

Fidelis Márcio Santos Rabelo de Melo Júnior

**Navegação por consenso com formação
descentralizada de robôs através de uma
estrutura de comunicação broadcast**

Viçosa - MG

2017

Fidelis Márcio Santos Rabelo de Melo Júnior

**Navegação por consenso com formação
descentralizada de robôs através de uma estrutura de
comunicação broadcast**

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

Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão

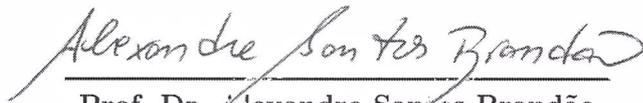
Viçosa - MG

2017

Fidelis Márcio Santos Rabelo de Melo Júnior

**Navegação por consenso com formação
descentralizada de robôs através de uma estrutura de
comunicação broadcast**

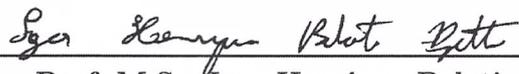
Trabalho aprovado. Viçosa - MG, 14 de julho de 2017:



Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão
Orientador, Universidade Federal de Viçosa



**Prof. Dr. Marcos Henrique Fonseca
Ribeiro**
Membro - Universidade Federal de Viçosa



**Prof. M.Sc. Igor Henrique Beloti
Pizetta**
Membro - Instituto Federal do Espírito Santo

Viçosa - MG

2017

Dedico a meus pais e minhas irmãs.

Agradecimentos

Agradeço a minha família pela confiança e carinho, a minha namorada por toda força e incentivo, e ao meu orientador Alexandre pelo apoio e conhecimento compartilhado. Agradeço a equipe NERO que me ensinou que “brincar com robôs é coisa séria”, à CNPq e à FAPEMIG pelo suporte financeiro concedido. Agradeço também, à Universidade Federal de Viçosa por viabilizarem a realização deste projeto.

“Levante-se e lute!”
(Leona)

Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a trajetória de uma formação robótica descentralizada através de uma estratégia consensual. Os fundamentos necessários para a execução desta tarefa são apresentados, como a solução do problema do encontro por consenso, sua expansão para um problema de formação de robôs, o projeto do controlador aplicado a robôs, desenvolvido por métodos de Lyapunov e a estruturação do sistema de troca de informações entre os agentes. A validação da proposta é realizada experimentalmente e os resultados e suas discussões são apresentados no trabalho demonstrando a execução bem-sucedida da tarefa de rastreamento de trajetória.

Palavras-chaves: consenso; robótica móvel; comunicação.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Comunicação entre robôs representada através de um grafo orientado.	11
Figura 2 – Formação desejada dos robôs para execução das tarefas.	13
Figura 3 – Grafo referente à matriz de adjacência utilizada nos experimentos.	16
Figura 4 – Configuração da formação desejada para realização dos experimentos.	16
Figura 5 – Exemplo de pacote de dados do Robô 3.	18
Figura 6 – Erro da condição de consenso.	20
Figura 7 – Trajetórias dos robôs durante o experimento.	20
Figura 8 – Falha de comunicação durante o experimento, representada pela taxa de atualização de dados.	21

Sumário

1	Introdução	9
1.1	Problema de <i>Rendez-vous</i>	10
1.2	Objetivos	11
1.3	Metas e Limitações	12
2	Expansão do Problema de Rende-vous para uma Formação de Robôs	13
2.1	Desenvolvimento do Controlador Baseado na Teoria de Lyapunov	14
2.2	do Sistema de Troca de Informações	15
2.3	Estrutura de Comunicação	16
3	Resultados e Discussão	19
4	Considerações Finais	22
	Referências	23

1 Introdução

O interesse no uso de robôs para execução de tarefas cotidianas é assunto de bastante relevância para a comunidade científica. Estes buscam modificar a forma como vivemos e trabalhamos, viabilizando maneiras mais inteligentes de executar tarefas pesadas, repetitivas e, por vezes, perigosas. Numerosos estudos nos últimos anos tiveram como foco os veículos terrestres e aéreos não-tripulados (VTNTs e VANTs), atuando de forma autônoma ou semiautônoma, de forma individual ou coletiva, para execução de missões nos mais variados cenários. Estas aplicações incluem missões de monitoramento e vigilância (LIU; NEJAT, 2013), inspeção e manipulação em áreas de desastre (TAN et al., 2013; CHENG et al., 2009), ordenação e transporte de cargas (FINK; HSIEH; KUMAR, 2008; KENNEDY; GUERRERO; KUMAR, 2015), assistência em ambientes domésticos e hospitalares (JEON; LEE, 2016), missões de busca e resgate (DUBÉ et al., 2016), coordenação de satélites (SAVINO et al., 2016), entretenimento (ALONSO-MORA et al., 2015), dentre outras.

Devido aos atuais altos padrões de exigência, a execução destas tarefas por muitas vezes se torna difícil de ser realizada com a autonomia e desempenho esperados, sendo necessária uma incansável busca por aprimoramentos em hardware e software para que os robôs possam atender tal demanda. Uma outra forma de ganho em desempenho é fazer com que os robôs trabalhem cooperativamente. Conforme apontado em diversas obras (ARBANAS et al., 2016; FIERRO et al., 2002; DAS et al., 2002), o trabalho cooperativo de robôs aumenta a eficiência energética do sistema e asseguram autonomia e ganho em desempenho.

