



RODRIGO OTÁVIO NARVÁEZ MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO
COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE ACOPLADO A UMA
PLATAFORMA MÓVEL AUTÔNOMA**

LAVRAS - MG

2020

RODRIGO OTÁVIO NARVÁEZ MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM TRÊS GRAUS
DE LIBERDADE ACOPLADO A UMA PLATAFORMA MÓVEL AUTÔNOMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras como parte das
exigências do Curso de Engenharia de Controle
e Automação, para a obtenção do título de
Bacharel.

Prof. Dr. Leonardo Silveira Paiva
Orientador

LAVRAS - MG
2020

RODRIGO OTÁVIO NARVÁEZ MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM TRÊS GRAUS
DE LIBERDADE ACOPLADO A UMA PLATAFORMA MÓVEL AUTÔNOMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras como parte das
exigências do Curso de Engenharia de Controle
e Automação, para a obtenção do título de
Bacharel.

APROVADO em 30 de junho de 2020.

Prof. Dr. Leonardo Silveira Paiva, UFLA

Prof. Dr. Fábio Domingues de Jesus, UFLA

Prof. Dr. Carlos Renato Borges dos Santos, IFMG

Prof. Dr. Leonardo Silveira Paiva

Orientador

LAVRAS - MG

2020

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me proteger.

A meus pais, Luiz Otávio e Sandra (em memória), irmãos, Felipe e Wolfgang, e madrastra, Luiza, por me apoiarem e me auxiliarem, desde o início, nas minhas escolhas, e me guiarem durante este tortuoso caminho, apesar da saudade diária.

A minha namorada, Nicoli Vilas Boas, por me acompanhar e sempre conceder o apoio necessário para seguir essa jornada.

A meus avós, tios, padrinhos e madrinhas por darem o apoio necessário e sempre torcerem por mim.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia e ao Departamento de Automática, e a todos os professores e técnicos que me ensinaram, instruíram e contribuíram para a formação do profissional que me torno hoje.

Ao meu orientador Dr. Leonardo Silveira Paiva, pela orientação, paciência, confiança e disponibilidade em me auxiliar em mais essa etapa.

Ao professor Dr. Fábio Domingues de Jesus pelo auxílio e disponibilização do material para impressão de protótipos em 3D.

Aos meus grandes amigos que conheci em Lavras, e cultivei ao longo dos últimos cinco anos, dentro e fora da universidade, com os quais compartilhei incontáveis experiências e que sempre me torcem por mim.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram em minha jornada durante a graduação.

Muito obrigado!

RESUMO

Devido à crescente demanda da produção por produtos agrícolas, a automação agroindustrial tornou-se importante ferramenta para a melhoria de processos nas mais diversas áreas da engenharia. Os manipuladores robóticos são peças fundamentais para implementação de sistemas automatizados, e estão presentes em inúmeras configurações, para diversas modalidades de atuação. A partir do esboço, estruturou-se este trabalho com a finalidade de desenvolver um manipulador robótico com três graus de liberdade do tipo esférico, acoplado a uma plataforma móvel autônoma com o intuito de atender certas atividades agrícolas em ambientes devidamente projetados. Posteriormente, realizou-se a comunicação sem fio entre ambiente e robô, e testou o pleno funcionamento do sistema. Como ferramentas para desenvolvimento do manipulador, utilizou-se o *Software* Matlab e sua *toolbox* destinada à manipuladores robóticos, e o algoritmo de geração de rotas P.R.M. Os resultados apresentados como forma de artigo científico, fazem uma análise da atuação do manipulador robótico desenvolvido em irrigação de lavouras, e demonstram sua versatilidade para atender diversos ambientes agrícolas.

Palavras-chave: Automação agroindustrial, Manipulador robótico, Plataforma móvel autônoma, Mapeamento probabilístico de rotas.

ABSTRACT

Due to the growing demand for production of agricultural products, agro-industrial automation has become an important tool for improving processes in diverse engineering areas. Robotic manipulators are fundamental tools for the implementation of automated systems, and are present in several configurations, for different types of actions. Based on the outline, this work was structured with the purpose of developing a spherical robotic manipulator with three degrees of freedom, coupled to an autonomous mobile platform in order to meet certain agricultural activities in properly designed environments. Subsequently, wireless communication between the environment and the robot was carried out, and the system was fully tested. As tools for robot development, the *Matlab software* and its *toolbox* for robotic manipulators, and the P.R.M algorithm were used. The results presented as a scientific article, analyzing the manipulator developed about irrigation and demonstrate its versatility to serve different agricultural environments.

Keywords: Agro-industrial automation, Robotic manipulator, Autonomous mobile platform, Probabilistic route mapping.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	7
INTRODUÇÃO GERAL	7
1 INTRODUÇÃO	7
2 REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1 Robótica	8
2.1.1 Robôs	9
2.1.2 Robótica Estática	9
2.1.3 Robótica Móvel	9
2.2 Anatomia dos Manipuladores Robóticos	10
2.3 A Robótica na Agricultura	11
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	12
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
SEGUNDA PARTE	15
ARTIGO	15

PRIMEIRA PARTE

INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso foi projetar e construir um manipulador robótico com três graus de liberdade, acoplado sobre uma plataforma móvel autônoma, para desempenhar a automação de ambientes agrícolas de pequeno porte.

A finalidade do trabalho foi utilizar técnicas de robótica estática e móvel para desenvolver equipamentos eletrônicos autônomos com capacidade de atuação em diferentes ambientes agrícolas de pequeno porte. Para tal, fez-se necessário a utilização de ferramentas computacionais e *softwares* robustos destinados a automação, como o Matlab e sua *toolbox* para manipuladores robóticos e o algoritmo de geração de rotas *Probabilistic Road Map* (PRM).

Este trabalho foi desenvolvido no formato de artigo científico, sendo dividido em duas partes:

A primeira parte é composta por:

- 1) Uma Introdução, contendo os objetivos do trabalho e sua organização;
- 2) Um Referencial Teórico, contendo uma contextualização dos assuntos abordados no artigo;
- 3) E Considerações Finais, contendo uma breve análise dos resultados obtidos com a realização deste trabalho.

A segunda parte é composta por um artigo científico que descreve e analisa todo o processo do trabalho. O artigo será publicado em um periódico a definir pelo autor e pelo orientador.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Robótica

Robótica é o ramo da tecnologia formado pelo conjunto de ciência e técnica que envolve a criação, a construção e a utilização de robôs (DICIONÁRIO MICHAELIS 2020). Seu estudo engloba áreas de mecânica, eletrônica e computação, além de teorias de controle e inteligência artificial (PIMENTA, 2009). O estudo de suas técnicas é essencial para a evolução dos robôs e aplicação de técnicas de aprendizado de máquina. Atualmente, a robótica se divide em duas vertentes: Robótica estática e Robótica móvel.

A ideia de construir robôs iniciou-se do início do século XX através dos ideais de George Devol, mundialmente conhecido como o pai da robótica. Devido a capacidade de trabalho e poder de desenvolvimento e aperfeiçoamento, os robôs estão sendo aplicados a cada vez mais ambientes, para a aplicação em inúmeras atividades (MODELIX ROBOTICS, 2020). O primeiro robô fabricado em massa, para atender as demandas de produção da indústria foi o robô Unimate (Figura 01), um manipulador robótico com três graus de liberdade, do tipo cilíndrico, criado em 1954 por George Devol.



Figura 01. Robô Unimate.

Fonte: História da Robótica (2012).

2.1.1 Robôs

A palavra *Robô* tem origem da palavra tcheca *Robota*, que significa “trabalho forçado”. Robôs, são dispositivos eletromecânicos ou biomecânicos capazes de realizar trabalhos de maneira autônoma, pré-programada ou através de controle humano (PIMENTA, 2009). Por princípio os robôs interagem com o meio físico respeitando as Leis de Asimov¹ (WINFIELD, 2010):

- 1º Lei: Um robô não pode ferir um ser humano ou, por omissão, permitir que um ser humano sofra algum mal;

- 2º Lei: Um robô deve obedecer às ordens que lhe sejam dadas por seres humanos, exceto nos casos em que tais ordens contrariem a Primeira Lei;

- 3º Lei: Um robô deve proteger sua própria existência desde que tal proteção não entre em conflito com as Primeira e Segunda Leis.

2.1.2 Robótica Estática

O foco da robótica estática ou fixa é o estudo e desenvolvimento dos manipuladores robóticos, robôs fixos a alguma estrutura, que executam determinada ação sem locomover sua base. Tais robôs possuem o corpo articulado e possuem grande versatilidade, para execução de diferentes tarefas (SANTOS, 2004).

2.1.3 Robótica Móvel

Robótica móvel é o ramo da robótica especializado em robôs móveis, ou seja, robôs que não são fixados a alguma estrutura, são livres para se locomover por meio de rodas, asas, hélices

¹ Escritor de Ficção Científica Issac Asimov (1920-1992), elaborada em seu livro de *ficção I, Robot* (“Eu, Robô”) o comportamento dos robôs (Leis da Robótica).

ou pernas. Atualmente, existem robôs móveis capazes de se deslocar de forma autônoma e inteligente, sem necessidade de algum auxílio humano, como exemplo os RMAs (Robôs móveis Autônomos) e os veículos autônomos inteligentes (WOLF, 2009). A Figura 02 apresenta alguns exemplos de robôs móveis disponíveis no mercado.



Figura 02. Exemplos de robôs móveis.

Fonte: *Robótica Móvel inteligente*, WOLF, Denis Fernando (2009).

