

Modelagem Cinemática de um Braço Robótico com 3-GDL de um Robô Baseado em um *kit* Didático de Baixo Custo

Micaellen Christie Cecília Carvalho, Isabelle Caroline Sousa Gonçalves, Igor Ribeiro Pereira, Gabriel Lopes dos Santos, Dr. Cláudio Henrique G. dos Santos, Renato S. Dâmaso

Departamento de Engenharia Mecatrônica

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Divinópolis, Brasil

E-mail: mica.christie@hotmail.com, isabellecs08@gmail.com, igoribeirol.275@gmail.com, gabriellopessantos21@gmail.com, claudiohgsantos@gmail.com, renatosd@cefetmg.br

Resumo—Este trabalho tem por objetivo mostrar o uso de um manipulador robótico construído através de um kit didático, num procedimento de modelagem, calibração e validação de seu modelo cinemático. Para isso, o estudo parte da definição da configuração do manipulador, seguida da construção do diagrama de arame contendo suas dimensões e a atribuição de seus sistemas de coordenadas. Para o desenvolvimento da cinemática direta do braço robótico foi utilizada a notação de Denavit-Hartenberg. Para a calibração do manipulador, foi utilizada uma relação gráfica para adquirir a equação de calibração e descobrir o fator de conversão e o *offset* de cada junta a partir de uma série de testes. Ao final, foi realizada a validação do modelo cinemático por meio da análise de dados experimentais para a posição da extremidade do manipulador em três posicionamentos distintos.

Palavras-chave—Denavit convention, Forward Kinematics, Calibration, Conversion Factor, Offset.

I. INTRODUÇÃO

O uso da robótica industrial revolucionou significativamente a indústria de manufatura. Com os avanços da tecnologia, a integração da robótica nos processos de produção tornou-se mais prevalente, levando a uma maior eficiência, precisão e economia. Assim, os robôs industriais também preenchem a lacuna para a execução de tarefas que exigem precisão elevada, repetitividade e funções que são feitas em ambientes insalubres ou que ofereçam risco humano [1].

Logo, a utilização de robôs manipuladores na realização de tarefas implica no controle de movimentações precisas de suas juntas e elos, realizando trajetórias no espaço de trabalho segundo suas características cinemáticas e dinâmicas [2]. Portanto, esses fatores incentivam cada vez mais estudos na área da robótica industrial. Porém, o gargalo para isso são os custos elevados dos manipuladores robóticos. Então, para preencher a lacuna entre a academia e a indústria, foram desenvolvidos kits didáticos para fornecer experiências práticas de aprendizado para estudantes e futuros profissionais. Assim, este trabalho visa mostrar o uso do *kit* didático *Robix Rascal*TM, construído e introduzido em [3], no curso

de Engenharia Mecatrônica do CEFET-MG em Divinópolis num procedimento de modelagem, calibração e validação de seu modelo cinemático.

Diante disso, são propostas a análise e a modelagem de um braço robótico com três juntas rotacionais (tipo RRR) construído a partir de um *kit* do robô *Robix Rascal*TM. Assim, visou-se obter os dados por meio de instrumentos de medição, determinando o comprimento dos *links*; também, realizou-se análises a fim de esboçar o diagrama de arame do manipulador e, com isso, desenvolveu-se a modelagem via cinemática direta. Portanto, fez-se a calibração do robô, em que se visou encontrar os parâmetros “fator de conversão” e “*offset*” de cada junta do manipulador.

Enfim, este artigo está organizado na seguinte ordem: na Seção 2 foi feita uma breve revisão do método de modelagem via cinemática direta; na Seção 3, há a descrição do procedimento para a obtenção do diagrama de arames do manipulador; na Seção 4 são apresentados os resultados e as devidas análises realizadas. Por fim, na Seção 5, há a conclusão do trabalho desenvolvido.

II. CINEMÁTICA DIRETA

A cinemática realiza o estudo dos movimentos dos robôs sem considerar os fatores dos quais os originam [4]. Logo, ela trata da dedução das equações de movimento relativo entre os corpos rígidos de um manipulador, existindo a análise inversa ou direta [5]. Portanto, a cinemática direta busca determinar a obtenção de uma posição e orientação do “*effector*” final, de acordo com os valores atribuídos às variáveis das juntas do robô [6]. Ou seja, é possível calcular a posição e a orientação do TCP em relação ao sistema de coordenadas fixo de referência [7].

