

Gabriel Viana Pacheco

Navegação Cooperativa de Robôs Móveis com Formações Triangulares

Viçosa

2018

Gabriel Viana Pacheco

Navegação Cooperativa de Robôs Móveis com Formações Triangulares

Universidade Federal de Viçosa
Departamento de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica

Alexandre Santos Brandão

Viçosa
2018

Este trabalho é dedicado à minha família.

Agradecimentos

Agradeço aos amigos que fiz durante a graduação, às cooperações de estudo desde Cálculo 1, dos “mambos” carneiros e rijos, pois nada aproxima mais do que passar por desafios juntos.

Ao professor Alexandre Brandão “a.k.a” Tim, que me acolheu como orientando no meu primeiro semestre e me permitiu conhecer o processo de fazer ciência.

Aos meus pais que sempre me apoiaram, mesmo que eu não passasse muito tempo em casa nas férias.

Ao meu irmão, que sempre esteve por perto e que sempre me incentivou, mesmo sem saber, por confiar na minha capacidade de aprender.

À minha namorada, companheira de longa data, que sempre me apoiou em todos desafios que aceitei e que foi minha melhor amiga durante toda minha graduação.

*“Toda criança começa como um cientista nato.
Nós é que tiramos isso delas.”
(Carl Sagan)*

Resumo

Este trabalho apresenta uma estratégia para guiar múltiplos robôs em uma estrutura virtual não-flexível. Para cumprir tarefas de rastreamento de posição e de trajetória, o controle de formação é implementado utilizando o Esquema de Controle Multicamadas (ECMC). O ECMC realiza a tarefa de controle de formação dividindo o grupo de robôs em formações triangulares, e então cada formação triangular é guiada individualmente pelo esquema considerando-se as trajetórias das formações triangulares transladadas do baricentro do pelotão. Além disso, este trabalho apresenta uma estratégia simples para automatizar a identificação da sequência de formação triangular, que é crucial para calcular as funções de transformação das variáveis da formação para variáveis dos robôs. Também são propostas duas estratégias para combinar e ponderar os sinais de controle dos robôs, uma vez que cada robô pode receber sinais de controle de várias formações. As propostas são testadas em uma simulação de 4-robôs utilizando o simulador *MobileSim* e as estratégias de ponderação são avaliadas utilizando índices de performance.

Palavras-chaves: Cooperação de robôs; Esquema de Controle Multicamadas; Múltiplos agentes; Sequência de formação.

Abstract

This paper presents a strategy to guide multiple robots in a virtual non-flexible structure. To accomplish positioning and trajectory tracking tasks, the formation control is implemented using the Multilayer Control Scheme (MLCS). The MLCS performs the formation control task splitting the group of robots in triangular formations, and then each triangular formation is guided individually by the scheme considering the triangular formations trajectories translated from the group barycenter. Besides that, this work presents a simple strategy to automate the identification of the triangular formation sequence, which is crucial to compute the transformation functions of the formation to the robots' variables. It is also proposed two strategies to combine and weight the robot control signals, since each robot may receive control signals from various formations. The proposals are tested in a 4-robot formation simulation using the *MobileSim* framework and the weighting strategies are evaluated using performance indices.

Key-words: Cooperative navigation; Multilayer Control Scheme; Multiple agents; Formation sequence.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Topologia do Esquema de Controle Multicamadas.	14
Figura 2 – Variáveis de formação triangular ABC	15
Figura 3 – Formações triangulares com sequências ABC e ACB	17
Figura 4 – Esquema de rede utilizado para simulação.	19
Figura 5 – Trajetória percorrida pela formação de 4-robôs.	20
Figura 6 – Integral do erro absoluto (IAE).	21
Figura 7 – Integral do erro absoluto ponderada no tempo (ITAE).	21
Figura 8 – Integral do sinal de controle absoluto (IASC).	22

Lista de abreviaturas e siglas

V-S	Estrutura Virtual
ECMC	Esquema de Controle Multicamadas
LCS	Último sinal de controle
MCS	Média dos sinais de controle
WMCS	Média ponderada dos sinais de controle
IAE	Integral do erro absoluto
ITAE	Integral do erro absoluto ponderada no tempo
IASC	Integral do sinal de controle absoluto
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
2	ESQUEMA DE CONTROLE	13
2.1	Esquema de Controle Multicamadas	13
2.1.1	Camada Planejador	13
2.1.2	Camada Controle de Formação	14
2.1.3	Camada Robô	15
2.2	Estratégia de identificação da sequência	16
2.3	Estratégia de ponderação do sinal de controle	17
2.4	Análise de desempenho	18
3	RESULTADOS	19
4	CONCLUSÃO	23
	REFERÊNCIAS	24
	ANEXOS	26
	ANEXO A – EQUAÇÕES DE CONTROLE	27
A.1	Controle de formação	27
A.2	Controle do robô	27
	ANEXO B – ESQUEMA DE COMUNICAÇÃO	29

1 Introdução

O interesse em pesquisa com robôs móveis tem crescido substancialmente nos últimos anos, especialmente no âmbito do controle de múltiplos agentes. A principal motivação para o crescimento dessa área de pesquisa é que um grupo de robôs pode ser mais eficiente para realizar uma determinada tarefa do que um único robô especializado, além de que existem tarefas que só podem ser realizadas por um grupo de robôs ou que seriam melhor realizadas em grupo (QIAN; ZI; DING, 2016). A implementação de tarefas em sistemas multi-robôs também pode ser mais fácil e barata, bem como promove maior flexibilidade, já que previne que a missão falhe em eventuais falhas individuais de robôs. Algumas tarefas em que a utilização de múltiplos agentes pode ser vantajosa são a inspeção de grandes áreas, tarefas de busca e resgate, aplicações em segurança pública e transporte de carga coletivo (DAI et al., 2015).

O mesmo problema de formação pode ser abordado de diversas maneiras. Apesar disso, a maior parte das abordagens pode ser classificada entre três das seguintes estratégias de navegação: líder-seguidor, estrutura virtual e navegação baseada em comportamento. Na estratégia de formação líder-seguidor, o robô designado líder é responsável por guiar todos os outros robôs, denominados seguidores. Assim, o problema de formação se transforma em um problema de movimento relativo entre o robô líder e os robôs seguidores. Neste caso, se o robô líder falhar em navegação, os robôs seguidores também falharão, o que é um ponto negativo desta estratégia.

