



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PESQUISA

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – PIBIC

PIB11814-2022 - Navegação de robôs móveis em formação para missões de escolta com possibilidade de perda de robôs na formação

Área do conhecimento: Engenharias
Subárea do conhecimento: Engenharia Eletrônica

Relatório Final

Período da bolsa: de Setembro de 2022 a Agosto de 2023

Este projeto é desenvolvido com bolsa de iniciação científica PIBIC/CNPQ

Autor: Rodrigo Passos Sousa
Orientador: Eduardo Oliveira Freire

RESUMO

Departamento de Engenharia Elétrica (DEL/CCET/UFS)

Neste projeto, foi investigado um controlador de formação baseado em líder-seguidor para solução da tarefa de escolta de um alvo móvel, o qual atua como líder da formação e os guardiões como seguidores. Nesse sentido, foi desenvolvida uma modelagem do problema com base na capacidade de proteção que cada robô guardião fornece, a partir da qual foi proposto um protocolo de rearranjo da formação que considera a possibilidade de perda de robôs guardiões.

Sumário

1	Introdução	2
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivos Gerais	3
1.1.2	Objetivos Específicos	3
1.2	Estrutura do Relatório	4
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Coordenação de Sistemas com Múltiplos Robôs	5
2.1.1	Caracterização do SMR	5
2.2	Controle de Formação em SMR	6
2.2.1	Estratégias de Controle de Formação	7
2.3	Controle de Formação com a Estratégia Líder Seguidor	9
2.3.1	Modelo Cinemático dos Robôs	9
2.3.2	Modelo Cinemático da Formação	10
2.3.3	Controle $l - \psi$	12
3	Trabalhos Relacionados	15
4	Formação Líder-Seguidor para Tarefa de Escolta	18
4.1	Modelagem e Especificações da Tarefa de Escolta	18
4.1.1	Modelo de Interação dos Robôs	20
4.1.2	Especificações da Escolta	20
4.2	Estratégia de Compressão e Descompressão da formação	22
4.3	Robustez à Perda de Robôs	25
4.4	Desvio de Obstáculo	26
5	Experimentos e Resultados	28
5.1	Experimento 1	29
5.2	Experimento 2	31
5.3	Experimento 3: Perda de Robôs	32
6	Conclusões	35
7	Perspectivas de Trabalhos Futuros	36
8	Atividades Complementares	37
	Referências Bibliográficas	38

Capítulo 1

Introdução

Na natureza, comportamentos coletivos em formação trazem diversas vantagens, como proteção individual contra predadores e fenômenos naturais, além de tornar a execução de tarefas como a procura por alimentos mais eficiente. Do mesmo modo, em robótica, a navegação de vários robôs em formação produz maior robustez e eficiência [1]. Uma atividade típica desempenhada por formações de robôs é a escolta, cujo o objetivo é manter um alvo no centro da formação.

As missões de escolta para Múltiplos Robôs Móveis (MRM) têm um grande potencial de aplicações na área de segurança, nos mais diversos cenários, desde os civis até os militares. Conforme [2], a missão escolta tem por objetivo cercar e manter uma formação ao redor de um alvo de modo a minimizar o perímetro do polígono formado e impedir que algum objeto externo entre na formação.

Na missão de escolta assume-se que a posição do escoltado pode ser estimada ou mensurada. Além disso, maioria dos trabalhos partem da suposição de que os robôs dispõem da capacidade de receber comandos do controlador central, bem como são capazes de estimar as posições dos demais robôs [2].

A escolta, como um subproblema da navegação em formação, pode ser tratada a partir de diferentes abordagens, as quais são comumente categorizadas em estratégias líder-seguidor [3, 4], baseadas em comportamentos [5, 2] e estrutura virtual [6, 7]. Do ponto de vista da tomada de decisão, a depender do grau de autonomia dos robôs, a abordagem pode, ainda, ser caracterizada como centralizada, quando um líder é responsável por centralizar as informações e organizar as ações do grupo, descentralizada quando os robôs possuem total autonomia na tomada de decisão, ou híbrida quando se tem um líder e, ao mesmo tempo, os robôs possuem autonomia em certas tarefas [8].

Um fator bastante importante para a tarefa de escolta é o comportamento da formação frente a obstáculos, pois a quebra da formação pode comprometer a tarefa, dado que, em tese, o escoltado poderia escapar ou ser capturado por intrusos. Nesse contexto, Kitts e Mas, em [7], propõe um controle de formação centralizado para escolta com um controlador de desvio de obstáculo implementado de forma distribuída, a nível de robô, que funciona

como um controlador de alta prioridade, o que pode, em algumas situações, divergir do objetivo da escolta.

Diferente da abordagem anterior, Bispo et al., em [4], procura manter a formação enquanto lida com obstáculos variando a distância entre os robôs e o escoltado. Quando surge um obstáculo os robôs se aproximam do escoltado no intuito de mantê-lo no interior da formação. Ao ultrapassar o obstáculo, os robôs retomam à configuração inicial. Para tal, é utilizado um controlador descentralizado com uma abordagem baseada na definição de um líder (alvo de escolta) e os seguidores (robôs guardiões), os quais seguem o líder de acordo com um padrão de formação escolhido.

Nessa interação, um problema relevante refere-se a situações de perda de agentes, o qual não é discutido por Bispo et al., em [4]. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é estender a abordagem para situações em que há perda de robôs, seja por falhas no hardware, descarga de bateria, dentre outros fatores. Com isso, foi realizado um estudo sobre as formas de reagrupar a formação após a perda de um agente, por meio de uma modelagem, sob o ponto de vista da cobertura de escolta, e proposta a utilização de uma metodologia para desvio de obstáculo como forma de garantir o reagrupamento da formação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este projeto tem como objetivo geral o estudo e a análise de soluções de controle descentralizado em tarefas de escolta com formação escalonável, visando a robustez à perda de robôs na formação.

1.1.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos desse trabalho:

- Realizar revisão bibliográfica sobre navegação em formação com foco nas tarefas de escolta;
- Investigar as soluções de controle descentralizado em diferentes níveis de comunicação;
- Implementar a abordagem proposta por [4];
- Implementar protocolo de escolha de novo líder e rearranjo da formação;
- Realizar experimentos e testes simulados;
- Divulgar os resultados obtidos por meio de relatórios e artigos científicos.

1.2 Estrutura do Relatório

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, em que é discutido conceitos gerais dos Sistemas com Múltiplos Robôs (SMR) e apresentada uma base teórica do controlador estudado neste trabalho. No capítulo 3 são apresentados os trabalhos relacionados. No capítulo 4, é discutida a metodologia proposta nesse trabalho, com uma proposição da modelagem da tarefa de escolta e o protocolo de robustez a perda de robôs. No capítulo 5, são apresentados os experimentos e resultados. No capítulo 6, as conclusões. As perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 7. No capítulo 8, é comentado sobre atividades complementares a esse projeto. Por último, estão as referências bibliográficas.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Coordenação de Sistemas com Múltiplos Robôs

Nas últimas décadas, diferentes configurações de Sistemas com Múltiplos Robôs (SMR) tem sido propostos visando agregar robustez e eficiência, bem como resolver problemas não solucionáveis com a aplicação de apenas um robô. Nesse contexto, surge o problema da coordenação dos robôs num SMR.

Conforme definido por Carvalho em [9], o problema de coordenação de SMRs pode ser entendido como a obtenção de uma estratégia ou controlador que coordena as ações dos robôs do sistema com a finalidade de alcançar um objetivo global especificado, levando em conta a dinâmica do ambiente onde o sistema atua.

Considerando a variedade de técnicas com as mais variadas topologias existentes na literatura, sistemas homogêneos ou não homogêneos, com comunicação explícita ou implícita, centralizado ou descentralizado, é de suma relevância uma caracterização da área. Na próxima subseção é apresentada uma caracterização de SMR proposta por [8].

2.1.1 Caracterização do SMR

Em [8], Farinelli, Iocchi e Nardi apresentam uma taxonomia para SMR com foco nos mecanismos de coordenação, organizada em dimensões conforme a Figura 2.1

A dimensão de *Cooperação* se aplica a sistemas cujos robôs operam juntos na execução de alguma tarefa global. Já a dimensão de *Conhecimento* está relacionado ao fato dos robôs, individualmente, terem ou não ciência da existência dos demais robôs.

No que se refere a dimensão de *Orquestramento*, as ações executadas por cada robô, levam em conta as ações executadas pelos demais robôs, de modo a produzir um comportamento global coerente e coordenado. Quando o orquestramento se baseia em algum tipo de *protocolo de coordenação*¹ ela é rotulada como *forte*, caso contrário como *fraca*.

¹Conjunto de regras bem definidas que delimitam como cada agente deve se comportar ao interagir com os demais agentes.

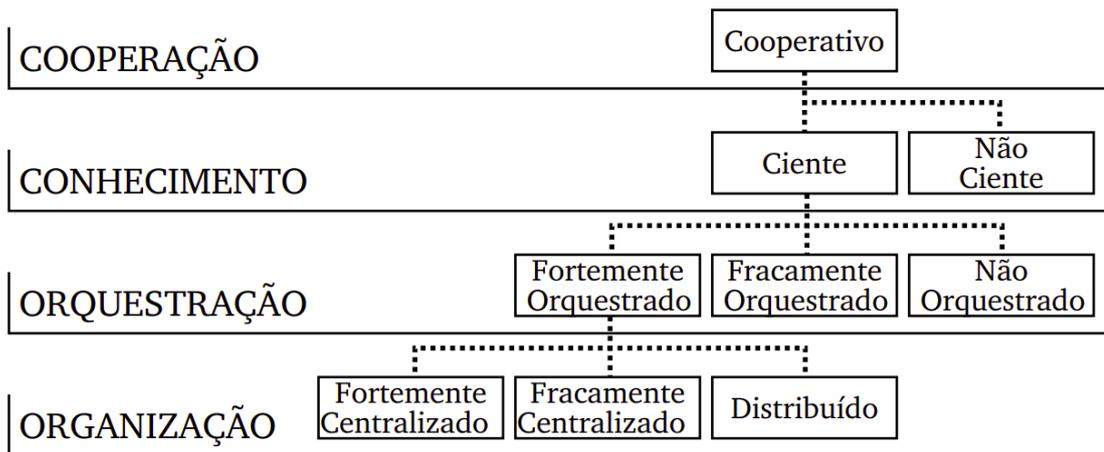


Figura 2.1: Taxonomia proposta em [8]

Por fim, a dimensão de *Organização* denota do nível de organização do SMR, que pode ir de *Centralizado*, onde um agente (Computador, robô...) comanda todos os outros, à *Distribuído*, quando cada agente possui seu controlador independente.

Note que alguns níveis da taxonomia da Figura 2.1 não se conecta com dimensões inferiores, por exemplo, se um sistema é *fracamente* ou *não orquestrado*, a dimensão de organização é inexistente nesse sistema. Da mesma forma que, quando se diz que um SMR é distribuído, subtende-se que o sistema é cooperativo, ciente e fortemente coordenado.

Dimensão do Sistema

Conforme definido em [8] a dimensão do sistema é independente das demais e está relacionada às características de hardware e software do SMR.

Para que seja possível a cooperação entre os robôs é frequentemente necessário algum nível de comunicação entre os agentes. Nesse sentido, [8] dividem os mecanismos em *comunicação explícita* e *implícita*. Na *explícita*, os robôs possuem hardware dedicado para troca de mensagens entre os agentes, enquanto a *implícita* as informações são passadas por meio das alterações que os agentes causam no meio.

Os SMRs podem, ainda, serem constituídos por robôs com as mesmas características de hardware e software, os quais são ditos *homogêneos*, ou com alguma diferença em hardware ou software, e nesse caso são chamados de *heterogêneos*.

2.2 Controle de Formação em SMR

No controle de formação em SMR, o objetivo da tarefa é coordenar a equipe de robôs para navegar no ambiente mantendo algum padrão estrutural de posicionamento dos robôs. Na Figura 2.2 são apresentados alguns padrões estruturais de formação discutidos em [10].

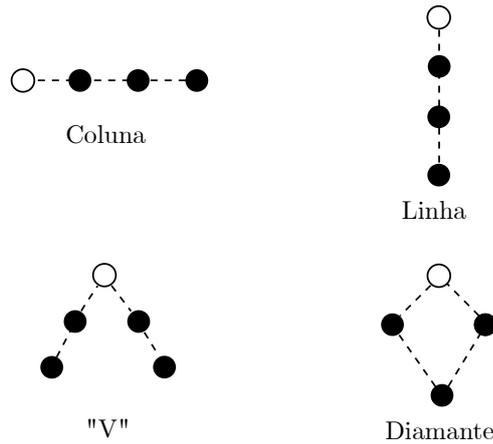


Figura 2.2: Alguns tipos de formação

A formação em coluna é adequada para missões para cobertura de área, como em varredura de minas ou mapeamento, por exemplo. Já a formação em linha pode ser útil em ambientes restritos.

As formações em V e Diamante são aplicadas em contextos mais gerais, possui boa visão da situação dos robôs vizinhos, ao mesmo tempo que uma comunicação fácil e direta pode ser estabelecida dentro da formação.

Note que um módulo de gerenciamento de tarefas, por exemplo, pode atuar de modo a ajustar a formação a um padrão conveniente para cumprir requerimentos específicos do ambiente ou da missão. Por exemplo, dada uma formação em V frente a uma passagem estreita, para evitar colisões, convém modificar a formação para um padrão linear.

2.2.1 Estratégias de Controle de Formação

Varias abordagens de controle tem sido propostas para alcançar os comportamentos de formação em cenários como:

- Geração e manutenção da formação: os robôs começam posicionados aleatoriamente no mapa e uma vez alcançada as posições designadas da formação, a formação deve ser mantida;
- Manutenção da formação durante o rastreamento da trajetória: O padrão da formação deve ser mantido enquanto a formação opera seguindo alguma trajetória especificada;
- Formação de padrão variável: os robôs devem manter a formação enquanto seguem determinada trajetória, ao mesmo tempo que possuem a capacidade de variar o padrão da formação e voltar ao padrão original com a finalidade de evitar obstáculos.

