



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA PARAÍBA
DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO DE ENSINO
COORDENAÇÃO DO CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA
DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

RAPHAELL MACIEL DE SOUSA

PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA PARA ROBÔS MÓVEIS CONSIDERANDO
RESTRICÇÕES SOCIAIS

CAJAZEIRAS – PB

2022

RAPHAELL MACIEL DE SOUSA

**PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA PARA ROBÔS MÓVEIS CONSIDERANDO
RESTRICÇÕES SOCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, do Instituto Federal da Paraíba – Campus Cajazeiras, em cumprimento às exigências parciais para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fabio Araujo de Lima

CAJAZEIRAS – PB

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S725p Sousa, Raphaell Maciel de

Planejamento de trajetória para robôs móveis considerando restrições sociais/Raphaell Maciel de Sousa.– Cajazeiras/PB: IFPB, 2022.

56f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-IFPB, Campus Cajazeiras. Cajazeiras, 2022.

Orientador(a): Prof. Dr. Fábio Araújo de Lima.

1. Automação – Robôs móveis 2. Automação – Planejamento de trajetória 3. Automação – Restrições sociais I. Sousa, Raphaell Maciel de II. Título

CDU: 004.41


RAPHAELL MACIEL DE SOUSA

**PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA PARA ROBÔS MÓVEIS CONSIDERANDO
RESTRICÇÕES SOCIAIS**


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, do Instituto Federal da Paraíba – Campus Cajazeiras, em cumprimento às exigências parciais para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovada em 07/12/2022


Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **FABIO ARAUJO DE LIMA**
Data: 28/12/2022 10:33:31-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Fabio Araujo de Lima
Orientador (IFPB)

Documento assinado digitalmente
 **Leandro Honorato de Souza Silva**
Data: 26/12/2022 09:31:27-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. M. Sc. Leandro Honorato de Souza Silva
Examinador (IFPB)

Documento assinado digitalmente
 **LEANDRO LUTTIANE DA SILVA LINHARES**
Data: 27/12/2022 17:48:18-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Leandro Luttiane da Silva Linhares
Examinador (IFPB)

Banca Examinadora



Documento assinado digitalmente
JOSE ALBERTO DIAZ AMADO
Data: 28/12/2022 11:35:15-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. José Diaz Amado

Examinador(IFBA)



Documento assinado digitalmente
CRISTIAN CAMILO MILLAN ARIAS
Data: 26/12/2022 10:59:49-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

M. Sc. Engenharia da Computação, Cristian Camilo Millán Arias

Examinador (UPE)

Dedico este trabalho inteiramente à mulher da minha vida, minha esposa Suiâmya e também ao meu filho querido, Caio Ravi. Obrigado pela paciência que vocês tiveram, obrigado pelo apoio e carinho, sem vocês, não teria sido possível, amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha esposa Suiâmya, e ao meu filho Ravi, por terem paciência e entenderem que esse tempo de dedicação foi importante para mim. Sem vocês, esse sonho não seria possível.

Agradeço aos meus professores, por compartilharem conhecimento de uma forma tão dedicada.

Agradeço ao meu amigo e orientador, professor Dr. Fábio, pela valiosa contribuição e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao IFPB Campus Cajazeiras, por ser essa instituição referência a qual me orgulho tanto. Por ser um oásis no sertão, trazendo o que há de melhor no ensino e proporcionando oportunidades.

Aos meus colegas de curso, que assim como eu, estão buscando o melhor de si, desejo sorte nas próximas etapas de suas vidas.

Aos meus alunos de pesquisa, pelas valiosas contribuições.

À todos que contribuíram direta ou indiretamente para que esse sonho se tornasse realidade.

RESUMO

Os Robôs estão cada vez mais presentes na sociedade, compartilhando espaços e tarefas que eram exclusivas de seres humanos. Nesta direção, este trabalho tem como objetivo realizar o estudo do planejamento de trajetórias de robôs móveis, incluindo restrições sociais. Para tanto, é apresentado um método para classificação de grupos de pessoas por meio da triangulação poligonal, em que cada pessoa é considerada um vértice de um triângulo. Em seguida, são apresentadas regras, baseadas em critérios de proxêmica e orientação das pessoas, para eliminar algumas arestas, de modo que as conexões resultantes sejam parte dos grupos classificados. Resultados de simulação são apresentados para validar a estratégia proposta, além disso, alguns experimentos relacionados com visão computacional e mapeamento de ambientes foram realizados em uma plataforma experimental desenvolvida. Por fim, propostas de trabalhos futuros são apresentadas como direcionamento desta pesquisa.

ABSTRACT

Robots are increasingly present in society, sharing spaces and tasks that are exclusive to human beings. In this direction, this work aims to study the path planning of mobile robots, including social constraints. Therefore, a method for classifying groups of people is presented through polygonal triangulation, in which each person is considered a vertex of a triangle. Next, rules are presented, based on proxemics criteria and people orientation, to eliminate some connections of triangles. Then, the resulting connections are part of the classified groups by the proposed method. Simulation results are presented to validate the proposed strategy, in addition, some experiments related to computer vision and environment mapping were carried out in a developed experimental platform. Finally, proposals for future work are presented as a direction for this research.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos métodos de planejamento de trajetória	23
Figura 2 - Planejamento de trajetória convencional (linha verde) e com restrições sociais (linha azul).	26
Figura 3 - Exemplo de distribuição caótica de pessoas	27
Figura 4 - Estratégia proposta	28
Figura 5 - Estratégia proposta para classificação dos grupos.	28
Figura 6 - Exemplo da aplicação da triangulação de Delaunay.	29
Figura 7 - Distância entre os vértices	30
Figura 8 - Formações de kendon	31
Figura 9 - Classificação dos grupos	32
Figura 10 - Classificação dos grupos incluindo os triângulos periféricos	32
Figura 11 - Classificação de grupos de pessoas utilizando triangulação Delaunay	34
Figura 12 - Classificação de grupos sociais	35
Figura 13 - referencial para o cálculo das funções Gaussianas	36
Figura 14 - Formas da função Gaussiana	37
Figura 15 - funções Gaussianas grupais	38
Figura 16 - Método proposto	46
Figura 17 - Protótipo de robô desenvolvido	41
Figura 18 - Plataforma de desenvolvimento	41
Figura 19 - Processo de mapeamento	42

Figura 20 - Processo de mapeamento com acesso à câmera	42
Figura 21 - Sistema de reconhecimento de padrões utilizando imagens e visão computacional	43
Figura 22 - Mestre ROS	53
Figura 23 - Nó do ROS publicando (publish) a mensagem hello world	54
Figura 24 - nó do ROS lendo (subscriber) a informação publicada	54
Figura 25 - Tela do rqt_graph com a estrutura de comunicação desenvolvida	55

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

BFS - breadth-first search
DSF - dynamic social force
DSZ - dynamic social zone
HLF - high-level features extraction
HRI - human robot interaction
IRL - inverse reinforcement learning
HSL - hue, saturation, lightness
HSV - hue, saturation, value
ML - machine learning
PSMM - proactive social motion model
ROS - robot operating system
RGB - red, gree, blue
RRT - rapidly-exploring random tree
SPP - social path planning
ZS - zonas sociais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos	14
1.2. Contribuições	15
1.3. Organização do Trabalho	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Navegação Autônoma	17
2.2. Robótica móvel	20
2.3. Percepção e localização	20
2.4. Path planning	21
2.5. Social path planning	22
2.6. Análise de Sentimentos	23
2.7. Análise de Sentimentos Para Robôs Sociais	23
3. UMA NOVA ABORDAGEM PARA INCLUIR RESTRIÇÕES SOCIAIS AO PLANEJAMENTO DE CAMINHO	25
3.1. Materiais e Métodos	25
3.2. Planejamento de trajeto considerando restrições sociais	27
3.3. Reconhecimento de Grupos Sociais	28
3.4. Resultados de Simulação	33
3.4.1. Classificação dos Grupos	33
3.4.2. Incluindo Orientação	34
3.4.3. Delimitação do Espaço Pessoal	35
3.4.4. Planejamento de Trajeto e Navegação Utilizando o Método Proposto	38
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS: SISTEMA DE PERCEPÇÃO DE UM ROBÔ MÓVEL UTILIZANDO LIDAR E VISÃO COMPUTACIONAL	40
4.1. Wally	40
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	44
6. REFERÊNCIAS	45
7. ANEXOS	51

1. INTRODUÇÃO

Robôs sociais estão cada vez mais presentes nas vidas dos seres humanos. No Japão, um dos maiores exportadores de robôs no mundo, há uma perspectiva de crescimento de cerca de 10 vezes do valor de mercado no ano fiscal de 2021 com previsão até 2027 (ARBA, 2022). Nesta direção, é possível observar uma crescente inserção destes dispositivos nas mais variadas conjunturas das relações humanas (BAHISHTI, 2017). Entre as aplicações, pode-se destacar o uso de robôs móveis autônomos em serviços de entrega/coleta de encomendas (*delivery*), na área médica, estes dispositivos ajudam no cuidado de pessoas enfermas (*healthcare*), nos trabalhos domésticos, já é possível encontrar robôs móveis realizando tarefas cotidianas, como aspirar o pó ou limpar janelas de vidro em edifícios. Ainda é possível encontrar robôs em aplicações na indústria bélica, ou até mesmo colaborando nas tarefas pesadas do campo (agricultura de precisão), entre outras aplicações (CHIANG; TRIMI, 2020).

Sabe-se que humanos são seres sociais, que vivem em grupo e seguem uma série de regras coletivas (REDHEAD; POWER, 2022). No que tange à inserção de dispositivos robóticos em meio às relações sociais, é observado na literatura que robôs autônomos precisam obedecer às regras coletivas a fim de criar relações humano-máquina mais naturais (GRAAF, 2016). Ao deslocar-se entre pessoas, é intuitivo pensar que robôs sociais devem, assim como os seres humanos, seguir protocolos de etiqueta (LIM; ROOKSBY; CROSS, 2022). Por exemplo, no caso de um robô de atendimento ao público, seria necessário deslocar-se muito próximo às pessoas, nesta situação, a proxêmica sugere a necessidade de respeitar o espaço pessoal de cada indivíduo. Até mesmo a influência cultural pode afetar a dinâmica da interação humano-máquina. Nesta direção, faz sentido esperar que o contexto social seja levado em consideração no planejamento de trajetórias de robôs móveis (ZHANG *et al.*, 2020).

Em um ambiente real de interação social, um robô deslocando-se de um ponto A até um ponto B, de modo autônomo, não é algo trivial. Esta tarefa envolve diferentes sensores para percepção e localização, além disso, sabe-se que o mundo real não é estático, frequentemente, o robô precisa lidar com objetos dinâmicos, como pessoas e animais. Os algoritmos clássicos de planejamento de trajetória global, tais como o *breadth-first search* (BFS), *A**, *voronoi graphs*, *rapidly-exploring random tree* (RRT), *potential field*, entre outros, têm por objetivo encontrar o caminho mais curto entre dois pontos, desviando dos

obstáculos detectados entre a origem e o destino. Neste caso, qualquer obstáculo detectado, seja estático, como uma mesa ou cadeira, ou dinâmico, como uma pessoa ou animal, são tratados igualmente, de modo que o algoritmo de planejamento de trajetória calcula uma rota até o destino, evitando colisões. Porém, em um cenário mais realista, os obstáculos costumam ser variados, dinâmicos e com possíveis interações entre si, como no caso de um grupo de pessoas circulando em um supermercado, ou um cliente escolhendo um produto numa vitrine de loja. Deste modo, os algoritmos clássicos mencionados podem não ser suficientes para incorporar as características de um ambiente dinâmico, o resultado é que o planejamento de rota, apesar de efetivo, não necessariamente fornece um caminho ótimo do ponto de vista das interações entre os elementos da cena (pessoas e objetos).

Nesta direção, este trabalho propõe uma nova estratégia de detecção de grupos de pessoas e planejamento de trajetórias com restrições sociais. A técnica proposta é baseada na triangulação de Delaunay, que cria uma malha de triângulos interconectados. Em seguida, a distância entre as pessoas e a orientação pessoal são utilizados como critérios para formação dos grupos sociais. Ao longo do trabalho serão apresentados resultados de simulações computacionais de robôs em condições de convívio social, bem como resultados experimentais do sistema de percepção e mapeamento coletados por meio de um protótipo de robô móvel desenvolvido.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é propor uma nova estratégia de detecção de grupos de pessoas e planejamento de trajetórias com restrições sociais.

Os objetivos específicos são:

- Apresentar o estado da arte dos robôs sociais;
- Estudar os elementos técnicos que possibilitam o projeto de robôs sociais capazes de interagir e tomar decisões em situações reais de interação social;
- Apresentar resultados de simulação computacional desenvolvidos no ROS (*Robot Operating System*) e Gazebo, *matlab* e *Jupyter notebook*;
- Apresentar resultados experimentais obtidos a partir de um protótipo de robô móvel desenvolvido.

1.2. Contribuições

Na tabela abaixo estão listadas as contribuições relacionadas com esta proposta. Foram diversos trabalhos em editais de pesquisa e publicações em congressos e periódicos que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

Título	Tipo	Ano
Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Computacional para Avaliação da Interação Entre Seres Humanos e Robôs Sociais	Edital nº 17/2020 - PIBITI/CNPq - Edital de Pesquisa	2020
Implementação de um Sistema de Análise de Sentimentos Aplicada a Robôs Sociais	Edital nº 27/2021 - PIBITI/CNPq - Edital de Pesquisa	2021
Utilização de Deep Learning para Detecção de Padrões de Sentimentos em Pessoas com ou sem Máscaras Faciais	Chamada 01/2022 - Interconecta - Coordenador de Projeto - Edital de Pesquisa	2022
Implementação De Zonas Sociais em um Protótipo de Robô Móvel Utilizando Funções Gaussianas	Edital nº 22/2022 - PIBITI/CNPq - Edital de Pesquisa	2022
Navegação com restrições sociais com base em uma percepção robocêntrica	Congresso Brasileiro de Automática CBA	2022
A New Approach for Including Social Conventions into Social Robots Navigation by Using Polygonal Triangulation and Group Asymmetric Gaussian Functions.	Revista Sensors (SOUSA <i>et al.</i> , 2022)	2022
Desenvolvimento de um Modelo de Simulação (Gêmeo Digital) de um Robô a Quatro Rodas Utilizando ROS e Gazebo	Revista Princípia	2022
A Framework for Socially Aware Navigation based on Robocentric Perception of People Social Cues	Congresso UbiProxemics	2022

1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos: no capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica das publicações relacionadas com robôs sociais, destacando-se o estado da arte da referida área;

No capítulo 3 é feita uma descrição de um método proposto para detecção de grupos de pessoas. Além disso, são apresentados resultados de simulação, validando a estratégia proposta;

No capítulo 4 são apresentados resultados experimentais obtidos por meio de um protótipo de robô móvel desenvolvido. O referido robô é dotado de um sistema de percepção composto por um LIDAR, uma câmera estéreo, além de outros sensores operacionais, tais como encoders, IMU e beacons;

No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros são apontadas para uma possível continuidade do presente estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os humanos são seres sociais, que vivem coletivamente regidos por um conjunto de regras que norteiam a moral, cultura e as interações entre indivíduos. Neste contexto, inserir robôs na sociedade, de uma forma que possam tornar-se parte integrante da dinâmica social, é uma tarefa complexa, que envolve vários desafios tecnológicos. Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica com o estado da arte relacionado com os robôs sociais.