Na estratégia de formação denominada estrutura virtual, do inglês *Virtual Structure* (V-S), os robôs devem navegar mantendo uma forma geométrica predefinida, que pode realizar movimentos rotacionais e translacionais no espaço. Esta estratégia é geralmente abordada trasladando a trajetória de referência em pontos de referência para os robôs.

Na navegação comportamental um conjunto de comportamentos são considerados simultaneamente, como navegar para pontos específicos, desviar de obstáculos e manter a formação. Assim, existe um conjunto de tarefas predefinidas para cada agente e o sinal de controle final é gerado da ponderação dos comportamentos previamente definidos.

A estratégia líder-seguidor é empregada em Peng et al. (2013) para guiar uma formação de robôs móveis não-holonômicos utilizando-se da técnica *backstepping*. Para resolver o problema de saltos de velocidade provenientes da técnica de *backstepping* é implementada uma abordagem bioinspirada em neurodinâmica.

Uma estrutura virtual flexível é proposta em Low e Ng (2011)Low (2014), onde a forma da estrutura virtual pode variar levemente quando uma manobra de guinada é executada. Para manter a estrutura virtual, um ponto central virtual é definido e as

posições desejadas são calculadas utilizando-se coordenadas relativas curvilíneas em relação à formação.

O problema de controle de formação também é abordado com estratégias baseadas em consenso, na qual grafos e teoria de controle são fundidos. Neste tipo de estratégia, um grupo de robôs que se comunicam devem atingir um objetivo comum, determinado por consenso. Em [Olfati-Saber, Fax e Murray \(2007\)](#) os algoritmos de consenso são estudados com aplicação em controle de formação, de forma a obter um rápido acordo entre todos os agentes da formação e a possibilitar o aumento da performance do pelotão auto-organizado.

Quanto à estrutura de controle, podem ser consideradas estruturas centralizadas e estruturas descentralizadas ([BRANDÃO et al., 2015](#)). No primeiro caso, existe uma unidade concentradora de informação, que é responsável por armazenar toda informação e por enviar os sinais de controle de forma a estabelecer a formação. Assim, a unidade centralizadora é responsável por guiar todos os robôs utilizando um único controlador. No segundo caso, não há necessidade da unidade centralizadora, já que o robô obtém as informações necessárias para navegação a partir do ambiente e da comunicação com outros agentes, sendo portanto capazes de gerar suas próprias ações de controle.

Na estrutura virtual, a utilização de uma estrutura centralizada apresenta algumas vantagens técnicas, como menor necessidade de processamento *on-board* nos robôs e a possibilidade de obter uma solução ótima para o problema de controle, já que a unidade centralizadora possui informações de todos os robôs.

O conceito de “*Cluster Space*”, aplicado em estratégias líder-seguidor e de estrutura virtual é desenvolvido em [Mas e Kitts \(2010\)](#), o qual pode ser aplicado tanto em uma estrutura centralizada quanto descentralizada. Neste tipo de estrutura, a forma da formação é definida por variáveis do “*Cluster Space*”, como posição, orientação e forma, que devem se relacionar com as variáveis dos agentes.

Em [Kato, Watanabe e Maeyama \(2010\)](#) uma estratégia de controle denominada “*Imaginary Equilateral Triangle*” é proposta. Esta estratégia é capaz de especificar a posição de cada robô em um grupo considerando-se que a formação é composta por triângulos equiláteros.

Uma estratégia de rastreamento de trajetória para uma formação é implementada considerando o modelo dinâmico dos robôs não-holonômicos em [Rosales et al. \(2011\)](#). A mudança na forma da formação e o rastreamento da trajetória são feitos utilizando teoria de álgebra linear e métodos numéricos.

Estudos anteriores de [Rampinelli et al. \(2009\)](#) propõem a estrutura virtual chamada Esquema de Controle Multicamadas (ECMC), sendo esta constituída por um grupo de módulos independentes que juntos realizam o controle de formação. A estratégia foi implementada para uma formação triangular ([BRANDÃO et al., 2009](#)) e posteriormente

estendida para um grupo de N -robôs, considerando a divisão do pelotão em formações triangulares (RAMPINELLI et al., 2010)(BRANDÃO et al., 2015).

Cada estrutura triangular formada pelo ECMC tem uma sequência que é definida de acordo com as posições desejadas dos robôs na formação. A definição da sequência triangular é crucial, já que para cada tipo de sequência (direta ou inversa) existe uma função de transformação das variáveis de formação para as variáveis dos robôs. Para automatizar a identificação da sequência triangular, uma estratégia que usa geometria analítica simples é apresentada. Além disso, nos trabalhos anteriores os robôs recebem somente o sinal de controle de uma formação, mesmo se o robô pertence a mais de um triângulo. Neste trabalho, duas estratégias adicionais para ponderação do sinal de controle são apresentadas, buscando-se obter melhor performance. Na primeira, o sinal de controle é calculado utilizando a média dos sinais de controle referentes à um único robô específico. Na segunda, os sinais de controle do robô são ponderados de acordo com os maiores erros de formação, e em sequência todos os sinais de controle ponderados são somados. A análise de performance é verificada por resultados de simulação de seguimento de trajetória com quatro robôs móveis.

Este trabalho é dividido nos seguintes capítulos e seções: Capítulo 2 - descreve o ECMC adotado para guiar três robôs terrestres e sua generalização para N -robôs; Seção 2.2 - apresenta a estratégia adotada para identificar as sequências triangulares; Seção 2.3 - apresenta e descreve as três estratégias de ponderação dos sinais de controle; Seção 2.4 - descreve os índices de performance utilizados para avaliar os resultados de simulação e o Capítulo 3 - mostra os resultados de simulação para uma formação de 4-robôs implementada com cinco computadores em uma rede local. Finalmente, o Capítulo 4 - destaca as principais conclusões do trabalho.