2.2 Anatomia dos Manipuladores Robóticos

Os manipuladores robóticos são compostos por uma base, *links* e um *end-effector*. A base é responsável pela fixação do manipulador e geralmente é alocada como o referencial do sistema, ou seja, o referencial fixo da base. Os *links* são formados por elementos denominados elos, e são conectados entre si por juntas que realizam os movimentos relativos, que por sua vez, estão acoplados aos atuadores responsáveis pelos movimentos, dotados de uma capacidade

sensorial e instruídos por um sistema de controle. Acoplado à extremidade do último elo encontra-se o *end-effector*, elemento que está diretamente ligado a algum tipo de garra ou ferramenta, responsável por realizar uma determinada tarefa exigida pelo sistema (PIMENTA, 2009). A Figura 03 ilustra a anatomia de um manipulador robótico.

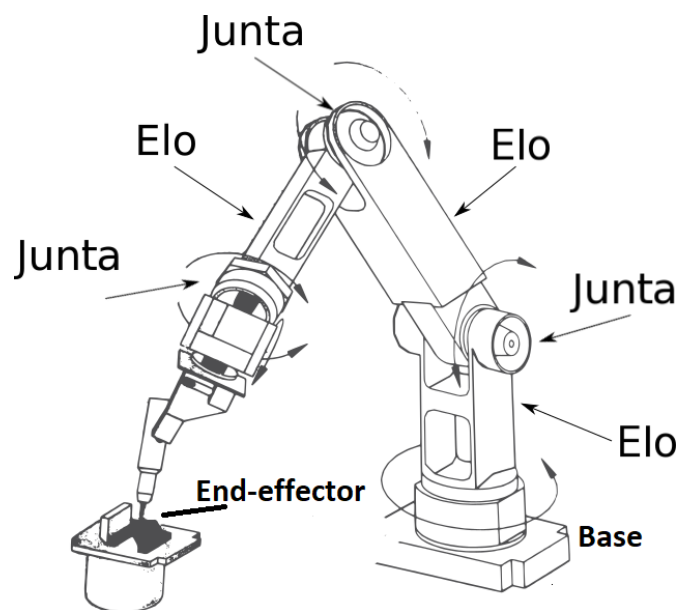


Figura 03. Anatomia de um manipulador robótico.

Fonte: Autor.

2.3 A Robótica na Agricultura de Precisão

“A Agricultura de Precisão deve ser vista como o conjunto de tecnologias e procedimentos utilizados para que o sistema de produção agrícola seja otimizado, tendo como elemento chave, o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e de fatores relacionados” (TABILE, 2011) (MOLIN, 2001). Diante do atual conceito de se obter técnicas agrícolas mais precisas, a qual buscam atender as necessidades de cultivos de maneiras personalizadas, as aplicações da robótica na área agroindustrial tornaram-se muito importantes. Para atender tais necessidades

agrícolas, necessitam-se ferramentas de automação e robótica adequadas para o trabalho em lavouras (TORRES, 2013).

A robotização agrícola iniciou-se com a implementação de tratores inteligentes e mecanizados (KISE et al, 2002), em sequência, vieram as plataformas móveis e os manipuladores robóticos (BAKKER et al, 2010). Atualmente, existem inúmeros veículos, plataformas e robôs autônomos de precisão próprios para o trabalho agrícola, porém, tais ferramentas automáticas ainda possuem elevado custo, e são de difícil acesso para pequenas lavouras.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho constatou a veracidade dos conceitos de robótica básica para a criação de robôs, desde simples manipuladores até robôs humanoides, e a eficácia do algoritmo de geração de rotas PRM em determinar variadas rotas de menor custo ao longo de ambientes repletos de obstáculos. Demonstrou também a eficácia da utilização de robôs autônomos de baixo custo na realização de tarefas e demandas constantes de ambientes agrícolas de pequeno porte.

Como sugestão para futuros trabalhos:

- 1) Melhorar a robustez do manipulador desenvolvido, a partir da utilização de técnicas industriais de usinagem de peças, a fim de aumentar sua capacidade de carga e velocidade de execução de tarefas, além de implementar a programação ONLINE do manipulador construído.
- 2) Inserir outros manipuladores robóticos e plataformas autônomas no mesmo ambiente de cultura, para possibilitar a realização de diversas tarefas simultaneamente e explorar os conceitos de comunicação V-To-V (*Vehicle-To-Vehicle*), entre diferentes robôs.

- 3) Implementar uma plataforma supervisorio com sistema de banco de dados para gerir e controlar todos os robôs do ambiente de cultura de maneira autônoma e eficiente.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asimov, I., Guest commentary: The Three Laws, *Compute! Magazine*, Vol 18 No 3, pp 18, November 1981

Asimov, I., Runaround, *Astounding Science Fiction*, 1942. Reprinted in *I, Robot*, Gnome Press, 1950.

BAKKER, Tijmen et al. Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 2, p. 63-73, 2010.

BODEN, Margaret et al. Principles of robotics: regulating robots in the real world. **Connection Science**, v. 29, n. 2, p. 124-129, 2017.

Clarke, R., Asimov's Laws of Robotics: Implication for Information Technology, *IEEE Computer* Vol 26 No 12 (December 1993) pp 53-61 and Vol 27 No 1 (January 1994) , pp 57-66.

Kise, M.; Noguchi, N.; Ishii, K.; Terão, H. (2002) "The Development of the Autonomous Tractor with Steerin Controller Applied by Otimal Control". Proceeding of the Automation Technology for Off-Road Equipment. Chicago-IL, 367-373p.

MODELIX ROBOTICS, Robótica educacional (2020). Disponível em: < <https://www.modelix.com.br/> >.

MOLIN, J. P. Agricultura de Precisão - O Gerenciamento da Variabilidade. Piracicaba, 2001. v. 1.

Pimenta, Thiago Tavares. CONTROLE DE MANIPULADORES ROBÓTICOS. 2009. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – PUC. Rio de Janeiro.

SANTOS, Vítor MF. Robótica Industrial. **Universidade de Aveito-Departamento de Engenharia Mecânica**, 2004.

TABILE, Rubens Andre; INAMASU, Ricardo Y.; PORTO, Arthur José Vieira. Robótica na agricultura de precisão. **Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2011.

TORRES, Clayton José et al. Estudio cinemático de una plataforma robótica para agricultura. **REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)**, v. 2, n. 22, 2013.

WINFIELD, Alan; HALVERSON, Mark. Artificial Intelligence and Autonomous Systems: Why Principles Matter.

Wolf, Denis Fernando, et al. "Robótica móvel inteligente: Da simulação às aplicações no mundo real." *Mini-Curso: Jornada de Atualização em Informática (JAI), Congresso da SBC*. sn, 2009.

SEGUNDA PARTE
ARTIGO

**ARTIGO – DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM
TRÊS GRAUS DE LIBERDADE ACOPLADO A UMA PLATAFORMA MÓVEL
AUTÔNOMA**

Desenvolvimento de um Manipulador Robótico com três graus de liberdade acoplado a uma Plataforma Móvel Autônoma

Rodrigo Otávio Narváez Medeiros*

**rodrigo.nmedeiros19@gmail.com*

Universidade Federal de Lavras - Campus Universitário, CEP 37200-000 • Lavras/MG

Resumo: Nas últimas décadas a automação agroindustrial tornou-se importante ferramenta para a melhoria de processos nas mais diversas áreas da engenharia. Os manipuladores robóticos são peças fundamentais para implementação de sistemas automatizados, e estão presentes em inúmeras configurações, para diversas modalidades de atuação. Neste trabalho, foi desenvolvido um manipulador robótico com três graus de liberdade do tipo esférico, acoplado a uma plataforma móvel autônoma, cuja aplicação é entender os mais diversos ambientes agrícolas, como lavouras de hortaliças, para projetar sistemas de irrigação. Primeiramente, construiu-se um ambiente de cultura baseado em uma lavoura de pequeno porte e coletou-se informações úteis através do sensoriamento. Em seguida, desenvolveu-se e construiu-se o manipulador robótico de modo a atender as exigências do ambiente de cultura. Posteriormente, realizou-se a comunicação sem fio entre ambiente e robô, e testou o pleno funcionamento do sistema. Como ferramentas para desenvolvimento do manipulador, utilizou-se o *Software* Matlab e sua *toolbox* destinada à manipuladores robóticos, e o algoritmo de geração de rotas P.R.M. A programação de atuação do manipulador foi realizada através do micro controlador Arduino e seu ambiente de programação.

Palavras-chaves: Automação agroindustrial. Manipulador Robótico. Plataforma móvel autônoma. Mapeamento probabilístico de rotas.

1. INTRODUÇÃO

Por definição (DICIONÁRIO MICHAELIS 2020), robótica é o conjunto de ciência e técnica que envolve a criação, a construção e a utilização de robôs. Seu estudo engloba áreas de mecânica, eletrônica e computação, além de teorias de controle, microeletrônica e inteligência artificial. Devido ao crescente estudo sobre este tema, robôs cada vez mais robustos, tecnológicos e confiáveis para a realização de ações humanas são projetados e desenvolvidos ao redor do mundo.

Manipuladores robóticos são amplamente utilizados para diversas aplicações da indústria e agricultura, são equipamentos eletromecânicos dotados de sistemas embarcados e pré-programados. Sua finalidade varia desde um simples movimento de um objeto até a confecção e montagem de equipamentos complexos. Para tais tarefas ocorrerem, faz-se necessário o estudo de técnicas de modelagem, controle e ferramentas de otimização sobre robôs manipuladores, de modo a garantir execução de processos de maneira segura, eficiente, rápida e a baixo custo.