Existem diversas estruturas nas quais pode-se trabalhar os robôs cooperativamente (BRANDÃO; SARCINELLI-FILHO, 2016), tais quais, líder-seguidor, abordagem de comportamento, estratégias de consenso e estruturas virtuais. Estas estruturas possuem suas particularidades. No primeiro caso, um robô é responsável por liderar todos os outros robôs, tal qual pássaros que seguem um líder durante suas migrações. No segundo caso, os robôs são programados para reagir diante um ambiente segundo padrões pré-estabelecidos. O terceiro caso se fundamenta na regra de que os robôs devem convergir para o ponto desejado simultaneamente, sendo então um problema de ponto de encontro (rendez-vous). No quarto caso a formação e o movimento em formação são os resultados a serem atingidos.

Além disso, todas estas estruturas pertencem a duas classes maiores de esquemas cooperativos, que são os esquemas centralizados e descentralizados (SHI et al., 2015). No esquema centralizado, toda informação a ser entregue aos robôs da formação é computada por um único agente, sendo este agente um robô da formação ou uma estação. Num esquema descentralizado, cada robô toma sua ação de forma independente, sem consultar

nenhum agente central, reagindo em acordo com sua visão restrita do sistema.

Tendo em vista que diversos trabalhos envolvendo cooperação de robôs não avançam além da fase de simulação e que, para uma aplicação prática destes sistemas, é necessário que se avance até a fase experimental, de testes, o presente trabalho aborda um problema de cooperação utilizando três robôs terrestres do tipo Pioneer 3-DX. Estes VTNTs executam uma tarefa de seguimento de trajetória, em formação, utilizando as estratégias de consenso. Todo o controle é realizado pelos agentes do sistema (robôs), de forma descentralizada. Os robôs estão fortemente conectados, compartilhando suas informações de postura através de uma rede em comunicação broadcast, descentralizada.

O desenvolvimento do estudo é explicitado no texto da seguinte forma: os Capítulos 1.1 a 2.2 descrevem os fundamentos necessários para execução da tarefa, tais quais a solução do problema de rendez-vous por consenso, expansão da ideia do problema de rendez-vous para uma formação de robôs, desenvolvimento do controlador aplicado aos robôs por métodos de Lyapunov e estruturação do sistema de troca de informações entre os agentes. O Capítulo 3 apresenta os resultados e discussões do trabalho, trazendo gráficos do desempenho dos robôs na execução da tarefa. O Capítulo 4 finaliza o trabalho, apontando as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Problema de *Rendez-vous*

A navegação baseada em consenso basicamente visa resolver um problema de *rendez-vous*, onde cada um dos agentes do sistema deve atingir o ponto do encontro simultaneamente, no menor tempo possível (SILVA; CARVALHO; BRANDÃO, 2016).

Para isso, os agentes devem receber a coordenada do ponto de encontro (*rendez-vous*) e comunicarem entre si para atingi-lo em conjunto. Uma forma pertinente de representar essa comunicação é através de um grafo orientado, fazendo com que os nós representem os agentes e as arestas do grafo os canais de comunicação. Com isso, pode-se estabelecer uma matriz de adjacência \mathbf{A} representando o grafo, onde cada um dos termos $[a_{ij}]$ da matriz representa se há, $[a_{ij}] \neq 0$, comunicação entre o agente i e j ou se não há, $[a_{ij}] = 0$, comunicação entre os agentes. Deve-se deixar claro que a comunicação se estabelece no sentido do agente i receber ou não informação do agente j .

É importante notar que \mathbf{A} estabelece, de forma matricial, como a troca de informação entre agentes ocorre, além de ponderar com coeficientes essa comunicação. Em problemas de controle cooperativo de robôs, os coeficientes, que podem ser fixos ou dinâmicos, irão ponderar a influência sentida por cada robô com um de seus pares. Além disso, classifica-se também a matriz de adjacência quanto a comunicação entre os agentes. No caso de todos os agentes se comunicarem, esta é dita fortemente conectada; no caso de

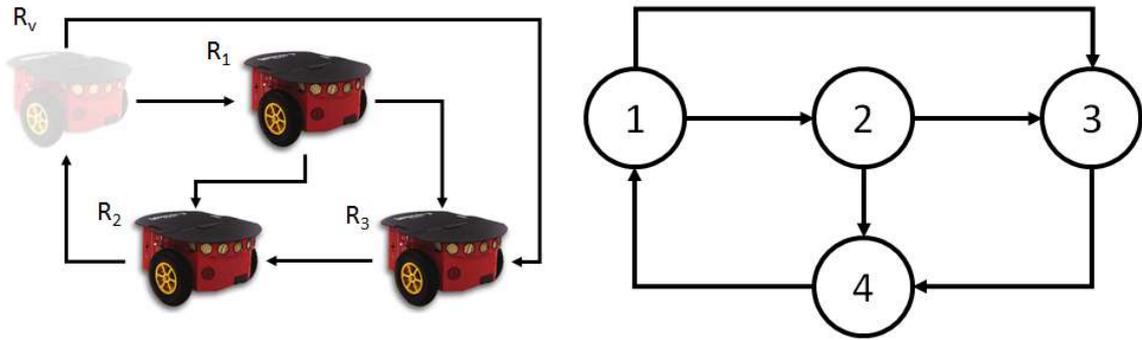


Figura 1 – Comunicação entre robôs representada através de um grafo orientado.

haver pelo menos um caminho interligando um nó a outro, esta é dita conectada; do contrário, ela é dita não conectada. No exemplo da Figura 1 para $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.78 & 0 & 0 & 0 \\ 2.5 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 2 & 0 \end{bmatrix}$, é possível afirmar que os robôs estão conectados e que o robô 4 sofre maior influência do robô 3 do que do robô 2.

