

Quem Procura Acha v1.0

Costa, Raphael Soares

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação
Universidade Federal do ABC
Santo André, Brasil

Werneck, Henrique Lima

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação
Universidade Federal do ABC
Santo André, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema multirrobótico consistindo de dois robôs seguidores de linha diferenciais, com o objetivo de encontrarem-se ao longo de uma linha guia. Durante o desenvolvimento do sistema, foram parte do objetivo principal o estudo e entendimento da mecânica e protocolo de comunicação entre os dois robôs e a identificação de pontos críticos de desenvolvimento do software dos robôs para seu funcionamento adequado.

Foram utilizados dois robôs montados pela Mosaico (marca, modelo) que contam com módulos XBee utilizados para a comunicação entre eles.

O trabalho destaca as dificuldades e desafios enfrentados quando desenvolvendo o programa de robôs, tanto individualmente como em conjunto, bem como um sistema formado por diversos robôs. Foi decidido trabalhar em um sistema de apenas dois robôs, com ambiente controlado e com robôs seguidores de linha para analisar a incidência de dificuldades, mesmo em um sistema relativamente simplificado.

A proposta do trabalho, foi realizada de acordo com o planejado, seguindo a linha sem se perder, encontrando obstáculos e sendo capazes de se encontrar ao longo do percurso da linha guia. Todos os pontos de comunicação de obstáculo foram executados com precisão e os dados de teste foram obtidos para análise dos desafios do desenvolvimento de um sistema robótico.

Palavras-chave: Sistema multirrobótico, robô seguidor de linha, Arduino, comunicação XBee, robótica

I. INTRODUÇÃO

Sistemas multirrobóticos (SMR) são sistemas onde robôs autônomos trabalham cooperativamente a fim de cumprir uma missão, podendo existir interação entre os robôs ou não [Osagie, 2006].

Esse tipo de sistema pode ser utilizado com diversos propósitos. Em alguns casos, é substituível por um sistema que emprega um único robô que acumula as funções de cada robô do sistema. No entanto, o robô em questão pode ser muito caro, ou danificar, vulnerabilizar e inviabilizar o sistema ou a operação, caso ele pare de funcionar, por exemplo. Nesses casos, mesmo que possível a substituição por um único robô, pode ser uma melhor alternativa o uso de um sistema multirrobótico. Como cada robô do sistema teria menos funções, ou uma única função, estes seriam mais simples e

mais baratos, de manutenção mais simples. Talvez a maior vantagem seria a continuidade da operação, mesmo que uma parte do sistema tenha falhado. O robô com falha pode ser mais rapidamente consertado ou substituído, de forma mais barata, além de não necessariamente comprometer o funcionamento de toda a operação. Sistemas com mais de um robô também tendem a apresentar melhor eficiência e tempo de execução com relação a sistemas que utilizam apenas um robô.

Outra forma de aplicação de sistemas multirrobóticos é a simulação de situações em que há mais de um agente atuante no sistema. Nesse tipo de cenário, é impossível a utilização de um único robô, uma vez que as funções são necessariamente divididas entre indivíduos diferentes. Como exemplos de simulações deste tipo, pode-se citar o futebol de robôs, uma corrida ou uma situação de resgate de vítimas.

Como objetivo de trabalho, buscou-se realizar a simulação de um sistema onde dois robôs tentam se encontrar em um ambiente com obstáculos, embora com rota de movimentação definida. Diversos aspectos do trabalho apresentaram interferência na conclusão do objetivo, como os sensores de linha, potência dos motores e o funcionamento, em geral, dos próprios robôs. Procurou-se entender através de uma pergunta: Quais são as dificuldades e pontos críticos de projeto de um sistema multirrobótico genérico?

Uma das maiores dificuldades encontradas com relação à detecção de linha, por exemplo, foi a calibração dos sensores para o reconhecimento da linha de forma eficiente. Inúmeros fatores, tais como, iluminação, sombras do ambiente, padrão no piso do chão do laboratório e as limitações de precisão inerentes dos sensores.

O desenvolvimento do robô foi então dividido de acordo com as principais funções para seu completo funcionamento. Foram implementadas de forma separada a função de seguir linhas, a função de comunicação e a estrutura de ações do robô por ciclo de processamento. Ao término das partes, elas foram unidas e os robôs foram então testados na pista criada, inicialmente individualmente, e por fim com os dois robôs funcionando ao mesmo tempo na linha guia.

Este trabalho apresenta com base em um estudo simples, problemas comumente encontrados no campo da robótica móvel, para robôs seguidores de linha, com praticamente qualquer aplicação ou robô sendo criado ou estudado. Desafios como a calibragem de sensores e motores, projeto da estrutura de funcionamento dos robôs e do sistema, etapa de testes individuais e coletivos, entre outros problemas encontrados quando do desenvolvimento do sistema multirrobótico apresentado.

A seguir encontram-se os conceitos fundamentais da robótica e de sistemas multirrobóticos, apresentados de acordo com a visão de autores e pesquisadores dessa área de estudo. Na sequência é caracterizado o sistema multirrobótico desenvolvido, seu ambiente, arquitetura e os robôs consistentes do sistema. Serão apresentadas as interações sociais dos robôs, bem como a estrutura técnica do sistema. Por fim, o trabalho apresenta os cenários estudados de funcionamento do sistema e, junto com estes, os resultados observados e a análise do comportamento do sistema mediante os resultados obtidos.

