



JOSÉ GUILHERME COSTA E BUSTAMANTE

**DESENVOLVIMENTO DE ROBÔ ANTROPOMÓRFICO
PARA VALIDAÇÃO DO TEOREMA DE DENAVIT
HARTENBERG**

LAVRAS – MG

2022

JOSÉ GUILHERME COSTA E BUSTAMANTE

**DESENVOLVIMENTO DE ROBÔ ANTROPOMÓRFICO PARA VALIDAÇÃO DO
TEOREMA DE DENAVIT-HARTENBERG**

Relatório de trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso de Engenharia
de Controle e Automação, para obtenção do título
de Bacharel.

Prof. Dr. Leonardo Silveira Paiva
Orientador

LAVRAS – MG

2022

JOSÉ GUILHERME COSTA E BUSTAMANTE

**DESENVOLVIMENTO DE ROBÔ ANTROPOMÓRFICO PARA VALIDAÇÃO DO
TEOREMA DE DENAVIT-HARTENBERG**

**ANTHROPOMORPHIC ROBOT DEVELOPMENT TO VALIDATE DENAVIT-
HARTENBERG THEOREM**

Relatório de trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Controle e Automação, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Leonardo Silveira Paiva
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

*À minha família,
Por tudo que fizeram para me ajudar a alcançar essa conquista.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe Maristela, por me amparar para as conquistas da vida e dar o seu melhor sempre.

Ao meu pai José Kléber pelo suporte sem medidas e incentivo na conquista deste objetivo e todo apoio durante a minha vida.

À minha irmã Maria Clara por todo companheirismo nos momentos bons e ruins e boas memórias compartilhadas.

À minha namorada Maria Aline, por me apoiar nos momentos em que precisei e sempre me ajudar na conquista dos meus objetivos.

A todos os professores da Universidade Federal de Lavras, principalmente do Departamento de Automática, que moldaram o meu conhecimento técnico de forma excepcional e sempre estiveram disponíveis para ajudar.

Ao meu orientador professor Dr. Leonardo Silveira Paiva, por ter me dado todas as direções, por me incentivar e por ajudar na concepção deste trabalho, além de incentivar os conhecimentos na área de robótica.

Meus agradecimentos a todos familiares que sempre demonstraram interesse na minha formação e incentivaram a buscar o caminho da educação.

E aos colegas que tive a oportunidade de conhecer durante minha jornada na graduação, principalmente o pessoal da Rep Hour, que foram ótimos amigos nesta época corrida da vida e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse possível. Meus agradecimentos!

“É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer.”. (Aristóteles)

RESUMO

A utilização de robôs no meio industrial já se tornou indispensável. À medida que os processos industriais ficaram maiores, mais complexos e a produção em larga escala se tornou vital, foi necessário reformular o método de produção, para obter maior rapidez, precisão e repetibilidade do que era possível com a manufatura. Um dos tipos mais comuns de robô utilizado na indústria é o manipulador articulado, que tem seus membros e links separados por juntas. Essas juntas podem ser rotacionais ou prismáticas, que representam seus Graus de Liberdade e utiliza sua mão robótica, *end-effector*, (parte atuante do manipulador, geralmente garra), para realizar alguma tarefa, como transporte de peças. Com o advento da robótica, surgiram também formulações e parâmetros definidos para padronizar o estudo e desenvolvimento de robôs no geral. Um dos parâmetros definidos no qual este trabalho se baseia são os de Denavit-Hartenberg, que são parâmetros utilizados globalmente para descrever a geometria de um manipulador robótico, necessitando apenas dos seus ângulos e medidas para, a partir disso, ser possível encontrar a posição que as juntas devem alcançar para chegar ao destino final. O trabalho proposto consiste em utilizar o kit de robótica LEGO Mindstorms EV3 para construir um robô manipulador antropomórfico com 3 graus de liberdade e, por meio da simulação e coleta de dados do modelo, analisar e validar os parâmetros de Denavit-Hartenberg.

Palavras-chave: Cinemática; LEGO Mindstorms; Robótica de Manipuladores

ABSTRACT

The utilization of robots in industries have become indispensable. As long as the industrial processes got bigger, complexer and large scale production became vital, it was necessary to reformulate the production method, that needed to be faster, more precise and more repeatability than before, with manufacturing. One of most common types of robots used in industries are the articulated manipulators, that have it's members and links separated by joints. This joints can be rotative or prismatic, that represents the Degrees of Freedom, and uses the end-effector, to perform some task, like move some pieces. With the emergence of robotics, there were also formulations and parameters defined to standardize the study and development of robots in general. One of the parameters defined in which this work is based is Denavit-Hartenberg Parameters, that are utilized globally to describe the geometry of a robotics manipulator, with their angles and measures to, from that, find the position that the joints need to be to reach the Destination. The proposal of this work is to utilize the LEGO Mindstorms EV3 Robotics Kit to build a anthropomorphic manipulator with 3 degrees of freedom and, through simulations and data collect from model, analyse and validate the Denavit-Hartenberg parameters.

Palavras-chave: Kinematics; LEGO Mindstorms; Robotics Manipulator

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Robô NAO	13
Figura 2 - Robô aspirador de pó	13
Figura 3 - Robô YuMi	14
Figura 4 - Sumô de Robôs	15
Figura 5 - Robô na mesa de competição FLL	15
Figura 6 - Futebol de robôs IronCup 2018	16
Figura 7 - Mohawk ROV in Flower Garden Banks National Marine Sanctuary	20
Figura 8 - Caminhão autônomo nível 2 para produção agrícola	21
Figura 9 - Sonda Opportunity exploração Marte	21
Figura 10 - Robô militar Talon	21
Figura 11 - Tipos de Juntas e quantidade de graus de liberdade	23
Figura 12 - Tipos de Robôs e seus espaços de trabalho	23
Figura 13 - Mesa de competição OBR	26
Figura 14 - Mesa de competição FLL	27
Figura 15 - Modalidade Guerra de robôs RoboCore	27
Figura 16 - Robô Kamikaze equipe Tróia 5.5kg	28
Figura 17 - Robô Aquiles equipe Tróia 27,2kg	28
Figura 18 – Competição sumô LEGO	29
Figura 19- Kit de Robótica Lego Mindstorms EV3	30
Figura 20 - Interface LEGO EV3 Home Edition	31
Figura 21 - Robô Unimate	33
Figura 22 - Sistema robótico da Vinci	34
Figura 23 - Manipulador Puma com indicações de elos e juntas	35
Figura 24 – Parâmetros dos elos	37
Figura 25 - Parâmetros do elo e seu vizinho	38
Figura 27 - Manipulador 3GL	42
Figura 28 - Jogos de Engrenagem 12:36 e 8:40	43
Figura 29 - Sequência de movimentos dos motores	45
Figura 30 - Modelo simulado no MATLAB	46
Figura 31 - Espaço de Trabalho do Modelo	46
Figura 31 - Volume de Trabalho do Modelo	47
Figura 33 - Esboço do modelo e suas variáveis	48

Figura 34 - Código no MATLAB para cálculo das matrizes parciais e total	51
Figura 35 - Vista posterior do modelo na posição 1: $\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 45^\circ, \theta_3 = -135^\circ$	52
Figura 36 - Vista superior do modelo na posição determinada	52
Figura 37 - Vista posterior do modelo na posição 2: $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -10^\circ, \theta_3 = -90^\circ$	53
Figura 38 - Vista superior do modelo na posição determinada	53
Figura 39 - Vista posterior do modelo na posição 3: $\theta_1 = 20^\circ, \theta_2 = -31^\circ, \theta_3 = -9,7^\circ$	54
Figura 40 - Vista superior do modelo na posição determinada	54
Figura 41 – Matrizes homogêneas parciais Posição 1	55
Figura 42 - Matriz total Posição 1	56
Figura 43 – Matrizes homogêneas parciais Posição 2	56
Figura 44 - Matriz total Posição 2	56
Figura 45 – Matrizes homogêneas parciais Posição 3	57
Figura 46 - Matriz total posição 3	57
Figura 47 - Coordenadas garra Posição 1	68
Figura 48 - Coordenadas garra Posição 2	68
Figura 49 - Coordenadas garra Posição 3	68
Figura 50 - Papel Milimetrado com Medições	58
Figura 51 - Código Matlab Cinemática Inversa	68
Figura 52 - Ângulos para Posição 1	69
Figura 53 - Ângulos para Posição 2	69
Figura 54 - Ângulos para Posição 3	69
Figura 55 - Código MATLAB Cinemática Inversa	70
Figura 56 - Ângulos inicial e final obtidos para as juntas $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, respectivamente	70

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVO	18
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	ROBÓTICA.....	19
3.2	ROBÓTICA EDUCACIONAL.....	24
3.2.1	Ferramentas de ensino	29
3.3	MANIPULADORES ROBÓTICOS	32
3.4	CINEMÁTICA DE MANIPULADORES	36
3.5	DENAVIT-HARTENBERG	39
3.5.1	Cinemática direta.....	39
3.5.2	Cinemática inversa.....	40
4.	METODOLOGIA.....	42
4.1	CONSTRUÇÃO DO MANIPULADOR.....	42
4.2	PROGRAMAÇÃO	44
4.3	DEFINIÇÃO DO ESPAÇO DE TRABALHO	45
4.4	VOLUME DE TRABALHO	46
4.5	PARAMETRIZAÇÃO	47
4.6	MATRIZES HOMOGÊNEAS PARCIAIS	49
4.7	MATRIZ HOMOGÊNEA TOTAL	49
4.8	EQUAÇÕES CINEMÁTICA INVERSA	50
4.9	VALIDAÇÃO DO MODELO	51
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS	62
	ANEXOS.....	68

1. INTRODUÇÃO

O ser humano sempre buscou facilitar o seu trabalho com auxílio de máquinas. Pode-se observar que isso acontecia desde a antiguidade clássica (300 a 1 A.C.), quando, na Grécia, Heron de Alexandria criou uma máquina capaz de captar energia eólica e transformá-la em trabalho. Também escreveu o livro *Pneumática*, contendo informações sobre engenharia e até invenções robóticas e automáticas, que apenas podiam ser teorizadas. (SILVA, 2015).

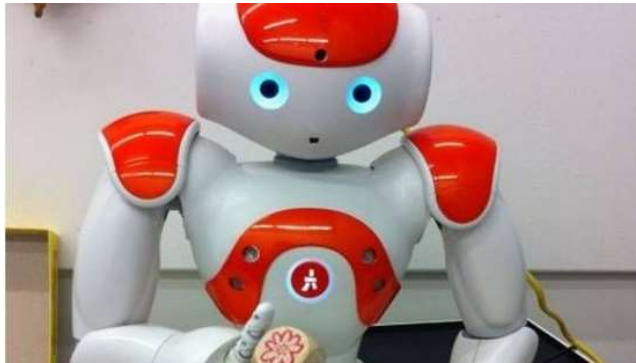
Atualmente, vivencia-se uma época de exponencial crescimento da tecnologia: a indústria 4.0. Uma era de integração das tecnologias de informação e comunicação que permite aos equipamentos trocarem informações com os controladores de uma forma muito mais rápida, possibilitando novos patamares de qualidade, produtividade e gerenciamento, fazendo com que a indústria seja beneficiada por melhores modelos de negócio e estratégias (SACOMANO, 2018).

Já se tornou cotidiano encontrar robôs auxiliando em tarefas básicas, sendo eles:

- Robôs aspiradores, que executam tarefas como varrer e aspirar a casa;
- Robôs Inteligentes, capazes de interagir com as pessoas, executar tarefas como apagar a luz e ligar a televisão, deixando a casa mais confortável e segura;
- Robôs de Lego com programação em blocos, utilizados em salas de aula para o desenvolvimento de habilidades necessárias, como a lógica e programação;
- Robôs capazes de controlar veículos, orientando e deslocando sem que o condutor esteja com as mãos no volante;
- Robôs manipuladores que realizam desde montagem de carros, até cirurgias muito delicadas.

As Figuras 1 2 e 3 são alguns dos tipos de robôs mencionados acima:

Figura 1 - Robô NAO



Fonte: HealthDay (2022)

O robô NAO, da Figura 1, interage com pessoas e está se mostrando eficiente na melhora da comunicação de crianças mais tímidas. Ele também é utilizado em competições de futebol de robôs. Já na Figura 2, um robô aspirador de pó, que auxilia em tarefas domésticas.

Figura 2 - Robô aspirador de pó



Fonte: iRobot (2022)

Por fim a Figura 3, um manipulador construído pela ABB, empresa multinacional do ramo da energia e automação, que pode realizar diversos tipos de tarefas, desde auxiliar em montagens leves em uma linha de produção, a operar uma cafeteira. Ele é utilizado também para estudo da robótica:

Figura 3 - Robô YuMi



Fonte: ENGENHO EDITORA TÉCNICA LTDA (2021)

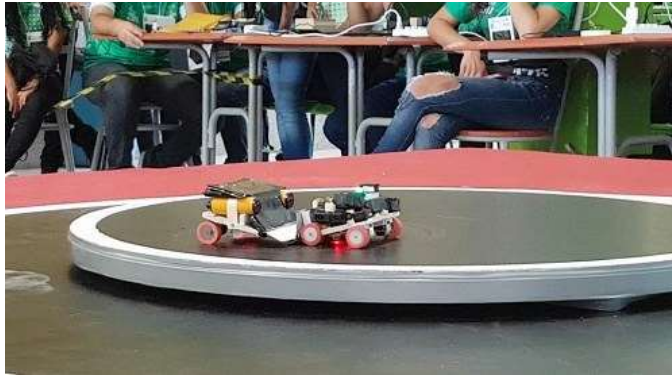
Como pode ser observado, o conceito de robótica atual é muito abrangente. Existem diversas formas e tipos de robôs, cada um designado para sua tarefa específica, o que os tornam consideravelmente importantes em diversos aspectos da vida moderna, desde a manufatura industrial, aos cuidados com a saúde, transporte e exploração do espaço e oceano (SICILIANO, 2008).

Estes fatores indicam a necessidade do estudo destas máquinas autônomas por grande parte da população, pelo menos para saber como utilizá-las da melhor forma (TAJRA, 2001).

Existem muitas formas de aguçar a curiosidade para essa tecnologia. As mais comuns são as competições, que estimulam os estudantes a trabalharem em equipe para resolver problemas complexos de lógica, matemática, engenharia e programação de acordo com seu nível de conhecimento. Esta forma de aprendizado é mais agradável, além de estimular a capacidade de resolver problemas na prática, habilidade muito necessária para um bom profissional da indústria.

As próximas figuras são algumas das competições de robótica, onde os alunos são instigados a realizar tarefas, ou a construir robôs mais resistentes e ágeis para combate com outros robôs. A Figura 4 mostra uma competição conhecida como sumô, onde um robô tem que derrubar o outro do tablado para vencer:

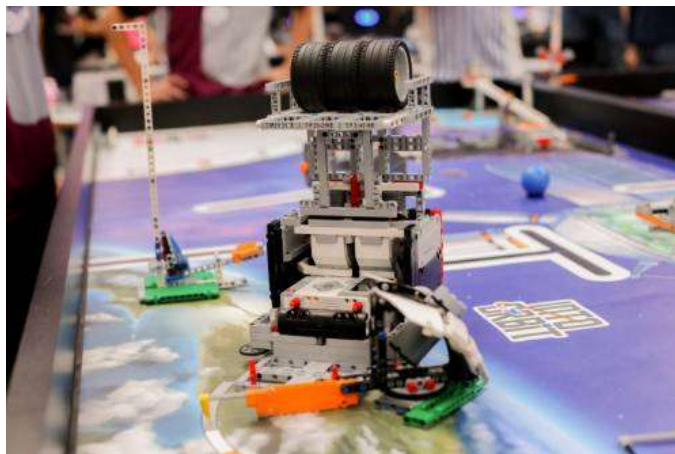
Figura 4 - Sumô de Robôs



Fonte: Rodrigues (2018)

A Figura 5 mostra um robô em cima da mesa de missões da competição *First Lego League*, um campeonato de robótica para estudantes de 10 a 15 anos, presente no Brasil, onde deve-se realizar o maior número de missões em dois minutos e trinta segundos com o modelo construído pela equipe, utilizando somente peças LEGO.