Acoplar estes manipuladores robóticos a plataformas móveis autônomas tornou-se uma alternativa bastante viável para aplicações que demandam percorrer grandes distâncias, como exemplos, lavouras e plantações. Essas plataformas permitem ao manipulador percorrer trechos automaticamente, além de possibilitar atender várias tarefas idênticas ou variadas em diferentes locais, tais como, controle de umidade, colheita e plantio em ambientes de cultura.

Neste trabalho foi projetado e construído um manipulador robótico com três graus de

liberdade, do tipo esférico, que posteriormente, foi acoplado sobre uma plataforma robótica móvel autônoma. Sua finalidade será promover o controle de umidade de uma cultura em um ambiente fictício mapeado e construído para testes. A temática deste trabalho fundamenta-se na crescente demanda de aumento na produção de alimentos, e a escassez de equipamentos inteligentes para execução de tarefas agrícolas em ambientes de cultura de pequeno porte.

2. PRESSUPOSTOS TEÓRICOS

2.1. Manipuladores Robóticos

Manipuladores robóticos são sistemas mecânicos compostos por elos, juntas e atuadores utilizados para movimentar ferramentas e peças entre pontos ou seguindo trajetórias, Romano e Dutra (2002).

Os elos são os elementos estruturais do manipulador que devem apresentar rigidez calculada para garantir uma precisão adequada do sistema. As juntas conectam os elos e são responsáveis pelo número de graus de liberdade do sistema, que pode ser do tipo rotacional (R) ou prismático (P), Allgayer (2011).

Geralmente os manipuladores robóticos são definidos como sistemas de controle em malha aberta. De acordo com Gomes da Silva (2000), após a aplicação de um sinal de controle pré-determinado aos atuadores do robô, espera-se que a variável controlada (posição dos links) atinja um valor ou comportamento já esperado. Neste tipo de controle não são utilizados sensores e transdutores de monitoramento do processo, ou seja, o sinal de controle não é calculado a partir de uma medição do

sinal de saída, é um sinal de valor pré-determinado de acordo com os parâmetros da cinemática direta para o manipulador em questão.

Os manipuladores robóticos industriais podem ser classificados em dois grandes grupos: Cadeia aberta e cadeia fechada. Robô de cadeia cinemática aberta apresenta apenas um único caminho numa sequência *elo-junta-elo* para se chegar da base até o *End-Effector*, já um robô de cadeia fechada apresenta dois ou mais caminhos possíveis de se chegar ao *End-Effector* partindo-se da base, Bonilla (2004).

2.2. Classificação Geométrica dos Manipuladores Robóticos de Cadeia Aberta

Segundo Riascos (2010), existem diversos tipos de manipuladores robóticos de acordo com sua estrutura cinemática, sendo possível ajusta-los para qualquer tipo de trabalho. São classificados como:

- **Cartesiano (P.P.P)** – Possui três de suas juntas principais do tipo prismático, que formam um paralelepípedo como volume de trabalho. Sua capacidade de atingir diferentes orientações e de aproximação aos objetos é restrita. É amplamente utilizado na movimentação de cargas e em montagens;

- **Cilíndrico (R.P.P)** – Possui duas de suas juntas principais do tipo cartesiano e sua base móvel do tipo rotacional. Seu volume de trabalho consiste de um cilindro vazado. É normalmente utilizado no acesso a superfícies horizontais;

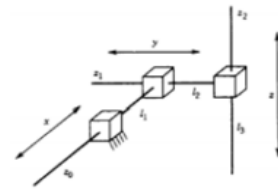
- **Esférico ou Polar (R.R.P)** – Possui duas de suas juntas principais do tipo rotacional e uma junta do tipo prismático. Seu envelope possui formato esférico, sendo recomendado para uma vasta gama de aplicações, necessitando-se apenas de pequenos ajustes;

- **Articulado ou Antropomórfico (R.R.R)** – É o manipulador robótico que mais se assemelha a um braço humano, possui suas juntas principais do tipo rotacional. Este modelo é o mais utilizado na indústria devido à sua grande destreza e flexibilidade de aplicação.

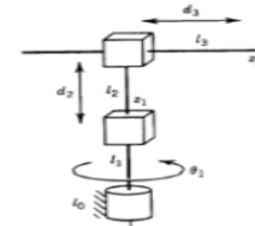
- **Scara (R.R.P)** – Acrônimo para *Selective Compliance Assembly Robot Arm*, este robô possui duas de suas juntas principais do tipo rotacional e uma do tipo prismático, porém, suas articulações são horizontais, e seus três eixos z_0 , z_1 e z_2 são todos verticais e paralelos. É amplamente utilizado na indústria de componentes eletrônicos.

Tabela 1. Classificação dos Manipuladores Robóticos de acordo com sua estrutura cinemática

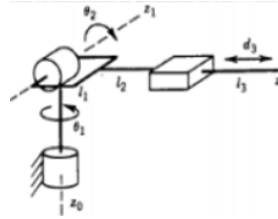
Cartesiano



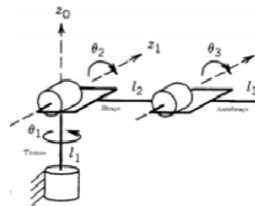
Cilíndrico



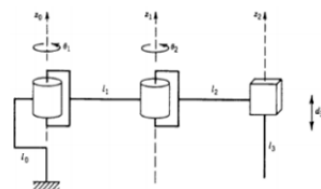
Esférico



Articulado



Scara



2.3. Graus de Liberdade (DOF – Degrees of Freedom)

Grau de liberdade é a denominação dada aos movimentos exercidos pelas juntas e base do manipulador no espaço bidimensional e tridimensional, Pimenta (2009).

Cada junta define um ou mais graus de liberdade, portanto a quantidade de graus de liberdade do manipulador é igual ao somatório dos graus de liberdade de suas n juntas, como demonstrado na Equação 2.1:

$$DOF = \sum_{i=1}^n f_i \quad (2.1)$$

Onde:

- n – Número de juntas do manipulador;
- f_i – Número de graus de liberdade da junta.

2.4. Evolução dos Manipuladores Robóticos

- **Robô Unimate** – Desenvolvido pelo americano George Devol, patenteado em 1954 e produzido pela Controls Corp, subsidiária do grupo Condec aos comandos de Joseph Engelberger, considerado o pai da robótica. O Unimate foi o primeiro robô industrial produzido em larga escala para automação industrial. De constituição simples, o manipulador era formado por três graus de liberdade, sua base rotacional podia rotacionar 360°, o segundo link efetuava uma movimentação vertical, enquanto o terceiro link, de constituição prismática, proporciona ao Unimate uma série de movimentos e aplicações distintas para o manipulador. Nas décadas de 1960 e 1970 diversas multinacionais, principalmente do ramo automobilístico, tais como: General Motors Company, BMW, Volvo, Fiat e Mercedes Benz, equiparam suas fábricas com os manipuladores robóticos Unimate para substituir cargos fabris considerados desagradáveis e perigosos humanos. (<robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm> acesso em 2 de março de 2020);

- **Manipulador de Stanford** – Desenvolvido entre as décadas de 60 e 70 pela Universidade de Stanford (E.U.A). Possui seis graus de liberdade, sendo os três primeiros no corpo, do tipo R-R-P, e os três últimos no punho (“*End-Effector*”), todos rotacionais. Devido a terceira junta ser do tipo prismática, confere-se a este manipulador a geometria de um robô esférico;

- **Robô Flex-Picker** – Fabricado pela empresa ABB, líder mundial em fornecimento de robôs industriais, o FlexPicker é constituído de três graus de liberdade e punho rotacional. Foi idealizado para aplicações precisas, que demandam alta precisão, seu exoesqueleto é similar à uma aranha, o que lhe confere alta flexibilidade e alcance em 360°. É programado por um *software* de gerenciamento de linhas de produção baseado em algoritmos de processamento de imagem e controle de movimentação em tempo real;

- **Linha ABB-IRB** – A linha de manipuladores industriais IRB, fornecida pela empresa ABB, possui manipuladores de seis a dezoito graus de liberdade, especializados em inúmeras atividades e dotados de *softwares* baseados em algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina (*Machine Learning*). Assim como a linha IRB, os manipuladores modernos são constituídos de materiais ultra resistentes e possuem estrutura similar a exoesqueletos de humanos e animais, fato que implica em alta flexibilidade e eficiência para inúmeras aplicações com perfeição.

2.5. Cinemática de Manipuladores

A cinemática de um manipulador é a linha de estudo sobre o conjunto de relações entre posição e deslocamento sofridos pelos elos através das juntas. Para definir o controle correto de um manipulador é necessário primeiramente, conhecer e calcular alguns conceitos cruciais sobre a cinemática de manipuladores. Nos próximos tópicos alguns destes conceitos serão analisados.

2.5.1. Transformações Homogêneas

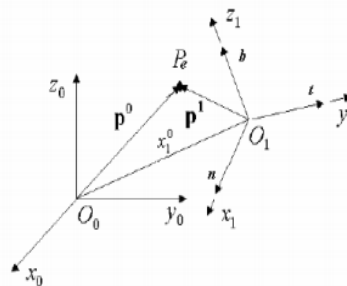


Figura 01. Representação de um ponto em diferentes sistemas de coordenadas.

Fonte: *Controle de Manipuladores Robóticos*, PIMENTA, Thiago Tavares (2009).

