

ESTUDO SOBRE PLATAFORMAS ROBÓTICAS EDUCACIONAIS DE BAIXO CUSTO

A STUDY OF LOW COST ROBOTIC PLATFORMS FOR EDUCATIONAL ROBOTICS

Alexandre Rossi Kurowiski*
Felipe Robson da Silva**
Antônio Marcos Neves Esteca***
Maurício Acconcia Dias****

RESUMO

A robótica educacional é uma área cujo crescimento nos últimos anos entre alunos de ensino fundamental, médio e superior demonstra um crescente interesse por parte de alunos, professores e pesquisadores. As ferramentas utilizadas para a prática da robótica devem ser bem escolhidas, pois não devem apresentar alta complexidade tanto na programação quanto na montagem considerando alunos de diferentes idades. O avanço e popularização de dispositivos de hardware de baixo custo contribuíram significativamente para o cenário descrito. A grande oferta de diferentes dispositivos de hardware e kits de montagem de robôs torna difícil a escolha correta para cada situação. Este trabalho apresenta um estudo de diferentes plataformas de robótica apontando suas principais vantagens e desvantagens. Após a análise, um estudo de caso utilizando uma das plataformas mais utilizadas para robótica atualmente, o micro controlador Arduíno, foi realizado sendo dividido em dois experimentos distintos. Um experimento apresenta o cálculo do erro acumulado na operação de um protótipo de braço robótico de baixo custo, e o segundo experimento implementa um algoritmo evolutivo onde o robô aprende de forma autônoma a se locomover no ambiente sem bater em objetos. Os dois experimentos demonstram as reais dificuldades e vantagens de se utilizar o Arduíno como plataforma de desenvolvimento em robótica.

Palavras-chave: Robótica. Arduíno. Educacional. Estudo.

ABSTRACT

The growth of educational robotics field in last years considering different levels of education shows a growing interest for the area by researchers, students and teachers. It is important to

* Graduação em Ciência da Computação. Faculdade de Tecnologia, Ciências e Educação (FATECE).
kuros_dvg@hotmail.com

** Graduação em Ciência da Computação. Faculdade de Tecnologia, Ciências e Educação (FATECE).
phelipe.phg@hotmail.com

*** Docente da Faculdade de Tecnologia, Ciências e Educação (FATECE) e Orientador desta pesquisa.
am.esteca@sjrp.unesp.br

**** Docente da Faculdade de Tecnologia, Ciências e Educação (FATECE) e Orientador desta pesquisa.
macdias@icmc.usp.br

choose carefully design tools for educational robotics because they have to be easy to use for students of different stages without compromising performance. High number of low cost hardware devices available contributed directly to educational robotics scenario. The problem of this high number of devices is how to choose correctly which device is the best for each robot. Based on presented scenario this work presents a study of low cost hardware platforms to be applied in robotics pointing their advantages and problems. After the initial analysis two different experiments were executed using Arduino in a robotic arm where the main positioning control errors were evaluated and also in a small robotic car that uses genetic algorithm to evolve robot's behavior and be able to move without colliding. Both experiments showed the potential, problems and challenges of using Arduino to control robots in two different situations. The results showed that Arduino is indicated for both cases and for educational robots in general.

Keywords: Robotics. Arduino. Educational. Survey.

Introdução

Nos últimos anos a robótica tomou as proporções que eram esperadas devido à diminuição dos custos de componentes, aumento da oferta de kits de robótica e também a criação de alternativas para programação de robôs, que podem ser consideradas mais acessíveis em comparação aos códigos necessários anteriormente. Este cenário possibilitou, dentre outros objetivos alcançados, a inclusão de robôs de baixo custo na educação e, consequentemente, a iniciação da área de computação nos ensinos fundamental e médio.

A robótica industrial vem se aprimorando desde seu início com os primeiros robôs manipuladores instalados em linhas de montagem de fábricas. Estes robôs tinham por objetivo baratear o custo da produção em série e também garantir a qualidade dos produtos finais, que estava ficando prejudicada pela individualidade dos trabalhos manuais. O campo da robótica industrial é então responsável pelo desenvolvimento e utilização de robôs para manufatura. Na indústria existem muitas aplicações para robôs manipuladores como, por exemplo, montagem de carros, organização de estoques, cirurgias médicas, entre outros. Os principais robôs industriais incluem robôs articulados, robôs SCARA e robôs cartesianos. Em geral todos estes robôs costumam ser chamados de braços robóticos sem a devida distinção e a pesquisa nesta área é de grande interesse por parte da indústria.

A robótica atingiu seu sucesso industrial com os robôs manipuladores, porém um problema com este tipo de robô é a falta de mobilidade. Considerando esta possibilidade, um robô poderia não só cumprir sua tarefa determinada em uma fábrica como também se

locomover por ela buscando novas tarefas. O principal desafio da robótica móvel é criar um robô que possa se locomover pelo mundo real de forma não-supervisionada e cumprir tarefas. A locomoção em si já é um grande problema (SIEGWART; NOURBAKHS, 2004).

Considerando a evolução da robótica é notável o avanço, nos últimos anos, da área de robótica educacional. Alguns trabalhos apresentam resultados interessantes que utilizaram a robótica educacional em diferentes níveis de educação (SILVA; ESTECA; DIAS, 2015). A utilização de robôs em aulas desperta o interesse em alunos em matérias que possuíam um alto índice de evasão inclusive em nível superior (CIELNIAK et al., 2012). Existem diferentes alternativas para o desenvolvimento de hardware como os controladores PIC¹, Arduíno², Raspberry PI³, Kits LEGO⁴, dentre outros. Devido ao grande número de opções a escolha da melhor plataforma para cada problema torna-se um processo complexo. Considerando este cenário este artigo apresenta uma revisão sobre a área de robótica educacional juntamente com dois experimentos práticos utilizando o controlador Arduíno em um braço robótico e em uma plataforma móvel. Os resultados indicam que o Arduíno é uma plataforma robusta e pode ser utilizada em diversos tipos de robô tanto para fins educacionais como de pesquisa.

1 Robótica

O início do desenvolvimento dos robôs ocorreu no século XVIII, na indústria têxtil, que foram as primeiras máquinas de teares mecânicos. Com o avanço da Revolução Industrial, houve uma busca crescente por máquinas que pudessem reproduzir automaticamente determinadas tarefas. Porém, apenas com o surgimento dos computadores em 1940 e dos avanços das tecnologias que compunham um robô é que a robótica começa a se tornar realidade.

A primeira patente de robótica foi de George Devol em 1954. O primeiro robô industrial foi o *Unimates*, desenvolvido por George Devol e Joe Engleberger, no início da década de 1960. Engleberger é considerado o pai da robótica por ter ajudado a construir o

¹ <http://www.microchip.com/design-centers/microcontrollers>

² <https://www.arduino.cc/>

³ <https://www.raspberrypi.org/>

⁴ <http://www.lego.com/en-us/mindstorms/?domainredirect=mindstorms.lego.com>

primeiro robô. Os robôs da *Unimates* eram conhecidos como máquinas de transferência programada que utilizavam atuadores hidráulicos e eram programados por coordenadas.

