

## **DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM CINEMÁTICA PARA OS BRAÇOS MECÂNICOS DAS ESTRUTURAS: CILÍNDRICA, SCARA E ARTICULADA.**

**Sérgio L. SAMPAIO JUNIOR; Jorge A. S. CARDOZA;  
Elda N. de CARVALHO; Felipe A. PINAGÉ.**

Unidade de Ensino Descentralizada de Manaus / CEFET-AM.

Av. Governador Danilo Areosa, sn – Distrito Industrial

CEP: 69075-350 - Manaus / Amazonas, Fax (92)3613-3530.

[lucena.sampaio@yahoo.com.br](mailto:lucena.sampaio@yahoo.com.br), [jcardoz@cefetam.edu.br](mailto:jcardoz@cefetam.edu.br),

[eldanunes@gmail.com](mailto:eldanunes@gmail.com), [felipepinage@gmail.com](mailto:felipepinage@gmail.com)

### **RESUMO**

Este estudo propõe o desenvolvimento da modelagem cinemática para os braços mecânicos considerando as estruturas do tipo cilíndrica, scara e articulada, a utilização desta modelagem para fins didáticos. O objetivo deste trabalho é mostrar a modelagem cinemática das matrizes de transformações homogêneas, através dos modelos matemáticos que determinam o posicionamento da estrutura no espaço tridimensional dos robôs manipuladores propostos. Os modelos matemáticos envolvidos são baseados em matrizes que podem descrever movimentos nos eixos de coordenadas, rotacionais e translações, utilizando como ferramentas as matrizes de transformações homogêneas, que permitem efetuar o controle dos servomecanismos e executar os movimentos. A pesquisa baseia-se na experimentação das estruturas através de um robô didático, no qual os movimentos são obtidos a partir dos modelos cinemáticos, com a medição dos parâmetros dimensionais e determinação dos sistemas de coordenadas. Para validação dos resultados, são feitas simulações a partir de dez pontos estratégicos dentro do volume de trabalho, utilizando os recursos das planilhas eletrônicas. Os resultados obtidos são as modelagens cinemáticas para as três estruturas, com o objetivo de facilitar o aprendizado dos alunos.

**Palavras - chave:** robô manipulador, modelagem cinemática de robôs, simulação de robô, método didático.

## 1. INTRODUÇÃO

A robótica é um campo da engenharia que constitui uma matéria multidisciplinar e requer conhecimentos provenientes de diversos campos, como projeto mecânico, eletrônico de potência, integração de grande escala e engenharia de software e que continuará a serem influenciados pelos avanços em acionamentos, controle, mecanismos, programação e sensores (ARMADA, 1995).

O mercado industrial vem utilizando a robótica nas linhas de produção, por sua flexibilidade, produtividade e facilidade de programação. Esta tecnologia é empregada em processos de alta periculosidade tais como: soldagem, usinagem, tóxicos, materiais radioativos, temperaturas altas e baixas, químicos, e exploração petrolífera, a medicina também vem usando robôs nos centros cirúrgicos (oftalmológicos e cardiológicos), além das próteses de pernas e braços mecânicos.

Atualmente o Parque Industrial de Manaus – PIM possui o pólo nacional de duas rodas e em diversos setores da indústria, portanto a demanda na área da robótica é bastante significativa. Porém as instituições de ensino são carentes nesta tecnologia, assim como, nos recursos humanos disponíveis. Este trabalho propõe um conhecimento sobre robótica e modelagem de manipuladores, que poderá ser utilizado por alunos de instituições públicas e privadas, nos níveis: fundamental, médio e técnico, ajudando na sua formação interdisciplinar em varias áreas do conhecimento.

## 2. MODELAGEM

A evolução das coordenadas das juntas do robô representa o modelo cinemático de um sistema articulado no espaço tridimensional. A notação de Denavit-Hartenberg é uma ferramenta utilizada para sistematizar a descrição dos sistemas mecânicos articulados com  $n$  graus de liberdade. (DENAVID, 1955).

