



Artigo

Desenvolvimento, modelagem matemática e simulação de um braço robótico acionado por CLP

Luiz José de Bessa Neto^[1], Josias Guimarães Batista^[2], Marcello Anderson F. B. Lima^[3], Josileudo Rodrigues Leite^[4] e Antônio Neilton da Silva^[5]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; luizjbessa@outlook.com

^[2] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; josiasbatista@ifce.edu.br

^[3] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; marcello@ifce.edu.br

^[4] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; josileudorodrigues@hotmail.com

^[5] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; aneiltons@ifce.edu.br

Recebido: 26/06/2021;

Aceito: 15/08/2021;

Publicado: 06/12/2021.

Resumo: O presente trabalho apresenta o desenvolvimento do protótipo de um manipulador robótico acionado por um CLP - Controlador Lógico Programável, bem como a sua modelagem matemática. O manipulador apresenta dois graus de liberdade, o qual permite a movimentação e deslocamento de peças mecânicas, ferramentas e objetos em geral de pequeno porte, através de um sistema eletroeletrônico. Nessa conjuntura, o objetivo é fazer a modelagem matemática da cinemática (direta, inversa e diferencial), bem como da dinâmica do manipulador robótico. Consoante a isso, pretende-se realizar a simulação da geração de trajetórias no MATLAB® do robô para descrever a translação e rotação entre dois links adjacentes do mesmo através dos parâmetros de Denavit-Hartenberg. Fundamentado na modelagem matemática, bem como nos resultados obtidos na simulação, conclui-se que o manipulador robótico desenvolvido neste estudo denota um grande potencial para desempenhar satisfatoriamente as funções de deslocamento e movimentação de peças mecânicas, ferramentas e objetos em geral no âmbito industrial, haja vista que o robô apresenta uma trajetória bem definida, com valores de velocidade e aceleração consideráveis.

Palavras-chave: Cinemática; Dinâmica; Denavit-Hartenberg; Manipulador robótico

Abstract: This work presents the development of the prototype of a robotic manipulator activated by a PLC - Programmable Logic Controller, as well as its mathematical modeling. The manipulator has two degrees of freedom, which allows the movement and displacement of mechanical parts, tools and small objects in general, through an electronic system. At this juncture, the objective is to make the mathematical modeling of kinematics (direct, inverse and differential), as well as the dynamics of the robotic manipulator. Accordingly, it is intended to carry out the simulation of the trajectory generation in the robot MATLAB® to describe the translation and rotation between two adjacent links of the robot using the Denavit-Hartenberg parameters. Based on mathematical modeling, as well as on the results obtained in the simulation, it is concluded that the robotic manipulator developed in this study shows a great potential to satisfactorily perform the functions of displacement and movement of mechanical parts, tools and objects in general in the industrial scope. since the robot has a well-defined trajectory, with considerable velocity and acceleration values.

Key-words: Kinematics; Dynamics; Denavit-Hartenberg; Robotic manipulator

1. INTRODUÇÃO

A robótica industrial é um ramo da tecnologia que engloba mecânica, eletrônica e computação, que atualmente trata de sistemas automáticos e controlados por circuitos integrados, tornando sistemas mecânicos automatizados [1-2]. Devido a sua complexidade, a robótica tem apresentado muitos desafios para a engenharia. Isto se reflete na indústria no fato de que apenas alguns países são desenvolvedores de sistemas robóticos. Países como o Brasil ainda não conseguem fabricar todo o sistema robótico, apenas fazem

a montagem de peças vindas de países que fabricam sistemas robóticos industriais, principalmente Alemanha, Japão e Estados Unidos da América [3].

Dessa maneira, um robô industrial pode ser definido como um sistema mecânico articulado que tem como objetivo principal a realização de operações pré-definidas que são realizadas através de um supervisor de controle que deverá especificar o que o manipulador terá que fazer para que o mesmo possa realizar as tarefas especificadas [4]. Por outro lado, um robô industrial é normalmente constituído de seis graus de liberdade, e o posicionamento de seu elemento terminal (ferramenta de operação) é especificado através do controle de suas variáveis articulares no sistema de coordenadas de trabalho [5].

De um modo geral, os três primeiros graus de liberdade de um robô são responsáveis pelo posicionamento de seu elemento terminal no espaço de tarefas e os restantes pela orientação de sua ferramenta. A Figura 1 denota duas possibilidades alternativas para definir o sistema de coordenadas inicial zero de um manipulador do tipo PUMA com 6 graus de liberdade: 6 juntas, 6 elos móveis mais uma base ou elo 0. É oportuno salientar, que haveria ainda várias outras possibilidades de escolher os sistemas de eixos [6].