Dentre as abordagens, destacam-se as **baseadas em comportamentos, estrutura virtual e líder seguidor**.

Baseadas em Comportamentos

O controle de formação baseado em comportamentos foi inicialmente proposto por Balch e Arkin [5]. Eles resolvem o controle de formação usando funções de controle com vetores ponderados, o qual é capaz de gerar comandos de controle baseados em vários tipos de missões da formação. Considerando os requerimentos gerais da tarefa, foram propostos 4 esquemas de controle (ou comportamentos): *move-to-goal*(u_{MG}), *avoid-static-obstacle*(u_{AO}), *avoid-robot*(u_{AR}) e *maintain-formation*(u_{MF}). A cada comportamento é atribuído um ganho determinado pela especificidade da tarefa e o comportamento final é dado pela combinação linear dos comportamentos,

$$u = a_1 \cdot u_{MG} + a_2 \cdot u_{AO} + a_3 \cdot u_{AR} + a_4 \cdot u_{MF}, \quad (2.1)$$

em que pesos a_i representam o grau de importância do respectivo comportamento para a tarefa em questão.

A composição de comportamentos permite que colisões com os obstáculos ou outros robôs sejam evitadas ao mesmo tempo que os robôs atuam para manter a formação. Nesse sentido, do ponto de vista prático trata-se de uma abordagem superior às demais [11]. Entretanto, o projeto dos controladores não se baseiam nas características cinemáticas e dinâmicas do robô, o que dificulta a prova matemática de estabilidade e torna complexa a justificativa teórica da performance do controlador.

Estrutura Virtual

A abordagem baseada em estrutura virtual foi inicialmente proposta por Tan e Lewis [12]. Tal abordagem é definida como uma coleção de veículos que mantém um rígido relacionamento geométrico com relação aos outros e a um sistema de referência.

O principal conceito por trás dessa abordagem é considerar a formação como um único corpo rígido, de modo que os movimentos projetados para tal corpo sejam convertidos em movimentos para cada robô.

A principal vantagem dessa abordagem é a fácil coordenação do comportamento do grupo e a formação rígida durante as manobras. No entanto, é importante destacar que as estruturas virtuais têm suas limitações, sobretudo quando a formação necessita ser reconfigurada com frequência, como em situações de desvio de obstáculo ou passagens estreitas, pois exigem manter a mesma estrutura em todos os momentos.

Líder-Seguidor

Na estratégia líder-seguidor, um dos robôs é designado como líder do grupo, de modo que seu estado é usado como referência para os demais robôs, os quais são chamados de seguidores.

O padrão da formação é construído a partir da manutenção, por parte dos seguidores j , da distancia L_{ij}^d e pose angular ψ_{ij}^d desejadas com relação ao líder i , conforme a Figura 2.3. As variáveis L_{ij} e ψ_{ij} , são, respectivamente, a distancia e pose angular atual do seguidor j , com relação ao líder i .

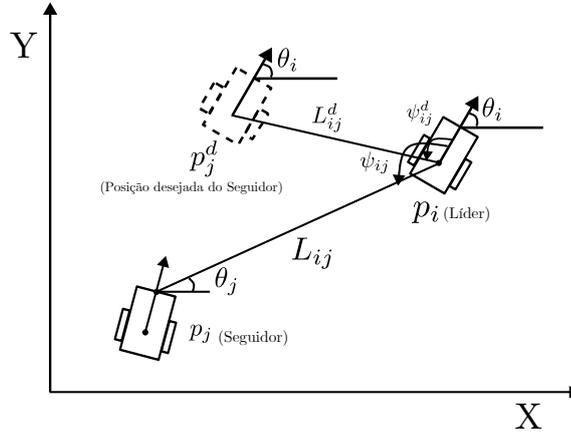


Figura 2.3: Abordagem de controle baseado em estratégia líder-seguidor

A tarefa de controle é obter as velocidades lineares e angulares para os seguidor que zerem o erro de distância e ângulo para o líder tal que,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (L_{ij} - L_{ij}^d) = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\psi_{ij} - \psi_{ij}^d) = 0.$$

Uma das principais vantagens desta abordagem é a flexibilidade em situações que exigem reconfiguração da formação, além de ser fácil de projetar e implementar. Em contrapartida, a formação não é robusta a falhas do líder [11].

2.3 Controle de Formação com a Estratégia Líder Seguidor

Nesta seção é apresentada em detalhes a formulação das leis de controle para robôs do tipo tração diferencial para o controle cinemático da formação segundo uma abordagem baseada em Líder-Seguidor, a qual foi utilizada nesse trabalho. Nesse sentido, a partir dessa seção, líder e escoltado (referindo-se ao alvo de escolta) são tratados de forma indistinta, já que, em [4], o escoltado é a referência da formação.

2.3.1 Modelo Cinemático dos Robôs

O modelo de SMR usado nesta pesquisa é do tipo homogêneo, em que todos os robôs possuem as mesmas características. Nesse sentido, para todos os robôs, inclusive o es-

coltado, foi adotado o mesmo modelo cinemático do tipo tração diferencial, conforme a Figura 2.4.

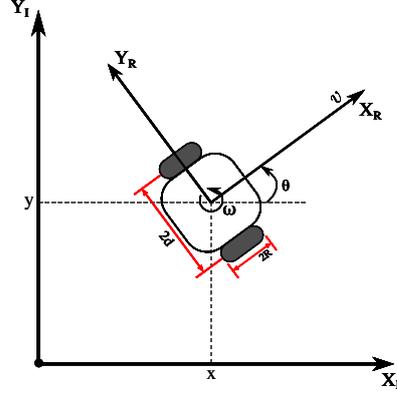


Figura 2.4: Modelo cinemático dos Robôs.

O modelo cinemático é obtido por meio da relação das velocidades no sistema de referência do robô $(\dot{x}_r, \dot{y}_r, \dot{\theta})$, com as velocidades deste com referência global $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$. Devido a restrição física do robô tipo tração diferencial, $\dot{y}_r = 0$, dessa forma,

$$v = \dot{x}_r \quad \text{e} \quad \omega = \dot{\theta}. \quad (2.2)$$

As velocidades da equação (2.2), relacionam-se com as velocidades no sistema de referência global por meio de uma rotação no sistema de coordenadas do robô, de modo que,

$$\dot{x} = v \cos \theta, \quad \dot{y} = v \sin \theta, \quad \omega = \dot{\theta}. \quad (2.3)$$

2.3.2 Modelo Cinemático da Formação

O controlador proposto por Desai [3], é feito com base no modelo cinemático da formação, o qual parte da consideração de um ponto P alocado a uma distância fixa d do eixo do robô, a qual, neste projeto, foi considerada igual a metade da distância entre as rodas, considerando um robô quadrado, conforme ilustrado na Figura 2.5.

O ponto $P = (x_i, y_i)$ é usado como referência para construção do modelo da formação e,

$$P = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

O objetivo do controle é manter os robôs seguidores R_i em uma posição relativa desejada com o escoltado R_e (em conformidade com a proposição original o escoltado pode ser visto como o líder da formação), em termos de distância l_{ei} (definida como distância do escoltado ao ponto P_i) e ângulo ψ_{ei} (entre a reta que liga o escoltado ao ponto P_i e

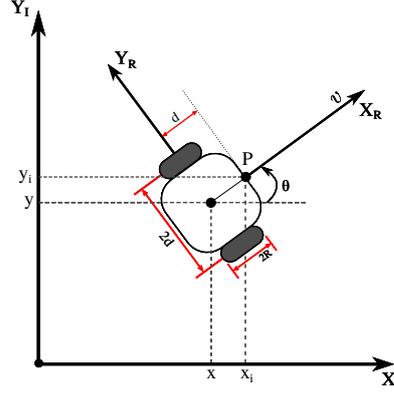


Figura 2.5: Representação linearizada do veículo.

a direção do robô escoltado), conforme a Figura 2.6. Tal abordagem é conhecida como controle $l - \psi$.

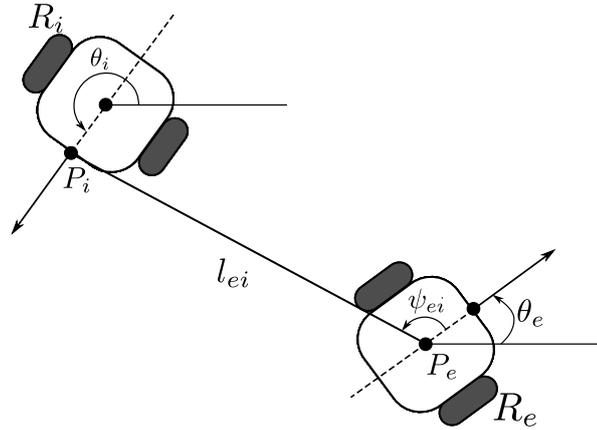


Figura 2.6: Notação para o controle $l - \psi$.

Na Figura 2.6, são definidos os pontos $P_i = (x_i, y_i)$ e $P_e = (x_e, y_e)$, a partir dos quais obtêm-se os seguintes vetores ortonormais,

$$\vec{l}_{ei} = \frac{1}{l_{ei}} \begin{bmatrix} x_i - x_e \\ y_i - y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{ei} \\ \sin \phi_{ei} \end{bmatrix} \quad e \quad (2.5)$$

$$l_{ei} \vec{\phi}_{ei} = \frac{1}{l_{ei}} \begin{bmatrix} -(y_i - y_e) \\ x_i - x_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_{ei} \\ \cos \phi_{ei} \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

em que, $l_{ei} = \|P_i - P_e\|$ e $\phi_{ei} = \psi_{ei} + \theta_e$.

A partir disso, um modelo cinemático da formação é construído com base nas variáveis l_{ei} e ψ_{ei} , por meio da projeção das velocidades do robô escoltado e do robô seguidor nos vetores das equações (2.5) e (2.6). Para tal, define-se,

$$\vec{u}_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \cos \theta_i - d\omega_i \sin \theta_i \\ v_i \sin \theta_i + d\omega_i \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad e \quad \vec{u}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_e \cos \theta_e \\ v_e \sin \theta_e \end{bmatrix},$$

em que, v_e e v_i são as velocidades lineares, definidas na direção X_R (Figura 2.4), dos robôs R_e e R_i , respectivamente.

A composição das velocidades na direção do vetor \vec{l}_{ei} , define a equação cinemática da variável l_{ei} ,

$$\begin{aligned} \dot{l}_{ei} &= \langle \vec{l}_{ei}, \vec{u}_i \rangle + \langle \vec{l}_{ei}, \vec{u}_e \rangle \\ \dot{l}_{ei} &= \begin{bmatrix} \cos \phi_{ei} & \sin \phi_{ei} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_i \cos \theta_i - d\omega_i \sin \theta_i \\ v_i \sin \theta_i + d\omega_i \cos \theta_i \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} \cos \phi_{ei} & \sin \phi_{ei} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_e \cos \theta_e \\ v_e \sin \theta_e \end{bmatrix} \\ \dot{l}_{ei} &= v_i \cos \gamma_{ei} + d\omega_i \sin \gamma_{ei} - v_e \cos \psi_{ei}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

em que $\gamma_{ei} = \psi_{ei} + \theta_e - \theta_i$.

De forma análoga, a equação cinemática da variável ψ_{ei} é definida a partir da composição das velocidades dos robôs na direção do vetor $\vec{\phi}_{ei}$,

$$\begin{aligned} l_{ei}\dot{\phi}_{ei} &= l_{ei}(\dot{\psi}_{ei} + \omega_e) = \langle \vec{l}_{ei}, \vec{u}_i \rangle + \langle \vec{l}_{ei}, \vec{u}_e \rangle \\ l_{ei}\dot{\psi}_{ei} &= \langle \vec{l}_{ei}, \vec{u}_i \rangle + \langle \vec{l}_{ei}, \vec{u}_e \rangle - l_{ei}\omega_e \\ l_{ei}\dot{\psi}_{ei} &= \begin{bmatrix} -\sin \phi_{ei} & \cos \phi_{ei} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_i \cos \theta_i - d\omega_i \sin \theta_i \\ v_i \sin \theta_i + d\omega_i \cos \theta_i \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} -\sin \phi_{ei} & \cos \phi_{ei} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_e \cos \theta_e \\ v_e \sin \theta_e \end{bmatrix} - l_{ei}\omega_e \\ \dot{\psi}_{ei} &= \frac{v_e \sin \psi_{ei} - v_i \sin \gamma_{ei} + d\omega_i \cos \gamma_{ei} - l_{ei}\omega_e}{l_{ei}}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

Uma terceira equação cinemática, usada em [4] refere-se à orientação relativa do escoldado com relação ao seguidor R_i , $\theta_{ei} = \theta_e - \theta_i$, definida por:

$$\dot{\theta}_{ei} = \omega_e - \omega_i. \quad (2.9)$$

As equações (2.7), (2.8) e (2.9) descrevem a cinemática da formação, de modo que o estado do sistema é $s_i = \begin{bmatrix} l_{ei} & \psi_{ei} & \theta_{ei} \end{bmatrix}^T$.

2.3.3 Controle $l - \psi$

A partir do modelo cinemático, são definidas leis de controle que respeitam a dinâmica de convergência desejada para as variáveis $l - \psi$. Desai, em [3], propõe uma lei de controle que garanta uma convergência exponencial para essas variáveis, o que leva a um dinâmica

do tipo,

$$\dot{l}_{ei} = \alpha_1(l_{ei}^d - l_{ei}) \quad (2.10)$$

$$\dot{\psi}_{ei} = \alpha_2(\psi_{ei}^d - \psi_{ei}), \quad (2.11)$$

em que, l_{ei}^d e ψ_{ei}^d são os valores desejados de posição relativa para o seguidor R_i . As equações (2.10) e (2.11) produzem uma linearidade entre as variáveis de controle por meio da realimentação, uma conhecida como *feedback linearization*.