II. SISTEMAS MULTIRROBÓTICOS: CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Os sistemas multirrobóticos, como explicado na introdução, são sistemas onde dois ou mais robôs atuam ao mesmo tempo para atingir certos objetivos. Os sistemas multirrobóticos são classificados de diversas formas, de acordo com diferentes características, tanto individuais de cada agente do sistema, como observando o sistema como um todo. Portanto, sistemas multirrobóticos são constituídos de robôs e estes também precisam ser analisados de forma individual no sistema.

2.1. Definindo um Robô

Uma definição completa e bem estruturada de o que é um robô é dada por Maja J. Matarić em Introdução à Robótica [Matarić, 2014]:

“Um robô é um sistema autônomo que existe no mundo físico, pode sentir o seu ambiente e pode agir sobre ele para alcançar alguns objetivos.”

Segundo esta definição, robôs precisam de sensores, atuadores e de algum controlador que os permita utilizar seus componentes para agir no ambiente a fim de alcançar seus objetivos. As características do robô e de seus componentes são utilizadas para classificá-los, e por consequência ao sistema.

Robôs podem ser classificados pela forma ou ambiente em que se locomovem (terrestres, aéreos, aquáticos, híbridos), ou

pelo fato de se locomoverem ou não (robôs móveis e robôs manipuladores).

Robôs podem ser aplicados nos mais diversos tipos de tarefas e situações, geralmente sendo muito utilizados para substituir seres humanos onde o trabalho possa ser repetitivo, perigoso, danoso ou nocivo de alguma forma.

Em muitos tipos de aplicação, robôs podem ser utilizados de forma isolada,

2.2. Sistemas Multirrobóticos

O sistema multirrobótico é, portanto, caracterizado e projetado principalmente de acordo com os agentes robôs que o compõe. Também influenciam um projeto de sistema robótico multiagente o ambiente onde o sistema será aplicado, a forma de comunicação dos robôs, etc.

Um agente é o nível micro do sistema multirrobótico, onde os mesmos podem ser classificados em dois grupos [Guessoum]:

- Agentes reativos: são aqueles que não utilizam raciocínio complexo, não possuem modelos do mundo e reagem à percepção atual de ambiente. Possuem comunicação indireta, usualmente pelo ambiente, e reagem de uma forma pré-determinada a situações previamente estudadas e analisadas;
- Agentes cognitivos: são os agentes possuem características de funcionamento mais organizado, estruturado. No geral, possuem modelos explícitos do ambiente, realizam comunicação direta e são capazes de planejar e executar ações a partir de um "racionalização" do problema em mãos.

Sistemas multirrobóticos costumam ser empregados em situações onde se faz vantajosa a troca de um único robô por um sistema de robôs. Isso pode ocorrer devido a diversos fatores, inerentes à aplicação em questão ou não, ou relacionados a processos não diretamente ligados a aplicação, como a manutenção dos agentes realizando a tarefa.

Elenca-se assim, argumentos e motivações para a escolha de um sistema multirrobótico, no lugar da aplicação de um robô isolado:

- Necessidade: há problemas e tarefas que só podem ser feitas em grupo. Um sistema de simulação de um esporte coletivo, ou uma malha de trânsito metropolitana inerentemente possuem diversos agentes atuantes no sistema;
- Desempenho: quando realizadas em grupo, determinadas ações são executadas de forma mais eficiente, em geral em menor tempo, em comparação a como se fossem realizadas por um único agente. Um problema de busca em um local muito extenso ou

controle de incêndio, por exemplo, terão melhor desempenho com um sistema multirrobótico;

- Custo: robôs menores, que dividem funções que seriam acumuladas por um robô único, são mais fáceis de serem substituídos em caso de manutenção, no geral não impactando de forma marcante a execução de um processo, ou resolução do problema;
- Manutenção: com robôs menores e mais simples, a complexidade do sistema em si também se torna menor;

III. DOMÍNIO DO SMR E TRABALHOS RELACIONADOS

3.1. Domínio do Sistema Multirrobótico

O domínio escolhido para o projeto consiste de dois robôs que se procuram mutuamente até que se encontrem, configurando este como um domínio de busca em um sistema multi-agentes.

Os domínios de busca podem ser implementados com inúmeras situações e dificuldades diferentes, como variação do alvo de busca, seja ele um objeto ou outro agente do sistema, ambientes e obstáculos de vários tamanhos e formas que possam ser superados explorando diferentes recursos dos agentes realizando a busca. A própria limitação dos agentes de busca, com relação aos seus sensores, atuadores e sistema de controle ajuda a caracterizar um domínio de busca.

No trabalho proposto, os agentes robóticos devem se encontrar ao longo de uma linha guia pela qual eles se movimentam e evitam obstáculos, comunicando-se para confirmação de encontro de outro agente.

Os robôs terão chegado ao objetivo quando confirmarem terem se encontrado, mediante troca de mensagens entre si, após terem realizado a detecção de um ao outro a partir de seus respectivos sensores infravermelhos, posicionados à frente de cada um dos robôs.

O domínio criado simula uma situação real onde uma pessoa precisa encontrar outra se aproximando, ou movimentando-se, através de comunicação entre os indivíduos no ambiente onde não necessariamente há um contato visual direto, por exemplo. Um resgate em um incêndio é um exemplo onde não necessariamente se enxergam as vítimas, mas pode-se ouvi-las e guiá-las para fora do local do incêndio.