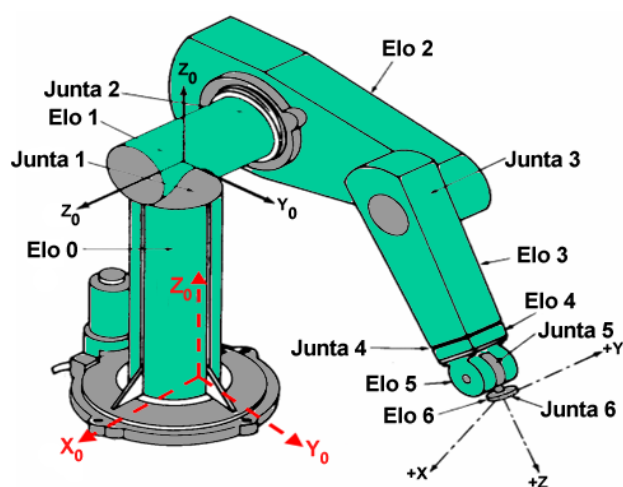


FIGURA 1. Elos e juntas de um manipulador do tipo PUMA 560. Fonte: Adaptado de [6].

Nesse sentido, um sistema robótico basicamente é formado por três partes, a saber: o braço eletromecânico, o controlador digital e uma linguagem de programação. O primeiro é constituído de acionamento elétrico, hidráulico ou pneumático com acoplamentos diretos e indiretos, por exemplo, engrenagens, polias e correias dentadas. Também inclui as proteções mecânicas e a carenagem do robô, geralmente fabricadas em alumínio ou ferro fundido [7].

De outra parte, o controlador é composto por drivers para controle dos motores, sistema de alimentação (potência) e sistema computacional para armazenamento e processamento de dados para operação do robô [8]. Possui ainda entradas e saídas de sinais digitais e analógicos para controle de dispositivos externos, como por exemplo, alimentadores, esteiras e troca automática de atuadores [9]. Portanto, as funções do controlador do robô são a geração de trajetórias a partir das coordenadas fornecidas pelo operador e o controle da execução da trajetória gerada.

Todavia, os manipuladores robóticos estão sempre sujeitos a dinâmicas incertas, incluindo torque gravitacional desconhecido, torque de fricção desconhecido, distúrbios e inércia incerta. Tais incertezas são muito difíceis de serem previstas antecipadamente. Isso afeta negativamente o desempenho, com precisão de posicionamento e repetibilidade [10]. Nesse contexto, o conhecimento exato da cinemática do manipulador consiste em resolver um problema de cinemática inversa para gerar uma posição desejada no espaço da articulação. No entanto, devido às medições imprecisas de parâmetros físicos e a interação entre manipuladores em diferentes ambientes, os parâmetros cinemáticos podem não ser conhecidos a priori [10-11].

Por todo o exposto, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento do protótipo de um manipulador robótico de dois graus de liberdade acionado por um CLP - Controlador Lógico Programável. O objetivo é fazer a modelagem matemática da cinemática (direta, inversa e diferencial), bem como da dinâmica do manipulador robótico. Consoante a isso, pretende-se realizar a simulação da geração de trajetórias no MATLAB® do robô

para descrever a translação e rotação entre dois links adjacentes do mesmo através dos parâmetros de Denavit-Hartenberg.

2. CINEMÁTICA E DINÂMICA DOS MANIPULADORES ROBÓTICOS

2.1 Controle da cinemática de um robô industrial

A cinemática de um robô estuda o movimento do mesmo em relação a um sistema de referência. Portanto a cinemática trata da descrição analítica do movimento espacial do robô como uma função do tempo, e em particular das relações entre a posição e a orientação da ferramenta do robô com os valores que tornam suas coordenadas articulares [11].

Dessarte, o problema da cinemática direta consiste em determinar qual a posição e a orientação do atuador do manipulador, em relação a um sistema de coordenadas de referência fixo, conhecido os valores das articulações; o problema da cinemática inversa resolve a configuração que deve adotar o robô para uma posição e orientação do extremo conhecido [12]. Em contrapartida, o problema da cinemática diferencial baseia-se na determinação dos incrementos ou diferenças na posição de duas quaisquer configurações no espaço operacional e no espaço das juntas de um dado sistema robótico [13].

O controle cinemático estabelece quais são as trajetórias que devem ser seguidas por cada articulação do robô num intervalo de tempo para atingir os objetivos fixados pelo usuário (ponto de destino, trajetória cartesiana da ferramenta do robô, tempo gasto pelo usuário, etc.). Estas trajetórias são selecionadas atendendo as restrições físicas próprias dos acionamentos e a certos critérios de qualidade da trajetória, como suavidade ou precisão da mesma [13].