Por cinemática inversa, obtêm-se as seguintes relações para v_i e w_i ,

$$\begin{cases} w_i = \frac{\cos \gamma_{ei}}{d} \cdot q_{ei} \\ v_i = p_{ei} - d \cdot w_i \tan \gamma_{ei} \end{cases}, \quad (2.12)$$

em que, $q_{ei} = \alpha_2 l_{ei}(\psi_{ei}^d - \psi_{ei}) - v_e \sin \psi_{ei} + l_{ei} \omega_e + p_{ei} \sin \gamma_{ei}$ e $p_{ei} = \frac{\alpha_1(l_{ei}^d - l_{ei}) + v_e \cos \psi_{ei}}{\cos \gamma_{ei}}$. Os parâmetros α_1 e α_2 são as constantes de controle para l e ψ , respectivamente.

Estimação dos Estados e das Velocidades do Líder

Os estados dos sistema $[l_{ei} \ \psi_{ei} \ \theta_{ei}]^T$, cuja as variáveis definem a estrutura da formação, podem ser estimados por sensores de bordo como por sensores ultrassônicos, LiDAR e câmeras, por exemplo. Em [13] e [14] a localização do líder e estimação dos estados são feitas usando um padrão, como ilustrado na Figura 2.7, o qual é detectado pelo seguidor por meio de uma câmera. Essa informação, é usada em [14] para a proposição de um controlador para guiar o robô seguidor no rastreamento do líder.

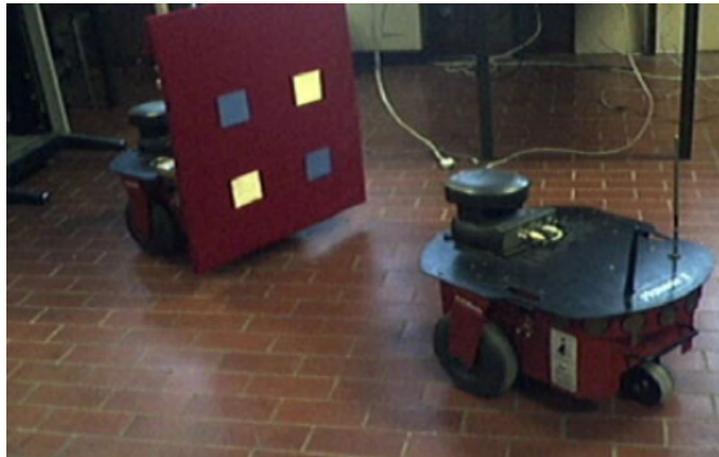


Figura 2.7: Imagem retirada de [14].

Além disso, [14] discute uma forma de estimar a velocidade linear do líder, cujo conhecimento é necessário para implementação do controlador, com base no modelo cinemático da formação e nas informações dos sensores. Da mesma forma, a equação de controle

(2.12), demanda informação das velocidades v_e e w_e , as quais também podem ser estimadas com base no modelo cinemático da formação,

$$\widehat{v}_e = \frac{-\left(\frac{l_{ei}^{(k)} - l_{ei}^{(k-1)}}{\Delta t}\right) + v_i \cos \gamma_{ei} + d\omega_i \sin \gamma_{ei}}{\cos \psi_{ei}}, \quad (2.13)$$

$$\widehat{\omega}_e = \frac{-l_{ei}^{(k)} \left(\frac{\psi_{ei}^{(k)} - \psi_{ei}^{(k-1)}}{\Delta t}\right) + \widehat{v}_e \sin \psi_{ei}^{(k)} - v_i \sin \gamma_{ei} + d\omega_i \cos \gamma_{ei}}{l_{ei}^{(k)}}, \quad (2.14)$$

em que, \widehat{v}_e e $\widehat{\omega}_e$ são as estimativas das velocidades linear e angular, respectivamente, Δt é o tempo de amostragem do sensor, e $\frac{l_{ei}^{(k)} - l_{ei}^{(k-1)}}{\Delta t}$ e $\frac{\psi_{ei}^{(k)} - \psi_{ei}^{(k-1)}}{\Delta t}$ são estimativas de \dot{l}_{ei} e $\dot{\psi}_{ei}$, respectivamente, utilizando uma amostra atual k e uma passada $k - 1$ de l_{ei} e ψ_{ei} .

Note que, o controlador (2.12), a princípio, pode ser implementado em n seguidores referenciados pelo mesmo líder. Além disso, pode ser feito um encadeamento ao considerar diferentes líderes na formação, de modo que um robô seguidor pode servir de referência e, portanto, atuar como líder de outro robô.

Consideração da Dinâmica do Robô

O controlador (2.12) é classificado como Controlador Cinemático, pois utiliza apenas o modelo cinemático do robô R_i . No entanto, o modelo cinemático não considera a massa e inercia do robô que será controlado, logo, não há garantias de que os comando de velocidades calculados pelo controlador serão efetivamente executados. Isso produz um erro de rastreamento de velocidades, pois há uma diferença entre as velocidades definidas pelo controle cinemático e as executadas na prática.

Para reduzir o erro de rastreamento de velocidades, um segundo *loop* de controle pode ser utilizado, o qual atua variando a aceleração para reduzir o erro de velocidade e tem como *setpoints* as velocidades obtidas pelo controle cinemático. Nesse sentido, há uma dupla realimentação, a primeira dada pelo controlador cinemático, cujas as velocidades são *setpoints* para um controlador de compensação da dinâmica, num esquema conhecido como cascata de controladores [15].

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

A escolta robótica pode ser caracterizada como o controle cooperativo de um SMR que tem como fim o envolvimento do alvo de escolta por parte dos robôs guardiões para a proteção do alvo. Esse tipo de controle de envolvimento (*Enclosing Control*) aparece na literatura sob diferentes cenários: com alvo único, múltiplos alvos, alvos estáticos ou em movimento.

Em [16, 2], Antonelli et al. propõem um SMR centralizado com uma estratégia de controle baseada em comportamentos para solucionar a tarefa de escolta de um único alvo em movimento. Foram realizados experimentos práticos que atestaram a robustez da escolta à perda de robôs, bem como a falhas momentâneas de comunicação.

Mas et al. [17], utilizam uma abordagem baseada em estrutura virtual para solucionar missões de escolta com a aplicação de campos potenciais [18] para desvio de obstáculo a nível de robô. Por se tratar de uma abordagem centralizada e baseada em estrutura virtual, o controle da formação é pouco robusto.

Os SMR distribuídos são mais robustos a falhas de comunicação e mal funcionamento dos robôs, se comparado com os centralizados, ademais, possui menor demanda computacional. Por causa disso, costumam ser alvos do maior número de pesquisas [8]. Nesse sentido, [19, 20, 21] abordam soluções distribuídas e utilizam uma abordagem baseada em consenso para organizar a formação de forma uniforme ao redor do alvo.

Falconi, Goyal e Martinoli, em [22], propõem uma solução baseada em *feedback* de controle Laplaciano (baseado em grafos) com uma modificação que leva em conta as restrições cinemáticas de um robô de tração diferencial. Na formulação da abordagem para a escolta, é considerado que a interação entre os seguidores, produzem um comportamento de manter a formação, e os seguidores com o líder, o comportamento de cercar o alvo, no fim é feita uma ponderação entre tipos de interações de modo a chavear suavemente os comportamentos.

Montijano et al., em [23], considera o problema do cercamento sob a hipótese de incerteza no conhecimento da posição do alvo. Para tal, cada robô modela seu conhecimento da localização do alvo por meio de uma distribuição gaussiana, ou seja, com um valor

esperado da localização do alvo e a respectiva matriz de covariância. Para o cumprimento da tarefa é adotada uma solução baseada em consenso, para o caso em que os robôs estimam a posição segundo um mesmo modelo e com modelos diferentes.

Uma abordagem que não faz uso de comunicação explícita entre os robôs é apresentada em [24], onde consideram-se robôs não-holonômicos com informações sensoriais apenas referentes a direção. Neste trabalho, Zheng et al. consideram cenários de cercamento com um único robô e com cooperação entre mais de um robô, em ambos os casos o alvo é considerado estático, sendo pontual ou um disco rígido.

Em [25], considera-se um problema em que múltiplos defensores cooperativos precisam capturar um evasor que está tentando escapar de uma região circular. Os defensores precisam trabalhar em conjunto para confinar o evasor e impedi-lo de escapar, enquanto o evasor tenta encontrar uma rota de fuga. O artigo apresenta uma formulação matemática para esse problema e discute possíveis abordagens para resolvê-lo.

Para o caso de múltiplos alvos móveis, [26] resolve o problema chamado vigilância de perímetro usando uma abordagem que consiste de duas etapas: planejamento descentralizado da movimentação de uma estrutura virtual (limitada a uma elipse) e controle descentralizado para os robôs manterem a formação. Em [27, 28], é estudado uma situação de controle de formação líder-seguidor em que os seguidores são controlados de modo que os líderes permaneçam dentro da geometria formada pela interpolação das posições dos seguidores.

Em [29], as interações entre os agentes e os agentes com o alvo são modeladas pela teoria algébrica de grafos. A partir disso, a posição do alvo é estimada de forma análoga ao problema de *rendezvous*. Já o controlador se baseia em campo vetorial, com a definição de um vetor na direção do alvo e a um ortogonal a este, a partir dos quais a lei de controle é obtida.

Para levar em conta a característica dinâmica dos robôs na escolta, [30, 31] modelam os robôs como sistemas de Euler-Lagrange e controlam os robôs segundo uma cascata de controladores. O controle cinemático feito por meio da composição de comportamentos de desvio de obstáculo e cumprimento da escolta usando uma abordagem baseada em espaço nulo (*Null-Space-Based Behavioral* - NSB) como em [16, 2], e o controle dinâmico é resolvido por meio de controle adaptativo. A análise de estabilidade também é discutida nesses trabalhos.

Hasan et al., em [32], utiliza aprendizado por reforço para treinar modelos de rede neural profunda usados como controladores para os agentes escoltadores realizarem missões de escolta em ambientes com muitos obstáculos.

Em missões de escolta, a cobertura de monitoramento das formações está intimamente relacionada às suas habilidades de escolta (por exemplo, monitoramento ambiental ou proteção de alvos), característica que é raramente estudada na literatura. Uma solução da missão de escolta baseada na cobertura de proteção do alvo é proposta em [33]. Nela, é

proposta uma estratégia baseada em comportamentos, em que são definidos dois comportamentos básicos, o primeiro é um vetor na direção do centroide dado pelo SLACS (*Sample Lloyd Area Coverage System* [34]), a direção que maximiza a cobertura, e o segundo é um vetor de repulsão para manter uma distância segura para o alvo de escolta. Apesar de poder ser implementada de forma distribuída a prova de estabilidade é complexa. Mais recentemente, em [35], é proposta uma metodologia de controle de robôs subaquáticos para escolta, na qual é utilizado uma abordagem de controle baseada em campos potenciais, que permite a compressão da formação na presença de obstáculos (assim como em [4]), bem como possibilita que os robôs também se movimentem aleatoriamente ao redor do alvo de escolta mantendo a forma da formação, com isso demonstra-se uma melhora da cobertura de escolta em comparação com formações fixas, em que a cobertura é considerada em termos do volume monitorado por cada robô.

No que se refere a considerações sobre problemas práticos, como a ocorrência de falhas nos robôs da formação, Kamel, Yu e Zhang, em [36], considera cenários de perda completa ou parcial de robôs e apresenta metodologias de atuação para rearranjo e compensação da formação. Em [37], é proposta uma modelagem do canal de comunicação dos robôs para analisar o impacto das imperfeições do canal na navegação em formação dos robôs. Nessa linha, [38] realiza a simulação da perda de pacotes na comunicação entre os robôs da formação e observa considerável influência na performance (devido aos erros na estimativa da posição do líder), baseado nisso é proposto o uso de um tipo de rede neural para prever a posição do líder de modo a garantir maior robustez do controle.

Neste contexto, esta pesquisa visa dar continuidade aos resultados de [4], pensando no que acontece com a escolta dada a possibilidade de perda dos robôs guardiões. Nesse sentido, foi proposto uma modelagem para a cobertura de escolta considerando os robôs homogêneos, a partir da qual a heurística de compressão e descompressão da formação foi ajustada e a robustez à perda de robôs foi discutida.

Capítulo 4

Formação Líder-Seguidor para Tarefa de Escolta

Conforme mencionado no Capítulo 3, é frequente na literatura SMR, proposições de controladores para cooperação dos robôs na tarefa de cercamento de alvo. Quando o alvo é um tratado como um objeto valioso ou perigoso, o objetivo dos controladores é minimizar os espaços de fuga durante a navegação do alvo. Nesse contexto, [4], assim como [2], observa tal cenário como um problema de escolta e utiliza o controlador (2.12) considerando o alvo de escolta como o líder da formação e, além de considerar 3 robôs protetores como seguidores e distribuí-los de forma uniforme em torno do alvo, propõe um mecanismo de adaptação da escala da formação visando minimizar os espaços de fuga com as alterações no ambiente.

Nesse sentido, um aprofundamento na abordagem de [4] e algumas especificações da escolta são discutidos neste capítulo.

4.1 Modelagem e Especificações da Tarefa de Escolta

Para a modelagem do problema de escolta sob o ponto de vista do controle de formação, o alvo de escolta R_e é definido como líder da formação e os robôs escoltadores R_i , com $i = \{1, 2, 3\}$, como seguidores, em uma configuração conforme ilustrado na Figura 4.1. Os parâmetros l_{ei} e ψ_{ei} descrevem a forma da formação e são definidos de acordo com a Figura 2.3.

O alvo de escolta é modelado como um robô do tipo tração diferencial e descreve uma navegação no sentido deliberativo. Enquanto os escoltadores, também modelados como robôs de tração diferencial, realizam a navegação com base no controlador (2.12), posicionando-se na formação de acordo com os *setpoints* l_{ei}^d e ψ_{ei}^d .