2 Esquema de Controle

2.1 Esquema de Controle Multicamadas

Esta seção apresenta brevemente a estratégia centralizada usada para guiar a formação de robôs. O esquema de controle multicamadas foi originalmente introduzido em [Rampinelli et al. \(2009\)](#) e proposto em [Brandão et al. \(2009\)](#) para guiar uma formação triangular de três robôs terrestres. A mesma estratégia é generalizada em [Rampinelli et al. \(2010\)](#) e [Brandão et al. \(2015\)](#) para uma formação de N -robôs, considerando a formação de $N - 2$ triângulos. Neste trabalho, o objetivo é analisar diferentes estratégias de ponderação do sinal de controle dos robôs, uma vez que um robô pode receber sinais de controle de várias formações triangulares.

O esquema de controle multicamadas possui três camadas principais: a camada controle de formação, a camada robô e a camada planejador. A primeira camada é responsável por enviar os sinais de controle aos robôs para que estes atinjam as posições desejadas. A segunda camada representa os robôs em si e suas características cinemáticas e dinâmicas, bem como suas estratégias de navegação individuais. Já a terceira camada é responsável por definir as condições iniciais e as posições iniciais dos robôs na formação, além de gerar a trajetória a ser seguida. A topologia do ECMC é mostrada na Figura 1.

A principal vantagem do ECMC é a independência entre suas camadas e módulos verticalmente e horizontalmente ([BRANDÃO et al., 2015](#)), ou seja, o esquema pode ser utilizado excluindo ou incluindo algumas camadas. Por exemplo, considerando-se uma navegação reativa, a camada planejador poderia ser eliminada.

2.1.1 Camada Planejador

A camada planejador é responsável por definir a tarefa ou missão, por estabelecer a posição e a orientação desejada e por definir as formações triangulares. Primeiramente, a tarefa deve ser estabelecida no início da rotina da unidade centralizadora, como seguimento de caminhos, controle de posição ou seguimento de trajetória. Depois, as posições iniciais dos robôs, previamente definidas pelo usuário, são enviadas aos robôs, a partir de seus computadores. Após isso, as posições desejadas são definidas de maneira a formar uma estrutura virtual durante a missão. Depois, o pelotão de N -robôs é dividido em $(N - 2)$ formações triangulares, de acordo com os índices dos robôs. Finalmente, a camada planejador calcula a trajetória de referência a ser seguida pela formação e sua orientação desejada.

Diversos módulos podem ser inseridos na camada planejador. Como apresentado

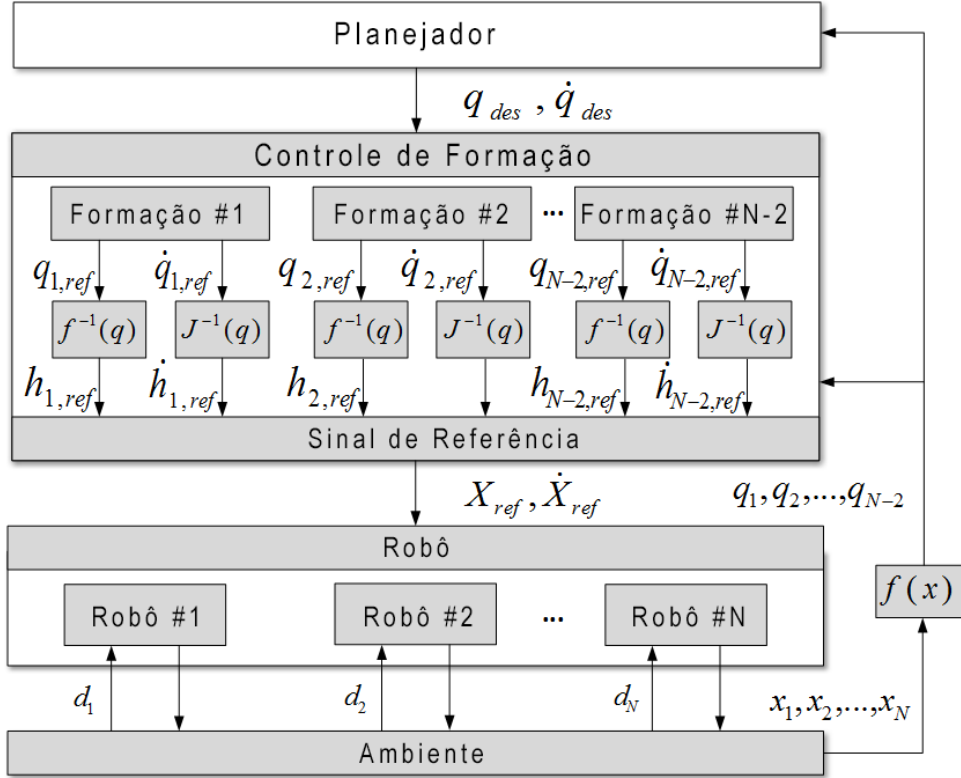


Figura 1 – Topologia do Esquema de Controle Multicamadas.

em Brandão et al. (2014), um módulo de otimização da posição desejada pode ser aplicado para evitar trajetórias que se cruzam em tarefas de rastreamento de posição. O desvio de obstáculos pela formação também pode ser implementado utilizando dados dos sensores provenientes dos robôs.

2.1.2 Camada Controle de Formação

Cada formação triangular mostrada na Figura 2 é descrita pela postura $\mathbf{P}_F = [x_F \ y_F \ \psi_F]$, onde $(x_F \ y_F)$ representa a posição do centroide da formação e ψ_F representa sua orientação em relação ao eixo x do referencial global xy . Além disso, a forma de cada estrutura triangular é definida por $\mathbf{S}_F = [p_F \ q_F \ \beta_F]^T$, que representa, respectivamente, a distância $\|R_1 - R_2\|$, a distância $\|R_1 - R_3\|$, e o ângulo $R_2 \widehat{R}_1 R_3$. A sequência de formação triangular pode ser direta (sentido anti-horário) ou inversa (sentido horário). Estas sequências são também denominadas sequências $R_1 R_2 R_3$ e $R_1 R_3 R_2$, doravante chamadas de sequências ABC ou ACB , respectivamente.