Nesse viés, a geração de trajetória é necessária para todo o movimento robótico. Normalmente a mesma é executada por meio de técnicas *off-line*, otimizando tanto o caminho geométrico que resolve a tarefa quanto o perfil de velocidade do ponto central da ferramenta, ao rastrear este caminho. Tal computação pode ser demorada. Em contraste, para métodos *on-line* o tempo de computação é restrito, resultando em métodos mais simples. A geração de trajetória *on-line* é necessária se o programa do robô for interpretado durante sua execução ou se o caminho desejado for alterado [13].

2.2 Controle da dinâmica de um robô industrial

A dinâmica do manipulador exhibe a relação entre posição, velocidade, aceleração e torque das articulações. Portanto, a modelagem dinâmica de um robô industrial almeja conhecer a relação entre o movimento do robô e as forças aplicadas a ele. Destarte, a descrição matemática da dinâmica de um manipulador rígido de n elos e juntas é convenientemente pormenorizada pela formulação Lagrangiana e Hamiltoniana. Portanto, o controle dinâmico tem por objetivo fazer com que as trajetórias realmente seguidas pelo robô sejam as mais próximas possíveis das trajetórias sugeridas pelo controle cinemático [14].

Para um robô industrial são demandadas altas velocidades e precisão de movimentos. Estes objetivos são evidenciados pelos grandes investimentos e avanços tecnológicos realizados no campo da robótica. Logo, a utilização de materiais mais leves, de sistemas de transmissão sem folgas e com baixa inércia, de atuadores rápidos e precisos ou de sensores de alta resolução, tem permitido melhorar de maneira notável a qualidade dos movimentos dos robôs [14-15-16].

Conforme supracitado, neste trabalho é apresentada a modelagem matemática de um robô manipulador com dois graus de liberdade destinado ao deslocamento de peças mecânicas de pequeno e médio porte em processos industriais. A modelagem engloba a cinemática (direta, inversa e diferencial) e dinâmica, além das simulações realizadas no MATLAB®. A Figura 2 evidencia o protótipo do braço robótico confeccionado neste estudo. É válido ressaltar, que o robô foi montado pelos autores no Laboratório de Tecnologia de Fabricação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE, *Campus* Tabuleiro do Norte.

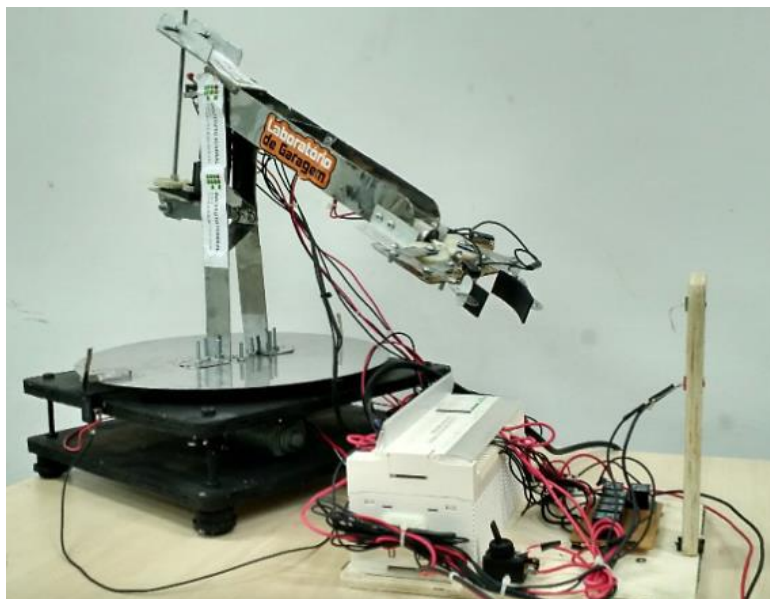


FIGURA 2. Manipulador robótico de dois graus de liberdade acionado por CLP. Autoria própria, 2021.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No intuito de desenvolver uma tecnologia própria, baseando-se na robótica de manipuladores, almejando otimizar a rapidez e precisão do transporte e deslocamento de peças mecânicas em processos de automação industrial, utilizou-se materiais de pequeno e médio porte para a elaboração de um braço robótico de dois graus de liberdade, visando demonstrar a eficiência do mesmo em aplicações industriais.

No que diz respeito a construção do manipulador robótico, procurou-se utilizar materiais recicláveis, como duas madeiras quadrangulares de dimensões (30cm x 30cm) para a base, 4 roletes para o amortecimento dos movimentos do robô, chapas de aço inoxidável de dimensão (27cm x 4cm) para a estrutura mecânica do manipulador.

Ademais, foi utilizado 3 metros de cabos elétricos flexíveis de cores diferentes de 2,5mm², 6 sensores de fim de curso, 3 motores de corrente contínua 12V, 6 relés eletromecânicos com uma tensão nominal de 12V, pelo qual são responsáveis pela inversão do sentido de rotação dos motores, através de uma lógica combinacional de comutação de contatos, além de um CLP - Controlador Lógico Programável, cuja função é comandar o braço robótico na execução de suas tarefas. A Tabela 1 apresenta a listagem dos componentes utilizados para a confecção do protótipo do braço robótico.