2.1. Navegação Autônoma

A navegação autônoma é uma técnica em que os robôs precisam obter um caminho ideal para chegar a um objetivo específico (ISLAM *et al.*, 2020). Neste contexto, o robô calcula sua respectiva trajetória global, e altera sua trajetória local conforme obstáculos vão sendo detectados no caminho, a fim de evitar colisão (GUL; RAHIMAN; ALHADY, 2019). Em ambientes sociais, existe uma complexidade associada ao tipo de obstáculo a ser detectado, de modo que os robôs devem ser capazes de identificar não apenas um obstáculo dinâmico, como pessoas ou outros agentes, mas também obstáculos estáticos que podem ser pessoas ou mesmo robôs (RAVANKAR *et al.*, 2018). No entanto, em um contexto de interação social, no qual seres humanos estão incluídos, vários fatores importantes como emoção, aspectos culturais e outros podem ser considerados pelos robôs a fim de obter uma interação social mais natural. Deste modo, o algoritmo de cálculo da rota de navegação (*path planning*) precisa avaliar esses fatores, e calcular uma trajetória que seja otimizada, não do ponto de vista da menor distância, mas considerando as interações sociais entre indivíduos e suas características dinâmicas associadas.

Sehsted *et al.*, em 2010, falaram sobre o problema de fundir comportamentos socialmente aceitáveis no planejamento do caminho do robô. Os autores abordaram um problema específico, no qual um robô circulava em um ambiente com pessoas alocadas em estações de trabalho. Deste modo, os autores observaram que seria interessante, do ponto de vista da produtividade, que o robô pudesse evitar estes caminhos próximos das estações a fim de evitar distrações aos trabalhadores. Garrel *et al.* apresentaram um amplo estudo sobre a cooperação e colaboração de equipes de robôs que trabalham juntos para desenvolver uma tarefa específica. Gomes *et al.* desenvolveram uma formulação matemática para o problema de planejamento de caminho socialmente aceitável, que definiu um espaço euclidiano com obstáculos que podem ser estáticos ou dinâmicos. Esses obstáculos dinâmicos, como pessoas,

têm como propriedades a velocidade ou direções. Outros trabalhos estudaram diferentes características sociais que poderiam ser consideradas no planejamento de caminho (VILASBOAS et al., 2021)(DAZA *et al.*, 2021)(CHEN; ZHANG; ZOU, 2018)(LIU et al., 2016).

Em um ambiente social, se um robô precisa interagir com as pessoas, ele precisa respeitar uma distância específica para que todos possam se sentir seguros. Nesse sentido, muitas abordagens que propuseram a navegação em ambientes sociais utilizaram a definição de proxêmica e incluíram características sociais que um robô precisa considerar para o planejamento de caminhos. Em outras palavras, como dito por Glass et al., a navegação pode ser influenciada pela aplicação na qual o robô esteja inserido. Assim, Glass *et al.* propuseram estratégias de navegação para espaços como *shopping centers*; também, Kanda *et al.* explicaram os desafios da navegação de robôs autônomos em espaços públicos.

Quando há uma interação entre robôs e humanos em uma situação do mundo real, espera-se que o robô possa compreender e armazenar informações sobre o ambiente, o que é fornecido pelo contexto em que foi inserido. Alguns trabalhos consideram características diferentes para este problema, uma vez que estados emocionais ou mesmo fatores culturais podem ser usados como dados para navegação social (TOLUNBUKE; METIN, 2018). Nesse cenário, algumas abordagens visam extrair características do ambiente, utilizando-as como dados para os sistemas de percepção (ZARAKI *et al.*, 2016). Zaraki *et al.* apresentaram um sistema externo multiplataforma para extrair recursos que podem ser aplicados a um sistema de percepção de robôs sociais. Nesse caso, eles propuseram um sistema de percepção baseado em modularidade, interconectividade, extensibilidade e comunicação. O sistema proposto tinha quatro camadas: aquisição de dados, extração de recursos de alto nível, criação de meta-cenas e comunicação. Praticamente, todos os modelos de interação social entre humanos e robôs, ali apresentados, utilizaram diversos recursos extraídos do ambiente, e os dados coletados serviram para fornecer conhecimento sobre o entorno. Em Vega *et al.*, os autores propuseram um sistema de planejamento de trajetórias que considerava o horário do dia e a possibilidade de não utilizar alguns espaços em horários específicos. Os autores propuseram um método que restringe ou penaliza a rota planejada pelo robô devido a variáveis dependentes do tempo.

Modelar um espaço social dinâmico é uma tarefa complexa e envolve diversas variáveis. Pandey *et al.* propuseram um algoritmo que trata os humanos não como obstáculos a serem evitados, diferente disso, os autores definiram um espaço social em torno de uma

pessoa como uma região paramétrica. Essa região paramétrica introduziu limites ao redor das pessoas com base em conceitos de proxêmica. A técnica proposta não foi generalizada para grupos de pessoas. Mais tarde, a ideia de regiões paramétricas foi aprofundada por Truong *et al.*. Xuang *et al.* introduziram o conceito de Zonas Sociais Dinâmicas (DSZ), que é uma fusão entre o espaço pessoal e o espaço de interação social. Os autores propuseram incorporar sua abordagem na função de custo do algoritmo de planejamento de caminho D* (STENTZ, 1995). Índices de conforto que avaliam o método proposto foram apresentados e comparados com o D* (FERGUSON; STENTZ, 2006) sem restrições sociais. Além disso, esse artigo apresentou a aplicação de funções gaussianas para cobrir o espaço DSZ e delimitar os limites dessa área.

Em (TRUONG; NGO, 2017), os autores expandiram seu trabalho anterior (TRUONG; NGO, 2016) e continuaram estudando as DSZ para introduzir um módulo capaz de prever poses, de modo que seja possível incorporar as interações de grupos de pessoas e indivíduos em diferentes posições ou características, como uma pessoa sentada, uma pessoa em movimento, ou até mesmo a interação com algum objeto e direção do olhar. Em (CHEN; ZHANG; ZOU, 2018), os autores utilizaram o algoritmo A* (HART *et al.*, 1968) para evitar obstáculos e introduziram o uso de uma função gaussiana assimétrica para definir uma zona social (CUI; WANG; YANG, 2012). A ideia incorpora assimetria ao delimitar os limites da função gaussiana. A assimetria foi introduzida usando a relação proxêmica para modificar as variâncias da função gaussiana. Simulações e resultados experimentais foram apresentados. Por outro lado, os autores não utilizaram outros recursos além da proxêmica para modificar variâncias, e a técnica proposta não foi utilizada para generalizar diferentes grupos de pessoas. Outra observação é que os resultados da avaliação do método proposto não foram apresentados, portanto, embora o uso de uma função gaussiana assimétrica pareça ser uma abordagem razoável, sua contribuição não ficou clara em comparação com Truong e Ngo (TRUONG; NGO, 2016).

Em (TRUONG; NGO, 2017), os autores propuseram um sistema de navegação autônomo em um ambiente lotado, que foi denominado de modelo de movimento social proativo (PSMM). O método proposto utiliza alguns estados humanos como posição, orientação, movimento, campo de visão, pose da mão e as interações humano-objeto e grupo humano. Embora o método proposto seja aplicado a ambientes lotados, os autores apresentaram resultados experimentais para um pequeno grupo de pessoas. Eles afirmaram que em um ambiente caótico, o custo computacional para extrair características em tempo real

afetaria o processamento de dados do método proposto. Outra abordagem para modelar o espaço social foi proposta por (PATOMPAK *et al.*, 2019). Os autores propuseram uma nova definição de espaço social, denominada Força Social Dinâmica (DSF). Essa nova definição de espaço social é baseada em um sistema de inferência fuzzy, e os parâmetros dessas funções são ajustados usando aprendizado por reforço. Os autores usaram o aprendizado por reforço para definir os parâmetros da função gaussiana. Este método não foi investigado como um método para generalizar grupos de pessoas.

Este trabalho introduz uma nova abordagem para classificação de grupos de pessoas, o método proposto utiliza a triangulação de Delaunay para criar uma malha de triângulos, em que cada pessoa é um vértice. Em seguida, serão utilizados critérios de proximidade e direção (cada pessoa possui um vetor de posição e direção, isto será detalhado no capítulo 3) para eliminar algumas conexões, de modo que os triângulos restantes determinarão cada grupo. Por fim, funções Gaussianas serão utilizadas para delimitar os espaços pessoais e grupais, nos quais o robô não deve utilizar como opção durante o planejamento de trajeto. O método adapta-se bem em ambientes caóticos, visto que é baseado em um método de triangulação bem estabelecido.

2.2. Robótica móvel

A locomoção de plataformas robóticas, sem o auxílio do ser humano, é um desafio importante que envolve um largo espectro de parâmetros. Pode-se dividir a robótica móvel em quatro camadas principais: percepção, localização, planejamento de trajeto e controle de movimento.

2.3. Percepção e localização

A percepção é um dos elementos-chave para a extração de características relevantes para a navegação autônoma no contexto social. Nesta direção, alguns autores têm desenvolvido metodologias e técnicas para extrair dados importantes no intuito de construir um sistema de percepção para robótica móvel (LIU *et al.*, 2020).

Liu *et al.* (2016) propuseram a utilização de uma rede de sensores (câmeras, microfones) externa ao robô, a partir dos dados coletados, os autores utilizaram técnicas de ML (*Machine Learning*) para imitar o comportamento das pessoas. Então, trata-se de uma abordagem de interação baseada em dados. A técnica proposta é dividida em algumas

abstrações, como segue:

1. Técnicas de processamento de áudio para compreensão de fala;
2. Segmentação de trajetórias para determinar locais típicos de parada e de movimentação;
3. Os autores determinam o que chamam de "*interaction state*" ou estado de interação, que é a posição relativa entre clientes e atendentes, baseado na posição entre duas pessoas baseado em regras de HRI (*human robot interaction*) e proxêmica;

Com relação à validação do modelo, os autores tiveram uma *accuracy* (mede a precisão do modelo de detecção) muito baixa, de 26%. Os autores sugerem o uso do *kinect* para extrair algumas características, como o *skeleton tracking data*, por exemplo. Além disso, o *kinect* foi utilizado para estimar a posição e orientação de cada pessoa.

Zaraki *et al.* (2017) propuseram um sistema *off-board* multi-plataforma para extração de *features* (características) que podem ser aplicadas à percepção social. Para tanto, os autores propuseram um sistema de percepção social baseado no contexto da modularidade, interconectividade, extensibilidade e comunicação. O sistema proposto possui 4 camadas, dentre as quais pode-se citar: aquisição de dados, extração de features em alto nível (*high-level features extraction* - HLF), criação de um padrão de cena, no qual apenas as pessoas detectadas dentro deste padrão são armazenadas em um banco de dados que armazena todas as *features* extraídas, e por fim, a camada de comunicação de dados, na qual os dados de percepção são transferidos para os robôs.

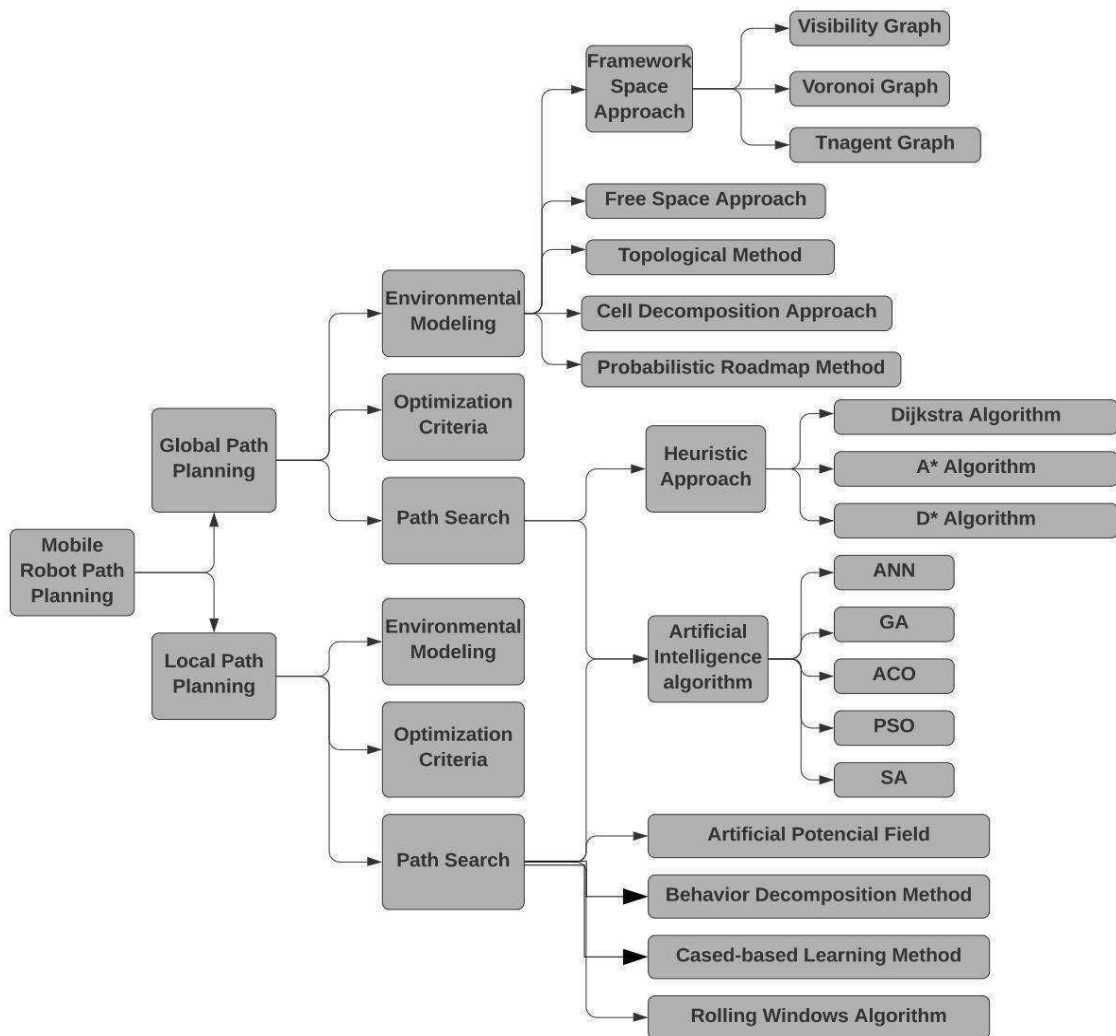
2.4. Path planning

Como pode ser observado na Figura 1, os métodos de planejamento de trajetória podem ser divididos em duas classes: local e global (ZHANG; LIN; CHEN, 2020). Basicamente, estes métodos são utilizados para calcular a trajetória entre dois pontos. Os métodos globais são utilizados para encontrar uma trajetória mais geral, considerando os objetos estáticos previamente obtidos. Já os métodos locais são importantes para um ambiente dinâmico, pois são responsáveis por adequar a trajetória, para desviar de obstáculos que não foram previamente previstos no mapa.