Dessa forma, pode-se definir a formulação para deslocamento dos agentes, num problema de ponto de encontro, dado por

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)), i = 1, \dots, n \quad (1.1)$$

em que \mathbf{x}_i e $\dot{\mathbf{x}}_i$ representam, respectivamente, a posição e a velocidade do i -ésimo agente. Juntamente a isso, a_{ij} representa a entrada da matriz de adjacência, estabelecendo o peso com que o i -ésimo agente será influenciado pelo j -ésimo. É importante notar que o algoritmo dado por (1.1) fará com que o estado do i -ésimo agente seja atualizado em acordo com a posição dos outros agentes, a fim de convergirem em conjunto para um ponto de encontro em um instante de tempo comum. Estabelece-se, portanto, que a condição de consenso será atingida quando

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \|\dot{\mathbf{x}}(t)\| = 0 \quad (1.2)$$

1.2 Objetivos

Propor uma topologia virtual de rede para troca de informações, utilizando UDP, entre robôs que navegam cooperativamente. Criar um pacote de dados generalizado para troca de informações. Analisar o modelo proposto e sua viabilidade. Implementar a estrutura proposta computacionalmente. E, validar a estrutura através de experimento de navegação cooperativa entre robôs terrestres utilizando a estratégia de consenso.

1.3 Metas e Limitações

Analisando a necessidade de uma estrutura de troca de informações entre robôs navegando cooperativamente e de forma autônoma foi idealizada e proposta uma estrutura de rede, para troca de informação entre eles, através do que já se conhece sobre estruturas de comunicação. Com uma estrutura de troca de dados proposta, é necessário organizar a informação de forma a ser interpretada pelas entidades da rede, então se criou um pacote que contém as informações a serem trocadas de forma organizada. A implementação computacional é organizada em funções para que o usuário não necessite conhecer o processo da comunicação, nem mesmo a estrutura, sendo necessário apenas saber como enviar e como receber a informação. A validação por experimento foi realizada com a navegação cooperativa de robôs, utilizando a estratégia de navegação descentralizada, seguindo uma estrutura virtual de formação, com consenso, em uma rede de troca de informação fortemente conectada. Por fim, destaca-se que esse trabalho está limitado a experimentos de navegação descentralizada por consenso de robôs terrestres.

2 Expansão do Problema de *Rendez-vous* para uma Formação de Robôs

O problema de *rendez-vous* descrito também pode ser utilizado para a construção de uma formação de robôs. Para isso, basta expandir as interações dadas por (1.2) para um problema em que o ponto de convergência do algoritmo deixa de ser um ponto comum a todos agentes e passa a ser uma determinada distribuição espacial dos agentes. Para atingir tal objetivo, é possível propor

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) - (\mathbf{x}_{fj} - \mathbf{x}_{fi}), i = 1, \dots, n \quad (2.1)$$

em que \mathbf{x}_{fi} representa a posição de um i -ésimo ponto da formação. Portanto, estes agentes entrariam em consenso, conforme (2.1), assim que as diferenças de posição entre os i - e j -ésimos agentes fossem iguais as diferenças de posição entre os i - e j -ésimos pontos da formação.

Neste trabalho, a formação a ser adotada pelos três agentes pode ser observada na Figura 2.

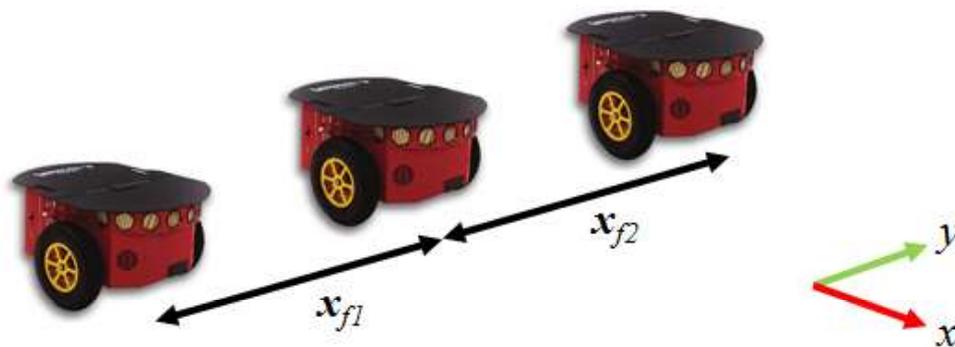


Figura 2 – Formação desejada dos robôs para execução das tarefas.

Para o caso especial em que um dos robôs pertença a um sistema descrito por matriz adjacência conectada, mas que este não receba sinal de nenhum outro agente, apenas entregando o seu aos demais, este robô terá todos os i -ésimos coeficientes iguais a zero. Isso faz com que sua velocidade $\dot{\mathbf{x}}_i(t)$ seja igual a zero durante toda a execução da tarefa de consenso. Portanto, é possível afirmar que a posição deste agente será a posição em que o consenso irá ocorrer.

Neste trabalho, este conceito, denominado líder virtual, será utilizado para que a formação de robôs siga uma determinada trajetória, dada pelo movimento no plano xy deste robô líder virtual.

2.1 Desenvolvimento do Controlador Baseado na Teoria de Lyapunov

Para que seja proposto o controlador que irá ser rodado nos robôs, foi utilizado o modelo cinemático para robôs móveis do tipo unicyclo, bastante difundido na literatura, dado por

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{K}\mathbf{u} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -a \sin(\psi) \\ \sin(\psi) & a \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

com $\dot{\psi} = \omega$, onde \mathbf{x} é a posição do robôs no plano cartesiano xy e ψ é sua orientação. Os sinais de controle referentes a velocidade linear e angular são respectivamente indicados por v e ω .