TABELA 1. Descrição dos componentes utilizados para a confecção do manipulador robótico.

<i>Componentes</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Preço (R\$)</i>
Aço inoxidável	3,0 m	40,00
Cabos elétricos (2,5mm ²)	3,0 m	25,00
Madeira	0,60 m	0,00
Sensores fim de curso	06	15,00
Motores DC 12V	03	30,00
Relés eletromecânicos 12V	06	40,00
Roletes	04	25,00
Interruptor ON/OFF	01	5,00
<i>Total</i>	-	180,00

Autoria própria, 2021.

É oportuno ressaltar, que o braço robótico desenvolvido neste trabalho, trata-se de um manipulador industrial capaz de realizar tarefas que exijam agilidade, precisão e repetitividade. Com o objetivo de obter informações relevantes do manipulador robótico foi feita uma modelagem computacional do mesmo no software *Rhinoceuros 3D*, conforme evidencia a Figura 3. Dessa maneira, torna-se possível observar as dimensões reais e o material constituinte do manipulador (aço inoxidável, borracha e madeira).

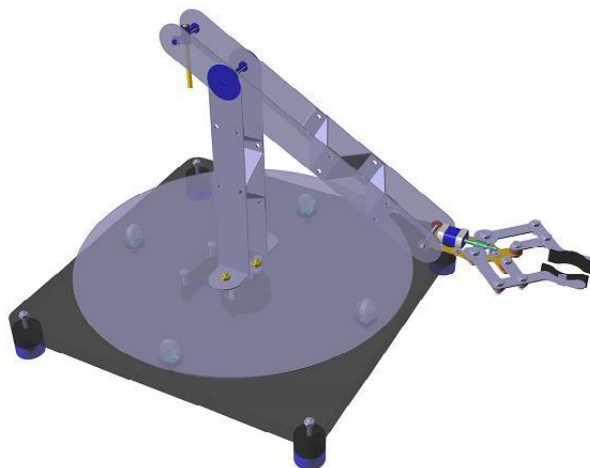


FIGURA 3. Modelagem em 3D da estrutura mecânica do manipulador robótico. Autoria própria, 2021.

Almejando minimizar os custos de construção do manipulador robótico, optou-se por usar motores de corrente contínua de 12V para a movimentação das juntas articulares do robô. Aliado a isso, com o intuito de inverter o sentido de rotação, bem como controlar precisamente a velocidade dos mesmos, desenvolveu-se uma lógica combinacional de relés eletromecânicos no software Proteus Profissional, conforme ilustra a Figura 4.

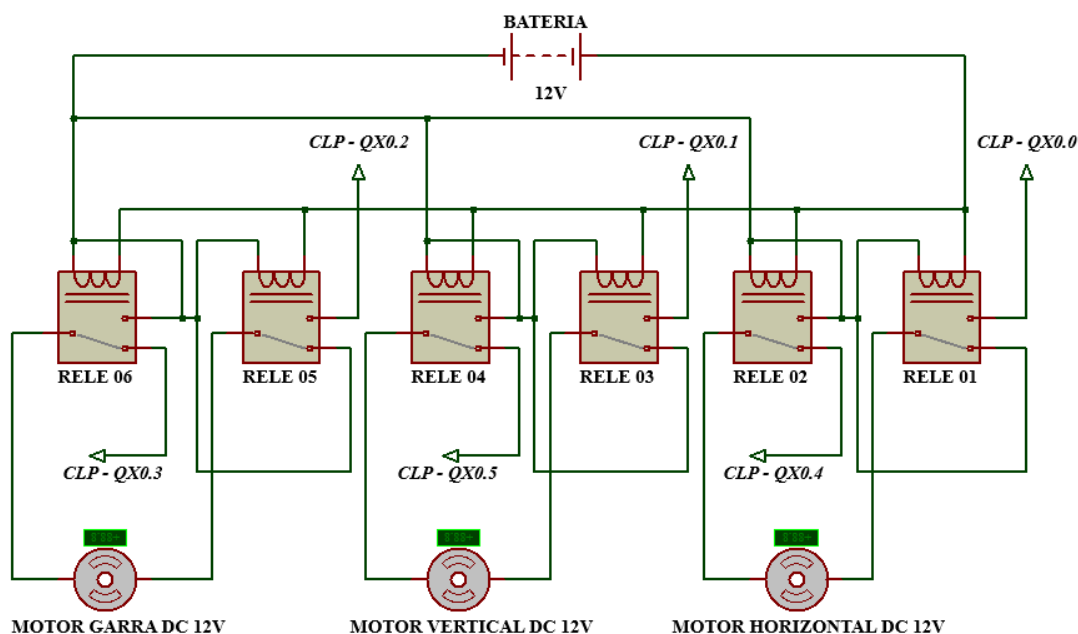


FIGURA 4. Circuito lógico de acionamento da placa de relés eletromecânicos. Autoria própria, 2021.