2.5. Social path planning

O planejamento de trajetória pode ser realizado levando em consideração o contexto social entre robôs e humanos, bem como a interação destes elementos com o meio no qual estão inseridos (TRUONG; NGO, 2017)(TRUONG; NGO, 2018)(GÓMEZ; MAVRIDIS; GARRIDO, 2020)(CHEN *et al.*, 2020). Nesta direção, Truong e Ngo (2018) propuseram um *framework* para navegação, levando em conta o contato social entre robôs e seres humanos. Segundo os autores, boa parte dos trabalhos sobre *social path planning* (SPP) focam na interação entre o robô e uma só pessoa. Outras técnicas consideram as pessoas como objetos estáticos. Este trabalho propõe uma abordagem que engloba, além de humanos estacionários, pessoas em movimento e grupos interagindo. Para modelar as relações entre pessoas ou grupos, os autores propõem a determinação de zonas sociais (ZS), isto é realizado considerando uma análise sob o ponto de vista da proxêmica. No entanto, observa-se que os autores não utilizam extração de características tais como idade (se é uma criança, adulto ou idoso), ação (se a pessoa está parada ou realizando uma ação de movimento, como jogar bola por exemplo), análise de sentimento, entre outras.

Figura 1: Classificação dos métodos de planejamento de trajetória.



Fonte: Zhang et al., 2018.

2.6. Análise de Sentimentos

A análise de sentimentos busca, a partir de características identificáveis dos seres humanos, analisar padrões de comportamento, buscando caracterizar o estado emocional das pessoas (raiva, felicidade, tristeza, nojo, medo e surpresa) (PATEL *et al.*, 2020).

2.7. Análise de Sentimentos Para Robôs Sociais

Zaraki et al. (2017) apresentaram um Sistema de Percepção Social (SPS) que é capaz de fazer com que os robôs tenham uma melhor percepção do mundo. Nesse projeto, a partir dos Métodos de Extração de Características de Alto Nível (HLF, sigla do inglês) proposto

pelos autores, é possível fazer análises tanto de características faciais quanto corporais. Nas análises de características faciais, pode-se detectar os sentimentos das pessoas com base em suas expressões faciais, essas emoções são classificadas em: feliz, surpreso, com raiva e triste. O SPS apresentado também é composto por quatro layers que podem ser executados em uma ou duas máquinas diferentes, em que cada layer de extração de característica tem ao todo seis módulos perceptuais paralelos: a) análise corporal; b) análise da característica facial; c) detecção de saliência; d) análise sonora; e) atribuição de identidade; f) análise do ambiente. Esse sistema foi testado com estudantes em uma sala, no qual um *kinect* sensor foi colocado paralelo ao chão e tinha que detectar as características faciais e corporais dos estudantes que estavam em diferentes posições e distâncias entre si, além disso, os dados obtidos foram utilizados para atribuir uma identificação aos estudantes de acordo com suas características.

Han, Lin e Song (2013) apresentaram um sistema autônomo de interação emocional, que tem como intuito expressar o sentimento do robô com base na análise de sentimento das pessoas, nas quais são classificadas em: neutro, triste, feliz e com raiva. Esses estados emocionais são determinados a partir de intensidade, entre 0 e 1, que são enviadas ao gerador de estado de humor robótico, possibilitando suas expressões com base na interação social.

As expressões do robô também ganharam grande importância, já que quanto mais mútua a interação for, melhor. Ficocelli, Terao e Nejat (2015), promovem o desenvolvimento de um comportamento assistivo em um robô a partir de estados emocionais gerados pela relação entre o robô e um humano. O módulo de estado emocional proposto pelos autores foi testado com base no robô Brian em uma conversa num cenário cara a cara com 35 pessoas. Para fornecer a entrada humana afetiva no módulo do estado emocional do robô, os autores usaram um modelo 3D de reconhecimento de pose corporal baseado em uma técnica de categorização do estado afetivo, desenvolvido anteriormente pelos mesmos, capaz de interpretar o estado afetivo dos seres humanos usando a informação de pose corporal 3D.

3. UMA NOVA ABORDAGEM PARA INCLUIR RESTRIÇÕES SOCIAIS AO PLANEJAMENTO DE CAMINHO

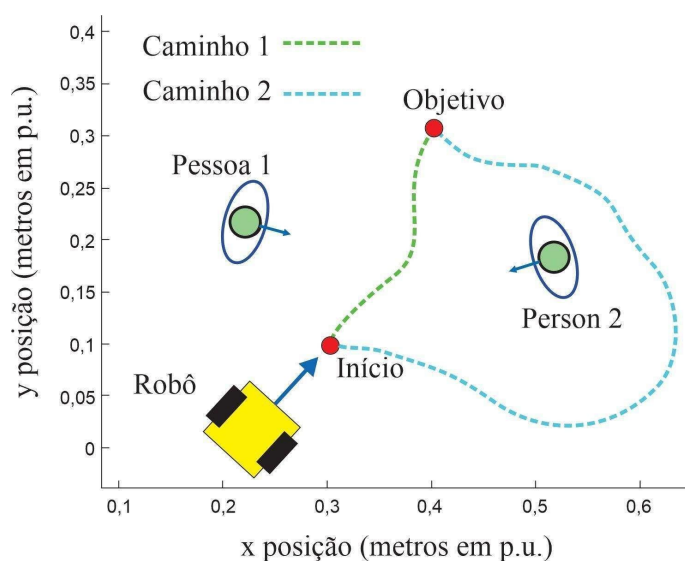
Neste capítulo, será apresentada uma metodologia para classificar grupos de pessoas, esta informação será utilizada para criar espaços pessoais e grupais, além da navegação autônoma com restrições sociais. O algoritmo proposto conecta todos no espaço do robô como vértices de triângulos (triangulação de Delaunay) para criar uma malha de triângulos (triangulação poligonal). Em seguida, com o objetivo de identificar grupos de pessoas, a abordagem proposta utiliza a proximidade e orientação pessoal como critérios para eliminar conexões realizadas pela triangulação. O resultado é a composição de grupos de pessoas em um ambiente social. Por fim, o centro de massa médio de cada triângulo individual é usado para calcular o centro de massa do grupo; então, uma função gaussiana assimétrica é utilizada para, a partir desse ponto, cobrir o grupo resultante.

Um vídeo detalhado com os experimentos realizados neste trabalho pode encontrado aqui <https://www.youtube.com/watch?v=d2hRGxDvtVs>.

3.1. Materiais e Métodos

Os seres humanos são indivíduos sociais, estes vivem em grupos e, ao longo da história, diferentes sociedades desenvolveram suas próprias regras de coexistência baseadas em convenções políticas, econômicas e culturais (FERGUSON; STENTZ, 2006). Com relação à robótica móvel, em um contexto social, a ideia principal é introduzir na navegação de robôs autônomos a percepção da interação entre as pessoas e como essas pessoas interagem com um ambiente social. Além disso, é importante investigar os efeitos da percepção do robô nesse contexto social e como isso afeta as abordagens de planejamento de caminhos. Para exemplificar, considere um caso simples (veja a Figura 2). Nesta Figura, o algoritmo de planejamento de caminho (por exemplo, o algoritmo A*) calculou o caminho mais curto entre a origem e o objetivo (caminho 1), porém, para atingir esse objetivo, o robô deve passar entre essas pessoas. Ao considerar as convenções sociais, essa trajetória não seria aceitável para os humanos, visto que há uma interação acontecendo entre as pessoas. Deste modo, não seria interessante que o robô utilizasse este caminho para chegar ao seu destino. Portanto, é razoável pensar que o robô deve ser capaz de perceber estas convenções sociais e relações proximicas e considerá-las no algoritmo de planejamento de caminhos, neste caso, o robô não deve apenas seguir o caminho mais curto, ao invés disso, deve escolher um caminho otimizado considerando o contexto social (caminho 2).

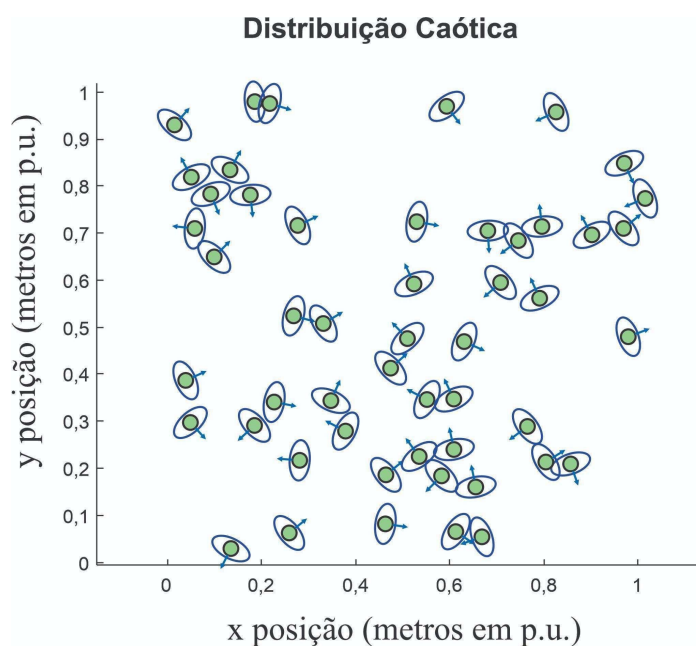
Figura 2: Planejamento de trajetória convencional (linha verde) e com restrições sociais (linha azul).



Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

Em contexto social, um robô móvel autônomo pode passar por situações nas quais deva interagir com pessoas ou grupos de pessoas. Conforme apresentado anteriormente, nestes casos, o robô deve seguir convenções sociais e planejar sua navegação de acordo com o ambiente no qual esteja inserido. No entanto, entender o ambiente ao redor e classificar um grupo de pessoas faz parte de uma experiência mais realista para um robô autônomo em termos de percepção social. Conforme apresentado em (KENDON, 2010), as formações de Kendon foram usadas para classificar grupos de pessoas. O problema com esta abordagem e outras, como apresentado em (HART; NILS; BERTRAM, 1968)(STENTZ, 1995)(FERGUSON; STENTZ, 2006)(CUI; WANG; YANG, 2012)(TROUNG; NGO, 2016)(TROUNG; NGO, 2017)(TROUNG; NGO, 2017), é que em um ambiente caótico real, no qual as pessoas estão agrupadas em posições aleatórias, é difícil identificar algum padrão, como mostra a Figura 3, com o número de pessoas $n = 50$. A situação apresentada na Figura 3 dificulta a inclusão de convenções sociais no comportamento do robô, porque, em ambientes reais, os robôs deverão respeitar as convenções sociais com indivíduos e grupos de pessoas.

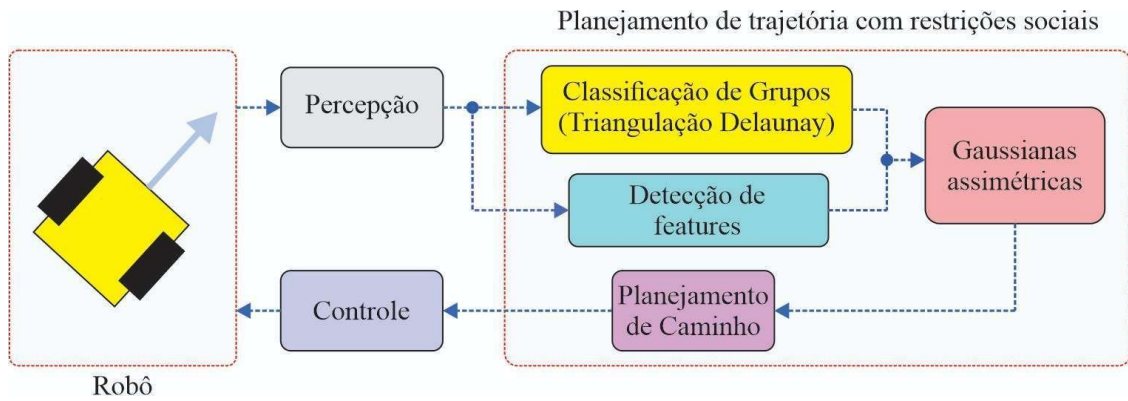
Figura 3: Exemplo de distribuição caótica de pessoas. Número de pontos $n = 50$.



3.2. Planejamento de trajeto considerando restrições sociais

Na Figura 2 é possível observar um diagrama de blocos da estrutura proposta por SOUSA *et al.* (2022). A abordagem proposta visa solucionar problemas de planejamento de trajetos com restrições social de forma automatizada e dinâmica. Baseia-se no uso de funções gaussianas assimétricas para modelar zonas proxêmicas para “modificar” a percepção do ambiente pelo robô; então, o robô pode evitar pessoas com base em convenções e percepções sociais. O bloco “percepção” é responsável por passar as informações dos sensores do robô (podem ser câmeras, lidars ou outras técnicas de percepção). Em seguida, os dados do referido bloco passam para o métodos de classificação de grupos proposto, este, utiliza a triangulação de Delaunay para criar uma malha de triângulos, na qual cada pessoa é um vértice. Em seguida, o algoritmo proposto utiliza regras de proxêmica e orientação das pessoas para eliminar algumas conexões, de modo que as conexões restantes deverão compor os grupos classificados (esta técnica será melhor descrita na próxima seção). Após a classificação dos grupos, são utilizadas funções Gaussianas assimétricas para modelas o espaço individual ou grupal. Por fim, são utilizados métodos tradicionais de planejamento de trajeto para calcular a rota do robô.

Figura 4: Estratégia proposta.

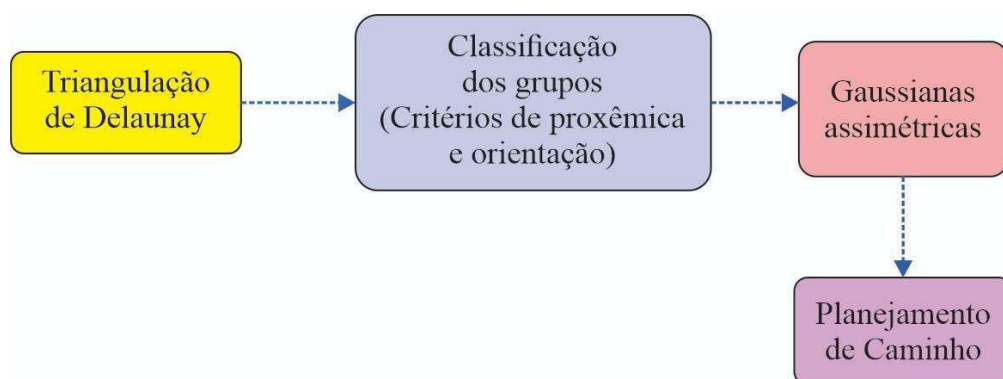


Fonte: próprio autor.