Com isso, pode-se utilizar da atribuição de *frames* de coordenadas a cada *link* do robô e expressar as relações entre eles a partir de transformações homogêneas, sendo esse procedimento conhecido como a convenção de *Denavit-Hartenberg* [8].

A. Convenção de Denavit-Hartenberg

A convenção de Denavit-Hartenberg (DH) habitualmente é utilizada para a análise cinemática de um manipulador

robótico [9]. De acordo com suas proposições, para a realização da modelagem cinemática direta de um manipulador é necessário fazer a atribuição dos sistemas de coordenadas ortonormais a cada uma de suas juntas, sejam estas rotacionais ou prismáticas [3]. Dessa forma, ela se baseia na atribuição de *frames* de coordenadas a cada *link* do robô e expressa as relações entre eles a partir de transformações homogêneas. Com isso, é possível obter uma matriz de transformação entre diferentes referenciais de coordenadas.

Para isso, realiza-se a disposição do sistema de coordenadas $o_i x_i y_i z_i$ de cada uma das juntas q_i , sendo $i = 1, 2, 3, \dots$, em que o primeiro desses sistemas de coordenadas é fixo de referência e os restantes são relacionados a transformações produzidas pelos movimentos de rotação e de translação de juntas e elos que compõem as cadeias cinemáticas abertas dos manipuladores [3]. Com isso, é possível obter os parâmetros que irão compor a tabela de *Denavit-Hartenberg* e, portanto, determinar a matriz de transformação homogênea A_i para cada linha da tabela, sendo ela dada por [5]:

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

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

em que os parâmetros θ_i , α_i , a_i e d_i correspondem, respectivamente, ao ângulo da junta, a torção do *link*, o comprimento do *link* e o deslocamento do *link*. Por fim, multiplica-se todas as matrizes A_i , de forma a adquirir o modelo cinemático do manipulador T_j^i , se $i < j$, que fornece a orientação e a posição final do TCP, (*Tool Center Point*), que é o ponto hipotético de referência da extremidade do robô ou ponto central da ferramenta, caso houver, em relação ao *frame* de referência. Logo, para utilizar essa convenção, é importante que suas duas principais propriedades sejam devidamente obedecidas [5]:

- DH1: o eixo x_n deve ser perpendicular ao eixo z_{n-1} .
- DH2: o eixo x_n deve interceptar o eixo z_{n-1} .

III. METODOLOGIA

A. Modelagem do Braço Robótico

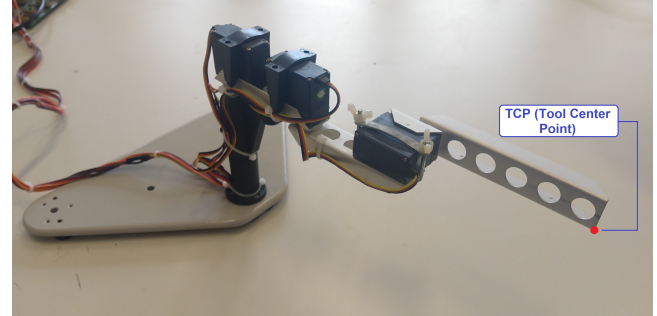
Para atender as finalidades deste trabalho, o foco estará na modelagem de um robô, com o auxílio do kit didático *Robix Rascal*, na configuração de braço robótico composto por três juntas rotacionais (3R).

O kit didático do robô promove uma solução integrada de *hardware* e *software* com aplicação lúdica. Assim, essa configuração possui articulações rotacionais, com elos e servomotores em que, para a sua programação, utiliza-se a linguagem *Rascal* e uma interface própria de interação [10].