Figura 5 - Robô na mesa de competição FLL



Fonte: JDV (2020)

A Figura 6 mostra uma partida de futebol de robôs, modalidade presente na *IronCup*, uma competição de robótica com diversas modalidades, como guerra de robôs, hockey, futebol, dentre outras.

No futebol de robôs, o objetivo é marcar mais gols no oponente.

Figura 6 - Futebol de robôs IronCup 2018



Fonte: ALMEIDA (2018)

O estudo e desenvolvimento da tecnologia por meio da robótica, no geral, é muito benéfico para os seres humanos. Esse avanço é capaz de ampliar sua capacidade intelectual de raciocínio, capacidade de resolução dos problemas e auxiliar na análise de informações em massa, além de ajudar nas habilidades interpessoais (BEER; CHIEL; DRUSHEL, 1999).

Com o auxílio de kits de robótica, os alunos conseguem aprender os termos técnicos de engenharia, componentes dos robôs, realizar programações lógicas e ampliar a bagagem de conhecimentos na área, montando robôs móveis ou fixos com diversos formatos, assim como a diversidade de robôs existentes no mercado.

Estas se tornam habilidades diferenciais para os estudantes ao ingressar no mercado de trabalho nos dias de hoje, pois a busca por uma performance melhor destas tecnologias é sempre procurada pela indústria, para reduzir o número de trabalhos exaustivos, melhorar a performance de uma linha de produção ou até mesmo resolver análises lógicas complexas.

Os manipuladores foram parte importante da evolução da indústria e, conseqüentemente, da sociedade, já que permitiram a produção em massa e trabalho em situações extremas. Nas indústrias eles são, até hoje, os maiores responsáveis para a evolução da produção na nossa sociedade. Pode-se dizer que sem eles não seria possível alcançar a velocidade e precisão necessária para suprir o consumo da população mundial, o custo dos produtos seria muito mais alto e a qualidade inferior (CRAIG, 2005).

Os robôs manipuladores fazem não só o trabalho pesado como usar materiais, mover peças grandes ou pesadas, mas também fazem trabalhos refinados, como separar produtos abaixo da qualidade, montar embalagens ou encher garrafas.

Uma parte muito importante do seu estudo é compreender a sua movimentação e onde ele se posiciona no espaço, para poder entender suas limitações, e qual o melhor robô para a

aplicação desejada. Ao estudo de sua orientação e movimentação, dá-se o nome de cinemática dos manipuladores.

Este relatório abrange o estudo da cinemática de manipuladores e encontra-se dividido em seis seções, incluindo essa introdução, que contextualiza a pesquisa. Na segunda seção são apresentados os objetivos do trabalho e na terceira um referencial teórico pertinente ao assunto composto pelos itens: Robótica, Robótica Educacional, Manipuladores Robóticos, Cinemática dos Manipuladores e Denavit-Hartenberg. Em seguida, na quarta seção, explanou-se acerca da metodologia de pesquisa utilizada neste estudo. Na quinta seção são evidenciados os resultados e discussões, com o foco na validação do método e explicações de cinemática direta e inversa. Por fim, as considerações finais.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é utilizar os parâmetros de Denavit-Hartenberg para descrever a cadeia cinemática completa de um robô manipulador de três graus de liberdade. O robô foi construído e programado com um kit de robótica LEGO Mindstorms EV3, como uma forma de aprofundar os estudos na área de robótica e seus conceitos, validando o teorema proposto.

A fim de aprofundar os conhecimentos sobre a ciência da robótica, foram definidos os seguintes objetos de estudo:

- a) obter uma contextualização histórica e atual dos conceitos de robótica, suas aplicações;
- b) expor os benefícios do estudo da robótica e programação nos ambientes escolares;
- c) introduzir conceitos de robótica industrial;
- d) explicar os conceitos de cinemática;
- e) aplicar e validar os conceitos de cinemática de Denavit-Hartenberg.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ROBÓTICA

A expressão robótica surgiu primeiro nos livros de ficção científica e, com o passar dos anos, foi virando realidade. A popularização do termo robótica veio do livro de Isaac Asimov “Eu, Robô”, de 1950. Porém, oito anos antes, em 1942, ele já havia mencionado o termo em suas obras. Nessa época, a imagem do robô era caracterizada por um humanóide com características muito semelhantes às dos humanos, como pensamento racional e habilidades de fala, porém com uma inteligência acima da média e totalmente inserida na sociedade, com o intuito de substituir integralmente as funções humanas em um ambiente.

Esta visão do autor demonstra a preocupação da época com a evolução sem controle da tecnologia. Em um momento do livro, Asimov postula três leis com o objetivo de proteger a sociedade dos robôs e que perduram até hoje no meio científico, são elas:

- 1 - Um robô não pode ferir um humano ou permitir que um humano sofra algum mal;
- 2 - Os robôs devem obedecer às ordens dos humanos, exceto nos casos em que essas ordens entrem em conflito com a primeira lei;
- 3 - Um robô deve proteger sua própria existência, desde que não entre em conflito com as leis anteriores.

Com o passar do tempo e as novas tecnologias desenvolvidas, os robôs se tornaram uma ferramenta de auxílio em tarefas desgastantes, e definições mais realistas da robótica surgiram. Como é o caso do livro introdução à robótica de Jhon Craig (2005), que diz que o estudo da robótica partiu do desejo de sintetizar alguns aspectos das funções humanas utilizando mecanismos, sensores, atuadores e computadores para auxiliar em tarefas exaustivas e repetitivas. Aqui, já se pode observar uma definição mais realista do conceito robótica, onde ela é utilizada para reduzir o trabalho pesado, ou repetitivo.

Partindo para uma visão mais técnica, tem-se a definição pelos órgãos reguladores, como a ISO, *International Standard Organization*. que na norma 8373, define robô como “Um manipulador controlável automaticamente, reprogramável, e multiuso com três ou mais eixos, que pode ser fixo ou móvel para aplicações pretendidas” ou o RIA, *Robotics Institute of America*, que os define como “Manipulador multifuncional reprogramável projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados através de movimentos variados para o desempenho de alguma tarefa”.

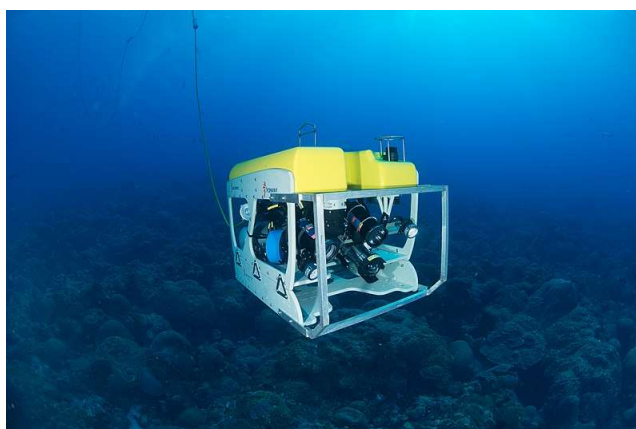
Dentro destas definições abrangentes, existem quatro categorias principais em que os robôs podem ser classificados, que serão abordados de forma individual, de acordo com a sua relevância na pesquisa: robôs móveis, visão computacional, inteligência artificial e por fim os manipuladores, objeto de estudo do trabalho.

Os robôs móveis são os mais diversos, geralmente autônomos, que captam informações do ambiente para se movimentar e executar as tarefas. Devido à extensão de seu movimento, podem ser utilizados em tarefas sem limite geográfico e seu espaço de trabalho pode ser variado (PIO; CASTRO, 2006).

Hoje em dia existem diversos tipos, combinando o *Global Positioning System* (GPS), para aquisição de medidas precisas de localização geográfica, a robótica móvel e a inteligência artificial. Alguns deles são: os carros autônomos que estão ganhando mercado atualmente devido à redução do custo de produção; máquinas agrícolas, que através do GPS, conseguem trabalhar sem que o operador tenha que fazer nenhuma manobra; robôs utilizados em missões militares, como os que procuram por pessoas soterradas ou desativam bombas; robôs que exploram o mar, como os ROV's; Robôs Operados Remotamente que conseguem montar e supervisionar equipamentos submersos, ou os ROVER's que vão pro espaço, explorando e coletando amostras do solo e até mesmo os robôs aspiradores, que auxiliam em tarefas domésticas (WOLF D. F., 2009).

As próximas figuras são alguns exemplos de robôs citados anteriormente, que podem melhorar a performance de uma tarefa complexa. Na Figura 7, pode ser visto um ROV's para a exploração do fundo do mar. Na Figura 8 um transbordo autônomo, que segue uma rota pré definida, melhorando a produtividade de uma operação agrícola., reduzindo o pisoteamento na cana, por exemplo.

Figura 7 - Mohawk ROV in Flower Garden Banks National Marine Sanctuary



Fonte: National Marine Sanctuary Foundation (2022)

Figura 8 - Caminhão autônomo nível 2 para produção agrícola



Fonte: Cana Online (2021)

Também é comum vermos notícias hoje em dia sobre os ROVER's, como o da Figura 9 explorando terrenos remotos como a Lua ou Marte.

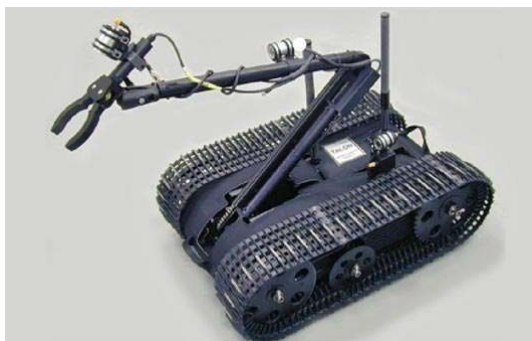
Figura 9 - Sonda Opportunity exploração Marte



Fonte: Editora Globo (2018)

Por fim, na Figura 10 temos o robô militar Talon, que pode ser utilizado para desarmar uma bomba remotamente, ou operar uma arma:

Figura 10 - Robô militar Talon



Fonte: G1 (2008)

Quanto mais evoluírem os sensores, na precisão e rapidez na leitura de dados, mais estes veículos se tornarão comuns e aplicáveis a outras tarefas.

Pode-se mencionar também os robôs computacionais, *softwares* que conseguem realizar processos de forma automática, ou que compõem o sistema de um robô, estes não se encaixam em algumas das definições de robótica, mas tem grande participação na evolução do pensamento computacional, que é um grande fator para o crescimento da robótica (OLIVEIRA, 2016).

Da mesma forma a inteligência artificial que, de forma simplificada, combina processamento computacional com grandes bancos de dados para resolver problemas, de forma racional. Ela evolui exponencialmente graças à indústria 4.0, já que nesta a quantidade de dados que podem ser adquiridos é imensa e os computadores estão conseguindo lidar com esta grande quantidade de dados, com softwares especializados (GALLOPOULOS; HOUSTIS; RICE, 1994). A inteligência artificial é utilizada grandemente na indústria, mercado financeiro, atividades empresariais e até em hospitais, seja aprimorando processos, reduzindo falhas, para agilizar o reconhecimento de alguma doença ou aumentando o campo de visão dos seus operadores (RUSSEL; NORVIG, 2010).

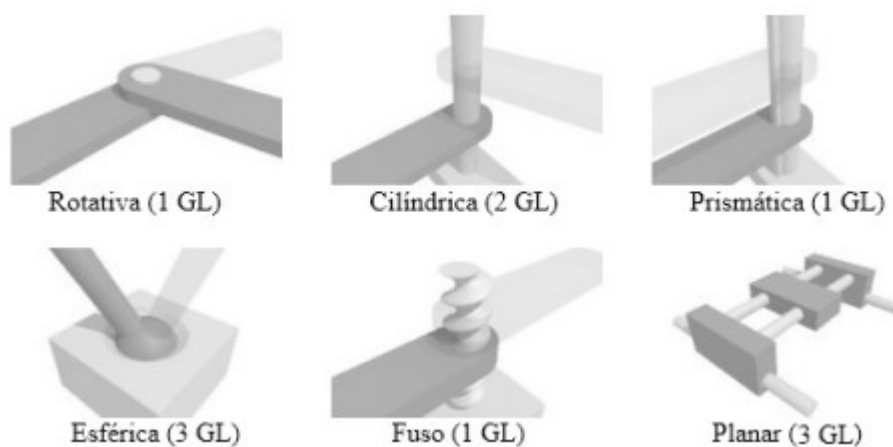
Um exemplo é a plataforma Watson da IBM, que utiliza um supercomputador e uma grande base de dados para gerar melhorias nos processos, por meio de associação com atividades e dados de empresas parceiras. Nele, você pode criar uma análise de dados pessoal de forma rápida e tem como benefício comparar os dados com outras empresas ou pessoas que possuem hábitos relacionados.

Por fim, os manipuladores, que são robôs fixos cujo espaço de trabalho corresponde ao volume total que a garra consegue alcançar ao executar todos os movimentos possíveis (SPONG; HUTCHINSON; VYDYASAGAR, 2006). Ele atua na realização de diversas tarefas, desde simples tarefas industriais a muito precisas cirurgias médicas. O formato e o volume do espaço de trabalho dependem dos limites mecânicos das juntas e da estrutura do manipulador (SICILIANO, 2008).

Pela variedade de aplicações, existem diversos tipos de robôs industriais. Sua classificação é feita a partir do modelo de suas juntas, partindo da base do manipulador (SIMPLÍCIO; LIMA; JUNKES, 2016).

As juntas são os componentes móveis dos robôs, e são responsáveis por guiar o efetuator (CRAIG, 2005). Na Figura 11, podem ser observados os tipos de juntas:

Figura 11 - Tipos de Juntas e quantidade de graus de liberdade



Fonte: Adaptado de GROOVER, 1988

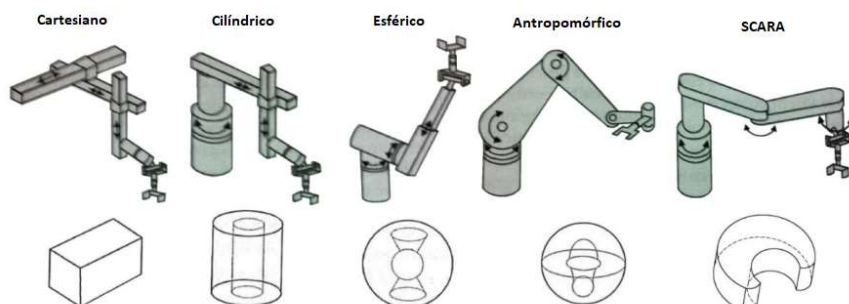
Por exemplo, as juntas rotacionais formam uma angulação entre os *links* vizinhos; as cilíndricas se movem em dois eixos, e performam um movimento cilíndrico entre os eixos; as prismáticas fazem o movimento de translação entre os *links* vizinhos.

Algumas juntas permitem movimento em dois ou mais eixos, o que concede ao robô mais graus de liberdade em uma única junta.

A quantidade de graus de liberdade (GL) é a quantidade de eixos em que a junta, ou o manipulador podem se mover. Este trabalho trata de juntas rotacionais, elas possuem um grau de liberdade.

Dentro da categoria de manipuladores, existem diversos tipos, que são desenvolvidos de acordo com a aplicação desejada, sendo mais comumente encontrados nas indústrias, porém, sua aplicação pode ir além. Dentre eles, os principais tipos de robôs são os cartesianos, cilíndricos, esféricos, antropomórficos e SCARA. Na Figura 12, podem ser observados exemplos dos robôs citados, com seus respectivos espaços de trabalho:

Figura 12 - Tipos de Robôs e seus espaços de trabalho



Fonte: Adaptado de NIKO (2020).

Os cartesianos movimentam todas as suas juntas de forma translacional, por este motivo, tem um pequeno espaço de trabalho e alcançam apenas ângulos perpendiculares ao plano, porém possuem alto grau de rigidez mecânica (ROSÁRIO, 2005). Na Figura 12, é apresentado um robô cartesiano, de 3GL, logo, é classificado como PPP, de acordo com suas juntas.

Os cilíndricos, como o nome já diz, possuem um movimento cilíndrico, e por isso, podem se movimentar em um espaço de trabalho mais variado do que o cartesiano, porém ainda tem limitações de alcance no plano esférico. Na Figura 12 é apresentado um manipulador cilíndrico de 3GL, que pode ser classificado como RPP, já que possui a junta da base rotacional e as outras duas prismáticas.