3.3. Reconhecimento de Grupos Sociais

Na Figura 5 pode ser observado um diagrama de blocos da estrutura proposta para classificação dos grupos de pessoas. Nesta figura, inicialmente é aplicado o método de triangulação de Delaunay. Em seguida, são utilizados critérios de proximidade e orientação para eliminar algumas conexões entre triângulos. Deste modo, os triângulos restantes deverão compor os grupos de pessoas. Por fim, funções gaussianas assimétricas são utilizadas para delimitar o espaço pessoal e dos grupos de pessoas. Em seguida, podem ser utilizados métodos clássicos para planejamento de caminho, tal qual o A*, por exemplo.

Figura 5: Estratégia proposta para classificação dos grupos.

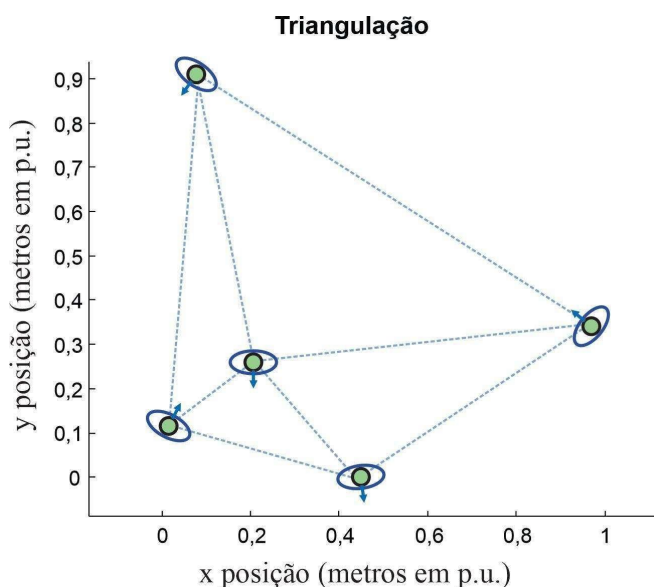


Fonte: próprio autor.

O primeiro passo na abordagem proposta é identificar grupos de pessoas que estejam interagindo entre si. Para tanto, inicialmente é utilizada a triangulação de Delaunay para conectar pessoas como vértices de uma única figura, conforme apresentado na Figura 6. Consequentemente, o aumento do número de pessoas levará a um número maior de

triângulos. Além disso, é possível ver na Figura 3 que cada pessoa possui um vetor que representa a direção associada.

Figura 6: Exemplo da aplicação da triangulação de Delaunay. Número de pontos $n = 5$.



Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

Após a aplicação da triangulação, a ideia é remover algumas conexões entre os vértices da malha de triângulos, de forma que a figura resultante seja formada pelas conexões restantes, essas partes resultantes referem-se aos grupos de pessoas.

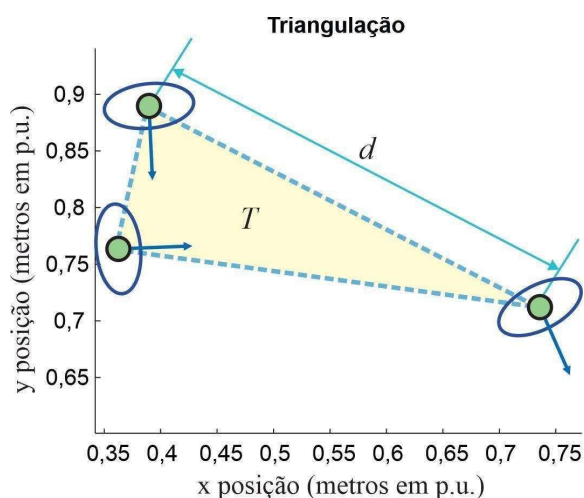
Para remoção das conexões entre os vértices dos triângulos serão definidos dois critérios: distância entre os vértices e orientação das pessoas. Para calcular a distância, a relação proxêmica entre os vértices de um triângulo será considerada, conforme apresentado na Figura 7. A equação (1) é utilizada para calcular a distância de um ponto a outro.

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (1)$$

onde x_1 , x_2 , y_1 e y_2 são as coordenadas das posições das pessoas, e d é a distância euclidiana.

Na Figura 6, é possível observar a distância entre os vértices calculada pela equação (1).

Figura 7: Distância entre os vértices. O triângulo amarelo refere-se ao T-Space.



Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

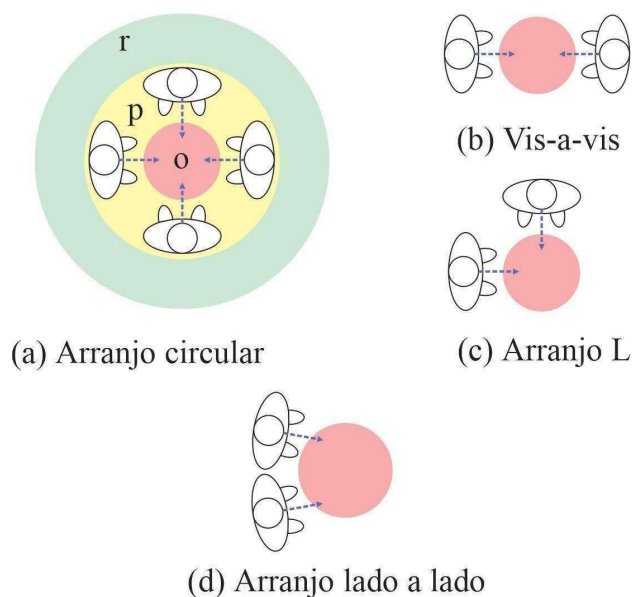
Com relação à segunda regra, será utilizado aqui os vetores de orientação de cada indivíduo. Considere que cada pessoa pode ser identificada em um espaço 2D por sua posição (coordenadas x , y) e orientação como segue:

$$P_i(x_i, y_i, |v_i|, \theta_i)$$

onde $|v_i|$ é o módulo do vetor de orientação v_i , θ_i é o ângulo e o subíndice i refere-se ao número de cada pessoa.

Conforme apresentado em (KENDON, 2010), a orientação é importante para modelar o relacionamento entre as pessoas, pois existe uma região chamada de *o-space* (ver Figura 8), que corresponde à um espaço vazio convexo que é cercado por pessoas envolvidas em uma interação social, no qual o vetor v deve apontar para essa região.

Figura 8: Formações de Kendon.



Fonte: próprio autor.

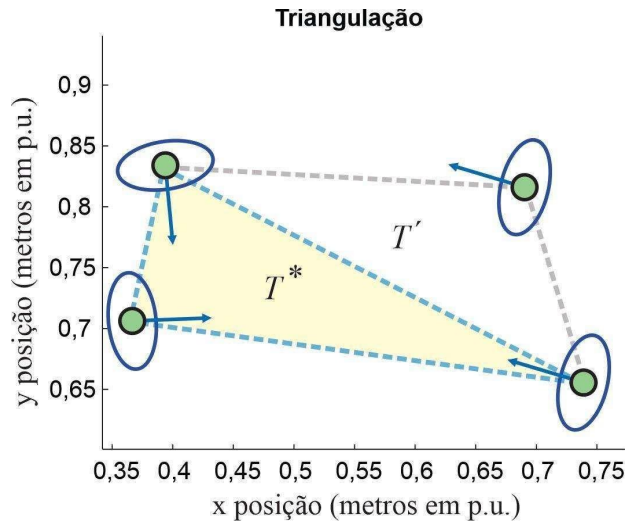
No contexto da triangulação, o equivalente ao *o-space*, será denominado aqui como T-space, e corresponde a região amarela da Figura 7. Considerando, então, a região limitada pelo triângulo (T-space) como um conjunto fechado. Será definido aqui que todos os vetores devem estar contidos dentro deste conjunto. Agora, considere que a extremidade do vetor direcional de uma pessoa tem como coordenadas o ponto $P_{vi}(x_{vi}, y_{vi})$, este ponto deve estar contido dentro do espaço T da seguinte forma:

$$P_{vi}(x_{vi}, y_{vi}) \subset T$$

onde o sobrescrito v se refere ao vetor e o subscrito i se refere a uma das pessoas que poderiam compor um triângulo.

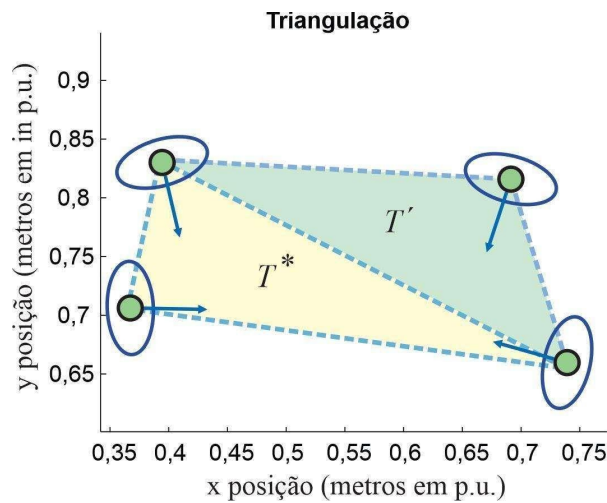
Agora, para classificar um grupo de pessoas, será introduzido aqui o conceito de triângulos de referência e periféricos. Os triângulos de referência serão os principais, a partir dos quais serão definidos os grupos. Os triângulos periféricos, serão obtidos a partir das referências. Deste modo, o triângulo definido pelo T-space (ver triângulo amarelo na Figura 7) será a referência (T^*) para um único grupo. É necessário definir uma regra para incluir triângulos periféricos, pois eles possuem um único vetor dentro de sua região T' (ver Figura 6). Porém, dois de seus vértices constituem o triângulo de referência. Essa situação é apresentada nas Figuras 9 e 10.

Figura 9: Classificação dos grupos. O triângulo amarelo refere-se ao triângulo de referência (T^*) para a classificação dos grupos.



Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

Figura 10: Classificação dos grupos incluindo os triângulos periféricos. O triângulo amarelo é a referência (T^*), enquanto que o triângulo verde é periférico (T') para a classificação dos grupos.



Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

Na Figura 9, é possível observar um triângulo de referência (T^*) e outro T' periférico. No entanto, verifica-se que o vetor de orientação da pessoa em relação ao triângulo periférico não está apontando para T' . Neste caso, esse triângulo periférico não será incluído neste grupo.

Já no cenário apresentado na Figura 10, a orientação da pessoa do triângulo periférico foi alterada. Agora, pode-se observar que o vetor aponta para T' , deste modo, diz-se que o triângulo é periférico, e faz parte do grupo com origem no triângulo de referência. Esta regra será aplicada a todos os triângulos periféricos.

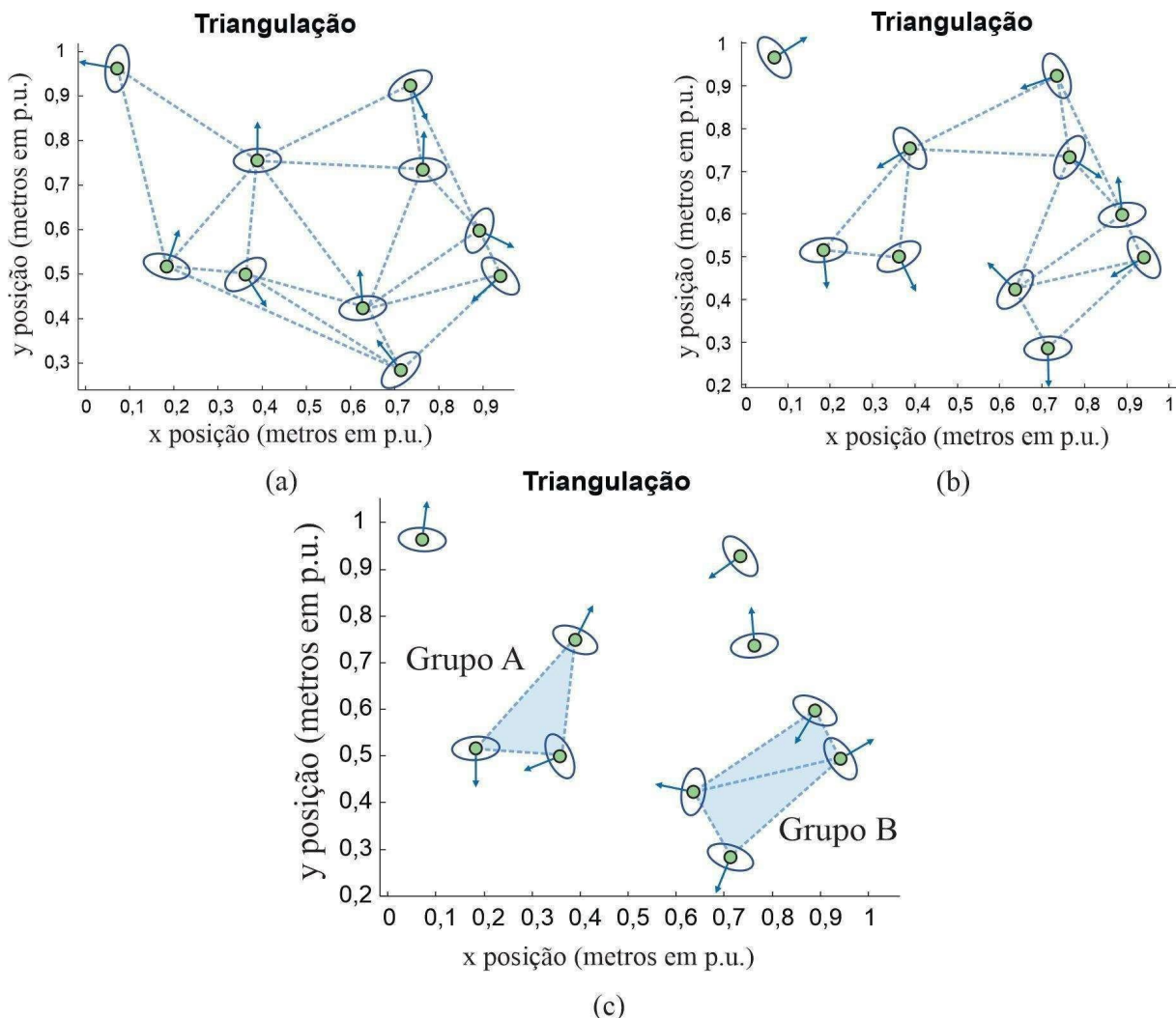
3.4. Resultados de Simulação

3.4.1. Classificação dos Grupos

Os resultados das simulações serão apresentados aqui para demonstrar a estratégia de classificação de grupos proposta. Primeiro, a triangulação de Delaunay foi usada para conectar pessoas como vértices de uma malha triangular, conforme apresentado na Figura 11a. Nesta figura, há uma distribuição aleatória de indivíduos ($n = 10$ pontos representando pessoas), com distância (d) em metros representada em porcentagem de unidade (p.u.). Na Figura 20b, pode ser observado o resultado de simulação para a mesma distribuição aleatória observada na Figura 10a, porém, com a adição de uma relação proxêmica de distância máxima ($d_{max} = 0,40$ p.u.) (Equação (1)).

