

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ROBÔ CILÍNDRICO DE CONFIGURAÇÃO RPP E ESTUDO DA SUA CINEMÁTICA

Abdiel Ferreira Neves da Silva, Carlos Eduardo Oliveira da Silva, Anderson Keiji Hirata, Ivan Lucas Arantes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Rod. Pres. Dutra, km 145 - s/n - Jardim Diamante - 12223-201 - São José dos Campos-SP, Brasil, abdiel.silva@aluno.ifsp.edu.br, carlossilva@ifsp.edu.br, anderson.hirata@ifsp.edu.br, ivanlucas@ifsp.edu.br.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Robô Cilíndrico com configuração RPP, constituído por uma junta rotacional (R) e duas juntas prismáticas (P), proporcionando três graus de liberdade. O projeto foi concebido utilizando software CAD e fabricado utilizando manufatura aditiva. As juntas responsáveis pelo sistema de movimentação do robô são compostas por motores de passo, que são controlados por uma placa de desenvolvimento baseada em um microcontrolador. A junta da base é acionada pela relação de transmissão de um sistema coroa-pinhão, enquanto as juntas prismáticas horizontal e vertical são acionadas pela relação de transmissão do sistema parafuso-porca. Os testes de validação foram realizados inicialmente por meio da programação da placa de desenvolvimento, com controle individual de cada junta via porta serial, e posteriormente com a implementação de um controlador global em uma interface gráfica. O protótipo desenvolvido demonstrou não apenas o potencial técnico do projeto, mas também sua relevância para fomentar o aprendizado em áreas como robótica, programação e automação.

Palavras-chave: Robótica; CAD; Arduino; Manufatura Aditiva; Cinemática.

Área do Conhecimento: Engenharias – Engenharia Mecatrônica.

Introdução

A robótica tem desempenhado um papel cada vez mais significativo na produtividade do setor industrial moderno, no qual os manipuladores robóticos são usados para uma vasta gama de operações. Segundo a International Federation of Robotics (IFR, 2024), em sua conferência anual, cerca de 541.302 unidades de robôs industriais foram instaladas no mundo no ano de 2023, fechando um balanço global de cerca de 4 milhões de robôs em operação. É importante salientar que dados do mesmo relatório mostraram projeções ainda maiores para o ano de 2024, superando a marca de implantação anual para 600.000 robôs industriais.

A demanda por robôs cada vez mais avançados estimula o desenvolvimento dos manipuladores robóticos. Na etapa de projeto, utilizam-se materiais mais leves e robustos, buscam-se atuadores mais eficientes e controladores mais precisos. Para se conseguir isso, experimentos didáticos envolvendo servomecanismos e controle automático são essenciais em cursos superiores como o de Engenharia de Controle e Automação (Rosas e Fernández, 2022). Segundo Siciliano e Khatib (2016), a engenharia de manipuladores robóticos precisa evoluir continuamente para atender às exigências do mercado e as inovações tecnológicas em diversas indústrias. Além disso, como apontado por Cruz-Martinez et al. (2012), o ensino de sistemas robóticos também acaba por incluir outros tópicos como aquisição de dados, controle e sistemas em tempo real, destacando a importância desse assunto.

Diante desse contexto, visto a necessidade de desenvolvimento da robótica no setor industrial e a importância do seu estudo em ambientes educacionais, o presente trabalho aborda as etapas de projeto em ambiente CAD (Computer-Aided Design), fabricação de um protótipo de um robô manipulador utilizando manufatura aditiva, seguido de testes de funcionamento.

