

Roteamento Eficiente para Abordagem de Indivíduos em Ambientes com Obstáculos Baseado em Normas Sociais

Aline F. F. Silva^{1,2}, Douglas G. Macharet¹

¹Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Belo Horizonte – MG – Brazil

²Coordenação de Engenharia Elétrica
Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM)
Patrocínio – MG – Brazil

aline.furtado@iftm.edu.br, {alinefurtado,doug}@dcc.ufmg.br

Abstract. *This thesis proposes efficient routing methods guided by social norms for navigating individuals and groups in dynamic environments. It introduces three solutions: a GTSP-based model for individuals in static settings; a SOP-based model for groups that maximizes rewards under constraints; and a COPS-based model for dynamic environments that integrates social segmentation, rewards, and adaptive navigation via the elastic band method. Experiments highlight the effectiveness of all approaches, with the COPS model offering the best trade-off between efficiency and social compliance.*

Keywords: *routing, robot-human approximation, social navigation, dynamic environments, trajectory optimization.*

Resumo. *Esta tese propõe métodos de roteamento eficientes baseados em normas sociais para a abordagem sequencial de indivíduos e grupos em ambientes com obstáculos. Três soluções são apresentadas. Nossa primeira solução propõe uma modelagem inédita para o problema de indivíduos isolados em ambientes estáticos como um Problema Generalizado do Caixeiro Viajante (GTSP). A segunda expande a abordagem para grupos, modelando-a como um Problema de Orientação de Conjuntos (SOP) para maximizar recompensas sob restrições de recursos. A solução mais sofisticada aborda ambientes dinâmicos, integrando segmentação do espaço social, sistema de recompensas e o método da faixa elástica para navegação adaptativa, modelado como um Problema de Orientação Agrupado com Subgrupos (COPS). Os experimentos demonstram a eficácia de cada abordagem, com destaque para o equilíbrio da solução COPS entre eficiência computacional e adesão às normas sociais em cenários dinâmicos.*

Palavras-chave: *roteamento, aproximação robô-humano, navegação social, ambientes dinâmicos, otimização de trajetória.*

PHD. Tese defendida em 30/05/2025. Banca Examinadora: Prof. Douglas G. Macharet (DCC/UFMG), Prof. Armando A. Neto (DEE - UFMG), Prof. Luiz Chaimowicz (DCC - UFMG), Profa. Danielli A. Lima (IELACHS - UFTM), Prof. Marcelo Fantinato (EACH - USP).

1. Introdução

A integração de robôs móveis em ambientes sociais, como museus, shoppings e escritórios, exige que estes dispositivos sejam capazes de navegar de forma eficiente e aceitável do ponto de vista das normas sociais. Historicamente, a interação humano-robô (IHR) tem explorado aplicações em espaços conhecidos, como museus e supermercados, onde robôs guias já demonstram sua utilidade (Al-Wazzan et al. 2016; Gross et al. 2009). No entanto, a crescente automação expande a presença desses dispositivos para uma gama muito mais ampla de ambientes cotidianos, incluindo serviços de bebidas (Langedijk et al. 2020), assistência em ensino (Rosenberg-Kima et al. 2019) e até atividades domésticas (Su 2023), com robôs humanoides já em operação em diversas partes do mundo. Essa transição dos laboratórios para cenários densamente povoados e dinâmicos, onde a convivência com humanos é constante, torna imperativo que os robôs não apenas evitem colisões, mas também compreendam e se adaptem às complexas normas sociais implícitas e explícitas que governam a interação humana (Shiomi et al. 2014).

O planejamento de rotas que respeitem regras sociais, como o espaço pessoal e as dinâmicas de grupo, é um desafio fundamental para a interação humano-robô (IHR). Apesar dos avanços em navegação robótica e compreensão de normas sociais, poucos trabalhos na literatura abordam de forma integrada o problema da abordagem robô-humano sequencial e múltipla em ambientes dinâmicos, caracterizados pela presença densa de indivíduos e obstáculos. As abordagens existentes frequentemente se concentram em cenários estáticos ou na evasão de colisões, sem considerar a complexidade de otimizar a sequência de abordagens a múltiplos grupos, com a interferência de indivíduos em movimento, sob restrições de recursos do robô, e com a adesão a normas sociais de proxêmica. Essa lacuna impede a integração plena de robôs autônomos em contextos sociais complexos, onde a proatividade e a adaptabilidade são essenciais para uma interação natural e eficaz. Este trabalho aborda o problema de planejar rotas adaptativas para um robô móvel autônomo abordar sequencialmente indivíduos e grupos em ambientes 2D dinâmicos com obstáculos, com o objetivo de maximizar o número de abordagens robô-humano bem-sucedidas, respeitando as restrições de recursos do robô. A Figura 1 ilustra um exemplo do problema de roteamento tratado, onde um robô deve planejar um caminho para visitar sequencialmente diferentes grupos em um ambiente com obstáculos e indivíduos não previamente conhecidos em movimento.