3.2. Trabalhos Relacionados

O conceito de robô seguidor de linha é uma das aplicações mais simples de robôs móveis. É em geral um dos primeiros robôs apresentados a estudantes e que permite de forma descomplicada o estudo de conceitos muitas vezes avançados de robótica, controle, eletrônica e engenharia, de um modo geral. Um exemplo de projeto de robô seguidor de linha a

partir de um Arduino é apresentado por Cândido [Cândido, 2018]. Neste projeto, é implementado no robô conceitos avançados de engenharia, como controle PID e ativação de motor elétrico por meio de PWM (*Pulse With Modulation*, pulso modulado numa tradução livre), técnica de controle de motor onde se liga e desliga o motor várias vezes por segundo, de forma a se conseguir velocidades intermediárias entre a velocidade máxima e o motor elétrico parado.

No caso do robô diferencial utilizado neste trabalho, não é usado o controle PID para controlar a movimentação do robô sobre a linha guia. Contudo, é utilizado a função de PWM, possível com o Arduino, para controle dos motores elétricos do robô. O robô é também chamado de diferencial por ter o controle dos motores de cada lado do robô independentes. Dessa forma, a direção do robô depende da diferença de velocidade individual de cada roda do robô. Daí seu nome de robô diferencial.

Ademais, em um trabalho de [Engin e Engin, 2012], é mostrado o projeto de um robô, também diferencial seguidor de linha, partindo desde sua estrutura, passando pelo planejamento do controle de motores para movimentação até sua construção, implementação e testes. São apresentados diferentes algoritmos de seguimento de trajetória, com estimação de erro e posição real.

O estudo também compara a eficiência do robô seguidor de linha ao utilizar diferentes formas de planejamento de trajetória. Dentre eles, destaca-se novamente o controle PID, sendo apresentado como mais eficiente dentre os tipos de controle testados. Novamente, apesar de não ter sido utilizado o controle PID, não fez parte do escopo a escolha de um algoritmo otimizado para realização do movimento sobre a linha do circuito proposto. Ainda assim, a calibração realizada para se conseguir otimizar a relação "precisão x velocidade" ao seguir a linha foi algo estudado quando do início da implementação do código do agente robótico.

IV. SISTEMA MULTIRROBÓTICO MODELANDO ÁREA DE DOMÍNIO

4.1. Descrição do Sistema Multirrobótico

O sistema multirrobótico criado ambienta um problema de busca, onde dois robôs percorrem um circuito com obstáculo através de uma linha guia, confirmando o encontro de um com o outro quando se aproximam através de comunicação para alcançar o objetivo final.

O sistema multirrobótico estudado neste trabalho pode ser caracterizado como um sistema heterogêneo, descentralizado, de cooperação não ativa, embora com a mesma meta global para todo o sistema.

Classifica-se o sistema como heterogêneo pelas diferenças apresentadas entre os robôs que compõem o sistema. Os

componentes de hardware dos robôs são iguais, uma vez que está sendo usado uma plataforma pronta da Mosaico. Os softwares dos robôs, porém, não são iguais, configurando este sistema multirrobótico como heterogêneo.

Chama-se o sistema de descentralizado pela forma como acontece o controle e a comunicação entre os agentes do sistema. Não existe um controlador central para onde são enviadas mensagens ou que calcula a movimentação de todos os agentes e depois repassa esses comandos para apenas serem executados. Cada robô é responsável por analisar os dados captados pelos próprios sensores e agir sobre eles de forma coerente para que os objetivos do sistema multirrobótico sejam alcançados.

A meta do sistema é comum pois ambos os robôs tem como objetivo principal se encontrar e ser encontrado. A cooperação entre eles, entretanto, não é ativa, uma vez que eles não se ajudam para completar o objetivo. A interação entre eles ocorre como forma de validação de que o objetivo foi de fato completo, mas não há uma cooperação durante a simulação do sistema para que o objetivo seja mais rapidamente completo, ou com uma interação mais coordenada entre as partes.

4.2. O Ambiente de Simulação

Um ambiente de simulação é criado com o intuito de emular as características de um sistema real, para teste do comportamento de agentes do sistema. Isso é feito, por exemplo, para estudo da viabilidade de certa aplicação em um ambiente controlado, antes de um investimento de maior volume diretamente no sistema real.

O ambiente utilizado para estudo do sistema multirrobótico é representado por uma linha guia pela qual os robôs se guiam, movimentando-se até que se encontrem. Foram utilizados dois percursos, um com a linha feita no chão e outro com a linha guia feita sobre uma cartolina branca, caracterizando o ambiente como plano em qualquer dos casos.

A mudança de local da pista foi usado como obstáculo aos sensores de detecção de linha, bem como um obstáculo de movimentação, uma vez que o coeficiente de atrito entre as rodas e a pista seria diferente em ambos os ambientes.

Nos dois casos também, um único obstáculo físico à movimentação dos robôs neste ambiente foi colocado e identificado de ambos os lados com fita adesiva verde. O único outro "obstáculo" na pista é exatamente o outro robô que se está buscando.