Entre os anos de 80 e 90, a popularização da computação, e da comercialização de computadores domésticos, repercutiu para o aumento do interesse e desenvolvimento de soluções para a indústria, saúde, segurança, e muitos outros setores em que a robótica e a computação proporcionaram um melhor desempenho e maior confiabilidade de realização de tarefas manuais. Desde o Início do século XXI, esses setores tornaram cada vez mais importante a presença da computação.

Atualmente, robôs experimentais são utilizados com o objetivo de pesquisar e desenvolver novos e mais eficientes robôs. Porém a área de robótica industrial está perdendo espaço para a robótica móvel nas pesquisas de universidades nos últimos anos. Portanto é interessante delimitar as áreas de robótica industrial e robótica móvel para entender o impacto que exercem na área de robótica educacional e também nas pesquisas realizadas.

1.1 Robótica Industrial

A robótica atingiu seu sucesso industrial com os robôs manipuladores (SIEGWART; NOURBAKSH, 2004). Um braço robótico ou manipulador é constituído por duas partes básicas o braço e o punho. O braço é constituído por elos ligados através de motores, ou juntas de movimento relativo, que são acionados para movimentar o braço. Geralmente estes motores possuem alguma capacidade sensorial e são instruídos por um sistema de controle. O braço é fixado à base por um lado e ao punho pelo outro.

O punho é constituído de partes menores e um número maior de juntas unidas por elos compactos que irão permitir que o robô realizasse a tarefa para a qual foi projetado. Em braços reais a identificação dos elos e juntas nem sempre é fácil, em virtude da estrutura de peças que acabam por esconder as juntas com finalidade de proteção. Uma ilustração descrevendo a estrutura básica de um braço robótico é apresentada na Figura 2.

Em uma junta qualquer, o elo que estiver mais próximo à base é chamado de elo de entrada. O elo de saída é o elo mais próximo ao punho. As juntas empregadas em robôs manipuladores podem ser dos seguintes tipos (ROSARIO, 2010):

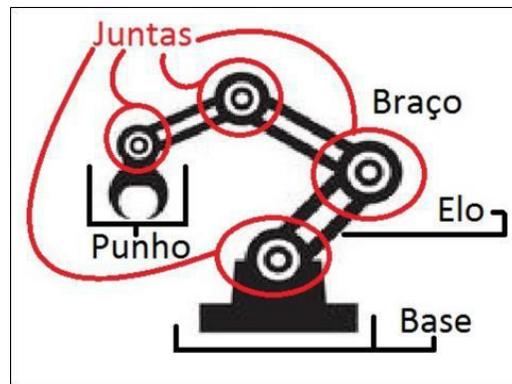


Figura 1 – Exemplo de robô manipulador com partes básicas identificadas

- Junta prismática ou linear - move-se em linha reta. São compostas de duas hastes que deslizam entre si.
- Junta rotativa - gira em torno de uma linha imaginária estacionária chamada de eixo de rotação. Ela gira como uma cadeira giratória e abrem e fecham como uma dobradiça. Pode ser de três tipos: (i) de torção onde os elos de entrada e saída tem a mesma direção do eixo de rotação da junta; (ii) rotacional onde os elos de entrada e saída são perpendiculares ao eixo de rotação da junta; e (iii) revolvente elo de entrada possui a mesma direção do eixo de rotação, mas o elo de saída é perpendicular.
- Junta esférica - combinação de três juntas de rotação permitindo movimento em três eixos distintos.
- Junta cilíndrica - duas juntas sendo uma rotacional e uma prismática.
- Junta planar - duas juntas prismáticas que realizam movimentos em duas direções.
- Junta fuso - parafuso e rosca que executa um movimento semelhante ao da junta prismática incluindo o movimento de rotação do eixo central.

Os graus de liberdade irão determinar as possibilidades de movimento do braço robótico no espaço 2D ou 3D. Cada junta irá definir n graus de liberdade, sendo que o número total de graus de liberdade de um braço robótico (Gl) é dado pela soma dos graus de liberdade de cada junta j (gl_j). A equação abaixo apresenta a fórmula do cálculo dos graus de liberdade de um manipulador sendo nt o número total de juntas.

$$Gl = \sum_1^{nt} gl_j$$

A complexidade do controle de um braço robótico é diretamente proporcional aos seus graus de liberdade (MATARIC, 2014). Os movimentos do manipulador são analisados separadamente entre o braço e o punho. Em geral os acionadores do braço são configurados para permitir que existam ao menos três movimentos distintos: movimento vertical do punho para cima e para baixo, movimento do punho horizontalmente para a esquerda e para a direita e movimento de afastamento e aproximação do punho. A cadeia cinemática de um manipulador é o “trajeto” entre a junta de entrada e o punho do robô. Um robô de cadeia cinemática aberta é aquele que partindo da base é possível chegar ao punho por meio de caminho único. Os robôs manipuladores de cadeia parcialmente fechada ou fechada podem possuir juntas ou articulações não-motoras.

A funcionalidade de um manipulador, em resumo, inclui a base que sustenta o corpo e será responsável também por movimentar o braço. O braço por sua vez posiciona o punho que irá movimentar o órgão terminal do manipulador responsável por executar a ação. O punho do robô manipulador é considerado a junta onde será ligada um órgão terminal. Estes punhos podem possuir juntas de rotação ou prismáticas que irão dar diferentes possibilidades de realizações de tarefas ao robô. Os órgãos terminais são normalmente o que chamamos de “garras” ou “mãos” do robô. Esta parte é complexa de ser projetada, pois deve ser capaz de realizar a tarefa e ainda assim ter o controle da pressão aplicada aos objetos. Este tipo de controle é feito com a instalação de sensores nas garras.

As juntas são conectadas por acionadores. Estes acionadores são geralmente de três tipos básicos: hidráulicos, elétricos e pneumáticos (CRAIG, 2006).

No caso de acionadores hidráulicos é necessário compor um sistema que possua motor, cilindro, bomba de óleo, válvula e tanque de óleo. Esta configuração é associada a robôs de maior porte quando comparados a acionadores pneumáticos e elétricos. O custo de um sistema deste porte é muito elevado, só sendo justificado em robôs deste tipo. Apesar disso, os atuadores em si são compactos e indicados para robôs do tipo pórtico ou esférico com juntas prismáticas.

Já os acionadores elétricos são utilizados em robôs de pequeno e médio porte. Estes tipos de acionadores não proporcionam muita velocidade ou potência, porém atingem maior precisão. Em geral são montados com caixas de redução para diminuir a velocidade e aumentar o torque, procedimento que prejudica a produtividade do motor. O custo do

acionamento elétrico é proporcional ao torque necessário para a movimentação do braço mecânico.