1.1. Contribuições

As principais contribuições deste trabalho estão agrupadas de acordo com os cenários abordados:

1. Roteamento em Ambientes Estáticos:

- Propomos uma modelagem inédita para o problema de abordagem sequencial a múltiplos indivíduos como uma instância do Problema Generalizado do Caixeiro Viajante (GTSP), focada em otimizar o comprimento do caminho.
- Publicação: Aline F. F. Silva, Douglas G. Macharet. A Routing-based Strategy to Socially Approach Multiple Individuals in Cluttered Environments. *Latin American Robotics Symposium (LARS)*, 2022. [Qualis-CC B4]

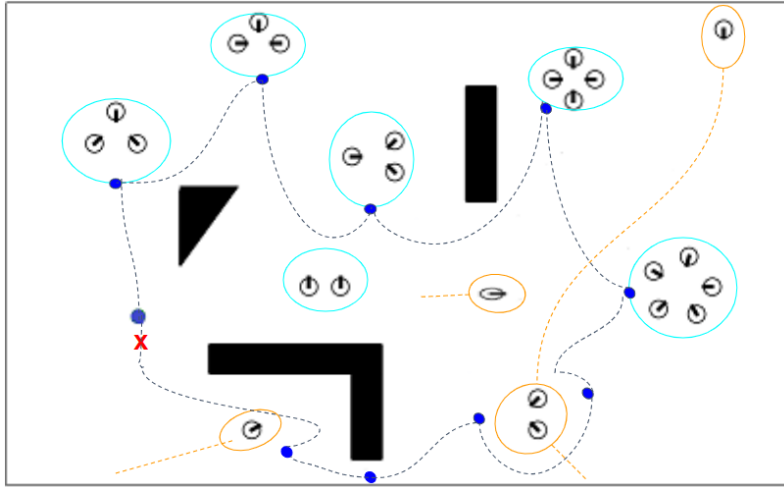


Figura 1. Exemplo do problema de roteamento com abordagem robô-humano em ambiente com obstáculos. O robô deve encontrar uma rota (linha pontilhada) que parta de sua base (X), evite obstáculos (preto) e visite múltiplos grupos, respeitando seus espaços sociais (envoltórias coloridas).

- Para a abordagem a grupos com recursos limitados, o problema é modelado como um Problema de Orientação de Conjuntos (SOP), permitindo maximizar o número de pessoas abordadas sob um orçamento de distância.
- Publicação: Aline F. F. Silva, Luciano E. Almeida, Douglas G. Macharet. Efficiently Approaching Groups of People in a Socially Acceptable Manner in Environments with Obstacles. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2023. [Qualis-CC A1]

2. Roteamento em Ambientes Dinâmicos:

- Desenvolvemos uma metodologia inovadora para navegação socialmente consciente que integra três elementos: (i) um método de segmentação do espaço social baseado em Função Gaussiana Assimétrica (AGF) para delimitar zonas de aproximação; (ii) um sistema de recompensas para guiar o planejamento; e (iii) o uso do método da Faixa Elástica para ajuste dinâmico da trajetória. O problema é modelado como uma instância do Problema de Orientação Agrupado com Subgrupos (COPS).
- Publicações: Aline F. F. Silva, Douglas G. Macharet. Social Space Segmentation for Approaching Tasks. *International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 2024. [Qualis-CC A2]
- EM REVISÃO: Aline F. F. Silva, Douglas G. Macharet. Socially Acceptable Sequential Approaches to Groups in Dynamic Environments. *Journal of Intelligent Service Robotics (JIST)*.

1.2. Formalização do Problema

Considere $\mathcal{E} \subset \mathbb{R}^2$ como um ambiente bidimensional, que pode ser estático ou dinâmico, densamente povoado, caracterizado pela presença de um número significativo de indivíduos e obstáculos, no qual um robô móvel deve navegar e realizar abordagens robô-humano.

Seja $\mathcal{N} = \{\mathbf{n}_1, \dots, \mathbf{n}_h\}$ o conjunto de indivíduos distribuídos espacialmente que podem ser visitados. Cada indivíduo i é representado por uma configuração $\mathbf{n}_i = \langle \mathbf{p}_i, \theta_i \rangle$,

onde $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)$ denota sua posição no espaço e θ_i sua orientação. Os indivíduos estão organizados em grupos disjuntos $\mathcal{C} = \{c_1, \dots, c_g\}$, onde cada grupo c_j é composto por um ou mais membros, isto é, $c_j \subseteq \mathcal{N}$ para todo $j \in \{1, \dots, g\}$, e $c_i \cap c_j = \emptyset$ para $i \neq j$. O robô deve respeitar certas convenções estabelecidas, como evitar invadir o espaço pessoal de um indivíduo i ou o espaço compartilhado de um grupo c_j . Além disso, o ambiente contém um conjunto de obstáculos $\mathcal{O} = \{\mathbf{o}_1, \dots, \mathbf{o}_m\}$, que consiste em barreiras fixas. Cada obstáculo \mathbf{o}_k é representado por sua posição e forma geométrica, ocupando uma região no espaço 2D que deve ser evitada.