Segundo Pimenta (2009), conhecer a cinemática espacial é fundamental para determinar a posição de um dado ponto no espaço de acordo com um determinado referencial.

No sistema representado pela figura acima, observa-se duas diferentes possibilidades para se representar o ponto da extremidade $P_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix}$: Em

relação à origem O_0 , no sistema de coordenadas x_0, y_0, z_0 , como vetor p^0 . E em relação à origem O_1 , no sistema de coordenadas x_1, y_1, z_1 , como vetor p^1 . Ambos representam o ponto p_e , porém em sistemas e valores diferentes. Para efetuar cálculos entre diferentes pontos, é necessário partir do mesmo referencial para representar todos os pontos.

As identificações \mathbf{n} , \mathbf{t} , \mathbf{b} da Figura 01, representam as coordenadas x_1, y_1, z_1 no sistema de coordenadas de x_0, y_0, z_0 . Portanto, são os vetores de módulo unitários nas direções dos eixos x_1, y_1, z_1 , respectivamente, e ortogonais entre si. Estes três vetores formam a Matriz de Orientação (R).

O vetor x_i^0 indica a distância entre a origem O_1 e a origem O_0 no referencial da origem O_0 . Analogamente, o vetor x_i^{i-1} indica a distância entre a origem O_i e a origem O_{i-1} no sistema de coordenadas de O_{i-1} .

2.5.2. Cinemática Direta

Cinemática Direta, como definido por Zwrites. R (2004. P.20), é a descrição dos movimentos e coordenadas executadas pelo

manipulador a partir das coordenadas de posição das juntas até o *End-Effector* como ponto final do sistema. O primeiro passo para descrever a Cinemática Direta de um manipulador é determinar a posição e orientação de seu último elo em relação à base. Encontra-se então uma relação final entre a extremidade com seu referencial da base, a origem (O_i).

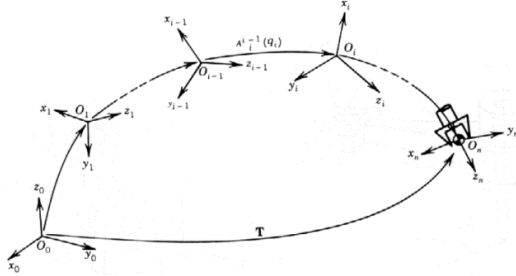


Figura 02. Representação do sentido da cinemática direta.

Fonte: *Controle de Manipuladores Robóticos*, PIMENTA, Thiago Tavares (2009).

$$T = A_1^0(q_1).A_2^1(q_2).A_3^2(q_3). \dots A_n^{n-1}(q_n); \quad (2.2)$$

T é a matriz representativa da posição da extremidade referente ao sistema de coordenadas da origem ($T^T = [x_e \ y \ z_e \ 1]$).

As operações de translação e rotação são definidas com base na multiplicação de matrizes com o vetor T^T . Tais matrizes são:

$$\text{Matriz de Translação} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Nota-se que a matriz de translação representa as operações nos eixos 'x', 'y' e 'z'.

$$\begin{aligned} &\text{Matriz de Rotação em 'x'} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\text{sen}(\alpha) & 0 \\ 0 & \text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Matriz de Rotação em 'y'} \\ &= \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \text{sen}(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Matriz de Rotação em 'z'} \\ &= \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\text{sen}(\gamma) & 0 & 0 \\ \text{sen}(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6) \end{aligned}$$

Em que 'x', 'y' e 'z' representam os deslocamentos lineares dos links e 'α', 'β' e 'γ' representam os deslocamentos angulares das juntas.

2.5.3. Cinemática Inversa

De acordo com Zwrites. R (2004. P.25), ao contrário da Cinemática Direta, a Cinemática Inversa é a descrição dos movimentos e coordenadas executadas pelo manipulador a partir das coordenadas de posição do *End-Effector* e tem como saída os possíveis ângulos ou deslocamentos das juntas para se obter a posição do "*End-Effector*". Ou seja, determinar os movimentos das juntas que se adequam a uma dada configuração no envelope de trabalho.

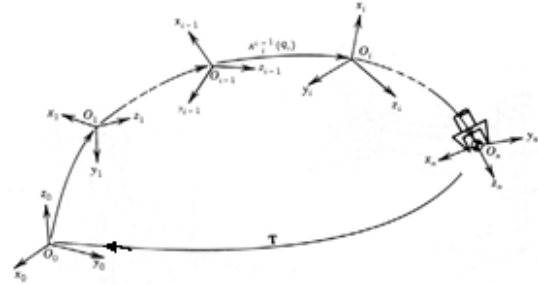


Figura 03. Representação do sentido da cinemática inversa.

Fonte: *Controle de Manipuladores Robóticos*, PIMENTA, Thiago Tavares (2009).

O conhecimento da Cinemática Inversa é essencial para a manipulação e controle pleno de um manipulador robótico. Por se tratar de cálculos complexos, os cálculos são realizados através de softwares numéricos.

2.6. O Algoritmo PRM (Probabilistic Roadmap)

Algoritmos de otimização para determinação de trajetórias são utilizados em robótica para determinar coordenadas no ambiente de navegação que sirvam como pontos de guinada (*waypoints*) para o robô realizar trajetórias de mínimo custo e livres de impactos (Siciliano, 2006). Existem diversos tipos de algoritmos de otimização disponíveis para geração de trajetórias, tais como: Algoritmos baseados em Lógica Fuzzy e Redes Neurais, *A* - estrela*, *Backpropagation*, entre outros.

Segundo R. Kala (2014), o Algoritmo PRM é responsável por gerar o caminho de menor custo (distância) entre dois pontos distintos. Tal algoritmo utiliza uma Grade de ocupação (Binary Occupancy Grid) sobre uma determinada imagem em extensão 'bpm' (Bitmap – mapa de bits), que atribui o valor um para pixels já ocupados, e zero para pixels livres. Portanto, para traçar o caminho de menor custo a ser utilizado para movimentação de plataformas móveis autônomas o PRM deve utilizar os pixels com valor zero.

Para utilização correta do algoritmo, deve-se mapear o ambiente onde será utilizado, através da criação de imagem em extensão 'bpm', em seguida, deve-se definir as coordenadas de partida e chegada. O algoritmo utiliza coordenadas bidimensionais do

plano cartesiano, portanto, as posições devem ser inseridas no formato “(y, x)”, em que ‘y’ e ‘x’ indicam os pixels nos eixos ‘y’ e ‘x’ da imagem, respectivamente (R. Kala, 2014).

Após entrada dos dados necessários, o algoritmo “bombardeia” a porção de pixels livres da imagem com nós (pontos sobre a imagem) aleatoriamente. A partir dos nós, são gerados todos os possíveis caminhos através destes nós, e o algoritmo realiza sua etapa de aprendizado sobre os caminhos gerados. Por último, é retornado o caminho de menor distância encontrado pelo algoritmo e uma matriz contendo as coordenadas de todos os nós que fazem parte do caminho gerado (R. Kala, 2014).

3. METODOLOGIA

Iniciou-se o desenvolvimento do manipulador robótico a partir da idealização do projeto de seus componentes (juntas, elos, base e garra) *no Software* de desenhos em três dimensões *Solid-Works*. Ao todo foram projetadas onze peças.

O primeiro grau de liberdade encontra-se na base, projetada em duas peças, para proporcionar movimento rotacional em 360° ao longo do eixo de coordenadas ‘z’. O segundo grau de liberdade rotacional foi projetado para ocorrer o primeiro e segundo elos, ao longo do eixo ‘y’. O terceiro grau de liberdade foi projetado com junta do tipo prismático, a fim de proporcionar o prolongamento do link. Para atuação como *End-Effector* projetou-se uma garra simples, formada por três peças, que possui apenas finalidade estética. As peças foram impressas em impressora 3D, com filamento de plástico do tipo ABS branco.

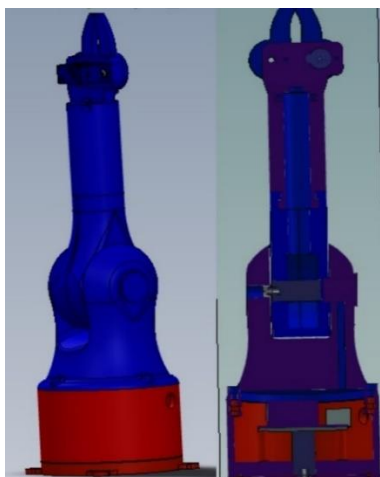


Figura 04. Vistas frontal e corte transversal do projeto do manipulador.

¹ Microcontrolador dedicado para aplicações em eletrônica.

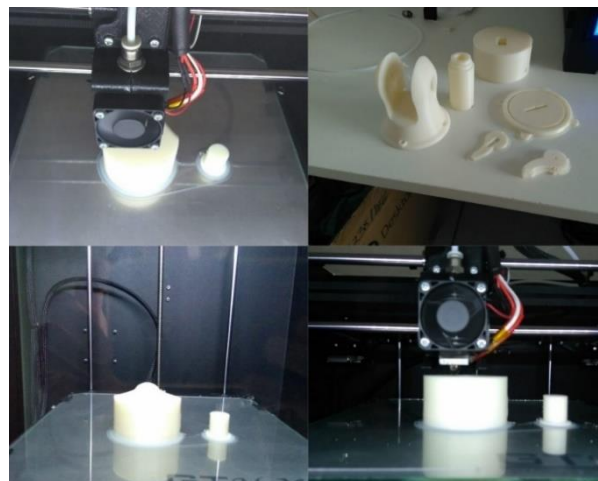


Figura 05. Impressão das peças em 3D.

