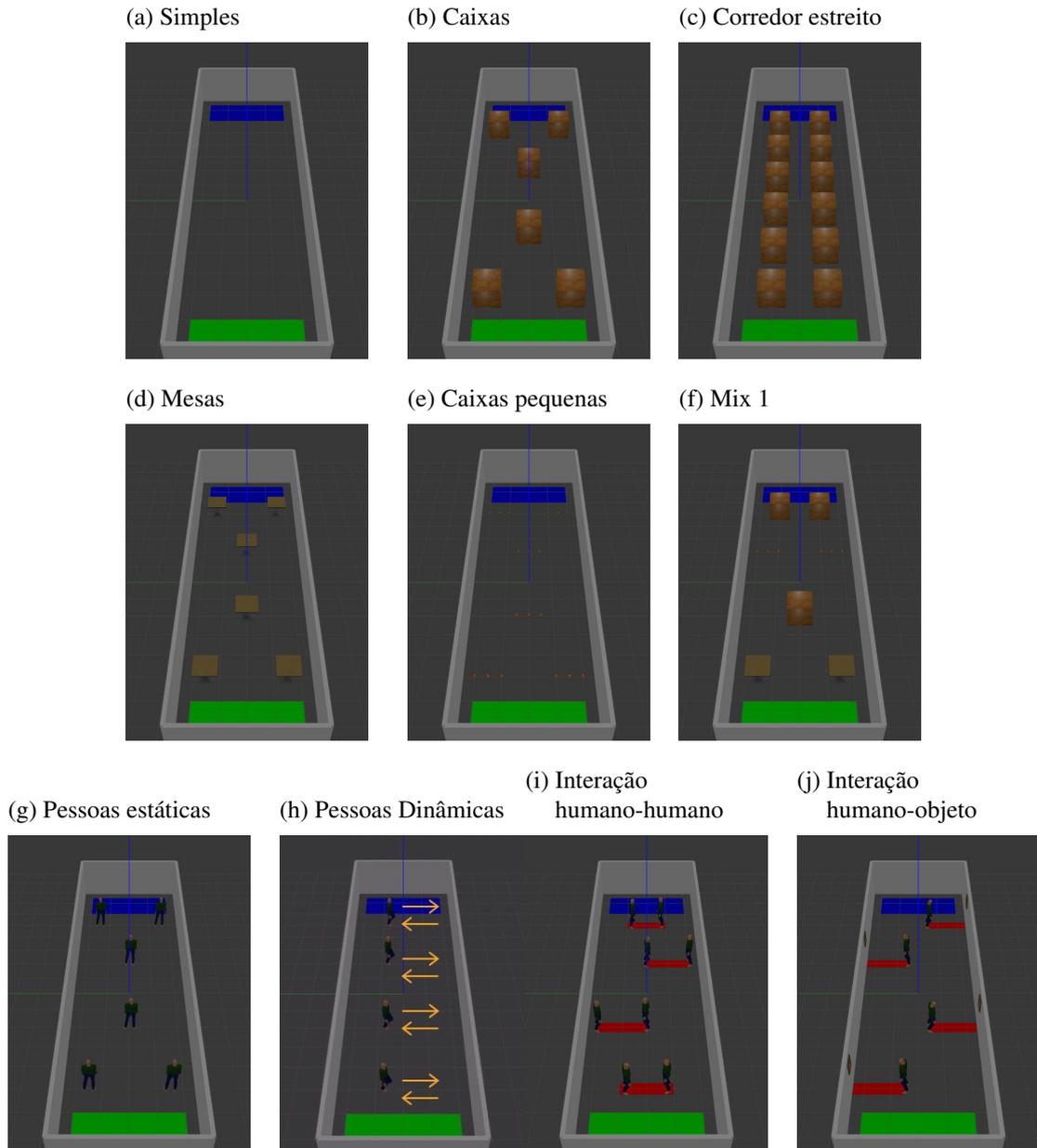
Fonte: Autor.

#### 3.1.3.2 Etapa 2 - Otimização de navegação comum

Os testes nesta etapa foram divididos em 5 conjuntos. Em cada conjunto, foi feita uma modificação no ambiente ou configuração do RNS, a fim de promover um aumento gradativo da complexidade e das capacidades da plataforma HERA. É uma forma de isolar o comportamento do robô em situações e configurações específicas de forma a avaliar se essas configurações con-

duzem a uma tarefa completa (navegação entre dois pontos). Para os conjuntos 1, 2 e 3, foram utilizados os ambientes da figura 11(a,b,c), para o conjunto 4 foram utilizados os ambientes da figura 11(d,e,f), para o conjunto 5 e os ambientes da figura 11(g,h,i,j) foram usados.

Figura 11 – Ambientes simulados usados na otimização. A área verde representa a região inicial e a área azul representa a região do objetivo.



Fonte: Autor.

### 3.1.3.3 Etapa 3 - Navegação social - Pessoas estáticas

Nesta etapa, apenas ambientes onde se tinha algum tipo de interação com humanos estáticos foram explorados. Os seguintes ambientes são apresentados.

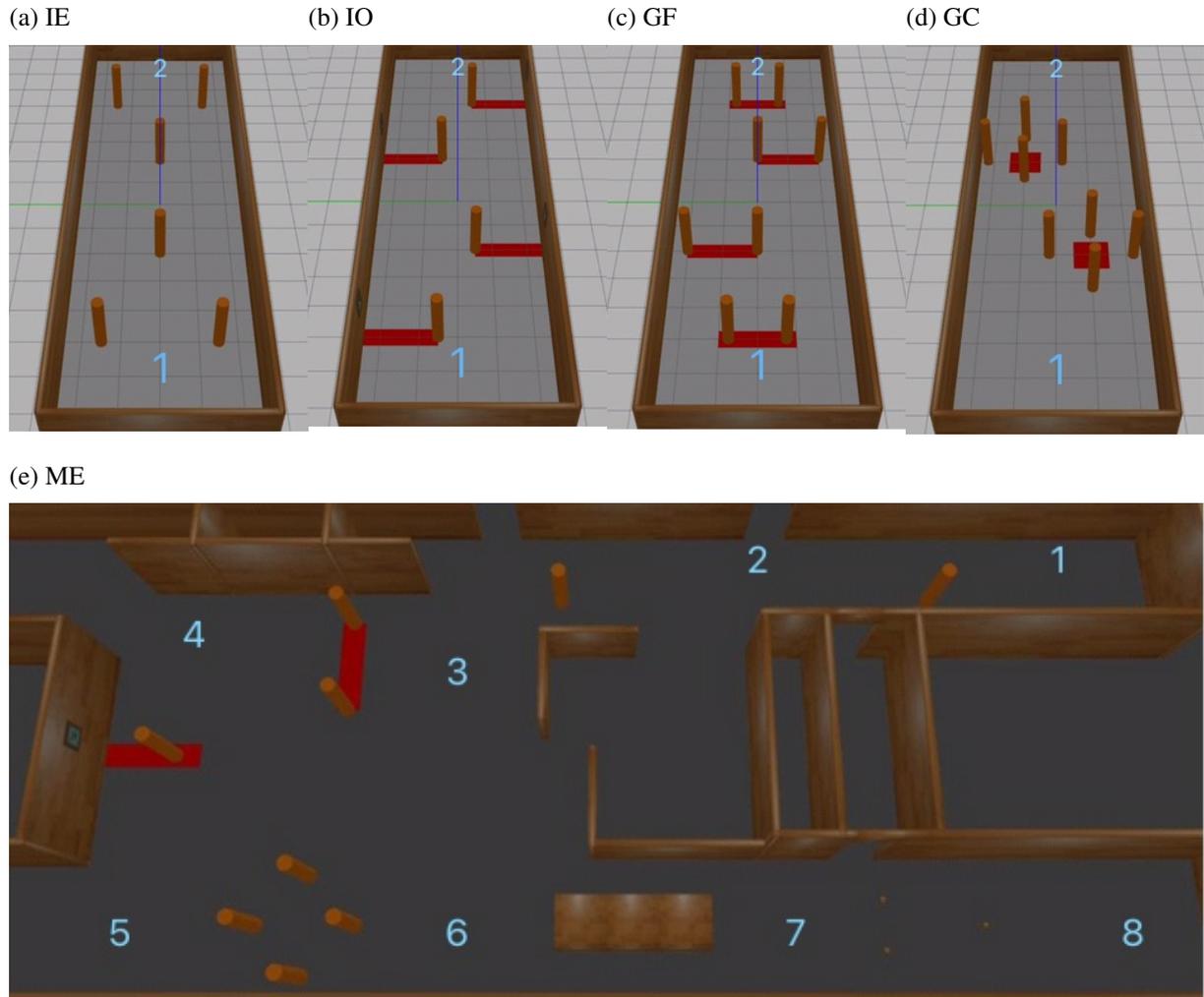
- a) **Individual Estático (IE):** Ambiente com diversas pessoas paradas sem interagir umas com as outras entre o ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 12.a);
- b) **Interação com Objeto (IO):** Ambiente com diversas pessoas paradas e interagindo com um objeto (um quadro na parede) entre o ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 12.b);
- c) **Grupo Face-a-Face (GF):** Ambiente com diversos grupos de pessoas em formação de interação face a face entre o ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 12.c);
- d) **Grupo em Formação Circular (GC):** Ambiente com diversos grupos de pessoas em formação de interação circular entre o ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 12.d)
- e) **Maratona Estática (ME)** Ambiente que mistura todos os cenários anteriores (Figura 12.e).

### 3.1.3.4 Etapa 4 - Navegação social - Pessoas dinâmicas

Nesta etapa, apenas ambientes onde se tinha algum tipo de interação com humanos dinâmicos foi explorado. Os seguintes ambientes são apresentados.

- a) **Individual com Cruzamento:** Ambiente com diversas pessoas andando transversalmente sem interagir umas com as outras entre o ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 13(a));
- b) **Individual de Frente:** Ambiente com uma pessoa andando entre o ponto final e inicial da trajetória do robô (Figura 13(b));
- c) **Grupo de 5 Pessoas:** Ambiente com 5 pessoas andando de forma aleatória entre ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 13(c));
- d) **Grupo de 10 Pessoas:** Ambiente com 10 pessoas andando de forma aleatória entre ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 13(d));
- e) **Maratona Dinâmica** Ambiente que mistura todos os cenários anteriores (Figura 13.e).

Figura 12 – Ambientes simulados com pessoas estáticas. Os cilindros laranjas são representações dos humanos que causam erro de colisão se o robô tocar, as áreas em vermelho são áreas proibidas que causam erro de invasão se o robô passar por cima e os números são os pontos de parada da trajetória do robô.



Fonte: Autor.

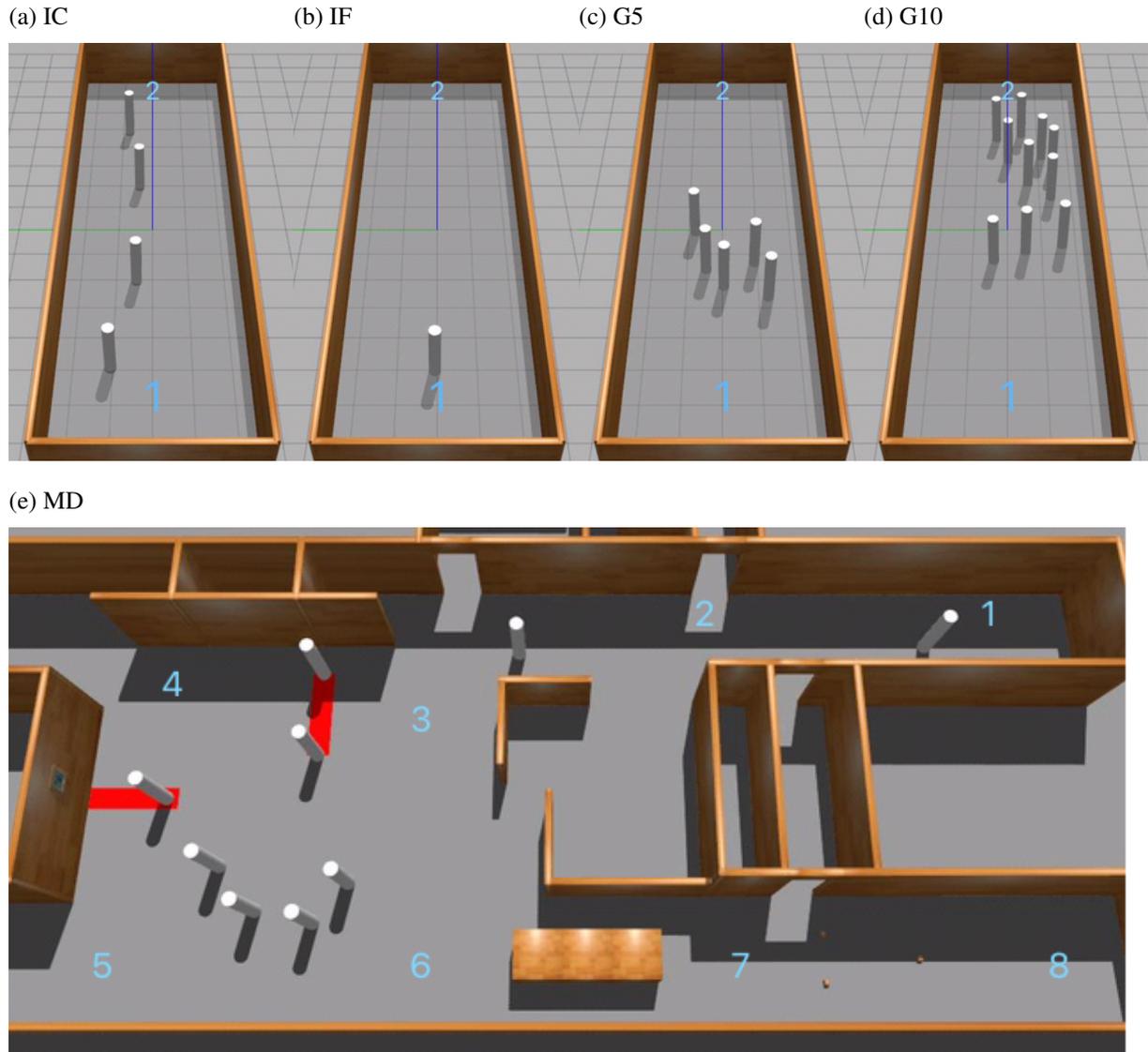
### 3.1.3.5 Etapa 5 - Ambiente real

Os experimentos com voluntários foram realizados em um espaço interno de 10 por 11 metros (Figura 14). Tanto o robô quanto os voluntários tinham espaço suficiente para se movimentar livremente.

Os seguintes ambientes foram utilizados nos experimentos reais:

- a) **Individual Estático:** Ambiente com situação cotidiana com uma pessoa parada no caminho do robô (esperando algo/alguém, mexendo/atendendo celular, etc) visto na figura 14.a;

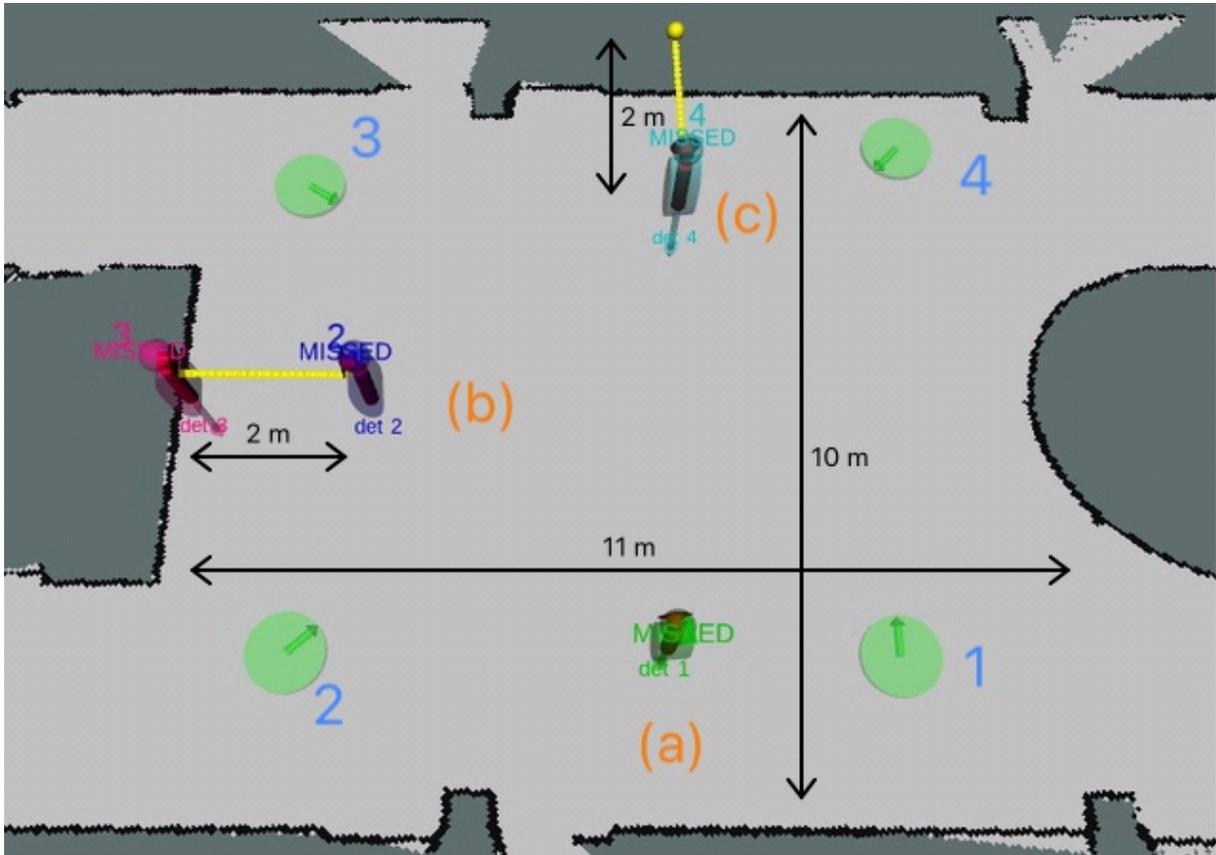
Figura 13 – Ambientes simulados usados com pessoas dinâmicas. Os cilindros são representações dos humanos que causam erro de colisão se o robô tocar, as áreas em vermelho são áreas proibidas que causam erro de invasão se o robô passar por cima e os números são os pontos de parada da trajetória do robô.



Fonte: Autor.

- b) **Interação com Objeto:** Ambiente com situação cotidiana de pessoa interagindo com um objeto em sua frente (interação com TV, quadro, chamada de vídeo em um totem, etc) visto na figura 14.c;
- c) **Grupo Face-a-Face:** Ambiente com situação cotidiana de conversação entre duas pessoas mantendo um distanciamento social de 2 metros) visto na figura 14.b.

Figura 14 – Representação do ambiente onde foram realizados os experimentos reais. Os números são os pontos de parada da trajetória do robô. As letras representam as interações: (a) Individual Estático, (b) Grupo Face-a-face, (c) Individual com Objeto.



Fonte: Autor.

### 3.2 Métricas

Essas métricas visam selecionar e otimizar os métodos utilizados na navegação do robô para que ela se torne mais segura, natural e confortável para o ser humano. As seguintes variáveis foram analisadas neste estudo:

- a) *Success Rate (SR)*: Determina o número percentual de experimentos, onde a navegação foi concluída com sucesso. É dado por:

$$SR = s/ex_{max} * 100 \quad (1)$$

onde  $s$  é o número de experimentos concluídos com sucesso e  $ex_{max}$  é o número máximo de experimentos realizados.

- b) *Fail Rate (FR)*: Determina o número percentual de experimentos, onde a navegação falhou. Existem cinco tipos e são dados pelas seguintes fórmulas:

- *Fail Rate by space Exceeded (FR\_SE)*:

$$FR_{SE} = f_1/ex_{max} * 100 \quad (2)$$

onde  $f_1$  é o número de experimentos que falharam devido ao espaço excedido.

- *Fail Rate by Time Exceeded (FR\_TE)*:

$$FR_{TE} = f_2/ex_{max} * 100 \quad (3)$$

onde  $f_2$  é o número de experimentos que falharam devido ao tempo excedido.

- *Fail Rate by Abortion (FR\_A)*:

$$FR_A = f_3/ex_{max} * 100 \quad (4)$$

onde  $f_3$  é o número de experimentos que falharam por aborto. A falha por aborto é determinada por *plugins* do simulador Gazebo desenvolvidos ao longo deste trabalho. A falha por aborto acontece quando planejador global não consegue encontrar um caminho possível para um robô chegar no destino

- *Fail Rate by Colision (FR\_C)*:

$$FR_C = f_4/ex_{max} * 100 \quad (5)$$

onde  $f_4$  é o número de experimentos que falharam por colisão. A falha por colisão é determinada por *plugins* do simulador Gazebo desenvolvidos ao longo deste trabalho.

- *Fail Rate by Invasion (FR\_I)*:

$$FR_I = f_5/ex_{max} * 100 \quad (6)$$

onde  $f_5$  é o número de experimentos que falharam por invasão do espaço de interação de uma ou mais pessoas. A falha por invasão é determinada por *plugins* do simulador Gazebo desenvolvidos ao longo deste trabalho.

- c) *Spatial Coefficient (SPC)*: determina o quão próximo a distância percorrida do robô está da distância planejada, dada por:

$$SPC = 1 - (s_e - s_{min}) / (s_{max} - s_{min}) \quad (7)$$

onde  $s_e$  é o espaço percorrido pelo robô,  $s_{min}$  é o espaço mínimo entre a posição inicial e a posição final,  $s_{max}$  é o espaço máximo que o robô pode navegar neste experimento. O resultado varia de 0 a 1, onde 1 significa que o caminho percorrido tem a mesma distância do caminho planejado.

- d) *Temporal Coefficient (TEC)*: Determina o quão próximo o tempo de execução da navegação está do tempo estimado para realizar a navegação, dado por:

$$TEC = 1 - (t_e - t_{min}) / (t_{max} - t_{min}) \quad (8)$$

onde  $t_e$  é o tempo utilizado pelo robô no experimento,  $t_{min}$  é o tempo mínimo necessário para o robô se deslocar do ponto de partida ao final em linha reta, dada a velocidade máxima do robô,  $t_{max}$  é o tempo máximo que o robô pode navegar neste experimento. O resultado varia de 0 a 1, onde 1 significa que o tempo decorrido é igual ao tempo planejado.

- e) *Smoothing Coefficient (SMC)*: Determina quão suave é a trajetória realizada pelo robô. É usado como uma medida para avaliar a naturalidade do robô, que é dada pela média das diferenças dos ângulos de cada linha que compõem a trajetória.

$$SMC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\arctan(y_i - y_{i-1}, x_i - x_{i-1}) / \pi)}{n - 1} \quad (9)$$

onde  $n$  é o número de pontos presentes na rota executada e  $x$  e  $y$  são as coordenadas dos pontos. O resultado varia de 0 a 1, onde 1 significa que a navegação é mais suave.

- f) *Proxemic Coefficient (PRC)*: determina o quanto a trajetória realizada pelo robô respeitou o espaço pessoal das pessoas. Esta métrica tenta representar o grau médio de conforto da pessoa mais próxima do robô no experimento em relação a proxêmica.

$$PRC = 1 - x, \begin{cases} x \leftarrow d/1.2, & \text{if } d \leq 1.2 \\ x \leftarrow 0, & \text{if } d > 1.2 \end{cases} \quad (10)$$

O resultado varia de 0 a 1, onde 1 significa que a navegação respeita as regras proxêmicas.

- g) *Individual Social Index (SII)*: Xuan Tung Truong e Ngo (2018a) usa as proxêmicas como base para medir o distanciamento social dos indivíduos.

$$SII = \max_{i=1:N} \exp \left( - \left( \frac{x_r - x_i^p}{\sqrt{2}\sigma_i^{px}} \right)^2 + \left( \frac{y_r - y_i^p}{\sqrt{2}\sigma_i^{py}} \right)^2 \right) \quad (11)$$

onde  $N$  é o número de pessoas próximas ao robô,  $(x_r, y_r)$  é a posição do robô,  $(x_i^p, y_i^p)$  é a posição da  $i$ -ésima pessoa, e  $(\sigma_i^{px}, \sigma_i^{py})$  é o desvio padrão das posições das pessoas em  $x$  e  $y$ .

- h) *Group Social Index (SGI)*: Xuan Tung Truong e Ngo (2018a) usa as proxêmicas como base para medir o distanciamento social dos grupos.

$$SGI = \max_{i=1:K} \exp \left( - \left( \frac{x_r - x_i^g}{\sqrt{2}\phi_i^g} \right)^2 + \left( \frac{y_r - y_i^g}{\sqrt{2}\phi_i^g} \right)^2 \right) \quad (12)$$

onde  $K$  é o número de grupos próximos ao robô,  $(x_r, y_r)$  é a posição do robô,  $(x_i^g, y_i^g)$  é a posição do  $i$ -ésimo grupo, e  $(\phi_i^g)$  é o raio do grupo  $i$  dividido por dois.

A seguir são apresentados os questionários aplicados aos voluntários nos experimentos em ambiente real. Esses questionários auxiliam principalmente na avaliação do conforto do ser humano, por ser a métrica mais subjetiva.

Questionário 1, realizado antes dos experimentos. Esse questionário é utilizado para identificar o grau de familiaridade do voluntário com o robô e alguns tópicos utilizados no estudo. O questionário também ajuda a compor os conceitos utilizados no desenvolvimento da ontologia.

- a) Qual o seu grau de familiaridade com os seguintes termos? (Questão de múltipla escolha com 5 opções: (1) O voluntário não conhece nada sobre o assunto, (2) o voluntário tem baixo conhecimento sobre o assunto, (3) o voluntário possui médio conhecimento sobre o assunto, (4) o voluntário possui alto conhecimento sobre o assunto e (5) o voluntário é especialista no assunto).
- Robô
  - Robô móvel
  - Robô colaborativo
  - Robô inteligente
  - Robô de serviço
  - Robô social
  - Interação Homem-Robô (IHR)
  - Interação espacial
- b) Qual o seu entendimento sobre segurança física? (Questão aberta)
- c) Qual o seu entendimento sobre naturalidade? (Questão aberta)
- d) Qual o seu entendimento sobre sociabilidade? (Questão aberta)

- e) Qual o seu entendimento sobre conforto? (Questão aberta)
- f) Qual o seu entendimento sobre legibilidade? (Questão aberta)

Questionário 2, realizado depois dos experimentos (Questões abertas). Esse questionário é utilizado para identificar como o voluntário se sentiu durante a execução do experimento.

- a) Qual o grau de segurança física que você sentiu durante o experimento como um todo?
- b) Alguma observação sobre o grau de segurança física?
- c) Para você, qual o grau de naturalidade dos movimentos do robô durante o experimento como um todo?
- d) Alguma observação sobre o grau de naturalidade?
- e) Para você, qual o grau de satisfação com os tópicos apresentados a seguir?
  - Sociabilidade
  - Conforto
  - Legibilidade
- f) O que mais te incomodou durante o experimento?
- g) O que mais te agradou durante o experimento?
- h) O que você achou da interação espacial do robô?
- i) Na sua opinião, tem algo que possa ser melhorado?

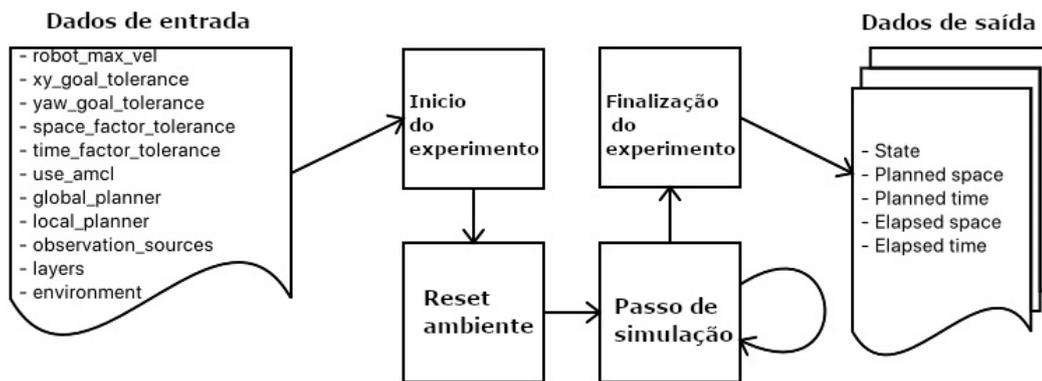
### 3.3 Métodos

A metodologia desta pesquisa se desenvolveu seguindo várias etapas. Em cada etapa foram realizadas melhorias nos métodos, sensores, e aumentando a complexidade dos ambientes de forma progressiva. O processo de construção da ontologia foi realizado em cada etapa, até chegar no estado atual. As etapas se dividem em (1) testes preliminares da navegação comum (seção 3.3.1), explorando o estado da técnica da robótica móvel em um robô real; (2) otimização da navegação comum (seção 3.3.2), onde são aplicadas técnicas do estado da arte sobre navegação social; A partir da próxima etapa, a ontologia social desenvolvida neste trabalho, é aplicada; (3) otimização da navegação social com pessoas estáticas (seção 3.3.3); (4) otimização da navegação social com pessoas dinâmicas (seção 3.3.4), indo além do estado da arte e implementando melhorias na navegação social nestas duas últimas etapas; e por fim, (5) aplicação da navegação em ambiente real em experimentos com voluntários para aprofundar a avaliação de conforto do ser humano com o robô real (seção 3.3.5). Ao longo de cada etapa

foram avaliados critérios sociais, de segurança e precisão em métodos de planejamento de navegação utilizando diferentes combinações de sensores, planejadores, camadas de mapas de custo e diferentes ambientes. O trabalho aqui foi selecionar, otimizar e aprimorar a navegação para ser o mais natural, social e confortável possível para o ser humano. Após o término dos experimentos, os resultados são avaliados com base nos critérios apresentados na seção 3.2.

Os roteiros para realizar esses testes podem ser encontrados no repositório Github <sup>16</sup>. Todas as etapas realizadas em ambiente simulado, seguem o roteiro a seguir (representado também na figura 15) e foram realizados sem o uso de interface gráfica no simulador:

Figura 15 – Roteiro dos experimentos.



Fonte: Autor.

- a) Receber dados de entrada com um conjunto de configurações que serão utilizadas no experimento;
- b) Um processamento inicial de dados é executado para deixar o ambiente pronto, com base nos dados de entrada. Um conjunto de regiões ( $R = [CR_0, \dots, CR_{nr}]$ ) que possui  $nr$  regiões é extraído do ambiente. Isso representa as regiões pelas quais o robô deve passar durante o experimento, aqui chamadas CheckRegions ( $CR = [P_0, \dots, P_{ncr}]$ ). Cada  $CR$  tem  $ncr$  pontos ( $P = [x, y]$ ) livres de colisão. Os pontos da mesma região são separados por espaço entre si no mundo de simulação por 0,5 metros e têm informações espaciais  $(x, y)$  relativas à origem do mundo

<sup>16</sup><https://github.com/fagnerpimentel/phd>

simulado. Para cada  $CR$ , um  $P$  é selecionado aleatoriamente. Ele irá compor o caminho que o robô percorrerá durante os experimentos ( $CP = [P_0, \dots, P_{nr}]$ ). Em seguida, o planejador global é usado para calcular a distância mais curta passando por todos os  $P$  em  $CP$ ;

- c) O ambiente e o robô são redefinidos com suas configurações iniciais;
- d) O experimento é iniciado passando a lista de  $CP$  para o sistema de navegação. O experimento é finalizado quando o robô chega ao seu destino final ou ocorre alguma falha de navegação (ver seção 3.2);
- e) Finalmente, os dados do experimento são salvos para análise futura. A seguir são apresentados os parâmetros utilizados neste roteiro, seguindo o algoritmo 1.

Os seguintes parâmetros foram mantidos constantes em todos os experimentos:

- a) `robot_max_vel = 0.3`: velocidade máxima em metros por segundo que o robô pode atingir durante o experimento.
- b) `xy_goal_tolerance = 0.1`: determina a distância mínima tolerável em metros para considerar que o robô alcançou sua posição de destino.
- c) `yaw_goal_tolerance = 3.1415`: determina o ângulo mínimo tolerável em radianos para considerar que o robô atingiu seu ângulo de destino (`yaw`).
- d) `time_factor_tolerance (tft) = 5`: fator de tolerância para determinar se o tempo gasto pelo robô na execução do experimento foi ultrapassado ou não.
- e) `space_factor_tolerance (sft) = 5`: fator de tolerância para determinar se o espaço percorrido pelo robô na execução do experimento foi excedido ou não.

Os dados de entrada que foram variados são apresentados a seguir:

- a) `use_amcl`: determina se deve usar o sistema de rastreamento AMCL ou usar a localização exata fornecida pelo simulador.
- b) `global_planner`: Planejador global usado pelo RNS.
- c) `local_planner`: Planejador local usado pelo RNS.
- d) `observation_sources`: Fontes de percepção utilizadas pelo robô no experimento.
- e) `layers`: Representações dos mapas de custos usados no RNS.
- f) `environment`: Mundo simulado usado no experimento.

Os dados de saída ao final do experimento são compostos por:

- a) `State`: Representa o estado em que o experimento foi concluído.
- b) `Planned space`: Trajetória planejada para a execução do experimento.
- c) `Planned time`: Tempo planejado para a execução do experimento.

- d) Elapsed space: Trajetória realizada durante o experimento.
- e) Elapsed time: Tempo decorrido durante o experimento.

### 3.3.1 Etapa 1 - Testes preliminares da navegação comum

Na tabela 5 são apresentados os métodos usados nos experimentos desta etapa, em seguida, na tabela 6 são apresentados os dados de estrada da primeira etapa. Aqui são feitas variações em sensores e métodos de planejamento de navegação. Os sensores utilizados nesta etapa foram um *laser* frontal, um *laser* traseiro e uma câmera frontal 3D de profundidade, que foram acrescentados progressivamente nas avaliações. Os planejadores foram o Planejador Local Base, o Planejador Local DWA, o Planejador Local EBand e o Planejador Local TEB.

Nesta primeira etapa, foram desenvolvidas as questões de eficiência, segurança e naturalidade da navegação do robô. Para isso, não foi necessário a presença de pessoas simuladas. Foram avaliados alguns métodos de planejamento de trajetória, selecionando o que possui maior naturalidade. Estas avaliações tiveram como objetivo selecionar planejadores ótimos na navegação do robô, de modo que esta se torne mais segura e natural para o ser humano, dado que a naturalidade no comportamento do robô é um dos pilares para a navegação social segundo Kruse et al. (2013). Para isso, foram testados alguns métodos de planejamento local, variando também sensores e ambientes. A metodologia de desenvolvimento nesta fase do trabalho visou avaliar critérios de segurança e precisão em métodos de planejamento de navegação local, utilizando diferentes combinações de sensores e em diferentes ambientes. O trabalho aqui foi selecionar um planejador local o mais natural possível para o ser humano. Com isso é possível aproximar-se de uma navegação mais segura e confortável.

Uma abordagem de desenvolvimento de um novo planejador utilizando campos potenciais chegou a ser cogitada, estudada e implementada nesta etapa, funcionando bem em um contexto em que o robô precisava seguir uma pessoa. Entretanto, não funcionou muito bem para desvios de obstáculos, principalmente em situações em que o robô passa por locais apertados como corredores estreitos e portas onde chance de ocorrerem mínimos locais aumenta. Deste estudo inicial com campos potenciais, chegou-se à conclusão de que não valia a pena investir tempo no desenvolvimento de uma nova solução para um problema bastante estudado e com diversas soluções presentes na literatura. Sendo assim, o caminho escolhido foi estudar as soluções existentes e já testadas por outros pesquisadores e utilizá-las ou adaptá-las para cada situação proposta no método e experimentos desta pesquisa.