Os esféricos possuem duas juntas rotacionais e uma prismática, fazendo com que seu espaço de trabalho seja um pouco mais variado do que o cilíndrico, porém com menor rigidez mecânica. O manipulador cilíndrico da Figura 12 pode ser classificado como RRP.

O antropomórfico possui uma grande flexibilidade e um espaço de trabalho maior do que os outros modelos. Ele é o mais utilizado nas indústrias, justamente pelo maior espaço de trabalho, porém, possuem uma cinemática mais complexa e o controle dos movimentos lineares é mais complexo. O da Figura 12 é classificado como RRR.

Por fim, o SCARA, último robô da Figura 12, que é classificado como RRP, por possuir ao menos duas juntas rotacionais e uma prismática. Também é amplamente utilizado na indústria, devido ao seu grande alcance e espaço de trabalho, pode ser utilizado em diversos processos, como montagem de placas de componentes eletrônicos ou separação de equipamentos (BAYER, 2011).

Cada um tem seu papel, determinado pelo tipo e espaço de trabalho. Neste trabalho, o objeto de estudo são os manipuladores antropomórficos, que possuem espaço de trabalho esférico e são os que alcançam um maior número de posições no plano.

Pode-se observar que, apesar da variedade de robôs espalhados nos mais diversos setores, como no setor industrial, no campo da medicina, automação residencial e predial, automobilístico, as definições de robótica são bem próximas. A principal relação entre eles é conseguir atuar em tarefas repetitivas e exaustivas, minimizando o esforço de seus operadores.

3.2 ROBÓTICA EDUCACIONAL

A robótica educacional vem se mostrando um aliado importante às instituições de ensino para o aprendizado da lógica, programação e relacionamento. Isso porque os estudantes se motivam ao realizar experiências de trabalho em equipe para resolver problemas, aguçar a

criatividade e competir entre eles. Assim, desenvolvem com mais facilidade o aprendizado da lógica, mecânica, programação e, ainda se tornam mais suscetíveis ao trabalho em equipe (BEER; CHIEL; DRUSHEL, 1999).

No nível universitário, a robótica é aplicada em muitas disciplinas de engenharia, cursos de microprocessador de engenharia elétrica, cursos de *design* de engenharia industrial, cursos de dinâmica e controle de engenharia mecânica e cursos de ciências da computação, como inteligência artificial. Projetos de robótica também estão sendo aplicados em cursos interdisciplinares, como computação biológica e em programas de extensão (WOLF D. F., 2009).

Também pode-se ressaltar que diversas universidades utilizam kits de robótica no laboratório para aplicação de conhecimentos teóricos, e há um benefício muito grande na capacidade resolução de problemas (KORKMAZ, 2016).

A dedicação dos alunos motivados por participar das competições os torna mais estudiosos e aguça o interesse por se aprofundar em diversos conceitos que não são ensinados na grade curricular, e permite que os conceitos sejam aplicados de forma interdisciplinar (MARTINS; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2012).

Atualmente no Brasil existem algumas competições de robótica, que vão desde o ensino fundamental até o ensino superior, como o TBR, Torneio Brasil de Robótica, OBR, Olimpíada Brasileira de Robótica, o *WinterChallenge*, entre outras. Cada uma com suas características e modalidades de competição.

O Torneio Brasil de Robótica, é uma competição que tem uma faixa etária variada, desde os 3 anos até as competições de nível universitário. Nessa competição, os estudantes, em equipes de 2 à 10 alunos, são estimulados a desenvolver uma pesquisa científica diferente a cada ano de competição. Em 2021, por exemplo, o tema foi “Eliminação do Trabalho Infantil”. Além do desenvolvimento da pesquisa, eles têm que construir um modelo de robô, programar e disputar com outras equipes em uma mesa de missões, que tem relação com o tema, a fim de conseguir a maior pontuação possível (TORNEIO Brasil de Robótica, 2020).

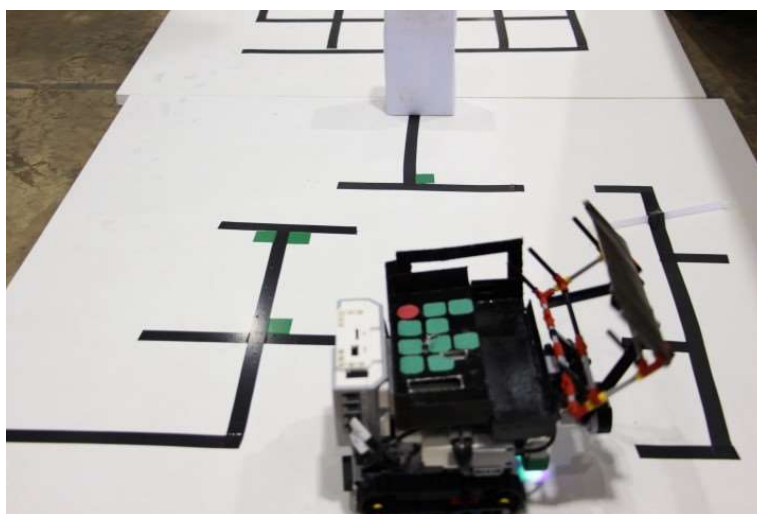
A OBR é uma olimpíada científica, para jovens de ensino fundamental até o médio, com os competidores possuindo até 19 anos, de escolas públicas ou privadas. A competição se baseia em 2 modalidades, teórica e prática. Na teórica, o participante realiza provas na própria escola sobre a ciência da robótica, que podem conter questões conceituais ou lógicas. Na modalidade prática, os participantes devem desenvolver robôs autônomos que consigam concluir tarefas diversas em uma mesa de competição, com etapas regionais, estaduais e uma final nacional. O participante decide de qual modalidade ele vai participar, podendo participar das duas. Por ser

organizada por uma Organização Sem Fins Lucrativos, e possui apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento científico, não possui nenhum custo ou taxa na participação, e também, distribui bolsas de iniciação científica para os melhores colocados de cada ano (OLIMPÍADA Brasileira de Robótica, 2021).

Outro campeonato é o *WinterChallenge*, organizado pela RoboCore, com modalidades variadas, como guerra de robôs, sumô, segue linha, hóquei, entre outras, onde, as categorias são definidas pelo peso dos robôs, e os times decidem de quais modalidades eles participarão. A competição não exige uma formação para os participantes, que podem começar a competir com 16 anos e não tem limite de idade, por mais que a maioria das equipes seja formada por universitários. Para a guerra de robôs, uma das modalidades do *WinterChallenge* a equipe projeta um robô com peso máximo definido por categoria, que será controlado por controle remoto ou autônomo, e o vencedor é quem causar mais danos no robô oponente. Esta categoria necessita de muito conhecimento em diversos campos da engenharia, como mecânica, eletrônica e programação. Outras categorias são o Sumô, onde os participantes projetam um robô autônomo que consiga empurrar o seu oponente para fora do tablado, Segue-linha, onde o desafio é fazer com que o robô autônomo percorra uma trilha definida na competição, no menor tempo possível e o Hóquei, onde os participantes atuam em grupo, controlando seus robôs, como em uma partida de hóquei (ROBOCore, 2022).

Abaixo, pode-se observar alguns dos tipos de competições de robô que existem no Brasil, como a RoboCore e OBR, citadas acima:

Figura 13 - Mesa de competição OBR



Fonte: Gomes (2018)

Figura 14 - Mesa de competição FLL



Fonte: Antunes (2017)

Figura 15 - Modalidade Guerra de robôs RoboCore



Fonte: Globo Universidade (2014)

O núcleo de estudos TROIA, da UFLA participa regularmente destas competições, e possui robôs em algumas das categorias do campeonato, como Sumô 3 kg e Guerra de Robôs, de 5,5 kg e 27,2 kg. Nas Figuras 16 e 17, podem ser vistos ver dois de seus robôs, ambos da modalidade guerra de robôs:

Figura 16 - Robô Kamikaze equipe Tróia 5.5kg



Fonte: UFLA (2013)

Figura 17 - Robô Aquiles equipe Tróia 27,2kg



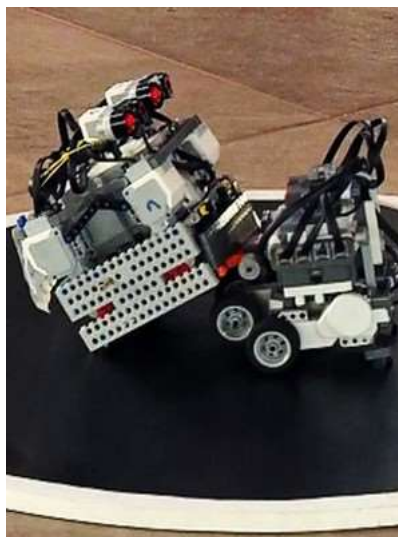
Fonte: UFLA (2013)

O intuito de participar destas competições é o de colocar em prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula aplicados de forma prática na realização do projeto dos robôs, visto que o desenvolvimento técnico do aluno obtido nesta tarefa e a quantidade de conhecimento assimilado é muito maior do que o aprendizado teórico por si só. O robô dá vida ao conceito e também permite que os alunos encontrem a resposta sobre como é feito ou como aconteceu (BARBOSA, 2011).

Há categorias, como a sumô e segue linha, em que o robô pode ser construído a partir de kits de robótica já existentes, como o LEGO Mindstorms, ou alguns específicos encontrados na internet.

Na Figura 18, tem-se dois robôs da modalidade sumô LEGO competindo entre si, onde vence quem derrubar o oponente:

Figura 18 – Competição sumô LEGO



Fonte: G1 (2015)

3.2.1 Ferramentas de ensino

Existem vários tipos de ferramentas que auxiliam no entendimento dos conceitos de robótica, tanto kits físicos, que podem ser utilizados desde o ensino fundamental até o ensino superior, cada um com sua complexidade, como softwares, para realizar simulações de montagens e programação.

A inserção da tecnologia em todos os setores da sociedade nos mostra que é necessária sua presença na escola, na formação de um cidadão que queira possuir conhecimento de seus instrumentos técnicos, mas, principalmente nas relações humanas e de seus valores éticos (BASTOS, 2000)

Os kits educacionais tornaram a área da robótica acessível a todos, eliminando a necessidade de conhecimento prévio em mecânica, elétrica ou softwares. Em muitas instituições, os educadores constroem seus próprios kits e ampliam as plataformas atuais para melhor atender às suas necessidades (PIRES, 2001).

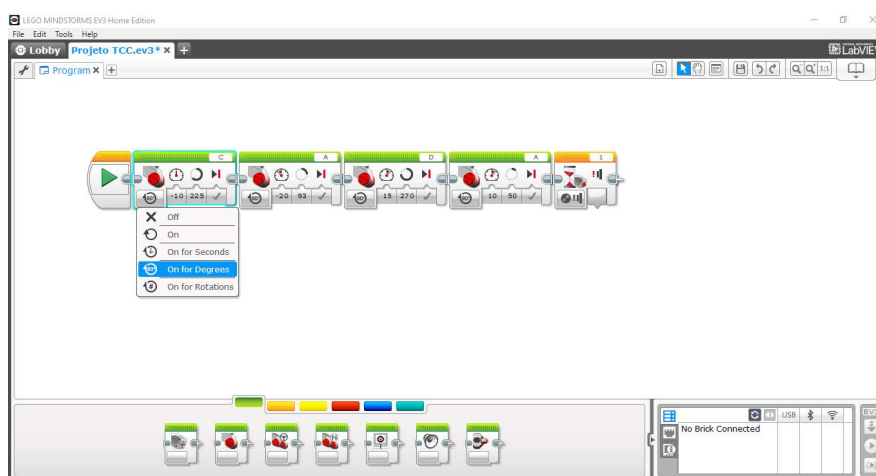
A LEGO, desde 1998 fabrica a linha *Mindstorms*, que iniciou no RCX, NXT e agora fabrica o EV3, todos com o mesmo objetivo: um kit de robótica, com versão educacional e recreativa, que possui um controlador, motores e sensores, além das peças para montagem, capazes de tornar o robô autônomo para a realização das tarefas programadas pelo usuário.

Os robôs *Mindstorm*, ensinam uma ampla gama de assuntos, que variam de linguagem, ciência da computação/programação, física, projetos de engenharia e robótica (BARROS, 2008). O kit educacional pode ser observado na Figura 19, a seguir:

matemática e física, e ajudar a criar projetos de sistemas complexos e implementá-los na prática.

Na programação do *Mindstorm EV3*, da Figura 19, define-se o movimento dos motores, por rotações, graus, ou segundos, a sua velocidade, que varia de 0 a 100, e a direção do movimento, horário ou anti-horário. Na Figura 20, pode-se observar a interface do software, com uma programação simples.

Figura 20 - Interface LEGO EV3 Home Edition



Fonte: Do Autor (2022)

Nesta figura, por exemplo, é feita a movimentação passo a passo do manipulador. Primeiramente se movimenta o motor C, no sentido anti-horário, a uma velocidade de 10, por 225°. Depois o motor A se move no sentido anti-horário, a uma velocidade de 20, por 93°, e assim por diante, até que o sensor de toque da entrada um mude seu estado.

Aqui, pode-se observar a facilidade de programação por este software. Existem grupos de blocos, representados por cores, como a verde, que se refere aos motores, a laranja as condições lógicas, como o *if e loop*, a aba amarela, aos sensores, como sensores de cor ou toque, e a vermelha, de operações matemáticas.

Outra característica do software é exibir as medidas de rotação de cada um dos motores e leituras dos sensores enquanto o bloco estiver conectado ao computador, além da possibilidade de iniciar e interromper o movimento do manipulador através dele.

O bloco também é programável por outros softwares, como *LabView* e *MATLAB*, através de extensões ou *API's*, que tem como vantagem possibilitar uma análise gráfica dos dados gerados pelo modelo, como leituras dos sensores ou rotação dos motores.

Além dele, existem outros kits para o ensino da robótica, porém com objetivos mais específicos, voltados para o desenvolvimento da lógica, programação ou com menor variação de modelagem. Por exemplo, o OWI 535, um kit de manipulador robótico com cinco graus de liberdade, onde o operador pode criar programações ou controlar por controle remoto, utilizado para estudo da cinemática e, também com intuito recreativo. Outro exemplo, mais conhecido é o NAO, um humanóide que pode ser programado para realizar diversas tarefas, desde futebol de robôs, até ensinar crianças por meio de sua inteligência artificial e capacidade de interação social, demonstrando expressões e comportamentos como uma pessoa. Este é bastante utilizado na RoboCup, uma competição que visa o desenvolvimento da robótica e inteligência artificial, na categoria futebol de robôs, já que sua inteligência artificial e processamento são avançados. Nas partidas, os robôs têm de se comunicar internamente para conseguir marcar gols no time adversário, além de se defender dos oponentes (BERTON; SANDINI; METTA, 2006).

Ele também é muito utilizado para ajudar crianças com dificuldade de interação social a desenvolver habilidades de comunicação, por exemplo, houve um estudo em que as crianças autistas ficaram mais concentradas se comunicando com ele do que em uma aula normal com professores (SHAMSUDDIN, 2012).

3.3 MANIPULADORES ROBÓTICOS

Partindo para o objeto de análise deste trabalho, os robôs manipuladores industriais, pode-se agora ressaltar algumas informações.

A mais comum aplicação deste tipo de robô é a industrial, onde ele realiza as mais diversas tarefas. A redução do custo atrelada a uma alta necessidade de produção fez com que o mercado de robótica industrial tivesse um grande crescimento, além de poderem performar tarefas mais perigosas ou não realizáveis por trabalhadores (CRAIG, 2005).

Nessa área, eles são utilizados desde a década de 60, onde tiveram seu início no setor automobilístico, mas hoje em dia já são utilizados em indústrias das mais variadas, como, medicinal, farmacêutica, cosméticos e aeroespacial (KURFESS, 2005).

O primeiro robô manipulador industrial que integrou uma linha de produção foi o Unimate (1959), que pode ser visto na Figura 21. Inventado por George Devol e Joseph Engelberger, na década de 50, ele foi colocado para utilização em 1961 na linha de produção da General Motors de Nova Jersey. Eles manuseavam elementos fundidos para realizar soldagem em carrocerias dos automóveis, uma tarefa considerada muito desgastante e perigosa para os colaboradores (MENZEL; D'ALUISIO, 2000).