As características de robôs manipuladores são particulares em vários pontos, porém algumas delas podem ser vistas também em robôs móveis.

1.2 Robótica Móvel

Os robôs móveis interagem com o mundo externo através de sensores e atuadores. Os sensores irão proporcionar dados sobre o ambiente onde o robô está inserido permitindo que ele escolha e tome as decisões corretas de como agir utilizando seus atuadores, ou seja, dispositivos que proporcionam alguma mudança do ambiente ou do robô em relação ao ambiente.

O conceito de robótica móvel se aplica, exclusivamente, a robôs que possuem uma base móvel, com pelo menos um tipo de sistema de locomoção. Dentre os sistemas possíveis de locomoção, para robôs móveis, os sistemas mais encontrados são as rodas. Rodas são sistemas de locomoção com maior uso em robôs móveis que trabalham em ambientes internos e isso se deve ao fato de que relacionados a questões técnicas, rodas são sistemas baratos, e relativamente mais fáceis de configurar e programar.

Entre os sistemas de locomoção existentes na robótica móvel, com destaque ao sistema de rodas, estão também sistemas compostos por pernas, utilizado em robôs inspirados em animais, ou até mesmo humanoides onde as funções se assemelham às funções humanas, como andar, sentar, pegar objetos ou conversar. Sistemas robóticos autônomos também são construídos com turbinas ou motores de propulsão, normalmente utilizados em aviões não tripulados, drones, barcos, entre outros.

Robôs Móveis Autônomos tem como característica sua locomoção e operação praticamente automáticas, não tendo em sua grande maioria nenhum tipo de controle manual. Para isso, é necessário que o robô tenha uma percepção do ambiente e consiga resolver e executar de forma precisa as mais diversas tarefas que a situação exija para o cumprimento dos seus objetivos. Técnicas de planejamento e controle de robôs autônomos são conhecidas como “Controle Robótico Inteligente”, proporcionando um controle mais robusto para execução das tarefas mais complicadas.

Para um bom desempenho do robô, é preciso adotar uma série de dispositivos, como sensores e atuadores, além de dispositivos de localização e navegação, a fim de situar o robô no meio em que está inserido, possibilitando o planejamento e execução de ações com precisão (WOLF et al., 2009).

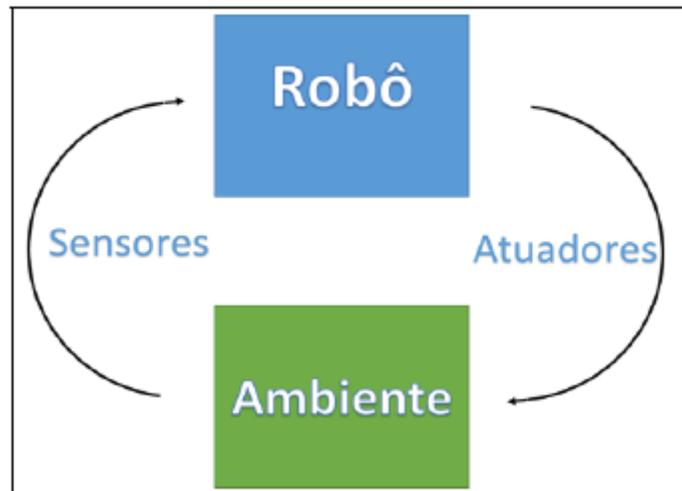


Figura 2 – Diagrama básico de interação do robô com o ambiente

A Figura 2 ilustra a relação de um robô com o ambiente. Um robô obtém informações do ambiente através de sensores, processa estas informações e decide o que fazer através de seus atuadores. Portanto podemos enumerar os conceitos básicos da seguinte forma:

- a) Sensores: Os principais componentes de hardware de um robô móvel autônomo são os sensores. Através da sua utilização o robô pode perceber o ambiente e se localizar. Muitos desses sensores podem ser utilizados para comunicação entre o robô e outro sistema externo.
- b) Atuadores: Os atuadores são igualmente importantes para robôs móveis, já que são responsáveis pelas ações que o robô emprega ao meio, ou seja, são os atuadores que fazem com que o robô ande pelo ambiente, e exerça qualquer outro tipo de ação (cavar, recolher objetos, etc.).
- c) Navegação: A navegação é uma das tarefas fundamentais a ser executada pelo robô autônomo, uma vez que, para poder interagir com o ambiente de forma precisa, é necessário um bom entendimento dos acontecimentos ao seu redor, e de um planejamento das ações. Sistemas de navegação mais elaborados podem proporcionar ao robô uma locomoção segura, uma vez que ajudam a

traçar rotas de forma a evitar obstáculos. Para isso, é imprescindível que o robô esteja dotado de sensores capazes de detectar qualquer obstrução em seu caminho, o que vai garantir a execução de sua rota sem colisão com qualquer objeto que esteja no ambiente, e também, possa reconhecer o ambiente através destas informações.

- d) **Localização:** A localização é responsável pela identificação da posição do robô, mesmo em movimento, no ambiente. Muitos objetivos de um robô móvel podem não ser bem executados - como navegação, localização de objetos ou exploração - se não houver informações sobre a sua posição. A localização normalmente é feita por meio da percepção do ambiente pelos sensores do robô e o monitoramento das ações e movimentação para calcular a distância percorrida desde o ponto inicial, ou pelo último ponto em que se registrou a localização (BIGHETI, 2011).

As ações tomadas pelo robô e também o processamento de informações obtidas pode ser feito de várias maneiras diferentes. Uma maneira de controlar o robô é utilizando algoritmos evolutivos, e esta escolha deu origem a uma área específica da robótica conhecida como robótica evolutiva.

1.3 Robótica Evolutiva

Várias áreas da inteligência artificial são aplicadas à robótica para a solução de problemas. Uma das áreas que apresentou resultados relevantes foi a computação evolutiva. A aplicação de algoritmos evolutivos em problemas de robótica deu origem a uma área de pesquisa conhecida como robótica evolutiva. Para que seja possível entender melhor os conceitos envolvidos nesta área inicialmente serão definidos os algoritmos evolutivos e, em seguida, a robótica evolutiva.

Este trabalho utiliza um algoritmo evolutivo chamado algoritmo genético. Algoritmos Genéticos são algoritmos evolutivos que utilizam vários operadores genéticos e possuem um fluxo padrão para sua execução. Eles são diretamente baseados em conceitos da evolução como elitismo, predação, cruzamento e mutação (LINDEN, 2008).

A ligação entre o algoritmo genético e um problema de busca é o indivíduo. O indivíduo representa uma possível solução dentro de um espaço de busca, e esta solução é avaliada através de uma função (chamada de fitness ou função de avaliação). A correta representação do problema por um indivíduo é de grande importância para o sucesso do algoritmo. Através da aplicação de operadores genéticos os indivíduos são modificados e podem ser “evoluídos” para um estado mais próximo à solução do problema. Este fato mostra que o algoritmo se difere de uma busca aleatória pois guia a modificação dos indivíduos pelos operadores o que, conseqüentemente, resulta em uma busca guiada.