Nas Figuras 1 e 2 são mostradas imagens das pistas com linha guia e obstáculos feitas sobre o chão e sobre a cartolina, respectivamente, demonstrando os ambientes usados para o estudo do sistema multirrobótico:

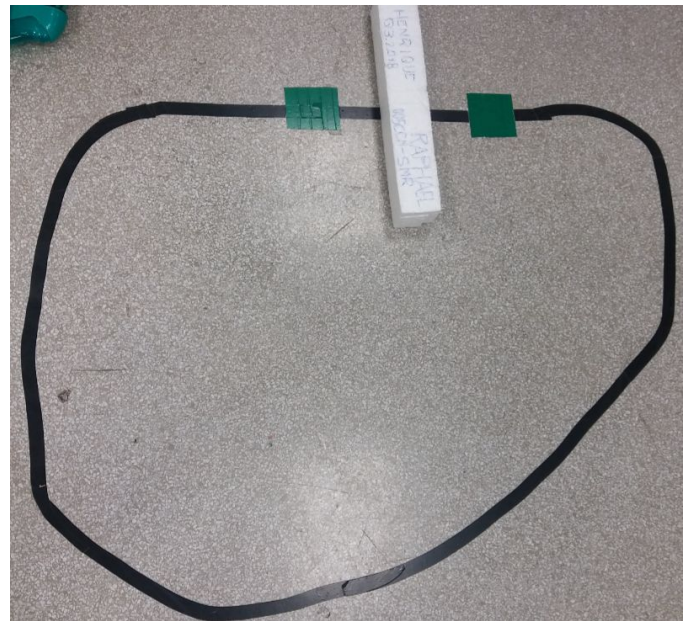


Figura 1. Pista com linha guia sobre chão, na qual os robôs se movimentaram.

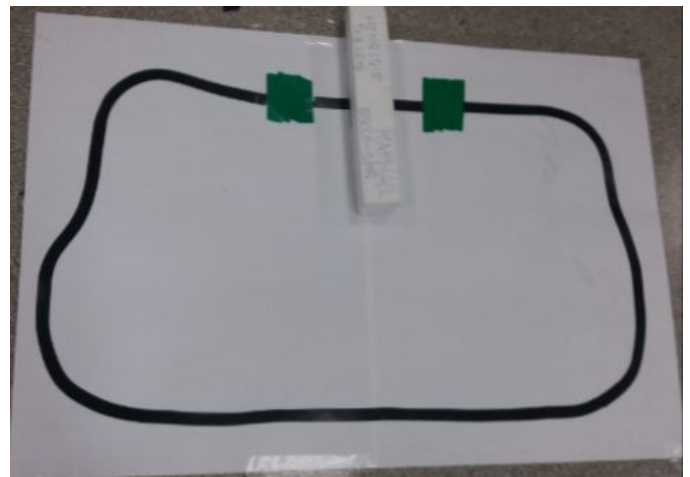


Figura 2. Pista com linha guia sobre cartolina.

O ambiente foi usado para diversos testes, separados em diferentes cenários. Os cenários estudados, tanto com os robôs em fase de implementação, como durante a simulação do sistema estão apresentados na Seção 7 deste trabalho, onde também estão disponibilizados os resultados de todos os testes realizados com o sistema multirrobótico.

4.3. Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema representa os agentes e interações do sistema de forma simples, para organizar e simplificar o entendimento de toda a estrutura do sistema.

A arquitetura geral do sistema multirrobótico estudado segue o esquema apresentado na Figura 3 a seguir:

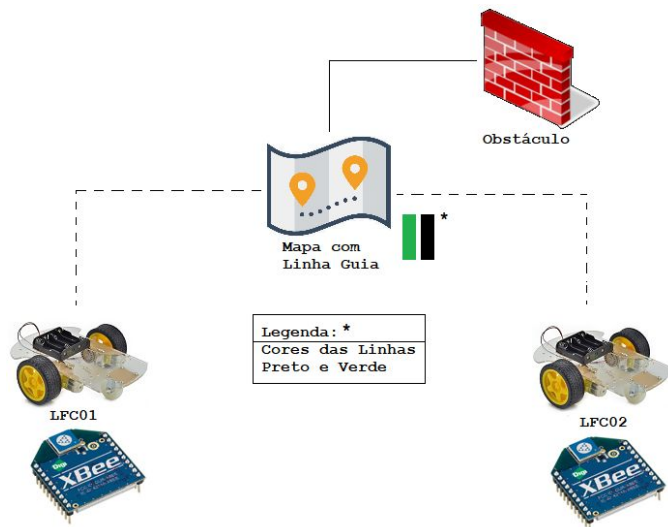


Figura 3. Arquitetura geral do sistema multirrobótico.

Na Figura 3, é apresentada a arquitetura do sistema multirrobótico. A arquitetura é composta de dois robôs agentes, uma pista com linha guia, um obstáculo e duas cores de linha, a principal na cor preta, que é a linha guia, por onde os agentes se locomovem; e a linha de cor verde, utilizada como auxílio para identificação de obstáculo por parte do robô. A análise da arquitetura se divide nas seguintes etapas:

- Locomoção: especifica o meio de locomoção dos agentes, no caso a linha guia;
- Linha guia: linha referência de movimentação dos robôs, também é responsável por definir o mapa de movimentação dos agentes no ambiente do sistema multirrobótico;
- Detecção de objetos: prioritariamente realizada através do sensor infravermelho de distância, a detecção de objetos é auxiliada pela linha sobre a qual o robô se encontra no momento da leitura do sensor infravermelho;
- Comunicação com XBee: dispositivo através do qual os robôs realizam a comunicação para validação de objetivo cumprido.