Para funcionamento e programação do manipulador, utilizou-se os seguintes componentes eletrônicos:

- **Arduino UNO¹**: Programado para controle dos movimentos do manipulador e comunicação com o ambiente de cultura montado para testes, utilizou-se o mesmo Arduino UNO para controle do manipulador e plataforma móvel;
- **Módulo Bluetooth HC-06**: Compartilhado com a plataforma móvel e utilizado para realizar a comunicação entre o computador e a plataforma com o manipulador;
- **Três micros Servo motores SG90**: Responsáveis por proporcionar os movimentos rotacionais das juntas e elos, além de movimentar a garra projetada;
- **Motor DC PN13LB**: Responsável por movimentar o link prismático;
- **Ponte H L298N**: Utilizada como driver de controle do motor DC;
- **Protoboard**: Utilizada para realizar as conexões entre os componentes eletrônicos sem necessidade de solda;
- **Jumpers²**: Utilizados para prover as conexões entre componentes e *Protoboard*;
- **Bateria 9 Volts**: Necessária para alimentação do conjunto eletrônico;
- **Peças impressas em plástico ABS**: Peças para montagem do manipulador robótico;
- **Componentes plásticos, parafusos e porcas**: Componentes necessários para criação e montagem do grau de liberdade do tipo prismático.

O esquemático de conexões elétricas e o manipulador construído, com todos os componentes encontram-se nas Figuras 06 e 07:

² Cabos elétricos especiais para ligações de pequenos componentes eletrônicos.

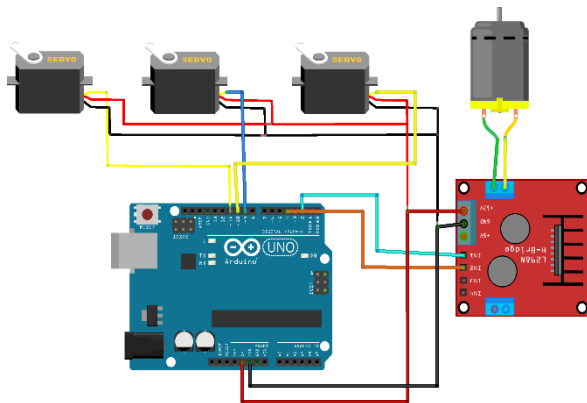


Figura 06. Esquemático de montagem dos componentes eletrônicos.



Figura 07. Manipulador construído fixado sobre a plataforma móvel.

O terceiro grau de liberdade, composto por um Link prismático, é constituído de um parafuso do tipo rosca sem fim acoplado a um cilindro de plástico, que se movimenta através de uma chaveira por dentro do “braço” cilíndrico do manipulador (extensão cilíndrica entre o terceiro link e o “*End-Effector*”). Todo o conjunto foi acoplado ao eixo do motor DC, fixado internamente ao manipulador construído.

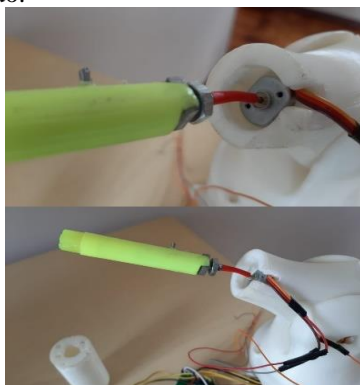


Figura 08. Montagem do Link Prismático.

3.1. Montagem do Ambiente de Simulação

A partir do mapeamento de um ambiente de cultura agrícola fictício, construiu-se uma pista para simulação e testes com o manipulador acoplado à base móvel, com dimensões de 245 X 245 centímetros.



Figura 09. Pista para simulações.

Os nove quadrados, de dimensões 35X35 cm, contidos no interior da pista simulam canteiros para criação de uma possível cultura.

Com auxílio de software de desenho, criou-se uma imagem virtual do ambiente de simulação em extensão ‘bmp’ (bitmap – mapa de bits), a ser utilizada para aplicação do algoritmo PRM. A imagem criada possui resolução de 1225X1225 pixels, ou seja, cinco pixels na imagem correspondem a um centímetro na pista real.

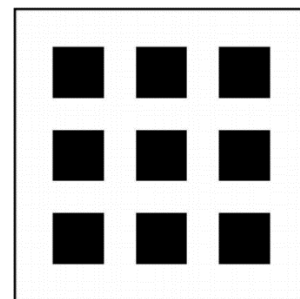


Figura 10. Imagem virtual do ambiente de simulação em extensão ‘bmp’.

3.2. Validação do Algoritmo PRM

A validação do algoritmo PRM no ambiente de simulação é importante para garantir que não haja nenhum erro de sintaxe ou na lógica do algoritmo. Para tal, foram realizados três diferentes testes com diferentes posições inicial e final da trajetória, e alguns obstáculos sobre a pista. Os testes e seus resultados são apresentados abaixo.

Teste 1: A posição inicial foi definida nas coordenadas 1158 em ‘y’, e 273 em ‘x’. A posição final foi estabelecida como 448 no eixo ‘y’ e 623 no eixo ‘x’. Foram realizados dois casos, variando-se o número de nós.

Tabela 2. Casos 1 e 2 e respectivas quantidades de nós para o Teste 1

Caso	Número de nós	Tempo de execução (s)	Distância (cm)
1	100	12,08	183,182
2	200	40,89	177,942

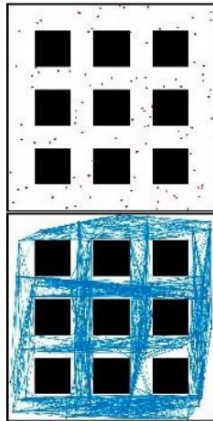


Figura 11. Etapas de “bombardeamento” e aprendizado do caso 1 para o Teste 1.

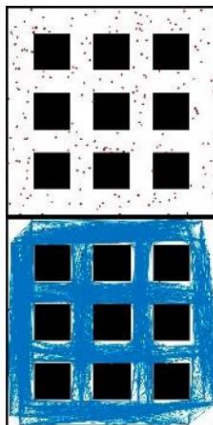


Figura 12. Etapas de “bombardeamento” e aprendizado do caso 2 para o Teste 1.

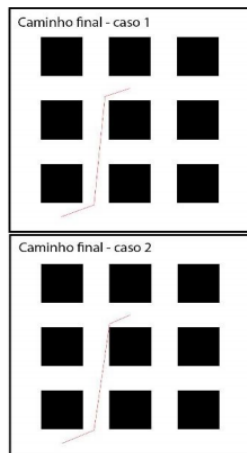


Figura 13. Caminhos finais gerados nos casos 1 e 2 para o Teste 1.

Teste 2: As posições inicial e final ('y', 'x') foram alteradas para (1158, 973) e (273, 88) respectivamente, e foram acrescentados alguns obstáculos no ambiente. Foram realizados dois casos, variando-se o número de nós.

Tabela 3. Casos 1 e 2 e respectivas quantidades de nós para o Teste 2

Caso	Número de nós	Tempo de execução (s)	Distância (cm)
1	100	18,49	318,08
2	200	63,44	298,52

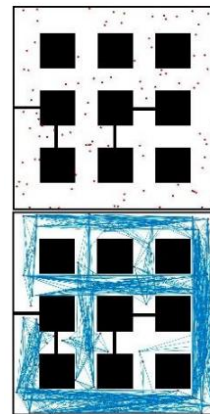


Figura 14. Etapas de “bombardeamento” e aprendizado do caso 1 para o Teste 2.

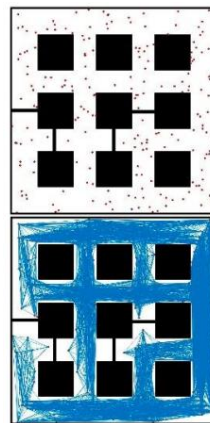


Figura 15. Etapas de “bombardeamento” e aprendizado do caso 2 para o Teste 2.

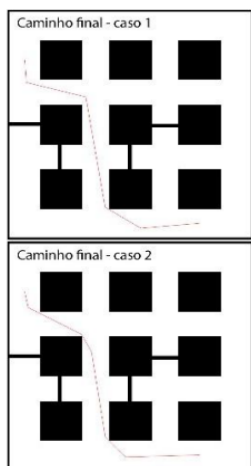


Figura 16. Caminhos finais gerados nos casos 1 e 2 para o Teste 2.

Teste 3: As posições inicial e final ('y', 'x') foram mantidas em (1158, 973) e (273, 88) respectivamente, e foram acrescentados alguns obstáculos no ambiente de maneira que fosse impossível o algoritmo traçar um caminho entre os pontos inicial e final.

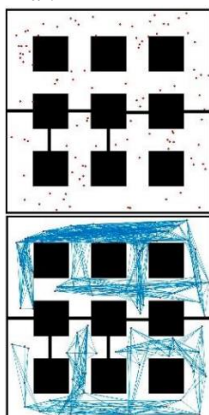


Figura 17. Etapas de “bombardeamento” e aprendizado para o Teste 3.

Como o esperado, não foi gerado nenhum caminho entre os pontos inicial e final. Os testes realizados comprovam a eficácia do algoritmo PRM para aplicação no ambiente de simulação construído.