É assumido que o ambiente pode conter ainda indivíduos em movimento $i_m \notin \mathcal{N}$, que não foram previamente mapeados. O robô deve ser capaz de reagir a esses indivíduos dinâmicos, evitando colisões e respeitando normas de interação apropriadas. Adicionalmente, o robô possui uma posição base \mathbf{b} , que corresponde ao ponto inicial do caminho. Após visitar os indivíduos ou grupos de interesse, o robô deve retornar a essa posição base. O robô é restrito por um recurso de viagem \mathcal{T}_{max} , que limita a distância total percorrida. O objetivo é determinar um caminho \mathcal{L} adaptável que maximize o número sequencial de indivíduos visitados, respeitando as restrições do ambiente, as configurações dos indivíduos e os recursos disponíveis.

Problema 1. *Roteamento eficiente para abordagem sequencial de indivíduos em ambientes com obstáculos baseado em normas sociais. Seja $\mathcal{E} \subset \mathbb{R}^2$ representando um ambiente bidimensional, estático ou dinâmico, com obstáculos e grupos de indivíduos. Defina-se $\mathcal{C} = \{c_1, \dots, c_g\}$ como o conjunto de grupos disjuntos de indivíduos, onde $c_j \subseteq \mathcal{N}$ indica os grupos que o robô precisa visitar. Adicionalmente, existe um conjunto de obstáculos denotado como $\mathcal{O} = \{\mathbf{o}_1, \dots, \mathbf{o}_m\}$. E o ambiente pode conter indivíduos em movimento i_m que não pertencem ao conjunto mapeado \mathcal{N} , exigindo resposta reativa do robô.*

Este problema envolve não apenas a seleção de um subconjunto otimizado de grupos a serem visitados e a ordenação dessas visitas, mas também a escolha de posições de aproximação adequadas dentro de cada grupo. Além disso, o caminho deve ser planejado de forma a garantir segurança, adaptabilidade às condições do ambiente e conformidade com as regras de aproximação robô-humano estabelecidas.

2. Trabalhos Relacionados

A interação entre robôs e humanos em ambientes dinâmicos exige que os robôs sigam trajetórias eficientes e respeitem normas sociais. A pesquisa em Interação Humano-Robô (IHR) é relativamente recente (Althaus et al. 2004), com foco na proximidade que um robô pode ter de uma pessoa de forma socialmente aceitável. As abordagens nessa área são classificadas pelos tipos de interação (e.g., toque ou não, longo ou curto prazo) (Dautenhahn et al. 2006) e subcampos que tratam de aspectos como proxêmica (Takayama and Pantofaru 2009), abordagem (Koay et al. 2014) e polidez (Sarathy et al. 2019). O comportamento de aproximação é fundamental para robôs sociais, sendo um dos passos mais importantes para iniciar ou manter uma interação bem-sucedida. Questões como "Quais indivíduos ou grupos devem ser visitados?", "Como um grupo deve ser abordado?" e "Onde o robô deve ingressar no grupo?" são centrais nesse contexto.

Muitos desafios da abordagem robô-humano, especialmente navegação e planejamento de rotas, são modelados a partir de problemas clássicos de roteamento, como

o Problema do Caixeiro Viajante (TSP) e suas variantes (Lawler et al. 1985). O TSP, um dos problemas mais antigos e estudados, busca o menor caminho que visite todas as cidades exatamente uma vez e retorne ao início. Dada sua complexidade NP-difícil, algoritmos exatos (como Branch and Bound (Lawler and Wood 1966)) são usados para instâncias pequenas, e heurísticas (como Algoritmos Genéticos (Holland 1992) e Simulated Annealing (Kirkpatrick et al. 1983)) para instâncias maiores. Suas variações incluem o Problema Generalizado do Caixeiro Viajante (GTSP) (Helsgaun 2015), que busca o menor caminho visitando um destino de cada grupo, e o Problema de Orientação (OP) (Golden et al. 1987), que visa maximizar a coleta de prêmios dentro de um limite de tempo ou distância. O Problema de Orientação de Conjuntos (SOP) (Archetti et al. 2018) é uma variação do OP, adaptada para cenários onde os nós são agrupados em subconjuntos.

A abordagem de grupos de indivíduos é mais complexa, exigindo a consideração de dinâmicas sociais, como formação espacial e respeito ao espaço compartilhado. Conceitos como o "espaço-O" (Rios-Martinez 2013) modelam o espaço social em torno de grupos para planejar pontos de encontro, e modelos gaussianos (Silva and Macharet 2019) identificam formações de grupos para calcular trajetórias de aproximação. Além disso, as "formações-F" de Ciolek e Kendon (Ciolek and Kendon 1980) definem padrões espaciais de interação em grupo. Em trabalhos recentes, espaços pessoais e de grupo são representados como funções de custo em um mapa, utilizando Funções Gaussianas Assimétricas e Gaussianas 2D, com adaptação de parâmetros baseada em indivíduos e obstáculos detectados por sensores. A habilidade de navegar próximo a pessoas (Melo and Moreno 2022) e planejar rotas socialmente adequadas é crucial para robôs sociais.