4.4. Os Agentes Robóticos

Os robôs utilizados durante o projeto e estudo deste sistema multirrobótico são robôs diferenciais seguidores de linha da Mosaico, comerciais, recebidos já montados e prontos para uso e implementação de rotinas de aplicação. Eles foram chamados de LFC1 e LFC2, acrônimo para *Line Follower Car*, do inglês, "Carro Seguidor de Linha". Na Figura 4, o robô da Mosaico é mostrado em detalhe:

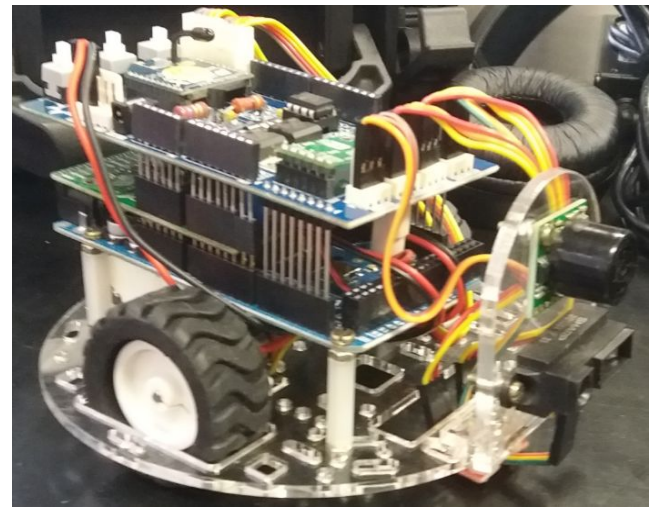


Figura 4. Robô diferencial seguidor de linha da Mosaico.

Analisando os robôs individualmente, observa-se que os robôs são idênticos em funcionalidades a nível de hardware e software. Os robôs estão dispostos na Figura 5, abaixo:



Figura 5. Agentes robóticos LFC1 e LFC2.

Para a aplicação proposta neste trabalho, contudo, os robôs deixam de ser idênticos. Não há qualquer alteração à estrutura de hardware deles, mas sim ao software. Há uma diferenciação no sistema de comunicação, mais especificamente no conjunto de mensagens trocadas pelos agentes.

Quanto às semelhanças, a nível de hardware, os robôs são praticamente idênticos. Ambos são robôs diferenciais que contam com alguns sensores em suas estruturas. Dentre eles, é importante destacar os sensores de linha, localizados na parte de baixo da estrutura dos robôs, e o sensor infravermelho de distância, localizado à frente de cada robô. Também foi utilizado um módulo de comunicação XBee em cada robô, para troca de mensagens com o outro robô do sistema.

A seguir, os agentes são apresentados, com uma breve descrição de suas características enquanto agentes do sistema e do seu funcionamento no sistema:

- Descrição dos agentes:

Os robôs LFC1 e LFC2 são os dois robôs utilizados no estudo deste sistema multirrobótico. Estes são agentes autônomos, reativos e que fazem uso de comunicação direta e descentralizada para contribuição da coordenação cooperativa do sistema como um todo.

Os robôs são autônomos por não dependerem de qualquer interferência de controle ou coordenação externa para que se movam, ou para que concluam o problema sendo trabalhado. Classifica-se, ainda, os agentes como reativos pelo fato de eles percorrem seus caminhos de acordo com a disponibilidade de passagem. Se não há obstáculos, eles devem seguir adiante. Para que sigam adiante, é necessário checar o chão para encontrar o caminho, através da linha de referência. Este comportamento é essencialmente reativo com relação ao que pode ser encontrado no ambiente.

A comunicação utilizada pelos agentes é direta e descentralizada, uma vez que não há um sistema de controle central manipulando as interações de comunicação entre os robôs. A comunicação também é direta porque é feita através de mensagens, enviadas diretamente de um robô para o outro.

Por fim, a coordenação do sistema é cooperativa, pois os agentes do sistema possuem um objetivo em comum e não são capazes de resolverem o problema sozinhos.

- Funcionamento dos agentes:

Os comportamentos dos robôs do sistema se resumem a três possibilidades: seguir a linha, evitar obstáculo e o encontro com o outro robô do sistema.

O comportamento padrão do robô é o de seguir a linha. A menos que algum obstáculo seja encontrado a frente, o robô capta a leitura dos sensores e interpreta a partir destes o sentido para o qual a linha de referência está seguindo. A rotina de seguimento de linha ainda conta com um controle referente ao último comando executado antes de o robô se perder, caso ele saia da linha. Desta forma, se ele acelerar para fora de uma curva à esquerda, ele vai registrar a direção esquerda como último comando antes de se perder e vai executar uma curva à direita para tentar se encontrar. O registro não é alterado caso ele não encontre a linha, fazendo com que ele continue virando à direita até encontrar novamente a linha de referência.

Em seguida, o comportamento de detecção e desvio de obstáculo é executado caso o robô encontre um bloqueio a até 7 cm de distância de seu sensor infravermelho frontal, além de o robô se encontrar sobre a faixa verde. Caso isso ocorra, ele identifica esse bloqueio como um obstáculo e executa a rotina de meia volta, para seguir seu caminho na direção oposta.

No entanto, se ao captar um bloqueio através de seu sensor infravermelho, o robô se encontrar sobre a linha guia de referência, ele irá interpretar o bloqueio como o outro robô a ser encontrado no ambiente. Ele irá entrar na rotina de comunicação, onde tentará contato com o outro robô.

A comunicação foi realizada de forma simplificada, reduzindo-se a mensagem a um único caractere representando um sinal para cada ação de cada agente. Quando o robô LFC1 encontra o outro robô, ele envia uma mensagem contendo o caractere "E"; já o robô LFC2 envia o comando "F" através de

uma mensagem pelo módulo XBee. Os robôs executam a ação final de girar sobre o próprio eixo indefinidamente somente após enviarem a sua mensagem e receberem a resposta do outro robô. De outra forma, o robô a encontrar o outro primeiro fica em estado de espera.