Algoritmo 1 – Roteiro dos experimentos realizados

```

1 Entrada: ENVIRONMENTS
2 Entrada: NAVIGATION_LAYERS
3 Entrada: LOCALIZATION_TYPE
4 Entrada: SENSORS_SOURCES
5 Entrada: GLOBAL_PLANNER
6 Entrada: LOCAL_PLANER
7 Saída: DATA (STATE,
8   ↪ SPACE_PLANNED, TIME_PLANNED,
9   ↪ PATH_EXECUTED, TIME_EXECUTED)
10 para cada env ∈ ENVIRONMENTS faça
11   para cada nav ∈ NAVIGATION_LAYERS faça
12     para cada (1 : 1000) faça
13       init_simulador(env.model, env.locals, env.objects); // Gazebo.
14       init_robot(env.map,
15         ↪ LOCALIZATION_TYPE, SENSORS_SOURCES,
16         ↪ GLOBAL_PLANNER, LOCAL_PLANER,
17         ↪ nav.global_layers, nav.local_layers); // HERA.
18       init_PedSim(ENV.people); // PedSim.
19       init_data_colector(DATA); // Coleta dados.
20       para cada cp ∈ env.checkpoints faça
21         go_to(cp); // Ir para checkpoint atual.
22         se colision() então
23           break; // Finaliza experimento se houver
24             colisão.
25         se invasion() então
26           break; // Finaliza o experimento se houver
27             invasão do espaço de interação.
28         se time_limit() então
29           break; // Finaliza o experimento se
30             ultrapassar o tempo limite máximo.
31         se space_limit() então
32           break; // Finaliza o experimento se
33             ultrapassar o espaço limite máximo.
34         se navigation_abortion() então
35           break; // Finaliza o experimento se a
36             navegação foi abortada.
37         fim
38       fim
39     fim
40 fim
41 retorna DATA

```

Tabela 5 – Métodos na primeira etapa.

Nome	Tipo	Funcionamento
AMCL	Localização	Utiliza filtro de partículas para rastrear a posição do robô em um mapa conhecido (DELLAERT et al., 1999). É o mesmo método utilizado atualmente no robô real. Se perde com facilidade em ambientes pouco estruturados.
NavFn	Planejador global	NavFn fornece uma função de navegação interpolada rápida que pode ser usada para criar planos para uma base móvel. A função de navegação é calculada com o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA et al., 1959).
Base	Planejador local	Este pacote fornece implementações das abordagens Trajectory Rollout (GERKEY; KONOLIGE, 2008) para a navegação local do robô em um plano.
DWA	Planejador local	Este pacote fornece implementações das abordagens Dynamic Window Approach (FOX; BURGARD; THRUN, 1997) para a navegação local do robô em um plano.
EBand	Planejador local	Esse planejador calcula uma faixa elástica dentro do mapa de custos local e tenta seguir o caminho gerado conectando os pontos centrais da faixa usando várias heurísticas (QUINLAN; KHATIB, 1993).
TEB	Planejador local	Esse planejador calcula e otimiza localmente a trajetória do robô em relação ao tempo de execução da trajetória (RÖSMANN et al., 2013).
Mapa estático do ambiente	Mapa de custo	Utiliza o mapa de custo para representar o ambiente do experimento. 2 cenários diferentes são utilizados.
Mapa de obstáculos	Mapa de custo	3 fontes de sensoriamento são utilizadas para criar o mapa de custo dos obstáculos.
Mapa de inflação	Mapa de custo	Os mapas de custos são inflacionados baseado nas propriedades físicas do robô.

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Variáveis na primeira etapa.

ENVIRONMENTS:	[Cenário sem mobilha, Cenário com mobilha] (Figura 10)
NAVIGATION_LAYERS:	[Mapa estático do ambiente, Mapa de obstáculo, Mapa de inflação]
LOCALIZATION_TYPE:	AMCL
SENSORS_SOURCES:	[Laser Frontal base], [Laser Frontal, laser traseiro base], [Laser Frontal base, laser traseiro base, câmera 3D base]
GLOBAL_PLANNER:	NavFn
LOCAL_PLANNER:	[BLP, DWA , EBand, TEB]

Fonte: Autor.

### 3.3.2 Etapa 2 - Otimização de navegação comum

O RNS usado neste trabalho foi otimizado usando os tutoriais de navegação ROS <sup>17</sup> e o Guia de ajuste de navegação ROS (ZHENG, 2017). O processo de otimização foi reali-

<sup>17</sup><http://wiki.ros.org/navigation/Tutorials>

zado observando o comportamento do robô próximo a obstáculos e levando em consideração as propriedades físicas da plataforma HERA.

Na tabela 7 são apresentados os métodos usados nos experimentos desta etapa, em seguida, na tabela 8 são apresentados os dados de entrada da segunda etapa. Questões de eficiência, segurança e naturalidade da navegação foram novamente avaliados em ambientes com diferentes tipos de objetos e nesta etapa foram inseridas pessoas simuladas. Além disso, foi realizada uma adaptação dos algoritmos de navegação para uma navegação social. Nesta etapa, uma camada de navegação social foi adicionada como um mapa de custos e os ambientes foram testados com humanos simulados.

Tabela 7 – Métodos na segunda etapa. Em negrito estão os métodos que apresentaram alguma alteração em relação à etapa anterior.

Nome	Tipo	Funcionamento
AMCL	Localização	Ver tabela 5.
<b>Gazebo</b>	Localização	Utiliza a localização do robô diretamente do simulador.
NavFn	Planejador global	Ver tabela 5.
GlobalPlanner	Planejador global	Ver tabela 5.
Base	Planejador local	Ver tabela 5.
DWA	Planejador local	Ver tabela 5.
EBand	Planejador local	Ver tabela 5..
TEB	Planejador local	Ver tabela 5.
<b>Mapa estático do ambiente</b>	Mapa de custo	Utiliza o mapa de custo para representar o ambiente do experimento. 13 cenários diferentes são utilizados.
<b>Mapa de obstáculos</b>	Mapa de custo	4 fontes de sensoriamento são utilizadas para criar o mapa de custo dos obstáculos.
<b>Mapa de proximica</b>	Mapa de custo	Apresenta a camada de proximica ao redor de cada pessoa determinando o espaço pessoal. Implementado por Lu, Hershberger e Smart (2014).
Mapa de inflação	Mapa de custo	Ver tabela 5.

Fonte: Autor.

Os testes nesta etapa foram divididos em 5 conjuntos:

- a) Conjunto I (Configuração Simples): A configuração do RNS mais simples e próxima da etapa anterior foi avaliada.
- b) Conjunto II (planejadores globais): Os planejadores globais NavFn e GlobalPlanner são variados e avaliados.
- c) Conjunto III (Planejadores Locais): Os planejadores locais BLP, DWA, EBand e TEB são variados e avaliados.
- d) Conjunto IV (Sensores): São feitas alterações no ambiente para incluir objetos de difícil percepção pelo robô, bem como a adição de um novo sensor para facilitar essa percepção.

Tabela 8 – Variáveis na segunda etapa.

ENVIRONMENTS:	[Simples, Caixa, Corredor estreito] (Figura 11(a,b,c)) [Mesas, Caixas pequenas, Mix] (Figura 11(c,d,e)) [Pessoas estáticas, pessoas Dinâmicas] (Figura 11(f,g)) [Interação humano-humano, Interação humano-objeto] (Figura 11(h,i))
NAVIGATION_LAYERS:	[Mapa estático do ambiente, Mapa de obstáculo, Mapa de inflação, Mapa de proximica]
LOCALIZATION_TYPE:	[AMCL, Gazebo]
SENSORS_SOURCES:	[Laser Frontal base, laser traseiro base, câmera 3D base] [Laser Frontal base, laser traseiro base, câmera 3D base, câmera 3D torço]
GLOBAL_PLANNER:	[NavFn, GlobalPlanner]
LOCAL_PLANNER:	[BLP, DWA, EBand, TEB]

Fonte: Autor.

- e) Conjunto V (Camada de Navegação): Os ambientes são apresentados com pessoas simuladas, em posições estáticas ou com comportamento dinâmico e interação com outras pessoas e objetos. As camadas do mapa de custos usadas nesta etapa são baseadas em (LU; HERSHBERGER; SMART, 2014) e podem ser vistas na figura 8. As camadas selecionadas foram: camada de mapa estático, representando o mapa do ambiente criado anteriormente; a camada Obstáculos, representando os obstáculos capturados pelos sensores; a camada proximica, que representa as pessoas e seus espaços pessoais; e, finalmente, a camada de inflação que determina uma zona segura em torno dos obstáculos. Todas essas camadas constituem a camada mestre, onde ocorre o planejamento da trajetória.

### 3.3.3 Etapa 3 - Navegação social - Pessoas estáticas

Na tabela 9 são apresentados os métodos usados nos experimentos simulados desta etapa, em seguida, na tabela 10 são apresentados os dados de entrada da terceira etapa.

Os testes nesta etapa foram divididos em 2 conjuntos:

- a) Conjunto I (Interações estáticas): Foi comparado o comportamento do robô com navegação comum e social em interações espaciais implícitas e explícitas.
- b) Conjunto II (Maratona): O robô deve passar por uma série de pontos de verificação em um ambiente mais complexo.

Tabela 9 – Métodos na terceira etapa. Em negrito estão os métodos que apresentaram alguma alteração em relação à etapa anterior.

Nome	Tipo	Funcionamento
AMCL	Localização	Ver tabela 5.
Gazebo	Localização	Utiliza a localização do robô diretamente do simulador.
NavFn	Planejador global	Ver tabela 5.
TEB	Planejador local	Ver tabela 5.
<b>Mapa estático do ambiente</b>	Mapas de custo	Utiliza o mapa de custo para representar o ambiente do experimento. 5 cenários diferentes são utilizados.
Mapa de obstáculos	Mapa de custo	Ver tabela 7.
Mapa de proximica	Mapa de custo	Ver tabela 7.
<b>Mapa de objetos para interação</b>	Mapa de custo	Apresenta uma camada ao redor do objeto que pode interagir com o ser humano. Implementada neste trabalho.
<b>Mapa de áreas de interação</b>	Mapa de custo	Apresenta uma camada nas áreas de interação do ser humano. Implementada neste trabalho.
Mapa de inflação	Mapa de custo	Ver tabela 5.

Fonte: Autor.

Tabela 10 – Variáveis na terceira etapa

ENVIRONMENTS	[Individual Estático, Interação com Objeto, Grupo Face-a-Face, Grupo em Formação Circular, Maratona Estática]
LOCALIZATION_TYPE	simulator.
SENSORS_SOURCES	[laser_scan_front_observation, laser_scan_back_observation, point_cloud_base_front_observation, point_cloud_torso_front_observation].
GLOBAL_PLANNER	NavFn.
LOCAL_PLANNER	TEB.
NAVIGATION_LAYERS	common, social.

Fonte: Autor.

### 3.3.4 Etapa 4 - Navegação social - Pessoas dinâmicas

Na tabela 11 são apresentados os métodos usados nos experimentos simulados desta etapa, em seguida, na tabela 12 são apresentados os dados de estrada da quarta etapa.

Os testes nesta etapa foram divididos em 2 conjuntos:

- a) Conjunto I (Interações dinâmicas): Foi comparado o comportamento do robô com navegação comum e social em variando cenários com pessoas dinâmicas.
- b) Conjunto II (Maratona): O robô deve passar por uma série de pontos de verificação em um ambiente mais complexo. Nesta etapa também foi utilizada a ferramenta PedSim em conjunto com o Gazebo para simular a movimentação das pessoas.

Tabela 11 – Métodos na quarta etapa. Em negrito estão os métodos que apresentaram alguma alteração em relação à etapa anterior.

Nome	Tipo	Funcionamento
Gazebo	Localização	Utiliza a localização do robô diretamente do simulador.
NavFn	Planejador global	Ver tabela 5.
TEB	Planejador local	Ver tabela 5.
<b>Mapa estático do ambiente</b>	Mapas de custo	Utiliza o mapa de custo para representar o ambiente do experimento. 5 cenários diferentes são utilizados.
Mapa de obstáculos	Mapa de custo	Ver tabela 7.
Mapa de proximica	Mapa de custo	Ver tabela 7.
<b>Mapa de objetos para interação</b>	Mapa de custo	Apresenta uma camada ao redor do objeto que pode interagir com o ser humano. Implementada neste trabalho.
<b>Mapa de áreas de interação</b>	Mapa de custo	Apresenta uma camada nas áreas de interação do ser humano. Implementada neste trabalho.
Mapa de inflação	Mapa de custo	Ver tabela 5.

Fonte: Autor.

Tabela 12 – Variáveis na quarta etapa

ENVIRONMENTS	[Individual com Cruzamento, Individual de Frente, Grupo de 5 Pessoas, Grupo de 10 Pessoas, Maratona Dinâmica]
LOCALIZATION_TYPE	simulator.
SENSORS_SOURCES	[laser_scan_front_observation, laser_scan_back_observation, point_cloud_base_front_observation, point_cloud_torso_front_observation].
GLOBAL_PLANNER	NavFn.
LOCAL_PLANNER	TEB.
NAVIGATION_LAYERS	common, social.

Fonte: Autor.

Com essa ferramenta foi possível utilizar o *Social Force Model*, dando mais realismo à movimentação das pessoas simuladas.

### 3.3.5 Etapa 5 - Ambiente real

Esta etapa apresenta a realização de experimentos reais com voluntários seguindo o projeto com Certificado de Apresentação de Apreciação Ética de número 43096121.7.0000.5508 apresentado ao comitê de ética em pesquisa do Brasil. Nesta pesquisa, todos os protocolos de segurança referentes a pandemia do novo coronavírus (Covid-19) indicadas pelos órgãos competentes foram seguidos. O estudo comparativo entre o ambiente simulado e real é um

dos objetivos da implementação da navegação social em um robô social, que visa melhorar o comportamento do robô independentemente dos sensores ou ambiente em que esteja atuando.

Foram convidados 20 voluntários para participar dos experimentos reais. As características dos voluntários variaram em termos de idade, gênero, experiência prévia com um robô e conhecimento prévio sobre robótica. Durante os experimentos não houve participantes retirados do estudo ou eventos adversos graves.

Para os experimentos reais foram aplicados dois tipos de interação espacial entre as pessoas e o robô. No primeiro tipo, o robô navegou pelo ambiente passando por alguns pontos específicos. Entre cada ponto havia pessoas executando uma determinada ação (paradas, em movimento, interagindo com outras pessoas ou objetos). No segundo tipo, o robô abordou uma pessoa ou um grupo de pessoas em um determinado local. Para alguns dos voluntários, compartilhar um ambiente e interagir com um robô são tarefas cotidianas, pois trabalham diretamente com esse tipo de cenário, onde existe a presença de um robô. Entretanto, para outros voluntários, interagir ou apenas compartilhar o mesmo ambiente com um robô, essas experiências seriam inéditas. Neste sentido, para tais voluntários, a simples presença do robô é algo que chama a atenção, podendo influenciar diretamente no conforto destas pessoas. Foi evitado que o robô atraísse a atenção do voluntário desnecessariamente. Para isso, foram selecionadas tarefas que mantinham o voluntário ocupado, como mexer no celular nos momentos em que estivesse sozinho, e estabelecemos uma conversa informal nas interações com outras pessoas ou com objetos.

Os riscos que seriam apresentados durante a realização do experimento são relativos ao robô poder causar algum dano às pessoas ou aos objetos no ambiente. Em relação ao ser humano o robô pode colidir em algum ser humano. Neste experimento em ambiente real para evitar qualquer risco de colisão, o robô é equipado com um botão de emergências que para todas as atividades do robô no mesmo instante que ele é acionado. Um especialista na operação do robô acompanhou o experimento a todo momento para acionar o botão de emergência ao menor sinal de risco.

O principal benefício da realização destes experimentos foi a promoção de um estudo que auxilia na observação de como o conforto das pessoas é alterado com a presença do robô e com isso melhorar o comportamento do robô social para que ele apresente um comportamento mais aceitável na sociedade.

As tarefas foram realizadas em sequência para minimizar o incômodo que os voluntários poderiam sentir por realizar tarefas repetitivas. Um número menor de experimentos foi realizado no ambiente real, para não sobrecarregar os humanos envolvidos no experimento.

Para esta pesquisa, foi proposta a execução das tarefas a seguir:

- a) Duas entrevistas, uma antes (E1) e uma depois (E2) do experimento;
- b) Tarefa 1: O participante realiza uma tarefa sozinho como mexer no celular. O robô passa próximo ao participante (Tarefa 1 - Interação Implícita); Em seguida aborda o participante, fazendo um cumprimento e uma pergunta (Tarefa 1 - Interação Explícita);
- c) Tarefa 2: O participante realiza uma interação com outro ser humano (uma conversa cotidiana). O robô passa próximo ao participante (Tarefa 2 - Interação Implícita) em seguida aborda o participante, fazendo um cumprimento e uma pergunta (Tarefa 2 - Interação Explícita);
- d) Tarefa 3: O participante realiza uma interação com um objeto (uma conversa cotidiana via chamada de vídeo através de um totem). O robô passa próximo ao participante (Tarefa 3 - Implícita) em seguida aborda o participante, fazendo um cumprimento e uma pergunta (Tarefa 3 - Explícita).

As tarefas foram gravadas para fins de análise do comportamento do robô e análise do conforto do ser humano, de acordo com a autorização do sujeito de pesquisa, documentado no Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE).

## 4 Ontologia Social

Segundo Schlenoff et al. (2012) seria extremamente difícil desenvolver uma ontologia para cobrir todo o espaço da robótica e automação, sendo assim, o desenvolvimento de domínios menores é mais atrativo. Portanto, a ontologia é desenvolvida e utilizada nesse trabalho para formalizar, representar e compartilhar o conhecimento dentro do domínio da navegação social. A ideia aqui é unificar os modelos de conhecimento utilizados na literatura e aprimorar com as pesquisas realizadas ao longo deste estudo. Com isso é possível formalizar os principais conceitos utilizados e compartilhar esse conhecimento de forma unificada. Nesta seção apresenta-se o processo de construção da ontologia. Para isso, são realizadas as etapas de especificação, conceitualização, formalização, implementação e manutenção desta ontologia. Sendo o desenvolvimento destas etapas, uma das principais contribuições originais deste trabalho. A ontologia é desenvolvida a partir dos experimentos nos estágios 1 e 2 e melhorada com os experimentos nos estágios 3, 4 e 5. Com ela é possível determinar o tipo de navegação que o robô realiza, o distanciamento social e como abordar as pessoas de uma maneira socialmente aceita e confortável.

O domínio da navegação social é uma interessante área em crescimento nos últimos anos com a inserção cada vez mais de robôs na sociedade. A ontologia resultante desse trabalho apresenta 6 classes principais e seus conceitos-chaves relacionados à navegação social. Foram identificados para compor a ontologia, as classes de *Robot*, *Environment*, *Object*, *Local*, *Person* e *Formation* (grupos de pessoas). Para definir o escopo da ontologia foram utilizadas as questões apresentadas no referencial teórico (seção 2) e no questionário de avaliação apresentado na metodologia de avaliação (3.2). As próximas seções apresentam os passos de especificação, conceitualização, formalização, implementação e manutenção da ontologia.

### 4.1 Especificação

Na especificação o objetivo é identificar o propósito e o escopo da ontologia, quais são as intenções de uso e seus usuários, quais as fontes de conhecimento e quais as ontologias relacionadas que podem ser utilizadas para reuso. Portanto, o propósito desta ontologia é a formalização da representação de conhecimento utilizado para navegação social. Para isso, são especificados os principais conceitos utilizados dentro da navegação social e como esses conceitos são utilizados para construção de modelos que representam a navegação social.

O escopo de utilização desta ontologia de navegação social é focado nas questões de interações espaciais dentro da área de interação humano-robô. São apresentados consequentemente, os conceitos relacionados a esse tipo de interação que envolvem um robô saber se localizar no ambiente, mapeamento e desvio de obstáculos, necessários para a navegação. No caso de pessoas como obstáculos em um ambiente social é preciso saber desviar sem causar nenhum tipo de dano físico, nem causar nenhum tipo de desconforto ou dano psicológico. Outros aspectos da interação humano-robô como as interações verbais e não verbais são observados durante o processo de manutenção da ontologia, mas não é o foco deste trabalho.

A aquisição de conhecimento foi realizada juntamente com a construção do referencial teórico, respondendo às questões apresentadas no referencial e a partir das entrevistas com voluntários dos experimentos. Os pontos de vista de cada fonte encontrada foram utilizados no desenvolvimento desta ontologia, formando a estrutura do conhecimento que foi definida nas classes da ontologia.

Os principais usos dessa ontologia está em compartilhar conhecimento para o desenvolvimento de novos modelos, métodos e soluções para a navegação social e nas interações espaciais entre humanos e robôs. Os principais utilizadores da ontologia são pesquisadores e desenvolvedores de robôs sociais que irão compartilhar e aprimorar conhecimento relativo a essa área de forma unificada.

Para reuso, algumas ontologias foram selecionadas. O subgrupo de robôs autônomos da ontologia de robótica e automação (SCHLENOFF et al., 2012) foi utilizado como base para representação dos sensores, atuadores, controle e percepção do robô social.

## 4.2 Conceitualização

A conceitualização objetiva descrever o modelo conceitual da ontologia de acordo com as especificações do estágio anterior. Os conceitos utilizados no desenvolvimento da ontologia são representados nas classes apresentadas aqui e baseados nos conceitos encontrados na revisão bibliográfica. A seguir são apresentadas as representações das classes e os conceitos envolvidos nestas classes.

#### 4.2.1 Classe *Robot*

A classe *Robot* descreve as principais características do robô utilizadas para a navegação social, como sua posição, velocidade, tipo de base que ele utiliza que pode influenciar na sua navegação e tipo de navegação que ele vai executar no ambiente social. Alguns conceitos como legibilidade, sociabilidade, naturalidade e previsibilidade não foram representados na ontologia por se tratarem de características subjetivas no comportamento do robô, entretanto, elas podem ser avaliadas pelas métricas deste trabalho e pelos participantes dos experimentos com robô quando estes percebem que as regras e normas sociais estão sendo respeitadas, influenciando assim no conforto do ser humano. Os conceitos utilizados são:

- a) **Robô social:** Como visto anteriormente, para Hegel et al. (2009), os robôs sociais foram desenvolvidos explicitamente para a interação de humanos e robôs para apoiar uma interação semelhante à humana. Deste ponto de vista, um robô social contém uma interface social;
- b) **Robô sociável:** Um robô sociável é capaz de se comunicar e interagir com os humanos, entender e até se relacionar conosco, de forma pessoal. Este robô também deve ser capaz de nos compreender e a si mesmo em termos sociais; Cynthia Breazeal (2003) definiu o robô Sociável, que se envolvem proativamente com os humanos a fim de satisfazer objetivos sociais internos (impulsos, emoções, etc.).
- c) **Robô Integrado socialmente:** Fong, Nourbakhsh e Dautenhahn (2002) complementa com o conceito de robô integrado socialmente que: (a) estão situados em um ambiente social e interagem com outros agentes e humanos; (b) estruturalmente acoplado ao seu ambiente social; e (c) pelo menos parcialmente ciente das estruturas interacionais humanas;
- d) **Robô Social Móvel:** É um robô móvel, colaborativo, inteligente e de serviço pessoal ou profissional, capaz de realizar interação homem-robô com autonomia;
- e) **Navegação:** A navegação é uma capacidade importante para o Robô Social Móvel, portanto dadas as posições inicial e final de um robô, descobrir uma sequência de movimentos para que ele saia da primeira e chegue à segunda posição sem colidir com outros robôs, humanos, ou obstáculos fixos ou móveis;
- f) **Planejamento de trajetórias:** Os aspectos do planejamento de trajetórias segundo Latombe (2012) são divididos em parâmetros de entrada, parâmetros de saída e coordenação de movimentos. Os Parâmetros de entrada consistem na des-

criação do ambiente, ou seja, fornece as propriedades físicas e geométricas dos objetos inseridos no espaço de trabalho do robô e suas relações espaciais. Somado a ideia de navegação social, o planejamento de trajetória deve ser realizado de modo que o robô não cause nenhum tipo de desconforto para o ser humano (KRUSE et al., 2013). Na navegação social do robô, as pessoas não devem ser vistas como simples obstáculos, pois existe um conjunto de regras sociais e culturais que regem a forma como as pessoas se movem, como, por exemplo, sempre se aproximar de uma pessoa pela frente ou se mover pela esquerda;

- g) **Interação espacial:** Para Bartneck et al. (2020), no IHR, a maioria dos algoritmos de planejamento de caminho que funcionam bem para contornar obstáculos resultará em comportamento socialmente impróprio quando testados perto de pessoas. Na navegação social, o objetivo é fazer com que um robô deixe de ter um comportamento de um simples Robô Móvel (RM) com desvio de obstáculos, onde ele apenas se preocupa em não colidir com os obstáculos no ambiente, e passa a se comportar como um Robô Social Móvel (RSM), onde as pessoas e o contexto do ambiente são levados em consideração, de modo a não apenas evitar as colisões, mas também maximizar o conforto das pessoas próximas ao robô.
- h) **Naturalidade e sociabilidade:** Dois aspectos surgem relacionados à mobilidade de um robô social: o primeiro é determinar o movimento apropriado, onde este deve ser o mais natural possível, e o segundo é a interação através da movimentação, onde esta deve ser a mais social possível, e ambos devem colaborar para maximizar o conforto humano. Em (KRUSE et al., 2013) A naturalidade reflete o comportamento de um robô, que busca se comportar o mais próximo possível dos humanos. Em (KRUSE et al., 2013) a sociabilidade reflete a maneira como o robô deve se comportar em ambientes sociais. Espera-se que as pessoas em um ambiente social sigam uma certa regra social, incluindo regras de distância;
- i) **Legibilidade e previsibilidade:** Um requisito essencial para a colaboração entre humanos e robôs é que o robô deixe suas intenções claras, legíveis e previsíveis para os humanos próximos (DRAGAN; LEE; SRINIVASA, 2013). Segundo Dragan, Lee e Srinivasa (2013), a legibilidade é frequentemente descrita como o efeito de movimentos previsíveis ou esperados, enquanto previsibilidade, por outro lado, refere-se à qualidade da expectativa de correspondência do movimento legível, como movimento que permite um observador inferir com confiança o objetivo de

uma ação após observar uma parte dessa ação. Quanto mais rápido isso acontece, mais legível é a ação;

- j) **Consciência de Interação:** Para Spexard et al. (2007) uma das competências que um robô social deve ter é a consciência de interação. Este termo é definido como o estado de um agente que é "capaz de perceber aspectos estruturais e/ou dinâmicos importantes de uma interação que observa ou em que ele próprio está envolvido". No entanto, para que um robô se torne ciente da interação, ele precisa estar ciente de seu ambiente físico e de sua localização para ser capaz de se comunicar sobre ele.

#### 4.2.2 Classe *Environment*

A classe *Environment* descreve o ambiente onde o robô social está inserido. Ele apresenta o espaço de configuração deste ambiente e é responsável por auxiliar na construção dos mapas de custos que são utilizados para a realização da navegação do robô. Ela também se utiliza das outras classes para compor este ambiente e auxiliar na construção dos mapas de custo como as classes de objetos, pessoas e locais. As normas e regras sociais do ambiente são apresentadas em diversos pontos da ontologia como por exemplo na utilização das proxêmicas para respeitar os espaços íntimos e pessoais das pessoas, utilização da cultura em que a pessoa está inserida como um peso para regular o valor das proxêmicas e utilização do contexto do local também como peso para regular a forma com que o robô navega no ambiente. Os conceitos utilizados são:

- a) **Espaço de Configuração:** Segundo (LAVALLE, 2006; LATOMBE, 2012), este é um conceito importante dentro da área de planejamento de trajetórias. Sua formulação tem como meta transformar o problema de planejamento de trajetória de um objeto bidimensional em um problema de trajetória de um ponto;
- b) **Mapa de custo:** Consiste em uma matriz de pesos usada por um sistema de navegação para armazenar informações probabilísticas sobre obstáculos (ELFES, 1989). No contexto da navegação social, o espaço pessoal humano é representado por um mapa de custos com células de alto custo em torno de um humano;
- c) **Mapeamento:** Segundo Kostavelis et al. (2016b), a modelagem de ambiente em termos de mapeamento métrico constitui a base para a maioria das aplicações robóticas. Especificamente, para que um robô seja capaz de navegar com efici-

ência, um mapa métrico consistente deve ser construído. Segundo Kostavelis et al. (2016b), apesar dos avanços no mapeamento métrico, para que um robô compreenda o ambiente da mesma forma que um ser humano, considera-se a formação de mapas acrescida de atributos semânticos envolvendo conceitos humanos, como tipos de cômodos, objetos e sua disposição espacial. Um atributo obrigatório para os futuros robôs. O mapeamento semântico (KOSTAVELIS; GASTERATOS, 2015) é uma descrição qualitativa dos arredores do robô, com o objetivo de aumentar as capacidades de navegação e o planejamento de tarefas, bem como preencher a lacuna na IHR.

#### **4.2.3 Classe *Object***

A classe *Object* descreve os tipos de objetos que existem no ambiente e como eles podem ser expandidos para auxiliar na navegação do robô de modo não causar nenhum tipo de colisão e auxiliar no desvio de obstáculos de forma adequada. O conceito utilizado foi a expansão de obstáculos (LAVALLE, 2006) que trata-se de uma técnica bastante usada para representação de obstruções. Com ela, o robô é reduzido a um ponto e os obstáculos são expandidos com base na forma do robô. Esta técnica facilita o estudo das configurações que o robô pode assumir, e ajuda na construção e visualização dos caminhos livres dentro do espaço de configuração.

#### **4.2.4 Classe *Local***

A classe *Local* descreve as possíveis localidades que podem ser representadas na base de conhecimento do robô e apresentam contexto que influencia como um peso na proximidade ao redor das pessoas.

O conceito utilizado foi de que os locais onde o robô está inserido e para onde ele está indo, são compostos por um contexto social que é de grande importância na influência do movimento do robô. Quando um robô é solicitado a buscar um item ou simplesmente quando um comportamento de navegação precisa ser ajustado de acordo com as regras sociais deste local, para não incomodar as pessoas. Portanto o contexto pode ser identificado como o conjunto de características culturais, sociais e a formação das pessoas presentes neste local.

#### 4.2.5 Classe *Person*

A classe *Person* descreve algumas propriedades da pessoa como sua pose usada para localização no momento atual; a velocidade com que a pessoa se movimentando no ambiente e como isso influencia na construção dos mapas de custos ao redor desta pessoa; o ângulo de visão dessa pessoa que pode influenciar em como o robô irá abordar esta pessoa; a sua proxêmica que define o seu espaço íntimo e social, também descreve a familiaridade que a pessoa tem com o robô que pode influenciar como um peso na proxêmica que é aplicado na representação dessa pessoa para construção do mapa de custo ao redor dela. Os conceitos utilizados são:

- a) **Segurança:** A segurança humana no que diz respeito à navegação de robôs pode ser classificada em duas categorias: 1) segurança física e 2) segurança psicológica. A primeira categoria é manter uma distância física mínima entre o robô e os humanos. A segunda categoria no contexto da interação social humano-robô implica que o robô móvel não pode causar estresse e desconforto aos humanos durante sua navegação e interação;
- b) **Proxêmica** A teoria proxêmica proposta por in (HALL, 1910), é o estudo da manipulação e interpretação dinâmica do comportamento social humano que são controlados por regras socioculturais em encontros sociais. A proxêmica preocupa-se com a interpretação, manipulação e dinâmica do comportamento espacial em encontros sociais e leva em consideração representações físicas (ex: distância e orientação) ou psicológicas (ex: quantidade de contato visual ou simpatia) (MEAD; MATARIC, 2016). Segundo Xuan Tung Truong e Ngo (2018a), as proxêmicas podem ser estendidas para um espaço social dinâmico que é um espaço de interação entre dois humanos, grupo de humanos, ou humano e objeto de interesse, e pode ser generalizada como um campo potencial que permite que o robô não se aproxime dos seres humanos dentro dessa zona e nem cause desconforto aos mesmos. Essa zona é incorporada ao sistema de planejamento de rotas garantindo conforto e segurança física e psicológica;
- c) **Conforto:** Em uma navegação social, o conforto humano se torna uma grande preocupação do que apenas o caminho mais curto. Conforto é uma condição psicológica em que um ser humano se sente seguro, apoiando-se na ausência de uma sensação de intimidação ou ameaça por algo. Para Kruse et al. (2013), o conforto reflete o estado de espírito em relação à segurança e ao bem-estar. É uma medida

complexa a ser avaliada, pois envolve a percepção do contexto, os sinais sociais, as micro expressões e a análise temporal do comportamento humano. O conforto pode ser utilizado futuramente como a medida de avaliação do comportamento do robô, verificando se este comportamento está adequado para interagir com o ser humano;

- d) **Modelo de força social:** SFM sugere que o movimento de um pedestre pode ser influenciado pelas motivações internas dessa pessoa para realizar certas ações (HELBING; MOLNAR, 1995).

#### 4.2.6 Classe Formation

A classe *Formation* apresenta os conceitos das formações F (F-Formations), vistas na figura 4. Essas formações são criadas por meio do posicionamento de duas ou mais pessoas em relação umas às outras, de modo que as áreas do espaço para as quais elas estão voltadas e nas quais focam sua atenção se sobreponham.

O conceito utilizado foi de configuração do espaço entre as pessoas. O espaço onde as pessoas têm acesso igual, direto e exclusivo, é denominado espaço O (O-space). Já o espaço em que os próprios participantes do grupo ocupam é denominado espaço P (P-space) e os participantes são rodeados pelo espaço R (R-space). Os exemplos de espaços utilizados podem ser vistos na figura 4(a).

### 4.3 Formalização

Na formalização o objetivo é transformar a descrição e conceitos definidos em regras, restringindo as interpretações e organizando a ontologia hierarquicamente.

#### 4.3.1 Classes e atributos

Atributos da classe Robot:

- a) **pose:** Representa a posição em que o robô está localizado. É utilizado para calcular a trajetória do robô no ambiente, sendo seu ponto inicial;
- b) **velocity:** Representa a velocidade do robô no momento atual. Pode ser reduzida quando o robô está próximo a algum ser humano para causar menos desconforto;

- c) **radius:** Representa o raio do robô. Utilizado para realizar expansão de obstáculos nos objetos;
- d) **devices:** Dado que essa ontologia foca na interação espacial, os sensores e atuadores representados aqui são relativos à navegação;
- e) **perception:** Usa informações dos sensores para estimativa de estado e representação de mundo;
- f) **control:** Utilizado para determinar como será realizada o planejamento de trajetória do robô;
- g) **navigation\_type:** Utilizado para determinar se a interação vai ser implícita (navegação comum de um ponto a outro em um ambiente com pessoas), explícita (abordagem de um ser humano), ou mesmo a combinação de implícita com explícita (robô guia ou robô que segue pessoas). O tipo de navegação social que o robô executa no momento pode ser uma navegação Para-local, Para-pessoa, Lado-a-lado, Guiar ou Seguir. O tipo de navegação determina o destino do robô, o ângulo relativo ao destino, distância de segurança do destino, orientação relativo ao destino como visto na tabela 13 e na figura 16 que apresenta um posicionamento do robô dependendo do tipo de navegação realizada. Na figura 17, são apresentados os mapas de custo das pessoas e áreas de interação (em amarelo é possível verificar os possíveis pontos de abordagem que um robô pode utilizar, esses pontos são inferidos utilizando a ontologia).

Tabela 13 – Tipos de navegação do robô

Tipo de navegação	Destino do robô	Ângulo de aproximação relativo ao destino	Distância do destino	Ângulo de abordagem relativo ao destino
Para-local	id-local	0	0	0
Para-pessoa	id-pessoa	0	proxêmica	180
Lado-a-lado	id-pessoa	90	proxêmica	0
Guiar	id-pessoa	0	proxêmica	0
Seguir	id-pessoa	180	proxêmica	0

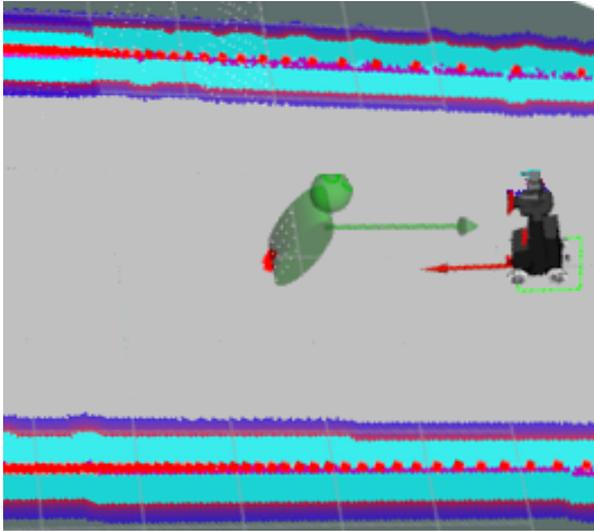
Fonte: Autor.