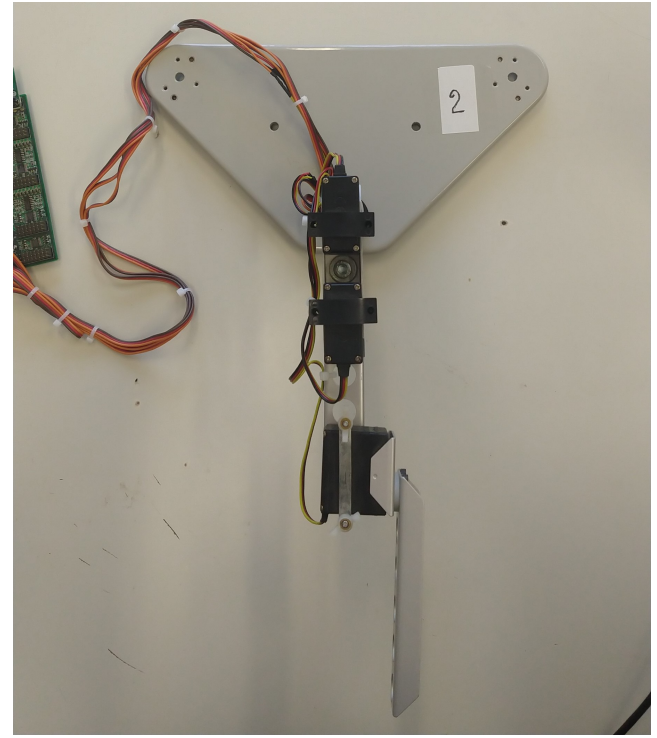
Assim, para a modelagem do robô *Robix*, objetivou-se obter o diagrama de arame do manipulador em estudo. Com isso, para o início dos procedimentos, fez-se o uso de dois *softwares*, sendo eles: *Usbor Nexus* e *Usbor Nexway*, que são os responsáveis pela conexão entre o *USB servo controller* e o computador, de forma a permitir que sejam feitas as configurações desejadas de deslocamento do manipulador.

Assim, por meio do programa servidor *Usbor Nexus*, foram registrados os três servos motores do robô e realizadas as configurações iniciais. Além disso, através do programa cliente *Usbor Nexway* foi realizada a programação do robô via comandos diretos de movimentação e utilizando a janela de movimentação manual, conforme [3].

Logo, através do *software Usbor Nexway*, com o uso do modo “*Teach*”, configurou-se a posição inicial de referência do manipulador, em que os valores articulares de cada junta são considerados iguais a zero, ou seja, a posição “*Home*”. Com isso, utilizando a função *Add to Script*, foi possível capturar os valores de *offset* que configuram o robô nessa posição. Assim, pode-se observar o manipulador na posição de referência através da Figura 1.



(a)



(b)

Fig. 1. Configuração braço robótico do robô baseado no kit *Robix Rascal*™ considerado nesse trabalho: (a) Vista lateral; (b) Vista superior.

Diante disso, definiu-se que o TCP (*Tool Center Point*) do robô ficasse no ponto indicado em vermelho, como é mostrado na Figura 1(a), posicionado na quina aguda inferior do último elo do manipulador.

Assim, com base no posicionamento do robô apresentado na Figura 1 e com a referência do TCP mostrado na Figura 1(a), esboçou-se a primeira versão do diagrama de arame do robô, como é visto na Figura 2. Adiante, fez-se a verificação dos sentidos positivos de rotação das juntas do manipulador. Logo, programou-se deslocamentos arbitrários em cada uma das juntas e, com base nos sentidos observados, pôde-se realizar a atribuição do sistema de coordenadas para cada

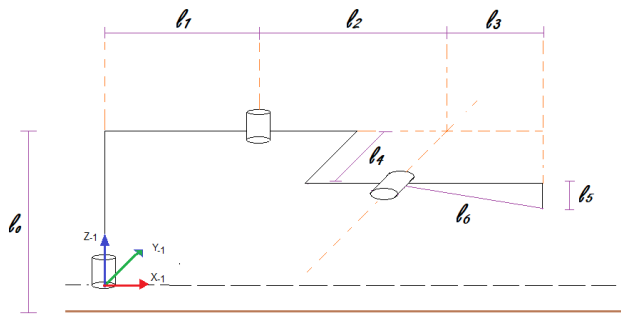


Fig. 2. Diagrama de arame do robô sem a indicação do sentido de rotação das juntas.

uma delas. Diante disso, os *frames* atribuídos e os sentidos positivos de rotação das juntas podem ser observados a partir da Figura 3, que representa a versão final e mais detalhada do diagrama de arame do robô em estudo.