Os mínimos e máximos locais são evitados através da intensidade com que os operadores são aplicados nos indivíduos, sendo que um ajuste fino, quando o algoritmo se encontra próximo à solução, é muitas vezes necessário. O Algoritmo Genético é geralmente dividido nas seguintes etapas: Inicialização da população, Avaliação, Seleção dos indivíduos mais aptos, Cruzamento dos indivíduos selecionados gerando novos indivíduos, Mutação dentre os indivíduos a fim de gerar diversidade e a repetição do processo até que um critério de parada seja atingido.

Basicamente são utilizados dois critérios de parada: primeiro quando a solução para o problema foi encontrada, então o algoritmo pode parar de ser executado; ou então quando um número de gerações foi alcançado. Cada vez que o loop seleção-cruzamento-mutação-avaliação é executado, uma geração é contada, conforme mostrado na Figura 3.

A Robótica Evolutiva nada mais é que a aplicação de algoritmos evolutivos à robótica para obter algoritmos de controle e projetos de robôs que sejam ótimos para determinadas aplicações (DONCIEUX, 2011).

Os problemas de robótica onde são aplicados com sucessos os métodos de computação evolutiva são:

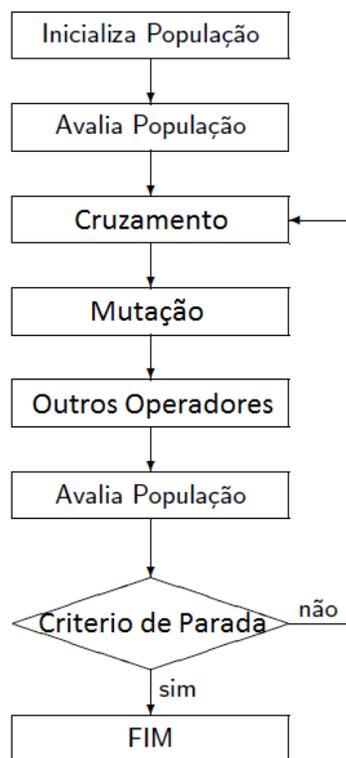


Figura 3 – Fluxograma do algoritmo genético. Inicialmente uma população é gerada de forma aleatória. Em seguida os indivíduos desta população são avaliados e selecionados. Os indivíduos que foram selecionados são cruzados e geram descendentes que substituem indivíduos escolhidos da população inicial. Este processo se repete até que algum critério de parada (encontrar a solução do problema ou tempo máximo de execução atingido) seja atingido

- a) Problemas onde não se possui um algoritmo ótimo: nestes casos a grande vantagem é que os algoritmos evolutivos podem apresentar boas soluções a qualquer momento em que o algoritmo for pausado;
- b) Quando é possível construir uma função de avaliação interessante: problemas que é possível criar funções que realmente vão guiar o algoritmo para os melhores resultados;
- c) Quando é possível desenvolver uma boa representação: casos onde o problema pode ser bem representado auxiliam no desenvolvimento do algoritmo e na busca por soluções.

Considerando um algoritmo genético, é possível desenvolver soluções para auxiliar no ajuste de parâmetros, no design do próprio robô, adaptação em tempo real, dentre outros problemas.

No caso do design do robô podem ser feitas experiências onde o algoritmo irá evoluir a forma do robô de modo que o mesmo possa se locomover e realizar suas tarefas. O trabalho de Heinen e Osório (2009) apresenta um algoritmo que evolui o formato do robô por um algoritmo genético e faz os testes com simulação física. Ao final da execução o algoritmo encontra as formas dos pés do robô bem como grossura das pernas dentre outras características. A questão do trabalho é a limitação dos testes por simulação que ficariam inviáveis de serem realizados em ambientes reais.

A adaptação em tempo real pode ser encontrada em um experimento realizado por Simões (2000) onde um grupo de robôs móveis foi projetado para andar no ambiente e executar um algoritmo genético distribuído. Os robôs representavam os indivíduos e realizavam cruzamentos através de sensores de infravermelho. O algoritmo evoluía 100% com informações da execução do algoritmo no ambiente. A aplicação de operadores genéticos foi estudada e avaliada com profundidade. Neste trabalho o problema é o hardware do robô que possuía um custo alto e pouca acessibilidade. Na época não estavam disponíveis as tecnologias de hardware ao custo e disponibilidade que existem atualmente.

Ao se desenvolver um projeto de robô autônomo é necessário não só montar o robô, mas também calibrar seus sensores e atuadores bem como desenvolver seu algoritmo de controle. O ajuste dos parâmetros pode ser uma tarefa árdua em que o desenvolvedor utiliza sua experiência prévia no assunto. A experiência pode ajudar, porém cada algoritmo deverá levar em conta um determinado problema em um determinado ambiente. Para isso os algoritmos evolutivos são indicados na robótica. Ao se projetar um algoritmo desta natureza vários comportamentos possíveis são mapeados para os genes e o algoritmo irá evoluir os comportamentos chegando a uma solução no final que irá conter informações de como os sensores e atuadores devem ser calibrados.

Tanto a robótica industrial quanto a robótica móvel, utilizando ou não algoritmos evolutivos, são amplos campos de pesquisa. A pesquisa em robótica nos últimos anos atingiu um patamar significativo tanto no ensino fundamental e médio quanto nas universidades. Este fato é consequência da popularização de dispositivos eletrônicos devido ao baixo custo.

1.4 Robótica Educacional

A robótica educacional pode ser entendida como a utilização de meios computacionais ou robóticos para fins pedagógicos. Compreendendo de uma forma mais específica, a robótica educacional tem como principal ferramenta a utilização de robôs para o aprimoramento de capacidades intelectuais relacionadas ao raciocínio lógico, bem como trabalho em grupo, concentração, imaginação e capacidade de resolução de problemas.

Com o crescente avanço em relação a tecnologia no mundo, diversas áreas profissionais acabaram por se modificar completamente nos últimos anos, o que, por consequência, gera uma necessidade de profissionais com um conhecimento amplo e atualizado. Porém muitas vezes não se encontra pessoas capacitadas para ocuparem cargos que exijam conhecimentos em tecnologias recentes, muitas vezes porque não tiveram contato ou muito menos o interesse por esses assuntos. Isso se deve ao fato de que os métodos de ensino utilizados nas escolas de hoje são pouco evoluídos em relação aos avanços tecnológicos de outras áreas, como telecomunicações, lazer, esportes, medicina, etc. (ZILLI, 2004).

