

## 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

### DESENVOLVIMENTO DE UM BRAÇO ROBÓTICO DE 6 EIXOS COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA ESTIMULAR A INOVAÇÃO DE TECNOLOGIA NACIONAL

WILLIAN BUENO SANTOS<sup>1</sup>, ANDRE LUIZ GONTIJO<sup>2</sup>

1 Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus SJBV, w.bueno@aluno.ifsp.edu.br.

2 Professor orientador, IFSP, Câmpus São João da Boa Vista, algontijo@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.05.02-5 Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais.

#### RESUMO:

A era digital e a revolução tecnológica têm transformado profundamente a maneira como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos. Nesse contexto, o presente trabalho de iniciação científica tem como objetivo projetar e construir um braço robótico de 6 eixos, concebido como uma ferramenta didática para uso acadêmico em aulas de robótica e tecnologia. O projeto busca despertar o interesse e engajar futuros alunos em engenharia e inovação, estabelecendo uma base sólida de dados para futuras pesquisas e desenvolvimentos. Assim, pretende-se contribuir de forma significativa para um setor estratégico no avanço tecnológico do país. Afinal, nós, engenheiros, somos movidos por desafios. Então, por que não enfrentar um desafio maior e mais complexo? O processo do projeto abrange desde a modelagem 3D, passando pela cinemática direta e inversa, notação DH (Denavit-Hartenberg), simulação, até o controle preciso das juntas, utilizando tecnologias como encoders magnéticos. Estão previstas a aplicação de ferramentas avançadas, como MATLAB e CoppeliaSim Edu, para o desenvolvimento de uma interface robusta e intuitiva de supervisão, programação e simulação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Braço Robótico; Robótica Educacional; Cinemática Direta e Inversa; Notação Denavit-Hartenberg; MATLAB; CoppeliaSim Edu.

#### DEVELOPMENT OF A 6-AXIS ROBOTIC ARM AS A TEACHING TOOL TO STIMULATE INNOVATION IN NATIONAL TECHNOLOGY

**ABSTRACT:** The digital era and the technological revolution are fundamentally transforming the way we live, work and relate. In this context, this scientific initiation project aims to design and build a 6-axis robotic arm as a teaching tool for academic use in robotics and technology classes, seeking to awaken and engage future students in engineering and innovation, with the purpose of generating a solid foundation of data for future waves and continuations with new scientific work, thus contributing significantly to a strategic sector in the country's technological development. After all, as engineers we are driven by challenges, why not face a bigger and more complex challenge? The process ranges from 3D modeling, direct and inverse kinematics, DH (Denavit-Hartenberg) notation, simulation to fine control of the joints through technologies such as magnetic encoders. It is planned to use sophisticated tools such as MATLAB and CoppeliaSim Edu to develop a robust and intuitive supervision, programming and simulation interface.

**KEYWORDS:** Robotic Arm; Educational Robotics; Direct and Inverse Kinematics; Denavit-Hartenberg notation; MATLAB; CoppeliaSim Edu.

## INTRODUÇÃO

A robótica tem desempenhado um papel cada vez mais relevante no desenvolvimento industrial, oferecendo soluções inovadoras para problemas complexos e repetitivos (NIKU, 2015). A evolução e inovação de máquinas inteligentes vêm sendo constante em nosso meio, pode-se ver claramente isso em fábricas, onde a Robótica, industrial 4.0 e controle moderno apresentam grandes potenciais. Além de suas aplicações industriais, estas tecnologias também emergem como instrumentos e ferramentas educacionais, ajudando a ensinar desde programação até engenharia e ciências físicas. A Robótica tem o potencial de transformar economias. Assim, dado o horizonte de planejamento e um determinado cenário futuro. Os Robôs são elementos muito poderosos da indústria hoje. Eles são capazes de realizar diversas tarefas e operações, são precisos e não requerem os elementos comuns de segurança e conforto que os seres humanos necessitam. (NIKU, 2015).

O objetivo principal das universidades é capacitar os alunos a se tornarem profissionais qualificados, e uma das melhores maneiras de alcançar esse objetivo é por meio de projetos práticos. Nesse contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um braço robótico de seis eixos voltado para uso acadêmico, com o intuito de engajar estudantes nas áreas de engenharia e inovação, além disso, este projeto tem o potencial de ser usado como herança para futuros projetos de extensões e iniciações científicas. A hipótese central é que o uso de ferramentas práticas, como o braço robótico, facilita o aprendizado e desperta o interesse por carreiras tecnológicas. A finalidade do projeto é dar início ao desenvolvimento de uma plataforma que envolve desde a modelagem, cinemática, algoritmos, hardware, simulações até o controle preciso das juntas, contribuindo para a formação de profissionais altamente qualificados para o futuro.