A modelagem cinemática trata do estudo dos movimentos dos robôs sem considerar as causas que lhe dão origem (GROOVER, 1988). O modelo cinemático é o principal processo para movimentação dos manipuladores e permite determinar, a partir do ângulo de cada junta, a posição e orientação do elemento terminal do robô, colocando o valor angular na matriz de transformação homogênea em uma determinada coordenada pode fazer o manipulador rotacionar ou transladar de um ponto para outro.

### 2.1 Características dos Manipuladores

Segundo Rosário (2005), o manipulador robótico é constituído basicamente por uma base, juntas e elos conectados em série. O sistema de referência das coordenadas de um manipulador tem início na base, as juntas ou articulação de braço mecânico são dispositivos responsáveis pela movimentação do robô, as juntas do braço humano também desempenham a função de mobilidade no esqueleto. O número de juntas é igual ao grau de liberdade do robô. A principal característica estrutural dos braços mecânicos propostos é que possuem apenas dois tipos de junta, as juntas prismáticas são simbolizadas por P e executam movimentos lineares e as juntas rotacionais são simbolizadas por R e executam movimentos circulares, os elos fazem as ligações ou conexões entre as juntas, os instrumentos convencionais serviram para fazer as medidas dos elos.

O manipulador Cilíndrico possui uma junta rotacional e duas juntas deslizantes ou prismáticas, a combinação das juntas poderá descrever um movimento final em torno de um cilindro, onde o volume de trabalho está contido em dois cilindros, um interno e um externo. Geralmente, a junta rotacional R localiza-se na base e em torno de um eixo vertical, uma junta prismática P1, que se desloca na horizontal perfazendo a área do cilindro interno e externo e a outra junta prismática P2 que se desloca na vertical e é responsável pela altura dos cilindros. A Figura 1 apresenta um manipulador cilíndrico.

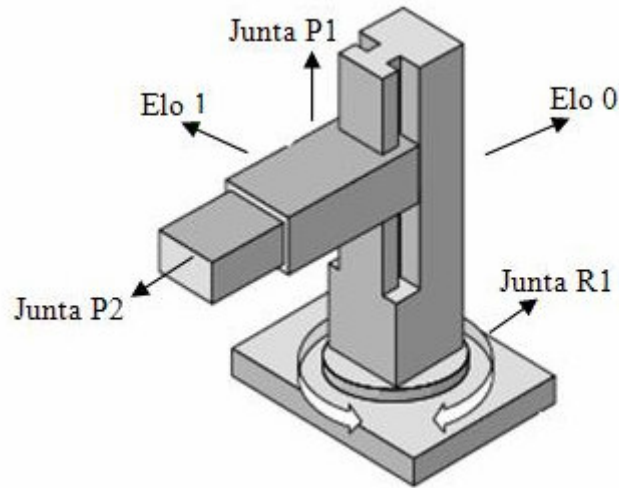


Figura 1 – Manipulador Cilíndrico obtida de (ROSÁRIO, 2005).

O manipulador Scara possui duas juntas rotacionais e uma prismática, apesar do Scara apresentar tipos de juntas iguais ao Esférico, estrutura que não faz parte do escopo deste trabalho, ele se diferencia devido à posição em que as juntas estão colocadas. As juntas R1 e R2 realizam movimentos rotacionais na horizontal, a junta prismática P permite o movimento vertical, fazendo com que o elemento terminal do robô se posicione em qualquer ponto dentro da sua área de trabalho, podendo até transpor algumas posicionadas a sua frente. A Figura 2 apresenta um manipulador Scara.