Figura 21 - Robô Unimate



Fonte: Kawasaki Robotics (2019)

Existem ainda alguns vídeos no *YouTube*, de apresentações realizadas com ele para demonstrar seu funcionamento, com tarefas como pegar um copo e transferir seu conteúdo para outro recipiente. Nele, pode-se observar que a precisão e a estabilidade são bem menores se comparadas aos modelos mais novos, porém foi a partir disso que a robótica se afirmou como uma ciência autônoma e, seu estudo começou a ser efetivamente desenvolvido.

Outra área em que estão obtendo muito sucesso é a medicinal, onde são utilizados para reabilitação de pacientes e até em cirurgias. Como é o caso do sistema cirúrgico Da Vinci, que possui um manipulador robótico extremamente preciso e um console para o médico cirurgião, que pode estar a quilômetros de distância do centro cirúrgico onde está sendo realizada a cirurgia, além de possuir um alto controle contra movimentos imprecisos e permitir movimentos inatingíveis com a limitação motora humana. Além disso, tem uma taxa de falha técnica muito baixa, de 1,8%, de acordo com um estudo realizado na universidade de Yonsei, na Coreia do Sul (KOH et al., 2018). Pode-se presumir que com a crescente era tecnológica, este número tende a reduzir cada vez mais. Na Figura 22, tem-se o sistema cirúrgico Da Vinci, com o console de onde o cirurgião opera, e o manipulador que fica na sala de cirurgia:

Figura 22 - Sistema robótico da Vinci



Fonte: Densford (2017)

Apesar da variedade de funções, podemos definir os manipuladores robóticos, também conhecidos como “braço robótico”, como uma cadeia de membros fixos (elos) unidos por articulações (juntas) projetados para realizar tarefas com o seu *end-effector* (garra) (GARCIA et al., 2007).

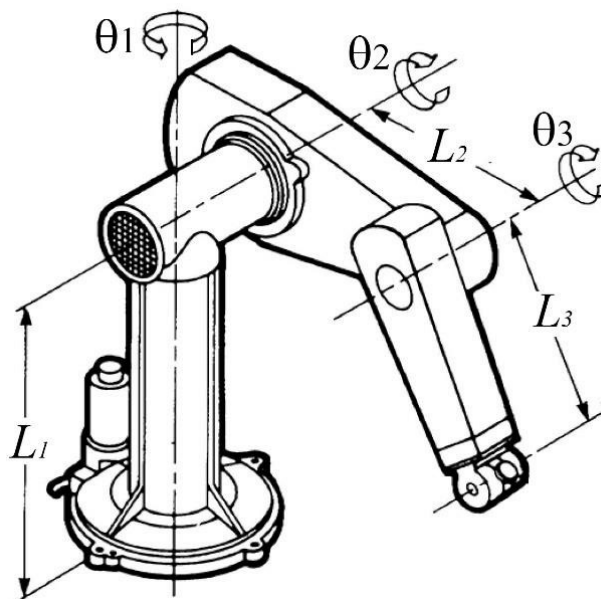
Estes termos entre parênteses agrupam os manipuladores na sua categoria. Assim, para uma melhor compreensão das partes do manipulador, temos a definição dos termos mencionados acima, além de uma observação sobre a sua base, segundo (KURFESS,2005):

- Elos: são os braços robóticos efetivamente ditos, são corpos rígidos entre as juntas dos robôs;
- Juntas: são os mecanismos que unem os links e que fazem a movimentação dos elos vizinhos, elas definem a quantidade de graus de liberdade do manipulador;
- Garra: ponto extremo do manipulador pode ser substituída de acordo com a aplicação, onde ela pode ser um mecanismo de pintura, soldagem, ou uma garra efetivamente, utilizada para transportar objetos de um local ao outro.

Por fim, eles possuem uma base fixa, que é necessária para a obtenção da orientação e posicionamento do robô.

Para ilustrar observe a Figura 23:

Figura 23 - Manipulador Puma com indicações de elos e juntas



Fonte:Lopes (2002)

Podemos observar que o robô possui uma base fixa, três links, três juntas rotacionais e, nesse caso, não possui uma garra no final, portanto, este robô possui três graus de liberdade, já que possui articulação em três pontos do braço, com um grau de liberdade em cada.

Junto da robótica de manipuladores deve-se utilizar alguns métodos para a descrição do movimento de suas juntas e elos, a cadeia cinemática do manipulador, para poder definir a posição final do efetuador, ou garra, e realizar a tarefa da forma correta. Para isso, será utilizado um conceito importante: a cinemática, que é demonstrada a seguir.

A cinemática, que tem como idealizador Franz Reuleaux é o estudo que possibilitou o início da descrição do posicionamento das máquinas a partir de cadeias de ligações entre seus elos, conhecidos como juntas cinemáticas. Seu precursor, já em 1875, postulava que uma sequência de movimentos das juntas cinemáticas produzia uma cadeia cinemática, que poderia ser utilizada para representar o movimento de diversos tipos de mecanismos. (MOON, 2003). Hoje, pode-se estudar a posição, velocidade, aceleração, entre outras variáveis com a descrição cinemática de seus links.

Contudo, com o passar dos anos, foi notado que a notação desenvolvida por Reuleaux para descrever os mecanismos ainda não contemplava todos os parâmetros necessários para uma descrição completa. Em 1955, os estudiosos Jacques Denavit e Richard Hartenberg criaram um método para que fosse possível a descrição das características cinemáticas de qualquer mecanismo de cadeia simples por meios de matrizes, nomeado como convenção de Denavit-Hartenberg, que será demonstrado no tópico 3.5.

3.4 CINEMÁTICA DE MANIPULADORES

A cinemática de um manipulador tem o objetivo de, a partir de um sistema de coordenadas fixo, descrever o movimento de um manipulador, determinando o efeito acumulativo de todas as juntas, desconsiderando as forças e torques necessários. Elas se dividem em duas, direta e inversa (WEIHMANN, 2011).

A cinemática direta obtém as posições no espaço cartesiano de acordo com a angulação das juntas. Já a cinemática inversa calcula os ângulos das juntas a partir das posições no espaço cartesiano (PENHA; QUEIROZ; ROSSINI, 2016).

As convenções, criadas por Reuleaux, para descrever a cadeia cinemática são de extrema importância para simplificar a análise de qualquer manipulador com '**n**' links, elas serão apresentadas, juntamente com simplificações de outros autores a seguir (CRAIG, 2005).

Um sistema de coordenadas é fixado em cada link, de modo que, quando o manipulador realizar um movimento, as coordenadas de cada ponto do link sejam constantes. Cada junta tem um sistema de referência fixo que descreve o movimento da junta (REDDY, 2014).

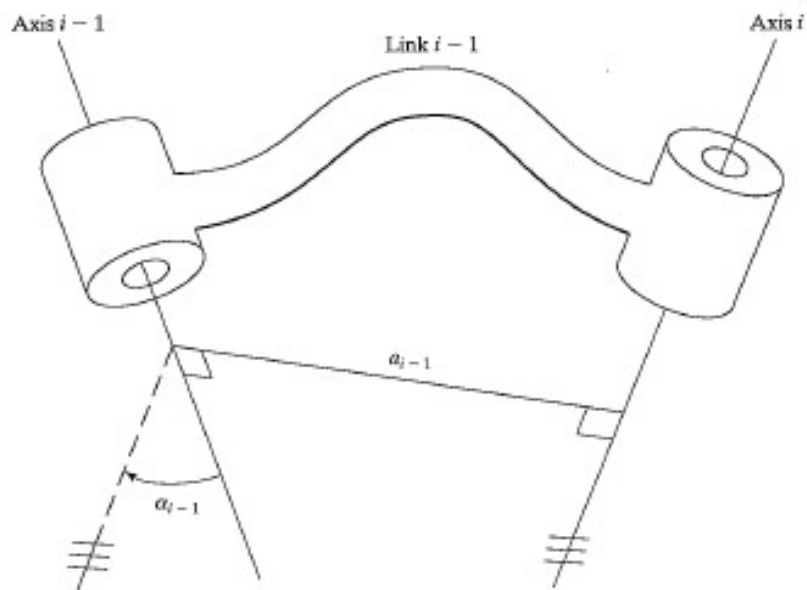
Segundo Jhon Craig (2005), um manipulador pode ser visto como um conjunto de corpos rígidos conectados em uma cadeia por juntas, cujos corpos são chamados de elos. Na cinemática direta, eles são numerados a partir da base do manipulador, geralmente chamada de **elo zero**, o próximo que se move é o **elo um** e assim por diante, até o elo '**n**'. Eles são considerados como o meio de conexão entre duas juntas vizinhas.

O termo cadeia simples, é utilizado para descrever a conexão entre um par de elos quando eles se movimentam em torno de um mesmo eixo. A Junta '**i**', por exemplo, é definida como um eixo no espaço sobre a qual o elo **i** rotaciona a partir do elo '**i-1**'.

Agora, serão introduzidos os quatro parâmetros que compõe o estudo da cinemática.

Para quaisquer dois eixos no espaço, existem meios de medir a distância entre eles. Há sempre uma linha reta, perpendicular aos dois eixos que a intercepta. Exceto quando eles são paralelos, neste caso existem várias linhas perpendiculares entre eles. Observe a Figura 24:

Figura 24 – Parâmetros dos elos

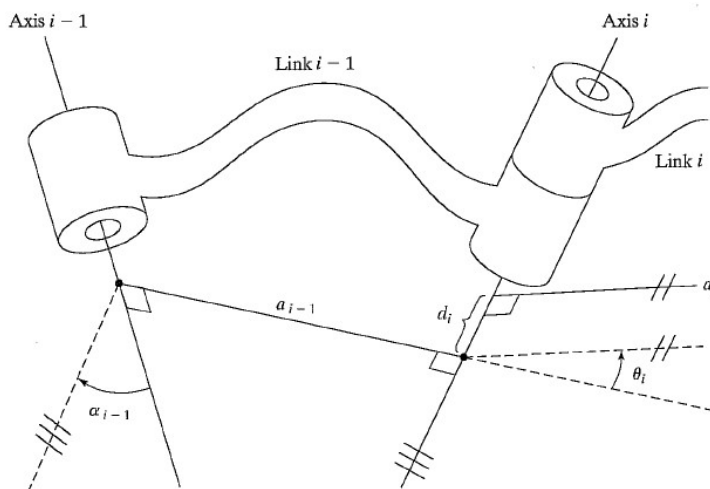


Fonte: CRAIG, 2005

Aqui, podem ser observados dois dos parâmetros para definição da localização relativa do manipulador. O primeiro é a linha perpendicular entre os eixos das juntas, chamado de a_{i-1} , que é o comprimento do elo. Também, pode-se observar aqui o α_{i-1} , chamado de ângulo de torção, que é a angulação necessária no eixo i para chegar ao eixo $i-1$, em outras palavras, é o ângulo medido do eixo $i-1$ ao eixo i pela regra da mão direita, com relação ao link $i-1$.

Observando agora a Figura 25, podem ser identificados os outros dois parâmetros que compõe a análise da cinemática, o deslocamento entre elos, chamado de d_i , que se refere à distância entre dois elos vizinhos que estão no mesmo eixo e, por fim, o ângulo das juntas, θ_i , que se refere ao ângulo de rotação do eixo comum entre as juntas, entre os elos vizinhos:

Figura 25 - Parâmetros do elo e seu vizinho



Fonte: CRAIG, 2005

Estes parâmetros são suficientes para descrever uma cadeia cinemática, e localizá-la no plano cartesiano tridimensional (SPONG; HUTCHINSON; VIDYASAGAR, 2006).

Para realizar a análise cinemática, existem algumas convenções para padronização que devem ser aplicadas. Ainda segundo SPONG, HUTCHINSON e VIDYASAGAR (2006):

- são fixados os sistemas de coordenadas nos 'n' elos do manipulador, no formato $o_i x_i y_i z_i$, para cada elo i ;
- o sistema da base é o sistema de coordenadas inicial e imóvel;
- a matriz de transformação homogênea A_i contém a posição e orientação do sistema de referências $o_i x_i y_i z_i$, a partir de $o_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$;
- partindo do pressuposto de que todas as juntas são revolutas ou prismáticas, como neste trabalho, A_i se torna função de apenas uma variável, θ_i , se tornando $A_i(\theta_i)$;

Logo, para descrever o manipulador, iremos multiplicar as matrizes homogêneas parciais obtidas para cada elo.

Como foram definidos sistemas de coordenadas em vários pontos da cadeia, a orientação da garra, quando atribuída a última posição, é constante independente da configuração do robô.

Esta é a definição inicial da cinemática direta, determinar as matrizes $A_i(\theta_i)$, e multiplicá-las entre si, por meio de Jacobiano. Porém, seus cálculos são muito complexos, e já foram simplificados por notações de outros cientistas.

Utilizando as matrizes acima, podem ser encontradas também as equações de cinemática inversa do manipulador. A cinemática inversa é utilizada para encontrar as angulações

necessárias das juntas para atingir um ponto no plano xyz . Por meio de manipulação algébrica, utilizando os pontos onde deseja se posicionar a garra, é possível encontrar as equações relativas aos ângulos de cada uma das juntas.

Agora, será apresentada a convenção de Denavit-Hartenberg, que partindo dos conceitos de cinemática, nos permite observar e calcular os parâmetros de maneira simplificada. Existem outros métodos que utilizam dos mesmos conceitos, porém não serão abordados neste relatório.

3.5 DENAVIT-HARTENBERG

Utilizando da notação de Reuleaux, a qual demonstrou vários princípios fundamentais do estudo da cinemática, Denavit e Hartenberg encontraram uma forma de parametrizar as variáveis de uma forma equacional simbólica, para qualquer cadeia simples.

Fixando sistemas de coordenadas aos elos, podem ser representadas as transformações entre os sistemas vizinhos, e cada transformação homogênea pode ser representada pelo produto de quatro transformações básicas (DENAVIT; HARTENBERG, 1955).

Para utilizar esta convenção, é necessário aplicar duas regras, segundo SPONG, HUTCHINSON, VIDYASAGAR (2006):

1. O eixo x é perpendicular ao eixo z_0 ;
2. O eixo x_1 intercepta o eixo z_0 .

Dessa forma, pode-se garantir que existem valores únicos para os parâmetros, tornando válida a equação (CRAIG, 2005).

Jhon Craig (2005), construiu um passo a passo para ajudar no posicionamento dos sistemas de referência:

1. Identificar os eixos das juntas e desenhar linhas infinitas sobre eles, depois, para os próximos passos, considere sempre duas linhas vizinhas (i e $i+1$);
2. Observar a perpendicular entre eles, ou o ponto de interseção. Neste ponto, ou no ponto em que a perpendicular comum entre eles encontra o ‘**i-ésimo**’ elo (eixo), posicione o sistema de referência;
3. Posicionar o eixo z_i sobre o ‘**i-ésimo**’ eixo da junta;
4. Posicionar o eixo x_i apontando sobre a perpendicular comum, ou, se os eixos se interceptam, definir x_i como normal ao plano contendo os dois eixos;
5. Posicionar o eixo y_i de forma a completar o sistema de coordenadas da regra da mão direita;

6. Definir $\{0\}$ para encontrar $\{1\}$ quando a primeira junta ainda não tiver se movido. Para $\{N\}$, escolher a origem de sua localização e, x_n com direção livre, mas geralmente é escolhida a posição em que a maioria dos parâmetros possam ser zerados.

Utilizando estas regras, podem ser obtidos os parâmetros mencionados no último tópico, com os quais se formula uma matriz de transformação homogênea (A_i) para cada elo do manipulador, como pode ser observado na Equação (1):

$$A_i = R_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Trans_{x,\alpha_i} R_{x,\alpha_i} \quad (1)$$

Onde:

- R_{z,θ_i} - Rotação de θ em torno do eixo z ;
- $Trans_{z,d_i}$ - Translação d ao longo do eixo z ;
- $Trans_{x,a_i}$ - Translação a ao longo do eixo x ;
- R_{x,α_i} - Rotação α em torno do eixo x .