O circuito eletrônico denotado na Figura 4, simboliza basicamente, a alimentação das bobinas dos relés por uma bateria de 12V, as ligações lógicas combinacionais de comutação de contatos (NA-NF) entre os relés, as saídas digitais do CLP que foram definidas no código da programação em LADDER, pelas quais representam a rotação horária e anti-horária dos motores (horizontal, vertical e garra).

4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO MANIPULADOR

4.1 Cinemática Direta

As equações da cinemática direta do Braço Robótico foram encontradas a partir da alocação dos sistemas de referências, representados na Figura 5, e aplicação dos parâmetros de Denavit-Hartenberg, como evidencia a Tabela 2. Dessa forma, foram obtidas as matrizes de transformação das juntas e em seguida calculou-se a matriz de transformação homogênea, conforme mostra a Equação 1, que indica a localização do elemento final do robô, a ferramenta, em relação ao sistema de referência inercial fixo da base.

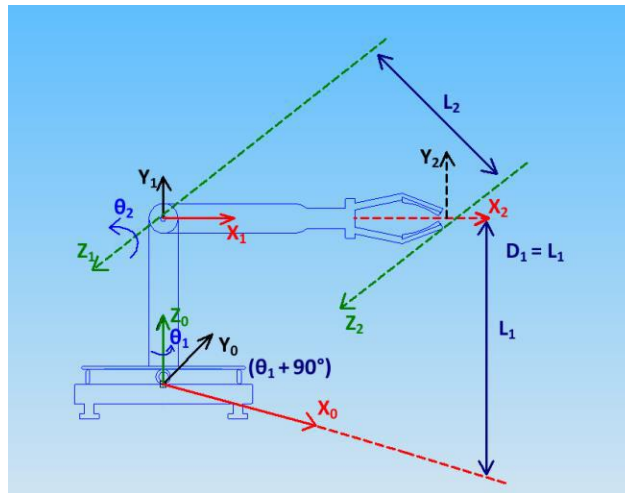


FIGURA 5. Sistemas de coordenadas referenciais. Autoria própria, 2021.

TABELA 2. Descrição dos componentes utilizados para a confecção do manipulador robótico.

Elos	Ângulos das juntas	Ângulos de torção do elo	Comprimento do elo	Deslocamento da junta
01	θ_1	$+90^\circ$	0	L_1
02	θ_2	0°	L_2	0

Autoria própria, 2021.

$$\begin{bmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 & L_2 C_1 C_2 \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & -C_1 & L_2 S_1 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & L_2 S_1 + C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

4.2 Cinemática Inversa

Baseado na matriz de transformação homogênea da cinemática direta, para resolver o problema da cinemática inversa, determinou-se a expressão matricial do manipulador robótico, conforme exibe a Equação 2, pelo qual desenvolveu-se as expressões individuais das juntas do robô, denotado pela Equação 3, encontrando os seguintes parâmetros, exemplificados, respectivamente, pelas Equações 4 e 5.

$$T_H^R = A_1 A_2 \cdots A_{n-1} \quad (2)$$

$$T_H^R \cdot A_n = A_1 A_2 \cdots A_{n-1}$$

$$T_H^R \cdot A_n^{-1} \cdot A_{n-1} = A_1 A_2 \cdots A_{n-2} \quad (3)$$

$$(4)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{p_z - L_1}{p_x C_1 + p_y S_1}\right) \quad (5)$$

4.3 Cinemática Diferencial

A Equação 6 evidencia a matriz Jacobiana alusiva ao protótipo do manipulador robótico, pela qual foi obtida através da alocação dos sistemas de referências inerciais fixos em relação à base (vide Figura 6), e da modelagem cinemática (direta e inversa) do mesmo.

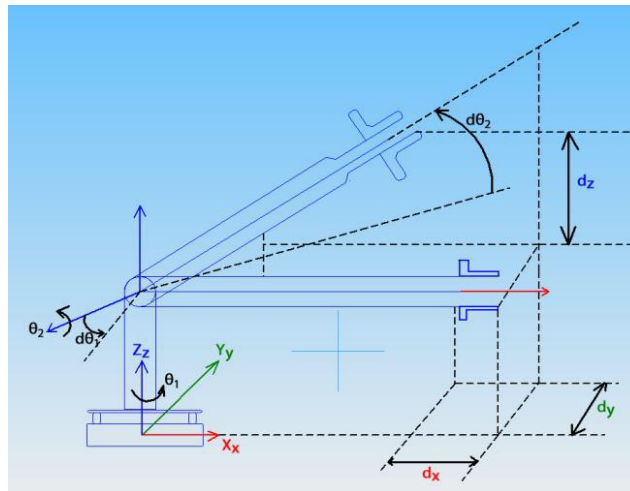


FIGURA 6. Sistemas de coordenadas referenciais diferenciais do braço robótico. Autoria própria, 2021.