É possível observar nas Figuras 11b-11c que, após a inserção das condições de proximidade máxima, algumas conexões da triangulação inicial foram descartadas, resultando em dois grupos distintos, denominados como grupo A e grupo B (Figura 10c). Para valores diferentes de d_{max} , é possível obter diferentes classificações de grupos.

Figura 11: Classificação de grupos de pessoas utilizando triangulação Delaunay. (a) sem limite de distância (b) com limite de distância $d_{max} = 0.40$ p.u. e (c) com limite de distância $d_{max} = 0.32$ p.u. Os triângulos azuis referem-se aos grupos resultantes (grupo A e B).



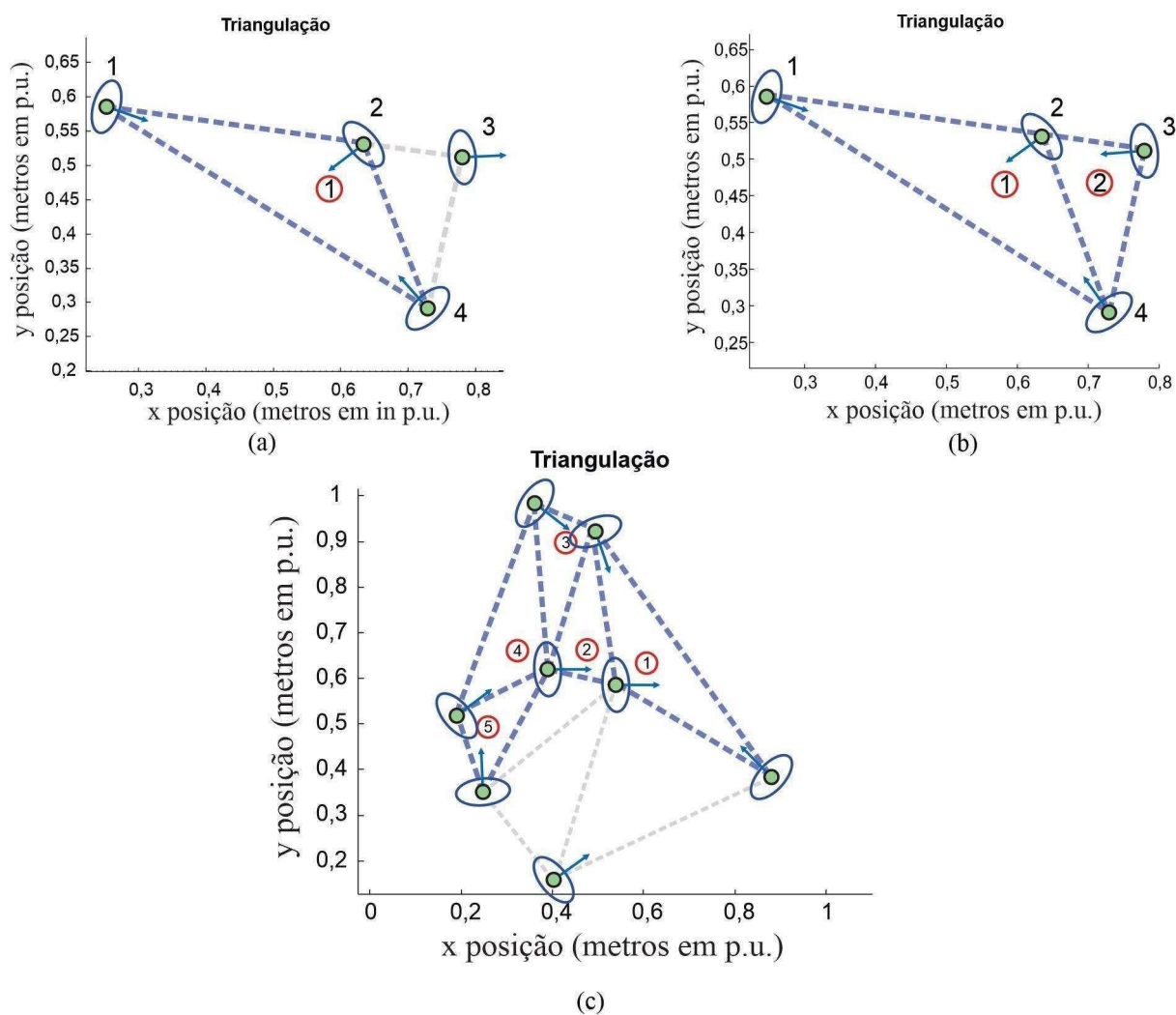
Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

3.4.2. Incluindo Orientação

A orientação é uma característica importante, pois pode indicar a interação entre as pessoas. Portanto, serão apresentados alguns resultados da triangulação, após a adição da orientação como parâmetro de classificação do grupo. Na Figura 12a, é possível observar que a pessoa número 3 não faz parte do grupo (triângulo azul pontilhado). A orientação da pessoa 3 é oposta ao triângulo principal, representando aqui a situação de não interação com as pessoas inclusas no triângulo 1. Já na Figura 12b, a orientação da pessoa 3 foi configurada para apontar para o triângulo azul, e consequentemente, o algoritmo proposto indica que essa

peessoa agora é membro desse grupo. Na Figura 12c, é possível observar o resultado de simulação para o número de pessoas $n_p = 8$. Os círculos vermelhos representam o centro de massa de cada triângulo.

Figura 12: Classificação de grupos sociais: (a) número de pessoas $n_p = 4$ com exclusão de pessoas, (b) número de pessoas $n_p = 4$ com inclusão de pessoas, (c) número de pessoas $n_p = 8$. Círculos vermelhos estão relacionados com o cálculo do centro de massa de cada triângulo, enquanto o número 1 dentro dos círculos vermelhos está relacionado com o triângulo de referência (T^*) e os números 2, 3,...,5 referem-se aos triângulos periféricos (T').



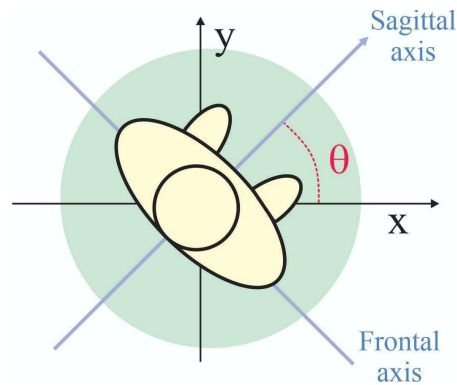
Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

3.4.3. Delimitação do Espaço Pessoal

Diversos trabalhos têm utilizado funções Gaussianas para modelar o espaço pessoal (TROUNG; NGO, 2016)(CHEN; ZHANG; ZOU, 2018). O espaço pessoal e/ou grupal utilizado nesta proposta será caracterizado por meio de funções Gaussianas assimétricas, tal qual apresentado por Sousa *et al.*, 2022.

Na Figura 13 pode-se observar o plano de referência para o cálculo das funções gaussianas.

Figura 13: referencial para o cálculo das funções gaussianas.



Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

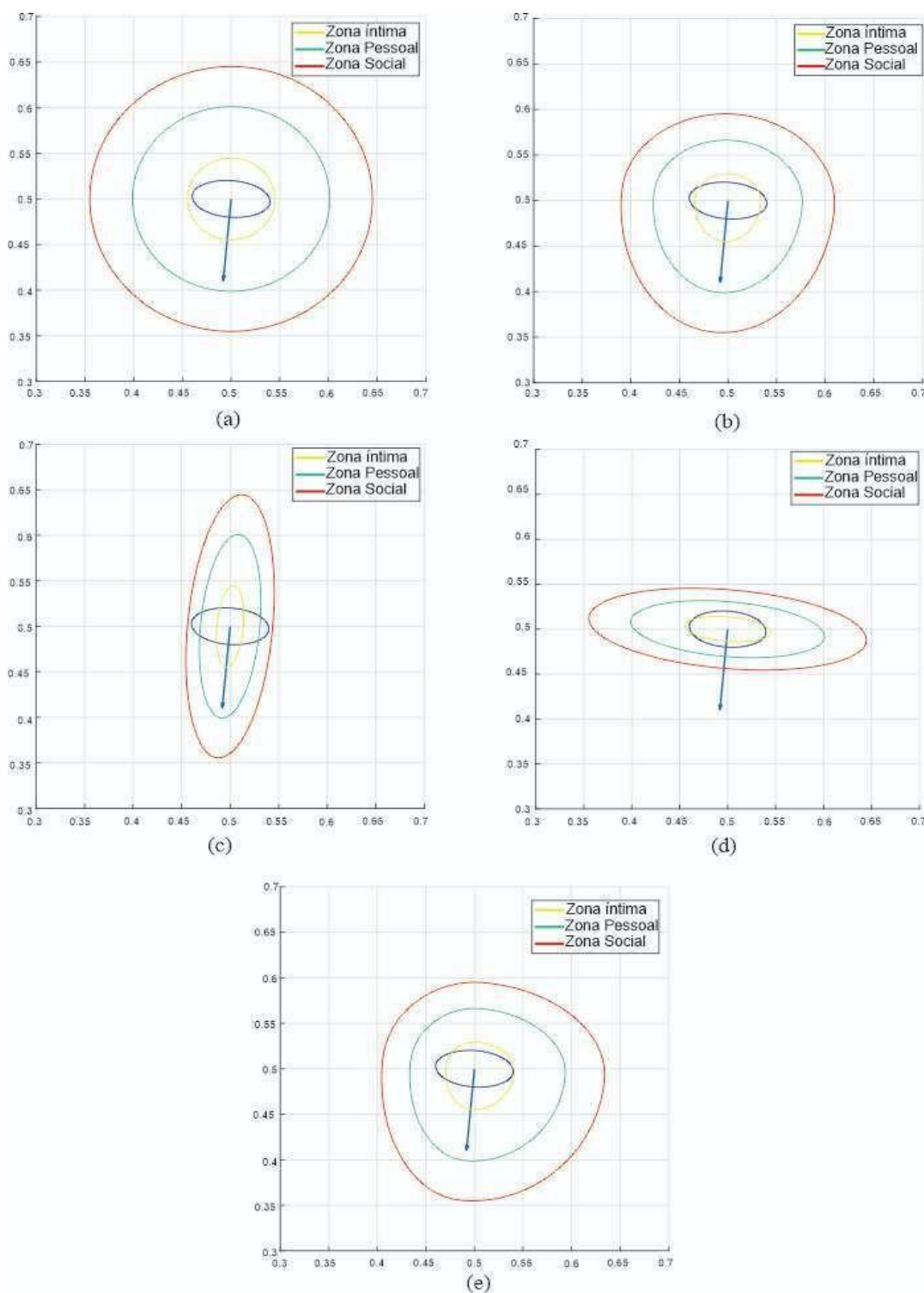
A função Gaussiana utilizada em Sousa *et al.* (2022) é modelada pela seguinte equação:

$$f(x, y) = e^{-\left(\frac{(d_{sag})^2}{2\sigma^2} + \frac{(d_{fro})^2}{2\sigma_s^2}\right)}$$

em que $d_{sag} = \cos(\theta)(x - x_c) + \sin(\theta)(y - y_c)$, $d_{fro} = \sin(\theta)(x - x_c) - \cos(\theta)(y - y_c)$ e σ^2 e σ_s^2 são as variâncias ao longo do eixo sagital e frontal, respectivamente. Foi demonstrado em Sousa *et al.* (2022) que modificando as variâncias dos eixos sagital e frontal é possível obter diferentes configurações da função Gaussiana, como pode ser observado na Figura 14. Nesta figura, observa-se diferentes formatos da função, denominados como círculo concêntrico, formato oval, elíptico e lado dominante. Além disso, cada Gaussiana possui 3 zonas distintas, definidas como íntima, pessoal e social.

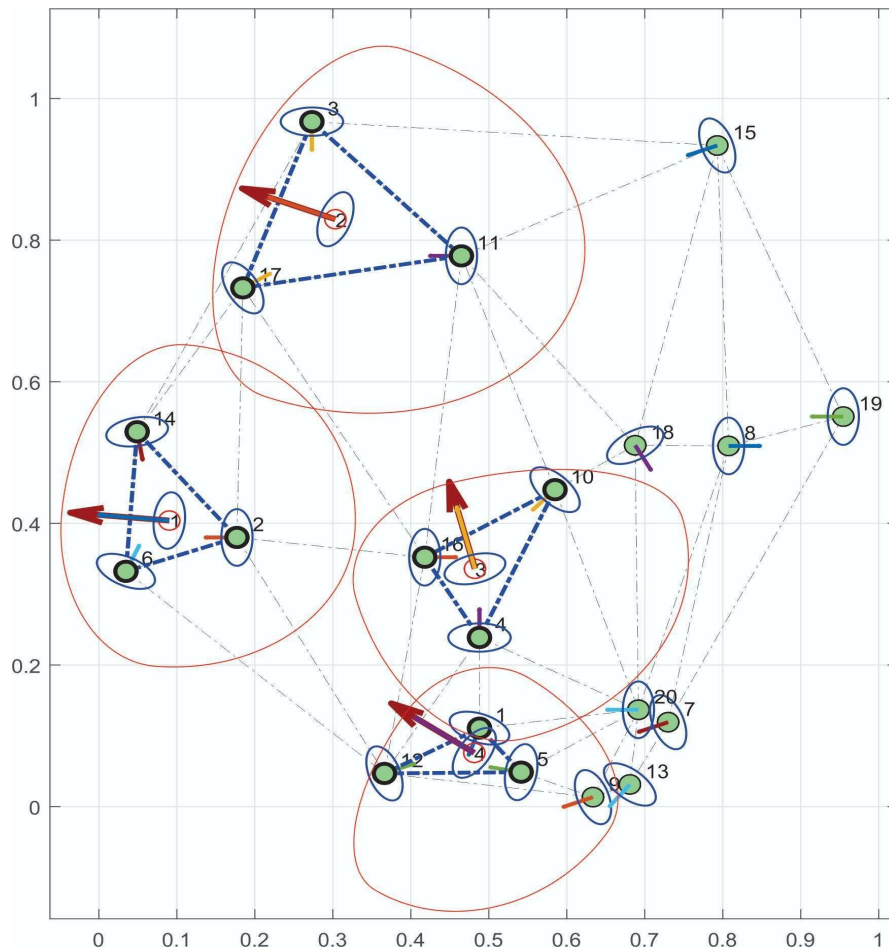
É possível modelar o espaço grupal a partir das funções Gaussianas (Sousa *et al.*, 2022). Na Figura 15 pode-se observar o resultado da triangulação poligonal com a definição dos grupos de pessoas utilizando Gaussianas assimétricas.

Figura 14: Formas da função Gaussiana: (a) círculo concêntrico, (b) formato oval, (c) elíptico, (d) elíptico e (e) lado dominante.



Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

Figura 15: funções Gaussianas grupais.



Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

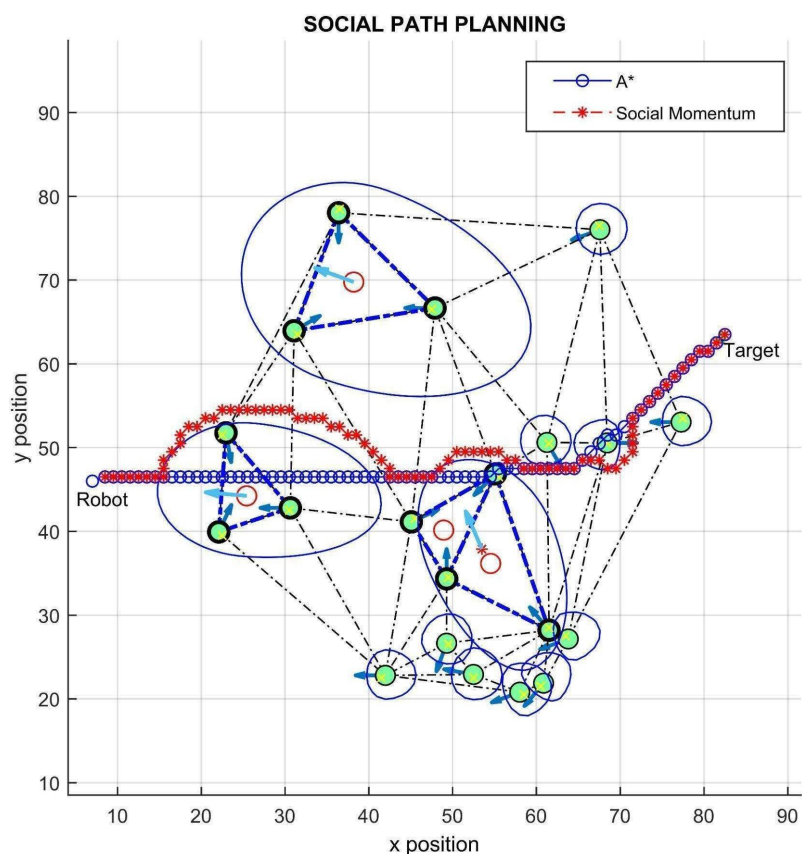
3.4.4. Planejamento de Trajeto e Navegação Utilizando o Método Proposto

Nas seções anteriores, o método de triangulação de Delaunay foi utilizado como uma forma simples de conectar pessoas como vértices de triângulos, em seguida, foram propostas regras para eliminar conexões entre alguns vértices dos triângulos, resultando na classificação de grupos de pessoas. Em seguida, funções Gaussianas assimétricas foram utilizadas para delimitar os espaços pessoais e grupais. Agora, serão apresentados resultados de simulação indicando como o método proposto pode ser aplicado para o planejamento de navegação social.

Nas simulações (Figura 16), a abordagem proposta por Daza *et al.* (2021), que é um método baseado em algoritmos A* e de momento social para evitar o espaço pessoal das pessoas, foi usado. O algoritmo A* foi usado para planejar um caminho (linha azul) da posição do robô até o alvo. É possível observar que o planejamento de trajetória resultante alcançado pelo algoritmo A* não respeita o espaço pessoal, cruzando o espaço proxêmico

para grupos e para uma única pessoa. Por outro lado, ao combinar a abordagem proposta com o momento social (linha vermelha), é possível ver que o caminho calculado é otimizado do ponto de vista social, pois o robô respeita os grupos e o espaço individual imposto pelas funções gaussianas.

Figura 16: Método proposto.



Fonte: Sousa *et al.*, 2022.

O método proposto pode ser aplicado a ambientes caóticos, pois utiliza uma técnica bem conhecida (triangulação de Delaunay) para conectar um grupo de pessoas; além disso, este método proposto pode ser combinado com uma percepção diferente, planejamento de caminho e algoritmos de navegação para definir novos recursos e restrições sociais para fornecer uma estratégia de planejamento de caminho mais adequada para robôs móveis sociais, conforme apresentado nos resultados da simulação.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS: SISTEMA DE PERCEÇÃO DE UM ROBÔ MÓVEL UTILIZANDO LIDAR E VISÃO COMPUTACIONAL

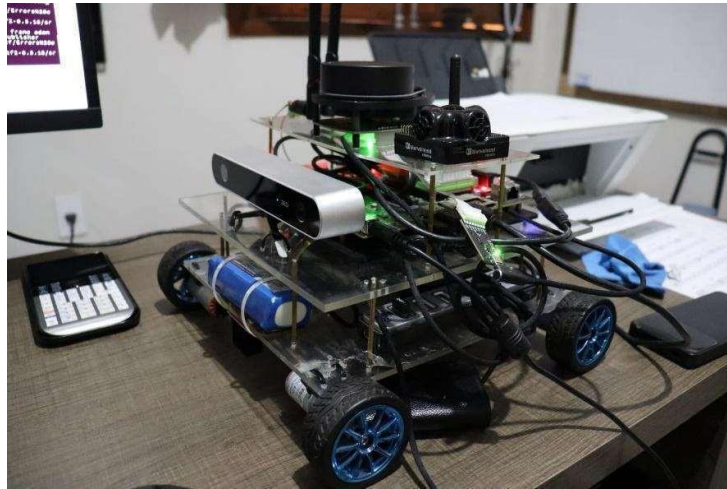
Neste capítulo serão apresentados alguns resultados experimentais obtidos por meio de um robô móvel (*Wally*) desenvolvido pelo LABSIN (Laboratório de Sistemas Inteligentes). Serão apresentados resultados demonstrando o mapeamento de ambientes bem como um sistema de classificação de imagens que utiliza uma câmera estéreo embarcada como fonte de dados.

4.1. Wally

Na Figura 17, é possível observar o protótipo de robô utilizado neste trabalho. O Wally é composto por 4 motores de corrente contínua, cada um com um encoder para medição de velocidade e deslocamento linear. Além disso, o referido robô possui uma câmera estéreo (*zedcam*), uma unidade de medição inercial (IMU), um beacon da Marvelmind, com capacidade de fornecer a posição do robô indoor, com uma precisão de +/- 2cm. Além disso, o Wally conta com um LIDAR, um microcontrolador da Atmel é utilizado para acionar os motores, e todo processamento dos dados é realizado por meio de uma Jetson TX2 da NVIDIA. A Jetson TX2 possui 256 núcleos de GPUs, além de uma CPU Dual-Core NVIDIA Denver 2 64-Bit CPU Quad-Core ARM® Cortex®-A57 MPCore e memória de 8 Gigas. Um sistema Linux embarcado é utilizado como sistema operacional do Hardware. Para visualização dos dados, é utilizado um monitor conectado em uma entrada HDMI (Figura 14).

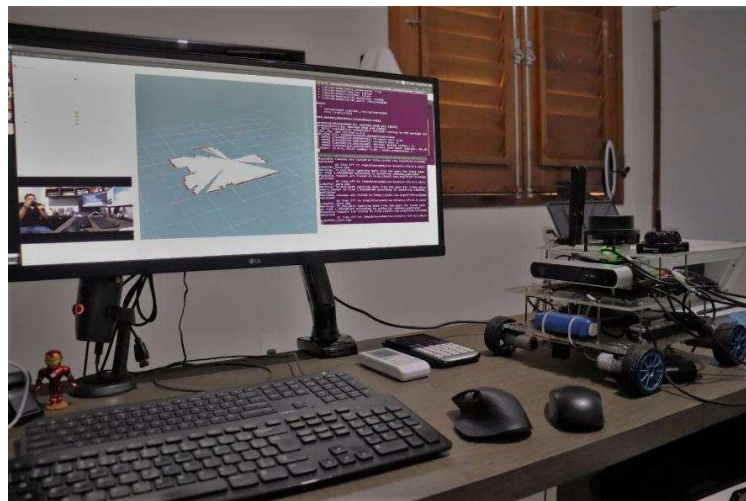
Na Figura 18, é possível observar dentro do RVIZ um mapa criado a partir dos dados do LIDAR, por meio de um pacote do ROS chamado *hector slam*. Observa-se que o ambiente no qual o robô está localizado é mapeado, de modo que todos os obstáculos detectados no raio de alcance do LIDAR aparecem no referido mapa. Além disso, por meio do ROS são publicados os dados da câmera estéreo, tal qual a imagem RGB capturada por uma das câmeras da *zedcam*, como pode ser observado na Figura 17.

Figura 17: Protótipo de robô desenvolvido.



Fonte: próprio autor, 2022.

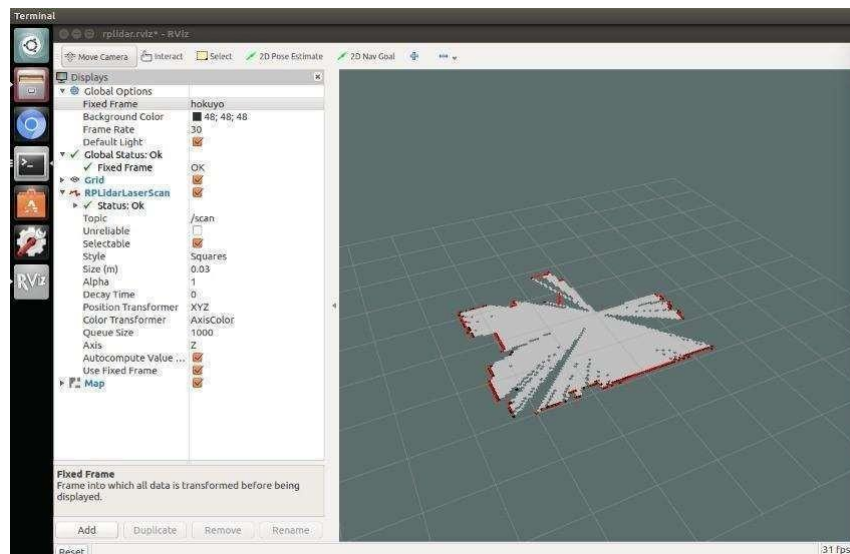
Figura 18: Plataforma de desenvolvimento.



Fonte: próprio autor, 2022.

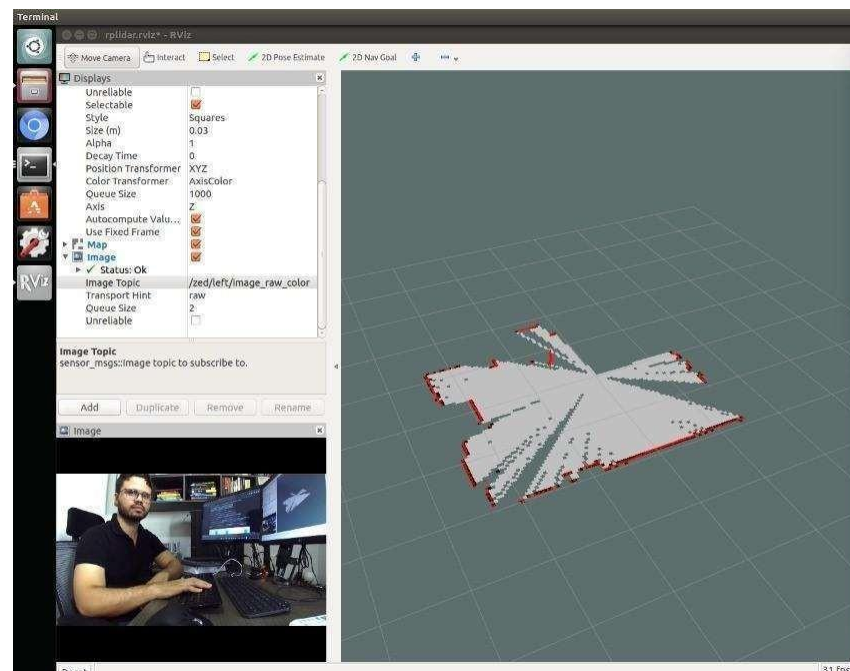
Pode-se observar, por meio dos resultados experimentais (Figuras 19-20), que tanto os dados da câmera estéreo quanto os dados do LIDAR são acessados e visualizados por meio do sistema proposto. Tanto o mapa desenvolvido, quanto os dados da câmera podem ser utilizados para realizar a navegação autônoma.

Figura 19: Processo de mapeamento.



Fonte: próprio autor, 2022.

Figura 20: Processo de mapeamento com acesso à câmera.



Fonte: próprio autor, 2022.

Além disso, o sistema de percepção proposto neste trabalho é baseado na utilização de visão computacional. Na Figura 21, pode-se observar o resultado da classificação de imagens utilizando a YOLO V3. Nesta Figura, nota-se a inserção de duas *bounding boxes* para detecção de uma pessoa, e um monitor de TV. A detecção é realizada a partir dos pesos pré-treinados para classificação de diversas categorias. Além disso, é possível treinar pesos para detecção de classes específicas, a partir de dados criados pelo usuário.

A partir do sistema de detecção (Figura 21), é possível fazer com que o robô tome decisões diferentes para manter a interação com seres humanos, ou até tomar decisões estratégicas para tomada de decisões com relação ao planejamento de trajetória.

Figura 21: Sistema de reconhecimento de padrões utilizando imagens e visão computacional.



Fonte: próprio autor, 2022.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abordou o planejamento de caminho (*path planning*), aplicado a robôs móveis autônomos, incluindo restrições sociais. Deste modo, foram apresentados diversos trabalhos relacionados com o tema, bem como uma fundamentação teórica dos elementos tecnológicos envolvidos, tais como os algoritmos de planejamento de caminho, além de uma visão sobre elementos de percepção, como a aplicação da visão computacional no contexto do trabalho proposto.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos pelo LABSIN (Laboratório de Sistemas Inteligentes), os quais contribuíram com o desenvolvimento desta proposta. Além disso, alguns trabalhos de pesquisa foram publicados em congressos e periódicos que relacionam o tema.

No capítulo 3 foi apresentada uma técnica de detecção de grupos de pessoas, a técnica é baseada na triangulação de Delaunay. Foram apresentados resultados de simulação para a estratégia proposta. A partir dos resultados, foi possível observar que o robô consegue locomover-se entre as pessoas, respeitando o espaço pessoal e/ou grupal limitado pelas funções Gaussianas. A estratégia proposta pode ser implementada em ambientes caóticos, pois o método de triangulação no qual a técnica proposta é baseada, é relativamente simples e bem estabelecido na literatura.

Como trabalhos futuros pretende-se implementar a técnica proposta no capítulo 3 em uma plataforma real, como o *Wally* utilizado nesta proposta. Pretende-se implementar a triangulação, detecção de grupos e planejamento de caminho. Também pode-se estudar a implementação do método proposto em uma visão robocêntrica. Para tanto, será necessário estimar a direção das pessoas, pois no método proposto no capítulo 5, foi considerado que todas as posições e direções das pessoas conhecidas.

Além disso, uma outra estratégia pode ser implementada para maximizar o espaço disponível para navegação do robô. Deste modo, pode-se definir funções de otimização que delimitam os grupos ou espaços individuais, porém, considerando a área útil resultante para navegação do robô, pois quanto mais espaço disponível, melhor.