3. Proposta Metodológica

A tese apresenta uma abordagem incremental com três soluções, cada uma construída sobre os conceitos da anterior para lidar com cenários de complexidade crescente.

3.1. Solução 1: Abordagem a Indivíduos com GTSP

O primeiro desafio abordado é o roteamento para visitar indivíduos isolados em um ambiente estático, priorizando a eficiência da rota. Este cenário se alinha naturalmente ao Problema Generalizado do Caixeiro Viajante (GTSP) (Helsgaun 2015), onde o objetivo é encontrar o caminho mais curto que visita um nó de cada um dos múltiplos conjuntos (clusters).

A metodologia é executada em três etapas. Primeiramente, para cada indivíduo, define-se uma nova Região Acessível, uma zona proxêmica semicircular que respeita o espaço pessoal (Hall 1966), delimitando o espaço apropriado para a abordagem do robô. Esta região é então discretizada em um conjunto de possíveis posições-alvo, que formam um *cluster* para o GTSP. Em seguida, utiliza-se um Mapa de Rotas Probabilístico (PRM) (Kavraki et al. 1996) para gerar um grafo de visibilidade que conecta todos os clusters de posições-alvo de forma segura, evitando os obstáculos estáticos do ambiente. Finalmente, a instância GTSP resultante é resolvida utilizando a eficiente heurística Lin-Kernighan (LKH) (Helsgaun 2015) para encontrar a rota de menor custo que visita um alvo de cada indivíduo.

A Figura 2 ilustra esquematicamente estas três etapas, detalhando como a metodologia transforma as informações do ambiente e dos indivíduos em um plano de rota socialmente consciente. Desde a delimitação das zonas de abordagem até a resolução do problema de roteamento, cada componente é interligado para otimizar o caminho do robô em ambientes estáticos.

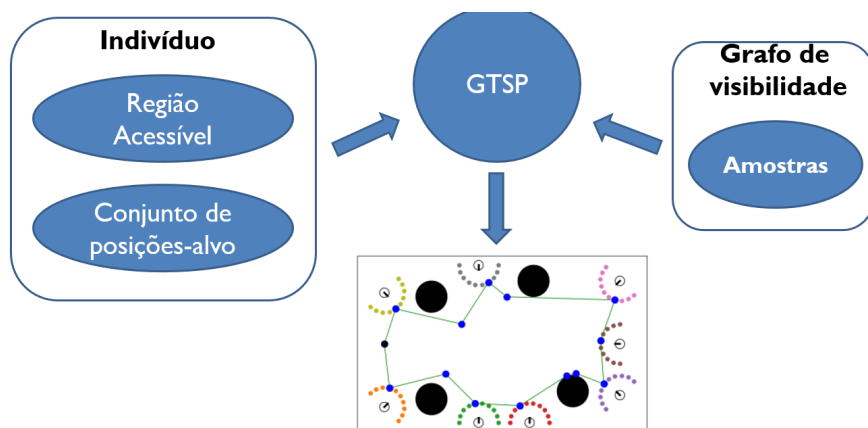


Figura 2. Diagrama esquemático da metodologia para a Solução 1 em ambientes estáticos. Ilustra as etapas de (1) definição da Região Acessível e geração de posições-alvo, (2) construção do grafo de visibilidade via Mapa de Rotas Probabilístico (PRM), e (3) modelagem e resolução do problema como uma instância do Problema Generalizado do Caixeiro Viajante (GTSP).

3.2. Solução 2: Abordagem a Grupos com SOP

A segunda solução avança para um cenário mais complexo: a abordagem a grupos de pessoas, considerando um recurso de viagem limitado (T_{max}), como bateria ou distância máxima. Esta nova restrição muda a natureza do problema de um de caminho mínimo para um de maximização de utilidade, tornando o Problema de Orientação de Conjuntos (SOP) (Archetti et al. 2018) a modelagem ideal.

Nesta abordagem, cada grupo de indivíduos é tratado como um conjunto de potenciais pontos de aproximação. A estrutura espacial desses grupos é modelada para grupos de dois a cinco indivíduos utilizando a teoria das **formações-F** (Ciolek and Kendon 1980), o que permite determinar posições-alvo socialmente adequadas. Um sistema de **recompensas** é introduzido, onde cada grupo recebe um valor proporcional ao seu número de membros. O objetivo do robô passa a ser, então, planejar uma rota que maximize a recompensa total coletada sem exceder o orçamento T_{max} . Para encontrar essa rota, a heurística VNS-SOP (*Variable Neighborhood Search for SOP*) (Pěnička et al. 2019) é aplicada sobre um grafo de visibilidade social, garantindo que o caminho seja livre de colisões e socialmente aceitável. A Figura 3 detalha a arquitetura proposta para a Solução 2, ilustrando como o problema de abordagem a grupos é tratado. O diagrama esquematiza o fluxo desde a representação das formações-F e a discretização das posições-alvo com ganhos associados, passando pela construção de um grafo de visibilidade social, até a resolução via Problema de Orientação de Conjuntos (SOP), com o objetivo de maximizar as recompensas sob as restrições de recursos do robô.