A constante a se refere à distância entre o eixo das rodas e o ponto de controle. Conforme dito no Capítulo 2, os robôs farão seguimento de trajetória a partir de um líder virtual. Dessa forma, é necessário propor um controlador para $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}$, onde \mathbf{x}_d é a posição que o agente deseja atingir e $\tilde{\mathbf{x}}$ é o erro de posição. Juntamente a isso, agregando à formulação de consenso dada em (1.2) e a velocidade entre os agentes, temos o consenso dado agora por

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i = \sum_{j=1}^n \{ \alpha a_{ij} [(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) - (\mathbf{x}_{fj} - \mathbf{x}_{fi})] + \beta a_{ij} \dot{\mathbf{x}}_j \} \quad (2.3)$$

em que α e β são ponderações da posição e velocidade dos robôs. Utilizar esta formulação para o consenso, com acréscimo do termo de velocidade viabiliza o controle de trajetória. Afinal, é importante que os agentes respondam à velocidade com que o líder virtual está se movendo, evitando com que os agentes sejam apenas “arrastados” pelo erro da posição.

O controlador utilizado para garantir a convergência assintótica da posição do robô aos seus valores desejados é dado por

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{K}^{-1} [\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_d + k_{p1} \tanh(k_{p2} \tilde{\mathbf{x}}) \\ &+ k_{h1} (k_{h2} + \text{diag}\{|\tilde{\mathbf{x}}|\})^{-1} \tanh(k_{h3} \tilde{\mathbf{x}})] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Em malha fechada, substituindo (2.4) em (2.2), temos

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} &+ k_{p1} \tanh(k_{p2} \tilde{\mathbf{x}}) + \\ &+ k_{h1} (k_{h2} + \text{diag}\{|\tilde{\mathbf{x}}|\})^{-1} \tanh(k_{h3} \tilde{\mathbf{x}}) \\ &= 0. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Analisando a estabilidade do sistema em malha fechada, pela Teoria de Lyapunov, aplicada a sistema não lineares, propomos a função candidata radialmente ilimitada

$$V(\tilde{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}^T \tilde{\mathbf{x}} > 0, \quad (2.6)$$

na sequência, tomamos sua primeira derivada temporal e substituímos (2.5). Daí, tem-se

$$\begin{aligned}\dot{V}(\tilde{\mathbf{x}}) &= -\tilde{\mathbf{x}}^T (k_{p1} \tanh(k_{p2}\tilde{\mathbf{x}}) \\ &+ k_{h1}(k_{h2} + \text{diag}\{|\tilde{\mathbf{x}}|\})^{-1} \tanh(k_{h3}\tilde{\mathbf{x}})) \\ &< 0.\end{aligned}\tag{2.7}$$

Logo, pode-se concluir que $\tilde{\mathbf{x}} \rightarrow 0$, para $t \rightarrow \infty$. ou ainda que $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_d$.

Basicamente, este controlador é a soma de três controladores que tratam particularidades do sinal de erro. A primeira parte da soma refere-se a um controle proporcional à velocidade desejada com que os agentes devam se deslocar. A segunda e a terceira referem-se a um controle proporcional à diferença de distância entre o agente e sua posição desejada. A semelhança entre as duas últimas é o fato delas saturarem analiticamente o sinal de controle. A diferença está na resposta a pequenas valores de erro, pois a terceira parte da soma visa amplificar o ganho do controlador, para que a posição desejada seja atingida mais rapidamente, sem comprometer a estabilidade do sistema.

2.2 Estrutura do Sistema de Troca de Informações

De acordo com que foi dito, o presente trabalho aborda um problema de cooperação utilizando três robôs terrestres, executando uma tarefa de seguimento de trajetória, em formação, conforme explicado nos Capítulos 2 e 2.1. Sabendo que todo o controle é realizado pelos agentes, sendo então um sistema descentralizado. A seguinte matriz de adjacência representa os canais de comunicação utilizados no experimento

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0.1 & 0.1 \\ 0.8 & 0.1 & 0 & 0.1 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 \end{bmatrix},$$

enquanto a formação desejada é dada por

$$\mathbf{x}_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.2 & -1.2 \end{bmatrix}.$$

Note que as colunas de \mathbf{x}_f representam os robôs reais, enquanto as linhas indicam as suas posições desejadas.

A Figura 3 ilustra a configuração do grafo que irá representar a matriz de adjacência da formação e a Figura 4 ilustra a configuração adotada da formação durante o experimento.

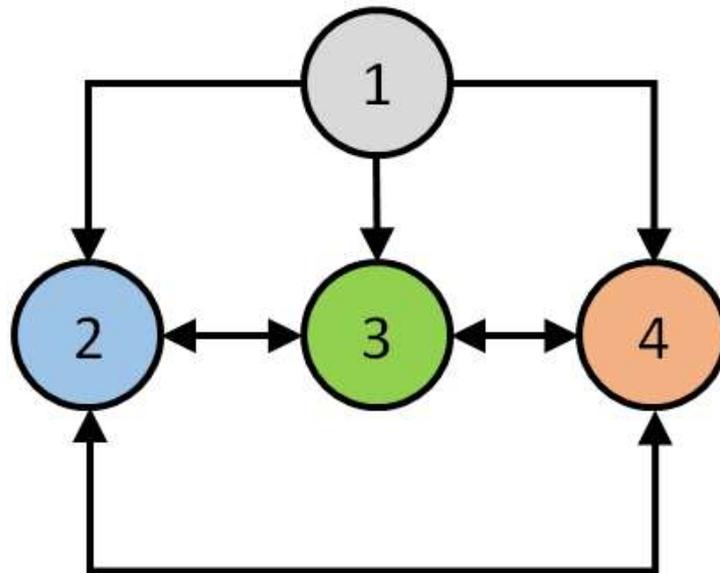


Figura 3 – Grafo referente à matriz de adjacência utilizada nos experimentos.