Ou, passando para forma matricial, tem-se a Equação (2):

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i * \cos\alpha_i & \sin\theta_i * \sin\alpha_i & a_i * \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i * \cos\alpha_i & -\cos\theta_i * \sin\alpha_i & a_i * \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sendo:

- a_i (comprimento do elo) – A distância de z_i a z_{i-1} medido ao longo de x_i ;
- α_i (ângulo de torção) – O ângulo entre z_i e z_{i-1} medido sobre x_i ;
- d_i (distância entre elos) – A distância entre x_i e x_{i-1} medida ao longo de z_i ;
- θ_i (ângulo das juntas) – O ângulo entre x_{i-1} e x_i , medido sobre z_i .

3.5.1 Cinemática Direta

Após obter as matrizes para cada elo do manipulador, pode-se encontrar a solução para o problema da cinemática direta, a matriz total. Deve-se multiplicar as matrizes homogêneas parciais, em ordem crescente, ou seja, da base do manipulador até a garra, de zero a n . Assim, obtemos a Equação (3):

$$T_j^i = A_1 A_2 \dots A_n \quad (3)$$

Logo, finalmente teremos uma matriz da seguinte forma apresentada na matriz da Equação (4):

$$\begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde:

- Sub matriz R: Matriz 3x3 que descreve a rotação total do manipulador;
- Sub matriz T: Matriz 3x1 contendo a posição do end-effector, no plano cartesiano, com relação a base do manipulador, no formato xyz (DENAVID; HARTENBERG, 1955).

3.5.2 Cinemática Inversa

Partindo para a cinemática inversa, tem-se que encontrar, a partir de um ponto desejado, a angulação de cada uma das juntas do manipulador. As equações podem ser obtidas de duas formas, geométrica e algébrica, neste trabalho utilizou-se a definição algébrica.

Uma das formas de encontrar as equações dos ângulos é igualar a matriz total simbólica com a matriz total obtida pela multiplicação das matrizes homogêneas, onde na última coluna da matriz, encontram-se os valores correspondentes aos pontos P_x , P_y e P_z , como demonstra a Equação (5):

$$T_3^0 = T_1^0 * T_2^1 * T_3^2 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Esta foi a forma utilizada, já que anteriormente foi aplicada a cinemática direta, então as matrizes homogêneas e totais já foram definidas.

Para facilitar a manipulação algébrica, foram utilizados o MATLAB e os resultados das simplificações serão exibidos na próxima seção.

A partir das definições acima, já se tem os conceitos para aplicar a convenção e analisar o manipulador a fim de estudar os conceitos da cinemática, além de expor o modo de construção e programação do modelo e, por fim, validar as teorias aplicando ângulos de rotação para as juntas e verificar se ela se comporta de forma esperada no plano cartesiano.

Alguns trabalhos nesta linha foram responsáveis por inspirar o modelo de trabalho e metodologia do atual relatório, como o Trabalho de Conclusão de Curso de Vinícius Rodrigues, de 2019, onde foram utilizados os conceitos de Denavit-Hartenberg para fazer a análise cinemática direta do manipulador Stäubli TX90 e compará-la com uma simulação e o modelo físico.

Outro trabalho que aborda o conceito de Denavit-Hartenberg é o Artigo de Setembro de 2006, onde João Carlos Sedraz Silva, Marcelo Linder, Marcos A. da S. Irmão e Ricardo Perrone da Silva construíram um modelo e analisaram os parâmetros de acordo com os conceitos de cinemática direta de manipuladores, por meio da convenção. Ainda, pode-se citar a tese de doutorado de Lucas Weihmann, 2011, onde ele utiliza dos conceitos de D-H além de outros para modelar e otimizar as forças e torques aplicados pelos robôs em contato com o meio.

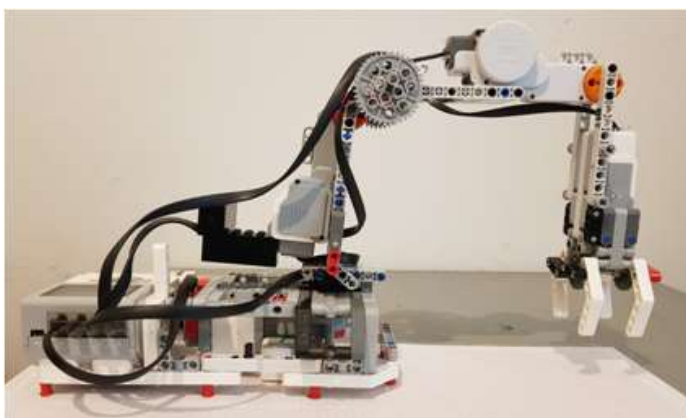
4. METODOLOGIA

Esse trabalho consiste em realizar um estudo à partir de um manipulador antropomórfico com três graus de liberdade, construído com o kit de robótica LEGO Mindstorms EV3, para validar o método de Denavit-Hartenberg para parametrização de manipuladores, podendo ser utilizado como um modelo para aplicar o teorema de Denavit-Hartenberg e estudo da cinemática direta e inversa.

4.1 CONSTRUÇÃO DO MANIPULADOR

Foi utilizado o kit de robótica LEGO *Mindstorms* EV3 para construção do modelo. Foram utilizados três motores grandes um motor médio, o bloco EV3, e peças de montagem, como conectores, engrenagens, vigas e eixos, que podem ser observados na Figura 26:

Figura 26 - Manipulador 3GL



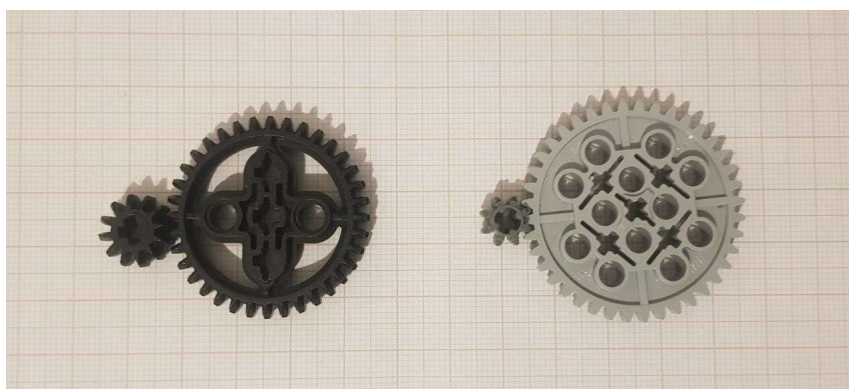
Fonte: Do Autor (2022)

A montagem foi baseada em uma montagem contida no manual de instrução desse kit. Porém, foram feitas algumas modificações a fim de aumentar o espaço de trabalho do robô, passando de dois para três graus de liberdade.

Os motores grandes são utilizados como juntas do manipulador, e o motor médio é a garra. Esses são os únicos membros móveis, além das engrenagens. Como as juntas se movimentam de forma rotacional, esse, portanto, é um robô RRR, por possuir três juntas rotacionais.

Na montagem, podem ser ressaltados dois jogos de engrenagem, um na base de 36:12 e outro de 40:8 na segunda junta do manipulador. Eles foram utilizados a fim de aumentar a precisão do movimento e foram considerados na programação. Na Figura 27, tem-se as imagens das engrenagens para fim de observação:

Figura 27 - Jogos de Engrenagem 12:36 e 8:40



Fonte: Do Autor (2022)

Partindo para o controlador do modelo, tem-se o bloco EV3, ele possui um microprocessador do tipo ARM9, 32bits da *Texas Instruments*, modelo AM1808 de 300Mhz, com uma memória de processamento (RAM) de 64MB e sistema operacional baseado em Linux. Conta com quatro entradas de dados (sensores) de 1Khz, ou seja, 1000 verificações por segundo e quatro saídas (atuadores).

Para comunicação com o usuário, existe uma porta mini USB, *Wi-Fi* e *Bluetooth* para comunicação sem fio, por onde foram realizadas as programações do robô.

Por ser um kit versátil, tanto para móveis ou fixos, ele possui uma bateria recarregável 10V DC acoplada ao bloco.

4.2 PROGRAMAÇÃO

A programação foi construída inicialmente no software nativo do EV3, o *LEGO Mindstorms EV3 Home Edition*, que utiliza como base o software *LabView*, da *National Instruments*, porém adaptada para uma visualização mais simples. O software encontra-se disponível pra download na página da LEGO. Como é possível ler o sensor de rotação do motor enquanto ele opera, esse método foi considerado mais seguro para a aplicação.

Na programação, notou-se que quanto maior a velocidade, menor a precisão do movimento. Então, foi feito um teste onde o robô movimenta suas juntas, uma de cada vez, passando por todos os ângulos possíveis do modelo, para verificar a movimentação da estrutura de acordo com a velocidade de movimentação das juntas, de modo que o movimento fosse o mais preciso possível.

Pode-se ressaltar que o software não possui uma velocidade definida, porém, por meio de testes, foi observado que o motor varia de 0 à 100, entre 0 e 1,647 km/h.

As velocidades definidas podem ser vistas na Tabela 1:

Tabela 1 - Velocidade do Movimento das Juntas

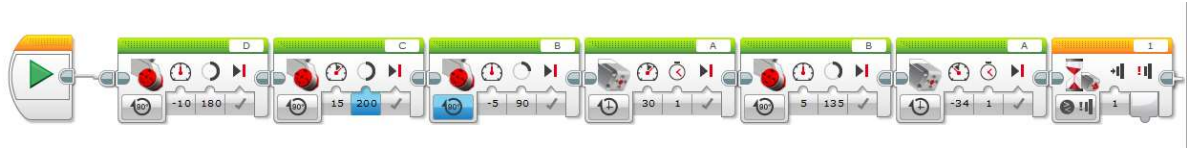
	Velocidade (0 a 100)	Velocidade (km/h)
Junta 1	15	0,247
Junta 2	10	0,164
Junta 3	5	0,082

Fonte: Do Autor (2022)

Pôde-se observar que as duas últimas juntas necessitam de um movimento mais lento, visto que elas se movimentam na vertical e orientam as partes mais pesadas do manipulador, o que em uma velocidade alta poderia implicar em solavanco, principalmente na junta três, por ficar na extremidade.

Depois de definidas as velocidades, foi realizada a programação do movimento do modelo, com cada junta se movimentando de uma vez, novamente para minimizar o balanço no movimento. A seguir, pode-se observar a sequência de blocos de programação, na Figura 28:

Figura 28 - Sequência de movimentos dos motores



Fonte: Do Autor (2022)

As engrenagens representaram uma redução no movimento, visto que elas eram de 12:36 e 8:40, logo, os valores de rotação da programação foram ajustados para refletir o movimento da junta por completo. Abaixo, pode ser observada a transmissão entre as engrenagens das juntas um e dois:

$$12X: 36 * \theta_1 \rightarrow \frac{X}{3 * \theta_1} \rightarrow X = 3 * \theta_1 \quad 8X: 40 * \theta_1 \rightarrow \frac{X}{8 * \theta_1} \rightarrow X = 5 * \theta_2$$

Uma observação que pode ser acrescentada é que o motor B, junta 3, realiza 2 movimentos, já que ele parte da posição de -90° , e para chegar à posição considerada inicial, ele antes retorna para a posição de 0° .

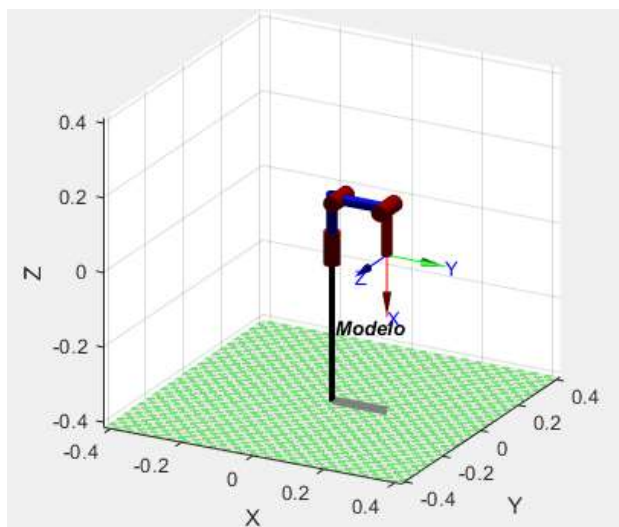
No fim da programação, para que o robô permaneça na posição final, foi adicionado um bloco de esperar por uma mudança no sensor de toque, ou seja, até que o botão seja pressionado, o robô permanece imóvel na posição final, para evitar que o motor destrave e o peso do elo modifique a sua posição.

4.3 DEFINIÇÃO DO ESPAÇO DE TRABALHO

Espaço de trabalho é o termo utilizado para o espaço em que o manipulador pode movimentar sua garra. Ele é definido pelo espaço total percorrido pelo punho, quando o manipulador passa por todos os movimentos possíveis. Portanto, pode-se dizer que ele é limitado pelo movimento máximo das juntas e comprimento dos elos.

Para a obtenção do espaço e do volume de trabalho, foi feita uma simulação utilizando a aplicação *Robotics Toolbox*, criada por Peter Corke, disponível no MATLAB, e no *site* do autor. A aplicação permite a simulação de um manipulador configurado com os parâmetros de Denavit-Hartenberg definidos pelo usuário, como mostra a Figura 29:

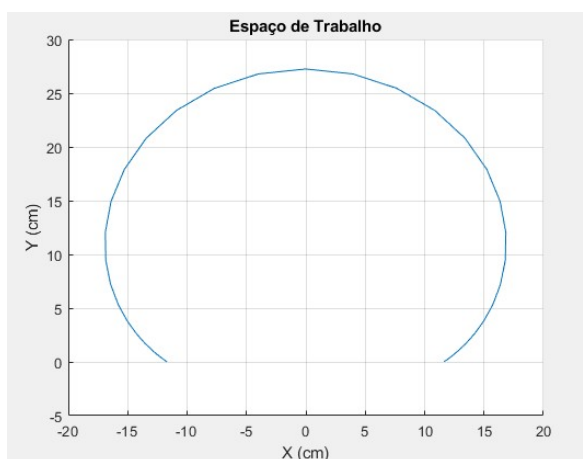
Figura 29 - Modelo simulado no MATLAB



Fonte: Do Autor (2022)

Depois de montado o modelo, foram indicados os graus de movimentação das suas juntas para que eles atingissem todo o espaço de trabalho possível no plano cartesiano, de forma a indicar o espaço de trabalho total, como mostra a Figura 30:

Figura 30 - Espaço de Trabalho do Modelo



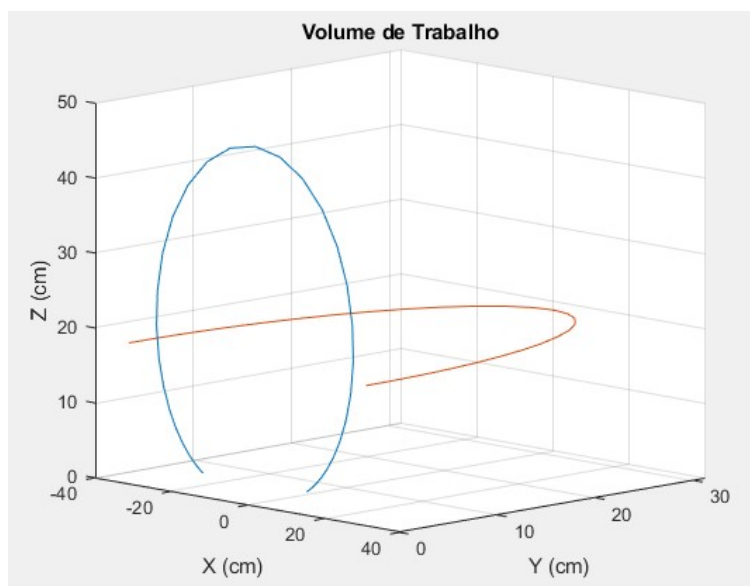
Fonte: Do Autor (2022)

4.4 VOLUME DE TRABALHO

O volume de trabalho é definido pelo volume total onde pode se encontrar o manipulador no plano xyz, ou seja, a máxima extensão de suas juntas, executando o maior movimento possível. Note que aqui não se leva em conta apenas a posição do efetuador, mas

do manipulador como um todo. O volume de trabalho do modelo pode ser observado na Figura 31:

Figura 31 - Volume de Trabalho do Modelo

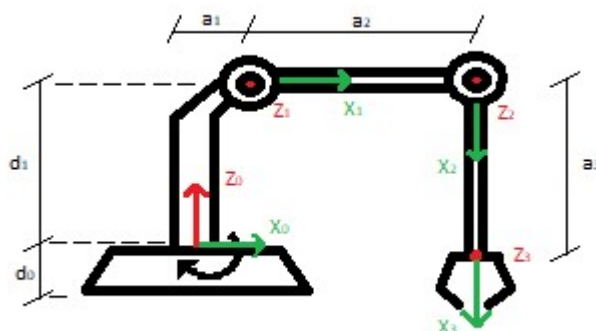


Fonte: Do Autor (2022)

4.5 PARAMETRIZAÇÃO

Depois da construção do modelo, definição da velocidade do movimento e identificação do espaço e volume de trabalho, foi utilizado o passo a passo do tópico 3.5 para fixar os sistemas de referência. Depois de fixados os sistemas de referência, é possível parametrizar o manipulador, de acordo com as quatro variáveis utilizadas na cinemática direta. Na Figura 32 podem ser observadas as referências adotadas, e a caracterização das variáveis que serão estudadas:

Figura 32 - Esboço do modelo e suas variáveis



Fonte: Do Autor (2022)

Foram obtidas as medidas de distância entre elos (d), dos links rígidos (a) e os ângulos de torção entre juntas (α). Para esta medida de torção, pode-se atentar que, como gira no sentido anti-horário, o valor é positivo. Algumas das variáveis têm valor nulo, como d_2 e d_3 , já que os eixos X se cruzam no plano. Abaixo, na Tabela 2 estão os valores encontrados para cada variável com valor não nulo:

Tabela 2 - Tabela dos parâmetros cinemáticos do modelo

d_0	5,60
d_1	13,20
a_1	2,00
a_2	13,65
a_3	15,60
α_1	90°

Fonte: Do Autor (2022)

Depois, foi montada a matriz de parâmetros da cinemática direta, no formato da convenção de Denavit-Hartenberg a fim de simplificar a montagem das matrizes homogêneas.