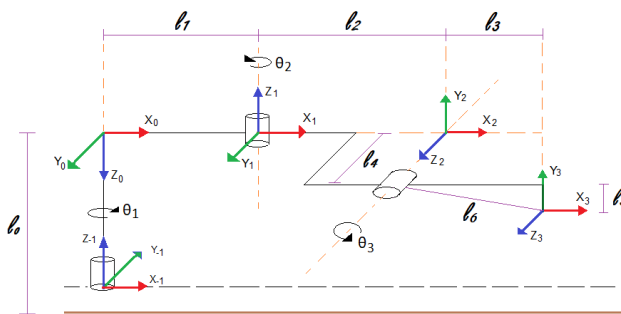


Fig. 3. Diagrama de arame do robô Robix com a atribuição dos sistemas de coordenadas.

Em seguida, para determinar o comprimento dos *links*, utilizou-se de instrumentos de medição, sendo eles: uma régua, um transferidor e esquadros de 30° e 45°.

Dessa forma, através do uso dos instrumentos de medição mencionados, pôde-se definir o valor do comprimento dos *links* apresentados no diagrama de arame da Figura 3, como é exposto na Tabela I.

TABELA I
DIMENSÕES DO MANIPULADOR.

Link (l_i)	Comprimento (mm)
l_0	126
l_1	76
l_2	78
l_3	104
l_4	29
l_5	11
l_6	104.6

B. Análise Cinemática

Portanto, com a atribuição dos *frames* mostrados no diagrama de arame e com os valores do comprimento dos *links* encontrados, construiu-se a tabela de *Denavit-Hartenberg*, sendo os parâmetros necessários apresentados na Tabela II. em que: * variável. Com isso, a partir da Tabela II de *Denavit-Hartenberg*, obteve-se a matriz homogênea A_i para cada

TABELA II
TABELA DE *Denavit-Hartenberg*.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
0	0°	l_0	0	180°
1	θ_1^*	0	l_1	180°
2	θ_2^*	0	l_2	90°
3	Não cumpre a convenção DH2			

linha, em que se substituiu os valores dos parâmetros na estrutura matricial apresentada em (1), sendo:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & l_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & l_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & l_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Dessa forma, como a terceira linha da Tabela II não cumpre uma das convenções de *Denavit-Hartenberg*, DH2, em que o eixo x_3 deveria interceptar o eixo z_2 , então a matriz homogênea A_3 foi obtida através do método de Movimentos Rígidos [5], em que adquiriu-se:

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_6 \cos(\theta_3 - 6^\circ) \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_6 \sin(\theta_3 - 6^\circ) \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Portanto, tem-se que o modelo cinemático do manipulador é dado por:

$$T_3^{-1} = A_0 A_1 A_2 A_3, \quad (6)$$

$$T_3^{-1} = \begin{bmatrix} c3(s1s2 + c1c2) & -s3(s1s2 + c1c2) & h_1 & h_3 \\ c3(c1s2 - s1c2) & -s3(c1s2 - s1c2) & h_2 & h_4 \\ s3 & c3 & 0 & h_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

em que:

$$s1 = \sin \theta_1,$$

$$s2 = \sin \theta_2,$$

$$s3 = \sin \theta_3,$$

$$c1 = \cos \theta_1,$$

$$c2 = \cos \theta_2,$$

$$c3 = \cos \theta_3,$$

$$h_1 = \cos \theta_1 \sin \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_2,$$

$$h_2 = -\sin \theta_1 \sin \theta_1 - \cos \theta_1 \cos \theta_2,$$

$$h_3 = l_4(\cos \theta_1 \sin \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_2) + l_6 \cos(6^\circ - \theta_3)$$

$$\cdot (\sin \theta_1 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 \cos \theta_2) + l_1 \cos \theta_1$$