Para calcular a lei de controle para o problema de formação é necessário relacionar as variáveis da formação e as variáveis dos robôs que compõem esta formação. Assim, a transformação direta e inversa são definidas como $\mathbf{q} = f(\mathbf{h})$ e $\mathbf{h} = f^{-1}(\mathbf{q})$, respectivamente. As transformações das velocidades são obtidas por $\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ e $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{h})\dot{\mathbf{h}}$, onde \mathbf{J} é a matriz Jacobiano.

Para generalizar a implementação do ECMC para N -robôs, um polígono de N vértices é decomposto em $(N - 2)$ triângulos. Dessa forma, o controle de uma formação de N -robôs pode ser realizado utilizando os mesmos parâmetros definidos para três robôs, sendo cada formação triangular guiada individualmente pelo ECMC. Para obter a configuração de triângulos, se faz necessário ordenar os robôs a partir dos índices (R_i , para $i = 1, 2, 3, \dots, N$). Depois disso, os triângulos são definidos de acordo com os índices dos robôs na sequência direta (R_j, R_{j+1}, R_{j+2}) onde $j = 1, 2, 3, \dots, (N - 2)$. A principal vantagem de dividir o esquadrão em formações triangulares é manter a ordem da matriz Jacobiano, limitando o custo computacional desta operação. Finalmente, é necessário identificar a sequência de formação de cada triângulo, uma vez que as funções de transformação mudam de acordo com a sequência de formação. Ainda, em caso de falha de um ou mais robôs, é necessário novamente identificar as sequências das formações triangulares, tornando possível a reorganização da formação.

É importante mencionar que os sinais de controle da formação podem ser aplicados aos robôs de maneiras diferentes, já que um robô pode compor mais de uma formação triangular. Por exemplo, pode-se utilizar o último sinal de controle calculado ou a média dos sinais de controle da formação referentes às formações as quais um robô participa. Algumas abordagens são apresentadas na Seção 2.3.

2.1.3 Camada Robô

A camada robô é responsável por guiar individualmente os robôs utilizando a saída do controle de formação e os sinais dos sensores do robô. Essa camada inclui o modelo do robô terrestre, neste caso o simulador *MobileSim*, que emula o comportamento cinemático e dinâmico do robô *Pioneer 3-DX*.

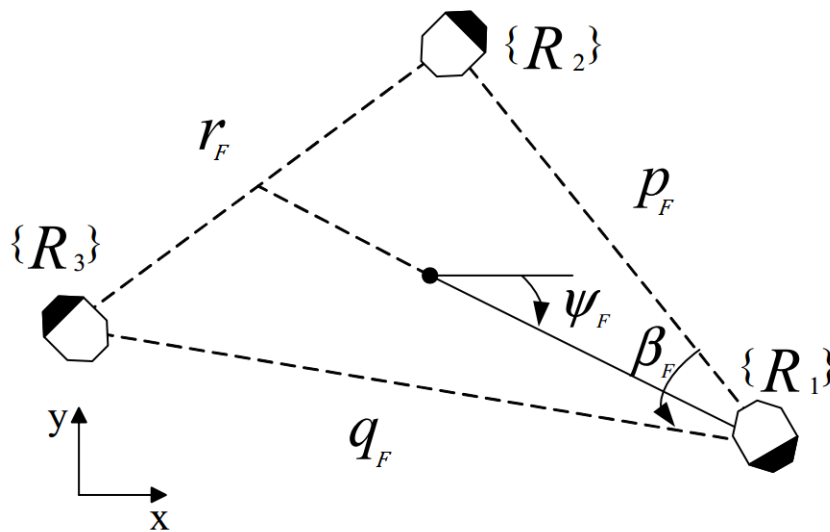


Figura 2 – Variáveis de formação triangular ABC .

É importante mencionar que os dados obtidos nas simulações utilizando o software *MobileSim* são próximos dos valores encontrados na prática, considerando-se um ambiente plano sem inclinações, de acordo com [Ernandes-Neto, Fonseca e Brandão \(2017\)](#). Sendo assim, os ajustes de ganhos obtidos na simulação podem ser utilizados em experimentos com robôs.

2.2 Estratégia de identificação da sequência

Considerando que cada formação triangular de índice j contém os robôs R_j , R_{j+1} e R_{j+2} , os vetores \vec{a} e \vec{b} são definidos abaixo:

$$\vec{a} = [(x_j - x_{j+1}) \ (y_j - y_{j+1}) \ 0] \quad (2.1)$$

$$\vec{b} = [(x_j - x_{j+2}) \ (y_j - y_{j+2}) \ 0]. \quad (2.2)$$

Do resultado do produto vetorial entre \vec{a} e \vec{b} é possível definir a sequência de cada triângulo:

$$\vec{a} \times \vec{b} = [0 \ 0 \ \kappa], \quad (2.3)$$

como uma função do vetor resultante na direção Z , que indica o sentido horário ou anti-horário. Neste caso, se o valor obtido em (2.3) é maior que 0 ($\kappa > 0$), a formação triangular está em sentido direto. Caso contrário ($\kappa < 0$), a formação triangular está no sentido inverso. A Figura 3 mostra formação decomposta em dois triângulos nos quais os vetores propostos \vec{a} and \vec{b} são mostrados. A região em cinza claro indica sequência de formação ABC (sentido direto) e a região em cinza escuro indica sequência ACB (sentido inverso).

Aplicando a estratégia proposta, é possível identificar a sequência dos triângulos que fazem parte do pelotão de maneira automática. Além disso, a implementação desta estratégia permite redefinir a sequência de formação, em caso de mudança da sequência original, o que torna o sistema mais robusto.

Esta estratégia também pode ser implementada para controlar uma formação no espaço tridimensional Cartesiano, considerando-se a componente Z do vetor gerado pelo produto vetorial dos vetores da formação, anteriormente definidos.

A estratégia de identificação de triângulos em conjunto com o ECMC é testada em simulações no capítulo Resultados.