Atributos da classe Environment:

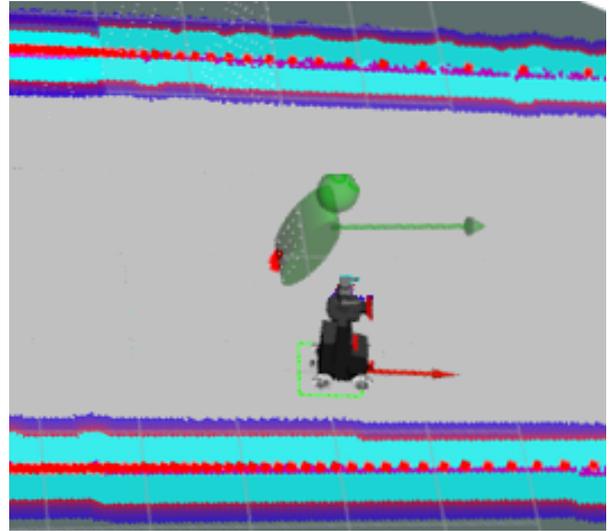
- a) **map:** Espaço de configuração do ambiente no qual o robô está inserido. É uma referência para uma imagem de mapa de custo de todos os obstáculos fixos do ambiente;
- b) **resolution:** Determina a resolução do mapa no sistema métrico do robô.

Figura 16 – Tipos de navegação quando o destino é uma pessoa.

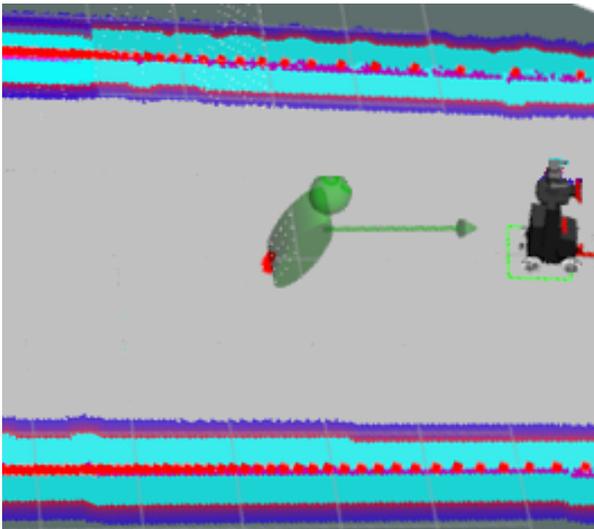
(a) Para-pessoa



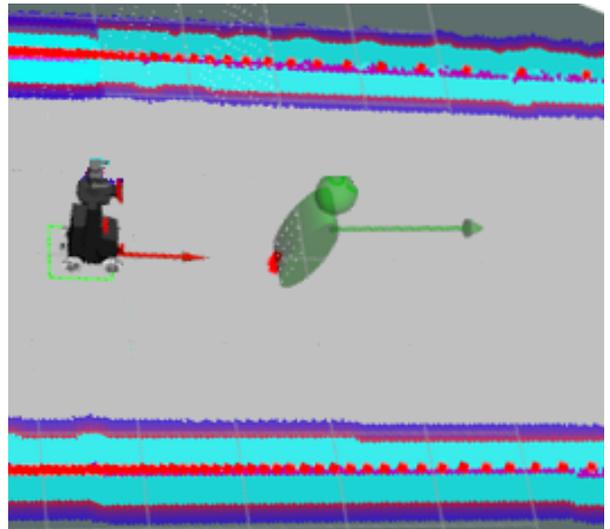
(b) Lado-a-Lado



(c) Guiar



(d) Seguir



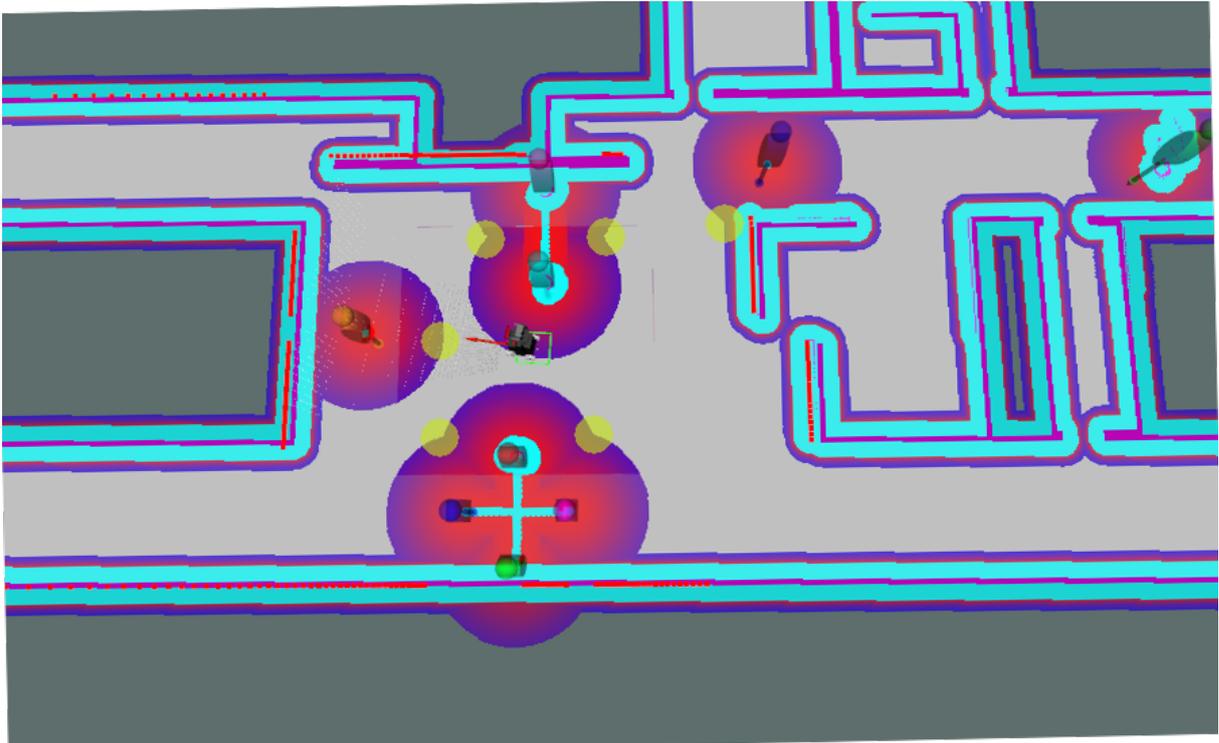
Fonte: Autor.

Atributos da classe Objects:

- a) **pose:** Representa uma posição em que o objeto está localizado. É utilizado para criar uma área de obstáculo ou área de interação usando mapa de custo;
- b) **type:** Define o tipo de interação que a pessoa vai ter com o objeto. Pode ser objeto de manipulação ou de observação. A interação de observação vai influenciar na construção do mapa semântico dos locais que o robô pode navegar causando o mínimo de desconforto para as pessoas presentes.

Atributos da classe Local:

Figura 17 – Pontos de abordagem de pessoas



Fonte: Autor.

- a) **pose:** Representa uma posição de um local no ambiente. É utilizado para definir os possíveis locais que o robô pode se movimentar;
- b) **context:** uma descrição qualitativa do local com objetivo de adaptar a navegação e planejamento de tarefas. O contexto determina o comportamento do robô.

Atributos da classe Person:

- a) **pose:** Representa a posição em que a pessoa está localizada. Utilizada para criar uma área de segurança física e psicológica utilizando proxêmica;
- b) **velocity:** A velocidade determina uma área na frente da pessoa que não pode ser invadida e ajuda a compor um mapa de custo desta área;
- c) **ang\_vision:** Diferente do do ângulo de posição dessa pessoa, o ângulo de visão determina posicionamento do robô.
- d) **proxemic\_intimacy:** Usado para expansão da área segurança física. A proxêmica determina o mapa de custo ao redor das pessoas;
- e) **proxemic\_personal:** Usado para expansão da área de segurança psicológica. A proxêmica determina o mapa de custo ao redor das pessoas;
- f) **robot\_familiarity:** Influencia como um peso que altera a proxêmica, representa as zonas dinâmicas de (TRUONG, X. T.; NGO, 2018a).

Atributos da classe *Formation*:

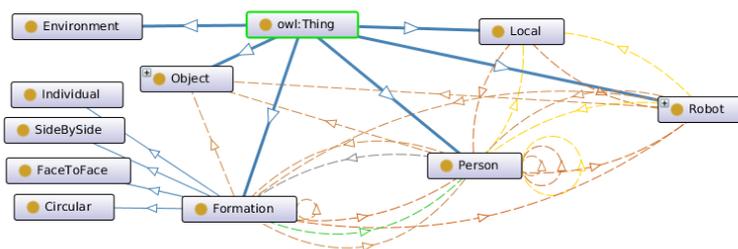
- pose:** Centro das posições das pessoas que compõem a formação;
- type:** É o tipo de formação, utilizado para determinar o local da abordagem. O tipo pode ser dividido em: Individual (quando a pessoa está sozinha no ambiente), face-a-face (quando os integrantes estão um de frente para o outro), Lado-a-lado (quando os integrantes estão um ao lado do outro) e Circular (quando os integrantes estão interagindo em círculo).

### 4.3.2 Relações

As relações descrevem a semântica da ontologia, dando significado na combinação das classes. No domínio da navegação social, as relações foram divididas em 6 tipos:

Figura 18 – Relações utilizadas na construção da ontologia de navegação social.

(a) Relacionamentos



(b) Nomes dos relacionamentos

<input checked="" type="checkbox"/>	— belongs_to
<input checked="" type="checkbox"/>	— composed_by
<input checked="" type="checkbox"/>	— goes_to
<input checked="" type="checkbox"/>	— interacts_with
<input checked="" type="checkbox"/>	— is_destination_of

Fonte: Autor.

A seguir são apresentados como as classes se relacionam entre si:

- has\_subclasses:** Determina quais classes são especificidades de outra classe;
  - De Formation para Individual.
  - De Formation para IndividualFaceToFace.
  - De Formation para SydeBySide.
  - De Formation para Circular.
- belongs\_to:** Determina quais classes compõem outras classes;
  - De Person para Formation.
- composed\_by:** Determina quais classes são compostas por outras classes;
  - De Formation para Person.

- d) **goes\_to:** Determina quais classes podem navegar no ambiente e para onde;
  - De Person para Person.
  - De Person Para Local.
  - De Robot para Person.
  - De Robot para Local.
- e) **is\_destination\_of:** Determina quais classes são destinos da navegação;
  - De Person para Person.
  - De Local Para Person.
  - De Person para Robot.
  - De Local para Robot.
- f) **interacts\_with:** Determina quais classe interagem com outras classes.
  - De Robot para Person.
  - De Robot para Object.
  - De Robot para Formation.
  - De Person para Person.
  - De Person para Object.
  - De Person para Formation.
  - De Formation para Person.
  - De Formation para Object.

#### 4.4 Implementação

Essa fase visa aplicar a ontologia em uma determinada linguagem. O desenvolvimento desse trabalho acontece ao longo de alguns pacotes que implementam as soluções encontradas na literatura e novas soluções realizadas para esta tese. São quatro principais pacotes que compõem a solução de navegação social aqui apresentada e vistas na seção 3.1:

- a) social\_msgs;
- b) social\_move\_base;
- c) social\_reasoning;
- d) social\_layers.

#### 4.4.1 social\_msgs

Esse pacote implementa as classes, atributos e relações apresentadas na seção anterior. A implementação é realizada utilizando a *framework* ROS que compila essas informações em linguagens como C++ e Python, que possam ser utilizadas por um desenvolvedor.

#### 4.4.2 social\_move\_base

Esse pacote funciona como uma interface em cima da pilha de navegação do ROS. O robô que antes, somente com o RNS recebia uma coordenada fixa no ambiente e navegava até essa coordenada, agora recebe uma identificação de um local ou de uma pessoa existente em sua base de conhecimento e realiza a navegação para este local de forma social, respeitando as normas e regras sociais com base na ontologia.

O pacote obedece ao seguinte roteiro:

- a) Recebe nome do destino e tipo de Navegação;
- b) Devolve pose do robô no destino;
- c) Verifica se o destino é um local ou uma pessoa;
- d) Se for local, o destino é definido como o próprio local;
- e) Se for pessoa, o destino definido como um local próximo a pessoa dentro do seu campo de visão, respeitando as proximidades e dentro de uma trajetória possível para o robô;
- f) Enviar um novo destino para o move\_base;
- g) Durante a execução da navegação são feitas modificações constantes na trajetória para evitar que passe pelo espaço pessoal das pessoas.

#### 4.4.3 social\_reasoning

Este pacote realiza o raciocínio sobre a informação ontológica para realizar a navegação social respeitando as regras e normas sociais. Os dados são armazenados em um banco de dados. O tipo de formação das pessoas não é classificado aqui, entretanto o posicionamento dos membros da formação e a melhor forma de abordagem podem ser encontrados baseado na orientação da pessoa mais próxima e nos mapas de custo. Sendo assim é possível generalizar a solução para qualquer formação de grupos.

Este pacote obedece ao seguinte roteiro:

- a) Identifica o tipo de navegação: [local, abordagem, andar lado a lado, guia, follow];
- b) Calcula as coordenadas de destino do robô dependendo do tipo de navegação;
- c) Publica informações das pessoas, formações, objetos e as interações entre eles;
- d) A partir do tipo de navegação e das proximidades, retorna pose de abordagem e atualizar o banco de dados.

#### **4.4.4 social\_layers**

A ontologia é usada neste pacote para construir os mapas semânticos como proposto por Kostavelis et al. (2016b) em forma de camadas de navegação social como proposto por Lu, Hershberger e Smart (2014).

Este pacote obedece ao seguinte roteiro:

- a) Recebe posição dos objetos, pessoas formações e as relações entre essas classes presentes na ontologia;
- b) São criadas 3 camadas de mapas de custo representando os objetos, as pessoas ou formações de pessoas e as relações como áreas de interação;
- c) É realizada a expansão de obstáculos em cada um dos elementos das classes de objetos, pessoas e formações. É utilizado o raio do robô para expandir os objetos e as áreas onde acontecem as interações, e utilizada as proximidades para expandir a área das pessoas e formações;
- d) As camadas com os mapas de custos são utilizadas pelo RNS para planejar as trajetórias do robô.

#### **4.5 Manutenção**

Para a manutenção é preciso atualizar e corrigir de acordo com o surgimento de novos requisitos. A manutenção da ontologia de navegação social foi realizada durante a execução de cada etapa dos experimentos simulados e real. Nos experimentos reais foi possível extrair informações dos voluntários para aprimorar e realizar essa manutenção.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados desta tese, dividido em 5 partes como apresentado na seção 3.3. A tabela 14 apresenta os conjuntos de experimentos, variáveis e quantidade de experimentos realizados em cada etapa da pesquisa. Todos os resultados podem ser encontrados em OneDrive cloud <sup>1</sup>.

### 5.1 Etapa 1: Navegação básica

Foram realizados 1000 experimentos para cada combinação de configuração em ambientes simulados. No total foram realizados 24.000 experimentos de simulação com posições iniciais e finais aleatórias, variando entre dois ambientes de teste, sem mobília (cenário 1, figura 10(a)) e com mobília (cenário 2, figura 10(b)), 3 combinações de sensores (1 *laser* frontal, 1 *laser* traseiro e 1 câmera 3D) e 4 planejadores locais (BLP, DWA, EBand e TEB). O objetivo principal desses experimentos foi implementar e avaliar o comportamento de navegação básica do robô usando o RNS.

Na tabela 15 pode-se ver os resultados dos experimentos realizados nos cenários 1 e 2. Pode-se observar que o planejador EBand obteve as melhores taxas de sucesso no cenário 1, sendo 91,60% com o laser frontal, 87,50% usando a combinação de laser frontal e traseiro e 90,10% usando a combinação dos 2 *lasers* e câmera 3D, enquanto o TEB teve as melhores taxas de sucesso no cenário 2, sendo 38,30% usando o laser frontal, 36,50% usando a combinação de *laser* frontal e traseiro e 35,70% usando a combinação dos 2 *lasers* e a câmera 3D. Os piores resultados em ambos os cenários foram observados com o planejador DWA, com 49,50% usando um *laser*, 27,10% usando a combinação de dois *lasers* e 29,60% usando a combinação de 2 *lasers* e a câmera 3D para o cenário 1 e 0,30% usando um *laser*, 0,40% usando a combinação de dois *lasers* e 0,70% usando a combinação de 2 *lasers* e câmera 3D para o cenário 2.

Para o cenário 1, o EBand apresentou as menores taxas de erro, como  $FR_{TE}$ , abaixo de 4% e  $FR_C$ , abaixo de 5,1%. Os métodos TEB e Base tiveram as menores taxas de  $FR_A$ , chegando a 0,0%, enquanto os piores casos são com o método DWA, atingindo 6,7%. O método TEB teve o pior resultado em termos de colisão quando foi usado apenas o *laser* frontal (42,0%), porém, essa taxa cai pela metade quando se usa o *laser* traseiro e câmera 3D e nestes

<sup>1</sup>[https://feiedu-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/fpimentel\\_fei\\_edu\\_br/E17oMARkD\\_tGjhLMnrs7z1QBqzYqqoy1E14csu1MPQvz5Q?e=QdjwXS](https://feiedu-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/fpimentel_fei_edu_br/E17oMARkD_tGjhLMnrs7z1QBqzYqqoy1E14csu1MPQvz5Q?e=QdjwXS)

Tabela 14 – Conjunto de experimentos, variáveis e quantidade de experimentos realizados em cada etapa da pesquisa.

Conjunto de experimentos	Variáveis	Quantidade de experimentos
Etapa 1 - Testes preliminares da navegação comum		
1.1 Cenário sem objetos	1 ambiente (Figura 10 (a)), 3 combinações de sensores, 4 planejadores locais	12.000
1.2 Cenário com objetos	1 ambiente (Figura 10 (b)), 3 combinações de sensores e 4 planejadores locais	12.000
Etapa 2 - Otimização de navegação comum		
2.1 Configuração simples	3 ambientes (Figura 11 (a,b,c))	3.000
2.2 Planejadores globais	3 ambientes (Figura 11 (a,b,c)) e 2 planejadores globais	6.000
2.3 Planejadores locais	3 ambientes (Figura 11 (a,b,c)) e 3 planejadores locais	9.000
2.4 Sensores	3 ambientes (Figura 11 (d,e,f)) e 2 combinações de sensores	6.000
2.5 Mapas semânticos	4 ambientes (Figura 11 (g,h,i,j)) e 2 combinações de mapas semânticos	8.000
Etapa 3 - Navegação social - Pessoas estáticas		
3.1 Individual	1 ambiente (Figura 12 (a)), 2 combinações de mapas semânticos e 2 tipos de interação espacial	4.000
3.2 Individual com objeto	1 ambiente (Figura 12 (b)), 2 combinações de mapas semânticos e 2 tipos de interação espacial	4.000
3.3 Grupo face-a-face	1 ambiente (Figura 12 (c)), 2 combinações de mapas semânticos e 2 tipos de interação espacial	4.000
3.4 Grupo circular	1 ambiente (Figura 12 (d)), 2 combinações de mapas semânticos e 2 tipos de interação espacial	4.000
3.5 Maratona estático	1 ambiente (Figura 12 (e)) e 2 combinações de mapas semânticos	2.000
Etapa 4 - Navegação social - Pessoas dinâmicas		
4.1 Individual	1 ambiente (Figura 13 (a)) e 2 combinações de mapas semânticos	2.000
4.2 Individual de frente	1 ambiente (Figura 13 (b)) e 2 combinações de mapas semânticos (b)	2.000
4.3 Grupo de 5 pessoas	1 ambiente (Figura 13 (c)) e 2 combinações de mapas semânticos	2.000
4.4 Grupo de 10 pessoas	1 ambiente (Figura 13 (d)) e 2 combinações de mapas semânticos	2.000
4.5 Maratona dinâmico	1 ambiente (Figura 13 (e)) e 2 combinações de mapas semânticos	2.000
Etapa 5 - Ambiente real		
5 Real	1 ambiente (Figura 14) e 2 combinações de mapas semânticos	120
Total:		84.120

Fonte: Autor.

Tabela 15 – Resultados de experimentos da etapa 1: Variando planejadores, sensores e cenários

<i>Laser frontal</i>								
Cenário 1					Cenário 2			
	DWA	EBand	TEB	BLP	DWA	EBand	TEB	BLP
<i>SPC</i>	1.00	0.99	0.93	1.00	1.10	1.00	0.95	1.01
<i>TEC</i>	0.14	0.53	0.63	0.63	0.14	0.14	0.35	0.26
<i>SMC</i>	0.64	0.65	0.61	0.58	0.51	0.54	0.53	0.50
<i>SR</i>	49.50%	91.60%	41.80%	56.80%	0.30%	28.60%	38.30%	16.90%
<i>FR_SE</i>	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
<i>FR_TE</i>	20.00%	3.50%	16.00%	14.60%	90.10%	69.80%	61.60%	58.80%
<i>FR_A</i>	6.70%	1.10%	0.20%	0.50%	9.60%	1.60%	0.10%	0.60%
<i>FR_C</i>	23.80%	3.80%	42.00%	28.10%	0.00%	0.00%	0.00%	23.70%
<i>Laser frontal e traseiro</i>								
Cenário 1					Cenário 2			
	DWA	EBand	TEB	BLP	DWA	EBand	TEB	BLP
<i>SPC</i>	1.00	0.99	0.92	1.00	1.13	1.00	0.96	1.01
<i>TEC</i>	0.15	0.58	0.59	0.62	0.29	0.08	0.28	0.35
<i>SMC</i>	0.62	0.65	0.62	0.57	0.49	0.52	0.52	0.51
<i>SR</i>	27.10%	87.50%	61.10%	47.70%	0.40%	20.70%	36.50%	25.90%
<i>FR_SE</i>	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
<i>FR_TE</i>	14.80%	4.00%	19.70%	12.20%	91.60%	66.40%	54.10%	72.40%
<i>FR_A</i>	3.70%	3.40%	0.00%	0.20%	8.00%	5.60%	0.30%	1.70%
<i>FR_C</i>	54.40%	5.10%	19.20%	39.90%	0.00%	7.30%	9.10%	0.00%
<i>Laser frontal, traseiro e câmera 3D</i>								
Cenário 1					Cenário 2			
	DWA	EBand	TEB	BLP	DWA	EBand	TEB	BLP
<i>SPC</i>	1.00	1.00	0.93	1.00	1.16	1.00	0.96	1.00
<i>TEC</i>	0.17	0.59	0.60	0.63	0.44	0.07	0.27	0.32
<i>SMC</i>	0.63	0.66	0.61	0.57	0.49	0.53	0.53	0.51
<i>SR</i>	29.60%	90.10%	58.20%	46.50%	0.70%	19.10%	35.70%	24.20%
<i>FR_SE</i>	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
<i>FR_TE</i>	13.60%	2.80%	20.70%	12.40%	90.70%	62.50%	54.40%	74.80%
<i>FR_A</i>	5.80%	2.90%	0.00%	0.00%	8.60%	8.40%	0.20%	1.00%
<i>FR_C</i>	51.00%	4.20%	21.10%	41.10%	0.00%	10.00%	9.70%	0.00%

Fonte: Autor.

casos, o método DWA tem o pior caso, chegando a 54,4% das colisões. Nenhum método apresentou problemas devido ao excesso de espaço percorrido ( $FR_{SE}$ ). Para o cenário 2, todos os métodos têm problemas com a taxa  $FR_{TE}$ . Este erro de taxa chega a 90% em alguns casos. Dentre os casos de sucesso, o planejador TEB teve o melhor resultado com valores em torno de 36% e o DWA teve o pior resultado, abaixo de 1%.

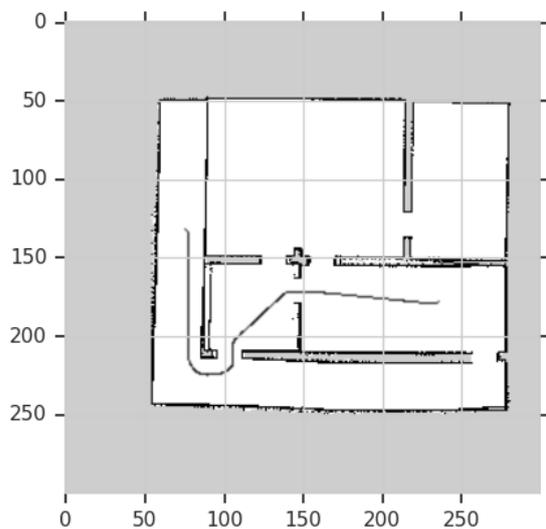
Em termos de eficiência espacial, os métodos não apresentam grandes diferenças, o melhor foi o planejador DWA e BLP com coeficiente espacial maior ou igual a 1,0 e o pior foi o planejador TEB com coeficiente em torno de 0,93% para o cenário 1 e 0,96 para o Cenário 2. Esses valores são explicados devido à característica do TEB de otimizar o movimento do robô para se tornar mais semelhante ao comportamento de um carro, dando menos foco à otimização espacial e suavizando seu movimento. Por esse coeficiente, é possível observar que alguns valores ultrapassam 1,0, o que significa que o robô andou menos do que o espaço mínimo necessário para chegar ao destino. Esses valores podem ser explicados pela tolerância usada no `move_base` para chegar ao destino, o parâmetro `'xy_goal_tolerance'` que faz com que o robô pare um pouco antes de chegar ao destino.

Em termos de eficiência de tempo, os métodos apresentaram diferenças consideráveis. Sendo que o DWA teve o pior resultado enquanto os demais estão mais próximos um do outro. Foi observado que o DWA faz pequenas paradas ao longo da trajetória aumentando assim o seu tempo de percurso. O melhor valor observado foi o planejador de base com coeficiente em torno de 0,63%.

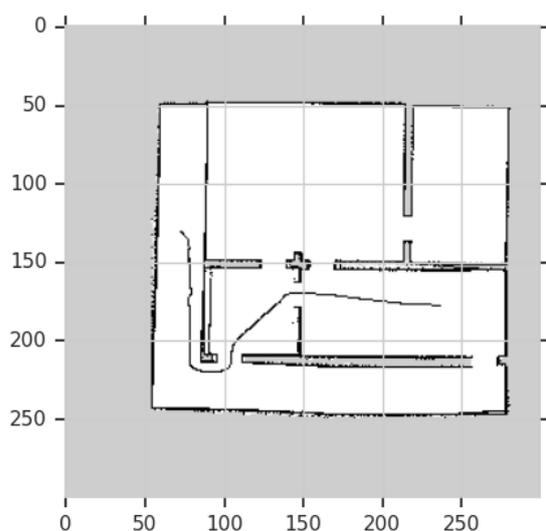
Em termos de coeficiente de suavização, todos os métodos apresentaram valores próximos, em torno de 0,60 e 0,65 para o cenário 1, exceto o método Base que ficou abaixo de 0,60, com os melhores valores encontrados no método EBand em torno de 0,65. Para o cenário 2, os valores caem em torno de 0,1 ponto, isso se deve à presença de mais obstáculos no cenário, o que obriga o planejador a fazer mais curvas para poder desviar. Neste cenário, os métodos EBand e TEB com valores em torno de 0,53 continuam tendo vantagem sobre o DWA e BLP com valores em torno de 0,50. Na Figura 19 pode-se ver exemplos das trajetórias percorridas pelo robô em dois experimentos, o primeiro com o método DWA em um ambiente sem mobília onde é possível perceber um caminho menos suave tentando realizar o menor caminho e o segundo usando o método EBand em um ambiente onde é possível perceber um caminho mais suave no desvio de obstáculos.

Figura 19 – Exemplo de trajetórias calculadas pelo planejador global (topo) e executadas pelos planejadores locais (parte inferior) em experimentos preliminares.

(a) Ambiente 1 com o planejador DWA



(b) Ambiente 2 com o planejador EBand



Fonte: Autor.

## 5.2 Etapa 2: Otimização da navegação comum

Nesta etapa dos testes, 1000 experimentos foram realizados para cada combinação de configuração em ambientes simulados, definindo um subconjunto de testes. No total, foram realizados 32 subconjuntos de testes, totalizando 32.000 experimentos de navegação em ambientes simulados. O objetivo principal desses experimentos foi otimizar e avaliar o comportamento de navegação do robô em diferentes cenários e configurações e fornecer uma linha base de resultados para comparar implementações e atualizações futuras.

As próximas subseções apresentam os resultados de cada um dos conjuntos desta etapa.

### 5.2.1 Conjunto I: Configuração simples

No primeiro conjunto dos testes na etapa 2, foi utilizada a mesma configuração da etapa 1 após a otimização, exceto pela alteração do ambiente para ter maior controle na análise dos resultados. Os cenários usados neste conjunto (figura 11 (a,b,c)) tem apenas obstáculos simples, ou nenhum obstáculo. Os dados de entrada para esta etapa são apresentados a seguir:

- a) robot\_max\_vel: 0.3;
- b) xy\_goal\_tolerance: 0.1;
- c) yaw\_goal\_tolerance: 3.1415;
- d) use\_amcl: Yes;
- e) global\_planner: NavFn (NavfnROS);
- f) local\_planner: Base (TrajectoryPlannerROS);
- g) observation\_sources - 3 sensors;
  - laser\_scan\_front\_observation (LaserScan);
  - laser\_scan\_back\_observation (LaserScan);
  - point\_cloud\_base\_front\_observation (PointCloud2).
- h) layers - Common configuration;
  - static\_layer (costmap\_2d::StaticLayer);
  - obstacles\_layer (costmap\_2d::VoxelLayer);
  - inflation\_layer (costmap\_2d::InflationLayer).

Na tabela 16 pode-se ver os resultados dos experimentos realizados para esta configuração simples. Pode-se observar que ambos os planejadores obtiveram resultados excelentes (acima de 90%) em  $SR$  para 2 cenários (vazio e caixas) e não tão bons resultados (abaixo de 70%) no cenário com corredor. Pode-se observar que a configuração padrão obteve resultados excelentes (acima de 90%) em  $SR$  para 2 cenários (vazio e caixas) e resultados ruins (abaixo de 50%) no cenário com corredor. Para o cenário com corredor, esta configuração teve as taxas de erro mais altas, como  $FR_{TE}$  igual a 25.7% e  $FR_C$  igual a 5.9%. Esta configuração não apresentou problemas devido ao excesso de espaço percorrido ( $FR_{SE}$ ).

Em termos de eficiência espacial, esta configuração apresenta pequenas diferenças em relação aos ambientes, o melhor valor para o coeficiente espacial foi igual a 1 no cenário de sala

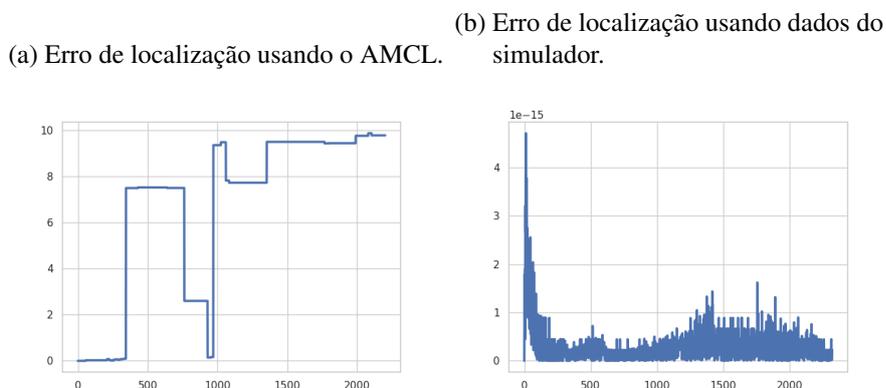
vazia devido a não haver obstáculos neste ambiente e os piores resultados foram iguais a 0.98 para cenário com caixa e igual a 0.98 para cenário com corredor.

Em termos de eficiência espacial, esta configuração apresentou pequenas diferenças na comparação dos três ambientes. O melhor valor do coeficiente espacial foi igual a 1 no cenário de sala vazia devido à ausência de obstáculos neste ambiente. Os piores resultados foram iguais a 0.98 para cenários com caixas e iguais a 0.98 para cenários com corredor.

Em termos de eficiência de tempo, esta configuração apresentou diferenças consideráveis com diferentes cenários. O comportamento para resultar nestes valores é o mesmo que o coeficiente de espaço onde o melhor valor foi igual a 0.96 no cenário de sala vazia e os piores resultados foram iguais a 0.88 para o cenário com caixas e igual a 0.74 para o cenário com corredor. O pior resultado no corredor foi devido ao pequeno espaço disponível para navegar e à necessidade de fazer mais correções no planejamento do trajeto para evitar colisões com obstáculos. Comparando os resultados da tabela 15 e 16 pode-se ver melhores resultados nos novos experimentos, exceto para os experimentos de corredor que não foram avaliados no conjunto anterior.

Neste conjunto, foi possível perceber que o robô apresentava alguns problemas de localização. A AMCL apresentou saltos repentinos de posicionamento, com isso, o robô se perdeu no ambiente resultando na impossibilidade de chegar ao destino ou pensar que chegou ao destino quando na verdade não chegou. A figura 20(a) mostra o gráfico de erro de posicionamento do robô usando AMCL em um dos experimentos realizados. Nesta figura é possível observar os saltos de posicionamento que ocorrem no robô. O eixo  $y$  representa o valor em metros do erro de localização do robô (distância euclidiana entre a posição que ele está no simulador e o sistema de localização). No eixo  $x$ , são observados os ciclos de execução da simulação. Enquanto na figura 20(a) o erro mostra alguns saltos, na figura 20(b) este valor permanece estável, próximo de 0. Testes preliminares em um ambiente mais complexo indicaram que esse tipo de problema ocorria com menos frequência. Este comportamento ocorre porque nos ambientes complexos existem detalhes suficientes que servem de referência para a AMCL para o robô se localizar. Diante dessas informações e como a otimização da localização não é o foco desses experimentos, foi utilizado o posicionamento do robô que vem diretamente do simulador por apresentar uma localização precisa conforme visto na figura 20(b).

Figura 20 – Erro de localização nos experimentos simulados. Eixo y representa o espaço em metros que a localização sofreu alteração e o eixo x representa o *timestep* de simulação



Fonte: Autor.

Tabela 16 – Resultados de experimentos da etapa 2.1: Configuração simples.

	vazio	caixas	corredor
<i>SR</i>	98.4 %	94.5 %	43.1 %
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0.1 %	1.4 %	25.7 %
<i>FR_A</i>	0.9 %	2.6 %	25.3 %
<i>FR_C</i>	0.6 %	1.5 %	5.9 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.03$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.14$	$\bar{x} = 0.74$ $\sigma = 0.24$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.84$ $\sigma = 0.1$	$\bar{x} = 0.79$ $\sigma = 0.12$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

## 5.2.2 Conjunto II: Planejadores globais

No segundo conjunto dos testes, foram utilizados os mesmos cenários do conjunto anterior (figura 11 (a,b,c)). Os detalhes das variáveis alteradas são apresentados a seguir:

- a) `use_amcl=:` No;
- b) `global_planner;`
  - Navfn (NavfnROS);

– Global (GlobalPlanner).