Os ângulos foram medidos em graus, e os comprimentos em centímetros, os valores estão apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Tabela de Parâmetros D-H do modelo

Junta (n)	θ (°)	α (°)	a_i (cm)	d_i (cm)	Range (°)
1	θ_1^*	90	2,00	18,80	0/90
2	θ_2^*	0	13,65	0	150/-45
3	θ_3^*	0	15,60	0	90/-135

Fonte: Do Autor (2022)

4.6 MATRIZES HOMOGÊNEAS PARCIAIS

Com a definição dos parâmetros, foi possível aplicar o teorema de Denavit-Hartenberg para obter as matrizes homogêneas parciais, a partir do formato exposto anteriormente na Equação 2:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \text{sen}(\theta_1) & 2 * \cos(\theta_1) \\ \text{sen}(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 2 * \text{sen}(\theta_1) \\ 0 & 1 & 0 & 18,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\text{sen}(\theta_2) & 0 & 13,65 * \cos(\theta_2) \\ \text{sen}(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 13,65 * \text{sen}(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\text{sen}(\theta_3) & 0 & 15,6 * \cos(\theta_3) \\ \text{sen}(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 15,6 * \text{sen}(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Depois de determinar as matrizes, foram realizadas as multiplicações a fim de obter a matriz homogênea total do manipulador. Os cálculos abaixo foram realizados pelo Software MATLAB.

4.7 MATRIZ HOMOGÊNEA TOTAL

De posse das matrizes de cada junta rotacional do manipulador, pode-se obter a matriz homogênea total (T), a partir do produto das homogêneas parciais, que interliga os sistemas de referência, desde a base até a garra, como mostra a Equação 6:

$$T = A_1^0 * A_2^1 * A_3^2 \quad (6)$$

Logo:

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c(\theta_1)c(\theta_2)c(\theta_3) - c(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) & -c(\theta_1)c(\theta_2)s(\theta_3) - c(\theta_1)s(\theta_2)c(\theta_3) & s(\theta_1) & 2 * c(\theta_1) + 15,6 * c(\theta_1)c(\theta_2)c(\theta_3) - 15,6 * c(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) + 13,65 * c(\theta_1)c(\theta_2) \\ s(\theta_1)c(\theta_2)c(\theta_3) - s(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) & -s(\theta_1)c(\theta_2)s(\theta_3) - s(\theta_1)s(\theta_2)c(\theta_3) & -c(\theta_1) & 2 * s(\theta_1) + 15,6 * s(\theta_1)c(\theta_2)c(\theta_3) - 15,6 * s(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) + 13,65 * s(\theta_1)c(\theta_2) \\ s(\theta_2)c(\theta_3) + c(\theta_2)s(\theta_3) & -s(\theta_2)s(\theta_3) + c(\theta_2)c(\theta_3) & 0 & 15,6 * s(\theta_2)c(\theta_3) + 15,6 * c(\theta_2)s(\theta_3) + 13,65 * s(\theta_2) + 18,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir daqui, foram definidas as angulações das juntas, de forma a representar o ponto no plano onde a garra estará na sua posição final. Foram definidas três posições para o modelo, com base na angulação de suas juntas. Os ângulos definidos foram:

- Posição 1: $\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 45^\circ, \theta_3 = -135^\circ$;
- Posição 2: $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -10^\circ, \theta_3 = -90^\circ$.
- Posição 3: $\theta_1 = 20^\circ, \theta_2 = -31^\circ, \theta_3 = -9,7^\circ$

4.8 EQUAÇÕES CINEMÁTICA INVERSA

De posse das matrizes total e total simbólica apresentadas anteriormente, pode-se encontrar as equações correspondentes aos ângulos das juntas do manipulador, igualando a matriz total aos pontos presentes na matriz simbólica total.

Assim, obtém-se as seguintes equações para os pontos P_x, P_y e P_z :

$$P_x = 2 * c(\theta_1) + 15,6 * c(\theta_1)c(\theta_2) c(\theta_3) - 15,6 * c(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) + 13,65 * c(\theta_1)c(\theta_2) \quad (7)$$

$$P_y = 2 * s(\theta_1) + 15,6 * s(\theta_1)c(\theta_2) c(\theta_3) - 15,6 * s(\theta_1)s(\theta_2)s(\theta_3) + 13,65 * s(\theta_1)c(\theta_2) \quad (8)$$

$$P_z = 15,6 * s(\theta_2) c(\theta_3) + 15,6 * c(\theta_2)s(\theta_3) + 13,65 * s(\theta_2) + 18,8 \quad (9)$$

Depois de encontrar as equações, pode-se encontrar os valores para os ângulos θ_1, θ_2 e θ_3 , isolando-os através de manipulação algébrica. As equações inversas podem variar de um quadrante para outro, devido à mudança de polaridade dos ângulos, por isso, as equações a seguir são válidas para o primeiro quadrante.

As Equações 10, 11 e 12 representam os valores dos ângulos necessários para alcançar os pontos P_x, P_y e P_z :

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{P_y}{P_x} \quad (10)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{P_z - 18,8}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}} - \tan^{-1} \frac{15,6 * s(\theta_3)}{15,65 + 15,6 * c(\theta_3)} \quad (11)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - 18,8)^2 - 15,65^2 - 15,6^2}{2 * 15,65 * 15,6} \quad (12)$$

As simplificações foram feitas pelo MATLAB, juntamente com relações trigonométricas simplificadas pelo autor. Ao realizar a comparação entre os valores obtidos pela cinemática inversa e direta, houve uma diferença entre as angulações para θ_2 e θ_3 , relacionada ao fato de ter sido utilizado o valor de θ_2 para o cálculo de θ_3 . Segundo a forma

geométrica, estes ângulos são complementares e podem variar entre si. Estas diferenças estão demonstradas no tópico Resultados e Discussão.

Depois de obter as equações para as juntas e os pontos, pode-se validar o modelo de acordo com programação realizada para verificar a movimentação do mesmo.

4.9 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validação do modelo, foi calculada de forma teórica a matriz T com os valores de ângulo para as juntas definidos. Para isso, foi implementado um código no MATLAB, onde a partir dos parâmetros do modelo e da matriz homogênea parcial, é realizado o cálculo das homogêneas parciais e depois as multiplica para obtenção da matriz T. O programa pode ser observado na Figura 33 abaixo:

Figura 33 - Código no MATLAB para cálculo das matrizes parciais e total

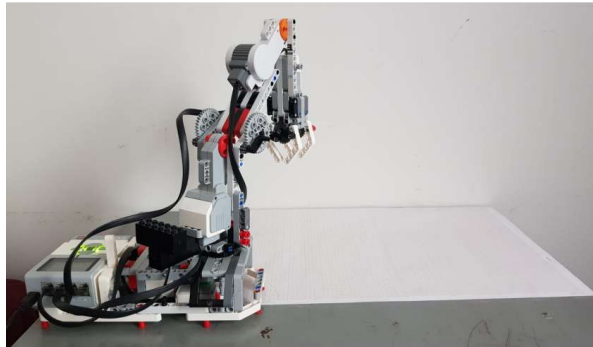
```
%% Matrizes Homogêneas
|
teta1=60; %Movimento Junta 1
teta2=45; %Movimento Junta 2
teta3=-135; %Movimento Junta 3
MatrizDH = [teta1 90 18.3 2;teta2 0 0 13.5;teta3 0 0 16.0]; %Matriz de Parâmetros

for i=1:3 %Loop que calcula as matrizes homogêneas Parciais
Homogenea=[cosd(MatrizDH(i,1)) -sind(MatrizDH(i,1))*cosd(MatrizDH(i,2)) sind(MatrizDH(i,1))*sind(MatrizDH(i,2)) MatrizDH(i,4)*cosd(MatrizDH(i,1));
sind(MatrizDH(i,1)) cosd(MatrizDH(i,1))*cosd(MatrizDH(i,2)) -cosd(MatrizDH(i,1))*sind(MatrizDH(i,2)) MatrizDH(i,4)*sind(MatrizDH(i,1));
0 sind(MatrizDH(i,2)) cosd(MatrizDH(i,2)) MatrizDH(i,3);
0 0 0 1];
fprintf('\n')
VetMatrizT(:,i)=Homogenea %Armazena as matrizes homogêneas
end
MatrizTotal=VetMatrizT(:,1)*VetMatrizT(:,2)*VetMatrizT(:,3); %Multiplica as matrizes
fprintf('\n');
fprintf('Matriz Total');
fprintf('\n');
disp(MatrizTotal); %Matriz Total
```

Fonte: Do Autor (2022)

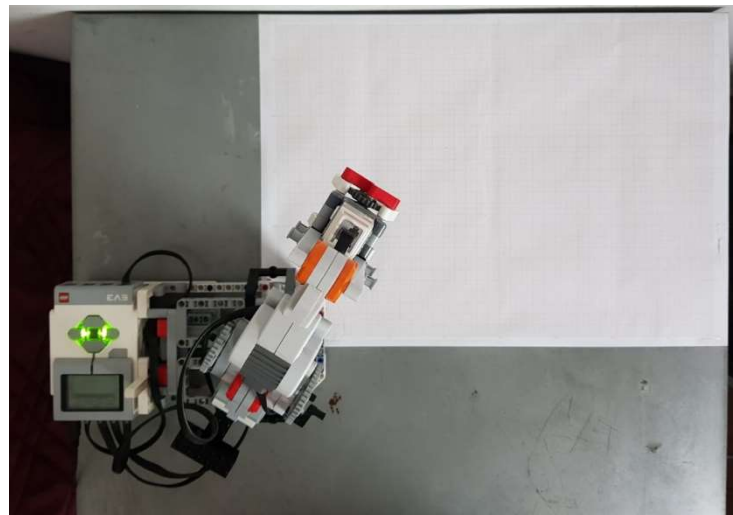
Então, o modelo foi colocado em uma folha de papel milimetrado, para que fossem obtidas as posições. Foram feitas cinco medidas do modelo partindo da posição inicial até os ângulos de junta escolhidos, para minimizar os erros. Depois, as melhores medidas de cada posição foram utilizadas para as comparações. Nas Figuras 34 e 35, pode-se observar o modelo na Posição 1, pela vista posterior e superior:

Figura 34 - Vista posterior do modelo na posição 1: $\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 45^\circ, \theta_3 = -135^\circ$



Fonte: Do Autor (2022)

Figura 35 - Vista superior do modelo na posição determinada



Fonte: Do Autor (2022)

A comparação entre os resultados pode ser verificada na Tabela 4, para os ângulos definidos:

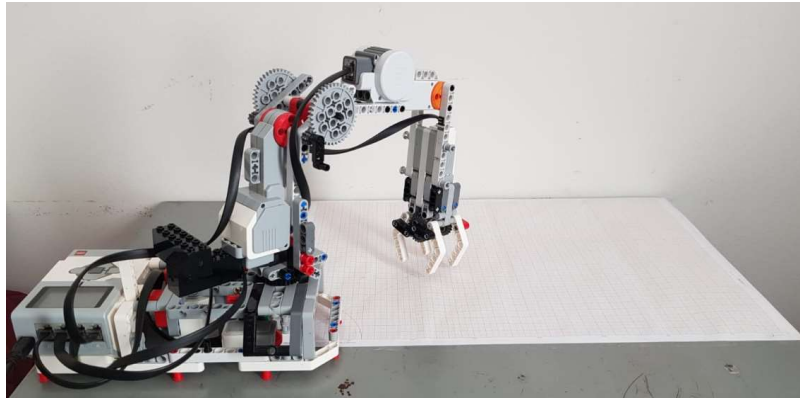
Tabela 4 - Comparação entre valor teórico e prático para o modelo Posição 1

	Valores Teóricos (cm)	Valor Modelo (cm)	Erro Relativo (%)
X	5,83	5,80	0,51
Y	10,09	10,00	0,89
Z	12,85	12,80	0,39

Fonte: Do Autor (2022)

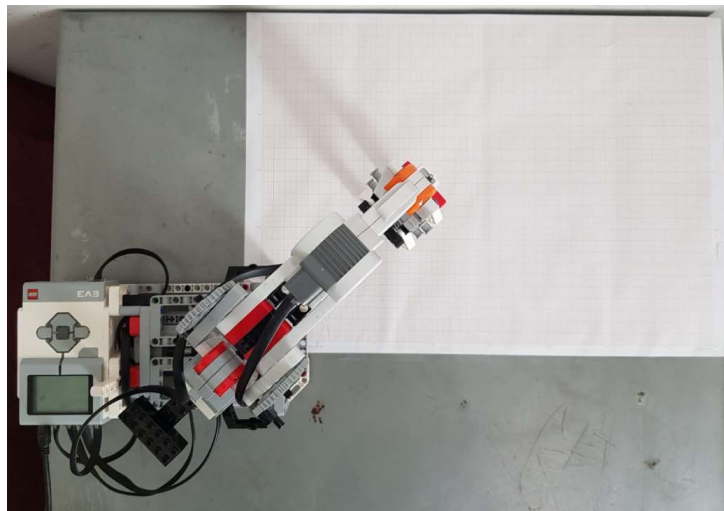
Posteriormente, foi feita a mesma aferição para a Posição 2:

Figura 36 - Vista posterior do modelo na posição 2: $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -10^\circ, \theta_3 = -90^\circ$



Fonte: Do Autor (2022)

Figura 37 - Vista superior do modelo na posição determinada



Fonte: Do Autor (2022)

A comparação entre os resultados pode ser verificada abaixo na Tabela 5, para os ângulos definidos:

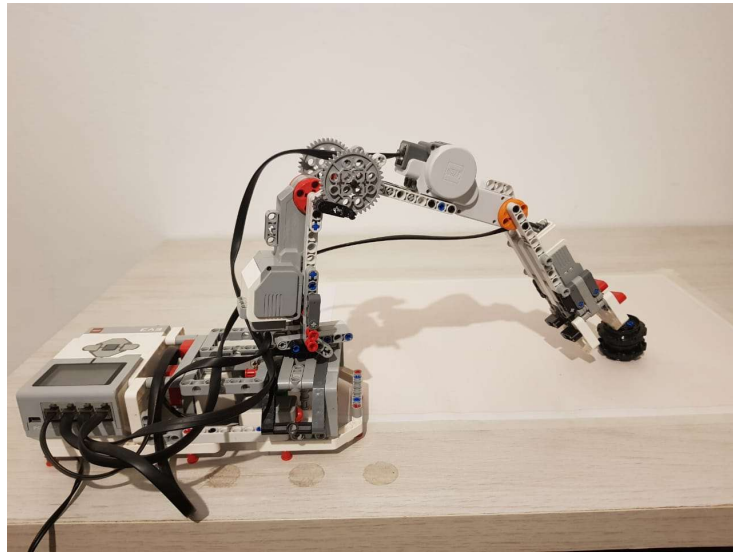
Tabela 5 - Comparação entre valor teórico e prático para o modelo Posição 2

	Valores Teóricos (cm)	Valor Modelo (cm)	Erro Relativo (%)
X	9,04	9,55	5,62
Y	9,04	9,30	2,86
Z	1,07	0,90	15,67

Fonte: Do Autor (2022)

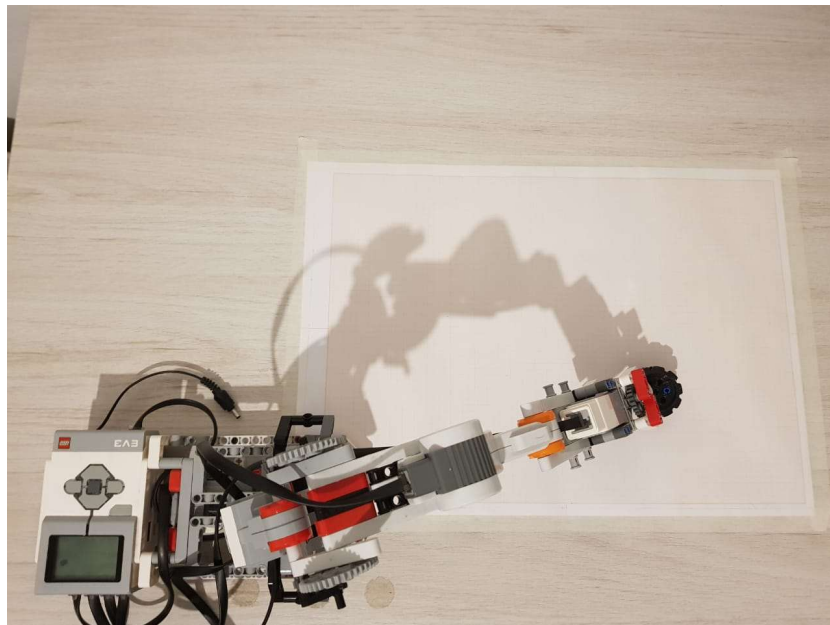
Para validação da área de trabalho, foi definido um ponto extremo do espaço de trabalho, e encontrada a posição das suas juntas para alcançá-lo. Os resultados podem ser observados nas Figuras 38 e 39 à seguir:

Figura 38 - Vista posterior do modelo na posição 3: $\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = -31^\circ$, $\theta_3 = -9,7^\circ$



Fonte: Do Autor (2022)

Figura 39 - Vista superior do modelo na posição determinada



Fonte: Do Autor (2022)

A comparação entre os resultados pode ser verificada na Tabela 6, da próxima página, para os ângulos definidos:

Tabela 6 - Comparação entre valor teórico e prático para o modelo Posição 3

	Valores Teóricos (cm)	Valor Modelo (cm)	Erro Relativo (%)
X	23,92	24,30	1,16
Y	8,70	8,75	2,86
Z	1,50	0,60	39,93

Fonte: Do Autor (2022)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Obteve-se as matrizes parciais e total do MATLAB, e partindo da matriz total, foi possível encontrar as coordenadas para a garra no plano XYZ. Abaixo, pode-se observar as matrizes obtidas para a Posição 1:

Figura 40 – Matrizes homogêneas parciais Posição 1

```
VetMatrizT(:, :, 1) =
    0.5000         0    0.8660    1.0000
    0.8660         0   -0.5000    1.7321
         0    1.0000         0    18.8000
         0         0         0     1.0000

VetMatrizT(:, :, 2) =
    0.7071   -0.7071         0    9.6520
    0.7071    0.7071         0    9.6520
         0         0    1.0000         0
         0         0         0    1.0000

VetMatrizT(:, :, 3) =
   -0.7071    0.7071         0  -11.0309
   -0.7071   -0.7071         0  -11.0309
         0         0    1.0000         0
         0         0         0    1.0000
```

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 41 - Matriz total Posição 1

Matriz Total			
0	0.5000	0.8660	5.8260
0	0.8660	-0.5000	10.0909
-1.0000	0	0	12.8520
0	0	0	1.0000

Fonte: Do Autor (2022)

Para a Posição 2:

Figura 42 – Matrizes homogêneas parciais Posição 2

VetMatrizT(:, :, 1) =

0.7071	0	0.7071	1.4142
0.7071	0	-0.7071	1.4142
0	1.0000	0	18.8000
0	0	0	1.0000

VetMatrizT(:, :, 2) =

0.9848	0.1736	0	13.4426
-0.1736	0.9848	0	-2.3703
0	0	1.0000	0
0	0	0	1.0000

VetMatrizT(:, :, 3) =

0	1.0000	0	0
-1.0000	0	0	-15.6000
0	0	1.0000	0
0	0	0	1.0000

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 43 - Matriz total Posição 2

Matriz Total			
-0.1228	0.6964	0.7071	9.0041
-0.1228	0.6964	-0.7071	9.0041
-0.9848	-0.1736	0	1.0667
0	0	0	1.0000

Fonte: Do Autor (2022)

E para a posição 3:

Figura 44 – Matrizes homogêneas parciais Posição 3

```
VetMatrizT(:, :, 1) =
    0.9397      0      0.3420      1.8794
    0.3420      0     -0.9397      0.6840
         0     1.0000         0     18.8000
         0         0         0         1.0000
```

```
VetMatrizT(:, :, 2) =
    0.8551     0.5185         0     11.6720
   -0.5185     0.8551         0     -7.0772
         0         0     1.0000         0
         0         0         0         1.0000
```

```
VetMatrizT(:, :, 3) =
    0.9857     0.1685         0     15.3770
   -0.1685     0.9857         0     -2.6284
         0         0     1.0000         0
         0         0         0         1.0000
```

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 45 - Matriz total posição 3

```
Matriz Total
    0.7099     0.6156     0.3420     23.9227
    0.2584     0.2241    -0.9397     8.7071
   -0.6551     0.7555         0     1.5027
         0         0         0         1.0000
```

Fonte: Do Autor (2022)

De onde puderam ser extraídos, na última coluna da matriz total, os pontos xyz do modelo para as posições 1, 2 e 3, que estão na Tabela 7:

Tabela 7 - Coordenadas da Garra para as três posições

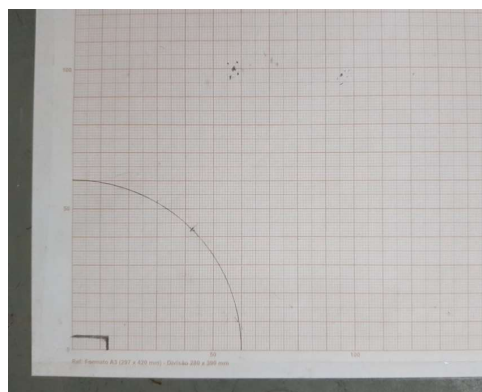
Coordenadas no Plano XYZ	X	Y	Z
Posição 1	5,83	10,09	12,85
Posição 2	9,00	9,00	1,07
Posição 3	23,92	8,71	1,50

Fonte: Do Autor (2022)

Com o auxílio do papel milimetrado, régua, transferidor e as matrizes parciais e totais calculadas no MATLAB, puderam ser traçados os pontos finais do modelo, segundo o movimento das juntas.

Abaixo, podem-se observar as medidas obtidas pelo manipulador, para as Posições 1 e 2. Elas foram medidas a partir do fim da garra, ao longo do eixo X_3 do modelo e projetadas no papel milimetrado:

Figura 46 - Papel Milimetrado com Medições



Fonte: Do Autor (2022)

Os resultados obtidos foram esperados, levando em conta as folgas e limitações do modelo, que representaram uma pequena diferença entre as medidas práticas do modelo. Há um erro de $0,4 \pm 0,1$ (cm) de altura, e $0,3 \pm 0,1$ (cm) de largura, porém, não são evidentes em todas as posições. Na Posição 2, por exemplo, o erro ficou evidente, visto que o robô estava em uma posição que favorece o desbalanceamento, onde o elo dois estava com angulação negativa, projetando o elo três para frente, como pode ser observado nas Figuras, 37 e 38. Já na Posição 3 o erro se agrava um pouco mais, principalmente com relação ao eixo z, pois mesmo com a peça no local na Figura 39, pode-se observar que ele se apoia a ela para não atingir o papel milimetrado, assim, pode-se constatar que o modelo tem uma maior diferença do valor teórico ao atingir seus extremos do espaço de trabalho, devido ao peso de seus elos.

Ao fim, foi utilizado o melhor valor para fazer a comparação com os valores práticos e a sua diferença da teórica, que é chamada de erro relativo (%).

Para validação das equações obtidas na seção 4.8 para cinemática inversa, foi realizado o cálculo dos ângulos definidos para as Posições 1, 2 e 3, definidas no tópico 4.7, a partir dos valores de cada um dos pontos P_x , P_y e P_z obtidos pela cinemática direta.

Os resultados foram obtidos utilizando o MATLAB e estão presentes na Tabela 8 abaixo. Imagens do código podem ser vistas na seção Anexos, ao fim do trabalho:

Tabela 8 - Angulações para as juntas obtidas pela cinemática inversa

	θ_1	θ_2	θ_3
Posição 1	59,98	38,00	-130,50
Posição 2	45,00	-8,70	-91,21
Posição 3	20,00	-24,22	-19,98

Fonte: Do Autor (2022)

De posse dos valores, podemos obter a comparação para cada posição, nas tabelas a seguir:

Tabela 9 - Comparação entre ângulos definidos e encontrados por cinemática inversa para Posição 1

	Valores Definidos (°)	Valor Cinemática Inversa (°)
θ_1	60,00	59,98
θ_2	45,00	38,00
θ_3	-135,00	-130,50

Fonte: Do Autor (2022)

Tabela 10 - Comparação entre ângulos definidos e encontrados por cinemática inversa para Posição 2

	Valores Definidos (°)	Valor Cinemática Inversa (°)
θ_1	45,00	45,00
θ_2	-10,00	-8,70
θ_3	-90,00	-91,21

Fonte: Do Autor (2022)

Tabela 11 - Comparação entre ângulos definidos e encontrados por cinemática inversa para Posição 3

	Valores Definidos (°)	Valor Cinemática Inversa (°)
θ_1	20,00	20,00
θ_2	-31,00	-24,22
θ_3	-9,70	-19,98

Fonte: Do Autor (2022)

Pode-se observar que os valores foram próximos, e as variações observadas entre os ângulos θ_2 e θ_3 se mostraram complementares, ou seja, as variações entre eles não representam uma variação na posição do manipulador, quando somadas.

Além dos conceitos de cinemática direta e inversa que foram utilizados e seus respectivos métodos, foi feita uma simulação utilizando os parâmetros do modelo, aplicados à Robotics ToolBox de Peter Corke, um simulador no MATLAB para encontrar a cinemática inversa e simular a movimentação do modelo. A partir dela foram calculadas as angulações das juntas necessárias para alcançar um objeto, em um ponto especificado no plano cartesiano, e fazer a sua movimentação para outro ponto no plano. O modelo conseguiu alcançar a peça, que estava na posição (20,5,1,5), em centímetros, e transportá-la para o ponto (10,15,1,5), em centímetros, seguindo as coordenadas para o plano xyz. Os valores encontrados para as juntas, podem ser vistos na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12 - Angulação das juntas para movimento de objeto Posição inicial a final

	θ_1	θ_2	θ_3
Ponto inicial	14,04	-10,97	-59,50
Ponto final	56,31	-8,02	-72,72

Fonte: Do Autor (2022)

De posse das angulações, foi feito um programa onde o robô parte da posição inicial e chega na final, com algumas movimentações extras para melhor performance e evitar proximidade com o objeto antes de pegá-lo.

O resultado foi satisfatório, visto que durante os testes o robô alcança a peça em todas as vezes e a posiciona no local delimitado, com uma margem de erro de $\pm 0,5\text{cm}$ no eixo x e $\pm 0,3\text{cm}$ no eixo y.

Para melhor demonstração, sua movimentação neste teste será filmada e apresentada na defesa do TCC.

Assim, foi possível validar a convenção de Denavit-Hartenberg, com uma diferença pequena entre os valores teóricos e práticos da cinemática direta, que só foi maior em um caso, devido às limitações de distribuição do peso do robô.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho consistiu no entendimento da robótica como uma ferramenta de auxílio em tarefas importantes e cotidianas da nossa sociedade, algumas simples e outras complexas e perigosas.

Foi possível compreender questões da cinemática de uma forma prática, onde a assimilação do conteúdo se deu de forma mais simples, e fixar os conceitos. Além de uma abordagem histórica sobre o assunto, e os passos que levaram a criação dos métodos do estudo da robótica fixa atualmente.

Foi validada a convenção de Denavit-Hartenberg para manipuladores de cadeia simples, utilizando o modelo construído e programado com o kit de robótica LEGO *Mindstorms* EV3, possibilitando, por meio deste o estudo do método.

Foi obtido um erro relativo baixo, próximo ao erro dos equipamentos de medida para posições próximas ao centro de gravidade do robô e com um erro mais acentuado nas extremidades, devido a um desbalanceamento no modelo e falta de rigidez no material das peças, onde o robô fica um pouco inclinado no sentido da garra, o que faz com que as medições tenham algumas variações, porém não comprometeram o objetivo do trabalho. Para solucionar este problema, poderia ser feita a análise das forças e dinâmica do modelo manipulador, parametrizações realizadas em diversos robôs antropomórficos na indústria. Estes cálculos podem ser realizados em um próximo estudo, assim como a diminuição dos ranges das juntas dois e três, a fim de diminuir o erro relativo.

Ainda, foi gravado um vídeo onde é explicado o funcionamento do modelo e sua parametrização de forma breve, e apresentado em sala de aula na disciplina de Robótica da UFLA, com o objetivo de uma melhor compreensão e despertar interesse dos alunos pela área.

Ainda para um próximo estudo a partir deste trabalho, poderia ser implementado um punho rotacional ao invés do fixo utilizado, que concederia ao robô mais três graus de liberdade, aumentando a sua mobilidade e alcance de objetos em outra direção, parametrizado pelo método de Euler, para dinâmica de um corpo rígido. O modelo em questão é um dos mais comuns na indústria.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Micaelle. IRON CUP 2018. **Portal da Inovação e Qualidade**, IF Campus Vitória da Conquista, 12 mar. 2018. Disponível em: <https://inq.conquista.ifba.edu.br/v1/iron-cup-2018/>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- ANTUNES, Juliana. O que é a FLL? Descubra como funciona o Torneio de Robótica FIRST LEGO League!. **Tecnologia Educacional**, p. 1, 3 ago. 2017. Disponível em: <https://tecnologia.educacional.com.br/blog-robotica-e-stem/o-que-e-a-fll-descubra-como-funciona-o-torneio-de-robotica-da-first-lego-league/>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- BARBOSA, F.C. **Educação e Robótica educacional na escola pública: As artes do fazer**. 2011. 182 p. Dissertação (Mestre em Educação) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- BARROS, R. P. RoboEduc - **Uma ferramenta para programação de robôs LEGO**. Natal, 2008. Monografia de graduação-Faculdade de Engenharia de Computação-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- BASTOS, A. C. S. (2000). **Modos de partilhar: a criança e o cotidiano da família**. Taubaté: Cabral Editora Universitária.
- BAYER, F.M. et.al. Automação de Sistemas -Material Didático elaborado pelo colégio técnico industrial de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2011.
- BEER, R.D.; CHIEL, H.J.; DRUSHEL, R.F. **Using Autonomous Robotics to Teach Science and Engineering**. *Communications of the ACM*, Junho 1999.
- BERTON, Fabio; SANDINI, Giulio; METTA, Giorgio. **Anthropomorphic Visual Sensors**. *Encyclopedia of Sensors*, v. 10, p. 1-16, 2006.
- CANA ONLINE (Ribeirão Preto, SP). Grunner amplia frota de equipamentos em operação nesta safra. **Cana Online**, p. 1, 27 abr. 2021. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/grunner-amplia-frota-de-equipamentos-em-operacao-nesta-safra.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- CRAIG, John J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: PEARSON, 2005. 400 p. ISBN 0-13-123629-6.
- DENAVIT, J.; HARTENBERG, R. S. **A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices**. *Journal of Applied Mechanics*, June 1955.
- DENSFORD, Fink. 11 surgical robotics companies you need to know. **The Robot Report**, p. 1, 1 fev. 2017. Disponível em: <https://www.therobotreport.com/11-surgical-robotics-companies-you-need-to-know/2/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

EDITORA GLOBO. Redação Galileu. Robô que descobriu água em Marte comemora 5 mil dias marcianos. **Galileu**, Revista Galileu, p. 1, 16 fev. 2018. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/02/robo-que-descobriu-agua-em-marte-comemora-5-mil-dias-marcianos.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.