V. NÍVEL MACRO: SITUAÇÃO DE INTERAÇÃO SOCIAL E MÉTODOS DE INTERAÇÃO SOCIAL ADOTADOS

Analisa-se a seguir a relação de interação social existente entre os robôs LFC1 e LFC2 quando em funcionamento em conjunto no ambiente de testes.

A interação entre os robôs ocorre quando um robô encontra o outro. Sempre que um robô vê o outro, independente de estar sendo visto, ele entrará em contato com o robô avistado, iniciando uma interação entre eles. Essa interferência pode ser considerada positiva. Embora ela não influencie diretamente na movimentação sobre linha do outro robô, quando o primeiro robô entra em contato com o segundo, ele permite que este outro robô saiba que foi encontrado quando avistar o primeiro, ponto necessário para que o objetivo final de ambos os robôs seja alcançado. Eles entram em laço infinito somente quando encontram e são encontrados, tornando esta interferência completamente necessária e positiva.

Os objetivos de ambos os robôs, portanto, são compatíveis, uma vez que a conclusão do objetivo de um não só não impede a conclusão do objetivo do outro, mas são objetivos concluídos concomitantemente.

Como seu funcionamento é sempre simultâneo, os recursos disponíveis no ambiente são suficientes. Considera-se aqui como recurso a linha guia, necessária à locomoção dos robôs, e onde ambos se movimentam de forma simultânea.

Por fim, as competências dos agentes são insuficientes. Ele pode se movimentar sobre a linha e detectar obstáculos ou outro robô, mas ele não pode confirmar em nome do outro robô se foi detectado por este ou não. Um robô depende do outro.

Esse conjunto de características - objetivos compatíveis, recursos suficientes e competências individuais insuficientes - configura a situação de interação social dos robôs como uma situação de interação de colaboração simples, considerada como uma interferência social positiva entre os robôs do sistema.

Baseado na situação de interação de colaboração simples, foi utilizado um método reativo de coordenação de ações para modelar o funcionamento do sistema projetado.

Como nenhum dos robôs poderia completar a tarefa sozinho, fez-se necessário o planejamento de um método de interação para reger a interação entre os robôs quando fosse requerido. O método reativo de coordenação de ações foi

escolhido pela simplicidade de desenvolvimento, uma vez que a interação entre os robôs só é de fato analisada quando eles se encontram.

O método é também compatível com as capacidades apresentadas pelos robôs do sistema, uma vez que eles são reativos e não possuem qualquer forma de representação do ambiente, reagindo sobre ele após a análise de cada leitura de dados de seus sensores.

Por causa dessa interação, um comportamento emergente observado foi o de o robô, após detectar um obstáculo, caso não recebesse confirmação de que também foi encontrado através de uma mensagem enviada pelo XBee, o robô que encontrava algum tipo de entrave ao seu movimento de seguimento de linha continuava seguindo normalmente seu percurso até que encontrasse um novo obstáculo.

VI. ESTRUTURA TÉCNICA DO SISTEMA MULTIROBÓTICO

Como citado anteriormente, o sistema multirrobótico foi desenvolvido utilizando como base um robô comercial já montado e pronto para utilização da Mosaico.

A linguagem de programação empregada foi a do Arduino, que é uma extensão de C [ref “”], linguagem suportada pelo módulo de comunicação disponível, o XBee. Toda a lógica foi criada a partir do IDE do Arduino.

A troca de mensagens entre os robôs seguiu o modelo apresentado no diagrama de sequência UML a seguir:

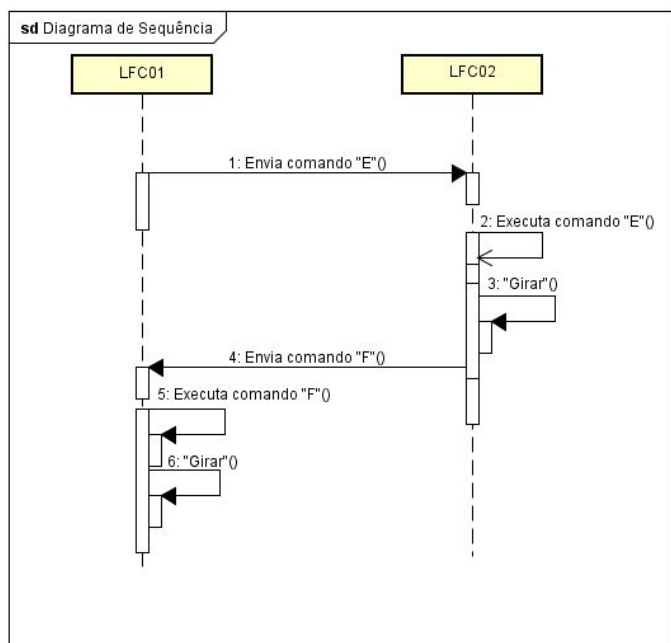


Figura 6. Diagrama de sequência UML referente à troca de mensagens dos robôs.

Na Figura 6, é representado o diagrama de sequência sob padrão UML, onde é retratada a forma de comunicação entre os agentes do sistema (*Agente_1* e *Agente_2*). O *Agente_1*, representado pelo LCF1, envia a mensagem de “E” e o *Agente_2*, representado pelo LCF2 recebe a mensagem de “E” e executa o comando “Girar”, seguindo-se da mesma forma, o LCF2, enviando a mensagem de “F” para o LCF1 que ao receber este comando, executará também o comando “Girar”.