3.3. Instalação de sensores no Ambiente de Simulação

Para automatização do projeto, instalou-se os determinados componentes no ambiente de simulação:

- **Arduino Mega³:** Optou-se pelo *Arduino Mega* devido ao grande número de pinos analógicos para receberem dados de todos os sensores;
- **Módulo sensor de umidade de solo LM393:** Escolheu-se este sensor para realizar a leitura dos

níveis de umidade do solo para determinada cultura agrícola;

- **Notebook:** Para pleno funcionamento do sistema, fez-se necessário a implementação de um *hardware* com *software* Matlab instalado.

Os sensores foram alocados dentro dos nove quadrados internos da pista, a 13 centímetros de distância da extremidade inferior de cada quadrado. Foram devidamente colocados dentro de copos plásticos contendo terra úmida, para simular um solo úmido. Para simular um solo seco, os sensores são retirados dos copos.



Figura 18. Ambiente de simulação com os sensores de umidade devidamente montados.

Quando for detectado pelo *software* a presença de solo seco (sensor fora do copo), a plataforma móvel é direcionada até o local onde determinado sensor com leitura de solo seco se encontra. Após o posicionamento da plataforma móvel próxima ao sensor, o manipulador robótico se movimenta com o objetivo de alcançar o sensor, como simulação de irrigação ao solo seco, e irá voltar ao seu estado de repouso após o solo obter umidade ideal. A plataforma móvel será liberada para se locomover novamente após o manipulador voltar ao repouso.

3.4. Monitoramento do Ambiente de Cultura

Devido a programação e aplicação do algoritmo PRM no *Software* MATLAB, o Arduino presente na pista de testes foi programado através do MATLAB, por meio da *toolbox* “ArduinoIO”.

A fim de simplificar a programação e comunicação entre o ambiente de cultura e o *Software* MATLAB, fez-se as seguintes considerações:

- A base móvel, com o manipulador montado sobre ela, é considerada de frente para a direita sempre que estiver parada;
- Para cada sensor, existe apenas uma posição possível para a plataforma móvel estacionar, como demonstrado na Figura 19:

³ Micro controlador com grande quantidade de conexões, dedicado para aplicações em eletrônica.

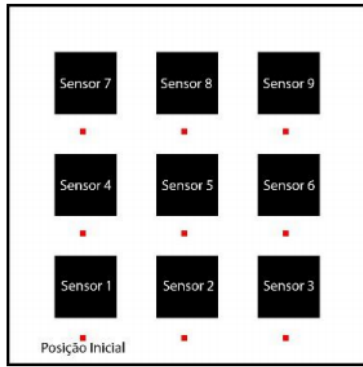


Figura 19. Posicionamento da plataforma móvel com manipulador abaixo dos sensores.

Feitas as considerações iniciais, os códigos foram desenvolvidos através do *software* Matlab, e são apresentados a seguir:

- **Função “ESCLIN.m”:** Recebe os valores inicial e final de determinada escala, os valores inicial e final da nova escala, e a variável a ser escalonada. Após definidas as entradas, faz o escalonamento desta variável e a retorna na nova escala;

- **Função “PosiçãoSensor.m”:** Recebe um valor numeral referente a um sensor e retorna suas coordenadas ‘x’ e ‘y’, de acordo com o posicionamento de cada sensor;

- **Função “PRM.m”:** Recebe as coordenadas iniciais e finais do caminho desejado como parâmetro. Retorna a imagem do caminho e a matriz “path”, com 2 colunas, que representam as coordenadas em ‘y’ e em ‘x’ dos nós gerados ao longo do trajeto;

- **Função “Caminho.m”:** Recebe a matriz “path” gerada pela função “PRM.m” e retorna os vetores “distâncias”, “ângulos” e “sinal”. O vetor “distâncias” é preenchido com as distâncias em linha reta que deverão ser percorridas pela plataforma móvel. O vetor “ângulos” é preenchido com os ângulos que a plataforma deve fazer antes de percorrer cada distância em linha reta. E o vetor “sinal” apresenta a posição ‘x’ do vetor “ângulos” multiplicada por -1, caso tal posição for negativa, caso contrário, o vetor “ângulos” não sofre alteração;

- **Função “VaiParaSensor.m”:** Recebe o sensor para qual a plataforma deve-se locomover e suas coordenadas atuais. Como resposta, a função retorna as coordenadas da nova posição da plataforma;

- **Código “Amain.m”:** É o arquivo principal da leitura dos sensores da pista. Nele, são definidos os parâmetros de umidade ideal (50%) e umidade baixa

(20%), caso a umidade esteja abaixo de 20%, a plataforma deve ir até o sensor, e o manipulador entrará em ação até que a umidade volte a atingir 50%. Após o manipulador completar a ação, ele retorna a sua posição inicial de repouso e permite que a plataforma possa se mover novamente.

3.5. Definição de parâmetros para Controle do Manipulador

A fim de se obter o melhor resultado possível referente a atuação do manipulador no Ambiente de Cultura, fez-se necessário descobrir os movimentos angulares e lineares das juntas para que a garra do robô conseguisse alcançar a localização do sensor de temperatura, nos nove quadrados construídos da pista. Para tal, utilizou-se dos conceitos de Cinemática de manipuladores e obteve-se os Parâmetros de Denavit-Hartenberg para o manipulador de três graus de liberdade. Ressalta-se que cada link⁴ se refere a uma junta do manipulador, ou seja, contém um link para cada grau de liberdade.

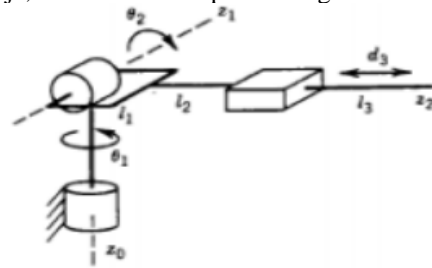


Figura 20. Denotação dos tamanhos dos links e rotações sofridas pelo manipulador.

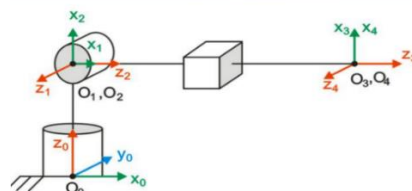
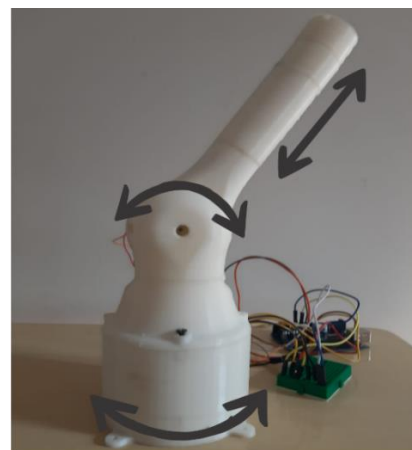


Figura 21. Posicionamento dos eixos e denotação de Denavit-Hartenberg para o manipulador.

⁴ Termo utilizado em robótica para denominar uma ligação do tipo elo-junta-elo.

Tabela 4. Comprimento das Juntas e Elos do Manipulador

Elos	
L1	14 cm
L2	6 cm
L3	10 cm
Deslocamento Máximo da Junta Prismática	
D3	0 a 3,5 cm
Deslocamento Máximo das Juntas Rotacionais	
θ_1	180°
θ_2	120°

Tabela 5. Notação de Denavit-Hartenberg

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
0-1	0	-90°	0	θ_1 variável
1-2	0	90°	L2	θ_2 variável
2-3	0	0	L3 + D3 variável	0

Os ângulos variáveis referentes às juntas rotacionais e a distância variável referente à junta prismática foram definidos de modo a conseguir posicionar o manipulador, a partir do repouso, sobre o sensor de humidade. Para isso, algumas considerações foram necessárias:

- Acoplou-se o manipulador sobre a plataforma móvel, com a frente posicionada no mesmo sentido da frente da plataforma;
- O manipulador sempre inicia e termina seus movimentos em sua posição de repouso, completamente na vertical;
- Adotou-se o posicionamento inicial do conjunto plataforma móvel e manipulador abaixo dos sensores como ponto de referência “zero” das coordenadas ‘x’, ‘y’ e ‘z’ para o manipulador;
- De acordo com as limitações físicas dos servos motores, e limitações construtivas do manipulador, θ_1 varia-se entre 0° e 180°, θ_2 varia-se de 0° a 65°, e D3 é variável de 0 a 3,5 centímetros. Portanto, definiu-se θ_1 variável em 90°, θ_2 variável em 40° e D3 variável em 3,5 centímetros, de modo a obter-se um posicionamento do *End-Effector* favorável à posição dos sensores de humidade;
- Ao executar os movimentos necessários, o manipulador sofre uma rotação de -90° sobre o eixo ‘z’, seguida de uma rotação de -40° sobre o eixo ‘y’, ambas com relação às coordenadas da base.

Após as definições iniciais, foram calculadas as matrizes homogêneas parciais (H_{0-1} , H_{1-2} e H_{2-3}), e total (H_{0-3}), relativas a posição do manipulador:

$$H_{0-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$H_{1-2} = \begin{bmatrix} 0,766 & 0 & 0,643 & 0 \\ 0,643 & 0 & -0,766 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$H_{2-3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 13,500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$H_{0-3} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -6 \\ 0,766 & 0 & 0,643 & 8,678 \\ -0,643 & 0 & 0,766 & 10,342 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

A partir da Matriz de Posição, encontrou-se as coordenadas de chegada da garra (*End-Effector*) com relação ao sistema de coordenadas da base, -6 centímetros em ‘x’, 8,68 centímetros em ‘y’ e 10,34 centímetros em ‘z’. Este ponto de chegada, é o local onde o manipulador irá depositar a água no canteiro, e notou-se que os sensores de humidade, alocados nos quadrados da pista, se encontram próximos ao ponto de chegada da garra.