$$L = \frac{1}{2} \cdot \left[m_1 \gamma_1^2 \theta_1^2 + m_2 l_1^2 \theta_1^2 + \frac{1}{2} m_1 \gamma_2^2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + m_2 l_1^2 \gamma_2 (\theta_1^2 + \theta_2 \theta_1) \cos \theta_2 l_1 - m_1 g \gamma_1 \cos \theta_1 + m_1 g (\sin \theta_1 + \gamma_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \right]$$

$$\begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_1 & C_1 & 0 \\ L_2 C_2 & L_2 C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ & & L_2 C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \frac{1}{L_2 C_2} \cdot \begin{bmatrix} -S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \quad (6)$$

4.4 Modelagem Dinâmica do Braço Robótico

Finalmente, a dinâmica do manipulador foi modelada a partir da alocação dos sistemas de referências, representados na Figura 7, e usando a mecânica Lagrangeana no espaço das juntas. Dessa forma, a Equação 7 caracteriza a dinâmica do robô manipulador apresentado neste trabalho.

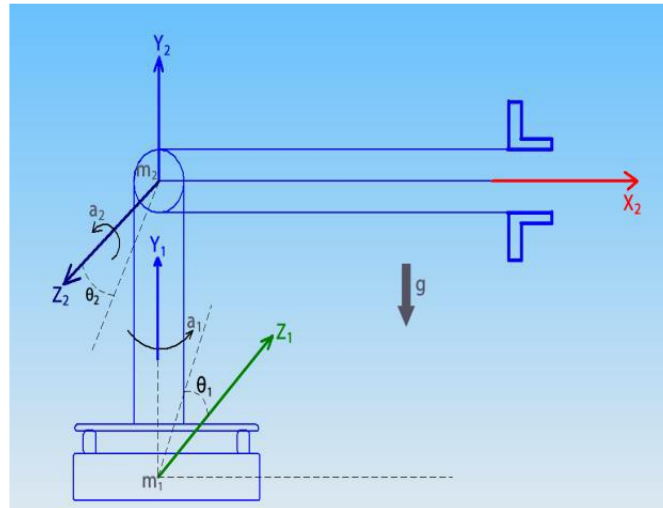


FIGURA 7. Sistemas de coordenadas referenciais da dinâmica do braço robótico. Autoria própria, 2021.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_2 m_2 l_1 \gamma_2 \cos \theta_2 & -m_2 l_2 \gamma_2 (\theta_1 + \theta_2)^2 \cos \theta_2 \\ \frac{1}{2} (m_2 l_1 \gamma_2 \cos \theta_2) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

5. RESULTADOS

Com os valores variáveis de DH descritos na Tabela 2, o MATLAB® (a partir da execução de uma rotina) gera um manipulador geométrico, correspondente a um braço robótico, conforme ilustrado na Figura 8. Para o problema da cinemática direta o MATLAB® elabora, com base na notação de DH, uma matriz T chamada *Matriz de Transformação Homogênea*, onde cada linha da matriz relaciona um elo do manipulador e suas colunas.

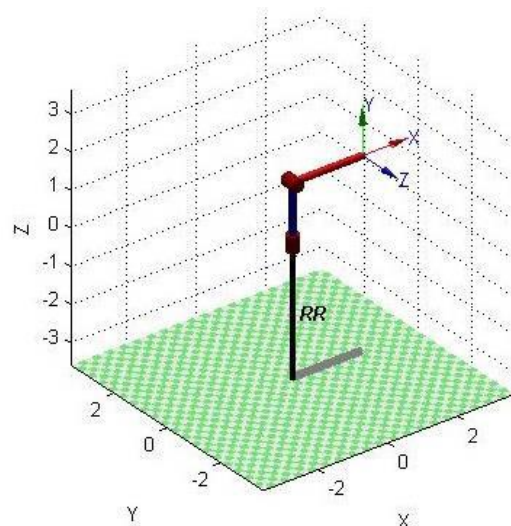


FIGURA 8. Braço robótico gerado pelo MATLAB® em sua posição inicial (coordenadas angulares iguais à zero). Autoria própria, 2021.

Por outro lado, a partir dos valores do manipulador e seus parâmetros de DH, sua *Matriz de Transformação Homogênea*, com base no último elo do manipulador em sua posição inicial, descrita pelo vetor θ , é dada pela Equação 8.

$$T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 3,57 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Após realizar a simulação no MATLAB® com os pontos finais modifica-se o conjunto de coordenadas angulares. Na simulação foi utilizado o ponto final dado por $\theta = (\pi/2\pi)$, que obtém-se uma nova configuração geométrica para o manipulador, cuja simulação é apresentada na Figura 9.