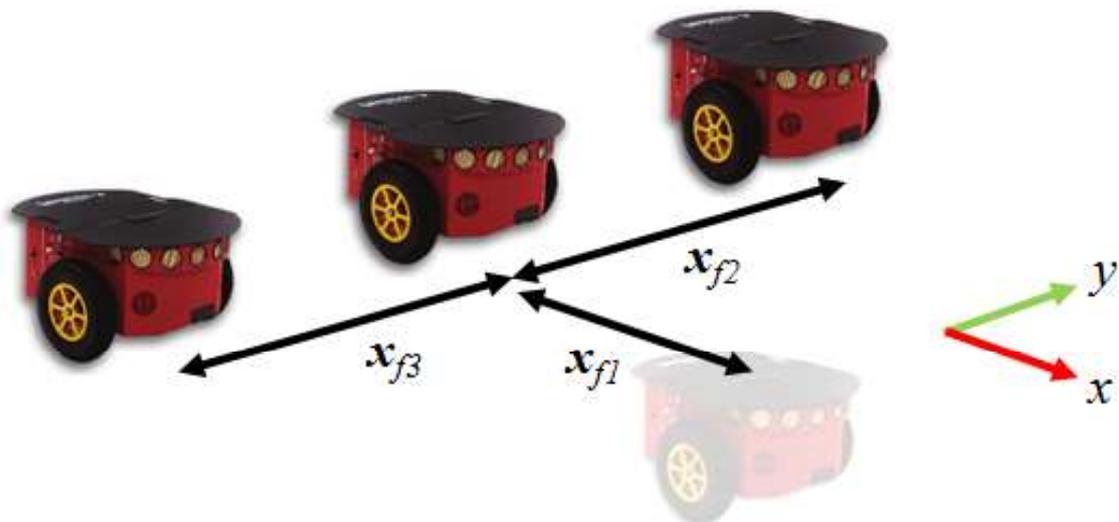


Figura 4 – Configuração da formação desejada para realização dos experimentos.

2.3 Estrutura de Comunicação

Com o propósito de realizar essa comunicação, os robôs estão conectados em uma rede local (LAN) na qual enviarão mensagens pelo protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) contendo informações próprias. Cada robô pertencente ao consenso precisa saber a postura dos demais para que possa ser realizado o consenso. Com isso é imprescindível que cada robô envie seus dados para todos os demais pertencentes à navegação.

A princípio cada robô precisaria criar uma conexão de saída e entrada que comunique com cada robô da rede, precisando saber qual o endereço de IP de todos os agentes que irá realizar a troca de informações, além de precisar determinar uma lógica de portas locais e

remotas para criar as conexões. Deste Modo em um experimento como o realizado neste trabalho, cada robô teria que criar quatro objetos UDP, cada um com o endereço de IP do agente que irá receber/enviar os dados, uma porta local e uma porta remota diferente dos outros objetos. E no momento de enviar as mensagens de dados teriam de enviar para cada objeto separadamente. Portanto, para cada agente inserido no consenso terá que criar um objeto a mais e enviar os dados para um objeto a mais. A fim de simplificar essa rotina, optou-se por enviar os dados por *broadcast*, desta forma não será mais necessário que seja conhecido o endereço de IP de cada agente na LAN, e uma lógica simples foi criada para a atribuição de portas locais.

Para detalhar a comunicação *broadcast*, essa foi dividida em três rotinas. A primeira é a criação de conexões de saída e entrada de dados, a segunda é o envio das informações, e, por fim, a terceira é a leitura de dados recebidos.

A primeira rotina é subdividida na criação da conexão de saída de dados e na criação das conexões de entrada de dados. Como se deseja enviar os dados por *broadcast* será necessário apenas uma conexão de saída de dados. Essa conexão é criada com o endereço de IP de destino sendo *255.255.255.255* que conseqüentemente é o endereço de *broadcast*, e a porta remota utilizada é igual ao número de identificação do robô (ID) adicionado de 2500. Como exemplo, para o Robô de ID igual a 3 será criado o objeto UDP com o endereço remoto *255.255.255.255* e a porta remota 2503. Por outro lado, as conexões de entrada de dados serão criadas de acordo com as conexões de saída dos todos agentes. Logo, em cada robô será criada uma conexão de entrada de dado para cada agente do consenso. Nessas conexões o importante é a porta local, que será igual ao ID do robô, em que se deseja receber informação, acrescido de 2500. Como exemplo, no trabalho apresentado, cada robô terá quatro conexões UDP com as portas locais variando de 2501 a 2504.