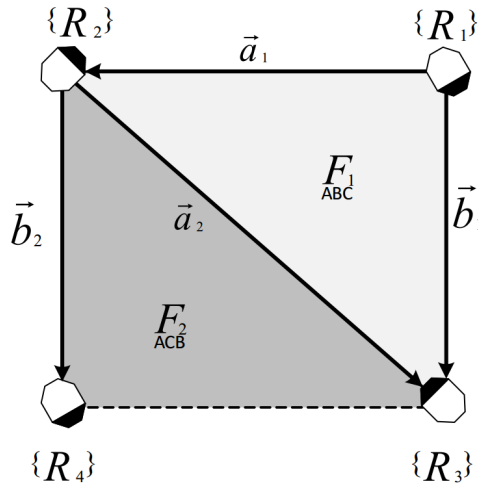


Figura 3 – Formações triangulares com sequências ABC e ACB .

2.3 Estratégia de ponderação do sinal de controle

No Esquema de Controle Multicamadas um robô pode pertencer à várias formações triangulares. Assim sendo, cada formação calcula um sinal de controle para os robôs que compõem o triângulo. Conseqüentemente, um robô pode receber múltiplos sinais de controle, cada um corresponde à uma formação a qual o robô faz parte. Desta forma, é necessário definir como será realizada a ponderação dos sinais de controle pelo robô. Neste trabalho, este problema é abordado de três maneiras: considerando somente o último sinal de controle (*LCS - Last Control Signal*), calculando a média dos sinais de controle (*MCS - Mean of the Control Signals*) e calculando uma média ponderada dos sinais de controle baseando-se nos erros de formação (*WMCS - Weighted Mean Control Signal*).

Na primeira abordagem, somente o último sinal de controle endereçado à um robô específico é realmente transmitido. Portanto, o robô reage somente ao controle de uma formação e ignora os sinais de controle provenientes das outras formações.

Já na segunda proposta, os sinais de controle das formações para um robô específico são somados e divididos pelo número de formações as quais um robô pertence, obtendo assim a média dos sinais de controle.

Finalmente, uma média ponderada baseada nos erros de formação é proposta. Nesta situação, a formação triangular com maior erro em relação às outras formações tem um maior peso no sinal de controle dos robôs que a compõem. Considerando n o número de formações triangulares, i o índice do robô, j o índice da formação, $B_{i,j}$ a relação de pertencimento entre o robô e a formação, definida por elementos 0 e 1, $\|\tilde{q}_j\|$ a norma dos erros de formação e $X_{Ri,j}$ o sinal de controle da formação em relação ao robô, temos que o sinal de controle final é calculado como:

$$X_{Ri} = \frac{\sum_{j=1}^n B_{i,j} \|\tilde{q}_j\| X_{Ri,j}}{\sum_{j=1}^n B_{i,j} \|\tilde{q}_j\|} \quad (2.4)$$

As três técnicas apresentadas são implementadas em simulações, buscando-se obter o menor erro em tarefas de rastreamento de trajetória.

2.4 Análise de desempenho

Para avaliar os resultados de simulação foram utilizados três indicadores de performance, que são: a integral do erro absoluto (IAE), a integral do erro absoluto ponderada no tempo (ITAE) e a integral do sinal de controle absoluto (IASC).

O primeiro deles é matematicamente definido por

$$IAE = \int_0^t \|\tilde{\mathbf{X}}\| dt \quad (2.5)$$

e indica a soma do erro durante o tempo da missão.

Similarmente, tem-se o

$$ITAE = \int_0^t t \|\tilde{\mathbf{X}}\| dt, \quad (2.6)$$

que mostra quão rápido a formação converge e o erro em estado permanente.

Por fim, o indicador

$$IASC = \int_0^t \|\mathbf{U}\| dt \quad (2.7)$$

estima do esforço de atuação realizado pelo robô, onde \mathbf{U} é a normal do sinal de atuação (velocidade linear e angular).

3 Resultados

Para implementar a simulação com o programa computacional *MobileSim*, considerando-se uma formação de 4 robôs, um esquema de comunicação baseado em protocolo UDP é montado na rede Wi-Fi local. Assim, quatro computadores são dedicados ao controle dos robôs, enquanto um computador central calcula as referências de trajetória e os sinais de controle das formações. O esquema de comunicação é ilustrado pela Figura 4. Para analisar os resultados de simulação, os dados das trajetórias executadas e os erros são coletados. Os resultados de simulação podem ser vistos em youtu.be/XPRBLKtTNug. Cada simulação dura o período de aproximadamente seis minutos e o vídeo é apresentado em velocidade 6 vezes aumentada. Deve-se observar que para todas as estratégias de ponderação do sinal de controle os robôs seguem a trajetória de maneira similar, sendo que as diferenças serão observadas pelos índices de performance.

A formação de quatro robôs resulta em duas formações triangulares, que executam suas trajetórias individualmente. A trajetória aqui proposta é composta por uma lemniscata, que é útil para avaliar a performance do sistema de controle, pois impõe grandes variações de velocidades lineares e angulares, e por uma elipse grande, que força um aumento do estresse nos atuadores devido à sua alta velocidade. A Figura 5 mostra um resultado de simulação com a trajetória executada e a trajetória de referência, respectivamente especificadas pelas linhas sólidas e pontilhadas. Cada formação triangular é guiada considerando-se seu baricentro, indicado por um pequeno quadrado preto. Os quatro robôs são propriamente enumerados e as seqüências direta e inversa são evidenciadas pelo sentido da flecha e pela

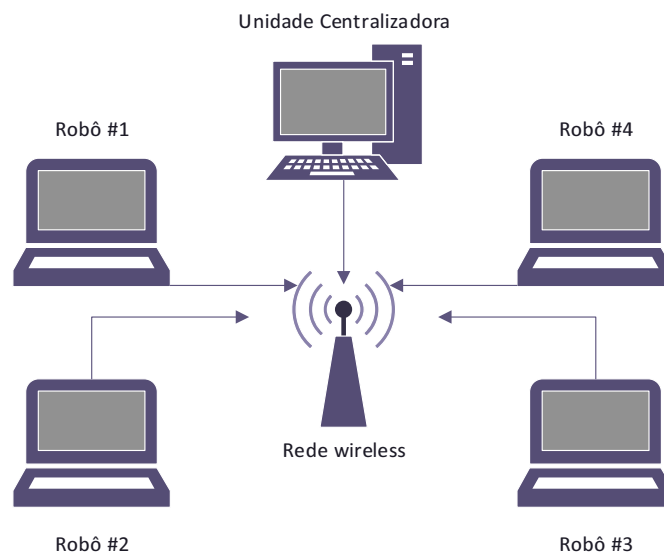


Figura 4 – Esquema de rede utilizado para simulação.

cor da formação triangular, sendo que a cor azul indica uma sequência de formação direta e a cor vermelha uma sequência de formação inversa.