A configuração desejada da formação é definida pelos *setpoints* l_{ei}^d e ψ_{ei}^d , os quais devem ser escolhidos de acordo com as demandas ou especificações do problema.

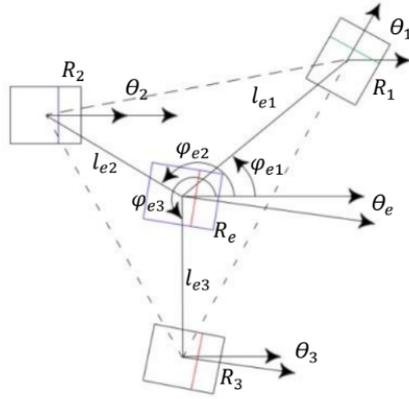


Figura 4.1: Formação de escolta com 3 robôs escoltadores.

Levando em consideração que a função dos robôs escoltadores é de proteção (são guardiões do alvo de escolta), uma forma de descrever a capacidade de proteção é definindo uma área em que o robô é capaz de proteger, a qual é definida a partir de um **raio de proteção** r_p (Figura 4.2).

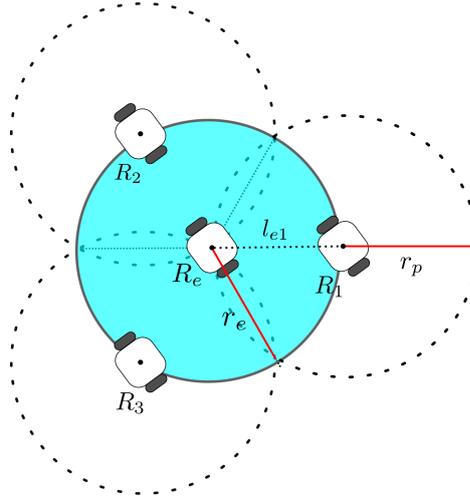


Figura 4.2: Definição da área de cobertura de escolta.

A noção de capacidade de proteção torna-se flexível para o tipo de atuação que o robô guardião pode fornecer, de modo que o r_p pode estar relacionado com o alcance de visibilidade do robô ou ao alcance de algum mecanismo de proteção, por exemplo.

A tarefa de escolta é bem sucedida quando o alvo de escolta recebe proteção em todas as direções. Nesse sentido, conforme ilustrado na Figura 4.2 as interseções entre as áreas protegidas pelos seguidores definem a área de cobertura da escolta, a qual é descrita por um **raio de escolta** r_e , quando as distâncias entre os robôs guardiões e o alvo de escolta l_{ei} são iguais.

Note que, o r_e pode ser utilizado como uma possível especificação ou objetivo em uma missão de escolta, ao definir uma área de cobertura de escolta desejada. Nesse contexto, os robôs guardiões devem se postar na formação a uma distância do alvo de modo a garantir

tal especificação, ou, a depender do tamanho de r_p , pode demandar de mais robôs para completar a tarefa, por exemplo.

4.1.1 Modelo de Interação dos Robôs

Para um SMR organizado de forma distribuída, pode ser considerado um modelo de interação de cada robô com os demais robôs e o ambiente, como o ilustrado na Figura 4.3. Neste, é assumido que os robôs são equipados com os sensores adequados para detectar os demais robôs, o alvo de escolta e os obstáculos do ambiente, possui hardware para comunicação explícita entre os agentes, e, portanto, dispõem de uma área de varredura de raio r_a em que $\{r_a \in \mathbb{R} | r_a > 0\}$, chamada de zona de detecção, e uma zona de comunicação $\{r_c \in \mathbb{R} | r_c > 0\}$, na qual pelo menos 1 dos demais robôs devem estar para que haja troca de mensagem entre os robôs. Além disso, define-se a zona de segurança $\{r_s \in \mathbb{R} | 0 < r_s \leq r_a\}$, que compõe uma região de garantia da integridade do agente.

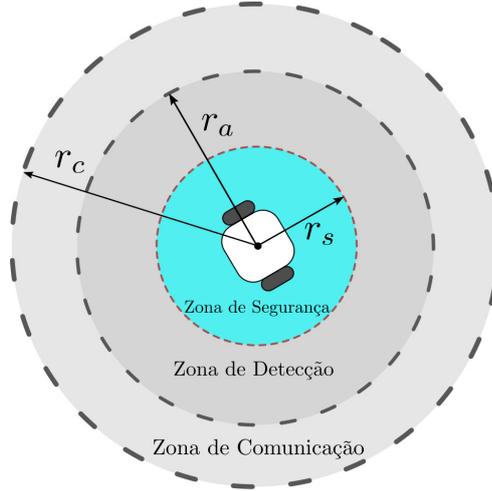


Figura 4.3: Modelo de interação do robô.

4.1.2 Especificações da Escolta

Nesta subseção, serão definidas especificações para missões de escolta considerando SMR do tipo homogêneo, cuja a distribuição angular ψ_{ei} desejada dos robôs guardiões na formação será radialmente uniforme,

$$\psi_{ei}^d = \frac{2\pi(i-1)}{n}, \quad (4.1)$$

em que n é a quantidade de robôs guardiões, e as distâncias para o alvo de escolta desejadas l_{ei}^d serão as iguais para todos os robôs da formação.

O projeto de uma formação que seja capaz atingir um raio de escolta desejado r_e^d , parte da definição da função $l_e^d = f(r_e^d, r_p, n)$, que retorna a distância desejada para o alvo

de escolta l_e^d , em função do raio de escolta desejado r_e^d , raio de proteção r_p e o número de robôs n .

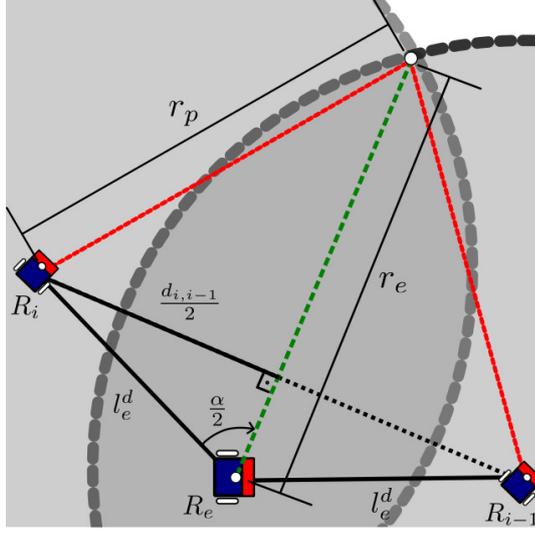


Figura 4.4: retrato genérico da configuração da escolta.

A Figura 4.4 ilustra alguns parâmetros de interesse da formação, em que os robôs R_i e R_{i-1} são os guardiões, R_e é o alvo de escolta, $\alpha = \frac{2\pi}{n}$ é o ângulo entre as retas que ligam R_e a R_i e R_e a R_{i-1} , e $d_{i,i-1}$ é a distância entre os robôs R_i e R_{i-1} . Nessa configuração,

$$r_e = l_e^d \cdot \cos \frac{\pi}{n} + \sqrt{r_p^2 - (l_e^d \cdot \sin \frac{\pi}{n})^2},$$

de modo que isolando l_e^d é possível obter $f(r_e^d, r_p, n)$ como,

$$l_e^d = r_e^d \cdot \cos \frac{\pi}{n} - \sqrt{(r_e^d \cdot \cos \frac{\pi}{n})^2 - (r_e^d)^2 + r_p^2}, \quad (4.2)$$

em que r_e foi substituído por r_e^d .

A equação (4.2) só retorna uma distância útil para $l_e^d \in \mathbb{R}$, logo,

$$(r_e^d \cdot \cos \frac{\pi}{n})^2 - (r_e^d)^2 + r_p^2 \geq 0 \Rightarrow \cos^2 \frac{\pi}{n} - 1 + \left(\frac{r_p}{r_e^d}\right)^2 \geq 0 \Rightarrow \left(\frac{r_p}{r_e^d}\right) \geq \sin \frac{\pi}{n},$$

que leva as seguintes relações:

$$n \geq \frac{\pi}{\sin^{-1} \frac{r_p}{r_e^d}}; \quad (4.3)$$

$$r_e^{d(max)} \leq \frac{r_p}{\sin \frac{\pi}{n}}. \quad (4.4)$$

A relação (4.3) indica o mínimo de robôs demandados para cumprir uma especificação de r_e^d dado r_p , e a (4.4) define o máximo valor desejado $r_e^{d(max)}$ dado n robôs com raio de proteção r_p .

Considerando as restrições de segurança dos robôs, dadas pelo modelo da Figura 4.3, e

o cenário de pior caso como $r_e^d = r_{s,e}$ e $r_p = r_{s,g}$, em que os raios de escolta e de proteção são iguais às distâncias de segurança do alvo de escolta e dos robôs guardiões, respectivamente, o número mínimo de robôs para satisfazer a escolta é dado pela desigualdade,

$$n > \frac{\pi}{\sin^{-1} \frac{r_{s,g}}{r_{s,e}}}, \quad (4.5)$$

Note que, diferente da (4.3), (4.5) não utiliza o " \geq ", isso porque trata-se de uma restrição de segurança. Por exemplo, se $r_{s,g} = r_{s,e} \Rightarrow n > 2$, porém caso fosse definido $n^{(min)} = 2$, para $l_{ei} = r_{s,e} \Rightarrow r_e = 0$ (na máxima aproximação do alvo de escolta com $r_p = r_{s,e}$).

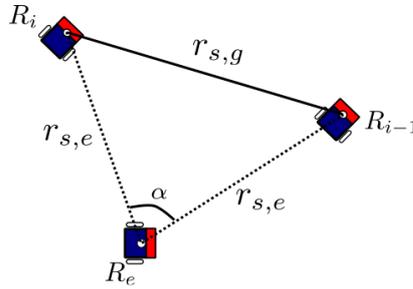


Figura 4.5: Restrição do número máximo de robôs na formação.

Ademais, o modelo da Figura 4.3 também impõe uma restrição do número máximo de robôs guardiões comportados pela formação. Nesse contexto, a partir da Figura 4.5 e utilizando a lei de cossenos é possível obter que,

$$n^{(max)} = \frac{\pi}{\cos^{-1} \frac{2 \cdot r_{s,e}^2 - r_{s,g}^2}{2 \cdot r_{s,e}^2}}, \quad (4.6)$$

em que $n^{(max)}$ é o número limite de robôs na formação. Por exemplo, se $r_{s,g} = r_{s,e} \Rightarrow n^{(max)} = 6$.

4.2 Estratégia de Compressão e Descompressão da formação

Para considerar a missão de escolta em ambientes povoados por obstáculos, é razoável admitir que as interações dos guardiões com os obstáculos afetam a capacidade de proteção, reduzindo a visibilidade do protetor, de modo que o raio de proteção r_p varia com a proximidade dos obstáculos (Figura 4.6). Nesse sentido, para manutenção da cobertura de escolta, se faz necessário modificações nas distâncias dos guardiões para o alvo de escolta l_{ei} . Os efeitos dessas modificações são: a **compressão da formação** com a diminuição de r_p , reduzindo l_{ei} manter a cobertura; e **descompressão da formação**, aumentando

l_{ei} para atingir r_e^d . Por fim, sob o ponto de vista da navegação em formação, a compressão e descompressão da formação também ajuda a manter a coesão da formação no desvio de obstáculos.

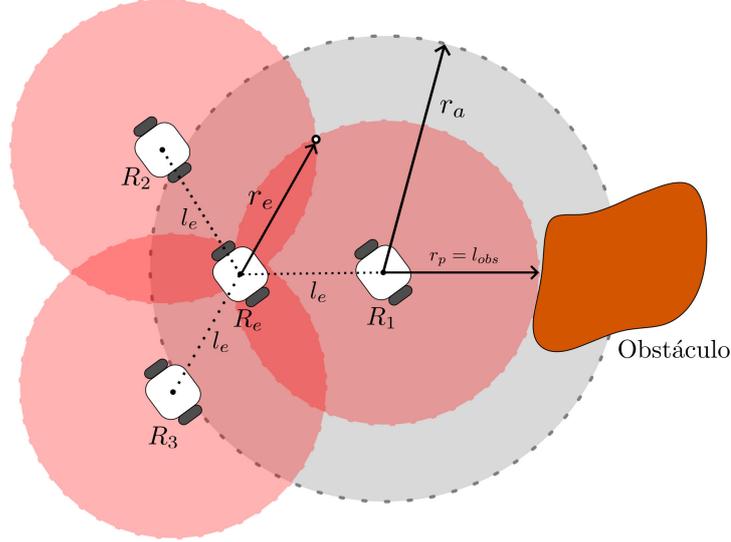


Figura 4.6: Modificação do raio de proteção dos robôs em função da proximidade com os obstáculos e redução da visibilidade.

Na metodologia proposta em [4], as distâncias desejadas l_{ei}^d entre o robô escoltado R_e e os robôs escoltadores R_i ($i = 1, 2, \dots, n$, em que n é o número de robôs) são calculadas de forma distribuída como função da distância do agente da formação para o obstáculo mais próximo l_{obs} , a qual pode ser obtida diretamente com a leitura sensorial. Ademais, define-se uma função heurística $l_{ei}^d = f(l_{obs}, r_{s,e}, r_{s,g}, r_{a,g})$, em que l_{ei}^d é proporcional a l_{obs} e leva em conta o modelo de interação da Figura 4.3, com $l_{ei}^d \rightarrow r_{s,e}$ para $l_{obs} \rightarrow 0$, e $l_{ei}^d \rightarrow L_{ei}^d$ para $l_{obs} \rightarrow \infty$, em que L_{ei}^d é distância desejada da formação. Dessa forma,

$$l_{ei}^d = A + B \cdot \tanh(k(l_{obs} - C)), \quad (4.7)$$

em que $A = \frac{L_{ei}^d + r_{s,e}}{2}$, $B = \frac{L_{ei}^d - r_{s,e}}{2}$ e $C = \frac{r_{a,g} + r_{s,g}}{2}$. Além disso, considerando os robôs homogêneos, os parâmetros de segurança $r_{s,g}$ são os mesmos para todos os robôs. Na equação (4.7), a constante k varia a sensibilidade da variação do *setpoint* l_{ei}^d dada a distância para o obstáculo l_{obs} .