Em intervalos fixos de tempo, o Robô irá enviar suas informações para rede utilizando a conexão de saída de dados, o que constitui a segunda rotina da comunicação *broadcast*. A fim de organizar os dados a serem enviados, criou-se um pacote de dados. Este é estruturado como na Figura 5, em que inicia com o caractere '\$', a indicação da postura 'POSX', o ID do robô representado por um número, seguido pelos seis valores da postura atual ($x, y, z, \phi, \theta, \psi$) do robô e também a variação da postura separados por vírgula, em seguida a indicação dos dados do sinal de controle atual 'SC:' seguido pelos valores de sinal controle separados pelo caractere vírgula, e para finalizar o pacote utiliza-se o caractere ponto e vírgula. Nota-se que na Figura 5, os caracteres em preto são fixos, enquanto os em vermelhos contêm as informações de um robô, como exemplo o Robô 3.

Por fim, a rotina de leitura dos dados recebidos consiste em varrer todas as conexões de entrada que o robô possui e verificando se existem dados recebidos pela conexão. Caso contenha dado recebido, este é lido para ser validado. A validação é feita verificando se a

```
$POX3:0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,0.00,SC:0.00,0.00,0.00,0.00;
```

Figura 5 – Exemplo de pacote de dados do Robô 3.

informação recebida contém a estrutura do pacote apresentado na Figura 5. Com os dados validados, o pacote é interpretado e os valores recebidos são atualizados nas variáveis locais do robô que armazenam as informações dos demais agentes da navegação por consenso.

3 Resultados e Discussão

Este capítulo trata dos resultados obtidos através do controlador de seguimento de trajetória proposto e da estratégia de formação por consenso. Os resultados do experimento podem ser visto através do link <<https://youtu.be/B67meeBgMks>>. As Figuras 6 e 7 ilustram, respectivamente, a evolução temporal do erro da condição de consenso e as trajetórias dos robôs durante a realização do experimento.

Neste experimento, os parâmetros escolhidos para o líder seguidor, de forma a guiar os robôs cooperativamente, foi o de uma trajetória em forma de lemniscata, de altura e comprimento iguais a $2,4[m]$, com período de 90 segundos. A posição inicial de cada robô é dada pela Tabela 1 e pode ser visualizada na Figura 7.

Tabela 1 – Configuração inicial da formação para o experimento.

Robôs	Virtual	#1	#2	#3
x_o (m)	0	-0.4	-2.0	1.6
y_o (m)	0	-1.2	0	0.8
ψ (graus)	0	90	90	-180

Verificando a análise de $\tilde{\mathbf{x}}$, observado na Figura 6, percebemos que o sistema tendeu a um erro médio mínimo na condição de consenso na ordem de $0,25m$. É necessário notar também que o sistema tende à condição de consenso nos tempos de 20s e 120s, momentos em que o líder virtual deixa de seguir a trajetória da lemniscata e permanece no ponto central da formação. No intervalo de 20s e 120s observa-se oscilações no erro da condição de consenso, aumentando nos trechos em que o líder virtual ganha velocidade e diminui nos trechos de baixa velocidade da trajetória.

Os motivos que levam a este pequeno erro de $0,25m$ para a soma de todos os agentes são diversos. Inércia dos robôs, atrasos devido à latência da rede e perda de pacotes, desempenho do controlador, entre outros. No entanto, é legítimo dizer que o sistema proposto é capaz de fazer o controle de trajetória, de forma descentralizada para uma formação de robôs, utilizando estratégias de consenso.

Outro fator determinante para determinação do atraso na realização do consenso é o atraso na comunicação ou perdas de pacotes. A Figura 8 ilustra tal situação. É possível verificar que o tempo médio da transferência dos dados é inferior a 100ms (período de amostragem dos robôs), porém são evidentes os picos, que podem chegar a 4 vezes este valor. Logo, o estabelecimento e manutenção do consenso em situações experimentais ficam comprometidas pelas falhas na comunicação.