$$+ l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_1 + l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2,$$

$$h_4 = l_4(-\sin \theta_1 \sin \theta_1 - \cos \theta_1 \cos \theta_2) + l_6 \cos(6^\circ - \theta_3)$$

$$\cdot (\cos \theta_1 \sin \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_2) - l_1 \sin \theta_1$$

$$- l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos \theta_1 \sin \theta_1,$$

$$h_5 = l_0 - l_6 \sin(6^\circ - \theta_3).$$

C. Calibração do Robô

Sabe-se que a calibração de um robô envolve descobrir o fator de conversão (FC) e o *offset* de cada junta através de uma série de testes. Assim, tem-se que os procedimentos necessários para descobrir os FC_i envolvem deslocamentos coordenados das juntas e medições, com o auxílio de instrumentos como transferidor e esquadros. Diante disso, para programar a movimentação do robô no programa *Usbor Nexway*, utiliza-se o comando *MOVE*, que varia entre os valores -1600 e 1600 , ou entre -1400 e 1400 . Com isso, tem-se que o fator de conversão é o meio que relaciona os valores atribuídos ao comando *MOVE* com o ângulo desejado. Dessa maneira, para calculá-lo, utiliza-se da relação gráfica apresentada na Figura 4.

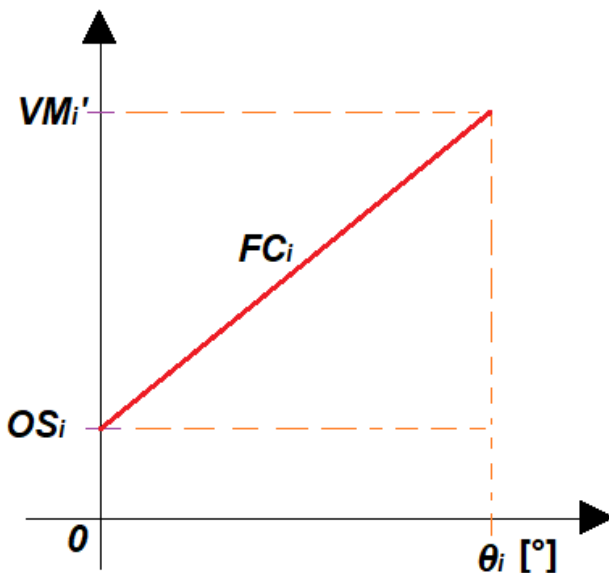


Fig. 4. Relação gráfica para encontrar o fator de conversão.

Disso, a partir da Figura 4, pode-se estabelecer a equação de calibração, sendo:

$$VM_i = FC_i \cdot \theta_i + OS_i, \quad (7)$$

em que: VM_i são os valores de posição, FC_i são os fatores de conversão e OS_i são os valores de *offset*.

Portanto, dispondo do manipulador em “Home” e utilizando do ambiente *Teach* do *Usbor Nexway*, moveu-se a junta q_3 em -90° . Em seguida, fez-se a conferência do ângulo através do transferidor e, assim, obteve-se o valor da posição a partir da função *Add to Script*. Utilizando o mesmo método, moveu-se a junta q_2 em 60° e a junta q_1 em -60° , adquirindo-se os valores da posição relativas a cada uma delas.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante dos procedimentos apresentados, buscou-se obter as equações que relacionam o fator de conversão e o *offset* de cada junta do manipulador, resultando nos valores de posição necessários para movê-lo a uma posição arbitrária.

A. Offset das Juntas do Manipulador

Dessa forma, primeiramente obteve-se os valores de *offset*, OS , de cada junta do manipulador movendo-o manualmente para a posição *Home*. Assim, os valores obtidos através da janela *Teach* do *Nexway* são apresentados na Tabela III.

TABELA III
VALORES MEDIDOS PARA O *offset* DE CADA JUNTA DO MANIPULADOR.