Com esse cenário, a robótica educacional surge como uma forma de contato com a tecnologia, oferecido a alunos de escolas e universidades, desde o fundamental, até o ensino superior. Através deste contato, há a possibilidade de inclusão de jovens às novas tecnologias e técnicas de raciocínio e programação oferecidos. Isto favorece diversas habilidades intelectuais, além de melhorar o entendimento das tecnologias que estão cada vez mais presentes no cotidiano.

O principal objetivo da Robótica Educacional é proporcionar ao aluno um ambiente de aprendizagem multidisciplinar onde é possível desenvolver o raciocínio, lógica, criatividade, e principalmente realizar a interação Homem-Maquina que cada dia mais se torna uma função necessária e importante no mundo moderno (ZILLI, 2004).

Kits robóticos tornaram-se populares nos últimos anos, e estudantes que usavam robôs como ferramentas de programação começaram a se interessar mais em como construir um robô e como cada decisão de projeto poderia impactar no resultado final. O fato mais interessante sobre os kits robóticos é que existem diferentes níveis de kits que podem ser usados para construir robôs com diferentes níveis de complexidade.

No caso da Lego, os kits são uma solução interessante para robótica educacional com crianças, pois não há necessidade de soldar componentes e o nível de programação que é necessário é muito simples, porque o kit é programado por blocos. Placas com microcontroladores Arduíno são interessantes para estudantes de graduação, dado o elevado número de atuadores e sensores que podem ser controlados pelo chip, e também porque eles são fáceis de implementar e possuem baixo consumo de energia. Outros microcontroladores como o Microchip PIC também são uma boa escolha para serem usados em robôs educacionais, mas, geralmente, os alunos têm de construir toda a placa.

A consequência desse grande número de kits e soluções disponíveis é um interesse crescente na arquitetura de robôs. No projeto de robótica a escolha correta da arquitetura é imperativa para o robô para ser capaz de realizar uma tarefa. Ao longo dos anos a arquitetura dos robôs mudou consideravelmente e uma análise desta evolução é interessante para compreender o impacto das novas tecnologias no campo da robótica educacional.

Um número considerável de plataformas robóticas com diferentes configurações de hardware, arquitetura e software de programação estão disponíveis a preços razoáveis. Este fato permitiu o uso de robôs em ambientes educacionais, desde o ensino fundamental até cursos de graduação. Escolher o melhor robô para cada situação tornou-se uma tarefa difícil, devido ao elevado número de plataformas disponíveis. Também construir um robô que irá abordar os requisitos de uma tarefa é mais fácil porque os controladores de hardware e componentes são mais baratos e mais fáceis de achar. A melhor solução pode ser construir um robô em vez de escolher um já montado.

Robôs educacionais possuem algumas limitações. A ideia é ter um robô para cada aluno e, conseqüentemente, um elevado número de alunos exige um elevado número de robôs. Devido à quantidade habitual de robôs necessários o preço deve ser tão pequeno quanto possível. Além disso, o equipamento robô tem que ser robusto, a fim de executar um elevado número de experiências sem apresentar qualquer avaria. Um alto poder de processamento também é desejável, porque pode limitar as funções que o robô pode realizar e o número de sensores ou atuadores que podem ser conectados e corretamente tratados. A fonte de alimentação tem de ser concebida para permitir um número mínimo de horas de experiência, mas também ser pequena para encaixar dentro de pequenas plataformas. Considerando todos esses recursos a busca de um robô que cumpre todos os requisitos ainda

é um desafio. Fabricantes e pesquisadores de robôs apresentaram diferentes abordagens para construir e programar robôs educacionais. Quando são analisadas as plataformas propostas é possível extrair informações interessantes.

Os dispositivos usados para construir robôs educacionais têm de ser relativamente baratos, com capacidades de processamento elevadas e baixo consumo de energia. Os dispositivos escolhidos também devem permitir que diferentes estruturas possam ser criadas, implementadas e testadas. Microprocessadores são opções interessantes, porque abordam todos os itens acima mencionados. Um problema desses dispositivos é que o hardware é fixo e, conseqüentemente, o poder de processamento também é limitado. Para construir robôs consumindo menos energia e com grande capacidade de processamento, alguns dispositivos podem ser uma boa escolha para construir robôs educacionais.

Microcontroladores ainda são as plataformas mais utilizadas para a construção de robôs educacionais, mas os dispositivos apresentados têm potencial para substituir esses chips nos casos em que o poder de processamento e flexibilidade são importantes. O fato de que esses dispositivos vêm em kits de desenvolvimento com várias interfaces de entrada / saída e alto poder de processamento é uma vantagem considerável quando usado em ambientes educacionais, pois não há necessidade de construir todo o hardware durante as aulas. Com melhor hardware disponível, alunos são capazes de conceber projetos mais complexos (SILVA; ESTECA; DIAS, 2015).

2 Experimentos e Análise

O referencial apresentado anteriormente sugere que seja utilizado o controlador Arduíno para robôs educacionais devido ao baixo custo e robustez. Para comprovar esta hipótese dois experimentos foram realizados com dois tipos diferentes de protótipos robóticos: um braço robótico utilizado na área de robótica industrial e uma plataforma móvel em forma de carro utilizado na área de robótica móvel.

2.1 Braço Robótico

O primeiro experimento foi executado utilizando um braço robótico. O kit do braço utilizado é muito simples e vem acompanhado de um manual de instruções passo a passo, seguindo este manual, em poucos minutos, o braço estava montado. Analisando o braço finalizado foi possível identificá-lo como um robô articulado, e foi possível compreender suas limitações, e assim poder determinar a distância máxima que um objeto pode estar do braço para que ele consiga pegá-lo. Outro ponto importante para o funcionamento do braço foi o limite de rotação dos servo-motores que podem se movimentar num raio de 180 graus. Uma vez que os limites de atuação do braço eram conhecidos foi iniciada a próxima etapa, conectar o braço robótico ao Arduino Mega. O processo envolveu ligar cada servo-motor em uma saída digital PWM do Arduino, como descrito no diagrama de Figura 5.

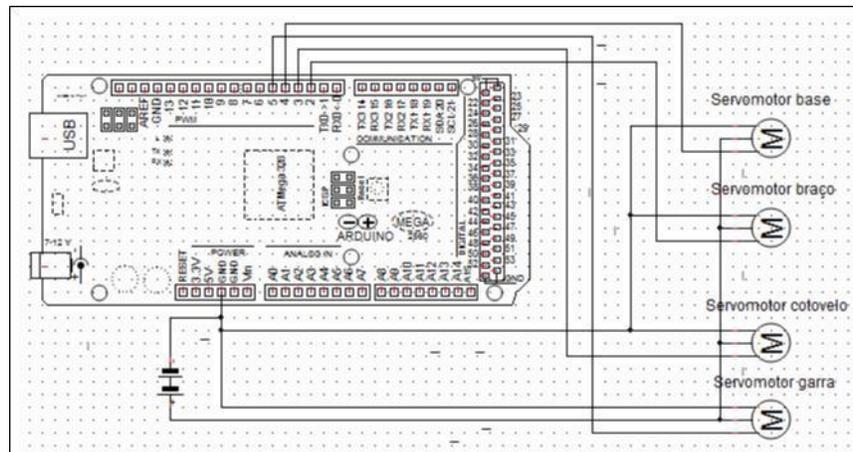


Figura 5 – Esquemático do circuito controlador do braço robótico.