Outra técnica que pode ser estudada seria a flexibilização dos espaços pessoais e grupais a partir da interação do robô com o meio. Neste caso, seria necessária a interação do robô com o meio, estabelecendo-se regras de comunicação para flexibilização das zonas próximas.

6. REFERÊNCIAS

- ARBA, A. **Value of the domestic facility and store robot market in Japan in fiscal year 2021 with a forecast until 2027.** Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1025063/japan-office-store-robot-market-size/#statisticContainer>. Acesso em: 12 dez. 2022.
- BAHISHTI, A. **Humanoid Robots and Human Society.** *Advanced Journal Of Social Science*, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 60-63, nov. 2017. AIJR Publisher. <http://dx.doi.org/10.21467/ajss.1.1.60-63>.
- CHEN, F. Y.; EVERETT, M.; LIU, M.; HOW, J. P. **Socially aware motion planning with deep reinforcement learning. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).** IEEE Xplore, 2017. Available on: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8202312>. Accessed: 22 June 2020.
- CHEN, W.; ZHANG, T.; ZOU, Y. **Mobile robot path planning based on social interaction space in social environment.** *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2018, 15, 1–10.
- CHIANG, Ai-Hsuan; TRIMI, S. **Impacts of service robots on service quality.** *Service Business*, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 439-459, 7 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11628-020-00423-8>.
- CUI, S.G.; WANG, H.; YANG, L. A. **Simulation study of A-star algorithm for robot path planning.** In *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics Technology*, Sichuan, China, 5–8 August 2012; pp. 506–510.
- DAZA, M.; BARRIOS-ARANIBAR, D.; DIAZ-AMADO, J.; CARDINALE, Y.; VILASBOAS, J. **An Approach of Social Navigation Based on Proxemics for Crowded Environments of Humans and Robots.** *Micromachines* 2021, 12, 193.
- FAN, X.; LI, X.; DU, F.; LI, X.; WEI, M. **Apply word vectors for sentiment analysis of APP reviews. 2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI).** 2016, pp. 1062-1066, doi: 10.1109/ICSAI.2016.7811108.
- FICOCELLI, M.; TERAJO, J.; NEJAT, G. **"Promoting Interactions Between Humans and Robots Using Robotic Emotional Behavior,"** in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 46, no. 12, pp. 2911-2923, Dec. 2016, doi: 10.1109/TCYB.2015.2492999.

FERGUSON, D.; STENTZ, A. **Using interpolation to improve path planning: The Field D* algorithm.** J. Field Robot. 2006, 23, 79–101.

GARRELL, A.; SAFELIU, A. **Cooperative social robots to accompany groups of people.** Int. J. Robot. Res. 2012 31, 1675–1701.

GINÉS, J.; MARTÍN, F.; VARGAS, D.; RODRIGUEZ, F.J.; MATELLÁN, V. **Social navigation in a cognitive architecture using dynamic proxemic zones.** Sensors 2019, 19, 5189.

GLAS, D.F.; SATAKE, S.; FERRERI, F.; KANDA, T.; HAGITA, N.; ISHIGURO, H. **The network robot system: enabling social human-robot interaction in public spaces.** J. Hum. Robot. Interact. 2012, 1, 5–32.

GÓMEZ, J.V.; MAVRIDIS, N.; GARRIDO, S. **Social Path Planning: Generic Human-Robot Interaction Framework for Robotic Navigation Tasks.** In Proceedings of the Cognitive Robotics Systems: Replicating Human Actions and Activities, Workshop of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'13), Tokyo, Japan, 3 November 2013.

GÓMEZ, J. V.; MAVRIDIS, N.; GARRIDO, S. **Fast marching solution for the social path planning problem.** 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). IEEE Xplore, 2014. Available on: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6907105>. Accessed: 20 June 2020.

GRAAF, M. M. A. **An Ethical Evaluation of Human–Robot Relationships.** International Journal Of Social Robotics, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 589-598, 2 jul. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12369-016-0368-5>. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s12369-016-0368-5>. Acesso em: 12 dez. 2022.

GUL, F.; RAHIMAN, W.; ALHADY, S. S. N. **A comprehensive study for robot navigation techniques.** Cogent Engineering, [S.L.], v. 6, n. 1, 1 jan. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2019.1632046>. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2019.1632046>. Acesso em: 12 dez. 2022.

HAN, M.; LIN, C.; SONG, K. "**Robotic Emotional Expression Generation Based on Mood Transition and Personality Model**," in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 43, no. 4, pp. 1290-1303, Aug. 2013, doi: 10.1109/TSMCB.2012.2228851.

HART, P. E.; NILS, J. N.; BERTRAM, R. "**A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths**." *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics* 4.2 (1968): 100-107.

ISLAM, N.; HASEEB, K.; ALMOGREN, A.; DIN, I. U.; GUIZANI, M.; ALTAMEEM, A. "**A framework for topological based map building: a solution to autonomous robot navigation in smart cities**." *Future Generation Computer Systems*, [S.L.], v. 111, p. 644-653, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2019.10.036>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X19324227?casa_token=izBYFlqj7O0AAAAA:IPYuQ0ox1JZGL3lWQc9D5MpPmVDyC9VDqo29GzwaBuzkCfhazSR_U6aTXW0d85-gWxSyGyLFt_. Acesso em: 12 dez. 2022.

KANDA, T.; SHIOMI, M.; MIYASHITA, Z.; ISHIGURO, H.; HAGITA, N. "**An affective guide robot in a shopping mall**." In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction*, La Jolla, CA, USA, 9–13 March 2009; pp. 173–180.

KENDON, A. "**Spacing and orientation in co-present interaction**." In *Development of Multimodal Interfaces: Active Listening and Synchron*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010; pp. 1–15.

LIM, V.; ROOKSBY, M.; CROSS, E. S. "**Social Robots on a Global Stage: establishing a role for culture during human robot interaction**." *International Journal Of Social Robotics*, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 1307-1333, 11 nov. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12369-020-00710-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12369-020-00710-4>. Acesso em: 12 dez. 2022.

LIU, P.; GRAS, D.F.; KANDA, T.; ISHIGURO, H. "**Data-driven HRI: Learning social behaviors by example from human–human interaction**." *IEEE Trans. Robot.* 2016, 32, 988–1008. Available on: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7539621>. Accessed: 22 June 2020.

MAIPRADIT, R.; HATA, H.; MATSUMOTO, K. "**Sentiment Classification Using N-Gram Inverse Document Frequency and Automated Machine Learning**," in *IEEE Software*, vol. 36, no. 5, pp. 65-70, Sept.-Oct. 2019, doi: 10.1109/MS.2019.2919573.

PANDEY, A.K.; ALAMI, R. **A framework towards a socially aware mobile robot motion in human-centered dynamic environment.** In Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, 18–22 November 2010; pp. 5855–5860.

PATEL, K.; MEHTA, D.; MISTRY, C.; GUPTA, R.; TANWAR, S.; KUMAR, N.; ALAZAB, M. **Facial Sentiment Analysis Using AI Techniques: state-of-the-art, taxonomies, and challenges.** Ieee Access, [S.L.], v. 8, p. 90495-90519, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2020.2993803>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9091188>. Acesso em: 12 dez. 2022.

PATOMPAK, P.; JEONG, S.; NILKHAMHANG, I.; CHONG, N.Y. **Learning Proxemics for Personalized Human–Robot Social Interaction.** Int. J. Soc. Robot. 2019, 12, 267–280.

RAVANKAR, A.; RAVANKAR, A.; KOBAYASHI, Y.; HOSHINO, Y.; PENG, C. **Path Smoothing Techniques in Robot Navigation: state-of-the-art, current and future challenges.** Sensors, [S.L.], v. 18, n. 9, p. 3170, 19 set. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s18093170>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/3170>. Acesso em: 12 dez. 2022.

REDHEAD, D.; POWER, E. A. **Social hierarchies and social networks in humans.** Philosophical Transactions Of The Royal Society B: Biological Sciences, [S.L.], v. 377, n. 1845, 10 jan. 2022. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2020.0440>. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rstb.2020.0440>. Acesso em: 12 dez. 2022.

SEHESTEDT, S.; KODAGODA, S.; DISSANAYAKE, G. **Robot path planning in a social context.** In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics Automation and Mechatronics (RAM), Singapore, 28–30 June 2010.

SOUSA, R. M. de; BARRIOS-ARANIBAR, D.; DIAZ-AMADO, J.; PATIÑO-ESCARCINA, R. E.; TRINDADE, R. M. P. **A New Approach for Including Social Conventions into Social Robots Navigation by Using Polygonal Triangulation and Group Asymmetric Gaussian Functions.** Sensors, [S.L.], v. 22, n. 12, p. 4602, 18 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s22124602>.

STENTZ, A. **The focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning.** In Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI 95, Montreal, QC, Canada, 20–25 August 1995; Volume 95; pp. 1652–1659.

TOLUNBUKE, C.; METIN, T. **Personal Space Calculation and Path Planning for Mobile Robots Based on the Turkish Social and Cultural Structure and the Gender.** In Proceedings of the 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Istanbul, Turkey, 25–27 November 2018; pp. 1–6.

TROUNG, X.T.; NGO, T.D. **Dynamic social zone based mobile robot navigation for human comfortable safety in social environments.** *Int. J. Soc. Robot.* 2016, 8, 663–684.

TRUONG, T. X.; NGO, D. T. **“To Approach Humans?”: A Unified Framework for Approaching Pose Prediction and Socially Aware Robot Navigation.** *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems* (Volume: 10 , Issue: 3 , Sept. 2018). IEEE Xplore, 2018. Available on: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8036225>. Accessed: 21 june 2020.

TRUONG, T. X.; NGO, D. T. **Toward Socially Aware Robot Navigation in Dynamic and Crowded Environments: A Proactive Social Motion Model.** *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (Volume: 14 , Issue: 4 , Oct. 2017). IEEE Xplore, 2017. Available on: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8011466>. Accessed: 21 june 2020.

VEGA-MAGRO, A.; CALDERITA, L.V.; BUSTOS, P.; NÚÑEZ, P. **Human-aware Robot Navigation based on Time-dependent Social Interaction Spaces: A use case for assistive robotics.** In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), Ponta Delgada, Portugal, 15–17 April 2020; pp. 140–145.

VILASBOAS, J.P.; SAMPAIO, M.S.C.; MOREIRA, G.F.; SOUZA, A.B.; DIAZ-AMADO, J.; BARRIOS-ARANIBAR, D.; CARDINALE, Y.; SOARES, J.E. **Application of social constraints for dynamic navigation considering semantic annotations on geo-referenced maps.** In Proceedings of the IECON 2021—47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Toronto, ON, Canada, 13–16 October 2021; pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589235>.

ZADEH, A.; ZELLERS, R.; PINCUS, E.; MORENCY, L., **"Multimodal Sentiment Intensity Analysis in Videos: Facial Gestures and Verbal Messages,"** in *IEEE Intelligent Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 82-88, Nov.-Dec. 2016, doi: 10.1109/MIS.2016.94.

ZARAKI, A.; PIERONI, M.; DE ROSSI, D.; MAZZEI, D.; GAROFALO, R.; COMINELLI, L.; DEHKORDI, M.B. **Design and evaluation of a unique social perception system for human-Robot interaction.** In IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems ; IEEE: New York, NY, USA, 2016; Volume 9, pp. 341–355.

ZARAKI, A.; PIERONI, M.; ROSSI, D.; MAZZEI, D.; GAROFALO, R.; COMINELLI, L.; DEHKORDI, B. M. **Design and Evaluation of a Unique Social Perception System for Human–Robot Interaction. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems (Volume: 9 , Issue: 4 , Dec. 2017) IEEE Xplore, 2017.** Available on: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7534850>. Accessed: 22 June 2020.

ZHANG, C.; ZHOU, L.; LI, Y.; FAN, Y. A Dynamic Path Planning Method for Social Robots in the Home Environment. *Electronics*, [S.L.], v. 9, n. 7, p. 1173, 19 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/electronics9071173>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/7/1173>. Acesso em: 12 dez. 2022.

ZHANG, H. Y.; LIN, M. W.; CHEN, A. X. **Path Planning for the Mobile Robot: A Review. Symmetry in Engineering Sciences. Symmetry**, 2018. Available on: <https://www.mdpi.com/2073-8994/10/10/450/htm>. Accessed: 29 June 2020.

7. ANEXOS

FUNDAMENTOS DE ROS (*ROBOT OPERATING SYSTEM*)

O ROS é um sistema operacional para robôs composto por um conjunto de bibliotecas e ferramentas que facilitam o desenvolvimento de aplicações robustas e complexas (ABOUT ROS, 2018). Neste capítulo serão apresentados os fundamentos do ROS utilizado neste trabalho.

Versões e Instalação

O procedimento para instalação do ROS pode ser encontrado em:

<http://wiki.ros.org/ROS/Installation>

Atualmente há duas versões recomendadas para o uso do sistema operacional para robôs: *ROS Melodic Morenia* e *ROS Noetic Ninjemys*, recomendadas para o ubuntu 18.04 e 20.04, respectivamente. Além disso, há também versões para a instalação do ROS 2, mas que não será utilizado neste trabalho, por se tratar de de uma versão mais recente, em fase de desenvolvimento.