Na tabela 17 verifica-se os resultados dos experimentos realizados usando a localização do simulador e os dois planejadores globais usados: Navfn e Global. Pode-se observar que ambos os planejadores obtiveram resultados excelentes (acima de 90%) em  $SR$  para 2 cenários (vazio e caixas), e não bons resultados (abaixo de 80%) no cenário do corredor. O planejador NavFn tem 98.8% para o cenário de sala vazia, 97.9% para o cenário de sala com caixas e 79.3% para o cenário de sala com corredor. O planejador global tem 99.3% para o cenário de sala vazia, 97.2% para o cenário de sala com caixas e 69.4% para o cenário de sala com corredor. Para o cenário com corredor, é notável que tenha ocorrido um upgrade de desempenho, quando comparado com o conjunto anterior: +36,2% para planejador NavFn e +26,3% para planejador Global. A maioria das falhas estava relacionada ao tempo excedido ( $FR_{TE}$ ). Esta atualização está mais relacionada ao uso de localização do simulador. Esta configuração não apresentou problemas devido ao excesso de espaço percorrido ( $FR_{SE}$ ). Em termos de eficiência espacial ( $SPC$ ), eficiência de tempo ( $TEC$ ) e coeficiente de suavização ( $SMC$ ) esta configuração apresentou um comportamento semelhante ao obtido no conjunto anterior.

Tabela 17 – Resultados de experimentos da etapa 2.1: Planejadores globais.

	navfn			global		
	vazio	caixas	corredor	vazio	caixas	corredor
$SR$	98.8 %	<b>97.9 %</b>	<b>79.3 %</b>	<b>99.3 %</b>	97.2 %	69.4 %
$FR_{SE}$	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
$FR_{TE}$	0 %	0.6 %	18.4 %	0 %	0.9 %	26.9 %
$FR_A$	0.7 %	0.4 %	0.5 %	0.5 %	0.9 %	1.2 %
$FR_C$	0.5 %	1.1 %	1.8 %	0.2 %	1 %	2.5 %
$SPC$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.03$
$TEC$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.13$	$\bar{x} = 0.83$ $\sigma = 0.2$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.11$	$\bar{x} = 0.73$ $\sigma = 0.25$
$SMC$	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.09$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.11$	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.07$	$\bar{x} = 0.81$ $\sigma = 0.12$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

### 5.2.3 Conjunto III: Planejadores locais

No terceiro conjunto dos testes, foram utilizados os mesmos cenários do conjunto anterior (figura 11 (a,b,c)). Os detalhes das variáveis alteradas são apresentados a seguir:

- a) global\_planner: NavFn;
- b) local\_planner;
  - BLP (TrajectoryPlannerROS).
  - DWA (DWAPlannerROS).
  - EBand (EBandPlannerROS).
  - TEB (TebLocalPlannerROS).

Da tabela 18 pode-se ver os resultados dos experimentos realizados usando os quatro planejadores locais usados: BLP, DWA, EBand e TEB. Observa-se que os resultados do planejador Base são os mesmos que os apresentados na tabela 18 para NavFn. Pode-se observar que os quatro planejadores obtiveram resultados excelentes (acima de 90%) em  $SR$  para 2 cenários (vazio e caixas) e bons resultados (acima de 70%) no cenário com corredor. Conforme apresentado no conjunto anterior, o planejador BLP tem 98.8% para o cenário de sala vazia, 97.9% para o cenário de sala com caixas e 79.3% para o cenário de sala com corredor. O planejador DWA tem 95% para o cenário de sala vazia, 92% para o cenário de sala com caixas e 78.3% para o cenário de sala com corredor. O planejador DWA tem 99.5% para o cenário de sala vazia, 97.9% para o cenário de sala com caixas e 87.4% para o cenário de sala com corredor. O planejador DWA tem 98.3% para o cenário de sala vazia, 98.2% para o cenário de sala com caixas e 96.6% para o cenário de sala com corredor. Para o cenário com corredor, novamente, é notável que uma atualização de desempenho foi alcançada, quando comparada à etapa anterior: +17,3% para Planejador TEB, com a maioria das falhas relacionadas ao tempo excedido ( $FR_{TE}$ ). Esta configuração não apresentou problemas devido ao excesso de espaço percorrido ( $FR_{TE}$ ). Em termos de eficiência espacial ( $SPC$ ), eficiência de tempo ( $TEC$ ) e coeficiente de suavização ( $SMC$ ) esta configuração apresentou comportamento semelhante ao conjunto anterior.

Tabela 18 – Resultados de experimentos da etapa 2.1: Planejadores locais.

	BLP			DWA		
	vazio	caixas	corredor	vazio	caixas	corredor
<i>SR</i>	98.8 %	97.9 %	79.3 %	95 %	92 %	78.3 %
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0 %	0.6 %	18.4 %	0.7 %	0 %	1.4 %
<i>FR_A</i>	0.7 %	0.4 %	0.5 %	4.3 %	8 %	20.3 %
<i>FR_C</i>	0.5 %	1.1 %	1.8 %	0 %	0 %	0 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.02$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.13$	$\bar{x} = 0.83$ $\sigma = 0.2$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.9$ $\sigma = 0.04$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.09$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.12$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.04$
	EBand			TEB		
	vazio	caixas	corredor	vazio	caixas	corredor
<i>SR</i>	<b>99.5 %</b>	97.9 %	87.4 %	98.3 %	<b>98.2 %</b>	<b>96.6 %</b>
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0 %	0 %	8 %	1.4 %	0.9 %	2.9 %
<i>FR_A</i>	0.5 %	2.1 %	4.1 %	0.3 %	0.9 %	0.5 %
<i>FR_C</i>	0 %	0 %	0.5 %	0 %	0 %	0 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.07$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.83$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.28$ $\sigma = 0.09$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.95$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.86$ $\sigma = 0.15$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.86$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.84$ $\sigma = 0.08$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

#### 5.2.4 Conjunto IV: Fontes de observação

No quarto conjunto dos testes, o ambiente foi alterado para explorar obstáculos mais complexos, como mesas e pequenos objetos, ambos difíceis de serem percebidos por um *laser* comum. Os ambientes utilizados nesta etapa podem ser vistos na figura 11 (d,e,f). Os detalhes das variáveis alteradas são apresentados a seguir:

- local\_planner: TEB;
- observation\_sources;

- 3 sensors;
  - i. laser\_scan\_front\_observation;
  - ii. laser\_scan\_back\_observation;
  - iii. point\_cloud\_base\_front\_observation.
- 4 sensors;
  - i. laser\_scan\_front\_observation;
  - ii. laser\_scan\_back\_observation;
  - iii. point\_cloud\_base\_front\_observation;
  - iv. point\_cloud\_torso\_front\_observation.

Da tabela 19 pode-se ver os resultados dos experimentos realizados usando a configuração de dois sensores diferentes. A primeira configuração com 3 sensores (*laser* frontal da base, *laser* traseiro da base e câmera 3D frontal da base) e a segunda configuração com 4 sensores (*laser* frontal da base, *laser* traseiro da base, câmera 3D frontal da base e câmera 3D frontal do torso). Pode-se observar que no cenário com mesas, resultados excelentes (acima de 90%) foram obtidos em *SR* para ambas as configurações, isso significa que as mesas podem ser bem percebidas pelo primeiro conjunto de sensores do robô. Nos outros 2 cenários nesta fase, foram obtidos resultados muito ruins (abaixo de 30%) para a configuração com três sensores e resultados excelentes (acima de 90%) para a configuração com quatro sensores. A configuração com três sensores teve 96.2% para o cenário com mesas, 8.5% para o cenário com pequenas caixas e 29.6% para o cenário com mesas e pequenas caixas. A configuração com quatro sensores tem 97.5% para o cenário com mesas, 96.1% para o cenário com pequenas caixas e 98.2% para o cenário com mesas e pequenas caixas.

### 5.2.5 Conjunto V: Mapas semânticos

No quinto conjunto dos testes, os cenários foram alterados para explorar um ambiente povoado por humanos, existem pessoas simuladas estáticas e dinâmicas e pessoas em interação com outras pessoas e objetos. O ambiente utilizado nesta etapa pode ser visto na figura 11 (g,h,i,j). Os detalhes das variáveis alteradas são apresentados a seguir:

- a) observation\_sources: 4 sensors;
- b) layers;
  - Common configuration;

Tabela 19 – Resultados de experimentos da etapa 2.1: Fontes de observação.

	3 sensores			4 sensores		
	mesas	caixas pequenas	mistura	mesas	caixas pequenas	mistura
<i>SR</i>	96.2 %	8.5 %	29.6 %	<b>97.5 %</b>	<b>96.1 %</b>	<b>98.2 %</b>
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	1.5 %	0 %	0 %	1.2 %	2.1 %	1 %
<i>FR_A</i>	0.4 %	0.4 %	0.3 %	0.6 %	0.4 %	0.6 %
<i>FR_C</i>	1.9 %	91.1 %	70.1 %	0.7 %	1.4 %	0.2 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.95$ $\sigma = 0.04$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.92$ $\sigma = 0.08$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.92$ $\sigma = 0.09$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.07$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.86$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.84$ $\sigma = 0.06$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

- i. `static_layer` (`costmap_2d::StaticLayer`);
- ii. `obstacles_layer` (`costmap_2d::VoxelLayer`);
- iii. `inflation_layer` (`costmap_2d::InflationLayer`).
- Social configuration;
  - i. `static_layer` (`costmap_2d::StaticLayer`);
  - ii. `obstacles_layer` (`costmap_2d::VoxelLayer`);
  - iii. `inflation_layer` (`costmap_2d::InflationLayer`);
  - iv. `proxemic_layer` (`social_navigation_layers::ProxemicLayer`).

Na tabela 20 pode-se ver os resultados dos experimentos realizados usando a configuração com dois conjuntos de camadas de navegação diferentes. A configuração comum com 3 camadas (estática, obstáculos e inflação) e a configuração social com 4 camadas (estática, obstáculos, inflação e proxêmica). Pode-se observar que apenas os cenários com pessoas estáticas obtiveram resultados excelentes (acima de 90%) em *SR* para ambas as configurações. No ambiente de interação humana, foram obtidos resultados ruins (em torno de 50%) para a configuração comum e resultado excelente (acima de 90%) para a configuração social. Nos outros 2 cenários deste conjunto, foram obtidos resultados muito ruins (abaixo de 10%) para ambas as configurações. A configuração comum tem 97.5% para o cenário com pessoas estáticas, 0.2% para o cenário com pessoas dinâmicas, 51.9% para o cenário com interação humano-humano, e 9.8% para o cenário com interação homem-objeto. A configuração social tem 98.5% para

o cenário com pessoas estáticas, 6.5% para o cenário com pessoas dinâmicas, 93.3% para o cenário com interação humano-humano, e 0.1% para o cenário com interação homem-objeto.

Tabela 20 – Resultados de experimentos da etapa 2.5: Mapas semânticos

	Comum			
	Pessoas estáticas	Pessoas dinâmicas	Interação humano-humano	Interação humano-objeto
<i>SR</i>	97.5%	0.2%	51.9%	<b>9.8%</b>
<i>FR_SE</i>	0%	0%	0%	0%
<i>FR_TE</i>	1.3%	0.1%	0.9%	0%
<i>FR_A</i>	1.2%	4.6%	0.8%	0.9%
<i>FR_C</i>	0%	95.1%	0%	0%
<i>FR_I</i>	0%	0%	46.4%	89.6%
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.71$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.01$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.95$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.01$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.9$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.9$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.87$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.01$
	Social			
	Pessoas estáticas	Pessoas dinâmicas	Interação humano-humano	Interação humano-objeto
<i>SR</i>	<b>98.5%</b>	<b>6.5%</b>	<b>93.3%</b>	0.1%
<i>FR_SE</i>	0%	0%	0%	0%
<i>FR_TE</i>	0.4%	0.2%	1.1%	0%
<i>FR_A</i>	1.1%	0.8%	1.8%	0.9%
<i>FR_C</i>	0%	92.5%	0%	0%
<i>FR_I</i>	0%	0%	3.8%	99%
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.08$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.07$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.78$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.07$	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.07$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.92$ $\sigma = 0$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

### 5.3 Etapa 3: Navegação comum x social - Pessoas estáticas

No ambiente simulado foi possível realizar uma implementação e avaliação de diversos elementos que compõem um sistema de navegação para robôs sociais móveis com pessoas estáticas. Foram realizados 1000 experimentos para cada conjunto de ambientes, tipos de interação e tipos de navegação. Ao todo, foram realizadas 18 combinações diferentes, totalizando 18000 experimentos. As seguintes variações foram realizadas nesta etapa:

- a) **Ambientes:** Individual Estático, Interação com Objeto, Grupo Face-a-Face e Grupo em Formação Circular;
- b) **Tipos de interação:** Interações Espaciais Explícitas e Interações Espaciais Implícitas;
- c) **Tipos de navegação:** Navegação comum e navegação social.

As tabelas 21, 22, 23 apresentam os resultados de simulação para as interações espaciais implícitas, explícitas, e a combinação delas respectivamente, onde o robô passa próximo das pessoas simuladas. Nestas tabelas é possível observar que os melhores resultados são apresentados para os ambientes que tiveram navegação social.

A principal causa de falha foi a invasão dos espaços de interação, com exceção dos ambientes com indivíduos estáticos, onde não existe uma área de interação que pudesse ser invadida, todos os outros ambientes apresentaram essa falha para a navegação comum.

Em relação ao coeficiente espacial (*SPC*), é observado que em todos os ambientes com navegação comum, os valores são iguais a 1. Isso quer dizer que o robô não faz pouco ou nenhum desvio de trajetória em comparação com o planejamento realizado. Já nos ambientes com navegação social, é observado uma queda nestes valores de *SPC*. Esta queda é decorrente de alteração na trajetória em comparação com o planejamento. Neste caso, o robô realiza uma trajetória maior do que o planejado para evitar passar perto demais dos humanos ou evitar passar em locais de interação. Já nos casos de interação espacial explícita, os resultados ultrapassam o valor de 1. Isso acontece porque nos casos de abordagem o robô planeja ir até o ponto onde está a pessoa, entretanto o robô seleciona um ponto próximo à pessoa e dentro do ângulo de visão da pessoa para fazer a abordagem. Esse ponto próximo resulta geralmente em uma trajetória menor do que a planejada, resultando em valores acima de 1 para o *SPC*.

Em relação ao coeficiente temporal (*TEC*), todos os experimentos apresentam valores próximos de 1, sem muita diferença. Os valores indicam que o robô segue o planejado em relação ao tempo. Um leve aumento dos valores é observado nos experimentos com interações espaciais explícitas, e novamente, esse aumento assim como na métrica *SPC*, ocorre porque o robô planeja ir até o ponto onde está a pessoa mas interrompe o seu movimento antes, para evitar invasão de espaço de interação ou mesmo uma colisão.

Em relação ao coeficiente de suavidade (*SMC*), essa métrica apresenta ótimos valores para as interações espaciais implícitas (acima de 0.91). Esses valores indicam que a trajetória foi suave, com poucas curvas. Já nas interações espaciais explícitas, o valor médio cai, sendo explicado pela necessidade do robô fazer curvas e de girar nos momentos de abordagem do ser

humano. Nos experimentos de maratona, esse valor cai drasticamente. Nestes ambientes o robô precisa fazer diversas curvas e giros ao longo da trajetória, impactando assim nesta métrica.

Em relação ao coeficiente de proximidade (*PRC*), existe uma diferença entre os experimentos com navegação comum e navegação social. É possível observar que a navegação social consegue respeitar as distâncias sociais das pessoas com valores muito próximos ou iguais a 1 em todos os experimentos.

Tabela 21 – Resultados de experimentos da etapa 3(1-4), interações implícitas. Melhores valores em negrito.

	Comum				Social			
	GC	GF	IE	IO	GC	GF	IE	IO
<i>SR</i>	36.9 %	0 %	<b>100 %</b>	<b>99.4 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	98.9 %
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_A</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_C</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_I</i>	63.1 %	100 %	0 %	0.6 %	0 %	0 %	0 %	1.1 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.95$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.02$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.03$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.86$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.84$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.02$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 0.82$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.92$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

#### 5.4 Etapa 4: Navegação comum x social - Pessoas dinâmicas

No ambiente simulado foi possível realizar uma implementação e avaliação de diversos elementos que compõem um sistema de navegação para robôs sociais móveis com pessoas dinâmicas. Foram realizados 1000 experimentos para cada conjunto de ambientes e tipos de navegação. Ao todo, foram realizadas 10 combinações diferentes, totalizando 10000 experimentos. As seguintes variações foram realizadas nesta etapa:

- Ambientes:** Individual com Cruzamento, Individual de Frente, Grupo de 5 Pessoas e Grupo de 10 Pessoas;
- Tipos de interação:** Interações Espaciais Implícitas;
- Tipos de navegação:** Navegação comum e navegação social.

Tabela 22 – Resultados de experimentos da etapa 3(1-4), interações explícitas. Melhores valores em negrito.

	Comum				Social			
	GC	GF	IE	IO	GC	GF	IE	IO
<i>SR</i>	0.3 %	0 %	<b>100 %</b>	0 %	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	99.9 %	<b>98.1 %</b>
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0 %	0 %	0 %	4.5 %	0 %	0 %	0.1 %	0.6 %
<i>FR_A</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_C</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_I</i>	99.7 %	100 %	0 %	95.5 %	0 %	0 %	0 %	1.3 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 1.03$ $\sigma = 0.18$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.92$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1.09$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 1.04$ $\sigma = 0.08$	$\bar{x} = 1.03$ $\sigma = 0.1$	$\bar{x} = 1.04$ $\sigma = 0.1$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.15$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.83$ $\sigma = 0.1$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1.05$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.12$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.1$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.11$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.87$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.81$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.87$ $\sigma = 0.07$	$\bar{x} = 0.81$ $\sigma = 0.07$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 0.62$ $\sigma = 0.44$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.01$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

Tabela 23 – Resultados de experimentos da etapa 3.5. Melhores valores em negrito.

	Comum	Social
<i>SR</i>	0 %	<b>100 %</b>
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0 %	0 %
<i>FR_A</i>	0 %	0 %
<i>FR_C</i>	0 %	0 %
<i>FR_I</i>	100 %	0 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.02$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.87$ $\sigma = 0.03$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.46$ $\sigma = 0$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

A tabelas 24, 25 apresentam os resultados de simulação para as interações espaciais implícitas, e a combinação delas respectivamente, onde o robô passa próximo das pessoas simuladas. Nestas tabelas é possível observar que os melhores resultados são apresentados para os ambientes que tiveram navegação social. A partir destas tabelas é possível verificar que me-

lhorias ainda podem ser realizadas nas interações dinâmicas com grupos de pessoas que serão realizadas em trabalhos futuros.

A principal causa da falha foi a colisão com pessoas simuladas (*Fail Rate by Collision*). Com exceção dos ambientes de uma pessoa cruzando na frente do robô, todos os outros ambientes apresentaram essa falha para a navegação comum.

Em relação ao coeficiente espacial (*Spatial Coefficient*), é observado que nos ambientes com uma pessoa cruzando o caminho os valores são iguais a 1. Isso quer dizer que o robô faz pouco ou nenhum desvio de trajetória em comparação com o planejamento realizado. Já nos demais ambientes, é observado uma queda nestes valores de *Spatial Coefficient*. Esta queda é decorrente de alteração na trajetória em comparação com o planejamento. Neste caso, o robô realiza uma trajetória maior do que o planejado para evitar colidir com os humanos em movimento, ao mesmo tempo que tenta manter uma distância segura.

Em relação ao coeficiente temporal (*Temporal Coefficient*), todos os experimentos apresentam valores próximos de 1, sem muita diferença. Os valores indicam que o robô segue o planejado em relação ao tempo.

Em relação ao coeficiente de suavidade (*Smoothing Coefficient*), essa métrica também apresenta ótimos valores em todos os casos. Esses valores indicam que a trajetória foi suave, com poucas curvas. Nos experimentos de maratona, esse valor cai drasticamente. Nestes ambientes o robô precisa fazer diversas curvas e giros ao longo da trajetória, impactando assim nesta métrica. Nestes ambientes também é observado que a navegação comum é mais suave que a navegação social, isso acontece porque o robô faz mais curvas tentando respeitar o espaço íntimo e pessoal das pessoas na navegação social, enquanto na navegação comum ele apenas respeita o espaço íntimo para evitar colisões.

Em relação ao coeficiente de proxêmica (*Proxemic Coefficient*), existe uma diferença entre os experimentos com navegação comum e navegação social. É possível observar que a navegação social consegue respeitar as distâncias sociais das pessoas com valores muito próximos ou iguais a 1 em todos os experimentos, enquanto existe uma queda na navegação comum.

## 5.5 Etapa 5: Navegação comum x social - Ambiente real

Nos experimentos reais, os voluntários realizaram tarefas simples e cotidianas como usar um celular, interagir com outras pessoas e interagir com objetos. Enquanto isso, o robô social realizava tarefas que envolviam interação espacial, como se deslocar pelo ambiente, podendo

Tabela 24 – Resultados de experimentos da etapa 4(1-4), interações implícitas. Melhores valores em negrito.

	Comum				Social			
	IC	IF	G5	G10	IC	IF	G5	G10
<i>SR</i>	<b>100 %</b>	61.6 %	30.6 %	50.7 %	<b>100 %</b>	<b>86.3 %</b>	<b>90.1 %</b>	<b>96.5 %</b>
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	3.7	0	0
<i>FR_A</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_C</i>	0 %	38.4 %	69.4 %	49.3 %	0	503.2	366.3	129.5
<i>FR_I</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0	0	0	0
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.03$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.95$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.95$ $\sigma = 0.03$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.9$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.87$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.9$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.9$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.03$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.07$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.05$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

Tabela 25 – Resultados de experimentos da etapa 4.5.. Melhores valores em negrito.

	Comum	Social
<i>SR</i>	0.3 %	<b>73.4 %</b>
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0.8 %	0.2 %
<i>FR_A</i>	0.1 %	0 %
<i>FR_C</i>	75.6 %	26.4 %
<i>FR_I</i>	23.2 %	0 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 0.87$ $\sigma = 0.18$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.05$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.74$ $\sigma = 0.21$	$\bar{x} = 0.82$ $\sigma = 0.07$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.51$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.46$ $\sigma = 0.01$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.01$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Fonte: Autor.

ou não passar próximas do participante (interação implícita) ou abordá-lo em algum momento (interação explícita). O robô poderia apresentar um comportamento socialmente aceito ou não enquanto a reação do voluntário era observada.

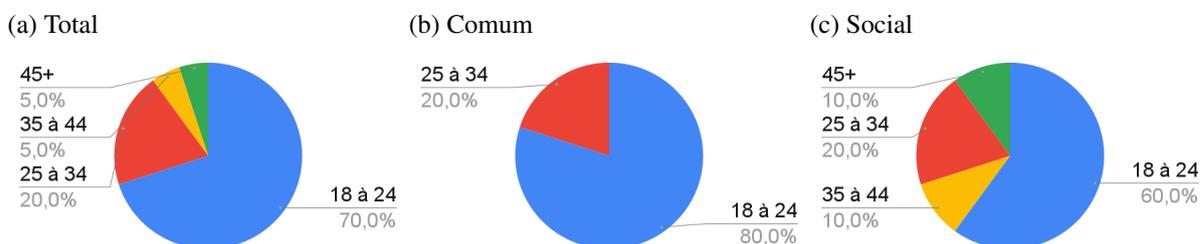
Nestes experimentos foram convocadas 20 pessoas com diferentes idades e diferentes familiaridades com um robô social para interagir com a plataforma robótica HERA. Cada experimento possui combinações diferentes totalizando 120 experimentos diferentes:

- a) **Ambientes:** Individual Estático, Interação com Objeto, Grupo Face-a-Face. Todos os participantes realizam;
- b) **Tipos de interação:** Interações Espaciais Explícitas e Interações Espaciais Implícitas. Todos os participantes realizam;
- c) **Tipos de navegação:** Navegação comum e navegação social. Metade dos participantes realizam cada tipo.

Destes experimentos, metade foi realizada com navegação comum, enquanto a outra metade foi realizada com navegação social. O tipo de navegação foi selecionado aleatoriamente para cada voluntário, até completar o requisito de meio a meio entre comum e social.

Na figura 21 é possível ver a distribuição da faixa etária dos participantes, de forma geral, e discriminado por tipo de navegação usada no experimento. A faixa etária predominante foi de 18 a 24 anos.

Figura 21 – Faixa etária dos voluntários nos experimentos reais.

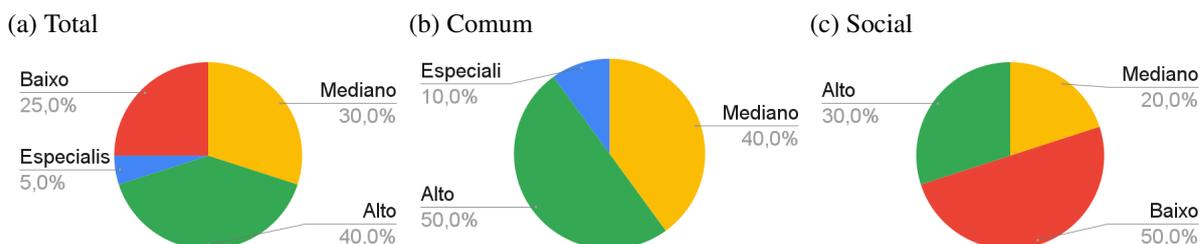


Fonte: Autor.

A figura 22 apresenta o grau de familiaridade médio dos voluntários com alguns termos chave utilizados na navegação social: robô, robô móvel, robô colaborativo, robô inteligente, robô de serviço, robô social, IHR e interação espacial.

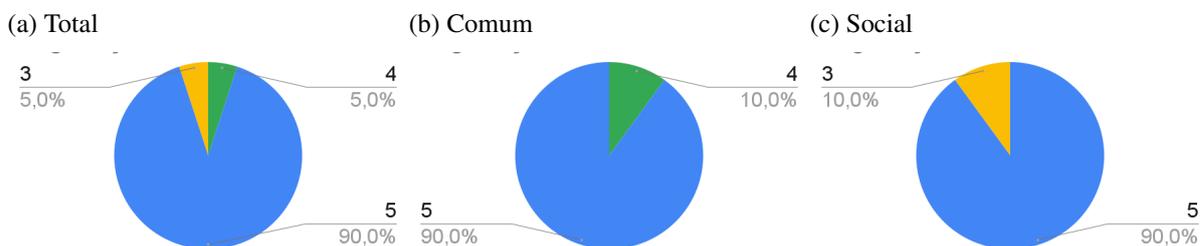
As figuras 23, 24, 25, 26 e 27 apresentam o grau de satisfação dos voluntários com algumas características da navegação social: segurança física, naturalidade, sociabilidade, legibilidade e conforto. A maioria dos voluntários possui um conhecimento 5 sobre segurança física, entre 3 e 4 para naturalidade, 5 para sociabilidade, entre 4 e 5 para legibilidade e 5 para conforto.

Figura 22 – Familiaridade dos voluntários nos experimentos reais.



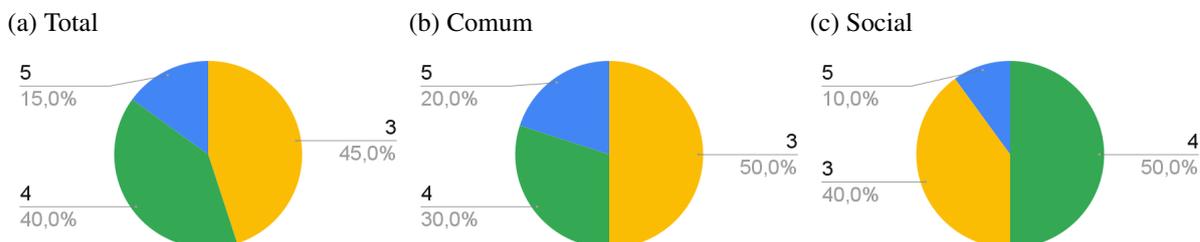
Fonte: Autor.

Figura 23 – Segurança Física dos voluntários nos experimentos reais.



Fonte: Autor.

Figura 24 – Naturalidade dos voluntários nos experimentos reais.



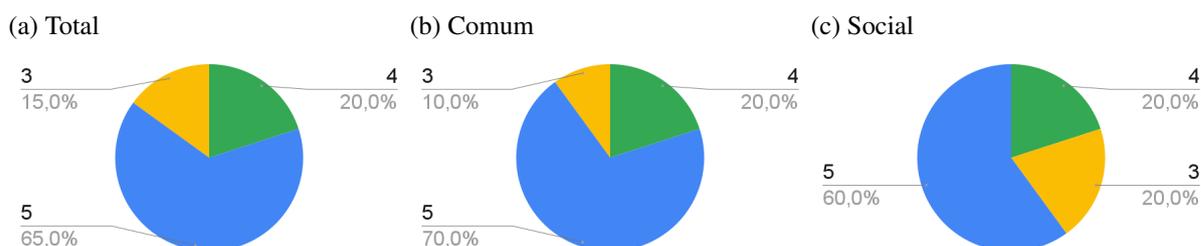
Fonte: Autor.

A tabela 26 apresenta os resultados das métricas *SPC* e *TEC* em cada um dos experimentos. Os valores para ambas as métricas, apresentam similaridades com os apresentados nos experimentos simulados.

A figura 28 apresenta os valores das métricas *PRC* e *SMC*, além destas duas, também é apresentado o PE, que é a distância do robô para a pessoa mais próxima (usado como medida básica para verificar a proximidade, não como uma métrica de avaliação) e *SII*, que também usa o PE como base.

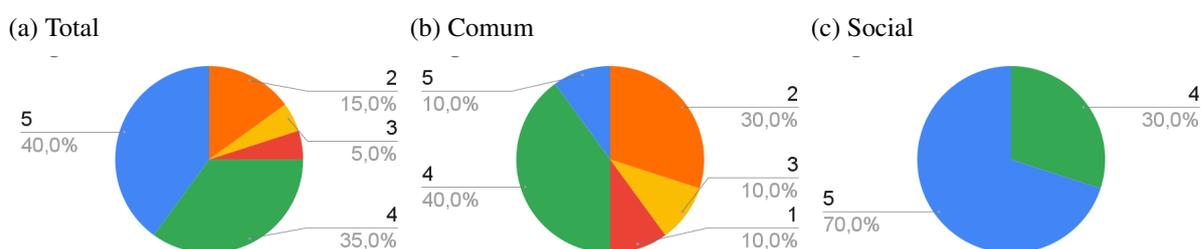
Como os resultados gráficos dos experimentos com navegação comum apresentam comportamentos similares entre si e o mesmo ocorre entre os experimentos de navegação social, foi selecionado apenas um experimento de cada tipo de navegação para ser analisado: o experi-

Figura 25 – Sociabilidade dos voluntários nos experimentos reais.



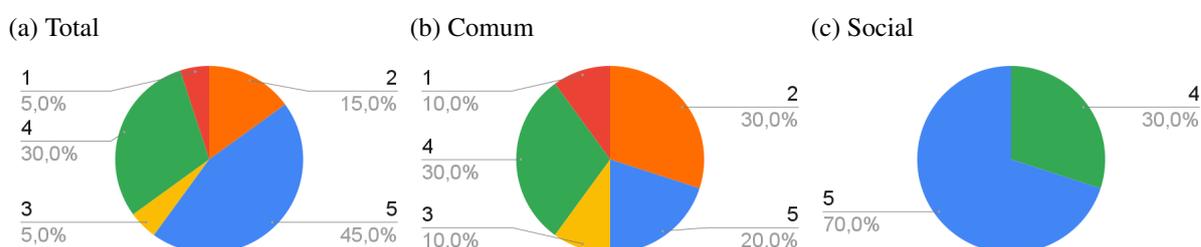
Fonte: Autor.

Figura 26 – Legibilidade dos voluntários nos experimentos reais.



Fonte: Autor.

Figura 27 – Conforto dos voluntários nos experimentos reais.



Fonte: Autor.

mento do voluntário 3 (navegação comum) e o experimento do voluntário 1 (navegação social). Nestes gráficos, o eixo x representa os pontos da trajetória executada pelo robô e o eixo y, o valor de cada métrica. Os gráficos são divididos em faixas que representam cada momento do experimento. São 9 momentos no total:

- 0:** individual estático e interação espacial implícita;
- 1:** individual estático e interação espacial explícita - início da abordagem;
- 2:** individual estático e interação espacial explícita - final da abordagem;
- 3:** grupo face a face e interação espacial implícita;
- 4:** grupo face a face e interação espacial explícita - início da abordagem;
- 5:** grupo face a face e interação espacial explícita - final da abordagem;
- 6:** individual interagindo com objeto e interação espacial implícita;

Tabela 26 – Resultados de experimentos da etapa 5.

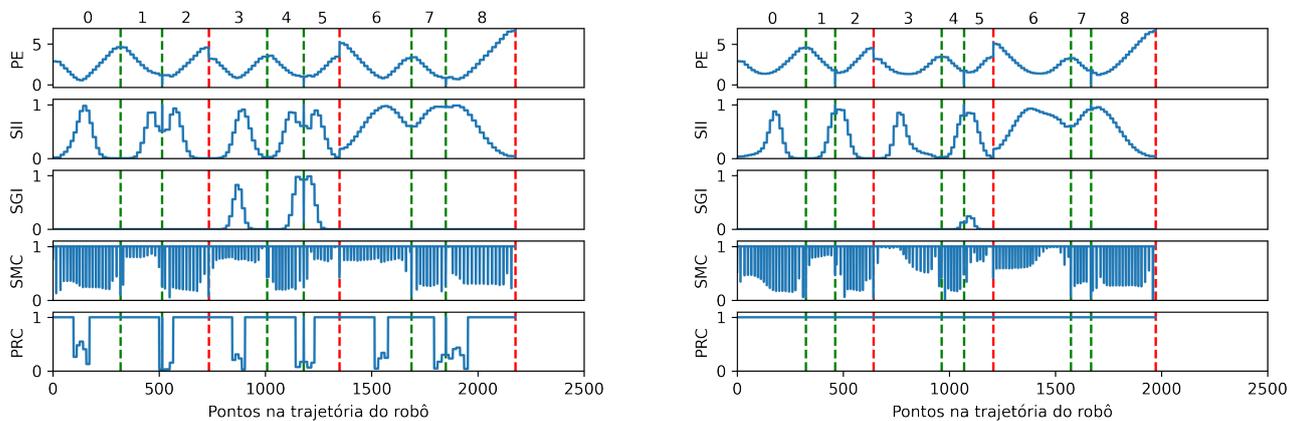
Comum										
ID	3	5	9	11	13	14	15	16	17	19
<i>SPC</i>	0.97	0.97	0.96	0.97	0.96	0.97	0.97	0.96	0.97	0.96
<i>TEC</i>	0.91	0.90	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93
Social										
ID	1	2	4	6	7	8	10	12	18	20
<i>SPC</i>	0.98	0.98	0.99	0.98	0.97	0.99	1.00	0.98	0.97	0.98
<i>TEC</i>	0.96	0.96	0.94	0.95	0.92	0.95	0.96	0.95	0.94	0.95

Fonte: Autor.

Figura 28 – Métricas *SII*, *SMC* e *PRC* nos experimentos reais.

(a) Voluntário 3: Navegação comum

(b) Voluntário 1: Navegação social



Fonte: Autor.

- h) **7**: individual interagindo com objeto e interação espacial explícita - início da abordagem;
- i) **8**: individual interagindo com objeto e interação espacial explícita - final da abordagem.

Dentre os 4 gráficos apresentados, o *PRC* e o *SMC* foram os mais representativos quando se compara a navegação comum e a social. Pelo *PRC* é possível observar com clareza os momentos em que o robô se aproxima demais do ser humano nos experimentos de navegação comum, enquanto nos experimentos de navegação social o robô respeita o distanciamento em todos os momentos. Pelo *SMC* pode-se ver os momentos em que o robô realiza movimentos suaves (próximo ao 1) e não tão suaves (próximo ao 0).

## 5.6 Discussão dos Resultados

Nesta seção são discutidos os resultados de cada etapa da implementação da navegação social na plataforma robótica HERA. Ao final de cada etapa de experimento, a ontologia é revisada e atualizada no processo de manutenção do seu ciclo de vida.