## MATERIAL E MÉTODOS

Mediante ao estudo de tema Robótica proposto por (Saeed B. NIKU et al., 2015) e (John J. CRAIG et al., 2013), o qual disponibiliza documentação e teoria pertinente relevante ao assunto, com clareza é possível entender o funcionamento de um Robô baseado na cinemática que o descreve. Dentre os diversos problemas da Robótica, a cinemática é área do estudo do movimento sem considerar as forças que causam o movimento de suas partes ou articulações, ou seja, sem considerar as forças ou torques que causam esse movimento. Em outras palavras, é a análise da geometria do movimento do robô (CRAIG, 2013). A cinemática é fundamental para o design, controle e programação de robôs, sendo está dividida em duas partes a cinemática direta e inversa. Um sistema pode ser representado de muitas maneiras diferentes e, portanto, pode ter vários modelos matemáticos, dependendo da perspectiva a ser considerada. A dinâmica de muitos sistemas mecânicos, elétricos, térmicos, econômicos, biológicos ou outros pode ser descrita em termos de equações diferenciais. (OGATA, 2015). A cinemática é o modelo matemático do sistema, que é definido como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema com precisão ou, pelo menos, razoavelmente bem. (OGATA, 2015).

Para obter o sistema de equações que governa o sistema. Primeiramente, busca-se desenvolver um modelo cinemático do braço robótico, aplicando os conceitos de Denavit-Hartenberg (DH). A Notação DH é um método sistemático para descrever a geometria cinemática de uma cadeia de corpos rígidos. Ela simplifica a descrição dos parâmetros geométricos ao se concentrar nas juntas, permitindo uma representação mais compacta e eficiente. No livro "Introdução à Robótica" de Saeed B. Niku, são apresentados dois tipos de métodos para encontrar a notação DH de um robô: Método analítico e Método experimental. Na representação DH original, associa-se o eixo de junta ao eixo z e cada matriz é representada pelo produto de quatro transformações básicas envolvendo rotações e translações como podemos observar na Equação (1).

$${}^nT_{n+1} = A_{n+1} = Rot(z - \theta_{n+1}) \times Trans(0,0,d_{n+1}) \times Trans(d_{n+1},0,0) \times Rot(x, \alpha_{n+1}) \quad (1)$$

O termo  $Rot(z - \theta_{n+1})$  representa a rotação  $\theta$  em torno do eixo Z;  $Trans(0,0,d_{n+1})$  a translação  $d$  ao longo do eixo z;  $Trans(d_{n+1},0,0)$  a translação  $a$  ao longo do eixo x; e por fim,  $Rot(x, \alpha_{n+1})$  representa a rotação  $\alpha$  em torno do eixo x. Esta operação resulta numa matriz representada pela Equação (2), sendo que através desta, é realizado o mapeamento de coordenadas entre os elos do robô manipulador.  $C\theta$  e  $S\theta$  referem-se a  $\cos(\theta)$  e  $\sin(\theta)$ .  $Ca$  e  $Sa$  referem-se a  $\cos(\alpha)$  e  $\sin(\alpha)$ , respectivamente.

$$A_{n+1} = \begin{bmatrix} C\theta_{n+1} & -S\theta_{n+1}C\alpha_{n+1} & S\theta_{n+1}S\alpha_{n+1} & a_{n+1}C\theta_{n+1} \\ S\theta_{n+1} & C\theta_{n+1}C\alpha_{n+1} & -C\theta_{n+1}S\alpha_{n+1} & a_{n+1}S\theta_{n+1} \\ 0 & S\alpha_{n+1} & C\alpha_{n+1} & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Realizando a multiplicação proposta nas Equações, obtém-se a matriz genérica de qualquer transformação homogênea de uma junta. Portanto, para obter a matriz de transformação total de um manipulador com n graus de liberdade, basta multiplicar todas as matrizes de transformação de cada uma das juntas que conectam a base ao efetuador, conforme Equação abaixo.

$${}^R T_H = {}^R T_1 {}^R T_2 {}^R T_3 \dots {}^{n-1} T_n = A_1 A_2 A_3 \dots A_n \quad (3)$$

Para o protótipo do estudo em questão foi definido os seguintes parâmetros DH para a cinemática direta conforme a Tabela 1.