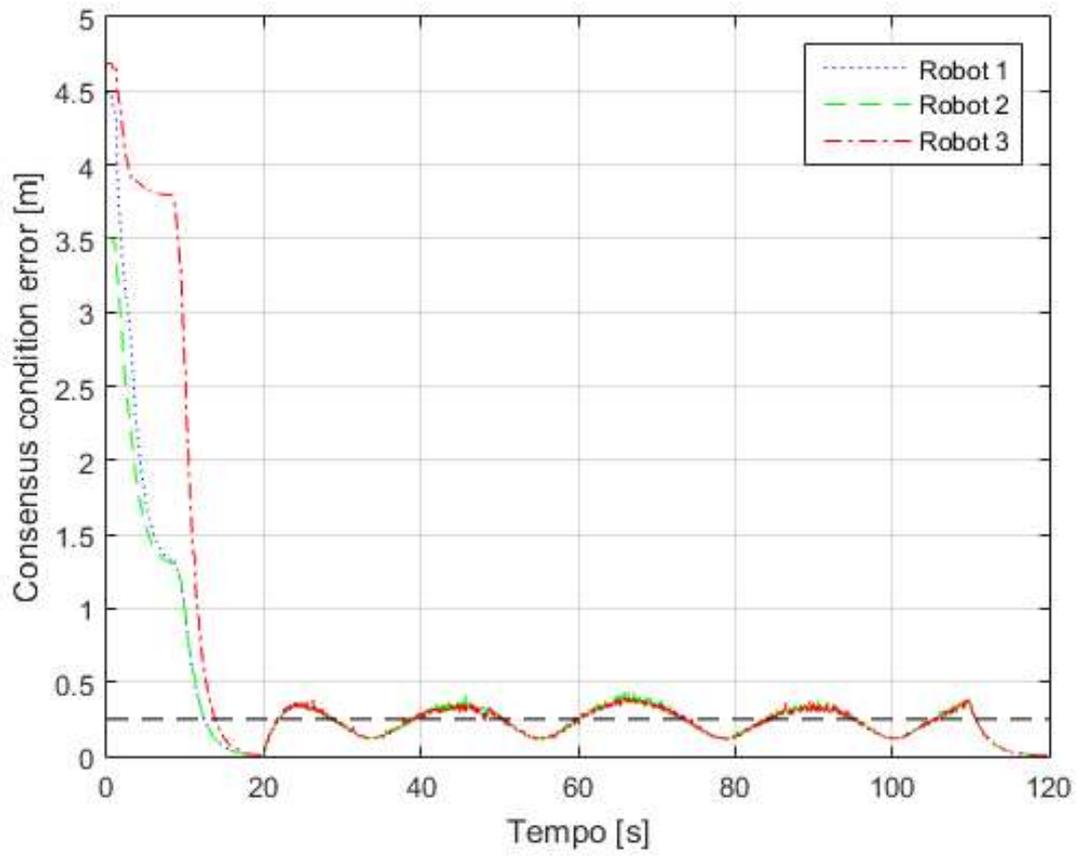


Figura 6 – Erro da condição de consenso.

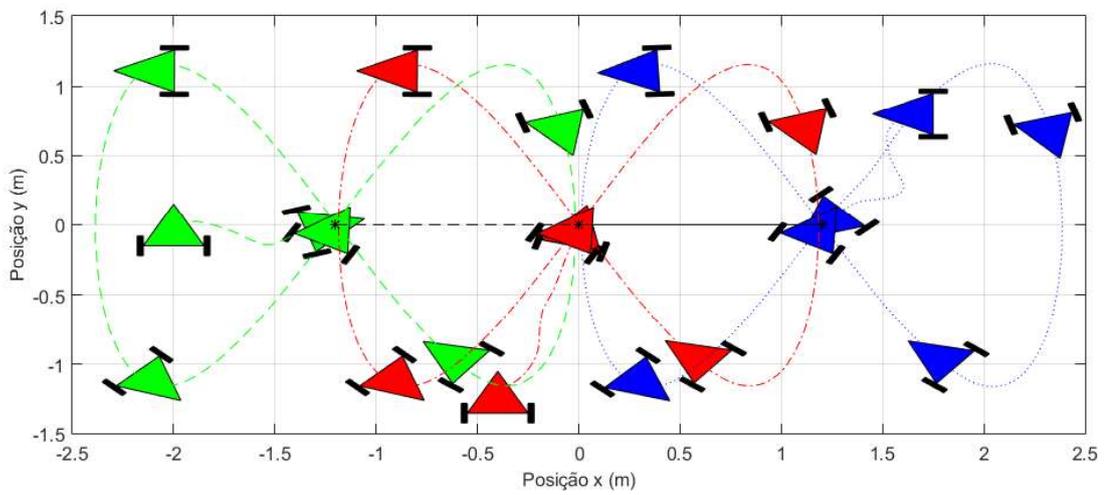


Figura 7 – Trajetórias dos robôs durante o experimento.

