

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA MODELAGEM CINEMÁTICA DE UM ROBÔ MANIPULADOR BASEADO EM KIT DIDÁTICO

RENATO S. DÂMASO

*Laboratório de Robótica, Departamento de Engenharia Mecatrônica, CEFET-MG
Rua Álvares de Azevedo, 400, B. Bela Vista, Divinópolis, MG
E-mail: renatosd@cefetmg.br*

Abstract— This work aims to contribute in some way to reducing the gap between theory and practice that often exists in the teaching of industrial robotics in Brazil. For this purpose the scope of the theory associated to the kinematic modelling of a manipulator with three degrees of freedom was delimited. The steps of mathematical modelling, computational simulation and experimental validation are formalized through the implementation of the manipulator with a low cost didactic kit. The placement of the manipulator in operation involved calibration and offset compensation. In the end, the expected data, estimated through the application of mathematical model and computational simulation were compared with the experimental data, in order to validate the models for three poses of the robot.

Keywords— Robots manipulators, Kinematic modelling, Computational simulation, Validation

Resumo— Este trabalho tem por objetivo contribuir de alguma forma para a diminuição da distância geralmente existente entre os conceitos teóricos abordados e a prática experimental no ensino da robótica industrial em cursos de engenharia no país. Para isso, foi delimitado o escopo da teoria associada à modelagem cinemática direta de um manipulador com três graus de liberdade. São formalizadas as etapas de modelagem matemática, simulação computacional e montagem experimental por meio da implementação do manipulador considerado, utilizando um kit didático de baixo custo. A colocação do manipulador em operação envolveu as necessidades de calibração e compensação de *offset*. Ao final, os dados esperados, estimados por meio da aplicação do modelo matemático e da simulação computacional, foram comparados com os dados experimentais obtidos para três posicionamentos do robô, de forma a validar os modelos matemático e computacional.

Palavras-chave— Robôs manipuladores, Modelagem cinemática, Simulação computacional, Validação

1 Introdução

Ao se falar em automação industrial no Brasil, especialmente na automação flexível baseada no emprego de robôs, invariavelmente se pensa em sistemas complexos e de custos elevados.

Por outro lado, ao se pensar no ensino da robótica industrial, outra constatação vem à cabeça dos agentes envolvidos, quer sejam docentes ou discentes, que é a distância geralmente existente entre a teoria contida nos livros clássicos da área e a parte experimentação praticada. Essa distância do que é ensinado em cursos de engenharia, como é o caso do curso de Engenharia Mecatrônica oferecido pelo CEFET-MG em sua unidade de Divinópolis, talvez aconteça, em parte, por conta dos conceitos teóricos abordados se aplicarem geralmente ao projeto de robôs, enquanto que os experimentos realizados em laboratório se relacionarem mais com a operação dos robôs e com suas aplicações mais básicas (CARVALHO, 2008). Com frequência, as práticas realizadas propõem que os alunos utilizem robôs manipuladores como usuários, abordando as interfaces de operação, escrevendo e testando pequenos programas. Tais programas são feitos em linguagens elaboradas para facilitar essas tarefas para operadores que geralmente não detêm conhecimentos aprofundados de programação e de detalhes do *hardware* envolvido nos sistemas robóticos de produção.

Diante do panorama descrito, pensou-se numa forma de contribuir para a diminuição dessa distância por meio da aplicação de teorias constantes da literatura clássica da robótica para uma modelagem matemática e geométrica da configuração de manipulador escolhido. Essa modelagem seria aplicada na elaboração de uma simulação computacional. Já a parte experimental envolveria a implementação do robô escolhido, utilizando para isso um kit educacional de baixo custo. Portanto, procurou-se planejar um procedimento que pudesse ser reproduzido por outras instituições que possuam cursos de engenharia que abordem o ensino da robótica. É cogitado que o procedimento descrito nesse texto possa, até mesmo, servir de introdução à metodologia científica, já que busca seguir as etapas de modelagem, simulação e validação experimental. Além disso, na parte experimental, é envolvida a programação de robôs feitos com kit didático, que se aproxima à programação de robôs industriais, como ficará evidenciado mais adiante nesse artigo.