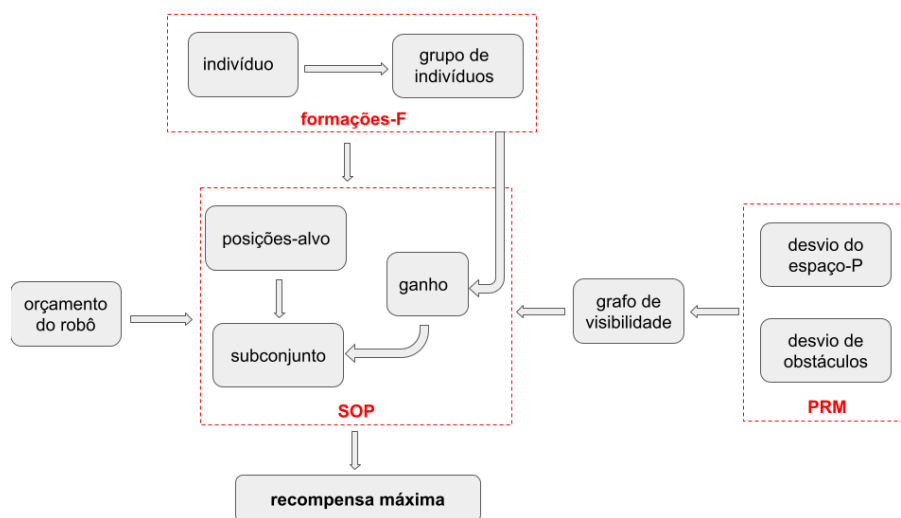


Figura 3. Diagrama metodológico da Solução 2 para a abordagem sequencial de grupos em ambientes estáticos. Apresenta as etapas de modelagem das formações-F, discretização das posições-alvo com atribuição de ganhos, criação do grafo de visibilidade social probabilístico, e a resolução do problema via Problema de Orientação de Conjuntos (SOP), considerando o recurso limitado do robô.

3.3. Solução 3: Abordagem Adaptativa em Ambientes Dinâmicos

Esta é a solução mais completa, projetada para ambientes dinâmicos com a presença de pessoas em movimento. A metodologia, ilustrada na Figura 4, integra três componentes inovadores para alcançar uma navegação que maximize o número de indivíduos visitados enquanto se adapta às mudanças no ambiente.

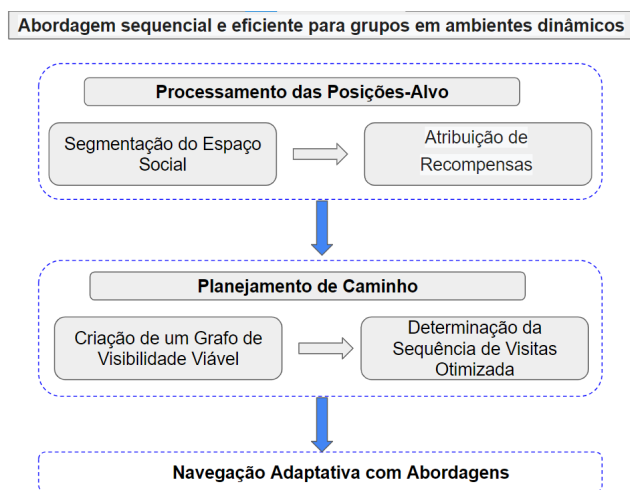


Figura 4. Diagrama da metodologia para roteamento em ambientes dinâmicos.

3.3.1. Segmentação do Espaço Social e Sistema de Recompensas

O primeiro passo é compreender onde um robô pode se aproximar de um grupo de forma a respeitar as regras sociais definidas pela proximica. Para isso, o

espaço social de cada grupo, identificado via Funções Gaussianas Assimétricas (AGF) (Silva and Macharet 2019), é classificado em três categorias: Zona de Aproximação Ótima (OAZ), Aceitável (AAZ) e Não Apropriada (NAZ).

O **Algoritmo 1** formaliza este processo. Para cada grupo, ele calcula os pontos de foco de interação e, para cada ponto na fronteira do espaço social, classifica-o em OAZ, AAZ ou NAZ, com base no seu alinhamento com o campo de visão dos membros do grupo. Posteriormente, o **Algoritmo 2** refina essa classificação, garantindo que nenhum ponto de aproximação esteja localizado em uma posição socialmente inadequada, como as costas de um indivíduo. Este processo de segmentação é demonstrado na Figura 5. As zonas resultantes recebem recompensas distintas (alta, média ou nula), que guiarão a próxima etapa de planejamento.