### 5.6.1 Etapa 1

A partir dos dados da primeira etapa foi possível chegar a algumas conclusões. O planejador DWA e o planejador BLP, apesar de serem os mais usados no RNS e em diversos trabalhos na literatura, apresentaram os piores resultados relativos às métricas de  $FR_C$  e  $SMC$ . Apesar de não terem sido feitos testes com pessoas nesta etapa, os índices  $FR_C$  e  $SMC$  sugerem que o método EBand é mais adequado para navegação social já que colidem menos com o obstáculos e possuem uma trajetória mais suave.

Os melhores resultados do método DWA foram em relação ao  $SPC$ , porém todos os demais resultados apresentaram índices abaixo dos demais métodos. Considerando que um dos objetivos deste trabalho é detectar e aplicar métodos mais próximos de um comportamento de navegação natural e seguro para o ser humano, os índices de coeficientes espaciais nem sempre são os mais relevantes, pois o menor caminho pode não ser o mais confortável para o ser humano.

O método EBand foi identificado como o mais qualificado para navegação social entre os métodos comparados nesta etapa. Esse método foi o que apresentou mais características de segurança de acordo com a métrica  $FR_C$  e naturalidade de acordo com a métrica  $SMC$ , sendo portanto, identificado como o mais adequado para aplicação neste etapa. Além disso, foi possível concluir que o método EBand apresenta bons resultados independente dos sensores utilizados.

### 5.6.2 Etapa 2

Na segunda etapa, foi possível criar diversas configurações de ambientes e situações com o objetivo de facilitar a análise dos resultados. Nesta etapa, os planejadores globais NavFnPlanner e GlobalPlanner tiveram um desempenho semelhante, no entanto, o NavFn teve melhores

resultados. Em um ambiente de corredor, o NavFn obteve aproximadamente 10 pontos percentuais a mais que o GlobalPlanner e uma taxa de colisão menor.

Entre os planejadores locais, novamente, os métodos analisados apresentaram maior discrepância para os ambientes do corredor, onde se observou que a taxa de sucesso aumentou em aproximadamente 17 pontos percentuais e a taxa de colisão foi de 0% para o planejador TEB. O TEB também foi apresentado como tendência em (MACENSKI et al., 2020).

Em cenários de difícil detecção de obstáculos, como os ambientes com mesas e caixas, foi necessário adicionar um novo sensor ao sistema de navegação. Sem este novo sensor, foram encontrados problemas principalmente com as pequenas caixas no caminho, atingindo uma taxa de sucesso de apenas 8,5%, enquanto com o novo sensor a taxa subiu para 96,1%. Em ambientes com apenas mesas, a configuração de 3 sensores mostrou-se satisfatória. A escolha dos sensores neste estudo foi orientada pela disponibilidade de dispositivos para a plataforma HERA. Apesar dos resultados terem sido satisfatórios para o uso de sensores, estudos mais aprofundados relacionados ao uso de outros dispositivos e métodos ainda são necessários dependendo de como o robô é projetado. É possível, por exemplo, escolher câmeras 3D que capturem o ambiente ao redor do robô de uma forma mais abrangente, como as usadas por carros autônomos ou usar apenas câmeras RGB comuns com o auxílio do reconhecimento de objetos por meio de aprendizado de máquina. Essas escolhas requerem um estudo comparativo semelhante ao realizado neste trabalho, porém como contrapartida espera-se um aumento no custo econômico ou computacional com uma redução no número de sensores.

Para ambientes com pessoas, foi explorada a utilização da proximidade nas camadas de mapa de custos, que compõem a configuração social. Esta camada de mapa de custos foi apresentada em (LU; HERSHBERGER; SMART, 2014). Nestes cenários, observou-se que a utilização de uma nova camada do mapa de custos melhorou o desempenho em quase todos os cenários. Porém, alguns pontos precisam ser observados: Para cenários com pessoas estáticas, não houve uma diferença considerável, pois o planejador acaba tratando as pessoas estáticas como um obstáculo comum, já analisado nas etapas anteriores; Para o ambiente com pessoas dinâmicas, os resultados com ambas as configurações (comum e social) foram péssimos, com alto índice de colisão (95,1% para a configuração comum e 92,5% para a configuração social); Para o ambiente de interação humana, houve uma melhora significativa de 41,4 pontos percentuais. A maior causa de falhas neste cenário foi devido à invasão do espaço de interação das pessoas, 46,4% para a configuração comum e 3,8% para a configuração social; Para o ambi-

ente de interação com objetos, ambas as configurações tiveram um desempenho ruim, e a maior causa das falhas também foi a invasão do espaço de interação.

Em relação ao *SPC*, não houve diferença significativa no desempenho espacial, com ligeira queda, porém chegando perto de 1 em praticamente todos os experimentos. A queda observada se deve ao fato de o ambiente na etapa anterior ter sido mapeado com os objetos já posicionados em seus lugares, ou seja, o planejamento leva esses objetos em consideração na hora de realizar o planejamento inicial. Nesta etapa, nenhum objeto foi posicionado no ambiente no momento do mapeamento, portanto, eles não são considerados no planejamento inicial, sendo necessário desviar-se da trajetória globalmente planejada para evitar esses obstáculos. Os resultados neste trabalho indicam que todas as configurações utilizadas são capazes de respeitar satisfatoriamente o planejamento da trajetória, com desvio padrão máximo de 0,08.

O desempenho temporal, entretanto, apresenta diferenças significativas. Em comparação com a etapa anterior, o estágio I desta etapa apresentou uma melhora considerável. Essa variação se deve a mudanças nos ambientes de teste usados. Na etapa anterior, os ambientes são muito mais complexos (figura 10), do que os ambientes usados nos estágios I a V desta etapa (figuras 11). Essa influência dos cenários nos valores do *TEC* se dá porque quanto mais complexo é o ambiente, maior é a necessidade de fazer ajustes na navegação, como redução da velocidade do robô em determinados pontos e movimentos de rotação do robô que gera muita perda de tempo. Possíveis soluções para este problema são levar em consideração tais reduções na velocidade e no tempo gasto com giro ao planejar o tempo de execução do experimento, bem como modificar o comportamento de navegação do robô para realizar movimentos mais suaves.

As próximas métricas analisadas fazem referência aos principais pontos apresentados em (KRUSE et al., 2013) como fundamentais para a navegação social. O *SMC* que verifica a suavidade dos caminhos percorridos pelo robô, relacionado à naturalidade na navegação social e o *PRC* que verifica a aplicação da proxêmica e está relacionado ao conforto do ser humano.

Nos resultados referentes ao *SMC*, foi observado novamente uma melhora nos valores, assim como observada para o medir *SMC* para os estágios I a V. Essa variação se deve aos mesmos motivos apontados pelas métricas *TEC*. Em um ambiente mais complexo o robô precisa fazer mais curvas para chegar ao seu destino, influenciando assim os valores de *SMC*. Os valores variam entre 0,49 e 0,66 na etapa anterior, entre 0,94 e 0,79 com desvio padrão máximo de 0,12 nos estágios I a V.

Os resultados relativos ao *PRC* aparecem apenas na etapa V, onde as pessoas estão presentes. Para o estágio V, os experimentos que usaram configuração comum e experimentos que

usaram configuração social obtiveram resultados semelhantes, em torno de 0,9. Esses resultados mostram que a camada social não contribuiu significativamente para a navegação social em comparação com a camada comum aplicada, ou seja, o caminho executado com a camada comum já atende aos requisitos da proxêmica de forma satisfatória. Porém, ainda é possível fazer melhorias na configuração da camada social para que ela satisfaça melhor a proxêmica. Essas melhorias são apresentadas nas próximas etapas.

### 5.6.3 Etapas 3 e 4

Foram realizados 18000 experimentos em ambiente simulados com pessoas estáticas e 10000 experimentos em ambiente simulados com pessoas dinâmicas.

Na etapa 3 foi observada uma melhoria significativa na métrica de  $SR$  e redução da métrica de  $FR_I$  indicando uma redução nas inovações dos espaços de interações das pessoas. Enquanto na etapa 4 não tinha área de interação para ser invadida, entretanto foi observado um aumento significativo na quantidade de colisões com as pessoas em movimento, sendo 75.6% para navegação comum e 26.4% para navegação social.

Em relação ao  $SPC$  e  $TEC$ , não houve diferença significativa no desempenho espacial em comparação com a etapa anterior.

Sobre o  $SMC$ , também não houve diferença significativa nos cenários mais simples (tabelas 22, 24). Entretanto observa-se que a  $SMC$  registra um baixo rendimento em ambientes com diversos pontos de parada (maratona - tabelas 23, 25) de paradas onde precisam fazer diversas curvas. Essa métrica ainda precisa ser melhor trabalhada, entretanto, já nos dá indícios de pontos de melhoria para suavizar a trajetória do robô. Duas melhorias precisam ser feitas na métrica  $SMC$ : aceitar melhor os movimentos em que curvas são necessárias e penalizar mais os giros no próprio eixo. Para a métrica  $PRC$  os resultados foram satisfatórios e semelhantes a etapa anterior em torno de 0.9.

### 5.6.4 Etapa 5

Esta etapa apresentou um estudo sobre o conforto de pessoas com robôs sociais. Foram convidados 20 voluntários para realizar experimentos em ambiente real.

Durante o estudo foi possível avaliar métricas objetivas sobre o comportamento do robô e verificar o grau de conforto dos voluntários baseado na percepção e observação destes volun-

tários para propor melhorias no robô. Também foi possível comparar abordagens de navegação comum e social com voluntários possuindo diferentes graus de familiaridade com robôs sociais. Em cada situação, foi observado que o barulho das rodas da plataforma HERA e não seguir normas sociais foram os principais motivos de desconforto dos voluntários.

A seguir é apresentado a visão dos voluntários sobre alguns conceitos utilizados na navegação social.

- a) **Segurança física:** Os voluntários a definem como o simples fato do robô não machucar a pessoa, como por exemplo, não passar com a roda em cima do pé da pessoa e evitar contato físico a menos que haja alguma interação que exija esse contato. Para evitar o contato físico, o robô deve respeitar o espaço da pessoa, manter uma distância segura e evitar se aproximar da pessoa, a menos que vá interagir com a pessoa;
- b) **Naturalidade:** Para que o robô tenha naturalidade, a segurança física também precisa ser respeitada. Portanto o robô não pode esbarrar em ninguém, não chegar muito perto e respeitar o espaço do ser humano. Dois pontos se sobressaem quando os voluntários tentam definir a naturalidade no robô. O primeiro é que a naturalidade está muito ligada a forma e o propósito do robô. Portanto se o robô possui uma forma humanoide ou características antropomórficas, então a naturalidade vai estar ligada a comportamentos semelhantes ao do ser humano. Entretanto, para alguns voluntários, a aparência do robô também não pode ser muito próxima do humano. Nesse cenário onde o robô se parece mais com um humano, ele precisa andar de forma moderada, não fazer movimento de robô (segundo o voluntário, o movimento não deve ser "muito travado") e não fazer algo que o ser humano não possa fazer pois a pessoa interagindo poderia se sentir ameaçada ou inferior ao robô. Algumas capacidades além da interação espacial também são importantes na naturalidade como cumprimentar a pessoa. O segundo ponto observado na naturalidade é a familiaridade dos movimentos. Portanto, o robô deve fazer movimentos que estejam dentro das expectativas do ser humano, além de executar de forma fluida, sem aparentar estar perdido. Outros tópicos apontados pelos voluntários para que o robô possua naturalidade são: manter velocidade compatível com o que está fazendo, não começar um movimento de forma muito brusca e ser silencioso;

- c) **Sociabilidade:** Sobre sociabilidade, os voluntários citam dois pontos. O primeiro aparece com bastante frequência e é relacionado a interações verbais, para eles, a sociabilidade está relacionada com o robô se comunicar de forma adequada, perguntando se o ser humano deseja alguma coisa, estabelecendo algum tipo de relação de fala e expressando suas intenções por meio de interação verbal com o ser humano. Já o segundo ponto está relacionado ao comportamento do robô em interações espaciais. O robô deve respeitar o espaço do ser humano abordá-lo de uma forma leve e evitar qualquer tipo de colisão respeitando sua área social, assim como não atrapalhar outras interações que o ser humano esteja realizando. O robô também deve ter um comportamento ajustável para o ser humano e evitar fazer barulhos desnecessários. Outros pontos comentados pelos voluntários estão relacionados a aparência do robô e a percepção de pessoas no ambiente;
- d) **Legibilidade:** Sobre a legibilidade, três pontos são observados. O primeiro sobre a movimentação do robô: essa movimentação precisa ter uma velocidade compatível com o ambiente, sempre iniciar com movimentos lentos e ser alterada de forma gradativa quando necessário e reduzir a velocidade perto de pessoas. O segundo ponto é a sinalização. O robô deve indicar a todo momento o que está fazendo, o que vai fazer e para onde está indo, para isso ele pode usar interação verbal como a fala, ou texto em algum painel e não verbal como gestos, expressões, e setas que indiquem o movimento. Por fim, o terceiro ponto é a familiaridade. Neste ponto, o robô precisa apresentar um comportamento semelhante a algo que o ser humano conheça, se for um robô com aparência humanoide, o ideal é que ele tenha movimentos parecidos com o ser humano. Se o robô exerce alguma atividade específica, ele deve ter uma aparência e comportamento que indique essa atividade. Isso ajuda o ser humano a encontrar padrões e saber o que esperar do robô. Uma outra possibilidade é que o robô sempre deixe claro qual a sua função e como ele opera para que o ser humano não tenha surpresas. O ambiente também pode influenciar na expectativa que o ser humano cria sobre o comportamento do robô;
- e) **Conforto:** Sobre conforto, os voluntários passaram por diversos pontos para tentar definir esse conceito: (1) respeito por interações espaciais evitando ser invasivo no espaço das pessoas, respeitando distâncias. Nesse ponto a velocidade do robô foi citada como uma característica importante, mantendo o movimento fluido, sem alterações bruscas; (2) manutenção de uma interação verbal que seja cortês com

o ser humano; (3) a familiaridade que aparece novamente como um ponto importante para o que o ser humano consiga deduzir as intenções do robô; e (4) aparência do robô que precisa ser agradável para o ser humano que está interagindo.

Ao final dos experimentos, os voluntários apresentam as observações apresentadas na tabela 27 sobre principais incômodos e agrados durante os experimentos.

Tabela 27 – Observação dos voluntários no final dos experimentos

	Navegação comum	Navegação social
Maior incômodo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ruído/barulho</li> <li>- interrupção das interações do voluntário</li> <li>- trajetória muito próxima do voluntário</li> <li>- partes soltas no robô</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ruído/barulho</li> <li>- medo de colisão</li> <li>- medo na primeira interação</li> <li>- houve pouca interação verbal</li> </ul>
Maior agrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- certeza de que não haveria colisão</li> <li>- não passar muito perto na primeira interação</li> <li>- o visual do robô</li> <li>- o rosto simpático do robô</li> <li>- a interação verbal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- a naturalidade do robô</li> <li>- a interação verbal</li> <li>- movimentos suaves</li> <li>- distância agradável nas abordagens</li> <li>- a aparência</li> </ul>
Outros pontos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- movimentos suaves</li> <li>- ruído pode ser melhorado e reduzido</li> <li>- o robô não pode passar entre as pessoas</li> <li>- não passar muito perto das pessoas</li> <li>- ter mais normas sociais na fala</li> <li>- variar o ambiente de teste</li> <li>- melhorar aparência deixar o design mais limpo</li> <li>- não ser tão mecânico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- a distância do robô é agradável</li> <li>- a naturalizada na fala pode melhorar</li> <li>- mais naturalidade no movimento</li> <li>- se sente mais seguro conforme vai interagindo com o robô</li> <li>- chegar mais devagar nas pessoas</li> <li>- o barulho pode ser melhorado</li> <li>- melhorar expressões no rosto e interação verbal</li> </ul>

Fonte: Autor.

A partir dos conceitos fornecidos pelos voluntários, os conceitos observados na literatura e os dados coletados nos experimentos, foi possível realizar algumas discussões sobre a navegação social.

Sobre segurança física, a partir dos gráficos apresentados na figura 23, ambas as abordagens de navegação (comum e social) apresentaram um desempenho excelente com 90% dos voluntários dando nota cinco. É preciso observar 50% dos voluntários da navegação comum declararam ter um alto grau de conhecimento sobre os tópicos de robótica enquanto para navegação social, 50% afirmaram ter baixo conhecimento sobre os tópicos de robótica. Este

resultado para segurança física pode ser explicado dado que tanto a navegação comum quanto social possuem características que respeitam a segurança física para evitar colisão.

Sobre naturalidade, a partir dos gráficos apresentados na figura 24 a navegação comum recebeu nota 3 de 50% dos voluntários, enquanto para a navegação social 50% dos voluntários deram nota 4. Apesar da naturalidade ser influenciada pelo planejador local que está sendo utilizado em ambas as abordagens de navegação, a diferença destes resultados pode ser atribuída a área que o robô respeita ao redor do ser humano, que é maior para abordagem social, pois além da segurança física ele também respeita a segurança psicológica das pessoas relativas a proxêmica, sendo assim o movimento do robô acaba sendo menos natural nas abordagens de navegação.

Sobre sociabilidade visto na figura 25 a abordagem de navegação comum obteve 70% de voluntários indicando nota 5, enquanto a abordagem social teve 60%. Isso acontece por que como visto anteriormente, a visão dos voluntários sobre a sociabilidade no comportamento do robô é muito relacionado as interações verbais que estão presentes da mesma forma tanto na navegação comum, quanto na social.

Em termos de legibilidade, visto na figura 26, a abordagem social apresentou um melhor desempenho com 70% dos voluntários indicando nota 5 enquanto para a navegação comum apenas 10% indicou nota 5 e 40% indicou nota 4. A legibilidade pode ser influenciada pela forma com que o robô desloca-se para suas posições respeitando normas e regras sociais sem atrapalhar a conversa entre duas pessoas nem interação com objetos. Quando o robô não segue as normas e regras, o voluntário não consegue prever qual o movimento que o robô vai fazer e, portanto, o movimento do robô fica menos legível para as pessoas.

Todas as todas as características anteriores influenciam diretamente no conforto do ser humano. Esse conforto é apresentado na figura 27, onde é possível observar que para abordagem de navegação social, novamente temos uma maior predominância da nota 5 de satisfação do voluntário com 70%, enquanto na navegação comum temos apenas 20% com nota 5.

As principais dificuldades encontradas durante os experimentos foram manter o foco dos voluntários nos elementos de interação espacial. Foi observado que outros elementos de interação humano-robô se sobressaem em relação aos elementos de interação espacial. Neste sentido, percebeu-se que elementos de aparência e design do robô são os primeiros a chamarem a atenção do voluntário, principalmente quando este voluntário não possui familiaridade com o robô, em seguida, a capacidade de interação verbal é o que mais chama a atenção do voluntário, seguido da capacidade de interação gestual e por último, a capacidade de interação espacial.

Acredita-se que a forma do robô também influencia no comportamento que o ser humano espera desse robô por estar ligado a uma experiência ou ideia prévia que o participante tem das capacidades do robô. O fato do robô possuir capacidade de interação verbal e por gestos, estimula o voluntário a criar expectativa em relação um comportamento adequado para essas capacidade, e a falta desse comportamento acabe gerando uma frustração e conseqüentemente um desconforto, é possível que em robôs que não possuem dispositivos para interação verbal e gestual, o desconforto seja menor quando essas interações não ocorrem.

No contexto de compartilhamento de um ambiente com um robô, o ideal é que a pessoa esqueça que o robô está em cena, a menos que ele chame sua atenção de forma explícita. Neste sentido, qualquer ação que chame atenção desnecessariamente como um movimento inesperado é um potencial desconforto para o ser humano.

Os voluntários de forma geral apresentaram pouco desconforto com o robô. Durante a navegação comum, os desconfortos foram observados quando o robô interrompia as interações sociais. Na navegação social o robô respeitou as interações sociais e foi mais aceito. O principal motivo do desconforto apontado pelos voluntários foi o barulho que as rodas do robô fazem quando navegam pelo ambiente. O barulho aparece como um fator de impacto, pois no contexto social ele é pouco ou inexistente, sendo visto como incômodo pelas pessoas quando ele acontece, já as pessoas que trabalham diretamente com o robô não se incomodam com o barulho pois já estão familiarizados com ele, mas admitem que pode ser um problema após ser questionado sobre o fato. A familiaridade prévia do voluntário com o robô teve grande influência no conforto por facilitar a legibilidade dos movimentos do robô. Essa familiaridade pode ser de uma interação presencial prévia, observações ficcionais ou observações na mídia. Observou-se que o conforto está ligado a familiaridade que o voluntário tem do robô e do conhecimento que o voluntário tem sobre o que o robô pode fazer. Conseqüentemente, muitos desconfortos são originados na realização de um comportamento não esperado por parte do robô.

### **5.6.5 Considerações Finais**

Esse estudo limitou-se apenas às interações espaciais, entretanto foi possível observar a influência de outros tipos de interações como verbal e gestual no conforto do ser humano e como essas interações ou a falta delas influenciam no conforto relacionado às interações espaciais. A ontologia foi aplicada durante todo processo de navegação social para inferir distanciamento

e regras de abordagem enquanto a otimização aplicada melhorou comportamento dos métodos aplicados na navegação.

Ao longo do estudo, alguns pontos foram observados para auxiliar o desenvolvimento da navegação social: (1) Avaliar muitas variáveis ao mesmo tempo torna difícil a verificação das causas de cada comportamento tanto no robô quanto nos humanos, quanto mais específica a situação mais clara são os resultados e a análise deles. As situações de corredor estreito, por exemplo, ainda é um desafio que pode ser melhorado; (2) o tipo e a quantidade de sensores é específico de cada plataforma robótica, é possível ter outras combinações que funcionam com outros robôs; (3) localização é importante para a navegação básica e conseqüentemente para a navegação social, mas pode ser ignorada em ambiente simulados para melhorar a análise de pontos mais específicos da navegação social; (4) planejadores globais tem pouca influencia no resultado final da navegação quando utilizados sozinhos, mas podem ser melhorados para a navegação social se forma combinados com um mapeamento semântico; (5) planejadores locais tem muita influência no resultado da navegações social, falta um planejador que foque especificamente em navegação social (recebe informações de pessoas, objetos, locais e retorna uma trajetória do robô); (6) o mapa semântico é uma importante ferramenta na navegação social e a utilização de camadas auxilia na representação de conhecimento e tomadas de decisão, uma abordagem que utiliza mapas semânticos e topológicos em conjunto pode ser uma boa abordagem para aprimorar a navegação social; (7) realização de experimentos é de grande importância para coletar informações de usuários dos robôs e aprimorar a navegação social, portanto, mais experimentos reais é um requisito necessário; (8) métricas mais robustas para avaliação da navegação social, continua sendo um desafio; (9) aprimorar a representação do conhecimento também continua sendo um desafio, entretanto o uso de ontologia ajudou na inferência de poses de abordagem, na manutenção do distanciamento social e na melhoria do conforto humano.

Com os resultados deste estudo é possível propor melhorias na plataforma robótica HERA, assim como em robôs sociais em geral para maximizar o conforto das pessoas próximas a esse tipo de robô.

Uma das melhorias futuras para a plataforma robótica é investir na naturalidade e legibilidade do seu comportamento, para isso é possível investir no aprimoramento das técnicas de planejamento local que influencia diretamente na movimentação do robô, e conseqüentemente na naturalidade do seu movimento, assim como investir em melhorias nas métricas de avaliação dessa naturalidade, envolvendo cada vez mais a participação do ser humano nas avaliações em experimentos futuros. Também é possível a utilização de outros canais de comunicação através

de interação humano-robô como interação verbal e não verbal para auxiliar na legibilidade dos movimentos do robô.

## 6 CONCLUSÕES

Esta tese apresentou o desenvolvimento de uma navegação social aplicado a plataforma robótica HERA usando um sistema de representação de conhecimento baseado em ontologia a partir de estudos comparativos e incrementais dentro da área de navegação social. O estudo comparativo é um dos objetivos da implementação da navegação social em um robô social, que visa melhorar o comportamento da naturalidade, sociabilidade e conforto no movimento do robô independentemente dos sensores ou ambiente em que esteja atuando.

Neste trabalho, foi possível realizar uma implementação e avaliação incremental de diversos elementos que compõem um sistema de navegação para robôs sociais móveis. Ambientes, planejadores globais e locais, fontes de detecção e camadas de mapa de custos foram variados. Os testes exploraram desde ambientes simples, sem objetos com planejadores e configurações comumente usados, até ambientes mais complexos com obstáculos de diferentes formas e tamanhos, como caixas, mesas e pequenas caixas com formas e tamanhos difíceis de perceber, pessoas estáticas e dinâmicas, e pessoas interagindo umas com as outras, ou com objetos. Ao longo das etapas de trabalho, cada elemento do sistema de navegação foi analisado e selecionado para uma próxima etapa ao mesmo tempo em que a ontologia era desenvolvida, chegando à configuração final. Com os resultados da seção 5 foi possível selecionar uma configuração para o sistema de navegação nos ambientes explorados. Alguns problemas ainda são apresentados principalmente com pessoas com comportamento dinâmico. Estes problemas serão explorados em trabalhos futuros.

O trabalho também focou na compreensão do conforto relacionado às interações espaciais em ambientes reais com uso de ontologia. A ontologia foi aplicada na navegação social para inferir o posicionamento do robô nas abordagens das pessoas e definir o melhor distanciamento social dependendo do tipo de navegação aplicado. A definição das classes da ontologia determinando o comportamento do robô é uma das principais contribuições deste trabalho. Neste trabalho foi verificada também a influência que o comportamento robótico social e não social tem sobre o conforto do ser humano. Também foram avaliadas as questões de segurança física e emocional das pessoas, assim como a eficiência espacial e temporal do robô em ambientes compartilhados com pessoas. O conforto, por ser uma medida subjetiva, é avaliado em questionários apresentados aos voluntários do estudo. Os questionários revelam características importantes que afetam o conforto humano, como a aparência do robô, a presença ruídos, a familiaridade com o robô, a falta do conhecimento do usuário sobre as capacidades funcionais do robô, e

por fim a geração e manutenção de expectativas no ser humano como um fator impactante no conforto. A pesquisa teve como motivação as dificuldades encontradas em tratar a navegação de um robô social de forma segura, natural e social de forma confortável para humanos que interagem no ambiente.

Muitos trabalhos na literatura se debruçaram sobre esse tema para construção de modelos de navegação social a partir de regras sociais e focado na sociabilidade do robô. Alguns trabalhos (LUBER et al., 2012; CHEN, Y. F. et al., 2017; CHAI et al., 2018; PFEIFFER et al., 2018; TRUONG, X. T.; NGO, 2018b) começam a utilizar aprendizado com foco na detecção de pessoas. Não foram encontrados na literatura trabalhos desse tipo que envolvam a representação de conhecimento aplicado à normas sociais com ontologia. Portanto, o tema se mostra desafiador, atual e aberto para novas pesquisas.

Foi identificado que os principais autores na área de navegação social são Truong *et al.*(TRUONG, X. T.; NGO, 2016; TRUONG; YOONG; NGO, 2017; TRUONG, X. T.; NGO, 2017, 2018b,a) tratando de segurança e conforto, navegação social proativa e apresentando um *framework* unificado, Kruse *et al.*(KRUSE et al., 2012, 2013, 2014) apresentando os principais conceitos de naturalidade, sociabilidade e conforto além de Legibilidade de robôs e Charalampous *et al.*(CHARALAMPOUS; EMMANOUILIDIS; GASTERATOS, 2014; CHARALAMPOUS; KOSTAVELIS; GASTERATOS, 2016, 2017) tratando sobre mapeamento social e tendências da navegação social. Estes trabalhos e autores serviram de base para desenvolver esta tese e suas ideias inspiraram o desenvolvimento dos experimentos para aperfeiçoamento da navegação social na plataforma HERA e a construção da representação de conhecimento de regras sociais com ontologias ao longo deste trabalho.

## 6.1 Contribuições

Por fim, as principais contribuições desta tese foram:

- a) Desenvolvimento da ontologia social com foco no domínio das interações espaciais.
- b) Desenvolvimento de diversos cenários de teste para avaliação de navegação social;
- c) Um estudo comparativo de diversos métodos de planejamento de trajetórias globais e locais, variando quantidade e tipos de sensores utilizados e ambientes e usando o RNS;

- d) Estudo e seleção de planejadores que apresente maior característica de naturalidade como contribuição científica;
- e) O trabalho apresentou também os resultados para ambientes simulados e reais, seguido de análise de dados comparados com outros trabalhos da literatura.

Com estes resultados foi possível concluir que o planejador DWA e o planejador Base, apesar de ser comumente utilizados no RNS, apresentou os piores resultados tanto em quesito de segurança, quanto em naturalidade (Coeficiente de suavidade). Esses dois índices nos sugerem que o método TEB é mais indicado para a navegação social. Os melhores resultados do método DWA foram em relação ao índice de eficiência espacial, entretanto todos seus demais resultados tiveram índices abaixo dos demais métodos.

Ao final deste trabalho foi possível identificar o método TEB como o mais qualificado para navegação social dentre os métodos comparados neste trabalho. Este método foi o que apresentou mais características de segurança segundo o índice de colisão e naturalidade segundo o coeficiente de suavidade utilizado, sendo assim o mais indicado até o momento para aplicação nesta tese. Também foi possível concluir que o método TEB apresenta bons resultados independentes dos sensores utilizados.

Este trabalho concluiu que o comportamento robótico, quando segue normas sociais, é mais aceito pelas pessoas e possui bons resultados mesmo em ambiente simulado. O trabalho concluiu também que elementos como aparência do robô e ruído produzido pelo robô se destacam em comparação com elementos de interação espacial causando desconforto no ser humano. Foi observado que a experiência prévia do voluntário influencia na forma com que as normas sociais são aceitas. Voluntários com experiência prévia das capacidades do robô costumam relevar alguns pontos de desconforto como a aparência, o ruído e até mesmo intervenções bruscas nas interações das pessoas. Com isso, foi observado que a existência de experiência prévia nas pessoas com as capacidades do robô possui uma grande influência no conforto destas pessoas.

Ao fim deste estudo, foi obtida uma solução computacional que permite que um robô social móvel seja capaz de interagir adequadamente em termos espaciais em um ambiente social, reduzindo a sensação de estranheza ou desconforto para o ser humano durante esse tipo de interação. Este estudo é concebido com o intuito de abranger desafios científicos e sociais existentes atualmente. Tendo um potencial de impacto positivo tanto no meio acadêmico quanto no cotidiano do cidadão comum.

Este estudo apresentou também o desenvolvimento de uma ontologia que represente o conhecimento no domínio da navegação social de robôs de serviço com uma ferramenta e

desafio apontado pela *Science Robotics* (YANG et al., 2018) e por Kruse et al. (2013), focado na navegação social.

## 6.2 Limitações

Como limitações, a tese abrange apenas a área de navegação de um RSM. Outros elementos que influenciam no conforto, naturalidade e sociabilidade, mas não tem relação com a navegação, como aparência, interação facial, interação verbal e manipulação de objetos não entram no escopo desta tese. A utilização da solução somente em ambiente interno pode ser vista como uma limitação e está relacionada à natureza dos sensores utilizados. Uma solução para esta limitação é a utilização de sensores mais robustos, entretanto, a utilização de tais sensores foge do escopo desta tese.

Este trabalho se limitou a experimentos em ambientes internos com superfícies planas para navegação por conta dos atuadores utilizados na plataforma HERA que são compostos por rodas omnidirecionais próprias para esse tipo de ambiente. A limitação de ambientes internos foi escolhida dada que os robôs de interesse deste trabalho são robôs sociais domésticos desenvolvidos para interação em ambientes como casas e apartamentos. Também limitou-se a interações com pessoas estáticas e grupos de duas pessoas nos ambientes reais para evitar aglomerações. Entretanto, os resultados obtidos neste trabalho podem ser aplicados a ambientes externos e outros tipos de superfícies se os sensores e atuadores permitirem e ambientes com mais pessoas em movimento como será feito futuramente na continuação deste trabalho.

## 6.3 Trabalhos futuros

Como visto, a área de navegação social é muito extensa, envolvendo diversas sub áreas de pesquisa em aberto. É possível, por exemplo, realizar pesquisas e melhorias da naturalidade do robô focando somente na atuação dos dispositivos robóticos relacionados à navegação convencional, propor novos planejadores de trajetória ou novas camadas de mapas de custo para representação semântica do ambiente. No trabalho de Charalampous, Kostavelis e Gasteratos (2017) é questionado se os métodos de navegação atuais são suficientes para a navegação social ou não. Existe muita pesquisa a ser feita na área de percepção de pessoas para extração de características, modelagem mental e percepção de conforto, assim como na percepção de ambientes para extração de semântica e por fim no aprendizado de comportamentos sociais. É possível

se aprofundar em previsão de ações utilizando métodos probabilísticos, aprofundar estudos em *framework* de navegação social e modelos de força social, realizar estudos de influência do comportamento do robô no comportamento do humano dentre outros.

Nos trabalhos futuros espera-se realizar experimentos com pessoas dinâmicas e grupos maiores em ambiente real. Estes experimentos focarão nos elementos de conforto que mais chamaram atenção neste trabalho, como a redução de ruídos realizado pelo robô, separar os grupos de voluntários de forma mais equilibrada entre os que possuem experiência prévia com um robô social e os que não possuem esta experiência e reduzir a influência de outros tipos de interação que não sejam a interação espacial. Atualmente, as melhorias dos problemas apontados pelos voluntários, como ruído e otimização das interações não espaciais estão sendo realizadas na paleoforma HERA.

#### 6.4 Publicações e participações em eventos científicos

Durante o desenvolvimento desta tese, foi possível participar de diversos eventos científicos e competições de robótica diretamente ligados ao tema da tese foram submetidos trabalhos que foram aceitos para publicações internacionais. Foram publicados diversos artigos de descrição de time, para competições internacionais de robôs domésticos, apresentado os avanços na plataforma robótica HERA no período de desenvolvimento desta tese; um relatório técnico para o comitê de ética em pesquisa sobre o conforto de pessoas em interações com o robô (visto nos anexos 6.4, 6.4 e 6.4) e artigo em conferências e revistas internacionais. As publicações podem ser vistas na tabela 28. Durante o período da tese, o doutorando também participou como membro e líder da equipe de robótica doméstica RoboFEI@home, foi membro do comitê técnico e organizacional da competição de robôs domésticos tanto em nível nacional como internacional. Essas posições contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento desta tese.