Para observar o efeito produzido pelas estratégias de ponderação do sinal de controle, os índices de performance IAE, ITAE e IASC são computados e armazenados para cada estratégia implementada, de forma a criar um conjunto de amostras. O IAE e o ITAE são calculados somando a norma dos erros formação, e o IASC é calculado somando a norma dos sinais de atuação dos robôs (velocidade angular e velocidade linear). A partir disso, a simulação da tarefa de seguimento de trajetória é executada 10 vezes para cada estratégia de ponderação de sinal de controle apresentada. Em seguida, os índices de performance são agrupados e comparados com diagramas de caixa. Os resultados são mostrados nas Figuras 6, 7 e 8, para o IAE, o ITAE e o IASC, respectivamente.

Para interpretar este resultado, se faz necessário descrever como são construídos os diagramas de caixa. Neste tipo de gráfico, a marca central vermelha em cada caixa indica a mediana de um grupo de amostras, sendo que os limites superiores e inferiores da caixa indicam os percentuais de 25 e 75 por cento da distribuição, respectivamente. A linha pontilhada se estende até os dados que não são desconsiderados por estarem muito distantes da distribuição. Os dados que estão muito longe e são desconsiderados são mostrados no gráfico pelo símbolo ‘+’ em vermelho.

Observando-se a Figura 6 é possível notar que a terceira estratégia implementada

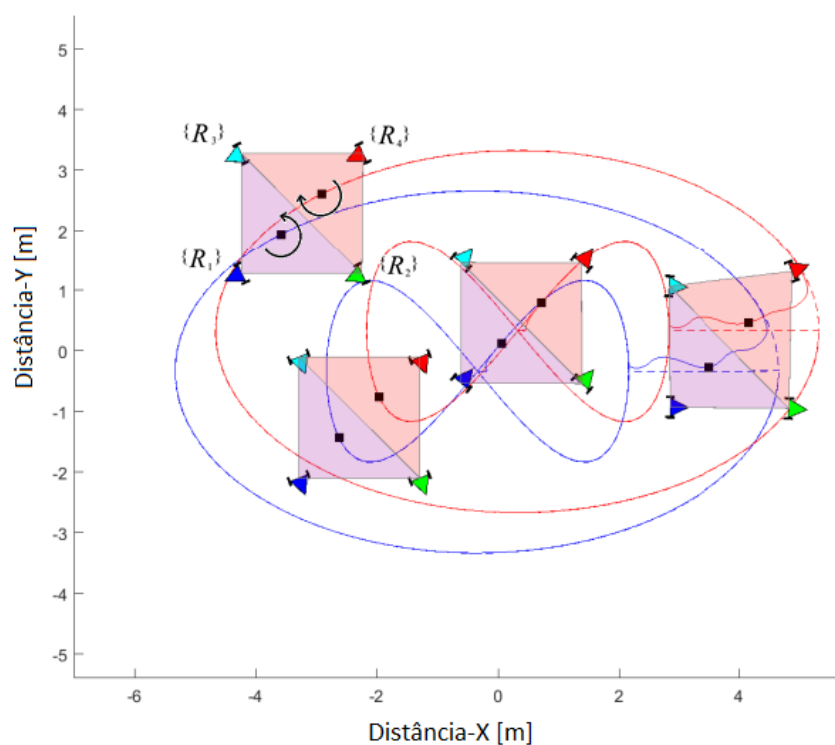


Figura 5 – Trajetória percorrida pela formação de 4-robôs.

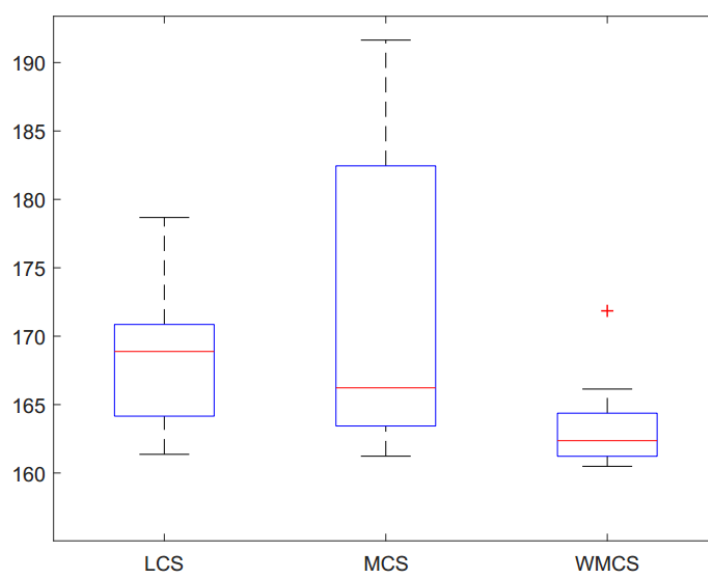


Figura 6 – Integral do erro absoluto (IAE).

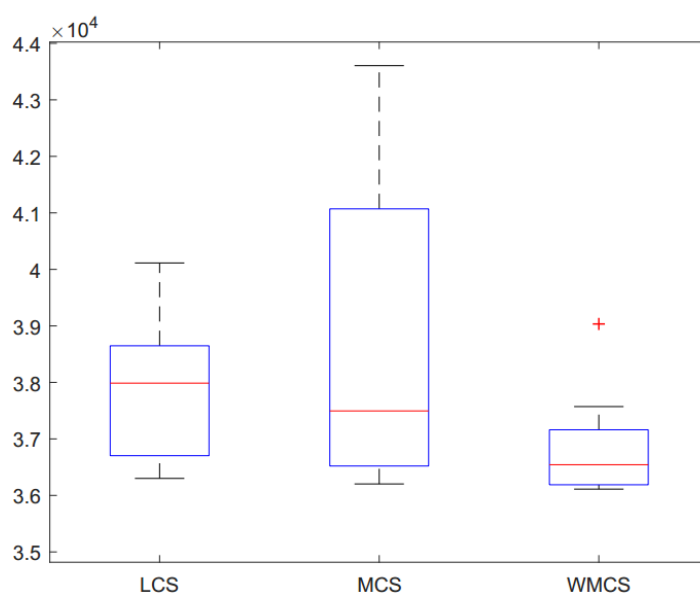


Figura 7 – Integral do erro absoluto ponderada no tempo (ITAE).