Os primeiros conceitos constantes dos livros clássicos de ensino dos fundamentos da robótica industrial, tais como (SPONG *et ali*, 2006), (CRAIG, 2005), (SICILIANO *et ali*, 2009), entre outros, se referem à transformações de sistemas de coordenadas e à modelagem cinemática de manipuladores. A modelagem das transformações de sistemas de coordenadas ortonormais, atribuídos a cada conjunto de juntas e elos do robô, são representadas por combinações de translações e

rotações. Já a modelagem cinemática de manipuladores relaciona o espaço articular ao espaço cartesiano envolvidos. Por conta desses conhecimentos fundamentais tratem de conceitos dos quais derivam grande parte dos demais conhecimentos abordados nesses livros, a modelagem cinemática de manipuladores foi delimitada aqui como sendo o escopo de estudo.

Portanto, o objetivo desse artigo é descrever um procedimento que aplique a teoria relacionada na modelagem cinemática de manipuladores, sua simulação computacional e sua montagem experimental baseada em kit didático de baixo custo. A expectativa é que a validação da modelagem matemática e da simulação computacional através dos dados experimentais obtidos seja uma forma de aproximar a teoria da prática no ensino da robótica industrial.

2 Fundamentação teórica

É visto na teoria básica de robótica, especialmente em alguns cursos de engenharia, que a modelagem cinemática de manipuladores depende da definição de sistemas cartesianos de referência, sendo estes sistemas ortogonais e destrógiros (SPONG *et ali*, 2006). O primeiro desses sistemas de coordenadas é fixo de referência e os outros representam transformações produzidas pelos movimentos de rotação e de translação de juntas e elos que compõem as cadeias cinemáticas abertas dos manipuladores. Uma forma conveniente de representar tais transformações de translação e rotação empregam as chamadas matrizes de transformação homogêneas, como mostrado na Equação (1). Tais matrizes compreendem a submatriz 3x3 de rotação do sistema de coordenadas móvel em relação ao sistema fixo. Já os três primeiros elementos da última coluna representam o vetor de translação da origem do sistema de coordenadas móvel expresso no sistema de referência (SPONG *et ali*, 2006).

$$H = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & o_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & o_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & o_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

De acordo com as proposições de Denavit e Hartenberg (D-H), para a realização da modelagem cinemática direta de um manipulador é preciso fazer a atribuição dos sistemas de coordenadas ortonormais a cada uma de suas juntas, quer sejam rotacionais ou prismáticas. Em seguida, é preciso obter os parâmetros a serem expressos na Tabela de D-H, onde cada linha da tabela deverá apresentar uma única variável, sendo θ_i no caso da junta ser

rotacional, ou d_i se tratar-se de uma junta prismática. Finalmente, cada linha dará origem a uma matriz de transformação homogênea A_i . Multiplicadas as matrizes A_i , na ordem crescente de seus índices, será produzido o modelo cinemático direto T_n^0 (SPONG *et ali*, 2006).

Já a solução do problema de cinemática inversa de manipuladores pode ser obtida de forma algébrica ou por meio geométrico. A abordagem algébrica se dá por meio da utilização do modelo cinemático direto e de uma posição e orientação desejada do sistema de coordenadas na extremidade do robô em relação ao sistema de coordenadas fixo de referência. Para isso, é preciso resolver parte do sistema formado por doze equações. Desse total, somente três equações de posição e três das nove equações de orientação são independentes. Já a abordagem geométrica leva em conta as relações obtidas da análise das projeções da estrutura do manipulador nos planos horizontal e de trabalho do robô.

3 Metodologia

3.1 A Montagem do Manipulador

Foi escolhida para esse trabalho uma estrutura de manipulador composta por três juntas rotacionais (3R), semelhante à esboçada por meio do diagrama de arames da Figura 1. Como as duas primeiras juntas possuem eixos verticais, essa parte do manipulador se assemelha a um SCARA (do inglês, *Selective Compliance Assembly Robot Arm*).

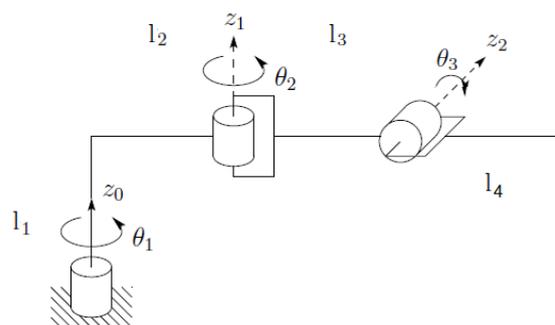


Figura 1. Estrutura do manipulador 3R escolhido

A partir da escolha do tipo de estrutura do manipulador a ser abordado, foi montado um robô utilizando um kit didático de baixo custo, o Robix da Rascal (ROBIX, 2018). Tal montagem é mostrada na Figura 2 em sua posição inicial de referência (*Home*). Na imagem foram indicados os eixos X_0 e Z_0 , sendo que o eixo X_0 foi considerado sobre o plano da mesa.