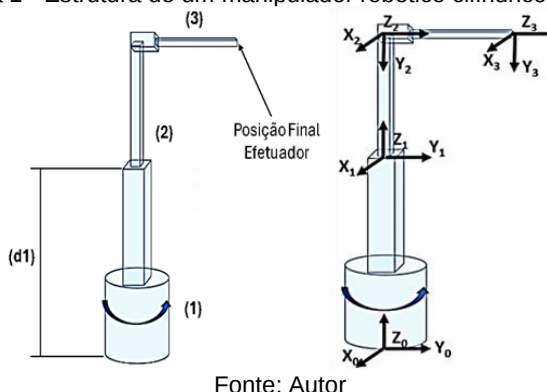
Metodologia

A robótica é um campo interdisciplinar que envolve a integração de diferentes áreas da ciência e da engenharia para o desenvolvimento de sistemas automatizados capazes de executar tarefas

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

previamente programadas (Craig, 2013). A configuração de um robô cilíndrico, ilustrado na Figura 1 à esquerda, consiste em uma estrutura mecânica composta por uma junta rotativa e duas juntas prismáticas (configuração RPP), que lhe garante três graus de liberdade. A primeira junta rotacional, permite que o robô realize uma rotação ao redor de um eixo fixo, no caso a base. Esse movimento é usado para orientar a ferramenta do robô em um determinado ângulo, enquanto as juntas prismáticas permitem movimentos lineares ao longo de um eixo específico, permitindo deslocamentos verticais e horizontais dos elos do robô.

Figura 1 - Estrutura de um manipulador robótico cilíndrico (RPP).



Fonte: Autor

A cinemática de um manipulador abrange o estudo das relações entre as posições e os deslocamentos de seus elos. Duas situações estão envolvidas, a Cinemática Direta calcula a posição e a orientação do sistema de referência da ferramenta em relação ao sistema da base. Por outro lado, a Cinemática Inversa busca determinar todas as combinações possíveis de ângulos e deslocamentos das juntas que permitam alcançar uma posição e orientação específicas da ferramenta acoplada ao efetuador.

O processo de equacionamento começa com a análise da estrutura de um manipulador RPP, como é mostrado na Figura 1 à esquerda. Observa-se em (1) a base, que é uma junta rotacional, seguida de (2) uma junta prismática que realiza o movimento translacional no sentido vertical, sendo que essa junta possui uma distância fixa em relação à origem da junta da base (d_1) e em (3) tem-se uma segunda junta prismática que está rotacionada 90° em relação ao eixo da junta da base, a qual realiza movimento translacional no sentido horizontal. O primeiro passo para o cálculo da Cinemática Direta do manipulador RPP é atribuir um sistema de coordenadas para cada uma das juntas, essa etapa pode ser observada na Figura 1 à direita. Nota-se que o eixo Z deve estar alinhado o eixo de rotação para juntas de revolução e no sentido de translação para juntas prismáticas, o eixo X deve estar disposto perpendicularmente ao eixo Z e o eixo Y se torna uma consequência (utilizando-se a regra da mão direita). O segundo passo é encontrar os parâmetros de Denavit-Hartenberg (DH), que são quatro parâmetros que devem ser verificados para cada combinação elo-junta. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros para cada elo, onde os valores que possuem asterisco são variáveis.

Tabela 1 – Parâmetros Denavit-Hartenberg para o robô RPP.

Elo	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	d_1	θ_1^*
2	0	-90	d_2^*	0
3	0	0	d_3^*	0

Fonte: Autor

A partir dos parâmetros DH, as matrizes de transformação são obtidas para cada eixo X, Y e Z do sistema de coordenadas, sendo posteriormente unificadas em uma matriz de transformação homogênea geral (Craig, 2013). Para o robô cilíndrico RPP, a cinemática direta é descrita pela Equação 1, na qual apresenta a matriz de transformação geral.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & -\sin\theta_i & d_3\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & 0 & \cos\theta_i & d_3\cos\theta_i \\ 0 & 1 & 0 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Assim, obtêm-se as coordenadas x, y e z (Equações 2, 3 e 4, respectivamente) da posição final do efetuador por meio da quarta coluna da matriz, e a orientação do eixo de referência da ferramenta com relação ao eixo da base é dada unicamente pelo ângulo da junta de rotação.

$$x = -d_3\sin\theta_i \quad (2)$$

$$y = d_3\cos\theta_i \quad (3)$$

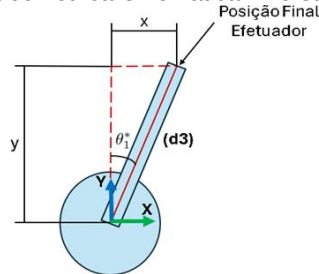
$$z = d_1 + d_2 \quad (4)$$

Os cálculos da Cinemática Inversa podem ser obtidos agora, sendo as coordenadas x, y e z da posição final do efetuador (posição alvo) fornecidas, e as variáveis d2, d3 e θ_1 devem ser calculados. A partir da Equação 4, pode-se calcular d2, como apresentado na Equação 5.