Sejam r_e^d e L_{ei}^d , o raio de escolta e a distância desejada, respectivamente, na situação em que os robôs guardiões estão com o raio de proteção máxima $r_p^{(max)} = r_{a,g}$ (Figura 4.6). Para adequar a heurística (4.7) as especificações propostas, r_e^d deve ser definido de acordo com,

$$r_{a,g} < r_e^d \leq \frac{r_{a,g}}{\sin \frac{\pi}{n}}, \quad (4.8)$$

dado que $l_e^d > 0 \iff r_e^d > r_{a,g}$. Se o objetivo é maximizar a cobertura $r_e^d = \frac{r_{a,g}}{\sin \frac{\pi}{n}}$. Logo,

projetando L_{ei}^d para $r_p = r_{a,g}$ e $r_e^d = \frac{r_{a,g}}{\sin \frac{\pi}{n}}$, de acordo com a equação (4.2),

$$L_{ei}^d = r_e^d \cdot \cos \frac{\pi}{n} - \sqrt{(r_e^d \cdot \cos \frac{\pi}{n})^2 - (r_e^d)^2 + r_{a,g}^2} = r_{a,g} \cdot \cot \frac{\pi}{n}. \quad (4.9)$$

Em sequência, dado o caso da Figura 4.6,

$$r_p = \begin{cases} l_{obs}, & l_{obs} \leq r_{a,g}; \\ r_{a,g}, & l_{obs} > r_{a,g}, \end{cases} \quad (4.10)$$

e considerando o modelo de interação da Figura 4.3,

$$l_e^d = r_e^d \cdot \cos \frac{\pi}{n} - \sqrt{(r_e^d \cdot \cos \frac{\pi}{n})^2 - (r_e^d)^2 + r_p^2} \geq r_{s,e},$$

em que para $r_p < r_{a,g}$, define-se $r_e^d = \frac{r_p}{\sin \frac{\pi}{n}}$, de modo que o r_p que demanda a menor aproximação é dado por:

$$r_p = r_{s,e} \tan \frac{\pi}{n}. \quad (4.11)$$

Com isso, a heurística (4.7) pode ser redefinida como,

$$l_{ei}^d = A + B \cdot \tanh((r_p - C)(B \sin \frac{\pi}{n})^{-1}), \quad (4.12)$$

a qual define l_{ei}^d em função do raio de escolta r_e^d , considerando $r_e^d = \frac{r_p}{\sin \frac{\pi}{n}}$. As constantes A e B são definidas da mesma forma que (4.7), com L_{ei}^d dada pela equação (4.9). Por fim,

$$C = \frac{\tan \frac{\pi}{n} (r_{s,e} + L_{ei}^d)}{2},$$

a qual define que na metade do range de r_p , l_{ei}^d também estará na metade de seu range.

O *setpoint* de distância para o escoltado, l_e^d é definido igualmente para todos os robôs, com $l_e^d = \min\{l_{e1}^d, l_{e2}^d, \dots, l_{en}^d\}$. Para tal, as leituras de distância euclidiana dos diferentes robôs seguidores a superfície do obstáculo é generalizada para ambos via comunicação explícita.

Note que na definição de r_e^d e l_e^d considera-se o menor r_p entre os robôs como o raio de proteção de todos os robôs, sob a suposição de que a capacidade de proteção dos robôs reduz devido a proximidade com os obstáculos e conseqüentemente afeta a escolta. Logo, o r_e^d considera o pior caso, de modo que a heurística (4.12) calcula uma aproximação da formação para compensar a redução de visibilidade do robô com menor r_p . Note que, $l_{obs} = 0 \Rightarrow r_p = 0$, mas, se for considerado que os robôs guardiões navegam de forma segura no ambiente, $l_{obs} = r_{s,g} \Rightarrow r_p = r_{s,g}$.

4.3 Robustez à Perda de Robôs

Na prática, fatores como descarga da bateria, falhas na comunicação ou algum defeito crítico no robô pode resultar na perda desse robô na formação. Neste trabalho é considerado que a perda do robôs ocorrem nas seguintes situações:

- **Colisão:** em caso de colisão, o robô fica inativo, logo deixa de fazer parte da formação;
- **Perda de comunicação:** ocorre quando a menor distância do robô para os demais robôs da formação é maior que o alcance de comunicação, dado por r_c ;
- **Outros fatores:** Qualquer fator que gere a falha completa do robô.

A depender de como o sistema é organizado (Figura 2.1), a perda do robô pode impactar de formas diferentes. Os sistemas organizados de forma distribuída são os mais robustos em situações de falhas nos robôs, dado que os robôs possuem mecanismos de tomadas de decisão independentes.

Para a implementação distribuída do controlador dado por (2.12) na configuração de escolta (Figura 4.1) é necessário que estimativa dos estados e das velocidades do alvo de escolta, conforme discutido na subseção 2.3.3, seja independente, de modo que cada robô deve ser equipado com o hardware necessário para realizar as estimativas, ou que as informações necessárias estejam disponíveis por algum outro meio, como a comunicação explícita com o alvo de escolta. Nesse sentido, este trabalho analisa a robustez a perda de robôs sob o ponto de vista de uma implementação distribuída do controlador (2.12) e como tais perdas impactam nas especificações discutidas na subseção 4.1.2.

Um protocolo de manutenção da formação em caso de perda de robôs, deve considerar que os robôs têm conhecimento da quantidade de robôs guardiões n e sua identificação $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, de modo que a manutenção da formação ocorre por meio da atualização das equações (4.1), (4.9) e (4.12), por cada robô independentemente.

No que se refere ao cumprimento das especificações da escolta (subseção 4.1.2), uma escolta robusta à perda de robôs ocorre com redundância no número de robôs, segundo a relação (4.5) e limitado por (4.6), ambos relacionados com a capacidade de proteção r_p dos robôs.

Sob o ponto de vista da navegação, o alvo de escolta atua no sentido deliberativo, de forma independente dos robôs guardiões e em uma trajetória livre de colisões, de modo que a estratégia de compressão e descompressão da formação, discutida na seção anterior, impõe, de forma indireta, um mecanismo de desvio de obstáculo para os guardiões. Porém, além de ser interessante alguma outra medida ativa para desvio de obstáculo, em caso de perda de robôs, o robô perdido se torna obstáculo e para que o processo de manutenção da formação seja bem sucedido é necessário que os robôs guardiões exibam alguma reação no sentido de evitar colisão com o robô perdido.

4.4 Desvio de Obstáculo

O controlador de desvio de obstáculo usado neste trabalho baseia-se no conceito de impedância mecânica ([13, 39, 40]). A ideia é modelar a interação do robô com o ambiente por meio de forças virtuais F , calculadas por,

$$F = \begin{cases} b \cdot (l_{obst}^{(max)} - l_{obst})^m, & l_{obst} < l_{obst}^{(max)}; \\ 0, & l_{obst} \geq l_{obst}^{(max)}, \end{cases} \quad (4.13)$$

em que, l_{obst} é a menor leitura de distância dos sensores, $l_{obst}^{(max)}$ é a maior distância que causa uma força virtual não nula ($F > 0$), $m \in \mathbb{N}$ e é um parâmetro de ajuste que varia a sensibilidade e b é uma constante de calibração definida por,

$$b = \frac{F_{max}}{(l_{obst}^{(max)} - l_{obst}^{(min)})^m}, \quad (4.14)$$

em que, $l_{obst}^{(min)}$ corresponde a mínima distância aceitável para evitar a colisão e F_{max} é um parâmetro que denota a máxima força virtual.

A partir das forças virtuais são calculadas as velocidades necessárias para evitar colisões com os obstáculos. Nesse sentido, para que sejam considerados obstáculos em diferentes direções, são definidas duas forças virtuais F_D e F_E , calculadas a partir da menor leitura sensorial da distância do lado direito e esquerdo, respectivamente. As variáveis l_{obst_D} , l_{obst_E} , β_D e β_E , da Figura 4.7, representam, reciprocamente, as distâncias e ângulos associados às menores leituras de distância do lado direito e esquerdo do robô.

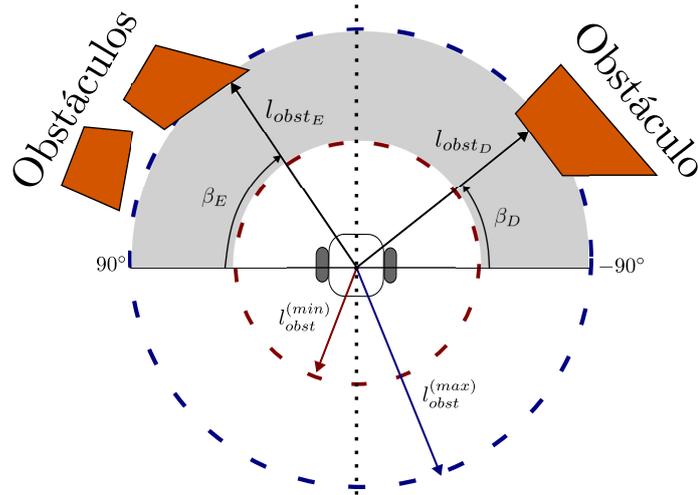


Figura 4.7: Ilustração das variáveis do controlador de desvio de obstáculo.

As magnitudes de correção das velocidades linear v_c e angular ω_c são dadas por,

$$\begin{cases} \omega_c = Z^{-1}(F_D - F_E); \\ v_c = -d \cdot \omega_c \tan \gamma_{ei}, \end{cases} \quad (4.15)$$

com Z representando a impedância mecânica, em que $Z = Is^2 + Bs^2 + K$, na qual I , B e K são constantes positivas que representam o momento de inércia, atrito e constante elástica, respectivamente, da dinâmica de interação entre o robô e o ambiente. Além disso, d é metade das distâncias entre as rodas do robô (Figura 2.4) e v_c é a correção de velocidade linear dada a respectiva correção em ω_c , segundo o modelo cinemático da formação, como no controlador (2.12).

Uma vantagem em utilizar a impedância mecânica Z nessa abordagem é que I e B produzem uma dinâmica que impede variações abruptas de v_c e ω_c , o que pode resultar em correções mais suaves. Na prática a impedância mecânica pode ser implementada como uma espécie de Filtro, de modo que I , B e K podem ser escolhidos a partir de frequências de corte adequadas.

Na Figura 4.8 o diagrama de blocos do sistema de controle é apresentado. A cada instante de amostragem os *setpoints* da formação l_{ei}^d e ψ_{ei}^d são atualizados, em seguida v e ω são calculados pelo controlador (2.12) no bloco do Controle Cinemático da Formação, no qual v_e e ω_e são conhecidos. Na sequência, as correções de velocidade v_c e ω_c , calculadas pelas equações (4.15), são somadas com v e ω , respectivamente, e as novas velocidades v' e ω' vão para o bloco da compensação dinâmica, a partir do qual as velocidades das rodas ϕ_D e ϕ_E , são calculadas. Os resultados desse trabalho consideram apenas o controlador cinemático, sem a compensação da dinâmica.

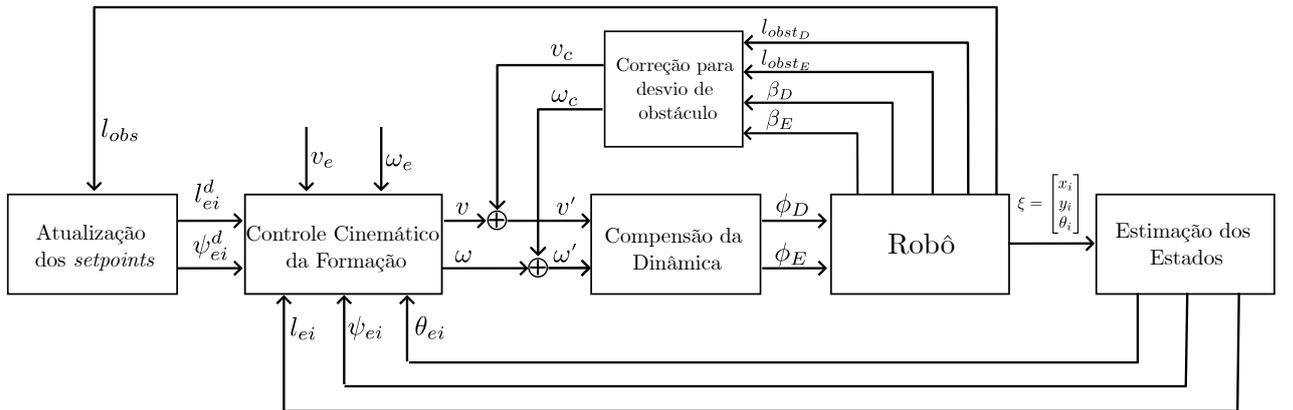


Figura 4.8: Diagrama de blocos do sistema de controle.

No bloco do Robô, as velocidades ϕ_D e ϕ_E são convertidos em comandos de atuação para motores. Além disso, as variáveis l_{obsD} , l_{obsE} , β_D , β_E e l_{obs} são obtidas por meio da leitura dos sensores. Por fim, as velocidades do robô produzem uma nova pose ξ , de modo que há uma alteração nos estados $[l_{ei} \ \psi_{ei} \ \theta_{ei}]^T$, os quais são estimados.

Capítulo 5

Experimentos e Resultados

Neste capítulo são apresentados experimentos simulados com o objetivo de discutir sobre a metodologia apresentada no capítulo anterior. Foram realizados três experimentos. Nos dois primeiros, o objetivo é observar o cumprimento das especificações da escolta em dois mapas diferentes, o primeiro para ilustrar o comportamento das variáveis com a compressão e descompressão da formação e o segundo para evidenciar o efeito da interação dos robôs com os obstáculos. Já o último tem como objetivo discutir as situações de perda de robôs.