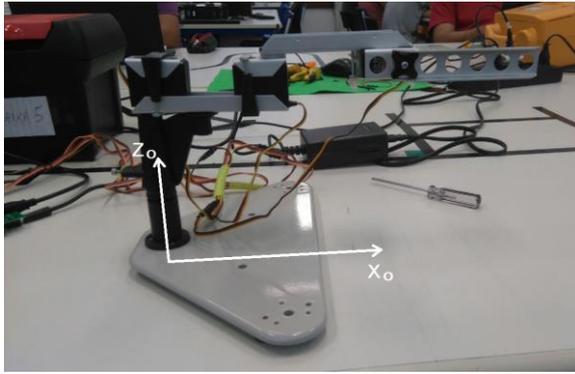


Figura 2. Manipulador 3R montado com o kit didático

3.2 A Modelagem Matemática

Para a realização da modelagem cinemática seguindo as convenções de D-H, foram feitas as medições no robô montado, apresentadas na Tabela 1, sendo que foi escolhida a quina aguda inferior do último elo como origem do sistema de coordenadas 3. Foi elaborado um novo diagrama de arames mais detalhado, mostrado na Figura 3, onde l_4 representa o deslocamento na direção perpendicular ao plano da folha de papel e l_6 a descida do eixo do terceiro servo motor até a extremidade inferior do último elo, usada como referência.

Tabela 1: Dimensões do manipulador 3R

l_1	152,2 mm
l_2	98,0 mm
l_3	93,1 mm
l_4	19,0 mm
l_5	104,9 mm
l_6	11,1 mm

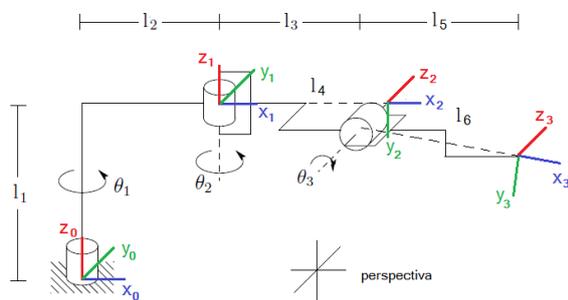


Figura 3. Representação do manipulador 3R com atribuições dos sistemas de coordenadas

Os parâmetros de Denavit-Hartenberg para o manipulador 3R são resumidos na Tabela 2, onde $h = \sqrt{l_5^2 + l_6^2} = 105,5$ mm e $\gamma = \text{Atan2}(l_5, l_6) = 6,04^\circ$.

Tabela 2: Parâmetros de D-H

I	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1^*	l_1	l_2	0°
2	θ_2^*	0	l_3	-90°
3	$\gamma + \theta_3^*$	$-l_4$	h	0°

*variável

A partir da Tabela de D-H, foram obtidas as matrizes A_i para cada conjunto de junta e elo do robô:

$$A_1 = \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 & l_2c1 \\ s1 & c1 & 0 & l_2s1 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} c2 & 0 & -s2 & l_3c2 \\ s2 & 0 & c2 & l_3s2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c\gamma3 & -s\gamma3 & 0 & h.c\gamma3 \\ s\gamma3 & c\gamma3 & 0 & h.s\gamma3 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

E da multiplicação das matrizes A_i , obteve-se o modelo cinemático direto:

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c12.c\gamma3 & -c12.s\gamma3 & -s12 & l_2c1+l_3c12+l_4s12+h.c12.c\gamma3 \\ s12.c\gamma3 & -s12.s\gamma3 & c12 & l_2s1+l_3s12-l_4c12+h.s12.c\gamma3 \\ -s\gamma3 & -c\gamma3 & 0 & l_1-h.s\gamma3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3 Simulação Computacional

Para fazer a modelagem computacional do manipulador 3R foram empregados recursos do *Robot Toolbox* para MatLAB (CORKE, 2011). Como é mostrado na Figura 4, o programa de simulação apresenta em sua interface gráfica o manipulador 3R em sua posição de referência (*Home*), correspondendo a $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0^\circ$. Lembrando que q_i é a variável generalizada, sendo θ_i se a junta for rotacional, ou d_i se a junta for prismática.