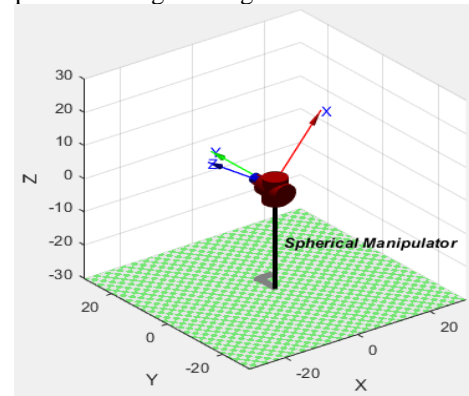


Figura 22. Posicionamento inicial do *End-Effector* com relação às coordenadas da base do manipulador construído.

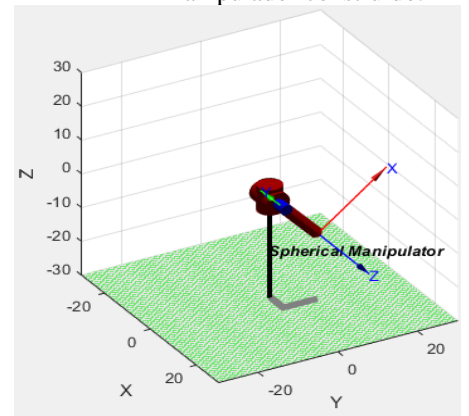


Figura 23. Posicionamento final do *End-Effector* com relação às coordenadas da base do manipulador construído.

3.6. Comunicação e Controle do Manipulador Construído

A realização da comunicação entre o Arduino UNO, alocado no carrinho com o manipulador montado, e o *Software* Matlab, instalado no computador (central de comando para o ambiente de cultura montado), foi realizada com auxílio do módulo de comunicação via *Bluetooth* 2.0 HC-06 (módulo já montado e compartilhado com a base móvel). Tal módulo utiliza a comunicação serial presente na placa Arduino UNO, nos pinos RX e TX.

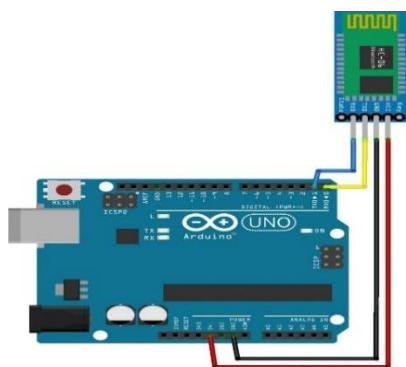


Figura 24. Ligação entre módulo *bluetooth* HC-06 e Placa Arduino UNO.

A comunicação para controle é representada na Figura 25:

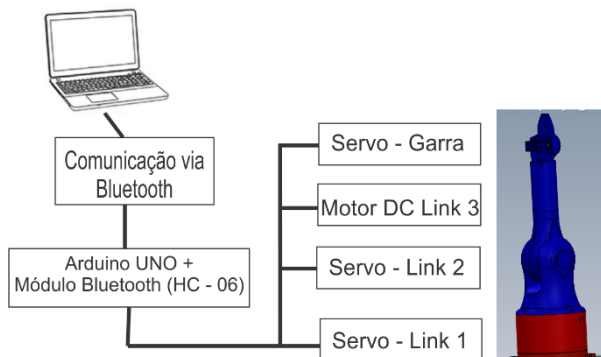


Figura 25. Comunicação entre o *Software* Matlab e o Arduino UNO montado na plataforma móvel.

O controle dos servos foi realizado a partir do sinal de controle, de cinco volts. Ao enviar o comando de acionamento dos servos, o Arduino emite um sinal de controle durante a movimentação do servo. O servo, por sua vez, incrementa ângulo a ângulo desde sua posição inicial (ângulo zero) até obter o ângulo requerido. Atingida a posição desejada, o sinal de controle é levado a zero volts, e permanece assim até o comando para realização do próximo movimento.

Este sinal de controle para os servos motor é realizado por largura modulada de pulso (P.W.M – *Pulse Width Modulation*). A variação da largura de pulso é responsável por definir a posição desejada do rotor do servo motor. Portanto, para modificar a

posição do servo, é necessário alterar a largura do pulso do sinal de tensão emitido, ou seja, variar o *Duty Cycle*. O período do sinal é de 50 Hz (20 milissegundos – 100% de *Duty Cycle*), a largura de pulso de um milissegundo marca uma das extremidades do servo (posição 0°), enquanto um pulso de dois milissegundos de largura marca a outra extremidade (posição 180°). Para o atingir as posições exatas requeridas de 90° para o primeiro Link e 40° para o segundo link, a largura de pulso P.W.M para realização do controle foi ajustada pelo micro controlador para os Links 1 e 2 em respectivamente, 1,50 milissegundos (7,5% de *Duty Cycle*) e 1,22 milissegundos (6,1% de *Duty Cycle*).

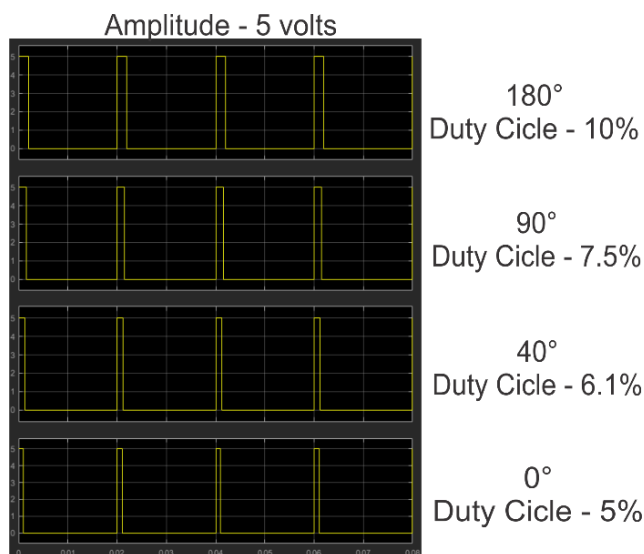


Figura 26. Modulação PWM para diferentes posições do servo motor.

Para o motor DC (Link prismático) o controle foi realizado também por um sinal de cinco volts para acionar o motor, enviado pela Ponte H, então, calculou-se o tempo gasto para o motor em funcionamento esticar o Link (300 milissegundos), após obtenção da distância desejada, o sinal de cinco volts para controle é cortado, e o motor aguarda o comando para recolher o Link. Ao requisitar o recolhimento do Link, o sinal de tensão é novamente emitido pela Ponte H, porém, com a polaridade do motor invertida, assim o motor gira em sentido contrário durante 300 milissegundos e recolhe o Link, que retorna para sua posição de repouso.

A programação dos movimentos realizados pelo manipulador foi desenvolvida através da IDE de programação do Arduino UNO, de modo que o manipulador pudesse realizar os movimentos necessários para sair do repouso, executar sua função e retornar ao repouso, como apresentado no fluxograma da Figura 27:

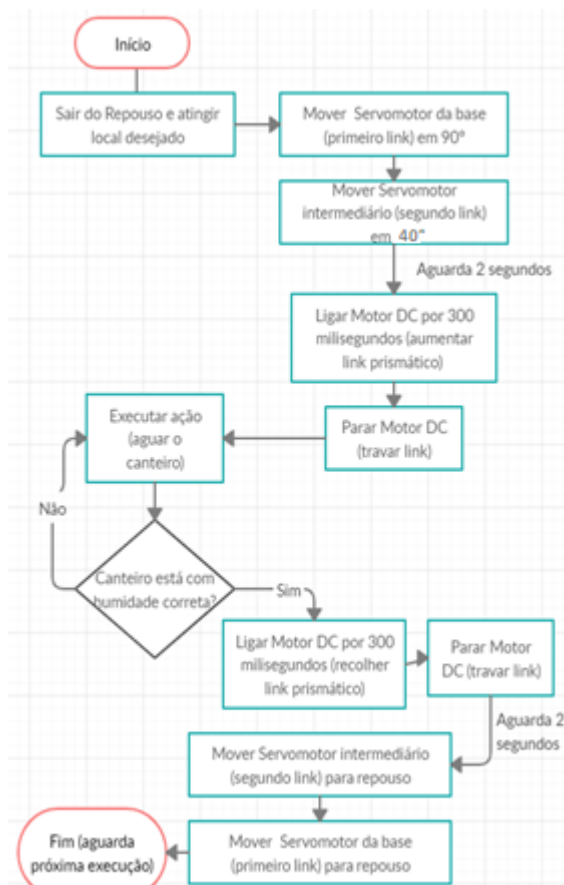


Figura 27. Fluxograma representativo das etapas de funcionamento do manipulador para executar as ações propostas.

O processamento das informações fornecidas pelo ambiente de cultura e posterior envio de comandos para acionamento do manipulador (retirá-lo da posição de repouso e execução das ações propostas) foi realizado através do *Software* Matlab. O fluxograma descrito na Figura 27 foi desenvolvido em código, como parte do código geral para funcionamento do conjunto plataforma móvel com manipulador. Tal código foi gravado no micro controlador Arduino UNO.