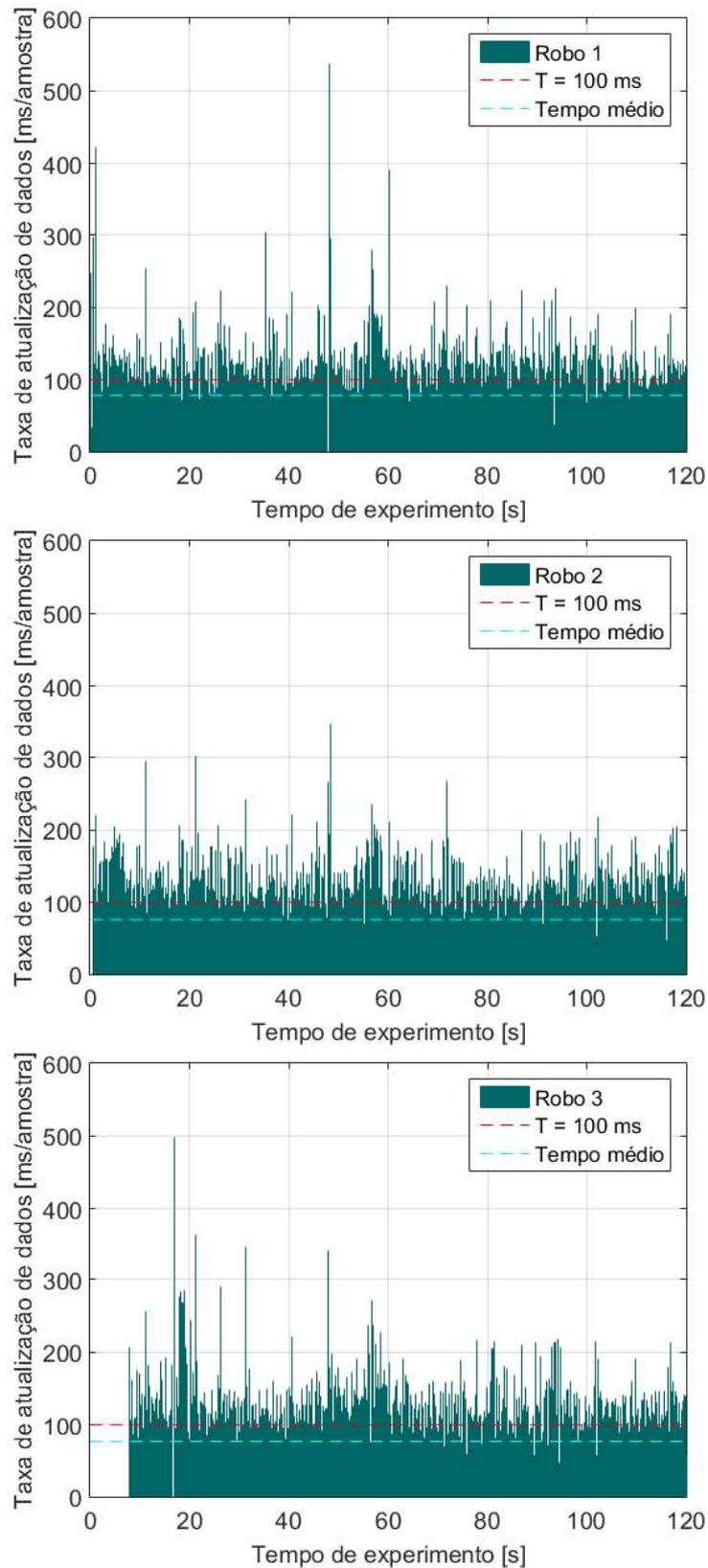


Figura 8 – Falha de comunicação durante o experimento, representada pela taxa de atualização de dados.

4 Considerações Finais

O presente trabalho apresenta um experimento prático acerca da temática de cooperação de robôs, buscando trazer para mais perto do cotidiano as inúmeras possibilidades que envolvem essa tecnologia. Foi visto aqui que é possível abordar a tarefa de seguimento de trajetória em formação, utilizando as estratégias de consenso. Estão presentes no trabalho também a análise de um controlador capaz de tratar as principais dificuldades quanto ao seguimento da trajetória, assim como a apresentação de um modelo de troca de informações descentralizado, onde cada um dos agentes é responsável por trabalhar a informação de seus pares e navegar em direção à formação.

Além disso, este trabalho apresenta a flexibilidade quanto a formação, possibilitando diferentes configurações de forma ou quantidade de agentes. Ademais, a flexibilidade também se estende à implementação de distintas trajetória, além da lemniscata, aqui demonstrada pois já existem outros trabalhos em andamento que serão temas de futuras publicações.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a implementação dos conceitos aqui propostos em uma formação heterogênea de robôs, permitindo que os robôs controlados tenham dinâmicas diferentes. Em adição, trabalhos que objetivam o tratamento das perdas de comunicação terão impacto direto na abordagem aqui apresentada, afinal irão possibilitar uma operação cooperativa de resposta mais rápida, em termos da convergência assintótica aos consenso.

Referências

- ALONSO-MORA, J. et al. Gesture based human-multi-robot swarm interaction and its application to an interactive display. In: IEEE. *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 5948–5953. Citado na página 9.
- ARBANAS, B. et al. Aerial-ground robotic system for autonomous delivery tasks. In: IEEE. *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 5463–5468. Citado na página 9.
- BRANDÃO, A. S.; SARCINELLI-FILHO, M. On the guidance of multiple uav using a centralized formation control scheme and delaunay triangulation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Springer, v. 84, n. 1-4, p. 397–413, 2016. Citado na página 9.
- CHENG, P. et al. Cooperative towing with multiple robots. *Journal of mechanisms and robotics*, American Society of Mechanical Engineers, v. 1, n. 1, p. 011008, 2009. Citado na página 9.
- DAS, A. K. et al. A vision-based formation control framework. *IEEE transactions on robotics and automation*, IEEE, v. 18, n. 5, p. 813–825, 2002. Citado na página 9.
- DUBÉ, R. et al. 3d localization, mapping and path planning for search and rescue operations. In: IEEE. *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2016 IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2016. p. 272–273. Citado na página 9.
- FIERRO, R. et al. Cooperative control of robot formations. In: *Cooperative control and optimization*. [S.l.]: Springer, 2002. p. 73–93. Citado na página 9.
- FINK, J.; HSIEH, M. A.; KUMAR, V. Multi-robot manipulation via caging in environments with obstacles. In: IEEE. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 1471–1476. Citado na página 9.
- JEON, S.; LEE, J. Multi-robot multi-task allocation for hospital logistics. In: IEEE. *Advanced Communication Technology (ICACT), 2016 18th International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 339–341. Citado na página 9.
- KENNEDY, M. D.; GUERRERO, L.; KUMAR, V. Decentralized algorithm for force distribution with applications to cooperative transport. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. [S.l.], 2015. p. V05CT08A013–V05CT08A013. Citado na página 9.
- LIU, Y.; NEJAT, G. Robotic urban search and rescue: A survey from the control perspective. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Springer Science & Business Media, v. 72, n. 2, p. 147, 2013. Citado na página 9.
- SAVINO, H. J. et al. Conditions for consensus of multi-agent systems with time-delays and uncertain switching topology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 63, n. 2, p. 1258–1267, 2016. Citado na página 9.

SHI, W. et al. Extra: An exact first-order algorithm for decentralized consensus optimization. *SIAM Journal on Optimization*, SIAM, v. 25, n. 2, p. 944–966, 2015. Citado na página 9.

SILVA, T. B. da; CARVALHO, K. B. de; BRANDÃO, A. S. Controle de formação de vtnts utilizando a estratégia de consenso no seguimento de trajetória. In: SBA. *XXI Congresso Brasileiro de Automática*. [S.l.], 2016. Citado na página 10.

TAN, C. et al. Fire fighting mobile robot: state of the art and recent development. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 7, n. 10, p. 220–230, 2013. Citado na página 9.