VII. CENÁRIOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os cenários utilizados para teste do sistema multirrobótico no trabalho foram escolhidos para teste das funções dos robôs de forma isolada. Os testes de cada cenário foram realizados mais de uma vez em cada um dos ambientes criados, de forma a aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos e verificar possíveis desenlaces causados por características específicas de cada ambiente.

A. Cenário 1: Robô isolado sem obstáculo

No cenário 1, procurou-se testar o funcionamento básico do algoritmo seguidor de linha dos robôs isolados no circuito. O principal ponto observado foi a eficiência de cada robô ao seguir a linha.

Além desse ponto principal, também foram observados os pontos de falha quando os robôs eventualmente saíam do percurso (quando os sensores de linha estavam ambos fora da linha) ou quando passavam por cima do trecho da pista com as fitas coloridas de verde.

Em ambas as pistas, os robôs isolados percorreram perfeitamente o circuito sobre linha preta, acompanhando curvas fechadas e pontos em que as faixas da pista não estavam regulares e bem fixadas (embora houvesse certa dificuldade para acionamento dos motores nesses casos).

Os agentes se mostraram bem calibrados com relação aos dados captados dos sensores, com resultados consistentes para os três tipos de cores identificadas (linha preta, faixa verde, e o piso ou cartolina).

Um ponto de funcionamento com baixa confiabilidade observado foi o de quando os robôs atravessavam uma faixa verde da pista. De acordo com o algoritmo implementado nos robôs, quando ele se perde da linha preta a ser seguida, ele executa um comando escolhido de acordo com o último comando executado. Dependendo da angulação com que o robô entra na faixa verde e dependendo do último comando executado saindo da linha preta, o robô pode continuar normalmente sobre o percurso ou se perder e sair da pista.

B. Cenário 2: Robô isolado com obstáculo

No cenário 2, os robôs ainda foram testados de forma isolada. Uma vez confirmada a movimentação dos robôs sobre a linha no cenário anterior, explorou-se a detecção de obstáculos e o comportamento dos robôs ao evitá-lo.

Novamente, os robôs apresentaram o funcionamento esperado. A detecção de objeto foi mais simples, uma vez que o sensor fora calibrado. Juntamente com a detecção de objeto, este cenário buscou validar o funcionamento do retorno do robô ao curso mediante encontro com um bloqueio no caminho.

Em seguida, embora tenha sido necessária alguma calibração no tempo de ciclo de processamento do robô, eventualmente a meia volta do robô foi executada de forma que ele continuasse orientado, não se perdendo em relação à sua linha guia.

Para os dois casos, observou-se que sem alteração da velocidade de acionamento dos motores, ao se reduzir o tempo de processamento do robô ele ficava mais exato e eficiente. Em outras palavras, reduzindo o tempo de processamento do robô, fazendo-o então conferir mais vezes a informação advinda de seus sensores, ele captava mais corretamente quando estava sobre a linha guia, além de oscilar menos ao redor da linha (redução do movimento de ziguezague ao seguir a linha guia).

C. Cenário 3: Dois robôs com obstáculo e comunicação

O primeiro teste com dois robôs ocorreu no cenário 3. Neste cenário, testou-se os robôs sendo inseridos ao mesmo tempo no circuito, já com comunicação. No entanto, o sistema só foi testado para detecção de obstáculo fixo, não sendo tratada neste cenário a interação entre os dois robôs quando eles se encontram.

Mesmo sem haver a verificação final de encontro entre um robô e outro, a comunicação não deixou de existir. Quando os robôs foram testados individualmente, o módulo XBee usado para comunicação entre os robôs estava desligado. Com o XBee já ligado durante os testes, os robôs realizavam a verificação de comunicação em um caso específico: quando detectavam o obstáculo, mas ainda se encontravam sobre a linha preta e não sobre a faixa verde, ou quando a leitura dos sensores de linha não retornava uma localização bem especificada aos robôs. Nestes casos específicos, o robô parava ao detectar o obstáculo para verificar se havia algum sinal de comunicação na serial.

Caso não houvesse uma mensagem na serial enviada pelo outro robô, depois de um pequeno intervalo criado com delays no código dos robôs, eles continuavam o percurso, detectando o obstáculo como um objeto diferente de um agente robótico e executando a rotina de meia volta para desvio da estrutura obstruindo a passagem e retomando a movimentação.

O funcionamento dos robôs quanto à detecção dos bloqueios na pista seguiu o mesmo modelo já testado. Mesmo com os momentos de pausa para verificação de comunicação, os robôs executaram a rotina de meia volta sem se perder da linha guia ao girar sobre os próprios eixos.

D. Cenário 4: Dois robôs se encontrando diretamente com comunicação

Por fim, no último cenário foi testado a ocasião de encontro dos robôs na pista. Os dois robôs foram colocados separados na pista, virados um em direção ao outro.

Segundo a programação implementada, seria observável quando os robôs se identificassem, pois eles deveriam girar no mesmo lugar dentro de um laço infinito (laço *while*).

Nos primeiros testes, no entanto, houve casos em que os dois robôs giravam sem fim, mas houve casos em que apenas um dos robôs girava sem parar. Não necessariamente era o LFC1 ou o LFC2; o primeiro robô a começar a girar, continuava girando sem fim. O outro robô apresentou três tipos de comportamentos: ora ele dava leves trancos para frente, ora ele ficava parado, esperando leitura de mensagem da serial que confirmaria o encontro dos robôs, ora ele realizava a rotina de meia volta e seguia movendo-se na mesma direção e em sentido oposto, como se ele tivesse reconhecido o robô girando como um obstáculo.