Todas as simulações computacionais foram realizadas no software Matlab 2018b. Foi considerado como modelo dos robôs, o modelo cinemático da Figura 2.5, com $r = 5,3\text{cm}$ e $d = 5,625\text{cm}$. Além disso, os robôs são equipados com sensores de distância que medem em todas as direções com uma resolução de 5° . As constantes do modelo da Figura 4.3 são: $r_{s,e} = 30\text{cm}$, $r_{s,g} = 25\text{cm}$, $r_{a,g} = 120\text{cm}$ e $r_{c,g} = 200\text{cm}$.

O escoltado navega no sentido deliberativo, de modo que nos experimentos aqui apresentados, o escoltado segue um caminho calculado por uma RRT (*Rapidly-exploring random trees*[41]) até o destino, com uma velocidade linear e angular máxima de, respectivamente, $v_{e,max} = 15\text{cm/s}$ e $\omega_{e,max} = 5\text{rad/s}$. Foi considerado que os robôs guardiões também possuem restrição de velocidade, de modo que: $v_{g,max} = 34,157\text{cm/s}$ e $\omega_{g,max} = 6,0724\text{rad/s}$, correspondentes ao modelo de um robô do Laboratório de Robótica da UFS.

As constantes de controle do controlador (2.12), $\alpha_1 = 0,6$ e $\alpha_2 = 0,8$, foram as mesmas para todos os robôs e com os mesmos valores em todos os experimentos. Devido o limite de velocidade dos robôs, é feito um ajuste no cálculo dos erros para o controlador cinemático (2.12), de modo que,

$$\begin{cases} \dot{l}_{ei} = \alpha_1 \cdot K_l \cdot \tanh(K_l^{-1}(l_{ei}^d - l_{ei})); \\ \dot{\psi}_{ei} = \alpha_2 \cdot K_\psi \cdot \tanh(K_\psi^{-1}(\psi_{ei}^d - \psi_{ei})), \end{cases}$$

em que, K_l e K_ψ são constantes de saturação dos erros em l e ψ , respectivamente.

Para pequenos valores de erro, $\alpha_1 \cdot K_l \cdot \tanh(K_l^{-1}(l_{ei}^d - l_{ei})) \approx \alpha_1 \cdot (l_{ei}^d - l_{ei})$ e $\alpha_2 \cdot K_\psi \cdot \tanh(K_\psi^{-1}(\psi_{ei}^d - \psi_{ei})) \approx \alpha_2 \cdot (\psi_{ei}^d - \psi_{ei})$, e para valores grandes de erro, satura em $\alpha_1 K_l$ e $\alpha_2 K_\psi$, respectivamente. Nos experimentos, foram definidos $K_l = 20$ e $K_\psi = 0,6$.

Para o controlador de desvio de obstáculo foram considerados: $l_{obst}^{(max)} = 20\text{cm}$, $l_{obst}^{(min)} = 10\text{cm}$, $F_{max} = 20$, $m = 10$, $I = 0$, $B = 1,6468$ e $K = 3,2936$.

Em todos os experimentos, o objetivo é maximizar a cobertura, logo L_{ei}^d é escolhido dado $r_e^d = \frac{r_{a,g}}{\sin \frac{\pi}{n}}$, logo $L_{ei}^d = r_{a,g} \cdot \cot \frac{\pi}{n}$.

5.1 Experimento 1

O primeiro experimento ilustra o efeito da compressão e descompressão da formação com o mapa ilustrado nas Figuras 5.1, de dimensões $1200 \times 500\text{cm}$. A pose inicial do robô escoltado é $p_e^0 = (100, 250, 0)$, $p_e^d = (1100, 250, 0)$ é a pose desejada e o estado inicial do sistema é dado por $s_i^0 = (50, \frac{2\pi(i-1)}{n}, 0)$. Foi definido $n = 4$, logo, de acordo com as especificações, o raio de escolta desejado é de $r_e^d = 169,7\text{cm}$ e $L_{ei}^d = 120\text{cm}$.

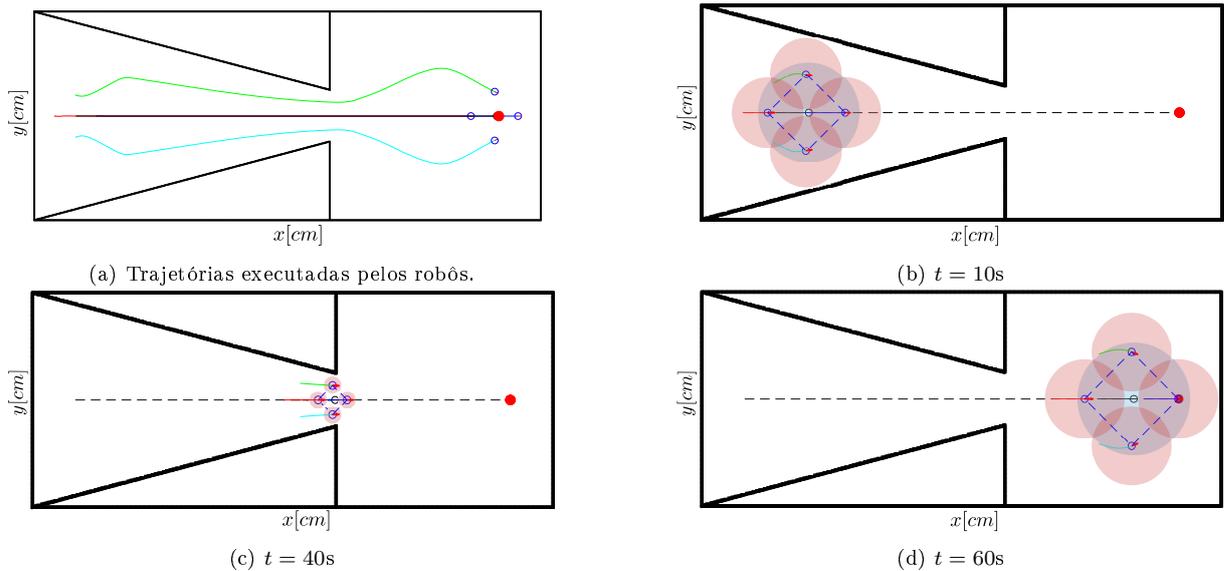
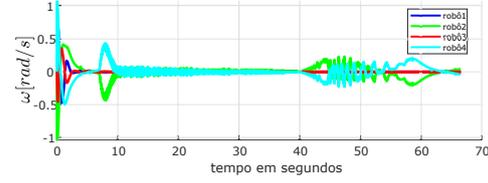
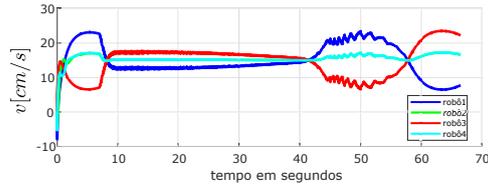
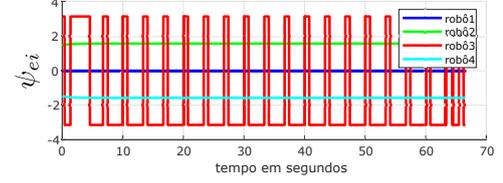
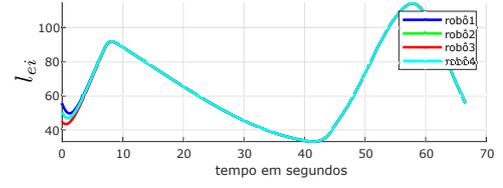


Figura 5.1: Trajetórias executadas (em (a)) e retrato do experimento em três instantes de tempo, $t = 10\text{s}$ (em (b)), $t = 40\text{s}$ (em (c)) e $t = 60\text{s}$ (em (d)). Os círculos vermelhos ao redor dos robôs representam o alcance de proteção do robô, dado por r_p e o círculo azul em torno do escoltado é a área de cobertura de escolta dada por r_e .

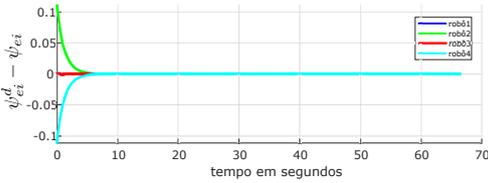
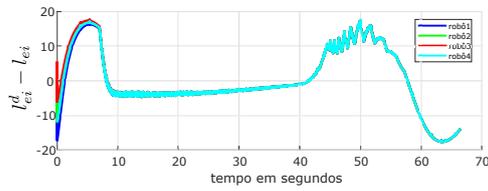
Na Figura 5.1a são apresentadas as trajetórias executadas pelos robôs após a conclusão da tarefa. Note que, a medida que os robôs se afastam da parede à esquerda a formação se expande, até que o estreitamento do corredor faz com que ela comprima, ao passar pelo corredor, é expandida mais uma vez e, ao se aproximar da parede à direita, comprime mais uma vez. As Figuras 5.1b, 5.1c e 5.1d, ilustram três configurações da formação em instantes distintos, as quais também ilustram a variação dos parâmetros da escolta r_e (raio de escolta) e r_p (raio de proteção).



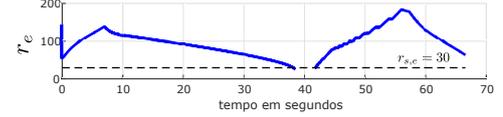
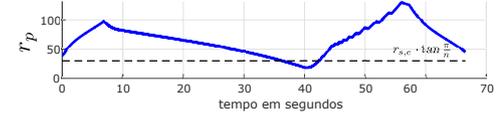
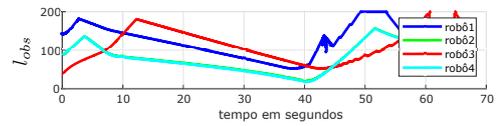
(a) Velocidade executadas pelos robôs.



(b) Evolução temporal das variáveis $l - \psi$.



(c) Evolução temporal dos erros em l_{ei} e ψ_{ei}



(d) Variação dos parâmetros da escolta.

Figura 5.2: Os gráficos em (a) ilustram a demanda por velocidades v e ω para a conclusão da tarefa. Em (b) é exibido o de comportamento compressão e descompressão da formação por meio da evolução das variáveis l_{ei} e ψ_{ei} . (c) expõe as variações dos erros das varáveis controladas. Por fim, (d) ilustra o comportamento dos parâmetros da escolta durante a tarefa. As curvas em azul, correspondem ao robô 1, as verdes ao robô 2, as vermelhas ao robô 3 e as cianas ao robô 4. Em (d) as curvas são azuis para as variáveis r_p e r_e , porém, estas variáveis são parte do contexto de toda a formação.

O gráfico da Figura 5.2b contém a evolução temporal das variáveis l_{ei} e ψ_{ei} de cada um dos quatro robôs, note que a evolução das variáveis correspondem à descrição. Além disso, as curvas de todos os robôs se sobrepõem, isso ocorre porque, as constantes de controle são idênticas para todos os robôs. A Figura 5.2c, demonstra que tais variáveis convergem para os valores desejados.

Por fim, no gráfico da Figura 5.2d, é demonstrado o comportamento da formação em termos dos parâmetros definidos nas especificações da escolta (seção 4.1.2). A linha tracejada ($r_{s,e} \cdot \tan \frac{\pi}{n}$) no plot da variável r_p se refere ao valor de r_p , que demanda a maior aproximação com o alvo de escolta ($l_{ei} = r_{s,e}$), já no plot de r_e a linha tracejada corresponde a $r_{s,e} = 30\text{cm}$. Note que em $t = 40\text{s}$, $r_p < r_{s,e} \cdot \tan \frac{\pi}{n} = 30$ e r_e é indefinido ($r_e \notin \mathbb{R}$), situação que é ilustrada na Figura 5.1c. Nesse mesmo instante, $l_{ei} \approx r_{s,e} = 30$ (Figura 5.2b), ou seja os robôs guardiões produziram a máxima aproximação para o escoltado, na sequência com o afastamento dos obstáculos $r_p > 30$ e $r_e > 30$ (Figura 5.1d).

5.2 Experimento 2

O objetivo desse experimento é ilustrar o funcionamento da abordagem em um cenário diferente, assim como, evidenciar o efeito que a correção para desvio de obstáculo pode produzir no controle da formação. O mapa escolhido está ilustrado nas Figuras 5.3 e tem dimensões $1000 \times 500 \text{cm}$. A pose inicial e desejada do robô escoltado é $p_e^0 = (100, 150, 0)$ e $p_e^d = (900, 150, 0)$, respectivamente, e o estado inicial do sistema é $s_i^0 = (50, \frac{2\pi(i-1)}{n}, 0)$. Assim como no primeiro experimento, $n = 4$, logo, $r_e^d = 169,7 \text{cm}$ e $L_{ei}^d = 120 \text{cm}$.