Após a montagem o protótipo pode ser visualizado na Figura 6. Com testes de alcance, capacidade e precisão finalizados e uma maior compreensão dos limites de funcionamento dos servo-motores iniciou-se o desenvolvimento do algoritmo. Para isso foi dividido o desenvolvimento do algoritmo em três etapas:

- Controle do alcance
- Controle de erro dos servo-motores
- Controle do braço robótico

A lei de controle de alcance foi necessária por causa das limitações dos servo-motores em funcionarem de forma sincronizada, com os resultados do teste de alcance em mãos pudemos criar as regras para o seu bom funcionamento, impedindo que valores incompatíveis

sejam usados. Por exemplo, para o servo-motor que controla o cotovelo poder ser atribuído para menos de 20 graus para isso o servo-motor do braço deve ser maior que 90 graus, este valor vai sendo ajustado de forma que quando o braço estiver atribuído 110 graus o cotovelo poderá atingir 0 graus.



Figura 6 – Protótipo de braço robótico finalizado

A partir dos testes de erro dos servo-motores foi encontrada uma taxa de erro que pode chegar até 0,3cm, com isso em mente iniciamos a elaboração do algoritmo para corrigir esta falha, e para isso desenvolvemos uma função que suaviza o movimento dos servo-motores. Pelo teste vimos que quanto menor o movimento do braço, menor é a taxa de erro. Sendo assim a função tem como objetivo pegar o movimento completo do servo e dividir ele em partes menores. Dividimos os movimentos em intervalos de no máximo 10 graus em intervalos de 150ms de atraso, por exemplo, um movimento do cotovelo que vai de 90 graus para 50 graus é dividido em quatro etapas de 10 graus totalizando 600ms para realizar o movimento.

As leis de controle estabelecidas e implementadas obrigam que todas as rotinas desenvolvidas para o braço robótico tenham seu comportamento ajustado para os padrões definidos. Estes fatores foram utilizados para o desenvolvimento do algoritmo de controle.

Foram feitos os testes para determinar as limitações do protótipo. O teste de alcance do braço mostrou que a variação de 180 graus fica prejudicada pela junta intermediária que limita entre 20 e 110 graus o movimento em qualquer direção. O alcance máximo foi de 17,5cm. O teste de erro foi feito com a repetição de movimentos e variação do tempo de

espera entre as repetições. Após testes exaustivos foi definido que o tempo de espera entre os movimentos deve ser de 1000ms e que o erro em casos de movimentos curtos e longos fica entre 0,1 e 0,2cm. Apesar da especificação dos servo-motores de peso máximo suportado de 1Kg, o braço no total conseguiu movimentar peças de 130g sem problemas. No caso de repetições, o braço permaneceu por 5 horas ininterruptas executando o mesmo movimento. Em nenhum dos experimentos houve problema com o Arduino que estava controlando o braço.

Estes dados mostram que o braço possui algumas limitações, porém mesmo assim pode ser utilizado como um protótipo educacional de braço robótico.

2.2 Algoritmo Evolutivo

No caso do segundo experimento foi construído um robô móvel cujo circuito é apresentado pelo esquemático da Figura 7. O robô montado é apresentado na Figura 8.

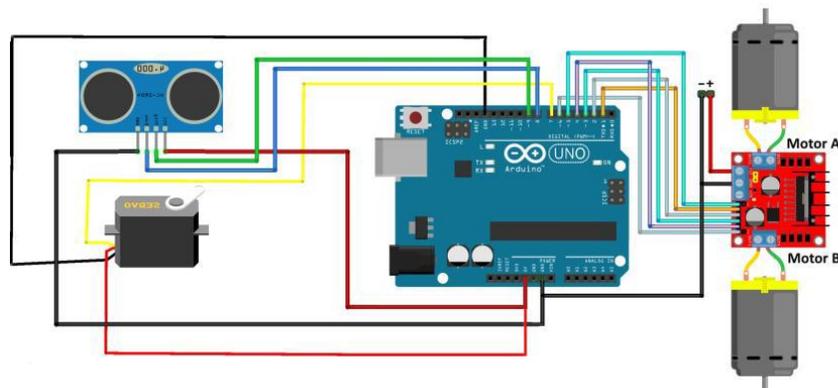


Figura 7 – Esquemático do robô. O circuito basicamente é composto por um circuito de controle de motores (Ponte H) e um servo-motor com o sensor de ultrassom acoplado. Todos os componentes são ligados à pinos de comando do microcontrolador Arduino

Como fonte de alimentação, o Arduino possui uma bateria de 9V e para a ponte h foi necessário acoplar uma caixa com 4 pilhas de 1,5V cada, com total de 6V. Este tipo de alimentação funciona melhor com pilhas recarregáveis de alta capacidade, pois a demanda de energia para os motores é muito grande, o que pode acabar prejudicando a locomoção do robô com uso de pilhas que não estejam em sua capacidade total.

Uma alternativa a esse problema é a realização dos testes com o robô conectado diretamente a uma tomada de rede elétrica, onde uma fonte fará a conversão da energia para

uma voltagem aceitável pelo robô (de 6V a 12V). Essa conexão é feita através do uso de um fio comprido ou extensão, para que o robô possa se locomover a uma distância razoável da tomada. O problema deste tipo de alimentação é que o robô se limita a poucos metros da fonte de energia, e ainda assim, é necessária uma pessoa para segurar o fio, evitando que enrosque ou se prenda. Porém, em ambiente de teste, a voltagem e potência contínua fornecida por essa alimentação melhoram o desempenho e precisão do robô nas avaliações.