Junta	1	2	3
<i>Offset</i>	16	-176	462

B. Fator de Conversão das Juntas do Manipulador

Adiante, com o robô em *Home*, comandou-se a junta 3 em $\theta = -90^\circ$ e anotou-se o valor da posição, VM_1 , obtido. Em seguida, repetiu-se o mesmo procedimento para as juntas 1 e 2 do manipulador, movendo-as para -60° e 60° , respectivamente. Disso, calculou-se o fator de conversão de cada junta, assim como segue:

$$FC_1 = \frac{VM_1 - OS_1}{-60^\circ - 0^\circ} = \frac{-1140 - 16}{-60^\circ} = 19.27, \quad (8)$$

$$FC_2 = \frac{VM_2 - OS_2}{60^\circ - 0^\circ} = \frac{1159 - (-176)}{60^\circ} = 22.25, \quad (9)$$

$$FC_3 = \frac{VM_3 - OS_3}{-90^\circ - 0^\circ} = \frac{-1356 - 462}{-90^\circ} = 20.20. \quad (10)$$

Assim, os valores de posição, VM , medidos, e do fator de conversão, FC , calculados para as três juntas estão dispostos na Tabela IV.

TABELA IV
VALORES MEDIDOS PARA VM E CALCULADOS PARA FC .

Junta	1	2	3
θ ($^\circ$)	-60	60	-90
VM	-1140	1159	-1356
FC	19.27	22.25	20.20

C. Equação Utilizada no Comando MOVE

Portanto, após a obtenção dos valores de fator de conversão e *offset*, encontrou-se as equações necessárias para utilizar o comando *MOVE* do *Robix* e movê-lo a uma posição arbitrária a partir de θ_1 , θ_2 e θ_3 dados. Para isso, utilizou-se da relação apresentada em (7).

Logo, aplicando (7) para cada junta do manipulador, e utilizando os dados dispostos nas Tabelas III e IV, obtém-se:

$$VM_1 = FC_1 \cdot \theta_1 + OS_1 = 19.27 \cdot \theta_1 + 16. \quad (11)$$

$$VM_2 = FC_2 \cdot \theta_2 + OS_2 = 22.25 \cdot \theta_2 - 176. \quad (12)$$

$$VM_3 = FC_3 \cdot \theta_3 + OS_3 = 20.20 \cdot \theta_3 + 462. \quad (13)$$

Em seguida, considerando a orientação $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ e $\theta_3 = 30^\circ$, tem-se, pelas equações (11), (12) e (13), os valores de posição:

$$VM_1 = 1172. \quad (14)$$

$$VM_2 = 825. \quad (15)$$

$$VM_3 = 1068. \quad (16)$$

Logo, após enviar o comando ao manipulador, ele se movimentou de modo a atingir a posição explicitada na Figura 5, em que nela foi possível medir as coordenadas finais: $x = 206 \text{ mm}$, $y = -120 \text{ mm}$ e $z = 170 \text{ mm}$ do TCP. Esse deslocamento foi registrado em vídeo para a validação do experimento analisado [11].

Por fim, visando validar as equações de movimentação encontradas, utilizou-se a matriz de cinemática direta H_{-1}^3 , substituindo os valores de θ_1 , θ_2 e θ_3 em (6). Dessa forma, é possível verificar os valores calculados e medidos de x , y e z para o TCP em *Home* e em $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ e $\theta_3 = 30^\circ$, através das Tabelas V e VI, respectivamente.

TABELA V

VALORES MEDIDOS E CALCULADOS DE x , y E z PARA O TCP EM *Home*.

<i>Home</i>	Calculado (mm)	Medido (mm)	erro (mm)
x	258	260	2
y	-290	-290	0
z	115	114	-1

TABELA VI

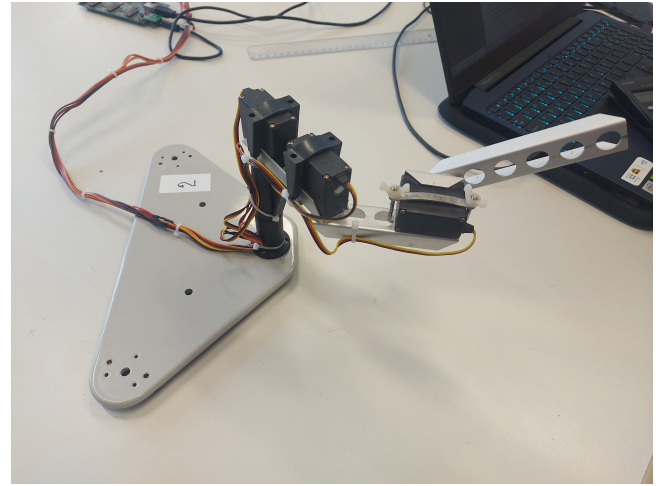
VALORES MEDIDOS E CALCULADOS DE x , y E z PARA O TCP EM $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ E $\theta_3 = 30^\circ$.