Algorithm 1 Segmentação do Espaço Social($\mathcal{C}, \partial\mathcal{S}_j$)

```

1: for  $c_j \in \mathcal{C}$  do
2:   Calcule  $M$  e  $\Theta$  para os pares em  $c_j$ 
3:   for  $p_s \in \partial\mathcal{S}_j$  do
4:     Classifique  $p_s$  em OAZ, AAZ, ou NAZ baseado em  $\Omega$  e  $\Theta$ 
5:     if SePontoEstaNasCostas( $p_s, c_j$ ) then
6:       Classifique  $p_s$  como NAZ
7:     end if
8:   end for
9: end for

```

Algorithm 2 SePontoEstaNasCostas(p_s, c_j)

```

1: for  $n_i \in c_j$  do
2:   Calcule o ângulo  $\psi$  de  $p_s$  em relação a  $n_i$ 
3:   Calcule o ângulo oposto  $\delta$  da orientação de  $n_i$ 
4:   if  $\psi$  está dentro da região de  $\delta \pm \omega$  then
5:
6:     return Verdadeiro
7:   end if
8: end for
9:
10: return Falso

```

3.3.2. Planejamento de Rota e Navegação Adaptativa com Abordagem Robô-Humano

Com as posições-alvo e suas recompensas definidas, o planejamento da rota é formulado como uma instância do Problema de Orientação Agrupado com Subgrupos (COPS) (Almeida and Macharet 2023), um modelo de roteamento que se ajusta perfeitamente ao desafio. A solução é encontrada através de um algoritmo de Busca Tabu (Glover 1986), que determina a sequência de visitas que maximiza a recompensa total.

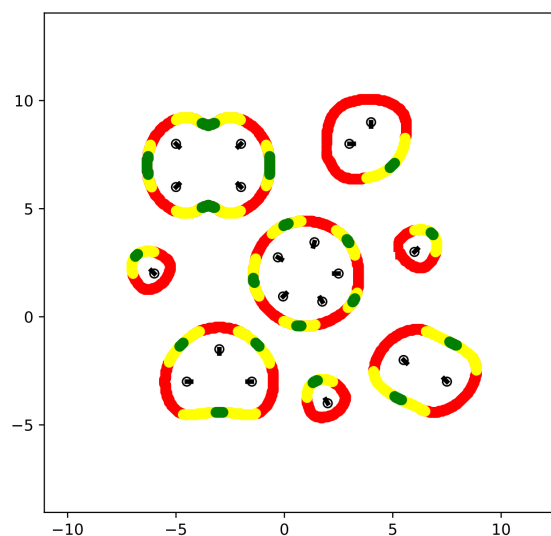


Figura 5. Resultado da segmentação do espaço social para grupos com formações arbitrárias, classificados em regiões Ótima (verde), Aceitável (amarelo) e Não Apropriada (vermelho).

A execução do trajeto em um ambiente imprevisível é gerenciada pelo **Algoritmo 3**, que implementa o método da Faixa Elástica (*Elastic Band*) (). Este algoritmo trata o caminho planejado (Quinlan and Khatib 1993) uma banda elástica que se deforma para contornar obstáculos. Para cada ponto da rota, ele calcula uma força total, composta por forças internas (que mantêm o caminho curto e suave) e forças repulsivas externas (que afastam o caminho de obstáculos estáticos e dinâmicos), além de realizar pausas ao atingir a posição-alvo escolhida para realizar a abordagem. O algoritmo também monitora continuamente o recurso T_{max} disponível. Caso o recurso restante seja insuficiente para garantir o retorno à base, a missão de abordagem é abortada, e o robô planeja uma rota segura de volta, garantindo a integridade da operação.

4. Resultados e Discussão

Os experimentos realizados em simulação validaram a eficácia das três abordagens propostas. Para ambientes estáticos, a análise comparativa demonstrou que a solução GTSP produz rotas com menor comprimento, sendo ideal para cenários que priorizam a eficiência de deslocamento. Em contrapartida, a solução SOP se destacou na maximização da recompensa acumulada, mostrando-se capaz de priorizar inteligentemente a visita a grupos maiores e mais relevantes quando os recursos do robô são limitados.