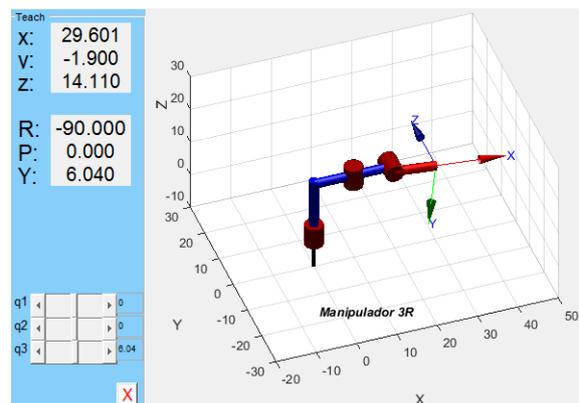


Figura 4. Interface do programa de simulação

Por meio dessa simulação computacional, é possível entrar com os valores articulares desejados, em graus, e obter os valores de X, Y e Z, em centímetros, calculados da origem do sistema de coordenadas 3, na extremidade do robô, em relação ao sistema de coordenadas 0 de referência. Tais valores podem ser vistos na Figura 4 e correspondem à cinemática direta de posição. Além disso, há a possibilidade de variar de forma incremental as posições articulares a fim de obter os valores cartesianos desejados para a extremidade do robô, correspondendo à solução da cinemática inversa de posição por esse procedimento de aproximação sucessiva.

4 Utilização do kit Robix

O kit didático Robix da Rascal é um kit considerado de baixo custo, estimado em cerca de mil e setecentos reais. Possui diversas peças estruturais, do tipo elos, peças de acoplamento e fixação, uma base, uma garra, seis motores, cabos para ligação dos motores, uma placa eletrônica de acionamento dos motores e monitoramento de sensores, cabo USB para ligação da placa eletrônica a um computador, fonte de alimentação, programas de interfaceamento, entre outros componentes (ROBIX, 2018).

Esse kit foi utilizado para a montagem de um robô 3R parecido com um SCARA, por ter os eixos de suas duas primeiras juntas orientadas verticalmente, como podem ser vistos nas Figuras 2 e 3. Através do programa servidor Usbor Nexus, foram registrados os três servo motores do robô e feitas as configurações iniciais. Já o programa cliente Usbor Neway, cuja interface é mostrada na Figura 5, permite que se faça a programação do robô, quer seja por meio de comandos diretos de movimentação, quer seja utilizando a janela de movimentação manual, mostrada na Figura 6. Essa janela pode ser aberta por meio da tecla da caixa de ferramentas (*Toolbox*) indicada por um círculo na parte superior da Figura 5. Após os posicionamentos desejados serem alcançados, usando as teclas existentes na janela de movimentação, esses posicionamentos podem ser gravados por meio da tecla “Add to Script”. Esse procedimento é bastante semelhante ao método de programação *on-line* por aprendizagem, nesse caso ponto a ponto, presente nos sistemas robóticos industriais. Os posicionamentos que foram gravados podem ser repetidos, ou utilizados para comporem uma sequência de movimentação para a realização de uma tarefa.

O comando de movimentação da junta *i* para programação do Robix possui a sintaxe:

Move <*i*> to <*valor*>

Onde podem ser atribuídos valores dentro da faixa de -1600 a 1600 para o argumento “*valor*”, o que faz o servo motor variar seu posicionamento de cerca de -80° a 80°. Portanto, houve a necessidade de fazer a calibração do robô, de forma a obter o fator de conversão do valor a ser escrito no comando “Move” e o valor do ângulo, em graus, que a junta efetivamente deve se mover. Esse valor em ângulo também corresponde aos ângulos constantes do modelo matemático e da simulação computacional.

Essa calibração foi realizada para a junta 1 do robô baseado no kit Robix, fazendo três movimentações de 90°, partindo de ângulos diferentes e calculando a média. Tal procedimento foi realizado com a junta 3, posicionando-a na horizontal e obtendo o valor do argumento do comando “Move” por meio da tecla “Add to Script”. Então o último elo foi movido manualmente na direção positiva da junta 3 até atingir a direção vertical. O valor do comando “Move” foi novamente adquirido e o fator de conversão *f*, calculado por meio da Equação (2).

$$f = \frac{\text{valor final} - \text{valor inicial}}{90^\circ} = 20,17/^\circ \quad (2)$$