$(60^\circ, 45^\circ, 30^\circ)$	Calculado (mm)	Medido (mm)	erro (mm)
x	198	206	8
y	-127	-120	7
z	169	170	1

Logo, visto que o maior erro obtido foi de 8 mm , então atesta-se a validade das Equações (11), (12) e (13) utilizadas para encontrar os valores de comando de movimentação do *Robix*, assim como da matriz de transformação homogênea H_{-1}^3 que representa a posição e orientação do TCP em relação ao *frame* 0 de referência.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, concluiu-se que a calibração na robótica consiste em uma técnica fundamental e viável a fim de colaborar para a melhoria de posicionamento final do manipulador, no qual objetiva-se certificar a exatidão necessária para a realização de tarefas solicitadas. Além disso, também se afirma que a modelagem de cinemática direta consiste em um método essencial para realizar a validação de um manipulador, uma vez que esse tipo de cinemática visa obter



(a)



(b)

Fig. 5. Manipulador *Robix* com orientação $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ e $\theta_3 = 30^\circ$: (a) Vista lateral; (b) Vista superior.

as posições e velocidade do efetuador para uma posição arbitrária de suas articulações.

Logo, com o desenvolvimento dos procedimentos propostos, foi possível realizar os testes, de forma em que se encontrou valores de coordenadas finais bastante próximos aos resultados encontrados pela modelagem via cinemática direta, o que valida o modelo matemático obtido para o manipulador através de dados experimentais. Com isso, pode-se relacionar as pequenas discordâncias encontradas para a posição do TCP - *Tool Center Point* a erros cometidos na medição dos comprimentos dos elos e das coordenadas finais do robô, além da imprecisão de posicionamento dos servo motores presentes no kit *Robix Rasca!*TM.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Divinópolis, pelo apoio e por disponibilizar o acesso aos

recursos para a execução deste trabalho, e também pelo suporte do Departamento de Engenharia Mecatrônica.

REFERÊNCIAS

- [1] D.F.M. Cruz, Implementação da cinemática inversa de robôs redundantes operando em ambientes confinados no projeto roboturbo, Online, 2007, url: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90064/245604.pdf?sequence=1>.
- [2] V.F. Romano, Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos, Edgard Blucher Ltda, São Paulo, Brasil, 2002.
- [3] R.S. Dâmaso, Validação experimental da modelagem cinemática de um robô baseado em kit didático, SBA, 1, 2019.
- [4] S.C.F. Tartari, Modelagem e Otimização de um robô de arquitetura paralela para aplicações industriais. Ph.D. thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.
- [5] M.W. Spong, S. Hutchinson and M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2020.
- [6] R.S. Souto, Modelagem Cinemática De Um Robô Quadrúpede e Geração de Seus Movimentos Usando Filtragem Estocástica, Ph.D. thesis, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2007.
- [7] R.K. Mittal and I.J. Nagrath, Robotics and Control, Tata McGraw-Hill, New Delhi, India, 2003.
- [8] J.M. Rosário, Princípios de Mecatrônica, Prentice Hall, São Paulo, Brasil, 2005.
- [9] R.N. Jazar, Theory of Applied Robotics. Springer US, Boston, MA, 2010.
- [10] R. Rascal™, Robot construction set, Online, 1992, url: <http://www.robix.com/default.html>.
- [11] I. Ribeiro, Deslocamento do robô Robix: TCP em Home para posição em $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ e $\theta_3 = 30^\circ$, Online, 2022, url: <https://www.youtube.com/watch?v=RKptUsGa3HE>.