Tabela 28 – Publicações

Ano	Título	Local de publicação
Artigo de descrição de time (TDP)		
2018	RoboFEI Team Description Paper for RoboCup@Home 2018	RoboCup
2018	RoboFEI@Home Team 2019: Team Description Paper for the @Home League at LARC/CBR 2018	LARC/CBR
2019	RoboFEI@Home Team Description Paper for RoboCup@Home 2019	RoboCup
2019	RoboFEI@Home Team 2019: Team Description Paper for the @Home League at LARC/CBR 2019	LARC/CBR
2020	RoboFEI@Home Team Description Paper for RoboCup@Home 2020	RoboCup
2021	RoboFEI@Home Team Description Paper for RoboCup@Home2021	RoboCup
2021	RoboFEI@Home Team 2021: Team Description Paper for the @Home League at LARC/CBR 2019	LARC/CBR
2022	RoboFEI@Home Team Description Paper for RoboCup@Home2022	RoboCup
Relatório técnico		
2021	Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social	Comitê de Ética em Pesquisa
Artigo		
2019	Proposal of a New Model for Social Navigation Based on Extraction of Social Contexts from Ontology in Service Robots	2019 <i>Latin American Robotics Symposium (LARS)</i>
2019	Performance evaluation of ROS local trajectory planning algorithms to Social Navigation	2019 <i>Latin American Robotics Symposium (LARS)</i>
2020	Simulation System for Learning of Social Rules Using Gazebo and OpenAI Gym	IV Brazilian Workshop on Service Robotics
2021	Evaluation of ROS Navigation Stack for Social Navigation in Simulated Environments	Journal of Intelligent & Robotic Systems
2022	Study on the comfort of people in spatial interactions with a social robot	Robotics and Autonomous Systems (submetido)
2022	Building a formal representation for social navigation using ontology	(em revisão)

Fonte: o Autor

## REFERÊNCIAS

- BARTNECK, Christoph; FORLIZZI, Jodi. A design-centred framework for social human-robot interaction. In: IEEE. RO-MAN 2004. 13th IEEE international workshop on robot and human interactive communication (IEEE Catalog No. 04TH8759). [S.l.: s.n.], 2004. P. 591–594.
- BARTNECK, Christoph et al. **Human-robot interaction: An introduction**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2020.
- BERA, Aniket et al. SocioSense: Robot Navigation Amongst Pedestrians with Social and Psychological Constraints. In: 2017 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS). [S.l.: s.n.], 2017.
- BREAZEAL, Cynthia. Toward sociable robots. **Robotics and autonomous systems**, Elsevier, v. 42, n. 3-4, p. 167–175, 2003.
- BREAZEAL, Cynthia L. **Designing sociable robots**. [S.l.]: MIT press, 2002.
- CALISI, Daniele; NARDI, Daniele. Performance evaluation of pure-motion tasks for mobile robots with respect to world models. **Autonomous Robots**, Springer, v. 27, n. 4, p. 465–481, 2009.
- CARE-O-BOT. **Care-O-bot 4**. [S.l.: s.n.], fev. 2022. Disponível em: <<https://www.care-o-bot.de/>>.
- CHAI, Jie et al. A Cognitive Map Learning Model Based on Hippocampal Place Cells. In: PROCEEDINGS of the 2018 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering. [S.l.: s.n.], 2018.
- CHARALAMPOUS, Konstantinos; EMMANOUILIDIS, Christos; GASTERATOS, Antonios. Social Mapping on RGB-D Scenes. In: 2014 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGING SYSTEMS & TECHNIQUES (IST). [S.l.: s.n.], 2014.
- CHARALAMPOUS, Konstantinos; KOSTAVELIS, Ioannis; GASTERATOS, Antonios. Context dependent social mapping. In: 2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). [S.l.: s.n.], 2016.
- CHARALAMPOUS, Konstantinos; KOSTAVELIS, Ioannis; GASTERATOS, Antonios. Recent trends in social aware robot navigation: A survey. **ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS**, 2017.
- CHEN, Changan et al. Crowd-robot interaction: Crowd-aware robot navigation with attention-based deep reinforcement learning. In: IEEE. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). [S.l.: s.n.], 2019. P. 6015–6022.

CHEN, Yu Fan et al. Socially Aware Motion Planning with Deep Reinforcement Learning. In: 2017 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS). [S.l.: s.n.], 2017.

CHIK, Sheng Fei et al. Neural-network based adaptive proxemics-costmap for human-aware autonomous robot navigation. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 11, n. 4, 2019.

DEAN, Jimmy. [S.l.: s.n.], 1987.

DELLAERT, Frank et al. Monte carlo localization for mobile robots. In: IEEE. PROCEEDINGS 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 99CH36288C). [S.l.: s.n.], 1999. v. 2, p. 1322–1328.

DEWANTARA, Bima Sena Bayu; MIURA, Jun. Generation of a socially aware behavior of a guide robot using reinforcement learning. In: IEEE. 2016 International Electronics Symposium (IES). [S.l.: s.n.], 2016. P. 105–110.

DIJKSTRA, Edsger W et al. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische mathematik**, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.

DONDRUP, Christian; HANHEIDE, Marc. Qualitative Constraints for Human-aware Robot Navigation using Velocity Costmaps. In: 2016 25TH IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROBOT AND HUMAN INTERACTIVE COMMUNICATION (RO-MAN). [S.l.: s.n.], 2016.

DRAGAN, Anca D; LEE, Kenton CT; SRINIVASA, Siddhartha S. Legibility and predictability of robot motion. In: IEEE PRESS. PROCEEDINGS of the 8th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction. [S.l.: s.n.], 2013. P. 301–308.

DUFFY, Brian R et al. What is a social robot? In: 10TH Irish Conference on Artificial Intelligence & Cognitive Science, University College Cork, Ireland, 1-3 September, 1999. [S.l.: s.n.], 1999.

ELFES, Alberto. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. **Computer**, IEEE, v. 22, n. 6, p. 46–57, 1989.

FERRER, Gonzalo et al. Robot social-aware navigation framework to accompany people walking side-by-side. **AUTONOMOUS ROBOTS**, 2017.

FONG, Terrence; NOURBAKHSI, Illah; DAUTENHAHN, Kerstin. A survey of socially interactive robots. **Robotics and autonomous systems**, Elsevier, v. 42, n. 3-4, p. 143–166, 2003.

FONG, Terrence; NOURBAKHSI, Illah; DAUTENHAHN, Kerstin. A survey of socially interactive robots: Concepts, Design and Applications. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA USA, 2002.

FOX, Dieter; BURGARD, Wolfram; THRUN, Sebastian. The dynamic window approach to collision avoidance. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, IEEE, v. 4, n. 1, p. 23–33, 1997.

GARRELL, A. et al. Aerial Social Force Model: A new framework to accompany people using autonomous flying robots. In: 2017 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS). [S.l.: s.n.], 2017.

GERKEY, Brian P; KONOLIGE, Kurt. Planning and control in unstructured terrain. In: ICRA Workshop on Path Planning on Costmaps. [S.l.: s.n.], 2008.

GRUBER, Thomas R. A translation approach to ontology specifications. **Knowledge Acquisition**, v. 5, n. 2, p. 199–220, 1993.

GRUBER, Tom. Ontology. **Encyclopedia of database systems**, v. 1, p. 1963–1965, 2009.

GUARINO, Nicola; OBERLE, Daniel; STAAB, Steffen. What is an ontology? In: **HANDBOOK on ontologies**. [S.l.]: Springer, 2009. P. 1–17.

HALL, Edward Twitchell. **Handbook for proxemic research**. [S.l.]: Society for the Anthropology of Visual Communication, 1974.

HALL, Edward Twitchell. **The hidden dimension**. [S.l.]: Garden City, NY: Doubleday, 1910. v. 609.

HEGEL, Frank et al. Understanding social robots. In: IEEE. 2009 Second International Conferences on Advances in Computer-Human Interactions. [S.l.: s.n.], 2009. P. 169–174.

HELBING, Dirk; MOLNAR, Peter. Social force model for pedestrian dynamics. **Physical review E**, APS, v. 51, n. 5, p. 4282, 1995.

HONIG, Shanee S. et al. Toward Socially Aware Person-Following Robots. **IEEE TRANSACTIONS ON COGNITIVE AND DEVELOPMENTAL SYSTEMS**, 2018.

IFR. World Robotics (Service Robots 2017). **IFR Statistical Department**, 2017.

ROBOTS and robotic devices — Vocabulary. v. 2012. [S.l.], 2012.

JOHNSON, Collin; KUIPERS, Benjamin. Socially-aware navigation using topological maps and social norm learning. In: **PROCEEDINGS of the 2018 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society**. [S.l.: s.n.], 2018. P. 151–157.

KAROTZ. **Karotz - Nabaztag & Cie**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.nabaztag.com/>>.

KENDON, Adam. **Conducting interaction: Patterns of behavior in focused encounters**. [S.l.]: CUP Archive, 1990. v. 7.

KIDOKORO, Hiroyuki et al. Will I Bother Here?: A Robot Anticipating Its Influence on Pedestrian Walking Comfort. In: PROCEEDINGS of the 8th ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction. [S.l.: s.n.], 2013.

KISMET. [S.l.: s.n.]. Disponível em:  
<<http://www.ai.mit.edu/projects/humanoid-robotics-group/kismet/kismet.html>>.

KOSTAVELIS, Ioannis; GASTERATOS, Antonios. Semantic mapping for mobile robotics tasks: A survey. **Robotics and Autonomous Systems**, Elsevier, v. 66, p. 86–103, 2015.

KOSTAVELIS, Ioannis et al. Human Aware Robot Navigation in Semantically Annotated Domestic Environments. In: UNIVERSAL ACCESS IN HUMAN-COMPUTER INTERACTION; INTERACTION TECHNIQUES AND ENVIRONMENTS, PT II. [S.l.: s.n.], 2016.

KOSTAVELIS, Ioannis et al. Human aware robot navigation in semantically annotated domestic environments. In: SPRINGER. INTERNATIONAL Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction. [S.l.: s.n.], 2016. P. 414–423.

KRUSE, Thibault et al. Evaluating Directional Cost Models in Navigation. In: PROCEEDINGS of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction. [S.l.: s.n.], 2014.

KRUSE, Thibault et al. Human-aware robot navigation: A survey. **ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS**, 2013.

KRUSE, Thibault et al. Legible Robot Navigation in the Proximity of Moving Humans. In: 2012 IEEE WORKSHOP ON ADVANCED ROBOTICS AND ITS SOCIAL IMPACTS (ARSO). [S.l.: s.n.], 2012.

LATOMBE, Jean-Claude. **Robot motion planning**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 124.

LAVALLE, Steven M. **Planning algorithms**. [S.l.]: Cambridge university press, 2006.

LI, Hao; ISLAS RAMIREZ, Omar A.; CHETOUANI, Mohamed. Potential Human Reaction Aware Mobile Robot Motion Planner: Potential Cost Minimization Framework. In: 2014 23RD IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROBOT AND HUMAN INTERACTIVE COMMUNICATION (IEEE RO-MAN). [S.l.: s.n.], 2014.

LIM, Gi Hyun; SUH, Il Hong; SUH, Hyowon. Ontology-based unified robot knowledge for service robots in indoor environments. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans**, IEEE, v. 41, n. 3, p. 492–509, 2010.

LU, David V; HERSHBERGER, Dave; SMART, William D. Layered costmaps for context-sensitive navigation. In: IEEE. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.l.: s.n.], 2014. P. 709–715.

LU, David V.; ALLAN, Daniel B.; SMART, William D. Tuning Cost Functions for Social Navigation. In: SOCIAL ROBOTICS, ICSR 2013. [S.l.: s.n.], 2013.

LUBER, Matthias et al. Socially-Aware Robot Navigation: A Learning Approach. In: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). [S.l.: s.n.], 2012.

MACENSKI, Steve et al. The Marathon 2: A Navigation System. **arXiv preprint arXiv:2003.00368**, 2020.

MARCZAL, Denise; JUNIOR, Plinio Thomaz Aquino. Behavioural Variables Analysis in Mobile Environments. In: SPRINGER. INTERNATIONAL Conference of Design, User Experience, and Usability. [S.l.: s.n.], 2015. P. 118–130.

MARDER-EPPSTEIN, Eitan et al. The office marathon: Robust navigation in an indoor office environment. In: IEEE. 2010 IEEE international conference on robotics and automation. [S.l.: s.n.], 2010. P. 300–307.

MATEUS, André et al. Efficient and robust pedestrian detection using deep learning for human-aware navigation. **Robotics and Autonomous Systems**, Elsevier, v. 113, p. 23–37, 2019.

MAVROGIANNIS, Christoforos I.; THOMASON, Wil B.; KNEPPER, Ross A. Social Momentum: A Framework for Legible Navigation in Dynamic Multi-Agent Environments. In: PROCEEDINGS of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. [S.l.: s.n.], 2018.

MEAD, Ross; MATARIC, Maja J. Autonomous human-robot proxemics: socially aware navigation based on interaction potential. **AUTONOMOUS ROBOTS**, 2017.

MEAD, Ross; MATARIĆ, Maja J. Perceptual models of human-robot proxemics. In: SPRINGER. EXPERIMENTAL Robotics. [S.l.: s.n.], 2016. P. 261–276.

OBO, Takenori; YASUDA, Eiji. Intelligent Fuzzy Controller for Human-Aware Robot Navigation. In: PROCEEDINGS 2018 12TH FRANCE-JAPAN AND 10TH EUROPE-ASIA CONGRESS ON MECHATRONICS. [S.l.: s.n.], 2018.

OLI, Siddharth; L'ESPERANCE, Bruno; GUPTA, Kamal. Human Motion Behaviour Aware Planner (HMBAP) for Path Planning in Dynamic Human Environments. In: 2013 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED ROBOTICS (ICAR). [S.l.: s.n.], 2013.

PANDEY, Amit Kumar; ALAMI, Rachid. A Framework towards a Socially Aware Mobile Robot Motion in Human-Centered Dynamic Environment. In: IEEE/RSJ 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS 2010). [S.l.: s.n.], 2010.

PARK, Chonhyon et al. HI Robot: Human Intention-aware Robot Planning for Safe and Efficient Navigation in Crowds. In: 2016 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS 2016). [S.l.: s.n.], 2016.

PARO. **Paro Therapeutic Robot**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.parorobots.com/>>.

PATOMPAK, Pakpoom et al. Learning social relations for culture aware interaction. In: IEEE. 2017 14th international conference on ubiquitous robots and ambient intelligence (URAI). [S.l.: s.n.], 2017. P. 26–31.

PEOPLEBOT. **RoboSklep**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://robosklep.com/en/wheeled-robots/157-peoplebot.html>>.

PFEIFFER, Mark et al. A Data-driven Model for Interaction-aware Pedestrian Motion Prediction in Object Cluttered Environments. In: 2018 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA). [S.l.: s.n.], 2018.

PR2. **PR2**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.wevolver.com/wevolver.staff/pr2>>.

PRESTES, Edson et al. Towards a core ontology for robotics and automation. **Robotics and Autonomous Systems**, Elsevier, v. 61, n. 11, p. 1193–1204, 2013.

QUINLAN, Sean; KHATIB, Oussama. Elastic bands: Connecting path planning and control. In: IEEE. [1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l.: s.n.], 1993. P. 802–807.

REETI. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.reeti.fr/>>.

RIOS-MARTINEZ, Jorge; SPALANZANI, Anne; LAUGIER, Christian. From proxemics theory to socially-aware navigation: a survey. **International Journal of Social Robotics**, Springer, v. 7, n. 2, p. 137–153, 2015.

ROMEO. **Projet romeo**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://projetromeo.wordpress.com/>>.

RÖSMANN, Christoph et al. Efficient trajectory optimization using a sparse model. In: IEEE. 2013 European Conference on Mobile Robots. [S.l.: s.n.], 2013. P. 138–143.

SANTOS, Thiago Freitas dos et al. Behavioral persona for human-robot interaction: a study based on pet robot. In: SPRINGER. INTERNATIONAL Conference on Human-Computer Interaction. [S.l.: s.n.], 2014. P. 687–696.

SCHLENOFF, Craig et al. An IEEE standard ontology for robotics and automation. In: IEEE. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.l.: s.n.], 2012. P. 1337–1342.

SEBASTIAN, Meera; BANISSETTY, Santosh Balajee; FEIL-SEIFER, David. Socially-Aware Navigation Planner Using Models of Human-Human Interaction. In: 2017 26TH IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROBOT AND HUMAN INTERACTIVE COMMUNICATION (RO-MAN). [S.l.: s.n.], 2017.

SIEGWART, Roland; NOURBAKSH, Illah Reza; SCARAMUZZA, Davide. **Introduction to autonomous mobile robots**. [S.l.]: MIT press, 2011.

SPEXARD, Thorsten et al. Interaction awareness for joint environment exploration. In: IEEE. RO-MAN 2007-The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. [S.l.: s.n.], 2007. P. 546–551.

SPRUTE, Dennis; TÖNNIES, Klaus; KÖNIG, Matthias. A study on different user interfaces for teaching virtual borders to mobile robots. **International Journal of Social Robotics**, Springer, v. 11, n. 3, p. 373–388, 2019.

TALEBPOUR, Zeynab et al. Incorporating Perception Uncertainty in Human-Aware Navigation: A Comparative Study. In: 2016 25TH IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROBOT AND HUMAN INTERACTIVE COMMUNICATION (RO-MAN). [S.l.: s.n.], 2016.

TECHI, Rodrigo C. et al. RoboFEI@Home Team Description Paper for RoboCup@Home 2020, 2020.

TRUONG, Xuan Tung; NGO, Trung Dung. “To Approach Humans?”: A Unified Framework for Approaching Pose Prediction and Socially Aware Robot Navigation. **IEEE TRANSACTIONS ON COGNITIVE AND DEVELOPMENTAL SYSTEMS**, 2018.

TRUONG, Xuan Tung; NGO, Trung Dung. Dynamic Social Zone based Mobile Robot Navigation for Human Comfortable Safety in Social Environments. **INTERNATIONAL JOURNAL OF SOCIAL ROBOTICS**, 2016.

TRUONG, Xuan Tung; NGO, Trung Dung. Socially Aware Robot Navigation Using Deep Reinforcement Learning. In: 2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE). [S.l.: s.n.], 2018.

TRUONG, Xuan Tung; NGO, Trung Dung. Toward Socially Aware Robot Navigation in Dynamic and Crowded Environments: A Proactive Social Motion Model. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, 2017.

TRUONG, Xuan Tung; YOONG, Voo Nyuk; NGO, Trung Dung. Socially aware robot navigation system in human interactive environments. **INTELLIGENT SERVICE ROBOTICS**, 2017.

TRUONG, Xuan-Tung; NGO, Trung Dung. Toward socially aware robot navigation in dynamic and crowded environments: A proactive social motion model. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, IEEE, v. 14, n. 4, p. 1743–1760, 2017.

TURNWALD, Annemarie et al. Understanding Human Avoidance Behavior: Interaction-Aware Decision Making Based on Game Theory. **INTERNATIONAL JOURNAL OF SOCIAL ROBOTICS**, 2016.

YANG, Guang-Zhong et al. The grand challenges of Science Robotics. **Sci. Robot.**, v. 3, n. 14, eaar7650, 2018.

ZHENG, Kaiyu. Ros navigation tuning guide. **arXiv preprint arXiv:1706.09068**, 2017.

**APÊNDICE A – ESTUDO SOBRE O CONFORTO ENVIADO AO COMITÊ DE ÉTICA**

Fagner de Assis Moura Pimentel

**Estudo sobre o conforto de pessoas em  
interações espaciais com um robô social**

São Bernardo do Campo

24 de agosto de 2021

Fagner de Assis Moura Pimentel

## **Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social**

Projeto de pesquisa apresentado ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) através da Plataforma Brasil pelo pesquisador responsável Fagner de Assis Moura Pimentel, doutorando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário FEI no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGE), atuando na linha de pesquisa de Inteligência Artificial Aplicada à Automação e Robótica (IAAAR) e orientado pelo Prof. Dr. Plinio Thomaz Aquino Junior.

Centro Universitário FEI  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

São Bernardo do Campo  
24 de agosto de 2021

# INFORMAÇÕES PRELIMINARES DO ESTUDO

Esta pesquisa envolve seres humanos, na qualidade de participante da pesquisa, individual ou coletivamente de forma direta ou indireta, em sua totalidade ou partes dela, incluindo o manejo de informações ou materiais.

---

Geral	
CAAE	: 43096121.7.0000.5508
Título do projeto de pesquisa	: Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social
Áreas do conhecimento	: Ciências Exatas e da Terra
Instituição proponente	: Fundação Educacional Padre Saboia de Medeiros
Orientador	: Plinio Thomaz Aquino Junior
Responsável principal	: Fagner de Assis Moura Pimentel
E-mail do responsável	: fpimentel@fei.edu.br
Telefone do responsável	: (71) 99158-6867

---

Participantes	
Pais de origem	: Brasil
Tamanho da amostra	: 20
Participações concluídos	: 20
Participações retiradas	: 0
Eventos graves ocorridos	: 0
Pedidos de indenização	: 0
Conduta nos eventos graves	: Não houve eventos graves.

---

Apoio Financeiro	
CNPJ	Instituição
00.889.834/0001-08	: FUND COORD DE APERFEICOAMENTO DE PESSOAL DE NIVEL SUPERIOR
61.023.156/0003-44	: FUNDACAO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS

---

## DESENHO DO ESTUDO

O desenho desta estudo é apresentado conforme sua abordagem, natureza, objetivo e procedimento. A abordagem será do tipo qualitativa e quantitativa, de natureza aplicada, objetivo exploratório e procedimento experimental. Estas características são apresentadas a seguir.

A pesquisa se enquadra tanto na abordagem quantitativa quanto qualitativa. É quantitativa no ponto em que serão realizados experimentos mensuráveis quantitativamente. Estes experimentos foram realizados previamente em um ambiente simulado, com objetos e pessoas simuladas. Nestes experimento foram levadas em considerações o tempo e espaço que o robô utiliza para chegar em pontos pré-definidos no ambiente. Também são levadas em considerações, métricas de proxemias, referentes ao gerenciamento dos espaços íntimo, pessoal e social das pessoas. Com estas métricas aplicadas em ambiente real, será possível fazer um comparativo com os ambientes simulados. A abordagem qualitativa será realizada levando em consideração o conforto do ser humano. Serão aplicados questionários para avaliar o grau de conforto dos seres humanos envolvidos no experimento durante o desenvolvimento das tarefas do robô.

Quanto a natureza do estudo, ela é classificada como aplicada, tendo como objetivo, gerar conhecimento a partir do grau do conforto de um ser humano na presença de um robô social em momentos de interação espacial e com este conhecimento gerar condições para levar um robô para um ambiente público, com mais segurança e conforto. O problema específico com que essa pesquisa se preocupa é a melhoria do conforto das pessoas durante atividades de interação espacial com robôs sociais. O estudo visa analisar e verificar como o conforto das pessoas no contexto de interação espacial é alterado pela presença do robô para que futuramente possamos aprimorar as capacidades do robô e trazer mais conforto para as pessoas.

Essa pesquisa também é classificada do ponto de vista do objetivo como uma pesquisa exploratória. A exploração será realizada para descobrir como o conforto é alterado no contexto da interação espacial, entender melhor esse mecanismo e futuramente aplicar tais descobertas na melhoria do conforto das pessoas. Para esse fim, será proporcionado para os participantes do estudo uma experiência prática com o problema proposto sendo abordado tarefas específicas e aplicação de questionário para entender como o conforto é alterado ao longo do experimento.

Portanto, nesta pesquisa experimental os objetos de pesquisa são tanto os seres humanos verificando seu nível de conforto quanto o comportamento do robô.

# Resumo

O tema deste estudo é a navegação social e verificação de como o conforto das pessoas se modifica com a aplicação de um método de navegação social de robôs. A metodologia aplicada será de experimentos que já foram previamente realizados em ambiente simulado onde nesses experimentos os robôs passam por diversos pontos e entre os pontos existem pessoas executando determinada ação. A todo momento é avaliada a trajetória do robô em termos de tempo e espaço além de métricas de proxemias e suavidade de movimento. No ambiente real proposto neste estudo serão aplicados os mesmos experimentos do ambiente simulado, além de questionários para verificar o conforto das pessoas. O tamanho da amostra será de 20 participantes que realizarão diferentes tarefas com interação espacial direta ou indireta com o robô. A coleta dos dados vai ser realizada através de questionários feitos com as pessoas. O método estatístico utilizado serão os mesmos apresentados nos experimentos simulados, assim como avaliação das respostas dos questionários sobre o conforto dos participantes. Como resultado espera-se encontrar um comportamento similar com o observado em ambiente simulado de modo a validá-los, entretanto espera-se também encontrar diferenças, comuns na transição do ambiente simulado para o real, em alguns pontos como na localização do robô e percepção de pessoas e objetos no ambiente real. Também como resultado espera-se ter uma visão mais clara sobre como acontece a variação do conforto das pessoas nas interações espaciais com um robô social.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Alterações realizadas na execução dos experimentos reais. . . . .	18
Figura 2 – Versão real e simulada da plataforma HERA. . . . .	19
Figura 3 – Ambientes simulados. . . . .	21
Figura 4 – Representação do ambiente onde foram realizados os experimentos com voluntários. . . . .	22
Figura 5 – Tipo de experimento . . . . .	27
Figura 6 – Faixa etária . . . . .	28
Figura 7 – Familiaridade . . . . .	28
Figura 8 – Segurança Física . . . . .	28
Figura 9 – Naturalidade . . . . .	28
Figura 10 – Sociabilidade . . . . .	29
Figura 11 – Legibilidade . . . . .	29
Figura 12 – Conforto . . . . .	29
Figura 13 – Métricas SII, SMC e PRC em experimentos com voluntários. . . . .	30

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Componentes da plataforma HERA. . . . .	20
Tabela 2 – Resultado para interações passivas. . . . .	26
Tabela 3 – Resultado para interações ativas. . . . .	26
Tabela 4 – Resultado para maratona. . . . .	27
Tabela 5 – Métricas SPC e TEC em experimentos com voluntários. . . . .	29

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
1.1	Hipótese do estudo	9
1.2	Objetivo primário	10
1.3	Objetivos secundários	10
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA</b>	<b>11</b>
2.1	Metodologia da análise dos dados	12
<b>3</b>	<b>RISCOS E BENEFÍCIOS</b>	<b>14</b>
3.1	Riscos	14
3.2	Benefícios	14
<b>4</b>	<b>DESFECHO</b>	<b>15</b>
4.1	Desfecho Primário	15
4.2	Desfecho Secundário	15
<b>5</b>	<b>EXECUÇÃO</b>	<b>16</b>
5.1	Cronograma de execução	16
5.2	Orçamento financeiro	16
<b>6</b>	<b>RELATÓRIO FINAL</b>	<b>17</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>17</b>
6.1.1	Objetivos	17
6.1.2	Alterações no projeto	18
6.1.2.1	Execução das tarefas	18
6.1.2.2	Nova métrica de avaliação	19
<b>6.2</b>	<b>Materiais</b>	<b>19</b>
6.2.1	A Plataforma Robótica HERA	19
6.2.2	Ambientes de testes	20
6.2.2.1	Ambientes simulados	20
6.2.2.2	Ambiente real	20
6.2.3	Voluntários	22
<b>6.3</b>	<b>Experimentos com voluntários</b>	<b>22</b>
<b>6.4</b>	<b>Resultados</b>	<b>24</b>
6.4.1	Resultados simulados	24
6.4.2	Resultados reais	26
6.4.3	Discussão	31

---

**Bibliografia** . . . . . 33

# 1 INTRODUÇÃO

Um robô móvel deve ser capaz de navegar livremente em seu ambiente. Deve também tratar de problemas comuns relacionados à navegação autônoma, como mapeamento, localização, planejamento de movimento e controle de movimento. No entanto, a coexistência de robôs e humanos em um mesmo ambiente adiciona algumas novas dimensões à mobilidade, como conforto e sociabilidade. As pessoas não são obstáculos comuns, pois existe um conjunto de regras sociais e culturais que ditam como as pessoas devem se mover.

De acordo com Kruse et al. [1], os desafios da navegação social envolvem naturalidade, conforto e sociabilidade. A naturalidade está relacionada às semelhanças entre robôs e humanos no padrão de comportamento de baixo nível; conforto refere-se à supressão de aborrecimento ou estresse para o humano nas interações com o robô; enquanto a sociabilidade lida com a adequação do robô a padrões socioculturais de alto nível. Neste estudo, vamos nos concentrar nos desafios da navegação social apresentados por Kruse et al. [1]. Este trabalho tem como motivação as dificuldades encontradas em tratar a navegação de um robô autônomo de serviço de forma segura, natural, social e confortável para humanos que interagem no ambiente. No trabalho de Pimentel e Aquino [2], foram realizados experimentos simulados exaustivos com diversos ambientes, tipos de obstáculos, pessoas simuladas de forma estática e dinâmica, interagindo com outras pessoas e objetos, variando também algoritmos de planejamento local e global e mapas de custos. Aspectos de segurança e precisão em termos de tempo e espaço estimados, navegação natural e respeito ao espaço pessoal foram observados.

## 1.1 HIPÓTESE DO ESTUDO

A hipótese do estudo é que o robô tenha um comportamento similar ao que foi realizado no ambiente simulado e que suas variáveis de análise de comportamento sejam similares ao ambiente simulados, entretanto espera-se uma variação em relação a percepção de pessoas e objetos. O comportamento esperado das pessoas não foi observado nos experimentos simulados, portanto esperamos ter uma exploração deste comportamento no ambiente real.

No ambiente simulado foi possível realizar uma implementação e avaliação incremental de diversos elementos que compõem um sistema de navegação para robôs sociais móveis. Ambientes, planejadores globais e locais, fontes de detecção e camadas de mapas personalizados foram variados. Os experimentos exploraram desde ambientes simples, sem objetos com planejadores e configurações comumente usados, até ambientes mais complexos com obstáculos variados, como caixas, mesas objetos de formas e tamanhos difíceis de serem percebidos, pessoas estáticas e dinâmicas, e pessoas interagindo umas com as outras, ou

com objetos. No ambiente simulado, foram alcançados os seguintes resultados para os experimentos realizados em um ambiente semelhante ao que será usado neste estudo:

- A taxa de sucesso do experimento foi de 97.6% com falha por aborto (o robô não conseguiu traçar uma rota segura) de 2.3% e falha por colisão (com algum humano simulado ou objeto) de 0.1%.
- Coeficiente espacial (respeito pela trajetória planejada) de 0.94, coeficiente temporal (respeito pelo tempo de execução planejado) de 0.89, coeficiente de naturalidade (movimentação mais suave) de 0.46 e coeficiente de proxêmica (respeito pelo espaço pessoal das pessoas simuladas) de 0.91.

## 1.2 OBJETIVO PRIMÁRIO

O objetivo primário deste estudo é observar e explorar como se dá a variação de comportamento e conforto das pessoas em um ambiente real através de questionários apresentados aos participantes do estudo. Os resultados deste estudo serão utilizados futuramente para a melhoria do comportamento de um robô em ambientes com pessoas.

## 1.3 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Os objetivos secundários são avaliar e validar as métricas avaliadas em ambientes simulados para verificar o comportamento do robô relativo a essas métricas em ambiente real. Dentre as métricas avaliadas estão as taxas de sucesso e falha, coeficientes espacial e temporal.

## 2 METODOLOGIA PROPOSTA

Este estudo visa identificar o grau de conforto de pessoas em situações de interação espacial com um robô social. Serão aplicados dois tipos de interação espacial entre as pessoas e o robô. No primeiro tipo, o robô navegará pelo ambiente passando por alguns pontos específicos. Entre cada ponto haverá pessoas executando uma determinada ação (paradas, em movimento, interagindo com outras pessoas ou objetos). No segundo tipo, o robô irá abordar uma pessoa ou um grupo de pessoas em um determinado local. Serão utilizadas 20 participantes nos experimentos. Estes participantes podem ter ou não experiência prévia com robôs sociais. As principais métricas avaliadas serão o tempo de execução, o espaço percorrido pelo robô, a naturalidade dos movimentos dos robôs, o respeito pelas regras sociais e espaços pessoais das pessoas e o grau de conforto destas pessoas que será verificado em questionários que serão aplicados previamente e posteriormente a realização do experimento. A plataforma robótica utilizada neste estudo será a Home Environment Robot Assistant (HERA) [3] desenvolvida pela equipe RoboFEI@home do Centro Universitário FEI.

A metodologia de desenvolvimento desta pesquisa visa avaliar critérios sociais, de segurança e precisão em métodos de planejamento de navegação utilizando diferentes configurações. O trabalho aqui é selecionar uma navegação que seja o mais natural, social e confortável possível para o ser humano. Com isso é possível abordar uma navegação mais eficiente, eficaz e segura para o contexto social. O experimento executa um roteiro que segue as seguintes etapas: (1) Recebe os dados de entrada com um conjunto de configurações que serão utilizadas no experimento; (2) Um conjunto de regiões ( $R = [CR_0, \dots, CR_{nr}]$ ) que possui  $nr$  regiões é extraído do ambiente. Isso representa as regiões pelas quais o robô deve passar durante o experimento, aqui chamadas ChechRegions ( $CR = [P_0, \dots, P_{ncr}]$ ). Cada  $CR$  possui  $ncr$  pontos ( $P = [x, y]$ ). Para cada  $CR$ , um  $P$  é selecionado aleatoriamente. Ele irá compor o caminho que o robô fará durante o experimento ( $CP = [P_0, \dots, P_{nr}]$ ). Em seguida, um planejador global é usada para calcular a distância mais curta passando por todo  $P$  em  $CP$ ; (3) O ambiente e o robô são redefinidos com suas configurações iniciais; (4) O experimento é iniciado passando a lista de  $CP$  para o sistema de navegação. O experimento é finalizado quando o robô chega ao seu destino final ou ocorre alguma falha de navegação; (5) Finalmente, os dados do experimento são salvos para análise futura. O sistema de navegação usado neste trabalho foi otimizado usando os tutoriais de navegação do ROS <sup>1</sup> e o *ROS Navigation Tuning Guide* [5].

<sup>1</sup> <http://wiki.ros.org/navigation/Tutorials>

## 2.1 METODOLOGIA DA ANÁLISE DOS DADOS

Essas métricas visam selecionar planejadores ótimos na navegação atual do robô para que ela se torne mais segura, natural e confortável para o ser humano, uma vez que estas características são os principais pilares para a navegação social segundo Kruse et al. [1]. As seguintes variáveis serão analisadas neste estudo:

- Taxa de sucesso ( $SR$ ): Determina o número percentual de experimentos, onde a navegação foi concluída com sucesso. É dado por:  $SR = s/ex_{max} * 100$  onde  $s$  é o número de experimentos concluídos com sucesso e  $ex_{max}$  é o número máximo de experimentos realizados.
- Taxas de falha ( $FR$ ): Determina o número percentual de experimentos, onde a navegação falhou. Existem cinco tipos e são dados pelas seguintes fórmulas:
  - Espaço excedido ( $FR_{SE}$ ):  $FR_{SE} = f_1/ex_{max} * 100$  onde  $f_1$  é o número de experimentos que falharam devido ao espaço excedido.
  - Tempo excedido ( $FR_{TE}$ ):  $FR_{TE} = f_2/ex_{max} * 100$  onde  $f_2$  é o número de experimentos que falharam devido ao tempo excedido.
  - Aborto ( $FR_A$ ):  $FR_A = f_3/ex_{max} * 100$  onde  $f_3$  é o número de experimentos que falharam por aborto.
  - Colisão ( $FR_C$ ):  $FR_C = f_4/ex_{max} * 100$  onde  $f_4$  é o número de experimentos que falharam por colisão.
  - Invasão ( $FR_I$ ):  $FR_I = f_5/ex_{max} * 100$  onde  $f_5$  é o número de experimentos que falharam por invasão de pessoal espaço.
- Coeficiente Espacial ( $SPC$ ): determina o quão perto a distância percorrida o robô está à distância de navegação planejada, dada por:  $SPC = 1 - (s_e - s_{min})/(s_{max} - s_{min})$  onde  $s_e$  é o espaço percorrido pelo robô,  $s_{min}$  é o espaço mínimo entre a posição inicial e a posição final,  $s_{max}$  é o espaço máximo que o robô pode navegar neste experimento. O resultado varia de 0 a 1, onde 1 significa que o caminho percorrido é igual ao caminho planejado.
- Coeficiente Temporal ( $TEC$ ): Determina o quão próximo o tempo de execução pelo robô está do tempo estimado para realizar a navegação, dado por:  $TEC = 1 - (t_e - t_{min})/(t_{max} - t_{min})$  onde  $t_e$  é o tempo utilizado pelo robô no experimento,  $t_{min}$  é o tempo mínimo necessário para o robô se deslocar do ponto de partida ao final em linha reta, dada a velocidade máxima do robô,  $t_{max}$  é o tempo máximo que o robô pode navegar neste experimento. O resultado varia de 0 a 1, onde 1 significa que o tempo decorrido é igual ao tempo planejado.

- Smooth Coefficient (*SMC*): Determina quão suave é a trajetória realizada pelo planejador local. É usado com uma medida para avaliar a naturalidade do robô. que é dada pela média das diferenças dos ângulos de cada linha que cria a trajetória. O resultado varia de 0 a 1, onde 1 significa que a navegação é mais suave.
- Coeficiente Proxêmico (*PRC*): determina a quantidade de trajetória realizada pelo robô em relação à proximidade no ambiente com as pessoas. Esta métrica tenta representar o grau médio de conforto da pessoa mais próxima do robô no experimento. O resultado varia de 0 a 1, onde 1 significa que a navegação respeita as regras proximais.