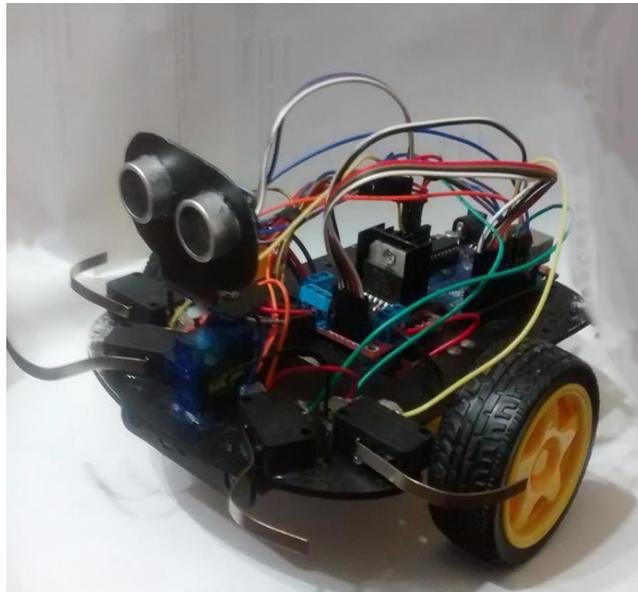


Figura 8 – Robô utilizado para os experimentos de robótica evolutiva

Com os componentes do robô já adquiridos, a montagem e acomodação na plataforma necessitou de alguns testes para avaliar a melhor posição de cada peça. Isso porque as placas (Arduíno e ponte H) acabam gerando interferências, necessitando de uma pequena distância entre si. Além disso, os testes ajudaram a determinar a melhor posição dos sensores, e também o melhor equilíbrio da plataforma, concentrando o ponto de equilíbrio do robô no centro, assim evita-se que o robô tombe ou que tenha uma carga de peso maior em cima de uma das rodas, gerando diferença na rotação, e conseqüentemente, afetando a locomoção em linha reta.

Os componentes de alimentação (bateria e pilhas) foram acomodados na parte de baixo da plataforma, juntos aos motores, de forma a melhorar o equilíbrio, e liberar um espaço considerável para montar os componentes na parte de cima.

Após a montagem, o processo de ligação dos componentes exigiu um pouco de conhecimento em elétrica, já que era preciso realizar a ligação das placas na alimentação, e logo depois, ligar a alimentação das placas nos componentes. Este processo exigiu cautela nas conexões, para evitar mau contato ou curto-circuito, e também algum dano ou quebra.

Com todos os componentes ligados, foi inserido o algoritmo reativo no Arduíno para analisar o comportamento. Com isso, foram identificadas características nos componentes que fizeram necessários alguns ajustes no algoritmo.

O principal problema observado com o teste da plataforma é a diferença de rotação dos motores, comprometendo a locomoção em linha reta. Isso pode ocorrer devido a problemas no redutor do motor - um conjunto de engrenagens acopladas na cabeça do motor, que faz com que o motor transmita ao eixo maior potência, porém, menor velocidade -, ou por problemas nos contatos do motor ou até na própria ponte h. Para resolver este problema foi necessário configurar no algoritmo uma diferença de potência nos motores, a fim de igualar a rotação.

Além da diferença de rotação, os motores ficaram inertes quando acionados com potências de 0 a 50, e problemas no acionamento com valores entre 50 e 90. Para evitar este problema, foi programado no algoritmo uma função de “partida” dos motores, onde ao receber o comando “andar”, o robô consiga sair da inércia. Esta partida consiste em atribuir potência máxima aos motores (255) gradativamente, e em seguida, diminuir a velocidade gradativamente até a velocidade desejada para locomoção. Esse processo demora cerca de 500ms, sendo imperceptível para uma pessoa, porém extremamente necessário para o bom desempenho dos motores, fazendo o robô iniciar a locomoção sem problemas.

A função de leitura do sensor ultrassônico também precisou ser configurada, pois esse tipo de sensor envolve um processo de leitura com demora de aproximadamente 1s, portanto o algoritmo precisa aguardar 1s para receber a leitura do sensor, e então continuar a execução.

Foi utilizado um algoritmo genético para controle. No caso do indivíduo de 5 genes, o primeiro gene é responsável pelo controle de velocidade dos motores do robô. Este controle foi implementado por uma variável inteira com limites de 0 para parado e 255 para a velocidade total dos motores. A questão é que quando o robô está parado, seu momento de inércia faz com que a velocidade necessária para movimentar o robô seja de 130. Sendo assim

o indivíduo considera este valor como o mínimo justamente porque o robô está parado quando começa sua avaliação.

O segundo gene é responsável por dizer a distância considerada crítica para um objeto identificado pelo robô. Este gene é um valor inteiro que varia de 20 a 60 representando os centímetros de distância entre o objeto e o robô. Esta distância é importante pois o sensor possui um tempo de processamento e, se o objeto for considerado apenas muito próximo ao robô, poderá haver um grande número de colisões.

O terceiro gene é responsável por quanto o robô vira após encontrar um objeto. Os valores da variável inteira variam de 200 a 550. Estes valores representam os milissegundos que o robô irá executar o procedimento de virar. O valor de 200 milissegundos irá resultar em uma movimentação de 90 graus e o valor de 550 irá resultar em uma movimentação de 180 graus. O lado considerado para virar é configurado pelo gene seguinte onde o valor 0 representa virar para esquerda e 1 virar para a direita. O último gene é responsável por dizer de quantos em quantos graus uma leitura do sensor de ultrassom é considerada. Como descrito anteriormente o sensor de ultrassom faz uma varredura de 180 graus na frente do robô. Ele pode considerar a medida de obstáculos com intervalo determinado. Portanto, este gene de valor inteiro entre 20 e 90 irá dizer de quantos em quantos graus a medida será considerada.

A população é um conjunto de indivíduos de 5 valores inteiros gerados de forma aleatória utilizando a função `rand` da biblioteca padrão da linguagem C no programa desenvolvido para teste, e pela função correspondente da linguagem de programação do Arduíno. Os valores da geração foram limitados aos valores máximos e mínimos que cada variável poderia assumir como descrito na parte que descreveu o indivíduo.

O cruzamento de valores inteiros e reais é um pouco mais complexo que o cruzamento de números binários. Existem várias formas de fazer o cruzamento, porém devido à influência final apresentada nos genes a média foi escolhida. A média dos valores irá promover uma modificação nos genes que não é muito abrupta e também não é tão simples a ponto de ser ignorada.

Existem dois tipos de cruzamento: o cruzamento com elitismo irá ordenar o vetor de indivíduos para obter o melhor indivíduo e depois cruzá-lo com todos os outros, um a um, respeitando a taxa de cruzamento pré-definida. O indivíduo gerado toma o lugar do indivíduo

que cruzou com o melhor. Este procedimento leva a uma rápida convergência; o segundo tipo desconsidera o elitismo e cruza indivíduos apenas uma vez entre si, um a um. Neste caso o indivíduo gerado toma o lugar do primeiro indivíduo e um indivíduo aleatório é inserido no lugar do segundo indivíduo para aumentar a variabilidade genética.

A mutação foi implementada como uma consideração de 80 a 90% do valor inicial do gene do indivíduo. Para cada indivíduo, cada um de seus genes é mutado de acordo com a taxa de mutação pré-estabelecida no algoritmo, e caso seja selecionado, o gene perde de 10 a 20% de seu valor original.