TABELA 1. Parâmetros DH do robô de estudo.

Links	$\theta$	d	a	$\alpha$
0-1	$\theta_1$	D1	A1	-Pi/2
1-2	$\theta_2$	0	A2	0
2-3	$\theta_3$	0	0	Pi/2
3-4	$\theta_4$	D4	0	-Pi/2
4-5	$\theta_5$	0	0	Pi/2
5-6	$\theta_6$	D6	0	0

O cálculo da posição e da orientação do atuador final do robô é chamado de análise cinemática direta. Em outras palavras, se todas as variáveis articulares do robô são conhecidas, usando equações de cinemática direta, podemos calcular onde o robô está em qualquer instante. No entanto, se quisermos colocar o atuador final do robô em um local e orientação desejados, precisamos saber quais devem ser os comprimentos dos elos ou ângulos das articulações do robô tal que, nesses valores, o atuador estará na posição e orientação desejadas. Isso é chamado de análise cinemática inversa, o que significa que em vez de usar as equações de cinemática direta, precisamos encontrar os inversos destas equações que nos permitam encontrar os valores articulares necessários para colocar o robô no local e orientação desejados. (NIKU, 2015).

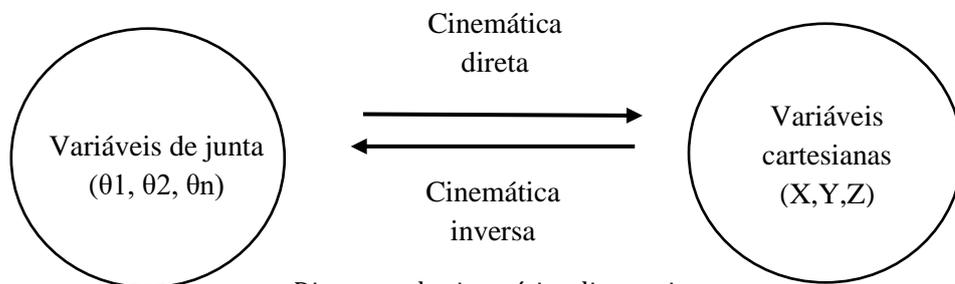


Diagrama da cinemática direta e inversa.

A cinemática inversa é importante pois, consiste em calcular a posição necessária de cada junta do manipulador, para atingir determinada posição e orientação desejadas da ferramenta em sua extremidade (CRAIG, 2013). No caso de um manipulador de 6 graus de liberdade é possível separar o problema da cinemática inversa em dois problemas mais simples. Esses problemas são denominados como cinemática inversa de posição e cinemática inversa de orientação. Essa separação é denominada desacoplamento cinemático que ocorre quando três eixos se cruzam. Quando os últimos três eixos se

cruzam, as origens dos sistemas de referência de elos {4}, {5} e {6} estão localizadas nesse ponto de intersecção. Esse ponto é dado nas coordenadas básicas cinemática inversa de posição (CRAIG, 2013).

Para a solução da cinemática inversa de posição, há três abordagens possíveis, o método geométrico, numérico e analítico. Para manipuladores que contém apenas juntas rotacionais, normalmente utiliza-se o método geométrico. Para solução da cinemática inversa da orientação é necessário a cinemática da posição que está resolvida é possível calcular a cinemática de orientação que consiste na determinação da matriz de orientação do pulso (CHRIS, 2023). Neste estudo, aproveita-se a solução de cinemática de código aberto apresentada por Chris Annin em seu blog, utilizando as ferramentas descritas por ele.

Visando o desenvolvimento deste projeto, até o momento foram utilizadas duas ferramentas fundamentais. Essas ferramentas foram escolhidas devido à sua robustez e ampla aplicação em simulações e controles robóticos.

O MATLAB GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) é uma ferramenta do MATLAB que facilita o desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário (GUI) de maneira intuitiva e visual. E o CoppeliaSim Edu oferecendo um ambiente de simulação que incorpora física e dinâmica avançadas, proporcionando uma aproximação realista dos cenários simulados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos ao longo do estudo foram analisados em relação à sua relevância para o objetivo proposto. Toda a parte cinemática e geométrica do robô foi desenvolvida utilizando a ferramenta gráfica do MATLAB, que permite a criação de interfaces interativas, com elementos como botões, sliders e gráficos, possibilitando a visualização e manipulação de dados em tempo real. No contexto deste projeto, o MATLAB GUIDE foi fundamental para o desenvolvimento de uma interface de controle e supervisão do braço robótico, proporcionando uma maneira eficiente de interagir com os algoritmos de controle e visualizar os resultados das simulações, conforme ilustrado na Figura 1.