## 3 RISCOS E BENEFÍCIOS

### 3.1 RISCOS

Os riscos que seriam apresentados durante a realização do experimento são relativos ao robô poder causar algum dano as pessoas ou aos objetos no ambiente. Em relação ao ser humano o robô pode colidir em algum ser humano. Nos experimentos realizados em ambiente simulado com navegação comum, o risco de colisão foi de 2.5%, já no segunda configuração com navegação social o risco foi de 1.5%. Neste experimento em ambiente real para evitar qualquer risco de colisão, o robô é equipado com um botão de emergências que para todas as atividades do robô no mesmo instante que ele é acionado. Um especialista na operação do robô irá acompanhá-lo a todo momento para acionar o botão de emergência ao menor sinal de risco.

### 3.2 BENEFÍCIOS

O principal benefício da realização destes experimento é a promoção de um estudo que vai poder observar como o conforto das pessoas é alterado com a presença do robô e com isso melhorar o comportamento do robô social para que ele apresente um comportamento mais aceitável na sociedade e isso acelere o processo de inserção de robôs dessa categoria em ambientes sociais. O estudo comparativo entre o ambiente simulado e real é um dos objetivos da implementação da navegação social em um robô social, que visa melhorar o comportamento da naturalidade no movimento do robô independentemente dos sensores ou ambiente em que esteja atuando. Com os resultados deste estudo, será possível selecionar uma configuração para o sistema de navegação em ambiente real. Em relação aos experimentos em ambientes reais que também serão realizados, é esperada uma queda nas taxas de sucesso, comum neste tipo de transição devido a ruídos com atuadores e sensores reais. Porém, com os experimentos realizados até o momento será possível identificar e tratar falhas de forma fácil e rápida em ambiente real. O Home Environment Robot Assistant (HERA) [3] será utilizado com a mesma configuração utilizada nos experimentos simulados. Um número menor de experimentos será realizado no ambiente real, para que não sobrecarregue os humanos envolvidos no experimento. Além das métricas utilizadas, também será realizado um questionário para avaliar o grau de conforto das pessoas durante o experimento. Espera-se que seja possível aprimorar os valores das métricas sociais sem a necessidade de mudar o ambiente.

## 4 DESFECHO

### 4.1 DESFECHO PRIMÁRIO

Como desfecho primário espera-se ter uma visão mais clara sobre como acontece variação do conforto das pessoas nas interações espaciais com um robô social.

### 4.2 DESFECHO SECUNDÁRIO

Como desfecho secundário espera-se encontrar um comportamento similar com o observado em ambiente simulado de modo a validá-los, entretanto espera-se também encontrar diferenças, comuns na transição do ambiente simulado para o real, em alguns pontos como na localização do robô e percepção de pessoas e objetos no ambiente real.

# 5 EXECUÇÃO

## 5.1 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

Este projeto terá início após a aprovação pelo Comitê de Ética em Pesquisa. A proposta a seguir poderá sofrer alteração dependendo da data de aprovação do projeto pelo comitê de ética.

- Submissão e aprovação do projeto no Comitê de Ética em Pesquisa – Janeiro de 2021 a Fevereiro de de 2021;
- Elaboração dos questionários – Janeiro de 2021 a Fevereiro de de 2021;
- Preparação do ambiente onde será realizado o estudo – Fevereiro de de 2021;
- Testes de segurança sem humanos – Fevereiro de de 2021;
- Aplicação do estudo e questionários – Março de 2021 a Abril de 2021;
- Análise das respostas dos questionários – Abril de 2021 a Maio de 2021;
- Elaboração do Artigo Científico Final – Maio de 2021 a Junho de 2021,
- Elaboração do Relatório Final – Junho de 2021.

## 5.2 ORÇAMENTO FINANCEIRO

Os itens marcados com '\*' já são fornecidos atualmente pela instituição proponente e não acarretarão em custos extras para a instituição. Os demais itens são de responsabilidade do pesquisador responsável.

Qtde.	Descrição	Valor
1	*Robô social	R\$ 143.791,66
1	*Bolsa de doutorado (período de 6 meses deste projeto)	R\$ 26.280,00
1	*Computador	R\$ 3.500,00
40	Pares de luvas descartáveis	R\$ 19,00
40	Máscaras descartáveis	R\$ 23,00
6	Frascos de álcool em gel	R\$ 47,00

## 6 Relatório Final

Relatório de pesquisa apresentado ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) através da Plataforma Brasil pelo pesquisador responsável Fagner de Assis Moura Pimentel, doutorando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário FEI no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGE), atuando na linha de pesquisa de Inteligência Artificial Aplicada à Automação e Robótica (IAAAR) e orientado pelo Prof. Dr.

### 6.1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados do projeto de pesquisa sobre conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social. O conforto da pessoa é um tópico estudado há vários anos no campo da interação humano-robô (IHR) e da navegação social. O interesse neste tópico pela comunidade científica vem aumentando nos últimos anos com a inserção cada vez maior de robôs em ambientes sociais. Dentro da IHR, três formas de interações se destacam: as interações verbais, as interações não-verbais e as interações espaciais.

O foco deste estudo está na compreensão do conforto relacionado as interações espaciais dentro da área conhecida como navegação social. Na navegação social, o objetivo é fazer com que um robô deixe de ter um comportamento de um simples robô móvel (RM) com desvio de obstáculos, onde ele apenas se preocupa em não colidir com os obstáculos no ambiente, e passa a se comportar como um robô social móvel (RSM), onde as pessoas e o contexto do ambiente são levados em consideração, de modo a não apenas evitar as colisões, mas também maximizar o conforto das pessoas próximas ao robô.

As interações espaciais são aprofundadas neste estudo e são divididas em dois tipos: Interações Espaciais Ativas (IEA), relacionadas a ações de abordagens do robô em um ser humano ou grupo de humanos e Interações Espaciais Passivas (IEP), relacionadas a forma com que o robô simplesmente navega e compartilha o mesmo ambiente com o ser humano.

#### 6.1.1 Objetivos

Esta pesquisa tem por finalidade, compreender o quão confortável o ser humano se sente na presença de um robô social, e como o robô influencia neste conforto. Os objetivos específicos desta pesquisa envolvem:

- Avaliar o comportamento e o conforto humano em ambientes com um robô móvel em termos de interação espacial.
- Analisar a influência do comportamento de Robô Móvel (RM) em comparação com um Robô Social Móvel (RSM) sobre o conforto humano.

- Comparar métricas de avaliação em ambiente simulado e real.
- Comparar os métodos utilizados neste experimento com métodos apresentados no estado da arte.
- Propor melhorias no comportamento do robô que possibilite maximizar o conforto das pessoas.
- Propor melhorias na realização de experimentos futuros.

### 6.1.2 Alterações no projeto

Esta seção apresenta as alterações realizadas no projeto para realização dos experimentos. Foram feitas basicamente duas alterações: A ordem de execução das tarefas e adição de uma nova métrica de avaliação.

#### 6.1.2.1 Execução das tarefas

Durante os experimentos algumas mudanças em relação ao projeto foram realizadas para otimizar a avaliação dos resultados. Para alguns dos voluntários, compartilhar um ambiente e interagir com um robô são tarefas quase cotidianas, pois trabalham diretamente com esse tipo de cenário, onde existe a presença de um robô. Entretanto, para outros voluntários, interagir ou apenas compartilhar o mesmo ambiente com um robô, essas experiências seriam inéditas. Neste sentido, para tais voluntários, a simples presença do robô é algo que chama a atenção, podendo influenciar diretamente no conforto destas pessoas. Tentamos evitar que o robô atraísse a atenção do voluntário desnecessariamente. Para isso, selecionamos tarefas que mantinham o voluntário ocupado, como mexer no celular nos momentos em que estivesse sozinho, e estabelecemos uma conversa informal nas interações com outras pessoas ou com objetos. Ao mesmo tempo também alteramos a ordem de execução das tarefas, inicialmente cada tarefa seria realizada separadamente, mas optamos por fazer todas as tarefas em sequência para minimizar o desconforto que os voluntários poderiam sentir por realizar tarefas repetitivas como visto na figura 1.

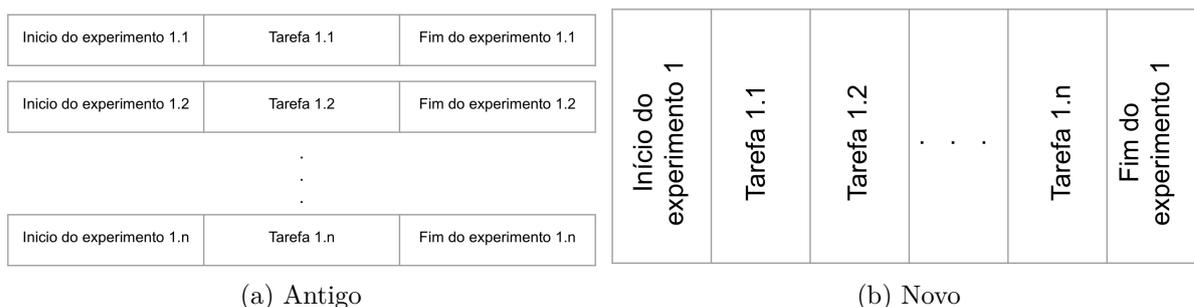


Figura 1 – Alterações realizadas na execução dos experimentos reais.

### 6.1.2.2 Nova métrica de avaliação

Além das métricas apresentadas no projeto desta pesquisa, uma nova métrica de avaliação de trajetória do robô em relação ao ser humano foi adicionado. Ela tem base no trabalho de [4] e foi adicionada para comparação de métodos.

$$SII = \max_{i=1:N} \exp \left( - \left( \frac{x_r - x_i^p}{\sqrt{2}\sigma_{px}^2} \right)^2 + \left( \frac{y_r - y_i^p}{\sqrt{2}\sigma_{py}^2} \right)^2 \right)$$

$N$  é o número de pessoas próximas ao robô,  $(x_r, y_r)$  é a posição do robô,  $(x_i^p, y_i^p)$  é a posição da  $i$ ésima pessoa, e  $(\sigma_{px}^2, \sigma_{py}^2)$  é o desvio padrão das posições das pessoas em  $x$  e  $y$ .

## 6.2 MATERIAIS

Esta secção apresenta o robô, os ambientes de teste, os voluntários e o experimentos utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

### 6.2.1 A Plataforma Robótica HERA

Para a realização desta pesquisa, foi utilizado o robô de assistência doméstica HERA (Home Environment Robot Assistant) desenvolvido no Centro Universitário FEI. A plataforma robótica HERA, vista na figura 2, possui as características físicas vistas na tabela 1 com seus sensores e atuadores.

Figura 2 – Versão real e simulada da plataforma HERA. Na versão simulada (lado esquerdo), os sensores robóticos usados neste estudo podem ser vistos em vermelho.

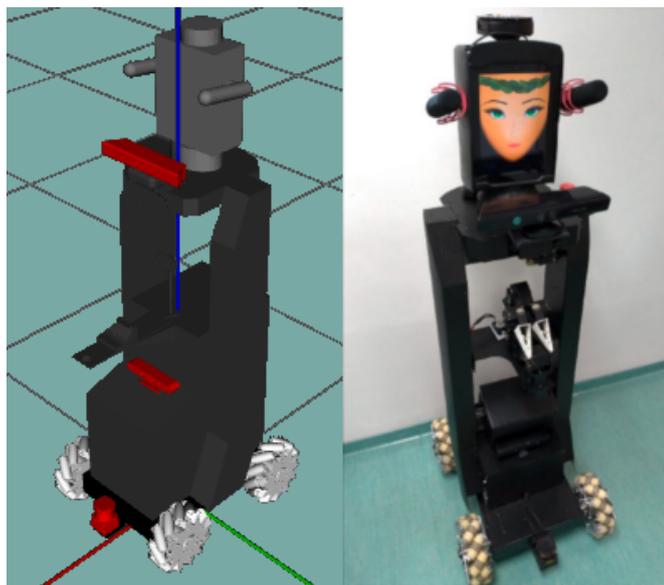


Tabela 1 – Componentes da plataforma HERA (Versão 2020 [3]).

Controle	Mini PC Zotak ZBOX-EN-1060K, Intel® Core™ i5 7500 CPU, 8GB RAM e placa gráfica GeForce GTX 1060	
	Sensores	Atuadores
Base	1 laser Hokuyo UTM-30LX, 1 laser Hokuyo URG-04LX-UG01	1 base Omnidirecional (Mecanum Wheel Vectoring Robot - IG52 DB) e 1 Câmera de profundidade Asus Xtion pro.
Torso	1 Botão de emergência.	1 Manipulador com 7 graus de liberdade.
Head	1 Camera de profundidade e RGB Microsoft Kinect, 1 Multi-sensor Matrix Creator, and 2 Microfones diferenciais RODE VideoMic GO	1 Apple Ipad (3rd generation) Servindo como uma face virtual para interações.

## 6.2.2 Ambientes de testes

Esta secção apresenta cada um dos ambientes utilizados para o desenvolvimento deste estudo. Na secção 6.2.2.1 são vistos os ambientes simulados e na secção 6.2.2.2 é vista a representação do ambiente onde foram realizados os experimentos reais com os voluntários.

### 6.2.2.1 Ambientes simulados

Os seguintes ambientes foram utilizados para os experimentos simulados:

- **Individual Estático (IE):** Ambiente com diversas pessoas paradas sem interagir umas com as outras entre o ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 3.a)
- **Interação com objeto (IO):** Ambiente com diversas pessoas paradas e interagindo com um objeto (um quadro na parede) entre o ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 3.b)
- **Grupo Face-a-face (GF):** Ambiente com diversos grupos de pessoas em formação de interação face a face entre o ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 3.c)
- **Grupo em formação circular (GC):** Ambiente com diversos grupos de pessoas em formação de interação circular entre o ponto inicial e final da trajetória do robô (Figura 3.d)
- **Maratona (M)** Ambiente que mistura todos os cenários anteriores (Figura 3.e).

### 6.2.2.2 Ambiente real

Os experimentos com voluntários foram realizados em um espaço interno de 10 por 11 metros (Figura 4). Tanto o robô quanto os voluntários tinham espaço suficiente para se movimentar livremente.

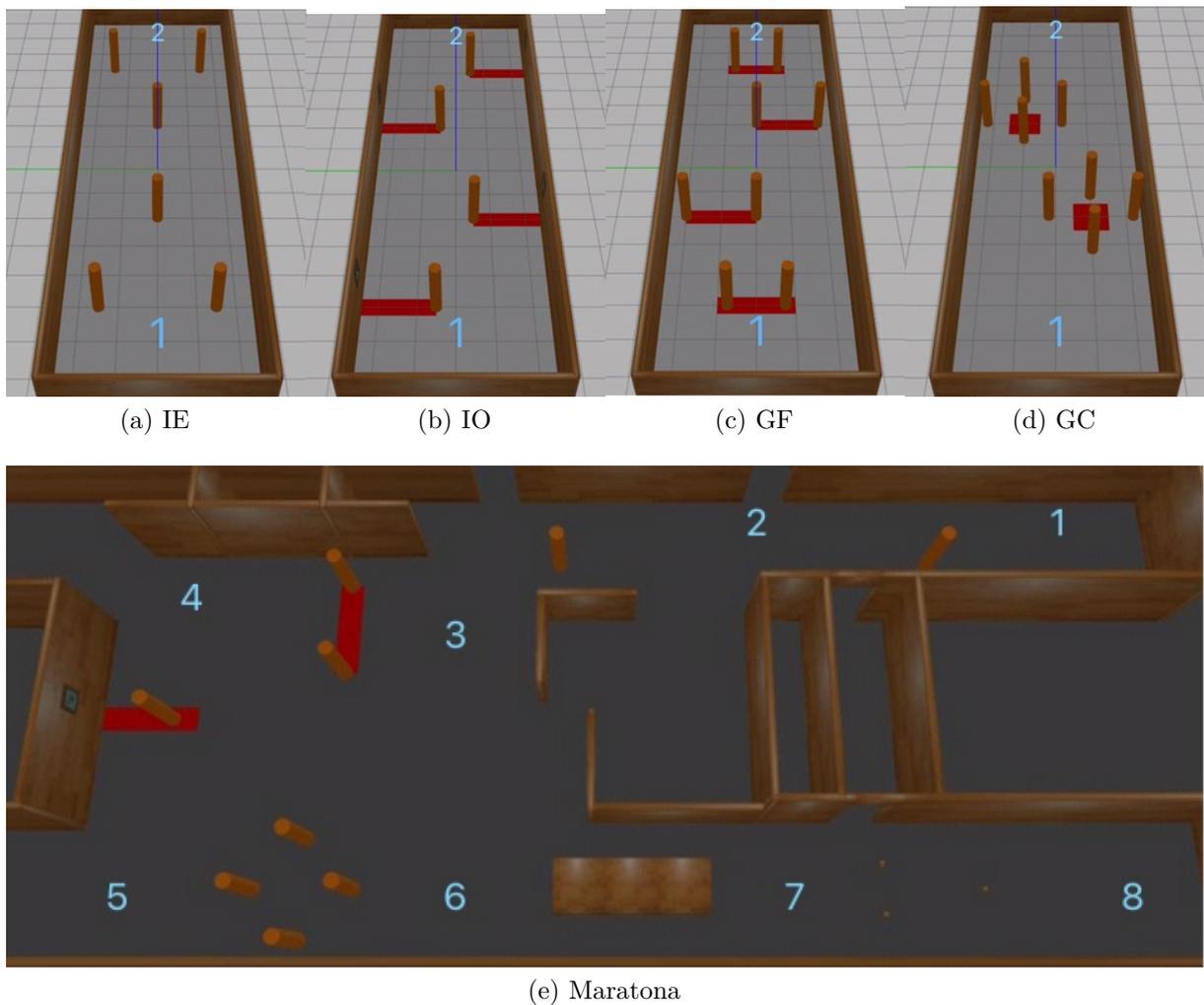


Figura 3 – Ambientes simulados. Os cilindros laranjas são representações dos humanos que causam erro de colisão se o robô tocar, as áreas em vermelho são áreas proibidas que causam erro de invasão se o robô passar por cima e os números são os checkpoints da trajetória do robô.

Os seguintes ambientes foram utilizados nos experimentos reais:

- **Individual Estático (IE):** Ambiente com situação cotidiana com uma pessoa parada no caminho do robô (esperando algo/alguém, mexendo/atendendo celular, etc) visto na figura 4.a.
- **Interação com objeto (IO):** Ambiente com situação cotidiana de pessoa interagindo com um objeto em sua frente (interação com tv, quadro, chamada de vídeo em um totem, etc) visto na figura 4.c.
- **Grupo Face-a-face (GF):** Ambiente com situação cotidiana de conversação entre duas pessoas mantendo um distanciamento social de 2 metros) visto na figura 4.b.

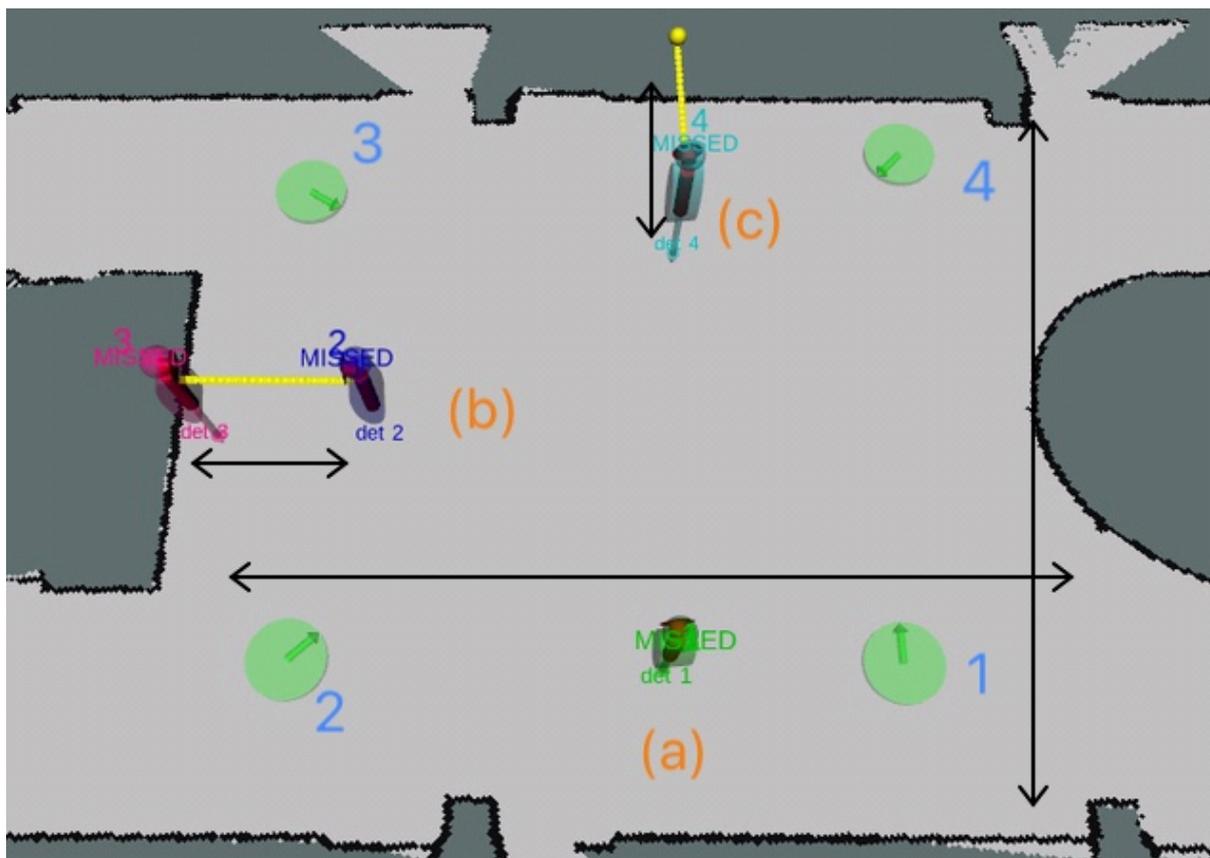


Figura 4 – Representação do ambiente onde foram realizados os experimentos reais. Os números são os pontos de parada da trajetória do robô. As letras representam as interações: (a) Individual Estático, (b) Grupo Face-a-face, (c) Individual com Objeto.

### 6.2.3 Voluntários

Foram convocados 20 voluntários para participar dos experimentos reais. As características dos voluntários variaram em termos de idade, gênero, experiência prévia com um robô e conhecimento prévio sobre robótica. Durante os experimentos não houve participantes retirados do estudo, eventos adversos graves e não foi necessário nenhum tipo de indenização.

## 6.3 EXPERIMENTOS COM VOLUNTÁRIOS

Nos experimentos, os voluntários realizaram tarefas simples e cotidianas como usar um celular, interagir com outras pessoas e interagir com objetos. Enquanto isso, o robô social realizava tarefas que envolviam interação espacial, como se deslocar pelo ambiente, podendo ou não passar próximo do participante (interação passiva) ou aborda-lo em algum momento (interação ativa). O robô poderia apresentar um comportamento socialmente aceito ou não enquanto a reação do voluntário era observada em ambos os casos.

Para esta pesquisa, foi proposta a execução das tarefas a seguir:

- Duas entrevistas, uma antes (E1) e uma depois (E2) do experimento.
- Tarefa 1: O participante realiza uma tarefa sozinho como mexer no celular. O robô passa próximo ao participante (Tarefa 1 - P). Em seguida aborda o participante, fazendo um cumprimento e uma pergunta (Tarefa 1 - A)
- Tarefa 2: O participante realiza uma interação com outro ser humano (uma conversa cotidiana). O robô passa próximo ao participante (Tarefa 2 - P) em seguida aborda o participante, fazendo um cumprimento e uma pergunta (Tarefa 2 - A)
- Tarefa 3: O participante realiza uma interação com um objeto (uma conversa cotidiana via vídeo chamada através de um totem). O robô passa próximo ao participante (Tarefa 3 - P) em seguida aborda o participante, fazendo um cumprimento e uma pergunta (Tarefa 3 - A).

A seguir são apresentados os questionários aplicados aos voluntários:

Questionário 1 - Antes dos experimentos:

- Qual o seu grau de familiaridade com os seguintes termos? (Questão de múltipla escolha com 5 opções: (1) O voluntario não conhece nada sobre o assunto, (2) o voluntario tem baixo conhecimento sobre o assunto, (3) o voluntario possui médio conhecimento sobre o assunto, (4) o voluntário possui alto conhecimento sobre o assunto e (5) o voluntario é especialista no assunto)
  - Robô
  - Robô móvel
  - Robô colaborativo
  - Robô inteligente
  - Robô de serviço
  - Robô social
  - Interação Humano-Robô (IHR)
  - Interação espacial
- Qual o seu entendimento sobre segurança física? (Questão aberta)
- Qual o seu entendimento sobre Naturalidade? (Questão aberta)
- Qual o seu entendimento sobre Sociabilidade? (Questão aberta)
- Qual o seu entendimento sobre Conforto? (Questão aberta)

- Qual o seu entendimento sobre Legibilidade? (Questão aberta)

Questionário 2 - Depois dos experimentos (Questões abertas):

- Qual o grau de segurança física que você sentiu durante o experimento como um todo?
- Alguma observação sobre o grau de segurança física?
- Para você, qual o grau de naturalidade dos movimentos do robô durante o experimento como um todo?
- Alguma observação sobre o grau de naturalidade?
- Para você, qual o grau de satisfação com os tópicos apresentados a seguir relativos a primeira abordagem do robô?
  - Sociabilidade
  - Conforto
  - Legibilidade
- O que mais te incomodou durante o experimento?
- O que mais te agradou durante o experimento?
- O que você achou da interação espacial do robô?
- Na sua opinião, tem algo que possa ser melhorado?

As tarefas foram gravadas para fins de análise do comportamento do robô e análise do conforto do ser humano. Durante a realização das tarefas, todos os protocolos de segurança exigidos pelo poder público referentes a pandemia do novo corona vírus (Covid-19) foram seguidos.

## 6.4 RESULTADOS

Esta secção apresenta os resultados dos experimentos simulados (secção 6.4.1), experimentos reais (secção 6.4.2) e discussão destes resultados (secção 6.4.3).

### 6.4.1 Resultados simulados

Para os experimentos simulados foram realizados 1000 experimentos para cada conjunto de ambientes, tipos de interação e tipos de navegação. Ao todo, foram realizadas 18 combinações diferentes, totalizando 18000 experimentos.

- **Ambientes:** Individual Estático (IE), Individual com objeto (IO), Grupo face a face (GF) e Grupo circular (GC).
- **Tipos de interação:** Interação Espacial Ativa (IEA) e Interação Espacial Passiva (IEP).
- **Tipos de navegação:** Navegação comum e navegação social.

A tabela 2 apresenta os resultados de simulação para as interações espaciais passivas, onde o robô passa próximo das pessoas simuladas. Nesta tabela é possível observar que os melhores resultados são apresentados para os ambientes que tiveram navegação social. A principal causa de falha foi o a invasão dos espaços de interação, com exceção dos ambientes com indivíduos estáticos, onde não existe uma área de interação que pudesse ser invadida, todas os outros ambientes apresentaram essa falha para a navegação comum.

Em relação ao coeficiente espacial (SPC), é observado que todos os ambientes com navegação comum, os valores são iguais a 1. Isso quer dizer que o robô não faz nenhum desvio de trajetória em comparação com o planejamento realizado. Já nos ambientes com navegação social, é observado uma queda nestes valores de SPC. Esta queda é decorrente de alteração na trajetória em comparação com o planejamento. Neste caso, o robô realiza uma trajetória maior do que o planejado para evitar passar perto demais dos humanos ou evitar passar em locais de interação. Já nos casos de interação espacial ativa, os resultados ultrapassam o valor de 1. Isso acontece porque nos casos de abordagem o robô planeja ir até o ponto onde esta a pessoa, entretanto o robô seleciona um ponto próximo à pessoa e dentro do ângulo de visão da pessoa para fazer a abordagem. Esse ponto próximo resulta geralmente em uma trajetória menor do que a planejada, resultando em valores acima de 1 para o SPC.

Em relação ao coeficiente temporal (TEC), todos os experimentos apresentam valores próximos de 1, sem muita diferença. Os valores indicam que o robô segue o planejado em relação ao tempo. Um leve aumento dos valores é observada nos experimentos com interações espaciais ativas, e novamente, esse aumento assim como na métrica SPC, ocorre porque o robô planeja ir até o ponto onde está a pessoa mas interrompe o seu movimento antes, para evitar invasão de espaço de interação ou mesmo uma colisão.

Em relação ao coeficiente de suavidade (SMC), essa métrica apresenta ótimos valores para as interações espaciais passivas (acima de 0.91). Esses valores indicam que a trajetória foi suave, com poucas curvas. Já nas interações espaciais ativas, o valor médio cai, sendo explicado pela necessidade do robô fazer curvas e de girar nos momentos de abordagem do ser humano. Nos experimentos de maratona, esse valor cai drasticamente. Nestes ambientes o robô precisa fazer diversas curvas e giros ao longo da trajetória, impactando assim nesta métrica.

Em relação ao coeficiente de proxêmica (PRC), existe uma diferença entre os experimentos com navegação comum e navegação social. É possível observar que a navegação

social consegue respeitar as distâncias sociais das pessoas com valores muito próximos ou iguais à 1 em todos os experimentos.

Tabela 2 – Resultado para interações passivas. Melhores valores em negrito.

	Comum				Social			
	GC	GF	IE	IO	GC	GF	IE	IO
<i>SR</i>	36.9 %	0 %	<b>100 %</b>	<b>99.4 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	98.9 %
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_A</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_C</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_I</i>	63.1 %	100 %	0 %	0.6 %	0 %	0 %	0 %	1.1 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.95$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.02$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.03$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.04$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.93$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.86$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.84$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.91$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.02$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 0.82$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.92$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.85$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1$ $\sigma = 0$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

Tabela 3 – Resultado para interações ativas. Melhores valores em negrito.

	Comum				Social			
	GC	GF	IE	IO	GC	GF	IE	IO
<i>SR</i>	0.3 %	0 %	<b>100 %</b>	0 %	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	99.9 %	<b>98.1 %</b>
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0 %	0 %	0 %	4.5 %	0 %	0 %	0.1 %	0.6 %
<i>FR_A</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_C</i>	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<i>FR_I</i>	99.7 %	100 %	0 %	95.5 %	0 %	0 %	0 %	1.3 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 1.03$ $\sigma = 0.18$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.92$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1.09$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 1.04$ $\sigma = 0.08$	$\bar{x} = 1.03$ $\sigma = 0.1$	$\bar{x} = 1.04$ $\sigma = 0.1$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0.89$ $\sigma = 0.15$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.83$ $\sigma = 0.1$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 1.05$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.98$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.12$	$\bar{x} = 0.97$ $\sigma = 0.1$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.11$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.05$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.87$ $\sigma = 0.03$	$\bar{x} = 0.81$ $\sigma = 0.06$	$\bar{x} = 0.87$ $\sigma = 0.07$	$\bar{x} = 0.81$ $\sigma = 0.07$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 0.62$ $\sigma = 0.44$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.88$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.96$ $\sigma = 0.02$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.01$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0.01$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

#### 6.4.2 Resultados reais

Para os experimentos reais, foram convocadas 20 pessoas com diferentes idades e diferentes familiaridades com um robô social para interagir com a plataforma robótica HERA. Cada experimento possui combinações diferentes totalizando 120 experimentos diferentes:

Tabela 4 – Resultado para maratona. Melhores valores em negrito.

	Comum	Social
<i>SR</i>	0 %	<b>100 %</b>
<i>FR_SE</i>	0 %	0 %
<i>FR_TE</i>	0 %	0 %
<i>FR_A</i>	0 %	0 %
<i>FR_C</i>	0 %	0 %
<i>FR_C</i>	100 %	0 %
<i>SPC</i>	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.94$ $\sigma = 0.02$
<i>TEC</i>	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.87$ $\sigma = 0.03$
<i>SMC</i>	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.46$ $\sigma = 0$
<i>PRC</i>	$\bar{x} = 0$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 0.99$ $\sigma = 0$

$\bar{x}$  = média,  $\sigma$  = desvio padrão.

- **Ambientes:** Individual Estático (IE), Individual com objeto (IO), Grupo face a face (GF). Todos os participantes realizam.
- **Tipos de interação:** Interação Espacial Ativa (IEA) e Interação Espacial Passiva (IEP). Todos os participantes realizam.
- **Tipos de navegação:** Navegação comum e navegação social. Metade dos participantes em cada tipo.

Destes experimentos, metade foi realizada com navegação comum enquanto a outra metade foi realizada com navegação social como visto na figura 5. O tipo de navegação foi selecionado aleatoriamente para cada voluntário, ate completar o requisito de meio a meio entre comum e social.

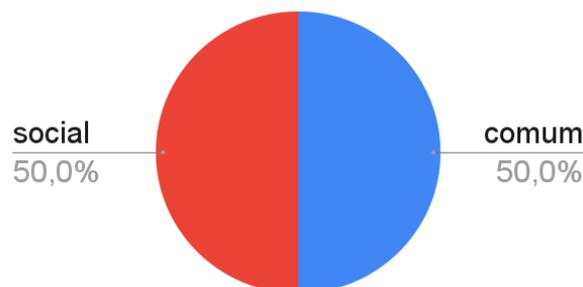


Figura 5 – Tipo de experimento

Na figura 6 é possível ver a distribuição da faixa etária dos participantes, de forma geral, e discriminado por tipo de navegação usada no experimento. A faixa etária predominante foi e 18 a 24 anos.

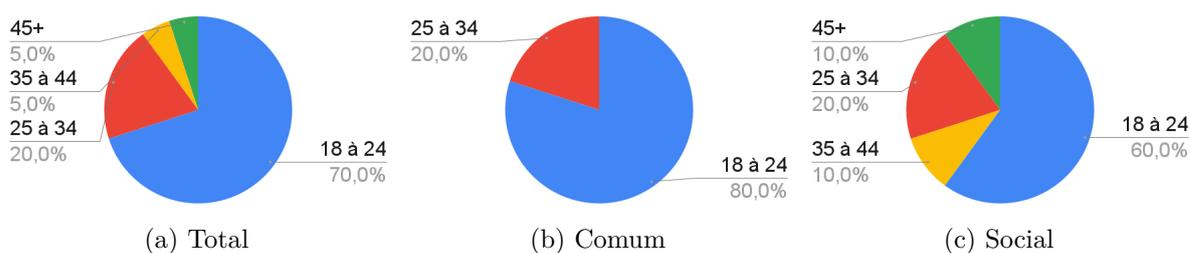


Figura 6 – Faixa etária

As figuras 8, 9, 10, 12 e 7 apresentam o grau de familiaridade dos voluntários com alguns termos chave utilizados na navegação social: Legibilidade, segurança física, naturalidade, sociabilidade e conforto. A maioria dos voluntários possui um conhecimento 5 sobre segurança física, entre 3 e 4 para naturalidade, 5 para sociabilidade, entre 4 e 5 para legibilidade e 5 para conforto.