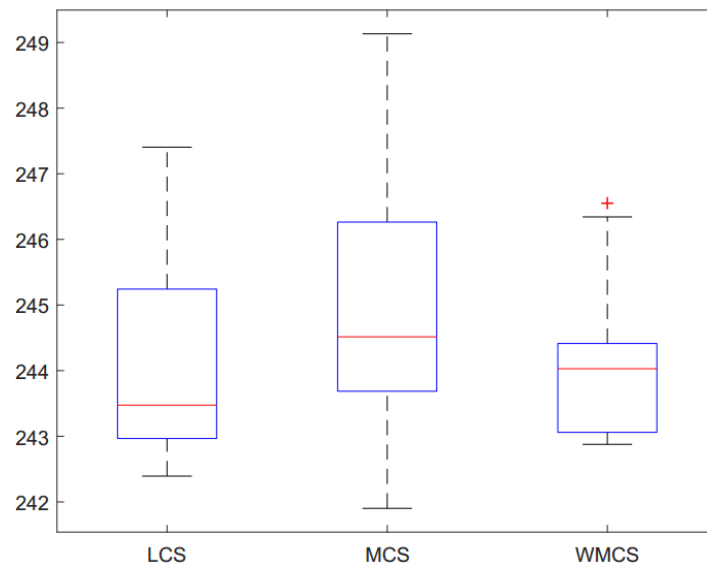


Figura 8 – Integral do sinal de controle absoluto (IASC).

(WMCS) acumula menos erro que as outras. Além disso, a pequena dispersão das amostras mostrada no gráfico WMCS mostra que esta estratégia produz, com maior probabilidade, menor erro do que as outras, mesmo que as estratégias tenham resultado em erros tão pequenos quanto os produzidos pela estratégia WMCS. Também pode-se notar que a estratégia LCS possui a pior performance considerando-se a capacidade de manter o erro pequeno, uma vez que a mediana do IAE possui o maior valor comparado com as outras estratégias.

O gráfico do ITAE (Figura 7) mostra que na maioria dos casos, a WMCS converge mais rapidamente para um regime permanente entre as outras estratégias. Ainda, como na análise de performance do IAE, a estratégia LCS apresentou o maior valor, o que resulta no maior tempo de convergência (ou convergência mais lenta).

Finalmente, o gráfico IASC (Figura 8) mostra que o método LCS provoca o menor estresse nos atuadores, seguido pelo método WMCS. Portanto, além de possuir uma melhor resposta em termo de erros e tempo de convergência, a estratégia WMCS não possui um gasto energético muito grande quando comparado às outras, uma vez que possui um sinal de controle intermediário considerando as três estratégias de ponderação pelo gráfico do IASC.

4 Conclusão

Este trabalho apresenta a implementação do Esquema de Controle Multicamadas em uma formação de 4-robôs móveis, onde os robôs são divididos em duas formações triangulares guiadas individualmente pelo ECMC. A estratégia de identificação de sequência triangular é implementada e validada, o que é evidenciado pelos resultados de simulação. Além disso, três estratégias de ponderação dos sinais de controle são testadas e comparadas utilizando-se índices de performance para medir a efetividade de cada estratégia.

Os resultados de simulação mostram que a estratégia WMCS produz os menores erros acumulados e o menor tempo de convergência, com menos dispersão. Por outro lado, a estratégia LCS produz os maiores erros e a pior convergência, sendo portanto a estratégia mais lenta. Além disso, a estratégia WMCS apresentou um consumo de energia intermediário comparando-se com as outras duas estratégias, a partir do gráfico de IASC, que indica o estresse nos atuadores durante a simulação.

A próxima etapa desta pesquisa é realizar o experimento com quatro robôs e propor mais estratégias para ponderar o sinal de controle, de forma a obter uma melhor performance. Para reduzir o erro de seguimento de trajetória, seria interessante implementar um compensador dinâmico na camada do robô. Ainda, para validar as estratégias de ponderação de sinal de controle em um cenário mais próximo do real seria necessário implementar estratégias de desvio de obstáculo no controle de trajetória.

Referências

- BRANDÃO, A. S. et al. A multi-layer control scheme for a centralized uav formation. In: IEEE. *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 1181–1187. Citado na página 14.
- BRANDÃO, A. S. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with adaptative dynamic compensation. In: *Proc. of the 5th IEEE International Conference on Mechatronics*. Málaga, Spain: IEEE, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.
- BRANDÃO, A. S. et al. The multilayer control scheme: A strategy to guide n-robots formations with obstacle avoidance. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, v. 26, n. 3, p. 201–214, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 13.
- DAI, Y. et al. Symmetric caging formation for convex polygon object transportation by multiple mobile robots. In: IEEE. *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 595–600. Citado na página 10.
- ERNANDES-NETO, V.; FONSECA, R. H.; BRANDÃO, A. S. Proposal and comparison of trajectory tracking strategies for mobile robots. In: IEEE. *Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), 2017 Latin American*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado na página 16.
- KATO, T.; WATANABE, K.; MAEYAMA, S. A formation method for heterogeneous multiple robots by specifying the relative position of each robot. In: IEEE. *SICE Annual Conference 2010, Proceedings of*. Taipei, Taiwan, 2010. p. 3274–3277. Citado na página 11.
- LOW, C. B. A flexible virtual structure formation keeping control design for nonholonomic mobile robots with low-level control systems, with experiments. In: IEEE. *Intelligent Control (ISIC), 2014 IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2014. p. 1576–1582. Citado na página 10.
- LOW, C. B.; NG, Q. S. A flexible virtual structure formation keeping control for fixed-wing uavs. In: IEEE. *Control and Automation (ICCA), 2011 9th IEEE International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 621–626. Citado na página 10.
- MAS, I.; KITTS, C. Centralized and decentralized multi-robot control methods using the cluster space control framework. In: *Proceedings of the 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Montreal, Canada: [s.n.], 2010. p. 115–122. Citado na página 11.
- OLFATI-SABER, R.; FAX, A.; MURRAY, R. M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 95, n. 1, p. 215–233, 2007. Citado na página 11.
- PENG, Z. et al. Leader–follower formation control of nonholonomic mobile robots based on a bioinspired neurodynamic based approach. *Robotics and autonomous systems*, Elsevier, v. 61, n. 9, p. 988–996, 2013. Citado na página 10.