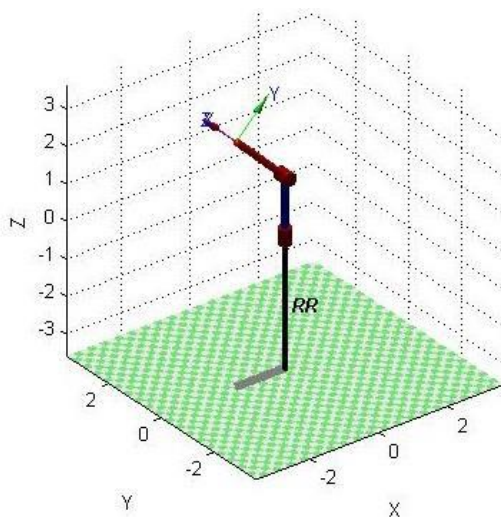


FIGURA 9. Simulação da cinemática direta para as coordenadas dadas por θ . Autoria própria, 2021.

O resultado desta simulação pode ser observado nas Figuras 10, 11 e 12, os resultados são: a trajetória, a velocidade e a aceleração de cada junta do braço robótico, respectivamente.

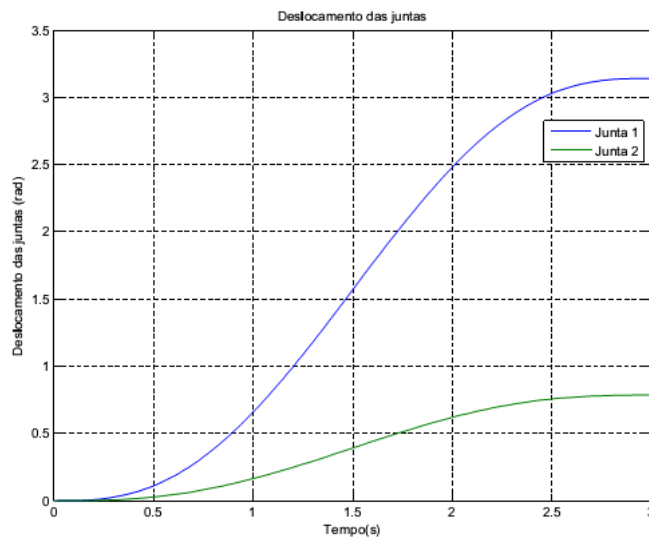


FIGURA 10. Curvas de deslocamento das juntas. Autoria própria, 2021.

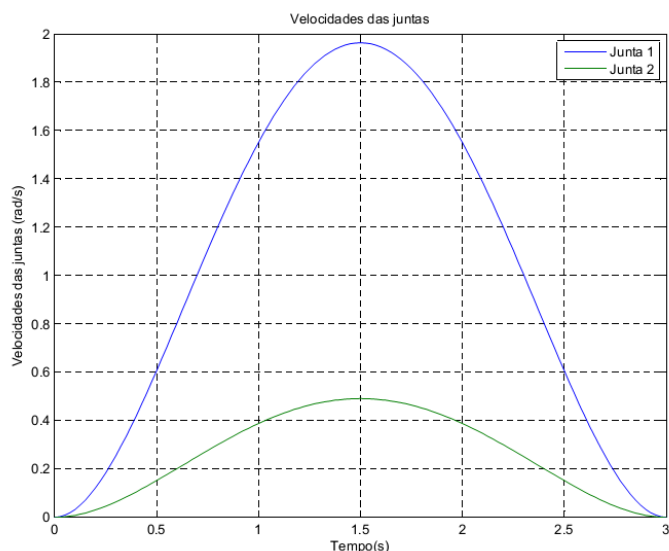


FIGURA 11. Curvas de velocidade das juntas. Autoria própria, 2021.

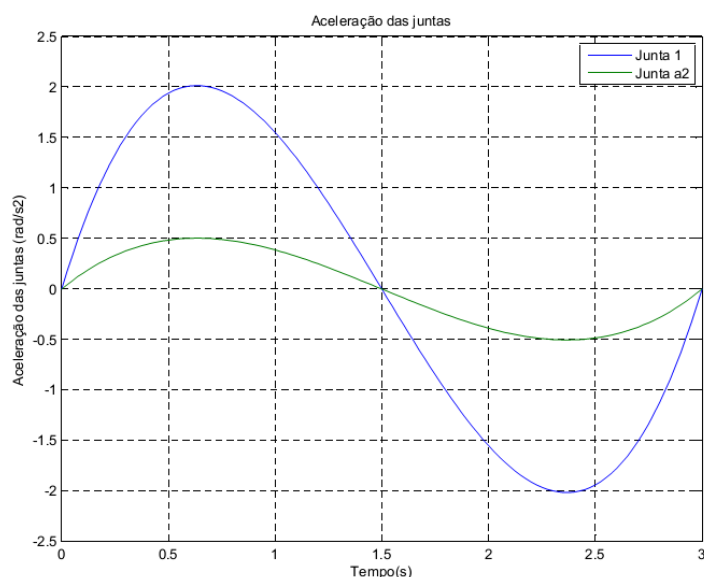


FIGURA 12. Curvas de aceleração das juntas. Autoria própria, 2021.