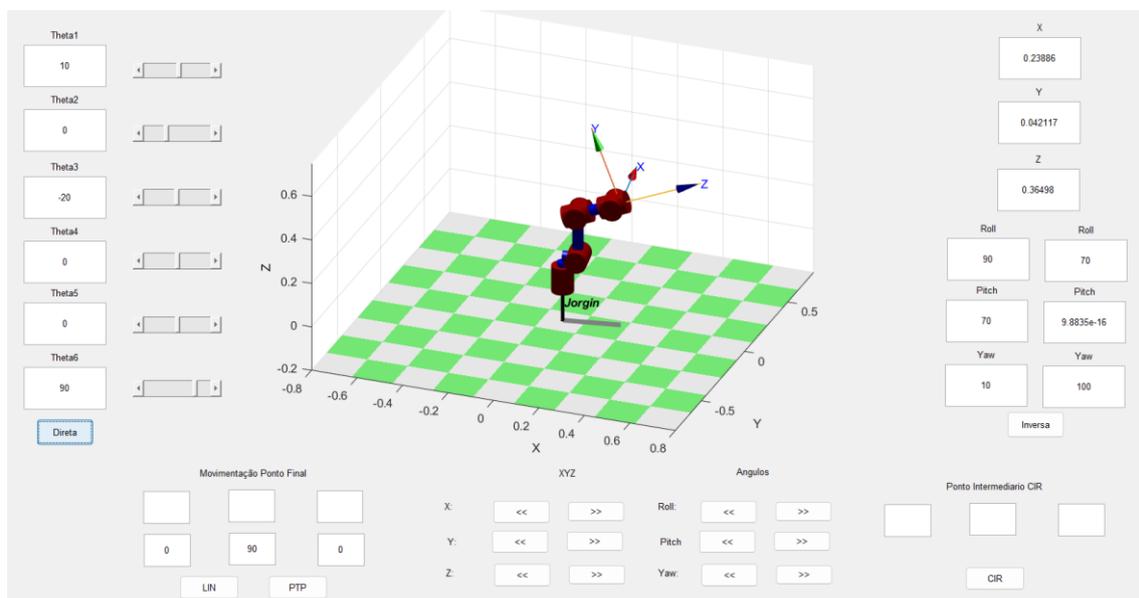


Figura 1: Interface no MATLAB GUIDE.

O CoppeliaSim é uma plataforma de simulação de robótica que permite a criação de modelos robóticos em um ambiente 3D realista. Ele oferece uma interface rica e expansível para a programação de robôs, suportando várias linguagens de script e permitindo integração com diversas bibliotecas de controle e simulação, incluindo o MATLAB. Utilizamos o CoppeliaSim para desenvolver um modelo 3D do braço robótico de 6 eixos, o que possibilitou testar e validar os algoritmos de controle em um ambiente seguro e controlado. A simulação proporcionou insights valiosos sobre o comportamento do robô, permitindo a identificação e correção de possíveis problemas antes da implementação física, como mostrado na Figura 2 abaixo.