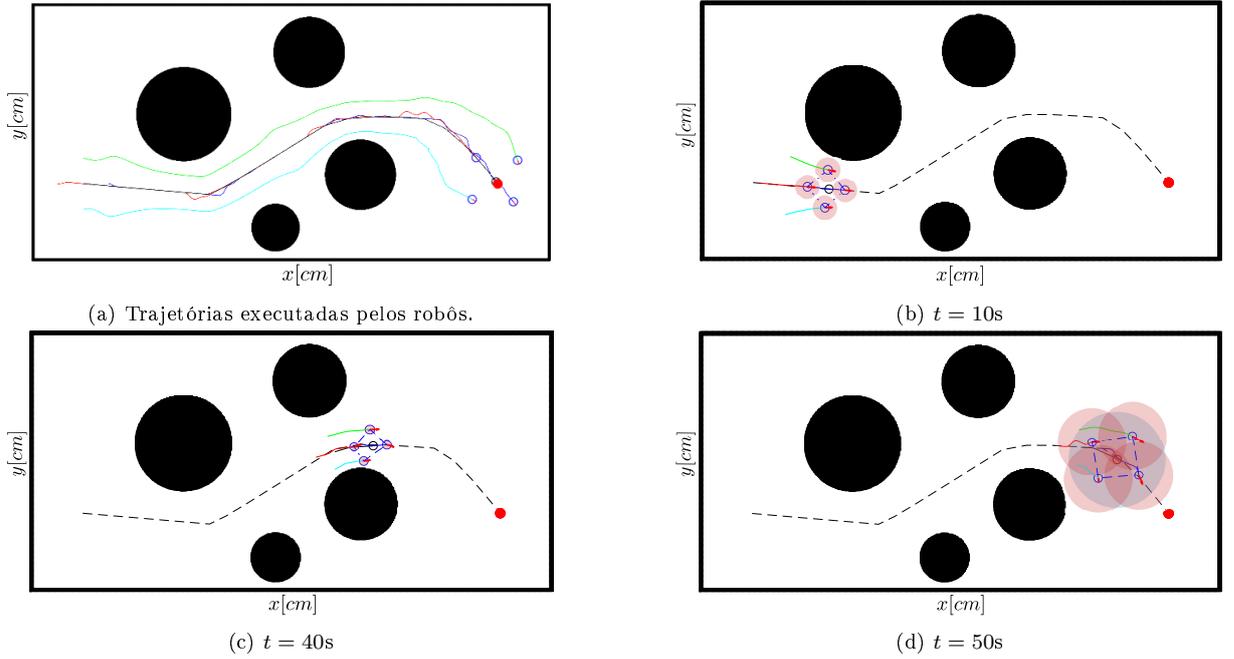


Figura 5.3: Trajetórias executadas (em (a)) e retrato do experimento em três instantes de tempo, $t = 10\text{s}$ (em (b)), $t = 40\text{s}$ (em (c)) e $t = 50\text{s}$ (em (d)). Os círculos vermelhos ao redor dos robôs representam o alcance de proteção do robô, dado por r_p e o círculo azul em torno do escoltado é a área de cobertura de escolta r_e .

As trajetórias executadas por cada robô durante a tarefa estão apresentadas na Figura 5.3a, note que, como a RRT retorna um caminho não suave, as trajetórias resultantes tornam-se relativamente irregulares.

O ambiente do experimento obriga os robôs guardiões a navegar próximo dos obstáculos, como pode ser visto nas Figuras 5.3b e 5.3c. Consequentemente, conforme o gráfico da Figura 5.4d, em 10s, situação da Figura 5.3b, $r_p < 30$ e r_e é indefinido, o mesmo ocorre entre 30 e 40 segundos, quando a distância do robô 4 para o obstáculo fica próximo de zero, e portanto, r_p fica próximo de zero (Figura 5.4d), nesse momento a formação é obrigada a realizar a compressão máxima com $l_{ei} \approx 30 \text{cm}$ (Figura 5.4b).

A proximidade do robô 4 para os obstáculos ocasionam correções de velocidade dadas pelas equações (4.15), e produz uma redução da velocidade linear por volta dos 35s, que pode ser visto no gráfico da Figura 5.4a, tal redução gera um aumento do erro na variável ψ_{e4} (Figura 5.4c) e essa situação é apresentada na Figura 5.3b. Por fim, a ação do

controlador de desvio de obstáculo ocorreu apenas em ψ_{e4} , pois a ação em l_{e4} implicaria na aproximação com o robô 3 e o escoltado, o que foi compensado pelo controlador.

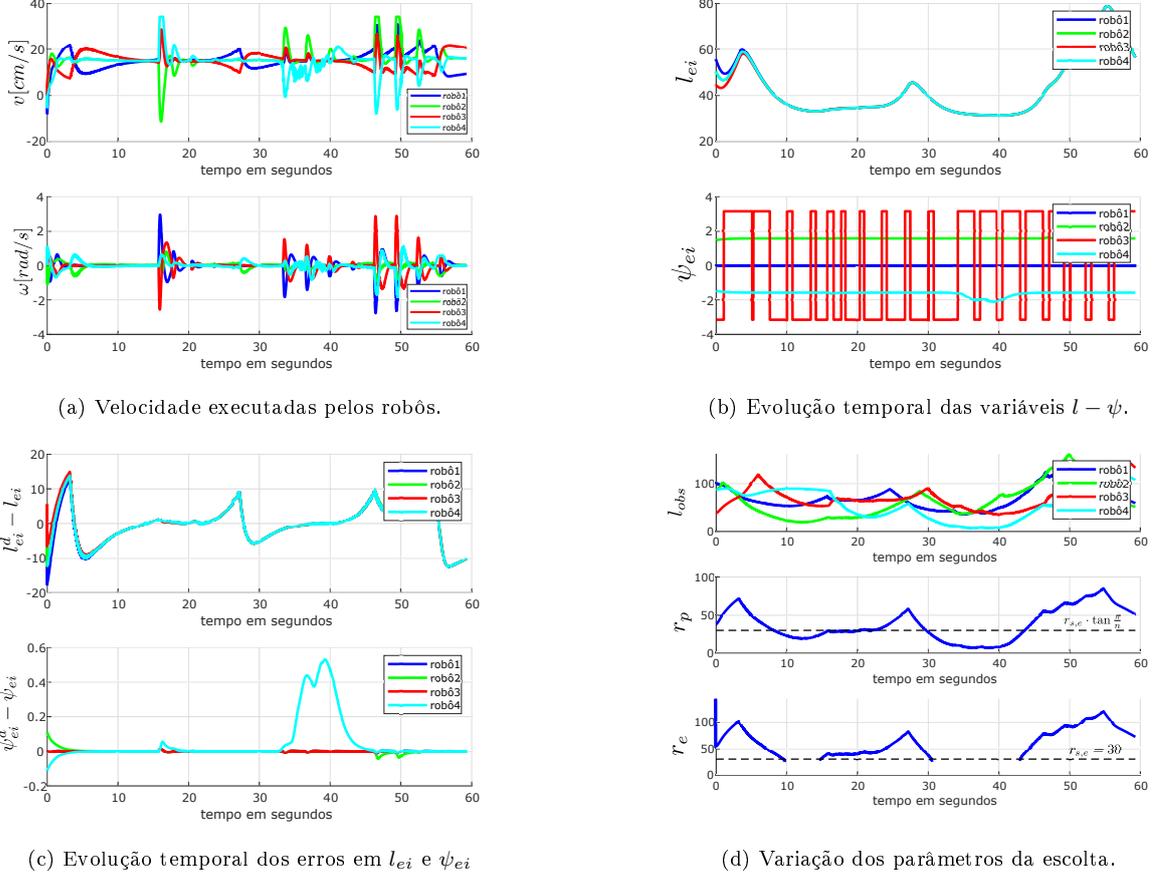


Figura 5.4: Os gráficos em (a) ilustram a demanda por velocidades v e ω para a conclusão da tarefa. Em (b) é exibido o de comportamento compressão e descompressão da formação por meio da evolução das variáveis l_{ei} e ψ_{ei} . (c) expõe as variações dos erros das varáveis controladas. Por fim, (d) ilustra o comportamento dos parâmetros da escolta durante a tarefa. As curvas em azul, correspondem ao robô 1, as verdes ao robô 2, as vermelhas ao robô 3 e as cianas ao robô 4. Em (d) as curvas são azuis para as variáveis r_p e r_e , porém, estas variáveis são parte do contexto de toda a formação.

5.3 Experimento 3: Perda de Robôs

Este experimento tem como objetivo, estudar o caso da perda de robôs de acordo com o protocolo descrito na seção 4.3, em que considera-se que os robôs possuem conhecimento da quantidade de guardiões n e a equação (4.12) é definida em função de n e $L_{ei}^d = r_{a,g} \cdot \cot \frac{\pi}{n}$.

O mapa utilizado nesse experimento é o mesmo do Experimento 2, e possui as mesmas configurações iniciais: $p_e^0 = (100, 150, 0)$, $p_e^d = (900, 150, 0)$ e $s_i^0 = (50, \frac{2\pi(i-1)}{n}, 0)$. O número inicial de robôs guardiões é $n = 6$, logo, $r_e^d = 240\text{cm}$ e $L_{ei}^d = 207,4\text{cm}$ (considerando que o objetivo é a máxima cobertura) e $r_{s,e} \cdot \tan \frac{\pi}{6} = 17,32\text{cm}$.

A perda dos robôs foram simuladas nos instantes $t = 6,5\text{s}$ e $t = 35\text{s}$, nos robôs 6 e 5,

respectivamente, como pode ser visto pela descontinuidade nos gráficos de velocidades na Figura 5.7a.

As Figuras 5.5b e 5.5c, apresentam a configuração da formação nos instantes $t = 10s$ e $t = 40s$, em processo de rearranjo após a perda dos robôs 6 e 5, respectivamente. Em $t = 10s$, o robô 5, por meio das correções de velocidades (Figura 5.7a), evita a colisão com o robô 6 perdido. Por volta de $t = 15s$, a formação é recomposta com os erros em ψ_{ei} dos robôs 4 e 5 sendo zerados, Figuras 5.6c e 5.7b, respectivamente.

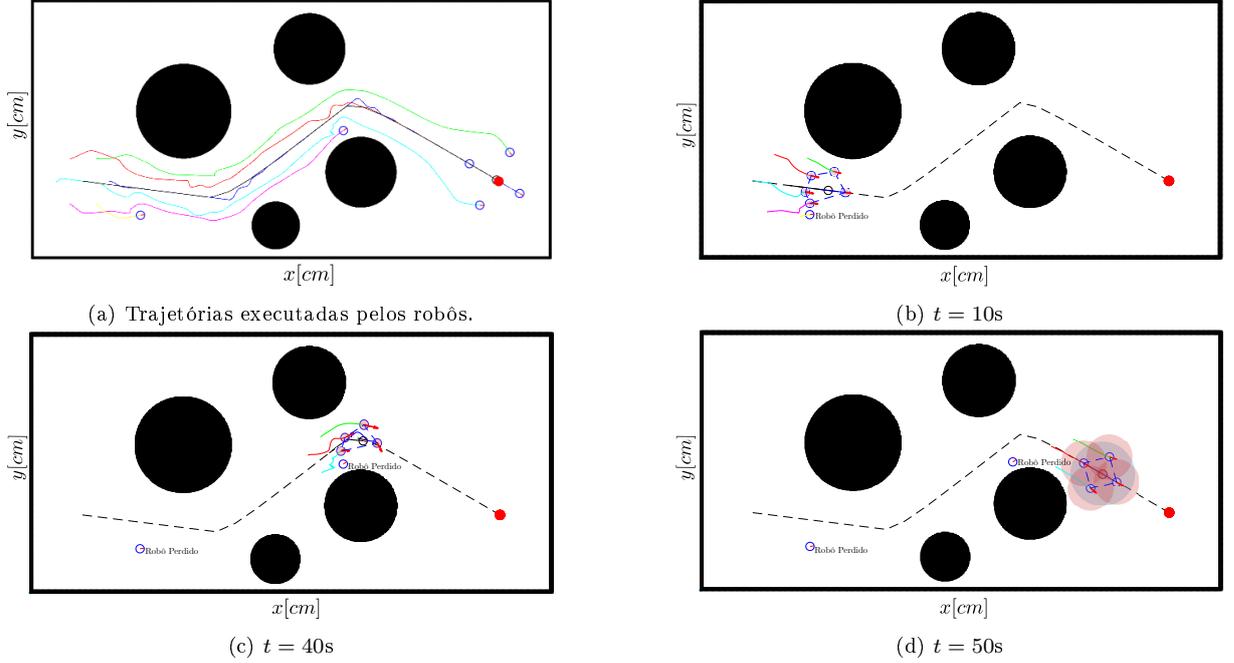


Figura 5.5: Trajetórias executadas (em (a)) e retrato do experimento em três instantes de tempo, $t = 10s$ (em (b)), $t = 40s$ (em (c)) e $t = 50s$ (em (d)). Os círculos vermelhos ao redor dos robôs representam o alcance de proteção do robô, dado por r_p e o círculo azul em torno do escolta é a área de cobertura de escolta r_e .

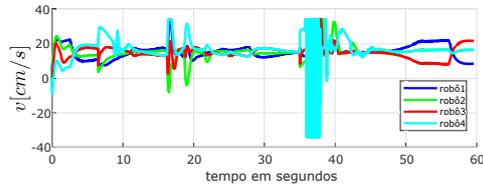
Note, pela Figura 5.6d, que no instante da perda do robô 6, $t = 6,5s$, o raio de proteção mínimo saltou para $r_{s,e} \cdot \tan \frac{\pi}{5} = 21,79cm$ e em $t = 35s$, falha do robô 5, $r_{s,e} \cdot \tan \frac{\pi}{4} = 30cm$. Fato que altera a capacidade da formação em alcançar a especificação $r_e > r_{s,e}$, de modo que a tarefa torna-se mais difícil quanto menor o número de robôs restantes.

No instante $t = 40s$, Figura 5.5c, a formação está corrigindo-se dada a perda do robô 5. Entre $t = 35s$ e $t = 40s$, correções de velocidade são aplicadas ao robô 4 para evitar colisão com o robô 5 (Figura 5.6a). Observe pelas Figuras 5.6b e 5.6c, que o robô em questão ficou *preso* por alguns instantes tentando não colidir e voltar para a formação. Só após $t = 45s$, que o mesmo se recompôs na formação e em $t = 50s$, obtém-se a configuração da Figura 5.5d.

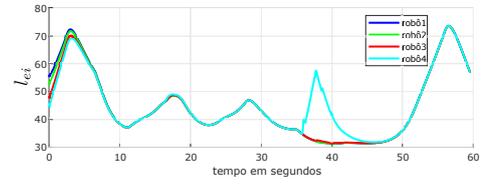
A situação em que o robô 4 ficou *preso* tentando não colidir com o obstáculo e ao mesmo tempo seguir para posição desejada na formação, ilustra uma desvantagem da abordagem proposta, conhecida na literatura por *mínimos locais*¹. No caso do experimento, o robô

¹São situações em que a solução estabiliza em um ponto diferente do desejado.