6. CONCLUSÃO

Pode-se extrair, como principal conclusão deste trabalho, que a modelagem cinemática e dinâmica de um manipulador robótico não é tão simples de serem realizadas, uma vez que envolvem várias áreas de conhecimentos, como física, álgebra matricial, ciências dos materiais, eletrônica, controle, processamento de sinais, programação e manufatura.

O propósito deste estudo foi realizado com êxito, que é a modelagem da cinemática (direta, inversa e diferencial) e dinâmica do robô, além das simulações realizadas no MATLAB® para encontrar a trajetória descrita pelas juntas, além da velocidade e aceleração, que são de extrema importância para otimizar a eficiência e precisão do manipulador em atividades industriais.

Ressalta-se, ainda, que essa pesquisa pode gerar trabalhos os seguintes trabalhos futuros: simulação da dinâmica, simulação e implementação do controlador, geração de trajetórias livre de colisões com campos potenciais artificiais e otimização de trajetórias com inteligência artificial.

REFERÊNCIAS

- [1] Ottoni, L. C. Introdução à Robótica. *I ORCV Olimpíada de Robótica do Campos das Vertentes*, Universidade Federal de São João Del-Rei, Minas Gerais, Brasil, p. 1-7, 2010.
- [2] Batista, J. G. Modelagem Matemática e Simulação Computacional da Dinâmica de um Robô SCARA. *Proceeding Series of the Braz. Soc. of Comp. and Appl. Math.*, v. 4, p. 1-7.
- [3] Carrara, V. Introdução à Robótica Industrial. *INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, São José dos Campos - SP, p.1-101, 2015.
- [4] Santos, V. M. F. Robótica Industrial. Departamento de Engenharia Mecânica, Aveiro, Portugal, p.1-166, 2004.
- [5] Almeida, R. Z. H. Modelagem Dinâmica e Controle de Robô Manipulador de Arquitetura Paralela Assimétrica de Três Graus de Liberdade. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2013.
- [6] Spong, M. W; Hutchinson, S. and Vidyasagar, M. Robot Dynamics and Control. *1st ed. John Wiley & Sons, Danvers – MA*, 352p., 1989.
- [7] Barrientos, A. et al. Fundamentos de Robótica. *1ª ed. McGraw-Hill*, Madrid, 1997.
- [8] Mary, A. H.; Kara, T.; Miry, Abbas H. Inverse kinematics solution for robotic manipulators based on fuzzy logic and PD control. *In: Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC MITCSA), Al-Sadeq Inter-national Conference on. IEEE*, p. 1-6, 2016.
- [9] Xiao, B.; Yin, S.; Kaynak, O. Tracking control of robotic manipulators with uncertain kinematics and dynamics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 63, n. 10, p. 6439-6449, 2016.
- [10] Lange, F.; Albu-schäffer, A. Path-accurate online trajectory generation for jerk-limited industrial robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 1, n. 1, p. 82-89, 2016.
- [11] Edwards, L. A. R. W. Open-Source Robotics and Process Control Cookbook: Designing and Building Robust, Dependable Real-Time Systems. *Newnes 1st ed.* 2005.
- [12] Murray, R. M.; Li, Z.; Sastry, S. S. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. *1st ed. Boca Raton – FL*, 1994.
- [13] Siegwart, R.; Nourbakhsh, I. Introduction to Autonomous Mobile Robots. *1st ed. The MIT Press. Cambridge – MA*, 2004.
- [14] Batista, J. et al. Dynamic Model and Inverse Kinematic Identification of a 3-DOF Manipulator Using RLSPSO. *Sensors*, v. 20, p. 1-36, 2020. DOI:10.3390/s20020416.
- [15] Batista, J. et al. Trajectory Planning Using Artificial Potential Fields with Metaheuristics. *IEEE Latin America Transactions*, v. 18, p. 914-922, 2020. DOI: 10.1109/TLA.2020.9082920.
- [16] Souza, D. A. et al. Identification by Recursive Least Squares With Kalman Filter (RLS-KF) Applied to a Robotic Manipulator. *IEEE Access*, v. 9, p. 63779-63789, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074419.