ENGENHO EDITORA TÉCNICA LTDA. (São Paulo - SP). *Brasilengenharia* (ed.). ABB apresenta o YuMi, o primeiro robô de dois braços realmente colaborativo do mundo. In: KREAB. **ABB apresenta o YuMi, o primeiro robô de dois braços realmente colaborativo do mundo**. 2021. Disponível em: <http://brasilengenharia.com/portal/noticias/destaque/12351-abb-apresenta-o-yumi-o-primeiro-robo-de-dois-bracos-realmente-colaborativo-do-mundo>. Acesso em: 14 nov. 2022.

EQUIPE Tróia, 2013. Disponível em: <http://www.nucleoestudo.ufla.br/troia/>. Acesso em: 17 fev. 2022.

G1 (São Paulo). EUA reforçam exército com pelo menos mais 2 mil robôs ‘guerreiros’: ‘Talon’ é especializado em desarmar bombas, ou detonar explosivos de forma segura. **G1**, G1 Notícias Tecnologia, p. 1, 29 maio 2008. Disponível em: <https://g1.globo.com/Noticias/Tecnologia/0,,MUL583539-6174,00-EUA+REFORCAM+EXERCITO+COM+PELO+MENOS+MAIS+MIL+ROBOS+GUERREIROS.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.

G1 (Sul de Minas). Sumô Lego é um dos destaques de competição de robôs no Sul de MG. **G1 Sul de Minas**, Santa Rita do Sapucaí, p. 1, 4 mar. 2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2015/03/sumo-lego-e-um-dos-destaques-de-competicao-de-robos-no-sul-de-mg.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.

GALLOPOULOS E., HOUSTIS E. and RICE J. R., **Computer as thinker/doer: problem-solving environments for computational science**, in *IEEE Computational Science and Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 11-23, Summer 1994, doi: 10.1109/99.326669.

GARCIA, E.; JIMENEZ, M. A.; SANTOS, P. G.; ARMADA, M. **The Evolution of Robotics Research: From Industrial Robotics to Field and Service Robotics**. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Março 2007.

GLOBO UNIVERSIDADE. Brasileiros vêm conquistando espaço em competições de robôs. **Globo**, p. 1, 12 mar. 2014. Disponível em: <http://redeglobo.globo.com/globouniversidade/noticia/2014/03/brasileiros-vem-conquistando-espaco-em-competicoes-de-robos.html>. Acesso em: 15 nov. 2022.

GOMES, Paulo. Robôs do IF marcaram presença nas pistas da OBR. **Instituto Federal Mato Grosso do Sul**, p. 1, 24 ago. 2018. Disponível em: <https://www.ifms.edu.br/imagens/imagens-noticias/obr-2018-fotos/obr2018-4/view>. Acesso em: 15 nov. 2022.

GROOVER, Mikell P. *Robótica: Tecnologia e Programação*. Porto Alegre: McGrawHill, 1988.

HEALTHDAY (Estados Unidos). **Meet Nao, the Robot That Helps Treat Kids With Autism**: Health Technology. HealthDay 28 maio 2022. Fotografia. Disponível em: <https://consumer.healthday.com/cognitive-health-information-26/autism-news-51/meet-nao-the-robot-that-helps-treat-kids-with-autism-733731.html>. Acesso em: 14 nov. 2022.

IROBOT (Vila Nova Conceição - São Paulo - SP). Robô Aspirador de Pó Inteligente Bivolt Roomba® 614 iRobot. In: **Robô Aspirador de Pó**, 2020. Disponível em: <https://www.irobotloja.com.br/roomba-614-robo-aspirador-de-po-inteligente-bivolt-irobot-p/p>. Acesso em: 14 nov. 2022.

ISO/TC 299 ROBOTICS. **Robots and robotic devices — Vocabulary**. In: **ISO 8373:2012**, Março 2012. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/55890.html>. Acesso em: 16 fev. 2022.

JDV (Santa Catarina). **Torneio de robótica da FLL reúne equipes de todo o Estado**. JDV, Jaraguá do Sul, p. 1, 7 fev. 2020. Disponível em: <https://www.jdv.com.br/torneio-de-robotica-da-fll-reune-equipes-de-todo-o-estado/>. Acesso em: 14 nov. 2022.

KAWASAKI ROBOTICS (Im Taubental 32, 41468 Neuss, Germany). History of Kawasaki Robotics. **Kawasaki Robotics**, p. 1, 28 nov. 2019. Disponível em: <https://kawasakirobotics.com/eu-africa/company/history/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

KOH, Dong Hoon; JANG, WonSik; PARK, JaeWon; HAM, WonSik; HAN, Woong Kyu; RHA, Koon Ho; CHOI, Young Deuk. **Efficacy and Safety of Robotic Procedures Performed Using the da Vinci Robotic Surgical System at a Single Institute in Korea: Experience with 10000 Cases**. **Yonsei Medical Journal**, Yonsei, Outubro 2018.

KORKMAZ, Özgen. **The Effect of Lego Mindstorms Ev3 Based Design Activities on Students' Attitudes towards Learning Computer Programming, Self-efficacy Beliefs and Levels of Academic Achievement**. **Baltic J. Modern Computing**, Amasya University, Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, Amasya, Turkey, ano 2016, v. 4, n. 4, p. 994-1007, 2016.

KURFESS, Thomas R. **ROBOTICS AND AUTOMATION HANDBOOK**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005. 579 p. ISBN 0-8493-1804-1.

LEGO, 2022. Disponível em: <https://www.lego.com/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

NATIONAL MARINE SANCTUARY FOUNDATION (8455 Colesville Road, Suite 1275, Silver Spring, MD 20910). **WHAT IS AN ROV?**: National Marine Sanctuary Foundation. **National Marine Sanctuary Foundation Blog**, 27 abr. 2020. Disponível em: <https://marinesanctuary.org/blog/what-is-an-rov/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

MARTINS, F.N.; OLIVEIRA, H. C.; OLIVEIRA, G. F. **Robótica como Meio de Promoção da Interdisciplinaridade no Ensino Profissionalizante**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES), 2012.

MENZEL, Peter; D'ALUISIO, Faith. **Robo sapiens: Evolution of a new species**. Mit Press, 2000.

MOON, F. C. Franz Reuleaux: Contributionsto 19th C. **KinematicsandTheoryofMachines. Applied Mechanics Reviews**, Ithaca, NY, 2003.

NETO, J. A. C.; ARAÚJO, D. C.; DIAS, W. R. A. **Iniciando na Robótica com a plataforma LEGO Mindstorms. Anais da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT)**, v. 2, ed. 1, 27 out. 2021.

OLIMPIÁDA Brasileira de Robótica. 2021. Disponível em: <http://www.obr.org.br/>. Acesso em: 17 fev. 2022.

OLIVEIRA, E. J. S. **Pensamento Computacional e Robótica: UM ESTUDO SOBRE HABILIDADES DESENVOLVIDAS EM OFICINAS DE ROBÓTICA EDUCACIONAL**. Orientador: Prof. Msc. Ana Liz Souto Oliveira de Araújo. 2016. 82 p. Trabalho de Conclusão de curso (Licenciatura Ciência da Computação) - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, Rio Tinto - PB, 2016.

PENHA, Bruno Schuavab; QUEIROZ, Mariana Emer; ROSSINI, Flávio Luiz. **Modelagem e Análise da Cinemática Direta e Inversa de Manipulador Robótico com Cinco Juntas Rotativas. IV Simpósio de Tecnologia e Engenharia Eletrônica - IV SIMTEEL**, Campo Mourão - PR, Novembro 2016.

PETERCORKE. **Robotics System Toolbox**. Disponível em: <https://petercorke.com/toolboxes/robotics-toolbox/>. Acesso em: 17 jan. 2022.

PIO, José Luiz de Souza; CASTRO, Thais Helena Chaves; JÚNIOR, Alberto Nogueira de Castro. **A Robótica Móvel como Instrumento de Apoio à Aprendizagem de Computação. XVII Simpósio Brasileiro de Informática na Educação - SBIE - UNB/UCB, MANAUS - AM, 2006**.

PIRES, V. C. N. **Tecnologias mudam métodos tradicionais de ensino**. Disponível em: <http://www.bauru.unesp.br/fc/boletim/informat/artigov.htm> Acesso em: 10 fev. 2022.

REDDY, A. Chennakesava. **Difference Between Denavit – Hartenberg (D-H) Classical and Modified conventions for forward kinematics of robotics with case study. International Conference on Advanced Materials and manufacturing Technologies**, JNTUH College of Engineering Hyderabad, 18 dez. 2014.

ROBOCore. 2022. Disponível em: <https://www.robocore.net/>. Acesso em: 17 fev. 2022.

RODRIGUES, Vinícius. **MODELO CINEMÁTICO DE UM MANIPULADOR DE 6 GDL**. Orientador: Prof. Dr. Rafael A.C. Laranja. 2019. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Eng. de Controle e Automação) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, julho de 2019.

RODRIGUES, Elaine. **Sumô de Robôs: o que a robótica tem ensinado aos estudantes?**. Campus Arapiraca, Instituto Federal de Alagoas, p. 1, 4 out. 2018. Disponível

em: <https://www2.ifal.edu.br/campus/arapiraca/noticias/sumo-de-robos-o-que-a-robotica-tem-ensinado-aos-estudantes>. Acesso em: 14 nov. 2022.

ROSÁRIO, João Maurício. *Princípios de mecatrônica*. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: PEARSON, 2010. 1151 p. ISBN 978-0-13-604259-4.

SACOMANO, J.B.; GONÇALVES, R.F.; SILVA, M.T.; S.H., BONILLA; SÁTYRO, W.C. **Indústria 4.0: Conceitos e Fundamentos**. 1. ed. SÃO PAULO - SP: BUCHER, 2018. 182 p. v. 1. ISBN 978-85-212-1370-3.

SHAMSUDDIN, Syamimi; YUSSOF, Hanafiah; ISMAILB, Luthffidzhar; MOHAMED, Salina; HANAPIAH, FazahAkhtar; ZAHARI, Nur Ismarrubie. **Initial Response in HRI- a Case Study on Evaluation of Child with Autism Spectrum Disorders Interacting with a Humanoid Robot NAO. International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors**, Serdang, Malaysia, 2012.

SEDRAZ, João C. S. S.; LINDER, Marcelo; IRMÃO, Marcos A. da S; PERRONE, Ricardo da Silva; (2006). **Modelagem cinemática de um robô manipulador**. Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia.

SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Handbook Springer of Robotics**. 1. ed. Berlin: Springer, 2008. 1611 p. ISBN 978-3-540-23957-4.

SIMPLÍCIO, Paulo Victor Galvão; LIMA, Beatriz Rêgo; JUNKES, Janaína Accordi. **MANIPULADORES ROBÓTICOS INDUSTRIAIS. Ciências exatas e tecnológicas**, Aracaju, v. 3, ed. 3, p. 85-94, Outubro 2016.

SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. **Robot modeling and control**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. 478 p.

TAJRA, S. F. **Informática na Educação: novas ferramentas pedagógicas para o professor na atualidade**. / Sanmya Feitosa Tajra. 3.ed. rev. atual e ampl. – São Paulo: Érica, 2001.

TORNEIO Brasil de Robótica, 1 out. 2020. Disponível em: <https://www.torneiobrasilderobotica.com.br/>. Acesso em: 16 fev. 2022.

UFLA (Lavras). Equipe de Robótica Tróia. Robôs. In: UFLA (Lavras). Equipe de Robótica Tróia. **Site da Equipe**. 2013. Disponível em: <http://www.nucleoestudo.ufla.br/troia/>. Acesso em: 15 nov. 2022.

WEIHMANN, Lucas. **Modelagem e otimização de forças e torques aplicados por robôs com redundância cinemática e de atuação em contato com o meio**. Orientador: Prof. Daniel

Martins, Dr. Eng. 2011. 322 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

WOLF, D. F.; OSÓRIO, F. S. **Intelligent Robotics: From Simulation to Real World Applications**. São Carlos - SP: Congresso da SBC – Sociedade Brasileira de Computação (Brasil)., 2009. 52 p. ISBN 9788587926548.

ANEXOS

Figura 47 - Coordenadas garra Posição 1

```

Coordenadas Plano XYZ
5.8260
10.0909
12.8520
1.0000

```

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 48 - Coordenadas garra Posição 2

```

Coordenadas Plano XYZ
9.0041
9.0041
1.0667
1.0000

```

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 49 - Coordenadas garra Posição 3

```

Coordenadas Plano XYZ
23.9227
8.7071
1.5027
1.0000

```

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 50 - Código Matlab Cinemática Inversa

```

Px='Posição X';
Py='Posição Y';
Pz='Posição Z';

r=sqrt (Px^2+Py^2);

tetal=atand(Py/Px);
teta3=-acosd( ((r^2)+((Pz-18.8)^2)-(15.65^2)-(15.6^2))/(2*15.6*15.65));
teta2=atand((Pz-18.8)/r)-atand((15.6*sind(teta3))/(15.65+15.6*cosd(teta3)));

```

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 51 - Ângulos para Posição 1

tetal =
59.9807

teta3 =
-130.4954

teta2 =
38.0005

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 52 - Ângulos para Posição 2

tetal =
45

teta3 =
-91.2126

teta2 =
-8.6953

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 53 - Ângulos para Posição 3

tetal =
20.0020

teta3 =
-19.9791

teta2 =
-24.2232

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 54 - Código MATLAB Cinemática Inversa

```

%% Gerando o modelo

L1=Link('d',18.8,'a',2,'alpha',pi/2);
L1.isrevolute;
L1.A(0.2)
L2=Link('d',0,'a',13.65,'alpha',0);
L2.isrevolute;
L2.A(0.2)
L3=Link('d',0,'a',15.6,'alpha',0);
L3.isrevolute;
L3.A(0.2)

bot = SerialLink([L1 L2 L3], 'name', 'Modelo'); %Define o Modelo à partir dos parâmetros
%Definindo os pontos iniciais e final no plano cartesiano
PXi=20;
PYi=5;
PZi=1.5;

PXf=10;
PYf=15;
PZf=1.5;

Ti = [ 1 0 0 PXi ;
       0 1 0 PYi;
       0 0 1 PZi ;
       0 0 0 1];
Tf = [ 1 0 0 PXf ;
       0 1 0 PYf;
       0 0 1 PZf ;
       0 0 0 1];
pontoInicial=bot.ikine(Ti, 'q0', [0, 0, 0], 'mask',[1, 1, 1, 0, 0, 0],'pinv')*180/pi;
pontoFinal=bot.ikine(Tf, 'q0', [0, 0, 0], 'mask',[1, 1, 1, 0, 0, 0],'pinv')*180/pi;

```

Fonte: Do Autor (2022)

Figura 55 - Ângulos inicial e final obtidos para as juntas θ_1 , θ_2 , θ_3 , respectivamente

```

pontoinicial =

    14.0362   -10.9698   -59.5008

pontofinal =

    56.3099   -8.0158   -72.7211

```

Fonte: Do Autor (2022)