A função de avaliação é onde os comandos dos sensores e atuadores serão captados e enviados. Foi desenvolvido uma função que limita o tempo de cada indivíduo, passando para o próximo em seguida. Dentro desta função, o algoritmo calcula o tempo de operação do indivíduo e a quantidade de batidas que os sensores captaram, onde a cada fim de execução de um indivíduo, o algoritmo calcula o fitness com base nesses números. O cálculo do fitness é realizado segundo a equação descrita abaixo:

$$Fitness = tempo\ andando - (tempoParado + (número\ de\ colisões * correção))$$

Onde, *tempoAndando* corresponde ao tempo em que o robô se manteve andando, *tempoParado* é o tempo em que o robô não se movimentou, *numeroColisoes* é o número de colisões que o robô sofreu e a correção é um valor definido no algoritmo para ser o multiplicador das colisões, uma vez que *tempoAndando* e *tempoParado* trabalham com números inteiros acima de 1000, é necessário multiplicar as colisões por 1000 para obter valores mais significativos ao cálculo.

Este algoritmo tornou o robô capaz de andar e avaliar seu modo de agir. Após a avaliação, modificações eram feitas pelo próprio algoritmo de controle e o robô melhorava seu desempenho A Tabela 1 mostra as diferenças entre o algoritmo de controle feito pelos autores e o resultado do algoritmo.

Tabela 1 – Resultados do algoritmo de controle

PARÂMETRO	REATIVO	FITNESS RUIM	FITNESS MÉDIO	FITNESS BOM
Distância dos obstáculos	35cm	28cm	42cm	47cm
Velocidade	150	250	189	180
Tempo de desvio	200ms	339ms	265ms	488ms

Considerações Finais

A análise apresentada sobre os dispositivos de robótica educacional demonstra que ainda hoje é um desafio construir um robô educacional eficiente devido ao grande número de dispositivos disponíveis e também a todos os componentes necessários. Os modelos apresentados mostram que é possível construir robôs de baixo custo utilizando soluções como Arduino e PIC em países onde a importação de hardware com maior poder de processamento pode acarretar em valores proibitivos. Mesmo considerando os pontos da análise é importante salientar que a melhor arquitetura sempre dependerá do problema a ser resolvido pelo robô e do custo máximo disponível para a construção da plataforma.

O protótipo de braço robótico pôde ser construído considerando um custo final aceitável como demonstrado pela Tabela II. Esta configuração apresentou um erro baixo se mostrando uma boa alternativa para a construção de protótipos para estudo e desenvolvimento de pesquisas por se tratar de uma plataforma barata e acessível. A facilidade de programação também sugere que pode ser utilizada como ferramenta educacional em diversos níveis acadêmicos. O controlador Arduino foi robusto e não apresentou problemas em controlar o dispositivo, sendo que o consumo de energia poderia ser feito tanto pela USB quanto por um conjunto de 4 pilhas AA.

Tabela II – Custo do protótipo de braço robótico

Componente	Preço Unidade	Quantidade	Valor
Braço robótico	R\$ 30,00	1	R\$ 30,00
Arduino	R\$ 70,00	1	R\$ 70,00
Servomotor	R\$ 9,90	1	R\$ 9,90
		Total	139,90

O segundo experimento apresentou um desenvolvimento de um algoritmo mais complexo para controle de uma plataforma robótica em forma de carro. O algoritmo evolutivo foi programado para que o robô configurasse seus sensores ao explorar o ambiente e então fosse capaz de se locomover sem colidir com objetos. Devido aos componentes de baixo custo (como descrito na Tabela III) a precisão de sensores e atuadores ficou levemente comprometida, porém este fator não comprometeu a execução do algoritmo que conseguiu controlar o robô corretamente.

Tabela III – Custo do robô móvel autônomo desenvolvido para o segundo experimento

Componente	Preço Unidade	Quantidade	Valor
Plataforma	R\$ 30,00	1	R\$ 30,00
Arduíno	R\$ 39,00	1	R\$ 39,00
Motores	R\$ 8,00	2	R\$ 16,00
Ponte H	R\$ 24,00	1	R\$ 24,00
Sensor Ultrassom	R\$ 8,00	1	R\$ 8,00
Servo Motor	R\$ 12,50	1	R\$ 12,50
		Total	129,50

O algoritmo evolutivo mostrou-se promissor com este tipo de plataforma, porém, alguns ajustes serão necessários para uma melhora significativa do desempenho. Novamente, o controlador Arduíno apresentou resultados satisfatórios mesmo sendo uma versão mais simples em comparação ao experimento anterior e executando um algoritmo mais complexo.

Portanto é possível afirmar que atualmente a robótica educacional se beneficia dos baixos custos de controladores e componentes e, desta forma, está presente em vários níveis educacionais de vários países independentemente da condição econômica. Baseando-se nas pesquisas e resultados de experimentos é possível concluir que o Arduíno é um controlador robusto para robótica educacional proporcionando a construção de plataformas tanto para ensino como para pesquisas na área de robótica.

Referências

BIGHETTI, J. A. **Navegação de robôs em ambientes internos usando SLAM**. 2011. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2011.

CIELNIAK, G.; BELLOTTO, N.; DUCKETT, T. Integrating mobile robotics and vision with undergraduate computer science. **IEEE Transactions on Education**, v. 56, n. 1, p. 48-53, 2012.

CRAIG, J. **Introduction to Robotics**. São Paulo: Pearson Education, 2006.

DONCIEUX, S. et al. Evolutionary Robotics: exploring new horizons. **New Horizons of Evolutionary Robotics**. Springer, p. 3-25, 2011.

HEINEN, M.; OSÓRIO, F.. Evolving Morphologies and Gaits of Physically Realistic Simulated Robots. In: ACM SAC - Intelligent Robotic Systems (ROBOT) Track, 2009, Honolulu, Hawaii. **Anais do 2009 ACM SYMPOSIUM ON APPLIED COMPUTING**. Nova York. ACM - Association for Computing Machinery, v. 2. p. 1161-1165, 2009.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 2. ed. São Paulo: Brasport, 2008.

MATARIC, M. J. **Introdução à Robótica**. São Paulo: Unesp, 2014.

ROSARIO, J. M. **Robótica Industrial I**. São Paulo: Baraúna, 2010.

SIEGWART, R; NOURBAKHSI, I. **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2004.

SILVA, F. R.; ESTECA, A. M. N.; DIAS, M. A. An analysis of educational robots design. In: WORKSHOP OF ROBOTICS IN EDUCATION, Conferências de Robótica, 6., 2015 Uberlândia.

SIMÕES, E. do V. **Development of an embedded evolutionary controller to enable collision free navigation of a population of autonomous mobile robots**. 2000. 289 p. Tese (Doutorado em Engenharia Eletrônica) - Universidade de Kent, Canterbury, 2000.

WOLF, D. F. et al.. **Robótica móvel inteligente: da simulação às aplicações no mundo real**. Minicurso: Jornada de Atualização em Informática (JAI), Congresso da SBC. 2009.

ZILLI, S. do R. **A robótica educacional no Ensino Fundamental: perspectivas e prática**. 2004. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.