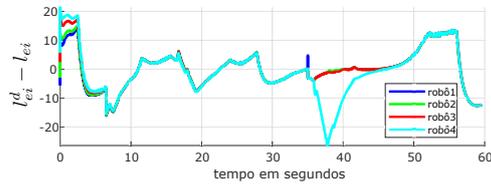
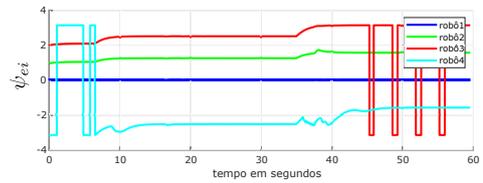
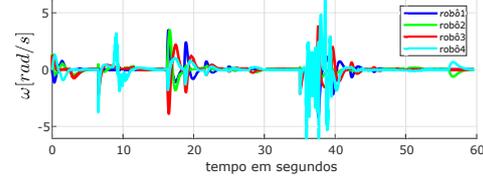
foi capaz de se recompor na formação, mas nada garante que sempre será capaz de fazê-lo.



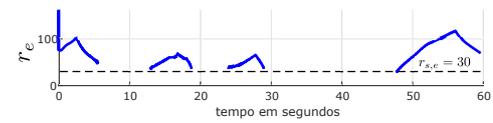
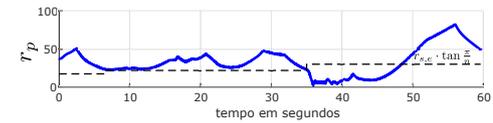
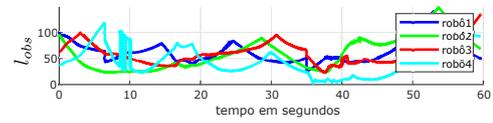
(a) Velocidade executada pelos robôs.



(b) Evolução temporal das variáveis $l - \psi$.

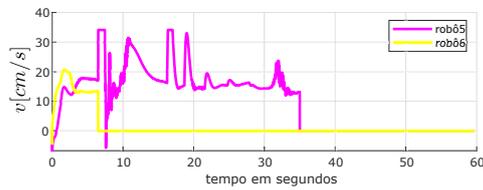


(c) Evolução temporal dos erros em l_{ei} e ψ_{ei}

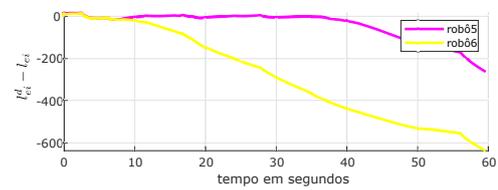


(d) Variação dos parâmetros da escolta.

Figura 5.6: Os gráficos em (a) ilustram a demanda por velocidades v e ω para a conclusão da tarefa. Em (b) é exibido o de comportamento compressão e descompressão da formação por meio da evolução das variáveis l_{ei} e ψ_{ei} . (c) expõe as variações dos erros das variáveis controladas. Por fim, (d) ilustra o comportamento dos parâmetros da escolta durante a tarefa. As curvas em azul, correspondem ao robô 1, as verdes ao robô 2, as vermelhas ao robô 3 e as cianas ao robô 4. Em (d) as curvas são azuis para as variáveis r_p e r_e , porém, estas variáveis são parte do contexto de toda a formação.



(a) Velocidade executada pelos robôs.



(b) Evolução temporal dos erros em l_{ei} e ψ_{ei} .

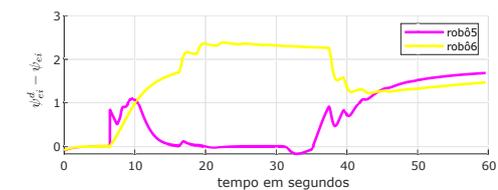
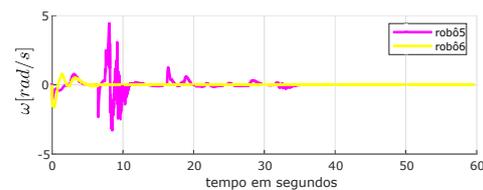


Figura 5.7: Gráficos correspondentes aos robôs perdidos. Em (a) ilustra a demanda por velocidades v e ω e (b) expõe a variação do erro das variáveis controladas para os Robôs 5 (magenta) e 6 (amarelo).

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho estuda a abordagem proposta em [4], incluindo a possibilidade da perda de robôs na formação. Para inserir essa possibilidade foi necessário incrementar na abordagem uma estratégia para desvio de obstáculos, a qual baseia-se na definição de forças virtuais e no conceito de impedância mecânica. O uso dessa estratégia, junto com o controle cinemático da formação se mostrou aplicável, de acordo com os experimentos.

Além disso, foi proposta uma modelagem da tarefa de escolta sob o ponto de vista da cobertura, a partir da qual a heurística apresentada em [4] foi ajustada para construção de um protocolo de rearranjo da formação em caso de perda de robôs. Outro objetivo da modelagem proposta é produzir uma base para o projeto de controle de SMR para escolta focado em especificações de cobertura de pior caso.

Por fim, os resultados demonstram que o protocolo de rearranjo da formação, considerando a princípio apenas o controle cinemático da formação, funciona adequadamente, uma vez que o rearranjo acontece e as especificações da escolta voltam a ser atingidas.

Capítulo 7

Perspectivas de Trabalhos Futuros

Pretende-se, em trabalhos futuros, implementar a abordagem considerando o modelo dinâmico dos robôs com a etapa de compensação da dinâmica. Além disso, pode ser investigado a abordagem levando em conta SMR do tipo heterogêneo, assim como modificações na modelagem da escolta para implementação em outros cenários como, por exemplo, envolvendo múltiplos alvos.

Capítulo 8

Atividades Complementares

Durante a execução desse projeto foram realizadas outras atividades no contexto do Grupo de Pesquisa em Robótica da UFS (GPR-UFS). O aluno foi um dos ministrantes de um minicurso sobre técnicas de cinemática inversa para robôs manipuladores, ofertado pelo SIGAA Extensão. Além disso, o aluno faz parte da equipe responsável pela construção de um time de futebol de robôs para participar da categoria IEEE Very Small Size Soccer da Competição Latino Americana de Robótica (LARC), chamado Lambe Sujo em homenagem ao foguedo sergipano.

Referências Bibliográficas

- [1] Saar Cohen e Noa Agmon. “Recent Advances in Formations of Multiple Robots”. Em: *Current Robotics Reports* 2.2 (2021), pp. 159–175.
- [2] Gianluca Antonelli, Filippo Arrichiello e Stefano Chiaverini. “The entrapment/escorting mission”. Em: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 15.1 (2008), pp. 22–29.
- [3] Jaydev P Desai, Jim Ostrowski e Vijay Kumar. “Controlling formations of multiple mobile robots”. Em: *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*. Vol. 4. IEEE. 1998, pp. 2864–2869.
- [4] Flávio SC Bispo et al. “Navegação de robôs móveis em formação líder-seguidor para Escolta”. Em: *2015 12th Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)* (2015).
- [5] Tucker Balch e Ronald C Arkin. “Behavior-based formation control for multirobot teams”. Em: *IEEE transactions on robotics and automation* 14.6 (1998), pp. 926–939.
- [6] Lei Chen e Ma Baoli. “A nonlinear formation control of wheeled mobile robots with virtual structure approach”. Em: *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE. 2015, pp. 1080–1085.
- [7] Christopher A Kitts e Ignacio Mas. “Cluster space specification and control of mobile multirobot systems”. Em: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 14.2 (2009), pp. 207–218.
- [8] Alessandro Farinelli, Luca Iocchi e Daniele Nardi. “Multirobot systems: a classification focused on coordination”. Em: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 34.5 (2004), pp. 2015–2028.
- [9] J. G. N. Carvalho Filho. “Modelagem e síntese para coordenação de sistemas multi-robôs baseada numa estrutura de jogo”. Diss. de mest. Florianópolis: UFSC, 2012.
- [10] Sable Campbell, Wasif Naeem e George W Irwin. “A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres”. Em: *Annual Reviews in Control* 36.2 (2012), pp. 267–283.
- [11] Yuanchang Liu e Richard Bucknall. “A survey of formation control and motion planning of multiple unmanned vehicles”. Em: *Robotica* 36.7 (2018), pp. 1019–1047.

- [12] Kar-Han Tan e M Anthony Lewis. “Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control”. Em: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS'96*. Vol. 1. IEEE. 1996, pp. 132–139.
- [13] Alexandre Santos Brandao et al. “Decentralized control of leader-follower formations of mobile robots with obstacle avoidance”. Em: *2009 IEEE International Conference on Mechatronics*. IEEE. 2009, pp. 1–6.
- [14] Ricardo Carelli, Carlos M Soria e Beatriz Morales. “Vision-based tracking control for mobile robots”. Em: *ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005*. IEEE. 2005, pp. 148–152.
- [15] Mario Sarcinelli-Filho e Ricardo Carelli. “Motion Control”. Em: *Control of Ground and Aerial Robots*. Springer, 2023, pp. 41–97.
- [16] Gianluca Antonelli, Filippo Arrichiello e Stefano Chiaverini. “The entrapment/escorting mission for a multi-robot system: Theory and experiments”. Em: *2007 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics*. IEEE. 2007, pp. 1–6.
- [17] Ignacio Mas et al. “Entrapment/escorting and patrolling missions in multi-robot cluster space control”. Em: *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2009, pp. 5855–5861.
- [18] Oussama Khatib. “Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots”. Em: *The international journal of robotics research* 5.1 (1986), pp. 90–98.
- [19] Jing Guo, Gangfeng Yan e Zhiyun Lin. “Cooperative control synthesis for moving-target-enclosing with changing topologies”. Em: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2010, pp. 1468–1473.
- [20] Ying Lan et al. “A distributed reconfigurable control law for escorting and patrolling missions using teams of unicycles”. Em: *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. IEEE. 2010, pp. 5456–5461.
- [21] Ying Lan, Gangfeng Yan e Zhiyun Lin. “Distributed control of cooperative target enclosing based on reachability and invariance analysis”. Em: *Systems & Control Letters* 59.7 (2010), pp. 381–389.
- [22] Riccardo Falconi, Sven Goyal e Alcherio Martinoli. “Graph based distributed control of non-holonomic vehicles endowed with local positioning information engaged in escorting missions”. Em: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2010, pp. 3207–3214.
- [23] Eduardo Montijano et al. “Distributed entrapment for multi-robot systems with uncertainties”. Em: *52nd IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE. 2013, pp. 5403–5408.

- [24] Ronghao Zheng, Yunhui Liu e Dong Sun. “Enclosing a target by nonholonomic mobile robots with bearing-only measurements”. Em: *Automatica* 53 (2015), pp. 400–407.
- [25] Wei Li. “Formulation of a cooperative-confinement-escape problem of multiple cooperative defenders against an evader escaping from a circular region”. Em: *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 39 (2016), pp. 442–457.
- [26] Alexander Jahn et al. “Distributed multi-robot coordination for dynamic perimeter surveillance in uncertain environments”. Em: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2017, pp. 273–278.
- [27] Yanfei Liu e Yihui Wang. “Theory and experiment of enclosing control for second-order multi-agent systems”. Em: *IEEE Access* 8 (2020), pp. 186530–186539.
- [28] Yihui Wang, Yanfei Liu e Zhong Wang. “Theory and experiments on enclosing control of multi-agent systems”. Em: *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 8.10 (2021), pp. 1677–1685.
- [29] Song Gao, Rui Song e Yibin Li. “Cooperative control of multiple nonholonomic robots for escorting and patrolling mission based on vector field”. Em: *IEEE Access* 6 (2018), pp. 41883–41891.
- [30] Ning Zhou e Yuanqing Xia. “Coordination control of multiple Euler–Lagrange systems for escorting mission”. Em: *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 25.18 (2015), pp. 3596–3616.
- [31] Song Gao, Rui Song e Yibin Li. “Coordinated control of multiple Euler–Lagrange systems for escorting missions with obstacle avoidance”. Em: *Applied Sciences* 9.19 (2019), p. 4144.
- [32] Yazied A Hasan et al. “Defensive escort teams for navigation in crowds via multi-agent deep reinforcement learning”. Em: *IEEE Robotics and Automation Letters* 5.4 (2020), pp. 5645–5652.
- [33] Murillo Rehder Batista et al. “A Method to Swarm Robot Escorting by Using the Probabilistic Lloyd Method”. Em: *XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Fortaleza: [sn]* (2013).
- [34] Murillo Rehder Batista, Rodrigo Calvo e Roseli Ap Francelin Romero. “A robot online area coverage approach based on the probabilistic lloyd method”. Em: *The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. IEEE. 2013, pp. 1–8.
- [35] Jie Zhang et al. “A cooperative-control-based underwater target escorting mechanism with multiple autonomous underwater vehicles for underwater internet of things”. Em: *IEEE Internet of Things Journal* 8.6 (2020), pp. 4403–4416.

- [36] Mohamed A Kamel, Xiang Yu e Youmin Zhang. “Fault-tolerant cooperative control design of multiple wheeled mobile robots”. Em: *IEEE Transactions on control systems technology* 26.2 (2017), pp. 756–764.
- [37] Xiao Xuan Teh et al. “Communications-based formation control of mobile robots: modeling, analysis and performance evaluation”. Em: *Proceedings of the 23rd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. 2020, pp. 149–153.
- [38] Leila Sedghi et al. “Formation Control of Automated Guided Vehicles in the Presence of Packet Loss”. Em: *Sensors* 22.9 (2022), p. 3552.
- [39] VTL Rampinelli et al. “Embedding obstacle avoidance in the control of a flexible multi-robot formation”. Em: *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE. 2010, pp. 1846–1851.
- [40] Mohamed A Kamel e Youmin Zhang. “Decentralized leader-follower formation control with obstacle avoidance of multiple unicycle mobile robots”. Em: *2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. IEEE. 2015, pp. 406–411.
- [41] Steven LaValle. “Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning”. Em: *Research Report 9811* (1998).