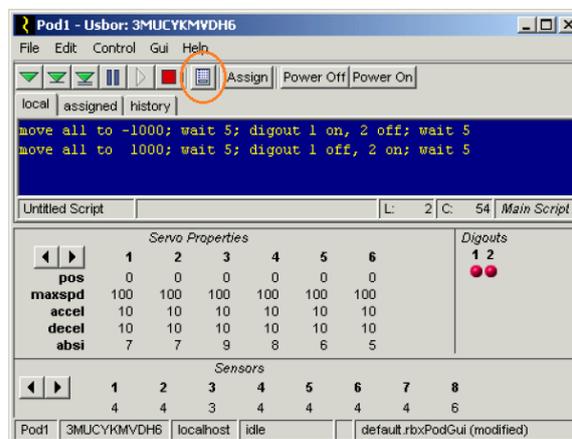


Figura 5. Interface de programação Nexway



Figura 6. Janela de movimentação manual

Outro procedimento necessário foi a obtenção dos valores de *offset* para o comando “Move”, ou seja, os valores para os quais as posições das articulações deveriam ser nulas. Os *offsets* foram

adquiridos após o posicionamento do robô na posição de referência (*Home*), como mostrado na Figura 7.

```
move 1 to 37, 2 to 111, 3 to -326;
```

Figura 7. Comando “Move” com valores de *offset*

5 Testes e Resultados

Para os testes e validação dos modelos matemático e computacional por meio da obtenção de dados experimentais, foi planejada a avaliação para a posição de referência (*Home*) e para duas outras posições, P_1 e P_2 . Para essas posições, os ângulos θ_i escolhidos são mostrados na Tabela 3, juntamente com os valores v_i , para o comando “Move”, calculados a partir da Equação (3).

$$v_i = f \cdot \theta_i + offset_i \quad (3)$$

Tabela 3: Ângulos e valores para teste

Pose	θ_1 / v_1	θ_2 / v_2	θ_3 / v_3
Home	0° / 37	0° / 111	0° / -326
P ₁	60° / 1247	30° / 716	-45° / -1234
P ₂	-60° / -1173	-30° / -494	30° / 279

Os valores esperados das coordenadas X, Y e Z da origem do sistema de coordenadas 3 em relação ao sistema de coordenadas fixo, quer sejam calculados por meio da modelagem cinemática direta, quer seja obtidos por meio do programa de simulação, são comparados com os valores experimentais nas Tabelas 5 a 7. Os valores obtidos das simulações podem ser vistos nas Figuras 4, 8 e 9. Já os valores experimentais foram medidos diretamente do posicionamento do manipulador 3R feito com o kit Robix, em três tentativas para cada posicionamento, como apresentado na Tabela 4. Dessa forma, os dados experimentais teriam valor estatístico, ainda que simples média aritmética e desvio padrão apresentados.

Tabela 4: Posicionamentos medidos e valores estatísticos para *Home*, P_1 e P_2

Tentativa	1ª	2ª	3ª	Média aritmética	Desvio padrão
X [mm]	297,1	294,8	295,7	295,9	+/- 1,6
Y [mm]	19,8	-21,0	-18,4	-19,7	+/- 1,8
Z [mm]	143,2	138,9	142,0	141,4	+/- 3,1
X [mm]	73,3	77,1	73,9	74,8	+/- 2,9
Y [mm]	263,7	261,8	260,8	262,1	+/- 2,1
Z [mm]	216,1	220,0	221,5	219,2	+/- 3,9
X [mm]	32,3	30,1	33,2	31,9	+/- 2,3
Y [mm]	-262,9	-262,4	-266,1	-263,8	+/- 2,8
Z [mm]	95,2	97,8	94,0	95,7	+/- 2,7

Tabela 5: Comparação entre valores esperados e valores obtidos experimentalmente para *Home*

Dados	Valores calculados	Valores simulados	Valores experimentais
X	296,0 mm	296,0 mm	295,9 mm
Y	-19,0 mm	-19,0 mm	-19,7 mm
Z	141,1 mm	141,1 mm	141,4 mm

Tabela 6: Valores esperados e obtidos para P_1

Dados	Valores calculados	Valores simulados	Valores experimentais
X	68,0 mm	68,0 mm	74,8 mm
Y	260,0 mm	260,0 mm	262,1 mm
Z	218,6 mm	218,6 mm	219,2 mm

Tabela 7: Valores esperados e obtidos para P_2

Dados	Valores calculados	Valores simulados	Valores experimentais
X	30 mm	30,0 mm	31,9 mm
Y	-263,3 mm	-263,3 mm	-263,8 mm
Z	90,1 mm	90,1 mm	95,7 mm