O micro controlador do conjunto plataforma e manipulador recebe via *bluetooth* as coordenadas do sensor que necessita de água (coordenadas processadas via Matlab, de acordo com as informações fornecidas pela pista), em seguida, a plataforma se direciona até o local indicado. Assim que a plataforma se posiciona corretamente abaixo do sensor, o manipulador inicia execução de seus movimentos, ou seja, a função relativa ao manipulador programada no micro controlador é executada até que o sensor se estabeleça com os níveis ideais de umidade. Finalmente, o manipulador retorna a sua posição de repouso e aguarda até que sua função seja requerida novamente.

4. ANÁLISE DE DADOS

4.1. Validação do Ambiente de Cultura

Após construção e programação de todos elementos do trabalho, foram realizados testes para validar o pleno funcionamento do sensoramento presente na pista e do tratamento de dados realizado.

- **Teste de Verificação** – Os sensores foram devidamente posicionados na terra úmida, em seguida, executou-se o arquivo “Amain.m” no Matlab. Verificou-se que o valor “zero” foi mostrado na tela, o que indica que todos os sensores estavam com níveis adequados de umidade, como esperado.

Em seguida, o sensor de número 3 foi retirado do solo úmido. Verificou-se que o valor 3 (três) foi mostrado na tela, o que indica que tal sensor estava em local seco, como esperado. Repetiu-se a verificação para todos os nove sensores presentes na pista, e constatou-se o funcionamento adequado de todos.

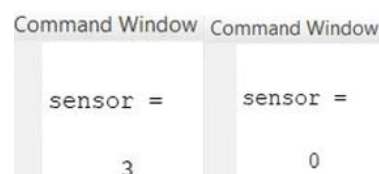


Figura 28. Indicações corretas de funcionamento dos sensores de umidade.

4.2. Validação de Controle do Manipulador

Após verificação de funcionamento da coleta de dados do ambiente de cultura e processamento no Matlab, verificou-se que os caminhos gerados através do algoritmo PRM estavam corretos e que a plataforma móvel conseguia executar com maestria as rotas requisitadas até os sensores que estivessem necessitando aumentar o percentual de umidade. Com a plataforma móvel em funcionamento correto e posicionamento abaixo dos sensores, prosseguiu-se com teste de funcionamento do manipulador construído.

- **Teste de Verificação** – Retirou-se o sensor de número 9 do solo úmido, e executou-se os algoritmos para geração de rota e controle do conjunto plataforma móvel e manipulador. Esperou-se a plataforma móvel atingir a posição de parada abaixo do sensor.

Com a plataforma móvel estática abaixo do sensor 9 (nove), verificou-se que o manipulador foi capaz de mover os três graus de liberdade sem dificuldades desde a posição de repouso até atingir o sensor. Repetiu-se o teste para todos os nove sensores presentes na pista.

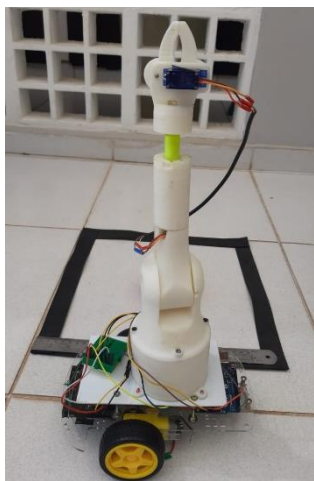


Figura 29. Posicionamento do conjunto manipulador e plataforma móvel em frente a um dos quadrados do ambiente de simulação.

Após execução da bateria de testes ao longo da pista, constatou-se que o manipulador conseguiu executar corretamente os movimentos necessários para sair do repouso, atingir os sensores e retornar ao repouso.

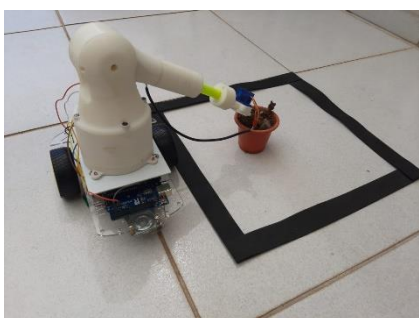


Figura 30. Execução dos comandos de irrigação.

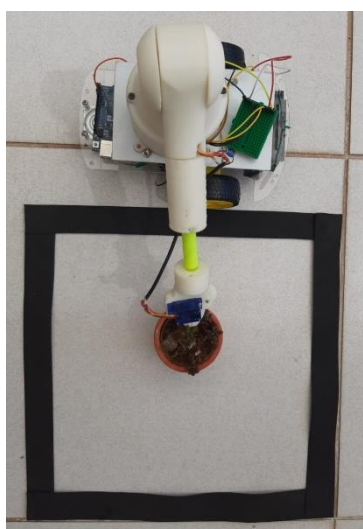


Figura 31. Vista superior da execução dos comandos de irrigação.

Notou-se que após algumas repetições de tarefas, devido ao peso do link prismático, o

manipulador apresentou dificuldade para retornar à posição de repouso depois de efetuar a ação sobre os sensores. Tal problema pode ser facilmente resolvido substituindo-se os servos motores do projeto por servos motores de maior capacidade de peso, o que corrige o problema de peso dos links.

Verificou-se também pequenas divergências entre as posições de chegada do *End-Effector* aos sensores. O *End-Effector* apresentou uma variação de um a quatro centímetros na chegada ao sensor. Essa divergência não atrapalha na escolha do manipulador desenvolvido para trabalho em ambientes de cultura, pois é relativamente pequena e pode não interferir no processo de umidificação do solo.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi demonstrado o desenvolvimento e construção de um manipulador robótico com três graus de liberdade, do tipo RRP para utilização em irrigação de ambientes de cultura. A execução desse trabalho possibilitou explorar conceitos e técnicas básicas de robótica, como cinemática direta e Denavit-Hartenberg, aliadas a utilização dos *softwares* Matlab, para programação e processamento de dados, e *Solid-Works*, para criação e design do manipulador, além do algoritmo de otimização para determinação de rotas de menor custo (PRM).

Em suma, verificou-se a veracidade dos conceitos de robótica básica para criação de robôs, desde simples manipuladores até robôs humanoides. Constatou-se também a eficácia do algoritmo PRM em determinar variadas rotas de menor custo ao longo do ambiente de cultura construído.

Portanto, o manipulador construído é adequado para aplicações em automação agroindustrial de baixo porte, devido a sua fácil construção e baixo custo. Assim, necessita apenas de pequenos ajustes para ser utilizados em diferentes ambientes de cultura, na realização de inúmeras atividades distintas.

Em trabalhos futuros, deseja-se melhorar a robustez e como consequência, aumentar sua capacidade e velocidade de serviço. Os equipamentos eletrônicos poderão ser substituídos por equipamentos mais potentes e o corpo de plástico do manipulador poderá ser construído de materiais mais resistentes.

REFERÊNCIAS

ABB portfólio de robôs industriais. Disponível em: <<https://new.abb.com/products/robotics>>. Acesso em 20 de março de 2020.

Allgayer, Renan Schmidt. Desenvolvimento de um Manipulador Robótico Cilíndrico acionado pneumáticamente. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2011).

Angeles, J. Fundamentals of Mechanical Systems. (2 edn).

Asada, H.H. Rotic. 2.12. Lecture Notes. Mechanical Engineering. (2005).

Bonilla, Aníbal Alexandre Campos. Cinemática diferencial de manipuladores empregando cadeias virtuais. 2004. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

End Effector. Collins Dictionary. Disponível em <<https://www.collinsdictionary.com/pt/dictionary/english/end-effector>>. Acesso em 30 de janeiro de 2020.

Graig, J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control, (2 edn), Mac Graw Hill, (1989).

LAGES, Walter Fetter. PARÂMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.

Meggiolaro, MA. Controle de Sistemas Robóticos. Departamento de Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica – Rio de Janeiro.

OSHA Instruction Publication No. 8-1.3. 1987. *Guideline for Robotics Safety*. Occupational Safety and Health Administration, Washington, D.C.

Pimenta, Thiago Tavares. CONTROLE DE MANIPULADORES ROBÓTICOS. 2009. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – PUC. Rio de Janeiro.

Programação de Servo motores. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/micro-servo-motor-9g-sg90-com-arduino-uno/>>. Acesso em 18 de fevereiro de 2020.

R. Kala (2014) Code for Robot Path Planning using Probabilistic Roadmap, Indian Institute of Information Technology Allahabad, Available at: <http://rkala.in/codes.htm>.

Riascos, Luis A.M. Fundamentos de Robótica: manipuladores e robôs móveis. Ed. Plêiade, São Paulo, 2010.

Robots and their Arms. Disponível em: <<http://infolab.stanford.edu/pub/voy/museum/picture>

<s/display/1-Robot.htm>> . Acesso em 02 de março de 2020.

Romano, V. F.; Dutra, M. S., Introdução à Robótica Industrial. In: Vitor Romano. (Org.). Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos, 1 ed. São Paulo: Edgard Bluncher, pp. 1-19, 2002.

Siciliano, Alexandre de Vasconcelos. Determinação de Trajetória Ótima em Navegação Robótica Móvel, Utilizando Algoritmo Genérico. 2006. Tese (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de pós-graduação em engenharia.

Silva, J. M. G., Controle em Malha Aberta e Malha Fechada. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

UNIMATE, The First Industrial Robot. Disponível em <<https://robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>>. Acesso em 02 de março de 2020.

Zwirtes, R. Cinemática Inversa para Controle da Abordagem de Órgãos Terminais de Robôs Manipuladores. Ciência da Computação. Universidade do estado de Santa Catarina (2004).