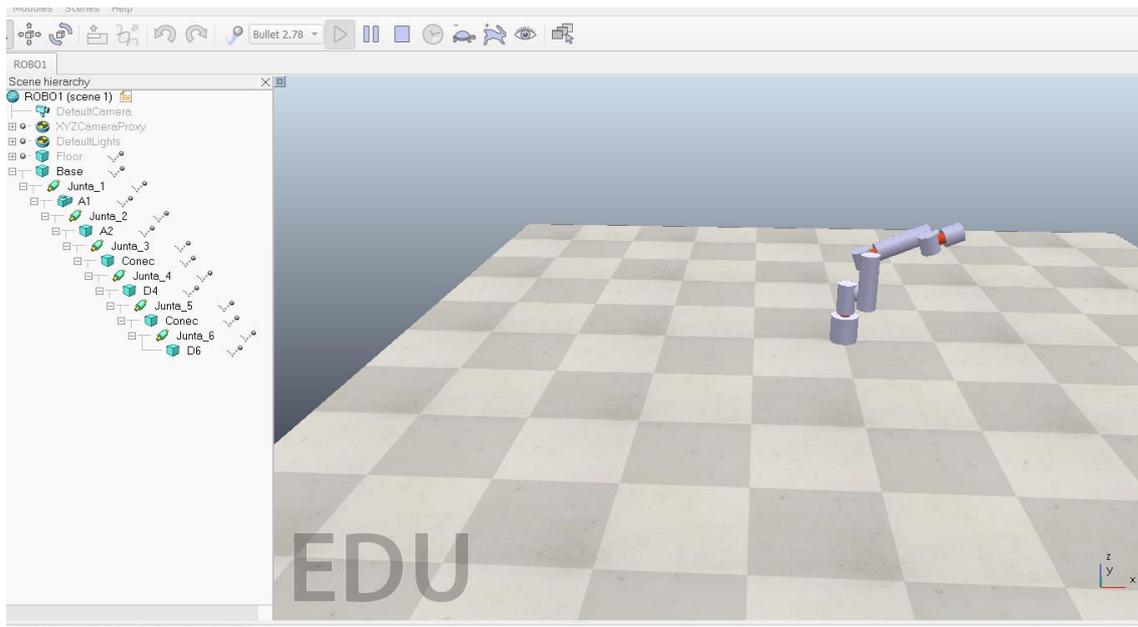


Figura 2: Interface na gráfica do CoppeliaSim e comunicação com o MATLAB GUIDE.

Para o hardware do braço robótico, foram selecionados diferentes tipos de motores e drivers, visando atender às necessidades específicas de cada eixo, conforme mostrado na Tabela 2. Outros componentes importantes incluem o encoder magnético AS5600 e a placa de controle ESP32, que são responsáveis por controlar os motores, realizar a leitura dos encoders nas malhas de controle e estabelecer a comunicação com o computador.

Tabela 2: Motores e Drivers dos Eixos do Braço Robótico

<b>Eixo</b>	<b>Motor</b>	<b>Modelo Motor</b>	<b>Driver</b>
1	Nema 23	23hs5628-HG 20-1	TB6600
2	Nema 17	17hs4401s-pg 51-1	DRV8825
3	Nema 17	17hs4401s-pg 27-1	DRV8825
4	Nema 17	17hs4401s-pg 5.18-1	DRV8825
5	Nema 11	11hs4010-pg 27-1	A4988
6	Nema 11	11hs4010	A4988

A seleção desses motores e drivers permite que o braço robótico execute movimentos precisos e controlados, atendendo aos requisitos do projeto e garantindo um desempenho necessário em aplicações didáticas e experimentais, lembrando que este projeto não está sendo considerado as forças atuantes na estrutura.

Para garantir a precisão e eficiência na construção deste dispositivo, foi utilizado a ferramenta de desenho assistido por computador (CAD) Autodesk Inventor que permitem visualizar e aperfeiçoar o design estrutural do protótipo de teste. A imagem a seguir apresenta o desenho CAD da estrutura do braço robótico.



Figura 3: Montagem do desenho da estrutura teste, feita no Autodesk Inventor.

## CONCLUSÕES

Este modelo foi simulado através dos programas Matlab GUIDE e CoppeliaSim, na simulação o modelo do braço robótico comprovou-se que o modelo teórico está adequado, pois os resultados obtidos do modelo e da simulação mostraram ser promissores, e com estes dados mostrasse adequado para a montagem de um protótipo. O objetivo deste estudo é voltado para aplicação acadêmica, em educação e pesquisa, mas abre portas para uma possível aplicação prática, como em atividades insalubres ou de risco, garantindo segurança, além de uso em logística e armazenagem, solda, manufatura e indústria.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Andre Luiz Gontijo pela oportunidade e por me orientar. Agradeço também ao IFSP/PIBIFSP pelo apoio financeiro destinado ao trabalho.

## REFERÊNCIAS

CHRIS, Annin. Annin Robotics - open source 6 axis robots you can build yourself: 2023. Disponível em: <<https://www.anninrobotics.com/>>.

CORKE, Peter. “Robotics, Vision & Control”. RCV. In: **Robotics, Vision & Control. RCV : RCVTOOLS**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://petercorke.com/toolboxes/robotics-toolbox/>. Acesso em: 27 out. 2023.

CRAIG, John J. **Robótica**. 3. ed. [S. l.: s. n.], 2013.

NIKU, Saeed B. **Introdução à Robótica: Análise, Controle, Aplicações**. [S. l.]: LTC, 2013.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. [S. l.]: Pearson, 2015.