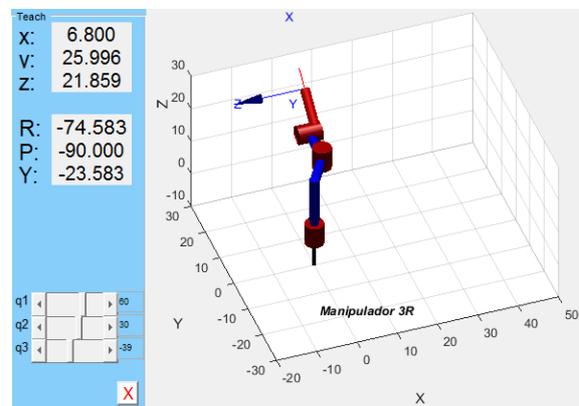


Figura 8. Simulação para a posição P_1

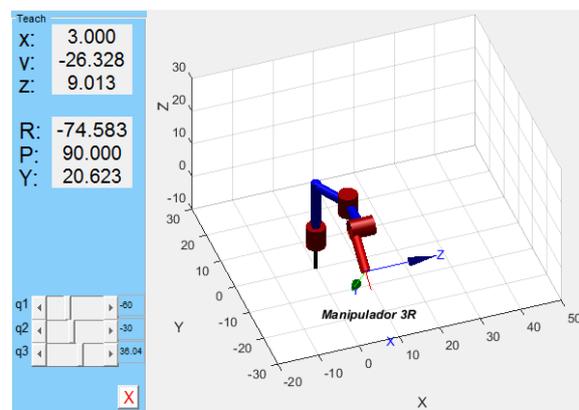


Figura 9. Simulação para a posição P_2

As comparações dos resultados nas Tabelas 5 a 7 mostram que:

- As igualdades entre os valores obtidos da modelagem matemática e os valores resultantes da simulação computacional eram esperadas e

mostram apenas que a simulação foi programada em concordância com a modelagem matemática. Dessa forma, a simulação pode ser usada para obtenção dos valores cartesianos esperados para outras posições articulares. A simulação também pode ser útil para prever a solução da cinemática inversa de posição, como comentado no final do Item 2.3.

- Os valores experimentais ficaram bastante próximos dos valores calculados e simulados, o que valida os modelos matemático e computacional através dos dados experimentais obtidos. A diferença pode ser atribuída: aos arredondamentos feitos na modelagem matemática e, conseqüentemente, na simulação; aos erros cometidos na medição dos comprimentos dos elos e das coordenadas X , Y e Z ; a torções e desalinhamentos da montagem não percebidos e, conseqüentemente, não modelados; e aos erros de posicionamento produzidos pela imprecisão inerente aos servo motores utilizados no kit Robix.

6 Conclusões

Neste trabalho, buscou-se formular um procedimento que pudesse contribuir para a aproximação da teoria contida na literatura básica da área da robótica industrial e da prática experimental correspondente a esse ensino no Brasil. Para essa finalidade, buscou-se realizar uma modelagem cinemática para um manipulador 3R escolhido, seguindo as convenções de D-H. Foi implementada uma simulação computacional para esse robô 3R por meio do *Robot Toolbox* para o ambiente MatLAB. Foram realizados testes no robô montado com kit educacional e os valores medidos de posicionamento da quina inferior da extremidade do robô foram comparados com os valores esperados da modelagem matemática e da simulação computacional.

Os resultados da comparação comprovaram que a modelagem cinemática, resultante da aplicação da teoria mostrou-se útil para prever a posição da quina da extremidade do robô em relação ao sistema de coordenadas de referência, sendo que essa validação foi feita experimentalmente. Assim, foi alcançado o objetivo de propor um procedimento acessível às instituições de ensino, por utilizar um kit didático de baixo custo, e que se mostrou capaz de aproximar a teoria da prática, favorecendo assim a compreensão e o aprendizado desses conceitos da robótica industrial.

Referências Bibliográficas

- Engenharia Mecânica – CONEN, Salvador, Brasil.
- Corke, P. (2011) *Robotics, Vision and Control: Fundamentals Algorithms in MATLAB*. Springer.
- Craig, J. J. (2005). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 3rd edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- Robix (2018). *Rascal Robot Construction Set*. Disponível em <http://www.robix.com/>, acessado em março de 2018.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G. (2009) *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer-Verlag.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M. (2006) *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Inc.
- Carvalho, J. A. D. (2008) *Metodologia para o Ensino de Robótica Industrial em Cursos de Engenharia Utilizando Sistemas Didáticos de Baixo Custo*. V Congresso Nacional de