$$d_2 = z - d_1 \quad (5)$$

Para encontrar as equações para d3 e θ_1 , utiliza-se o método geométrico, analisando-se a vista superior do manipulador cilíndrico. Na Figura 2 observa-se o elo da junta prismática horizontal a partir das coordenadas X e Y.

Figura 2 – Análise Geométrica Cinemática Inversa Manipulador RPP.



Fonte: Autor

Com essa vista superior do manipulador, pode-se determinar os valores dos parâmetros d3 e θ_1 a partir de uma análise trigonométrica.

$$d_3 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (7)$$

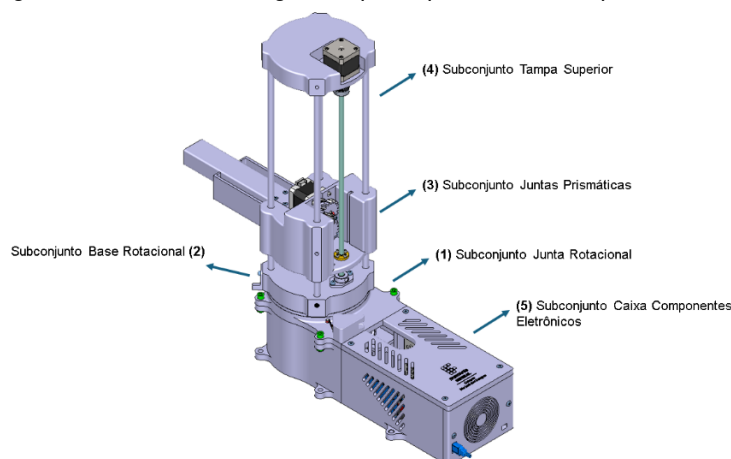
A função atan2 é implementada computacionalmente com o intuito de resolver ambiguidades no cálculo de ângulos, pois considera o quadrante correto e lida com divisões por zero, sendo essencial para precisão em problemas geométricos, robóticos e físicos.

Para o desenvolvimento do protótipo, adotou-se uma abordagem que utiliza ferramentas CAD de projeto, fabricação por manufatura aditiva e controle eletrônico usando componentes de prototipagem open-source. Para a etapa de concepção e projeto, foi utilizado o software de CAD CATIA V5 da fabricante Dassault Systems, e o fatiamento para a impressão 3D foi realizado no Prusa Slicer e fabricação por meio da impressora Ender 3 da fabricante Creality. Além disso, foi realizada a integração de três motores de passo NEMA 17 com sistemas de transmissão mecânica específicos, como engrenagens pinhão-coroa e fusos trapezoidais. Para controle dos motores, foi usado o CNC Shield baseado nos drivers A4988 e DRV8825. Para programação do controlador utilizou-se a Arduino IDE e para a interface gráfica, o software LABVIEW, da fabricante National Instruments.

O projeto mecânico foi concebido com montagens modulares, sendo composto por cinco subconjuntos principais, cada um projetado para atender a integração do sistema, conforme Figura 3.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