Nos experimentos dinâmicos, a metodologia completa demonstrou robustez e eficiência. A etapa de segmentação do espaço social alcançou uma precisão média de 80% na classificação de zonas de aproximação, mesmo para grupos com formações arbitrárias e em movimento. A solução final, baseada em COPS com navegação adaptativa, permitiu ao robô planejar rotas ótimas e ajustá-las em tempo real para desviar de pessoas. Em testes com múltiplos obstáculos dinâmicos, o robô obteve uma taxa de sucesso de 75% nas visitas planejadas. A Figura 6 ilustra um desses experimentos, mostrando como o caminho planejado (a) é deformado dinamicamente (b) para que o robô contorne um

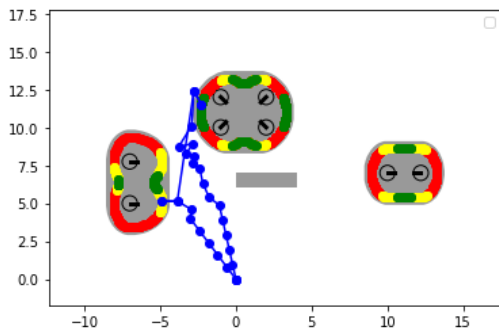
Algorithm 3 Navegação Adaptativa com Abordagem a Grupos(\mathcal{L})

```

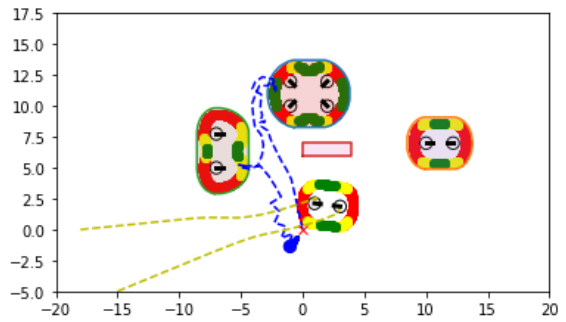
1:  $\mathcal{L}_{\text{adaptativo}} \leftarrow \mathcal{L}$ 
2:  $k \leftarrow 1$ ;  $\text{distancia\_percorrida} \leftarrow 0$ 
3: while  $k \leq n$  do
4:    $\text{converged} \leftarrow \text{Falso}$ ;  $\text{iter} \leftarrow 0$ 
5:   while  $\neg \text{converged} \wedge \text{iter} < \text{max\_step}$  do
6:     {Suavização do caminho com Faixa Elástica} for  $i \leftarrow 1$  to  $(|\mathcal{L}_k| - 2)$  do
7:       Calcule  $F_{\text{total}}$  (forças elástica, repulsão estática e dinâmica) para o ponto  $\mathbf{p}_i$ 
8:        $\mathbf{p}_i \leftarrow \mathbf{p}_i + \delta \cdot F_{\text{total}}$  {Atualiza a posição do ponto}
9:     end for
10:     $\text{iter} \leftarrow \text{iter} + 1$ 
11:    if CaminhoConvergente( $\mathcal{L}_k$ ) then
12:       $\text{converged} \leftarrow \text{Verdadeiro}$ 
13:    end if
14:  end while
15:  for  $\forall \mathbf{p} \in \mathcal{L}_k \setminus \{\mathbf{p}_{\text{alvo}}\}$  do
16:    {Navegação pelo caminho suavizado} while  $\neg \text{DestinoAtingido}(\mathbf{p})$  do
17:      Mova o robô em direção a  $\mathbf{p}$ 
18:      Atualize  $\text{distancia\_percorrida}$  e  $\text{distancia\_restante} = T_{\text{max}} - \text{distancia\_percorrida}$ 
19:      if  $\text{distancia\_restante} < \text{Distância}(\mathbf{p}, \text{base})$  then
20:        Planeje rota para a base e PARE {Retorno por falta de recurso}
21:      end if
22:    end while
23:  end for
24:  {...Lógica para navegar até o ponto-alvo final e realizar a pausa para visita...}
25:   $k \leftarrow k + 1$ 
26: end while
27:
28: return  $\mathcal{L}_{\text{adaptativo}}$ 

```

indivíduo em movimento e complete sua tarefa.



(a) Caminho otimizado planejado.



(b) Trajetória adaptativa executada.

Figura 6. Experimento de navegação adaptativa. (a) A solução COPS planeja o caminho ótimo. (b) Durante a execução, o robô (trajetória azul pontilhada) desvia de um indivíduo em movimento (laranja) para continuar sua missão.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma estrutura completa para o roteamento de robôs em ambientes sociais, com contribuições que vão desde a modelagem do problema com formulações

clássicas de roteamento (GTSP, SOP, COPS) até o desenvolvimento de um método de navegação adaptativa para cenários dinâmicos. As soluções propostas demonstram um balanço eficaz entre eficiência de rota, respeito a normas sociais e adaptabilidade a ambientes dinâmicos.

Apesar dos resultados promissores, o trabalho possui limitações, como a complexidade computacional da solução dinâmica e a validação ter sido realizada exclusivamente em ambientes simulados. Como trabalhos futuros, propõe-se: (i) a incorporação de modelos de predição de movimento humano para melhorar a antecipação do robô; (ii) a integração de outras modalidades de interação, como gestos e fala; e (iii) a validação da metodologia em plataformas robóticas reais com a participação de seres humanos.