- QIAN, S.; ZI, B.; DING, H. Dynamics and trajectory tracking control of cooperative multiple mobile cranes. *Nonlinear Dynamics*, Springer, v. 83, n. 1-2, p. 89–108, 2016. Citado na página 10.
- RAMPINELLI, V. et al. Embedding obstacle avoidance in the control of a flexible multi-robot formation. In: IEEE. *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2010. p. 1846–1851. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- RAMPINELLI, V. T. L. et al. A multi-layer control scheme for multi-robot formations with obstacle avoidance. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Robotics, ICAR'09*. Munich, Germany: IEEE, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.
- ROSALES, A. et al. Formation control and trajectory tracking of mobile robotic systems—a linear algebra approach. *Robotica*, Cambridge University Press, v. 29, n. 3, p. 335–349, 2011. Citado na página 11.

Anexos

ANEXO A – Equações de controle

No esquema de controle em cascata, primeiramente é realizado o controle das formações triangulares. Em seguida os sinais de saída do controle de formação são transmitidos como sinais de entrada no laço de controle do robô, que é mais interno.

A.1 Controle de formação

Primeiramente, fez-se necessário definir o erro das variáveis da formação, exibido na Equação A.1.

$$\tilde{X}_F = X_{Fd} - X_F \quad (\text{A.1})$$

Considerando-se que a velocidade de saída do controlador deve compensar o erro de formação, e além disso acompanhar a movimentação desejada, é possível obter a Equação A.2, apresentada á seguir.

$$\dot{X}_{Fr} = \dot{X}_{Fd} + K_a \tilde{X}_F \quad (\text{A.2})$$

onde K_a é uma constante que multiplica o erro de formação.

À partir da matriz \dot{X}_{Fr} obtida é possível aplicar o jacobiano inverso e obter o vetor \dot{X}_d referente à cada robô. À partir disso, obtém-se a lei de controle final, que depende da posição desejada dos agentes e do erro de posicionamento dos robôs, que é apresentada na Equação A.3.

$$U = K^{-1}(\dot{X}_d + K_2 \tanh(K_1 \tilde{X})) \quad (\text{A.3})$$

Vale notar que neste caso foi adicionado uma função *tangente hiperbólico* visando a saturação do controlador.

A.2 Controle do robô

Para realizar o controle individual dos robôs é primeiramente calculado o erro de posição \tilde{X} . Vale lembrar que X é o vetor que contém as posições x e y . Assim, o erro de

posição pode ser determinado pela Equação A.4, apresentada à seguir, onde X_d é a posição desejada.

$$\tilde{X} = X_d - X \quad (\text{A.4})$$

Considerando-se que o erro tenha um comportamento assintótico negativo, encontra-se a Equação A.5. O comportamento assintótico pode ser facilmente verificado resolvendo a equação diferencial proposta. Vale lembrar que neste caso K_p representa um ganho proporcional.

$$\dot{\tilde{X}} + K_p \tilde{X} = 0, \quad \text{se } K_p > 0 \quad (\text{A.5})$$

Derivando-se a Equação A.4 é possível obter a obter a Equação A.6, sendo K a matriz de modelo cinemático e $U = [v \ \omega]^T$

$$\dot{\tilde{X}} = \dot{X}_d - KU \quad (\text{A.6})$$

Além disso, da Equação A.5 tem-se que $\dot{\tilde{X}} = -K_p \tilde{X}$. Finalmente, substituindo $\dot{\tilde{X}}$ obtém-se:

$$\begin{aligned} KU &= \dot{X}_d + K_p \tilde{X} \\ U &= K^{-1}(\dot{X}_d + K_p \tilde{X}) \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

ANEXO B – Esquema de comunicação

Para realizar a comunicação entre os 4 computadores que simulam os robôs e a unidade centralizadora, são trocados pacotes do tipo UDP pela rede *WiFi* local em seu endereço *broadcast*. Na proposta de topologia de comunicação utilizada, cada robô deve trocar mensagens somente com a unidade centralizadora, não havendo portanto necessidade de troca de mensagens entre os robôs. Assim, escolheu-se por endereçar os dados de acordo com as portas, escolhidas de acordo com o índice do robô.

Para cada robô são definidas uma unidade de recebimento e uma unidade de envio de pacotes UDP. A porta local é definida pelo número $26000 + ID$ e a porta remota é definida por $25000 + ID$, onde ID é o número identificador do robô, neste caso $ID = 1, 2, 3, 4$. A Tabela 1 exibe as portas remotas e locais para cada robô, considerando-se a formação de quatro robôs.

Tabela 1 – Porta local e remota para cada robô.

Robô	Porta Local	Porta Remota
1	26001	25001
2	26002	25002
3	26003	25003
4	26004	25004

Assim definidas as portas locais e remotas dos robôs, devem ser definidas as portas para recepção e envio de dados para a unidade centralizadora. Para recepção de dados, é necessário considerar como portas locais todas as portas remotas utilizadas pelos robôs. Já para envio de dados, deve-se considerar como portas remotas as portas locais definidas anteriormente. Assim, as portas locais e remotas da unidade centralizadora são exibidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Portas locais e remotas da unidade centralizadora.

Portas Locais	Portas Remotas
25001	26001
25002	26002
25003	26003
25004	26004

Assim, cada robô recebe os dados destinados ao seu número identificador, não havendo necessidade de examinar o destinatário de cada mensagem enviada ao endereço *broadcast* da rede local.