Analisando o comportamento dos robôs, cogitou-se a possibilidade de os robôs estarem sobrecarregando a serial, enviando mais mensagens do que o necessário. Além disso, acreditou-se que em um novo ciclo de processamento, eles possam ter recebido uma leitura ruidosa de algum sensor e não retornado à parte do código que detecta o outro robô, seja pelo sensor de distância como pelo sensor de linha.

Caso o sensor de linha, por exemplo tivesse uma variação e o sensor de distância detectasse o outro agente, o robô com leitura ruidosa do sensor de linha poderia interpretar o outro robô como um obstáculo. No caso do sensor de distância apresentar variação na leitura, o robô interpretaria o caminho como livre de obstáculos e tentaria se locomover novamente, causando pequenos trancos até que o sensor de distância captasse novamente o robô parado à frente.

Este último tipo de erro, falha de captura de leitura do sensor infravermelho de distância, também ocorreu quando os robôs se encontravam em uma parte curva da pista. A angulação com que os robôs se encontravam na pista não permitia que eles se encontrassem. Os robôs só eram capazes de se identificar em trechos retos da pista, onde um robô conseguia ver o outro.

Após correção do código baseado nos erros observados e teorias propostas, reduziu-se o envio de mensagens entre robôs para quando eles encontrassem um obstáculo que provavelmente fosse um robô. Isso permitiu que

eles enviassem menos mensagens, reduzindo drasticamente a sobrecarga de mensagens na serial. Além disso, um comportamento emergente observado é que se não houvesse resposta do outro robô e o obstáculo fosse removido, o robô que encontrou o bloqueio continuou seu movimento de seguimento de linha normalmente. Isso foi observado quando o robô detectou um objeto estranho na pista e parou, mas não deu meia volta. Quando o objeto foi removido, o robô continuou seu movimento. Quando os robôs se encontraram após as correções realizadas, mediante a condição de estarem em linha reta e de fato capturarem a leitura um do outro através do sensor infravermelho de distância, os robôs tiveram êxito na comunicação, culminando com ambos os robôs girando em torno dos próprios eixos em um laço infinito.

VIII. CONCLUSÕES

Como objetivo a observação do projeto e estudo do sistema robótico de modo a encontrar pontos críticos em seu desenvolvimento, este trabalho apresenta conclusões úteis, em um âmbito didático, e mesmo considerando-se aplicações multirrobôs de projetos mais complexos.

Com base nos estudos e testes realizados, foi possível observar diversos pontos de atenção enquanto o trabalho foi desenvolvido. Um exemplo foi a análise das funcionalidades de cada robô sendo testadas de forma isolada, mesmo antes de chegar à pista. Verificar e calibrar sensores e atuadores é um dos trabalhos mais realizados em uma aplicação real de robôs, uma vez que a leitura dos sensores e atuação de motores e dispositivos pode ser intensamente influenciados pelo ambiente em que o robô será empregado.

Outro ponto de interesse é a análise da execução do código programado em cada robô. O fato de o robô funcionar de forma isolada não atesta seu funcionamento em um sistema multirrobótico. Além disso, é extremamente vantajoso criar uma forma de verificação de cada entrada e troca de funções no código do robô. Como em testes de campo o robô não necessariamente estará conectado a um computador, é difícil definir o que está acontecendo com ele, que código está executando, sem uma forma visual ou auditiva de determinar o que ele está processando. Uma forma de comunicação direta com um computador, capaz de gerar um arquivo com informações do teste de funcionamento seria ideal. Mesmo assim, muitas vezes um LED vermelho ou uma sirene podem causar uma resposta mais rápida ao projetista do sistema do que dados a serem analisados em uma tela.

Dentre os possíveis trabalhos futuros ao redor deste sistema, seria relevante uma maior complexidade do ambiente, com mais tipos de obstáculo, estáticos e móveis, por exemplo, além de mais linhas guia pelas quais os robôs pudessem decidir por onde seguir caminho. Isto contribuiria com uma análise das dificuldades no projeto de robôs com sistema de

decisão, algo comum aos robôs criados com algum tipo de inteligência artificial, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- [1] Osagie, P. "Distributed Control for Networked Autonomous Vehicles". Dissertação de Mestrado, KTH CSC, Royal Institute of Technology, Sweden, 2006
- [2] Mataric, Maja J. Introdução à Robótica. 1. ed. São Paulo: Editora UNESP/Blucher, 2014.
- [3] Guessoum, Zahia. A Hybrid Agent Model: a Reactive and Cognitive Behavior. Université Paris 6. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/5734/47481856dc8dfdb5b8573496b787bc434e3d.pdf>>. Acessado em: 07/12/2018.
- [4] Russell, Stuart; Norvig, Peter. Inteligência Artificial. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.
- [5] Cândido, Gradimilo. Vida de Silício. Robô Seguidor de Linha com Infravermelho e PWM. 2018. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/robo-seguidor-de-linha-sensor-infravermelho-e-pwm/>> Acesso em: 01/12/2018.
- [6] Engin, Mustafa; Engin, Dilsad. Path Planning of Line Follower Robot. Izmir: EDERC, 2012.
- [7] Arduino - FAQ. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/FAQ#toc13>>. Acessado em: 01/12/2018.