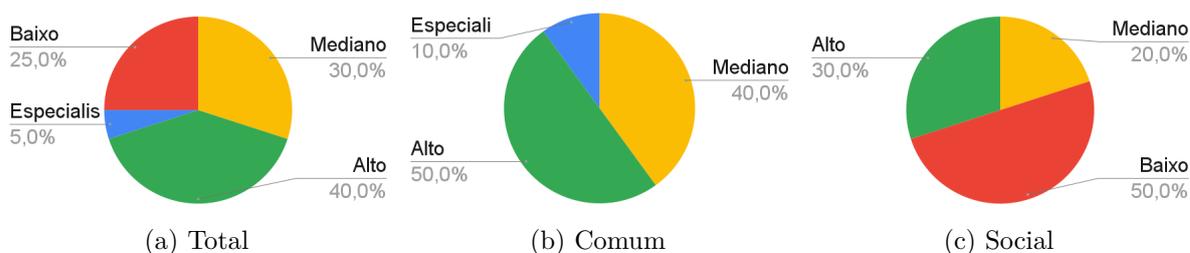


Figura 7 – Familiaridade

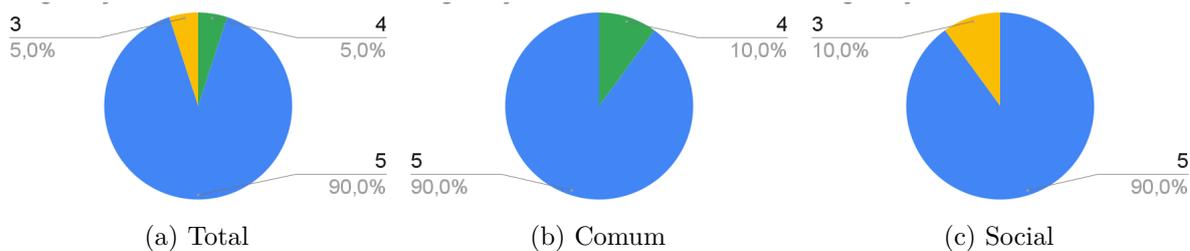


Figura 8 – Segurança Física

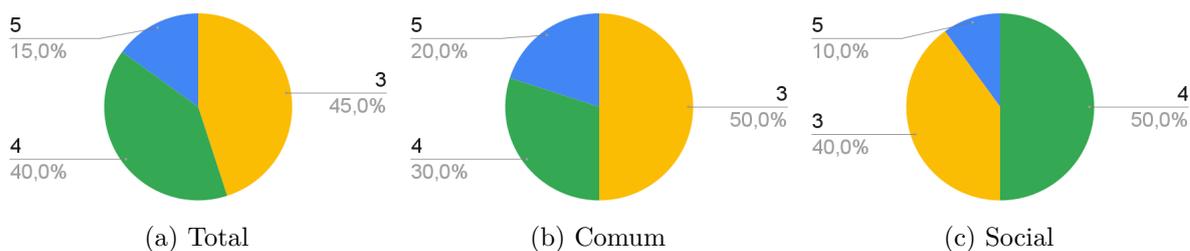


Figura 9 – Naturalidade

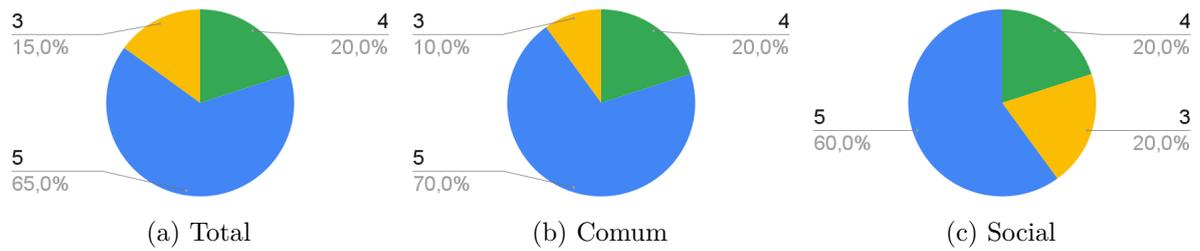


Figura 10 – Sociabilidade

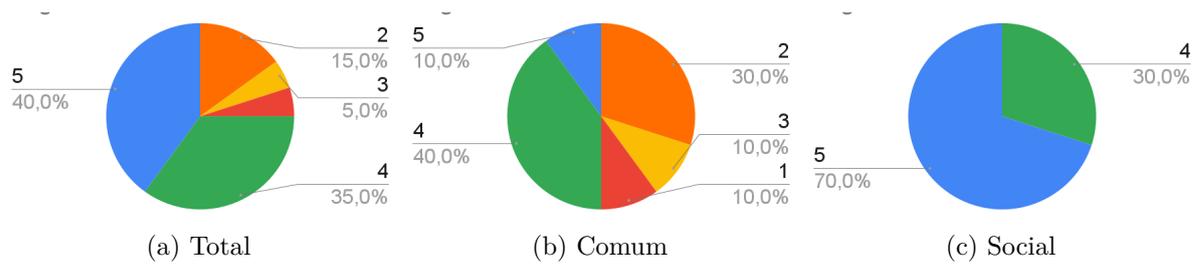


Figura 11 – Legibilidade

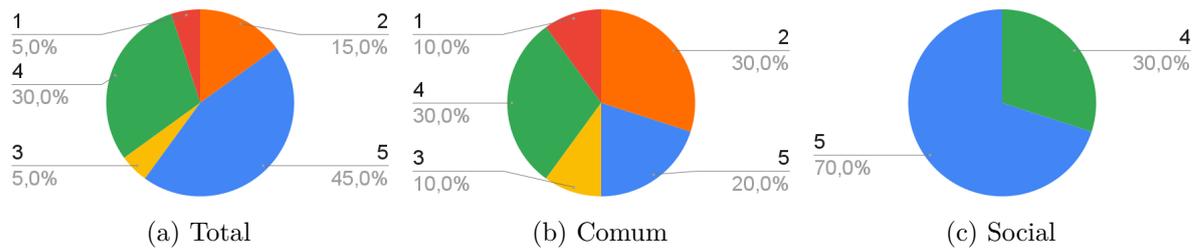


Figura 12 – Conforto

A tabela 6.4.2 apresenta os resultados das métricas SPC e TEC em cada um dos experimentos. Os valores para ambas as métricas, apresentam valores similares aos apresentados nos experimentos simulados.

Tabela 5 – Métricas SPC e TEC em experimentos com voluntários.

Comum										
ID	3	5	9	11	13	14	15	16	17	19
SPC	0.97	0.97	0.96	0.97	0.96	0.97	0.97	0.96	0.97	0.96
TEC	0.91	0.90	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93
Social										
ID	1	2	4	6	7	8	10	12	18	20
SPC	0.98	0.98	0.99	0.98	0.97	0.99	1.00	0.98	0.97	0.98
TEC	0.96	0.96	0.94	0.95	0.92	0.95	0.96	0.95	0.94	0.95

A figura 13 apresenta os valores das métricas PRC e SMC, elem destas duas, também é apresentado o PE, que é a distancia do robô para a pessoa mais próxima (usado como

medida básica da proxêmica) e SII, apresentado na introdução deste relatório e também usa o PE como base.

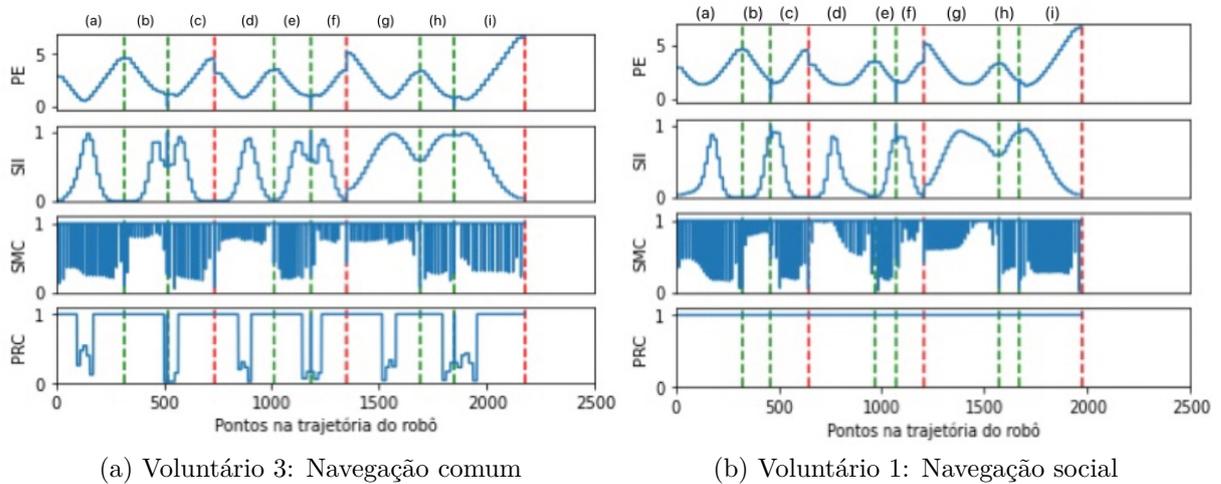


Figura 13 – Métricas SII, SMC e PRC em experimentos com voluntários.

Como os resultados gráficos dos experimentos com navegação comum apresentam comportamentos similares entre si e o mesmo ocorre entre os experimentos de navegação social, foi selecionado apenas um experimento de cada tipo de navegação para ser analisado: o experimento do voluntário 3 (navegação comum) e o experimento do voluntário 1 (navegação social). Nestes gráficos, o eixo x representa os pontos da trajetória executada pelo robô e o eixo y, o valor de cada métrica. Os gráficos são divididos em faixas que representam cada momento do experimento. São 9 momentos no total:

- **a:** individual estático e interação espacial passiva
- **b:** individual estático e interação espacial ativa - início da abordagem
- **c:** individual estático e interação espacial ativa - final da abordagem
- **d:** grupo face a face e interação espacial passiva
- **e:** grupo face a face e interação espacial ativa - início da abordagem
- **f:** grupo face a face e interação espacial ativa - final da abordagem
- **g:** individual interagindo com objeto e interação espacial passiva
- **h:** individual interagindo com objeto e interação espacial ativa - início da abordagem
- **i:** individual interagindo com objeto e interação espacial ativa - final da abordagem

Dentre os 4 gráficos apresentados, o PRC e o SMC são os mais representativos quando comparamos a navegação comum e a social. Pelo PRC é possível observar com clareza

os momentos em que o robô se aproxima demais do ser humano nos experimentos de navegação comum, enquanto nos experimentos de navegação social o robô respeita o distanciamento em todos os momentos. Pelo SMC podemos ver os momentos em que o robô realiza movimentos suaves (próximo ao 1) e não tão suaves (próximo ao 0).

### 6.4.3 Discussão

O trabalho apresentou um estudo sobre o conforto de pessoas em ambientes com robôs sociais. Foram realizados 18000 experimentos em ambiente simulados e 20 voluntários foram convocados para realizar experimentos em ambiente real. Durante o estudo foi possível analisar métricas objetivas sobre o comportamento do robô e verificar o grau de conforto dos voluntários. Em cada situação, foi observada que a navegação que não segue regras sociais causam maior desconforto nas pessoas e que o barulho das rodas da plataforma HERA foi o principal motivo de desconforto dos voluntários.

As principais dificuldades encontradas foi em manter o foco dos voluntários nos elementos de interação espacial. Outros elementos de interação humano-robô se sobressaem em relação aos elementos de interação espacial. Neste sentido, foi observado por exemplo que os elementos de aparência e design do robô são os primeiros a chamarem a atenção do voluntario, principalmente quando o voluntario não possui familiaridade com o robô, em seguida, a capacidade de interação verbal é o que mais chama a atenção do voluntario, seguido da capacidade de interação gestual e por ultimo, a capacidade de interação espacial. No contexto de compartilhamento de um ambiente com um robô, o ideal é que a pessoa esqueça que o robô esta em cena a menos que ele chame sua atenção de forma ativa. Neste sentido, qualquer ação que chame atenção desnecessariamente como um movimento inesperado é um potencial desconforto para o ser humano. Dada esta dificuldade, foi necessário fazer algumas alterações na forma como o experimento foi realizado como explicado no inicio deste relatório.

Os voluntários de forma geral apresentaram pouco desconforto com o robô. Durante a navegação comum, os desconfortos foram observados quando o robô interrompia as interações sociais. Na navegação social o robô respeitou as interações sociais e foi mais aceito. O principal motivo de desconforto apontado pelos voluntários foi o barulho que as rodas do robô faz quando esta navegando pelo ambiente. O barulho aparece como um fator de impacto pois no contexto social ele é pouco ou inexistente, sendo visto como incomodo pelas pessoas quando ele acontece, já as pessoas que trabalham diretamente com o robô não se incomodam com o barulho pois já estão familiarizados com ele, mas admitem que pode ser um problema apos ser questionado sobre o fato. A familiaridade previa do voluntário com o robô teve grande influência no conforto por facilitar a legibilidade dos movimentos do robô. Essa familiaridade pode ser de uma interação presencial prévia, observações ficticias ou observações na mídia. Observou-se que o conforto esta intimamente ligado a familiaridade que o voluntario tem do robô e do conhecimento que o voluntario tem sobre

o que robô pode e irá fazer. Consequentemente, muitos desconfortos são originados na realização de um comportamento não esperado por parte do robô.

Observa-se que, tanto no simulador, quanto no real, a SMC registra um baixo rendimento em ambientes com diversos pontos de paradas onde precisam fazer diversas curvas. Essa métrica ainda precisa ser melhor trabalhada, entretanto, já nos dá indícios de pontos de melhoria para suavizar a trajetória do robô. Duas melhorias precisam ser feitas na métrica SMC: aceitar melhor os movimentos em que curvas são necessárias e penalizar mais os giros no próprio eixo.

Esse estudo limitou-se apenas as interações espaciais, entretanto foi possível observar a influência de outros tipos de interações como verbal e gestual no conforto do ser humano e como essas interações ou a falta delas influenciam no conforto relacionado as interações espaciais.

Com os resultados deste estudo é possível propor melhorias na plataforma robótica HERA assim como em robôs sociais em geral para maximizar o conforto das pessoas próximas a esse tipo de robô.

Futuramente, esperamos utilizar uma distribuição mais equilibrada dos voluntários e explorar ambientes dinâmicos. Atualmente este estudo está sendo revisado para publicação em revista científica da área.

# Bibliografia

- [1] Thibault Kruse et al. “Human-aware robot navigation: A survey”. Em: *Robotics and Autonomous Systems* 61.12 (2013), pp. 1726–1743.
- [2] F. Pimentel e P. Aquino. “Performance Evaluation of ROS Local Trajectory Planning Algorithms to Social Navigation”. Em: *2019 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE)*. 2019, pp. 156–161.
- [3] Rodrigo C. Techi et al. “RoboFEI@Home Team Description Paper for RoboCup@Home 2020”. Em: *Team Description Paper of RoboCup@Home Competition* (2020).
- [4] Xuan-Tung Truong e Trung-Dung Ngo. ““To approach humans?”: A unified framework for approaching pose prediction and socially aware robot navigation”. Em: *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems* 10.3 (2017), pp. 557–572.
- [5] Kaiyu Zheng. “Ros navigation tuning guide”. Em: *arXiv preprint arXiv:1706.09068* (2017).

# Apêndices

# TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

**Título do Projeto de Pesquisa** : Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social  
**Pesquisador Responsável** : Fagner de Assis Moura Pimentel  
**Nome do participante** : \_\_\_\_\_  
**Documento de identidade** : \_\_\_\_\_  
**Data de nascimento** : \_\_\_\_\_

Leia cuidadosamente o que se segue e pergunte sobre qualquer dúvida que você tiver. Caso se sinta esclarecido(a) sobre as informações que estão neste Termo e aceite fazer parte do estudo, peço que assine ao final deste documento, em duas vias, sendo uma via sua e a outra do pesquisador responsável pela pesquisa. Saiba que você tem total direito de não querer participar.

Qualquer dúvida, pedimos a gentileza de entrar em contato com **Fagner de Assis Moura Pimentel**, pesquisador responsável pela pesquisa, telefone: **(71) 99158-6867**, e-mail: **fpimentel@fei.edu.br**, com o **Comitê de Ética em Pesquisa da Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Metodista de São Paulo (CEP-UMESP)**, localizado na **Rua do Sacramento nº 230, sala 303, Rudge Ramos, São Bernardo do Campo - SP**, telefone: **(11) 4366-5814**, e-mail: **cometica@metodista.br**, e/ou com a **Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (CONEP)**, telefone: **(61) 3315.5877**, e-mail: **conep@saude.gov.br**.

Você está sendo convidado(a) para ser participante do projeto de pesquisa intitulado "**Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social**" de responsabilidade do pesquisador **Fagner de Assis Moura Pimentel**.

- O trabalho tem por finalidade, compreender o quão confortável o participante se sente na presença de um robô social que irá se deslocar pelo ambiente, podendo ou não passar próximo do participante ou abordá-lo em algum momento.
- A participação nesta pesquisa consistirá em executar tarefas simples e cotidianas como caminhar, interagir com objetos no ambiente (ex.: televisores ou quadros), interagir com outras pessoas mantendo distanciamento social (ex.: conversa informal

---

com uma ou duas pessoas) enquanto um robô social se desloca pelo ambiente podendo ou não abordar o participante (ex.: parar próximo ao participante e cumprimentá-lo). Serão realizadas até 10 tarefas diferentes com a presença do robô e 2 (duas) entrevistas, uma antes e uma depois das tarefas. A duração máxima de cada tarefa e cada entrevista será de 5 (cinco) minutos, totalizando 1 (uma) hora (tempo máximo) de participação na pesquisa. As tarefas serão gravadas para fins de análise do comportamento do robô. Fica assegurado ao participante da pesquisa o direito de recusar-se a responder as perguntas que ocasionem constrangimentos de qualquer natureza. Durante a realização da pesquisa, serão seguidos todos os protocolos de segurança exigidos pelo poder público referentes a pandemia do novo corona vírus (Covid-19). Serão fornecidas luvas, álcool em gel, máscaras, higienização do ambiente e do robô e será respeitado o distanciamento social de 1.5 (um e meio) metros entre as pessoas.

- Durante a execução da pesquisa o risco de colisão do robô com o participante é baixo. Nos experimentos realizados em ambiente simulado o índice de colisão chegou a 2.5%. De forma complementar, durante a participação neste estudo, para anular qualquer risco de colisão, o robô é equipado com um botão de emergência que para todas as atividades do robô no mesmo instante que este botão é acionado. Um especialista na operação do robô irá acompanhá-lo a todo momento para acionar o botão de emergência ao menor sinal deste risco.
- A participação nesta pesquisa não trará benefícios diretos mas permitirá melhorar o comportamento do robô social, tornando este comportamento mais aceitável na sociedade e acelerar o processo de inserção de robôs dessa categoria em ambientes sociais.
- Os participantes não terão nenhuma despesa ao participar da pesquisa e poderão retirar sua concordância na continuidade da pesquisa a qualquer momento.
- Não há nenhum valor econômico a receber ou a pagar aos voluntários pela participação, no entanto, caso haja qualquer despesa decorrente desta participação haverá o seu ressarcimento pelos pesquisadores.
- Caso ocorra algum dano comprovadamente decorrente da participação no estudo, os voluntários poderão pleitear indenização, segundo as determinações do Código Civil (Lei nº 10.406 de 2002) e das Resoluções 466/12 e 510/16 do Conselho Nacional de Saúde.
- O nome dos participantes e sua identidade durante a gravação das tarefas serão mantidos em sigilo, assegurando assim a sua privacidade, e se desejarem terão livre acesso a todas as informações e esclarecimentos adicionais sobre o estudo e suas

consequências, enfim, tudo o que queiram saber antes, durante e depois da sua participação.

- Os dados coletados serão utilizados única e exclusivamente, para fins desta pesquisa, e os resultados poderão ser publicados.

—

Declaro ter sido informado a respeito das informações que descrevem o estudo intitulado "**Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social**". Ficaram claros para mim quais são os objetivos do estudo, os procedimentos a serem realizados, seus riscos, benefícios e as garantias de confidencialidade. Ficou claro também que minha participação é isenta de despesas. Concordo voluntariamente em participar deste estudo e poderei retirar o meu consentimento a qualquer momento, antes ou durante o mesmo, sem penalidades ou prejuízo.

---

Participante

---

**Fagner de Assis Moura Pimentel**

Pesquisador responsável pela pesquisa e por coletar de forma apropriada e voluntária este termo de consentimento livre e esclarecido

# TERMO DE CONFIDENCIALIDADE

**Título do Projeto de Pesquisa** : Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social  
**Pesquisador Responsável** : Fagner de Assis Moura Pimentel

Os pesquisadores do presente projeto intitulado "**Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social**" sob responsabilidade do pesquisador **Fagner de Assis Moura Pimentel**, se comprometem a preservar a privacidade e o anonimato dos sujeitos cujos dados serão coletados através de gravação e questionários realizados no Centro Universitário FEI. Concordam, igualmente, que estas informações serão utilizadas única e exclusivamente para execução do presente projeto. As informações somente poderão ser divulgadas preservando o anonimato dos sujeitos e serão mantidas em poder do responsável pela pesquisa por um período de 5 anos. Após este período, os dados serão destruídos.

<b>Pesquisador</b>	<b>Assinatura</b>
<b>Fagner de Assis Moura Pimentel</b>	_____
	_____

# TERMO DE COMPROMISSO DO PESQUISADOR

**Título do Projeto de Pesquisa** : Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social  
**Pesquisador Responsável** : Fagner de Assis Moura Pimentel

Os pesquisadores do presente projeto intitulado "**Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social**" sob responsabilidade do pesquisador **Fagner de Assis Moura Pimentel**, se comprometem a:

- Cumprir os termos da resolução nº 196/96, de 10 de Outubro de 1996, do Conselho Nacional de Saúde, do Ministério da Saúde e demais resoluções complementares à mesma (240/97, 251/97, 292/99, 303/2000, 304/2000, 340/2004, 346/2005 e 347/2005);
- Assumir o compromisso de zelar pela privacidade e pelo sigilo das informações, que serão obtidas e utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa;
- Utilizar os materiais e as informações obtidas no desenvolvimento deste trabalho apenas para se atingir o(s) objetivo(s) previsto(s) nesta pesquisa e não serão utilizados para outras pesquisas sem o devido consentimento dos voluntários;
- Arquivar os materiais e os dados obtidos ao final da pesquisa sob a responsabilidade do pesquisador responsável pela pesquisa, de que também será responsável pelo descarte dos materiais e dados, caso os mesmos não sejam estocados ao final da pesquisa;
- Tornar público os resultados da pesquisa através de apresentação em encontros científicos ou publicação em periódicos científicos, quer sejam favoráveis ou não, respeitando-se sempre a privacidade e os direitos individuais dos sujeitos da pesquisa;
- Comunicar ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Metodista de São Paulo (CEP-UMESP) a suspensão ou o encerramento da pesquisa por meio de relatório apresentado na ocasião da suspensão ou do encerramento da pesquisa com a devida justificativa;
- Comunicar ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Metodista de São Paulo (CEP-UMESP) imediatamente se ocorrerem efeitos adversos, resultantes desta pesquisa, com o voluntário;

---

Pesquisador	Assinatura
Fagner de Assis Moura Pimentel	_____
	_____

São Bernardo do Campo, 24 de agosto de 2021.

# DECLARAÇÃO DE INICIO

**Título do Projeto de Pesquisa** : Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social  
**Pesquisador Responsável** : Fagner de Assis Moura Pimentel

Ao Comitê de Ética em Pesquisa – CEP.

Declaramos que não iniciaremos a pesquisa do projeto intitulado "**Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social**" sob responsabilidade do pesquisador **Fagner de Assis Moura Pimentel** até a aprovação do projeto pelo comitê de ética.

<b>Pesquisador</b>	<b>Assinatura</b>
<b>Fagner de Assis Moura Pimentel</b>	_____
	_____

São Bernardo do Campo, 24 de agosto de 2021.

# DECLARAÇÃO DE AUTORIZAÇÃO E INFRAESTRUTURA DA INSTITUIÇÃO PROPONENTE

**Título do Projeto de Pesquisa** : Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social  
**Pesquisador Responsável** : Fagner de Assis Moura Pimentel

Ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Metodista de São Paulo (CEP-UMESP).

Eu, **Dario Alliprandini**, Vice-Reitor de Ensino e Pesquisa no Centro Universitário FEI, estou ciente e autorizo o pesquisador **Fagner de Assis Moura Pimentel** a desenvolver nesta instituição o projeto de pesquisa intitulado "**Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social**", o qual será executado em consonância com as Normas e Resoluções que norteiam a pesquisa envolvendo seres humanos, em especial a Resolução CNS 466/12. Para isto, serão disponibilizados ao pesquisador, os materiais apresentados no orçamento financeiro deste projeto.

Declaro estar ciente de que a instituição proponente é co-responsável pela atividade de pesquisa proposta e executada pelos seus pesquisadores e dispõe da infraestrutura necessária para garantir o resguardo e bem-estar dos participantes da pesquisa.

---

Vice-Reitor de Ensino e Pesquisa no Centro Universitário FEI

São Bernardo do Campo, 24 de agosto de 2021.

# QUESTIONÁRIO APLICADO NOS EXPERIMENTOS EM AMBIENTE REAL

**Título do Projeto de Pesquisa** : Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social

**Pesquisador responsável** : Fagner de Assis Moura Pimentel

**Nome do participante** : \_\_\_\_\_

**Documento de identidade** : \_\_\_\_\_

**Data de nascimento** : \_\_\_\_\_

**Gênero:** : \_\_\_\_\_

**Tipo do experimento** : \_\_\_\_\_

## PARTE 1: FAMILIARIDADE DO PARTICIPANTE

QUAL O SEU GRAU DE FAMILIARIDADE COM OS TERMOS A SEGUIR?

(1 - Não possui conhecimento, 2 - Possui baixo conhecimento, 3 - Possui conhecimento mediano, 4 - Possui alto conhecimento, 5 - Especialista no assunto)

<b>Robô:</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
<b>Robô móvel:</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
<b>Robô colaborativo:</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
<b>Robô inteligente:</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
<b>Robô de serviço:</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
<b>Interação humano-robô:</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
<b>Interação espacial:</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
<b>Robô social:</b>	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5

## PARTE 2: EXPERIMENTOS

Para cada experimento, indique seu grau de satisfação com os tópicos apresentados

- Segurança** : Envolve os conceitos de segurança física e psicológica. O quão seguro você se sente com o robô passando próximo de você?
- Naturalidade** : Relativo aos movimento do robô. Para você, o quão natural ou familiar aparentam ser os movimentos do robô?
- Sociabilidade** : Sobre respeito de regras e normas sociais. O quanto você acha que o robô esta respeitando algum tipo de regra ou norma social?
- Conforto** : O quão confortável você se sente na presença do robô?
- Legibilidade** : O quanto você consegue prever os movimentos do robô (o que esta fazendo e para onde esta indo)?

## PESSOAS ESTÁTICAS NO CAMINHO DO ROBÔ (INTERAÇÃO PASSIVA)

Experimento 1: Uma pessoa.

Segurança:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Naturalidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Sociabilidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Conforto:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Legibilidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Confiança:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5

Experimento 2: Uma pessoa interagindo com um objeto.

Segurança:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Naturalidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Sociabilidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Conforto:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Legibilidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Confiança:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5

Experimento 3: Duas pessoas interagindo entre si.

Segurança:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Naturalidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Sociabilidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Conforto:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Legibilidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Confiança:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5

## PESSOAS ESTÁTICAS SENDO ABORDADAS PELO ROBÔ (INTERAÇÃO ATIVA)

Experimento 4: Uma pessoa.

Segurança:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Naturalidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Sociabilidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Conforto:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Legibilidade:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5
Confiança:	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5

Experimento 5: Uma pessoa interagindo com um objeto.

- |                |                         |                         |                         |                         |                         |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Segurança:     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Naturalidade:  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Sociabilidade: | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Conforto:      | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Legibilidade:  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Confiança:     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |

Experimento 6: Duas pessoas interagindo entre si.

- |                |                         |                         |                         |                         |                         |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Segurança:     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Naturalidade:  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Sociabilidade: | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Conforto:      | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Legibilidade:  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Confiança:     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |

## PESSOAS DINÂMICAS NO CAMINHO DO ROBÔ

Experimento 7: Uma pessoa no caminho do robô indo em direção à ele.

- |                |                         |                         |                         |                         |                         |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Segurança:     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Naturalidade:  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Sociabilidade: | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Conforto:      | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Legibilidade:  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Confiança:     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |

Experimento 8: Duas pessoa no caminho do robô indo em direção à ele.

- |                |                         |                         |                         |                         |                         |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Segurança:     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Naturalidade:  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Sociabilidade: | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Conforto:      | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Legibilidade:  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| Confiança:     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |

Experimento 9: Uma pessoa cruzando o caminho do robô.

- |                       |                         |                         |                         |                         |                         |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Segurança:</b>     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| <b>Naturalidade:</b>  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| <b>Sociabilidade:</b> | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| <b>Conforto:</b>      | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| <b>Legibilidade:</b>  | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |
| <b>Confiança:</b>     | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 | <input type="radio"/> 3 | <input type="radio"/> 4 | <input type="radio"/> 5 |

---

Participante voluntário

---

**Fagner de Assis Moura Pimentel**

Pesquisador responsável

**APÊNDICE B – RELATÓRIO FINAL ENVIADO AO COMITÊ DE ÉTICA**

**COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA  
DA UNIVERSIDADE METODISTA DE SÃO PAULO**

**RELATÓRIO PARCIAL ( ) RELATÓRIO FINAL ( X )**

**CEP Nº 09.640-000**

**CONEP Nº**

**Título do Protocolo:**

Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social

**Nome Pesquisador Responsável: Fagner de Assis Moura Pimentel**

**1. Situação da Pesquisa**

( ) Em andamento

Previsão de conclusão: / /

( ) Ainda não foi iniciada

Previsão de início: / /

( ) Suspensa

( X ) Concluída

Data de conclusão: 05/08/2021

**2. Local ou locais de realização da pesquisa.**

**Fundação Educacional Padre Saboia de Medeiros**

**3. Qual o tamanho da amostra alocado no estudo?/ Qual o tamanho da amostra proposto para o estudo? (Justificar alterações)**

**20/20**

**4. Houve necessidade de alteração na estrutura do projeto? Título? Material? Método? Objetivos? Detalhar e justificar alterações.**

**Durante os experimentos algumas mudanças em relação ao projeto foram realizadas para otimizar a avaliação dos resultados.**

**Para alguns dos voluntários, compartilhar um ambiente e interagir com um robô são tarefas quase cotidianas, pois trabalham diretamente com esse tipo de cenário, onde existe a presença de um robô. Entretanto, para outros voluntários, interagir ou apenas compartilhar o mesmo ambiente com um robô, essas**

experiências seriam inéditas. Neste sentido, para tais voluntários, a simples presença do robô é algo que chama a atenção, podendo influenciar diretamente no conforto destas pessoas. Tentamos evitar que o robô atraísse a atenção do voluntário desnecessariamente. Para isso, selecionamos tarefas que mantinham o voluntário ocupado, como mexer no celular nos momentos em que estivesse sozinho, e estabelecemos uma conversa informal nas interações com outras pessoas ou com objetos.

Ao mesmo tempo também alteramos a ordem de execução das tarefas, inicialmente cada tarefa seria realizada separadamente, mas optamos por fazer todas as tarefas em sequência para minimizar o incomodo que os voluntários poderiam sentir por realizar tarefas repetitivas.

**5. Resultados parciais ou totais apresentados em congresso?**

Ainda não houve apresentação em congresso.

**6. Resultados parciais ou totais já publicados?**

Artigo científico em processo de revisão.

**7. Aconteceram eventos adversos graves?**

Não houve eventos adversos graves.

**8. Conduitas adotadas em relação aos eventos dos eventos adversos graves.**

Não se aplica.

**9. Houve pedido de indenização por danos causados por este estudo?**

Se sim, especificar.

Não houve pedido de indenização.

São Bernardo do Campo, 07 de Setembro de 20 .

Assinatura do pesquisador responsável

Obs. (Não preencher a mão o formulário)

**APÊNDICE C – PARECER DO COMITÊ DE ÉTICA**

**PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP**

**DADOS DO PROJETO DE PESQUISA**

**Título da Pesquisa:** Estudo sobre o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social

**Pesquisador:** FAGNER DE ASSIS MOURA PIMENTEL

**Área Temática:**

**Versão:** 1

**CAAE:** 43096121.7.0000.5508

**Instituição Proponente:** FUNDAÇÃO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS

**Patrocinador Principal:** FUNDAÇÃO EDUCACIONAL INACIANA PADRE SABOIA DE MEDEIROS  
FUND COORD DE APERFEICOAMENTO DE PESSOAL DE NIVEL SUP

**DADOS DA NOTIFICAÇÃO**

**Tipo de Notificação:** Envio de Relatório Final

**Detalhe:**

**Justificativa:**

**Data do Envio:** 05/08/2021

**Situação da Notificação:** Parecer Consubstanciado Emitido

**DADOS DO PARECER**

**Número do Parecer:** 4.931.500

**Apresentação da Notificação:**

A apresentação do projeto está adequada e bem redigida. O projeto de pesquisa analisa o conforto de pessoas em interações espaciais com um robô social. O estudo está baseado na compreensão do conforto relacionado as interações espaciais dentro da área conhecida como navegação social.

**Objetivo da Notificação:**

Os objetivos estão bem definidos. O objetivo primário deste estudo é observar e explorar como se dá a variação de comportamento e conforto das pessoas em um ambiente real através de questionários apresentados aos participantes do estudo. Os resultados deste estudo serão utilizados futuramente para a melhoria do comportamento de um robô em ambientes com pessoas.

Os objetivos secundários são avaliar e validar as métricas avaliadas em ambientes simulados para

**Endereço:** Rua do Sacramento, 230, Edifício Capa. sala 419 , 4° andar

**Bairro:** RUDGE RAMOS

**CEP:** 09.640-000

**UF:** SP

**Município:** SAO BERNARDO DO CAMPO

**Telefone:** (11)4366-5814

**E-mail:** cometica@metodista.br

Continuação do Parecer: 4.931.500

verificar o comportamento do robô relativo a essas métricas em ambiente real. Dentre as métricas avaliadas então as taxas de sucesso e falha, coeficientes espacial e temporal.

#### **Avaliação dos Riscos e Benefícios:**

A avaliação dos Riscos e Benefícios foi desenvolvida adequadamente.

Os riscos apresentados durante a realização do experimento são relativos ao robô poder causar algum dano as pessoas ou aos objetos no ambiente.

O principal benefício da realização destes experimento é a promoção de um estudo que vai poder observar como o conforto das pessoas é alterado com a presença do robô e com isso melhorar o comportamento do robô social para que ele tenha um comportamento mais aceitável na sociedade e isso acelere o processo de inserção de robôs dessa categoria em ambientes sociais.

As tarefas foram gravadas para ns de análise do comportamento do robô e análise do conforto do ser humano.

Durante a realização das tarefas, todos os protocolos de segurança exigidos pelo poder público referentes a pandemia do novo corona vírus (Covid-19) foram seguidos.

#### **Comentários e Considerações sobre a Notificação:**

A notificação de pesquisa foi desenvolvida de forma científica e atendendo os requisitos da Ética em pesquisa científica.

O trabalho apresentou um estudo sobre o conforto de pessoas em ambientes com robôs sociais. Foram realizados 18000 experimentos em ambiente simulados e 20 voluntários foram convocados para realizar experimentos em ambiente real. Durante o estudo foi possível analisar métricas objetivas sobre o comportamento do robô e verificar o grau de conforto dos voluntários. Em cada situação, foi observada que a navegação que não segue regras sociais causam maior desconforto nas pessoas e que o barulho das rodas da plataforma HERA foi o principal motivo de desconforto dos voluntários.

#### **Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:**

O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido TCLE foi construído adequadamente.

#### **Recomendações:**

Recomendo a aprovação do projeto de pesquisa

#### **Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:**

O Projeto de Pesquisa deve ser aprovado.

**Endereço:** Rua do Sacramento, 230, Edifício Capa. sala 419 , 4° andar

**Bairro:** RUDGE RAMOS

**CEP:** 09.640-000

**UF:** SP

**Município:** SAO BERNARDO DO CAMPO

**Telefone:** (11)4366-5814

**E-mail:** cometica@metodista.br

Continuação do Parecer: 4.931.500

**Considerações Finais a critério do CEP:**

**Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:**

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Envio de Relatório Final	plataforma_brasil.pdf	05/08/2021 15:33:13	FAGNER DE ASSIS MOURA PIMENTEL	Postado

**Situação do Parecer:**

Aprovado

**Necessita Apreciação da CONEP:**

Não

SAO BERNARDO DO CAMPO, 25 de Agosto de 2021

---

**Assinado por:**  
**MARCELO DA SILVA CARNEIRO**  
**(Coordenador(a))**

**Endereço:** Rua do Sacramento, 230, Edifício Capa. sala 419 , 4° andar

**Bairro:** RUDGE RAMOS

**CEP:** 09.640-000

**UF:** SP

**Município:** SAO BERNARDO DO CAMPO

**Telefone:** (11)4366-5814

**E-mail:** cometica@metodista.br