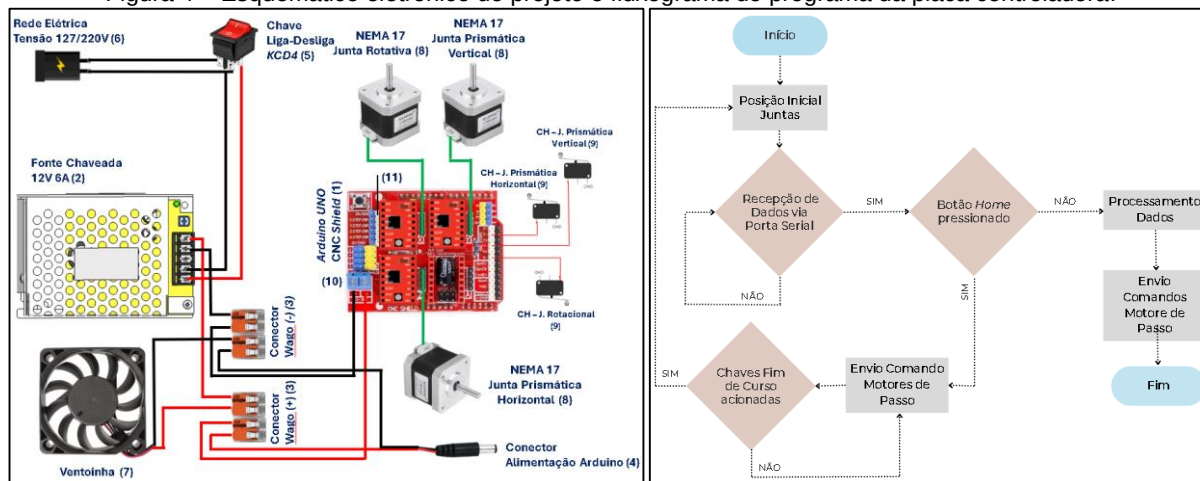
Figura 3 – Visão da montagem do protótipo do robô manipulador RPP.



Fonte: Autor.

A Figura 4 ilustra as conexões elétricas dos componentes do projeto e o fluxograma da programação que foi realizada na Arduino IDE para controle. Pode-se observar que a alimentação da placa Arduino UNO e CNC Shield (1) é realizada por uma fonte de alimentação chaveada 12V 6A (2), por meio de conectores Wago (3). Para o controle dos três motores de passo foi utilizado a biblioteca AccelStepper. Os comandos são recebidos da interface feita no LabVIEW via comunicação serial, sendo o programa na placa responsável por processar os dados para determinar as posições-alvo, e movimentar os motores até essas posições com controle de velocidade e aceleração.

Figura 4 – Esquemático eletrônico do projeto e fluxograma do programa da placa controladora.



Fonte: Autor.

A interface gráfica realizada em ambiente de desenvolvimento LabVIEW (Figura 5) apresenta um modo mais intuitivo e interativo para o controle das juntas do robô, através de objetos visuais para a realização de controle, movimentação e entrada e saída de dados para o robô.

Resultados

Para testes de validação da cinemática do manipulador com os resultados obtidos do arranjo experimental utilizou-se o software Robot Analyzer, no qual foi feita a modelagem do robô cilíndrico configuração RPP para verificações em ambiente de simulação dos deslocamentos e espaço de trabalho do manipulador. A Figura 6 apresenta na região (1) os parâmetros de Denavit-Hartenberg extraídos do projeto e utilizados para modelagem do manipulador em ambiente de simulação. Em (2) é apresentada a matriz de transformação homogênea do ponto do efetuator com relação a base. Nota-

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

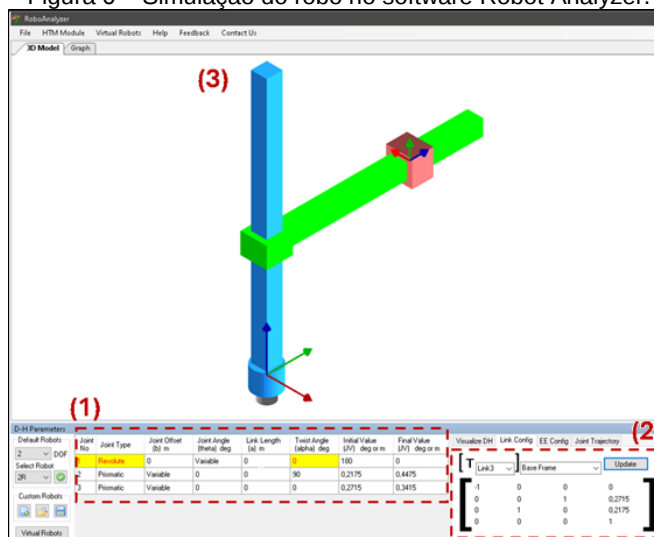
se ainda nesta região as coordenadas $X=0$, $Y=0.2715$ e $Z=0.2175$, posição essa que caracteriza o ponto inicial do manipulador em relação aos eixos adotados, calculados da cinemática direta. Em (3) pode-se observar o modelo 3D criado do manipulador projetado.