Referências

- [Al-Wazzan et al. 2016] Al-Wazzan, A., Al-Farhan, R., Al-Ali, F., and El-Abd, M. (2016). Tour-guide robot. In *2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems (CIICS)*, pages 1–5. IEEE.
- [Almeida and Macharet 2023] Almeida, L. E. and Macharet, D. G. (2023). Clustered orienteering problem with subgroups.
- [Althaus et al. 2004] Althaus, P., Ishiguro, H., Kanda, T., Miyashita, T., and Christensen, H. I. (2004). Navigation for human-robot interaction tasks. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004*, volume 2, pages 1894–1900. IEEE.
- [Archetti et al. 2018] Archetti, C., Carrabs, F., and Cerulli, R. (2018). The Set Orienteering Problem. *European Journal of Operational Research*, 267(1):264–272.
- [Ciolek and Kendon 1980] Ciolek, T. M. and Kendon, A. (1980). Environment and the spatial arrangement of conversational encounters. *Sociological Inquiry*, 50(3-4):237–271.
- [Dautenhahn et al. 2006] Dautenhahn, K., Walters, M., Woods, S., Koay, K. L., Nehaniv, C. L., Sisbot, A., Alami, R., and Siméon, T. (2006). How may i serve you? a robot companion approaching a seated person in a helping context. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*, pages 172–179.
- [Glover 1986] Glover, F. (1986). Tabu search: A tutorial. *Interfaces*, 20(4):74–94.
- [Golden et al. 1987] Golden, B. L., Levy, L., and Vohra, R. (1987). The orienteering problem. *Naval Research Logistics (NRL)*, 34(3):307–318.
- [Gross et al. 2009] Gross, H.-M., Boehme, H., Schroeter, C., Müller, S., König, A., Einhorn, E., Martin, C., Merten, M., and Bley, A. (2009). Toomas: interactive shopping guide robots in everyday use-final implementation and experiences from long-term field trials. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2005–2012. IEEE.
- [Hall 1966] Hall, E. T. (1966). *The Hidden Dimension: Man's Use of Space in Public and Private*. The Bodley Head Ltd.
- [Helsgaun 2015] Helsgaun, K. (2015). Solving the equality generalized traveling salesman problem using the lin-kernighan-helsgaun algorithm. *Mathematical Programming Computation*, 7(3):269–287.
- [Holland 1992] Holland, J. H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. MIT Press, Cambridge, MA.

- [Kavraki et al. 1996] Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J.-C., and Overmars, M. H. (1996). Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(4):566–580.
- [Kirkpatrick et al. 1983] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598):671–680.
- [Koay et al. 2014] Koay, K. L., Syrdal, D. S., Ashgari-Oskoei, M., Walters, M. L., and Dautenhahn, K. (2014). Social roles and baseline proxemic preferences for a domestic service robot. *International Journal of Social Robotics*, 6(4):469–488.
- [Langedijk et al. 2020] Langedijk, R. M., Odabasi, C., Fischer, K., and Graf, B. (2020). Studying drink-serving service robots in the real world. In *2020 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pages 788–793. IEEE.
- [Lawler et al. 1985] Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A., and Shmoys, D. B. (1985). *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. Wiley.
- [Lawler and Wood 1966] Lawler, E. L. and Wood, D. E. (1966). The branch and bound method for discrete programming: An informal survey. *Operations Research*, 14(4):699–719.
- [Melo and Moreno 2022] Melo, F. and Moreno, P. (2022). Socially reactive navigation models for mobile robots. In *2022 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*. IEEE.
- [Pěnička et al. 2019] Pěnička, R., Faigl, J., and Saska, M. (2019). Variable Neighborhood Search for the Set Orienteering Problem and its application to other Orienteering Problem variants. *European Journal of Operational Research*, 276(3):816–825.
- [Quinlan and Khatib 1993] Quinlan, S. and Khatib, O. (1993). Elastic bands: Connecting path planning and control. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 802–807. IEEE.
- [Rios-Martinez 2013] Rios-Martinez, J. (2013). Socially-aware robot navigation : combining risk assessment and social conventions.
- [Rosenberg-Kima et al. 2019] Rosenberg-Kima, R., Koren, Y., Yachini, M., and Gordon, G. (2019). Human-robot-collaboration (hrc): social robots as teaching assistants for training activities in small groups. In *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 522–523. IEEE.
- [Sarathy et al. 2019] Sarathy, V., Arnold, T., and Scheutz, M. (2019). When exceptions are the norm. 8(3):1–21.
- [Shiomi et al. 2014] Shiomi, M., Kanda, T., Imai, M., Ishiguro, H., and Hagita, N. (2014). Towards a socially acceptable collision avoidance for a mobile robot navigating among pedestrians using a pedestrian model. *International Journal of Social Robotics*, 6(3):443–455.
- [Silva and Macharet 2019] Silva, A. D. G. and Macharet, D. G. (2019). Are You With Me? Determining the Association of Individuals and the Collective Social Space. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 313–318.
- [Su 2023] Su, Y. (2023). Artificial intelligence: The significance of tesla bot. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 39:1351–1355.
- [Takayama and Pantofaru 2009] Takayama, L. and Pantofaru, C. (2009). Influences on proxemic behaviors in human-robot interaction. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 5495–5502. IEEE.