Este trabalho foi desenvolvido com base no Ubuntu 18.04, portanto, foram seguidos os passos de instalação do *ROS Melodic Morenia*, disponível em:

<http://wiki.ros.org/melodic/Installation/Ubuntu>

Criando um Workspace

```
mkdir -p ~/catkin_ws/src
cd ~/catkin_ws/src
catkin_init_workspace
```

Criando um pacote em ROS

```
catkin create_pkg <package_name> [depend1] [depend2] [depend3]
```

–


```
catkin_create_pkg hello_world std_msgs rospy roscpp
```

```
cd ~/catkin_ws/src/hello_world  
mkdir scripts  
catkin_make
```

Agora, dentro da seguinte pasta, crie os arquivos `talker.cpp` e `listener.cpp`:

```
cd ~/catkin_ws/src/hello_world/src  
gedit
```

Copie os códigos disponíveis em:

http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials/WritingPublisherSubscriber%28c%2B%2B%29#roscpp_tutorials.2BAC8-Tutorials.2BAC8-WritingPublisherSubscriber.Writing_the_Subscriber_Node

Salve os arquivos `talker.cpp` e `listener.cpp`. Em seguida, abra o arquivo `CMakeList.txt`:

```
cd ~/catkin_ws/src/hello_world  
gedit CMakeList.txt
```

Adicione as seguintes linhas de código no final do arquivo:

```
add_executable(talker src/talker.cpp)  
target_link_libraries(talker ${catkin_LIBRARIES})  
add_executable(listener src/listener.cpp)  
target_link_libraries(listener ${catkin_LIBRARIES})
```

Agora, mova-se para a parte `catkin_ws`:

```
cd ~/catkin_ws/  
catkin_make
```

Para executar os nós, abra um terminal no Ubuntu e inicie o mestre ROS:

```
roscore
```

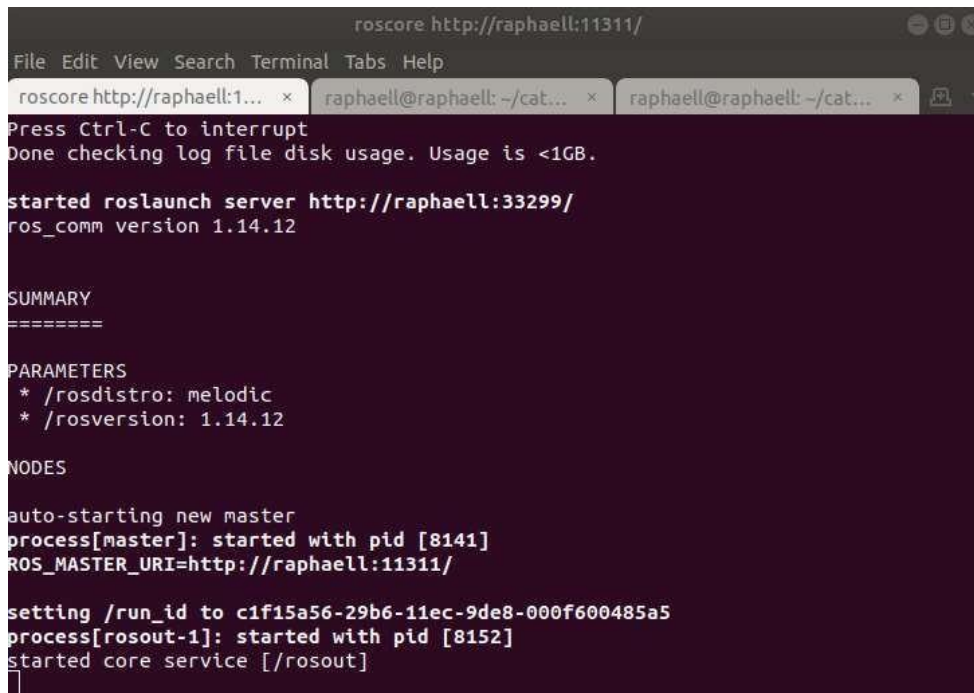
Em outro terminal, execute o no *publisher* (`talker`):

```
source devel/setup.bash  
roslaunch hello_world talker
```

Repita o procedimento para o no subscriber (listener):

```
source devel/setup.bash
roslaunch hello_world listener
```

Figura 22: mestre ROS.

A terminal window titled 'roscore http://raphaell:11311/' showing the output of a ROS master startup. The terminal has a dark background with light-colored text. The output includes: 'Press Ctrl-C to interrupt', 'Done checking log file disk usage. Usage is <1GB.', 'started roslaunch server http://raphaell:33299/', 'ros_comm version 1.14.12', 'SUMMARY', 'PARAMETERS', '* /rostdistro: melodic', '* /rosversion: 1.14.12', 'NODES', 'auto-starting new master', 'process[master]: started with pid [8141]', 'ROS_MASTER_URI=http://raphaell:11311/', 'setting /run_id to c1f15a56-29b6-11ec-9de8-000f600485a5', 'process[rosout-1]: started with pid [8152]', and 'started core service [/rosout]'.

```
roscore http://raphaell:11311/
File Edit View Search Terminal Tabs Help
roscore http://raphaell:1... x raphaell@raphaell: ~/cat... x raphaell@raphaell: ~/cat... x
Press Ctrl-C to interrupt
Done checking log file disk usage. Usage is <1GB.
started roslaunch server http://raphaell:33299/
ros_comm version 1.14.12

SUMMARY
=====

PARAMETERS
* /rostdistro: melodic
* /rosversion: 1.14.12

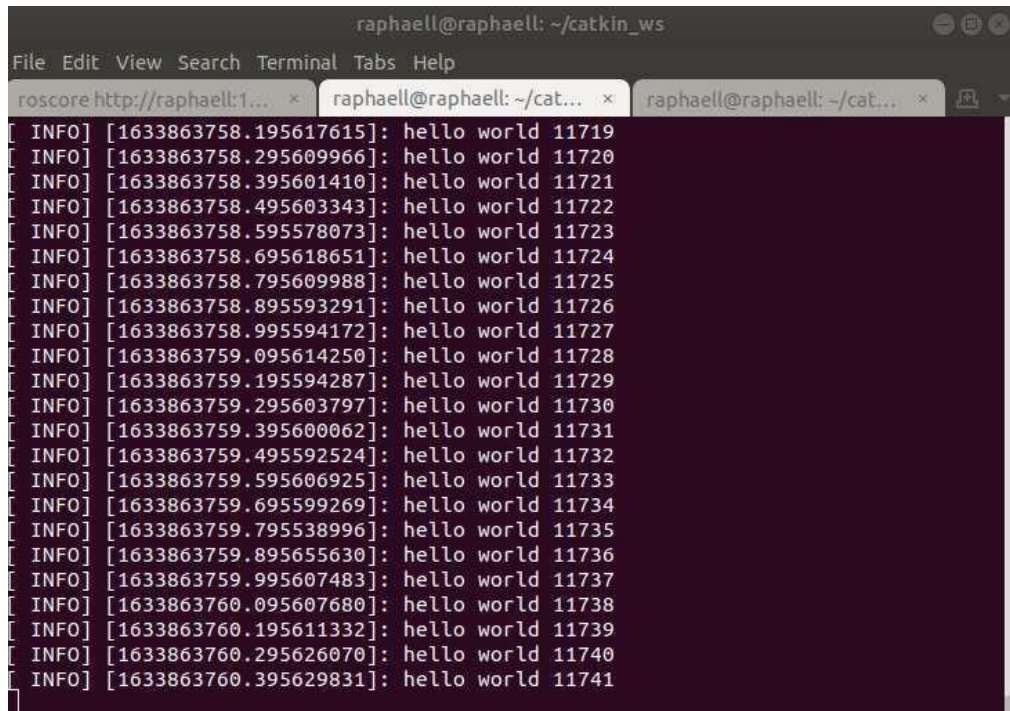
NODES

auto-starting new master
process[master]: started with pid [8141]
ROS_MASTER_URI=http://raphaell:11311/

setting /run_id to c1f15a56-29b6-11ec-9de8-000f600485a5
process[rosout-1]: started with pid [8152]
started core service [/rosout]
```

Fonte: próprio autor, 2022.

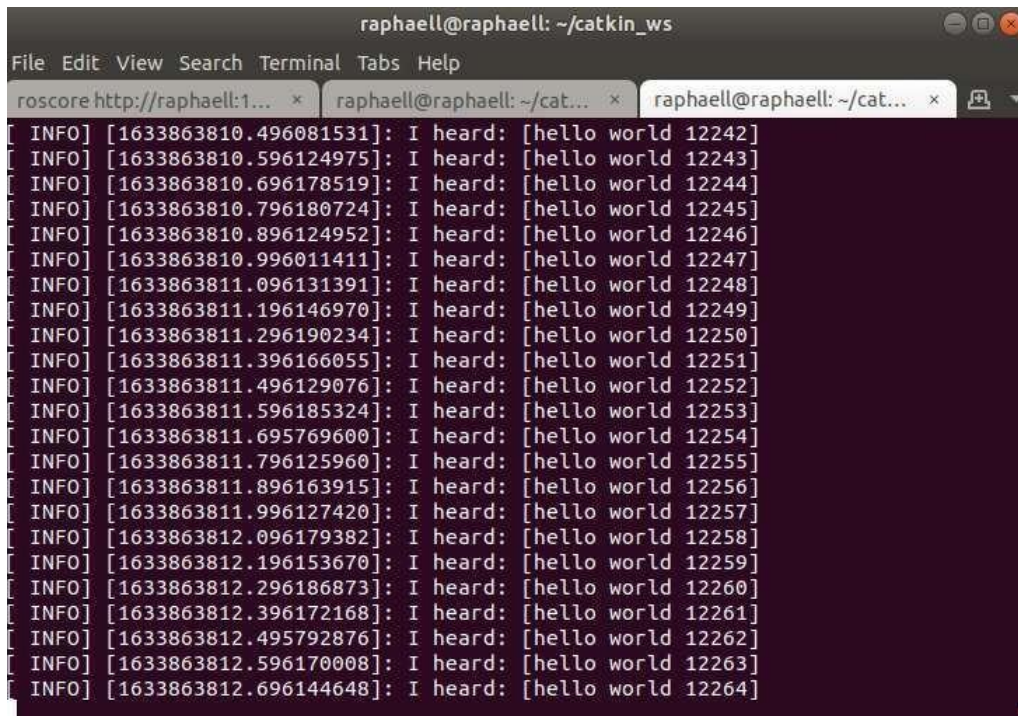
Figura 23: nó do ROS publicando (*publish*) a mensagem *hello world*.



```
raphaell@raphaell: ~/catkin_ws
File Edit View Search Terminal Tabs Help
roscore http://raphaell:1... x raphaell@raphaell: ~/cat... x raphaell@raphaell: ~/cat... x
[INFO] [1633863758.195617615]: hello world 11719
[INFO] [1633863758.295609966]: hello world 11720
[INFO] [1633863758.395601410]: hello world 11721
[INFO] [1633863758.495603343]: hello world 11722
[INFO] [1633863758.595578073]: hello world 11723
[INFO] [1633863758.695618651]: hello world 11724
[INFO] [1633863758.795609988]: hello world 11725
[INFO] [1633863758.895593291]: hello world 11726
[INFO] [1633863758.995594172]: hello world 11727
[INFO] [1633863759.095614250]: hello world 11728
[INFO] [1633863759.195594287]: hello world 11729
[INFO] [1633863759.295603797]: hello world 11730
[INFO] [1633863759.395600062]: hello world 11731
[INFO] [1633863759.495592524]: hello world 11732
[INFO] [1633863759.595606925]: hello world 11733
[INFO] [1633863759.695599269]: hello world 11734
[INFO] [1633863759.795538996]: hello world 11735
[INFO] [1633863759.895655630]: hello world 11736
[INFO] [1633863759.995607483]: hello world 11737
[INFO] [1633863760.095607680]: hello world 11738
[INFO] [1633863760.195611332]: hello world 11739
[INFO] [1633863760.295626070]: hello world 11740
[INFO] [1633863760.395629831]: hello world 11741
```

Fonte: próprio autor, 2022.

Figura 24: nó do ROS lendo (*subscriber*) a informação publicada.



```
raphaell@raphaell: ~/catkin_ws
File Edit View Search Terminal Tabs Help
roscore http://raphaell:1... x raphaell@raphaell: ~/cat... x raphaell@raphaell: ~/cat... x
[INFO] [1633863810.496081531]: I heard: [hello world 12242]
[INFO] [1633863810.596124975]: I heard: [hello world 12243]
[INFO] [1633863810.696178519]: I heard: [hello world 12244]
[INFO] [1633863810.796180724]: I heard: [hello world 12245]
[INFO] [1633863810.896124952]: I heard: [hello world 12246]
[INFO] [1633863810.996011411]: I heard: [hello world 12247]
[INFO] [1633863811.096131391]: I heard: [hello world 12248]
[INFO] [1633863811.196146970]: I heard: [hello world 12249]
[INFO] [1633863811.296190234]: I heard: [hello world 12250]
[INFO] [1633863811.396166055]: I heard: [hello world 12251]
[INFO] [1633863811.496129076]: I heard: [hello world 12252]
[INFO] [1633863811.596185324]: I heard: [hello world 12253]
[INFO] [1633863811.695769600]: I heard: [hello world 12254]
[INFO] [1633863811.796125960]: I heard: [hello world 12255]
[INFO] [1633863811.896163915]: I heard: [hello world 12256]
[INFO] [1633863811.996127420]: I heard: [hello world 12257]
[INFO] [1633863812.096179382]: I heard: [hello world 12258]
[INFO] [1633863812.196153670]: I heard: [hello world 12259]
[INFO] [1633863812.296186873]: I heard: [hello world 12260]
[INFO] [1633863812.396172168]: I heard: [hello world 12261]
[INFO] [1633863812.495792876]: I heard: [hello world 12262]
[INFO] [1633863812.596170008]: I heard: [hello world 12263]
[INFO] [1633863812.696144648]: I heard: [hello world 12264]
```

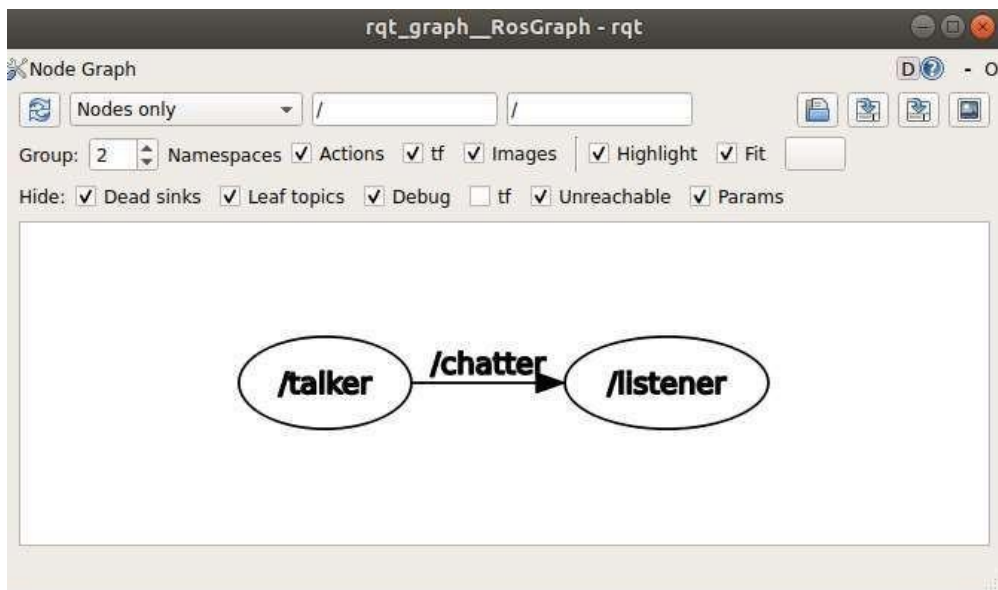
Fonte: próprio autor, 2022.

A aplicação `rqt_graph` pode ser chamada por meio do comando a seguir:

```
roslaunch rqt_graph rqt_graph
```

Na Figura 25, é possível visualizar, por meio do *rqt_graph*, a estrutura de tópicos com o fluxo de informações entre os nós criados. Pode-se observar que o fluxo de informação é entre o *talker* (*publish*) e o *listener* (*subscriber*).

Figura 25: tela do *rqt_graph* com a estrutura de comunicação desenvolvida.



Fonte: próprio autor, 2022.

Uma observação importante é que o *rqt_graph* funciona a partir do python 2.7, deste modo, caso esteja utilizando um ambiente virtual, como o conda, será preciso criar um ambiente com a referida versão do python.