Figura 5 – Interface Gráfica feita em LabVIEW para controle do robô



Fonte: Autor.

Figura 6 – Simulação do robô no software Robot Analyzer.



Fonte: Autor.

A Figura 7 apresenta o gráfico da trajetória de operação do manipulador robótico. Observa-se as coordenadas da posição inicial do efetuador ($X=0$, $Y=0.2715$ e $Z=0.2175$), e as coordenadas da posição final ($X=0$, $Y=-0.3415$ e $Z=0.4475$). Esses resultados correspondem ao esperado para as coordenadas que podem ser obtidas das Equações 1 a 4, e implementadas no projeto.

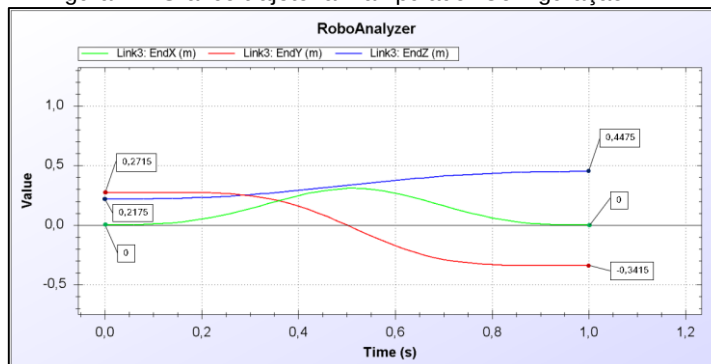
Para fins de teste da movimentação do robô, realizou-se os ensaios de validação para as posições angulares da Junta Rotacional em 0° , 45° , 90° , 135° e 180° , conforme demonstrado na Figura 8.

Discussão

Os resultados de posição e orientação do efetuador final, obtidos na interface desenvolvida, correspondem aos resultados obtidos nas simulações. Isso valida os cálculos de cinemática direta obtidos no desenvolvimento teórico do trabalho, bem como a realização da implementação feita no programa do robô. Os testes de cinemática direta demonstraram também a correspondência com as equações desenvolvidas, sendo que a diferença apenas de que os testes iniciam com a entrada de dados de posição na interface, e as posições dos atuadores do robô são calculadas, e os comandos são enviados ao controlador do robô para a realização da movimentação.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 7 – Gráfico trajetória Manipulador Configuração RPP.



Fonte: Autor

Figura 8 – Teste posições angulares do eixo rotacional da base do robô.



Fonte: Autor.

Conclusão

Este trabalho contribuiu para o campo da robótica aplicada em projetos acadêmicos, mostrando como tecnologias de baixo custo e ferramentas amplamente disponíveis podem ser utilizadas para criar sistemas didáticos e funcionais. A interface gráfica agregou praticidade no controle do robô, permitindo um controle mais visual das juntas do manipulador, enquanto o uso de manufatura aditiva possibilitou a prototipagem rápida dos modelos desenvolvidos em ambiente CAD. Os resultados obtidos demonstraram não apenas o potencial técnico do projeto, mas também sua relevância para fomentar o aprendizado em áreas como robótica, programação e automação.

Referências

- CRAIG, J. J. **Robótica**. 3ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2013.
- CRUZ-MARTÍN, A. et al. A LEGO Mindstorms NXT approach for teaching at Data Acquisition, Control Systems Engineering and Real-Time Systems undergraduate courses. **Computers & Education**, v.59, p. 974-988, 2012.
- INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. **World Robotics: Press Conference 2024**. Disponível em: https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf. Acesso em: 12 fev. 2025.
- ROSAS, E. E. V.; FERNÁNDEZ, C. G. Pedagogical framework to develop interactive virtual tools for the teaching and learning of dynamic systems in Control Engineering. **IFAC Papers Online**, v.55-17, p. 218-223, 2022.
- SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. **Springer Handbook of Robotics**. 2. ed. Cham: Springer, 2016.