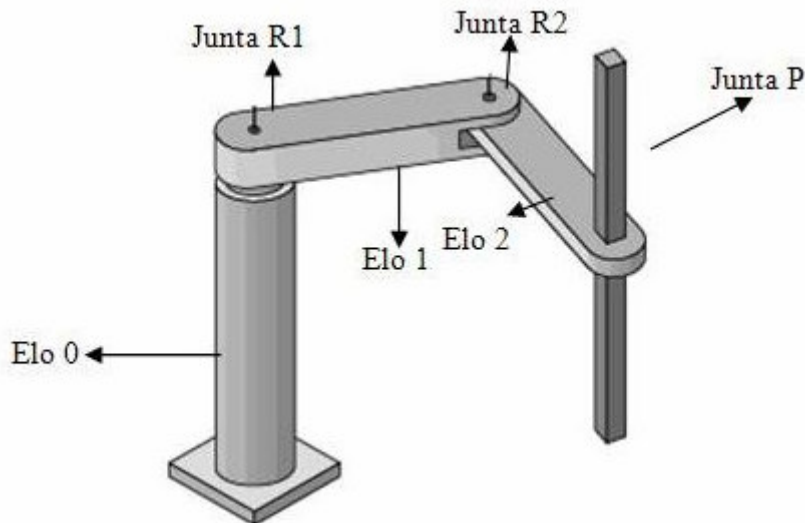
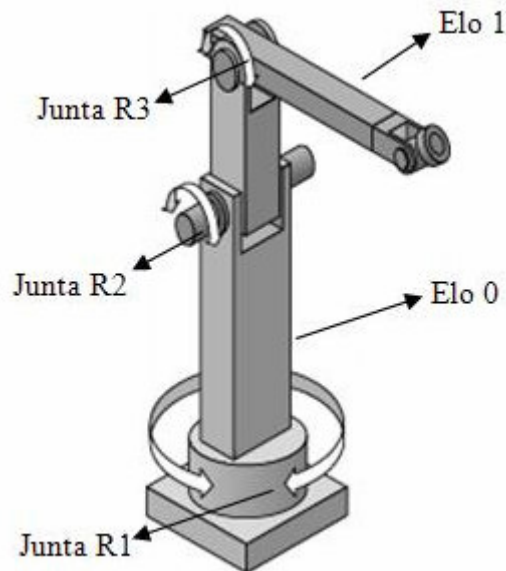


Figura 2 – Manipulador Scara obtida de (ROSÁRIO, 2005).

O manipulador articulado é o mais parecido com o braço humano, possuindo quatro juntas rotacionais. O braço mecânico articulado pode ser conhecido como braço antropomórfico, por ser formado somente por juntas rotacionais. Apesar de não possuir outro tipo de junta ele não fica com uma área de trabalho restrita, sua área de atuação é maior que a dos demais manipuladores existentes. Na base desse manipulador tem uma junta R1, que permite o robô movimentar-se na vertical, as juntas R2 e R3, movimentam o robô na horizontal e a junta R4 é fixa e, portanto, não faz da modelagem cinemática. A Figura 3 apresenta um manipulador articulado.



**Figura 3 - Manipulador Articulado obtido de (ROSÁRIO, 2005).**

Compreender as relações matemáticas e físicas que envolvem os movimentos das estruturas de robôs dados nas Figura 1, Figura 2 e Figura 3 é uma tarefa não trivial para estudantes de robótica. Contudo, por meio de um robô manipulador didático, é possível estudar e determinar os modelos cinemáticos das três estruturas, contribuindo significativamente no aprendizado. Na Figura 4 é apresentado o robô didático utilizado no Laboratório de Automação da UNED Manaus / CEFET-AM.



**Figura 4 – Robô Didático ROBIX utilizado no Laboratório de Automação da UNED Manaus / CEFET-AM**

## **2. METODOLOGIA**

A determinação dos modelos cinemáticos são obtidos através de modelos conhecidos e de manipulações matemáticas para determinação de seus parâmetros, cuja quantidade dependendo do modelo utilizado.

O modelo de Denavit – Hartenberg possui quatro parâmetros: primeiro, o ângulo de rotação da junta em determinada coordenada  $\theta_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\Psi_i$  o segundo comprimento de cada elo, o terceiro  $a_i$  menor distancia medida entre os eixos ângulo de torção da junta  $\alpha_i$ , a pesquisa está direcionada com a cinemática dos manipuladores, então os parâmetros;  $a_i$  e  $\alpha_i$  não serão levados em consideração.

A representação de Denavit-Hartenberg (DH) resulta na obtenção de uma matriz de transformação homogênea 4x4, que representa cada sistema de coordenada do elo na junta em relação aos sistemas de

coordenada do elo anterior. Assim, a partir de transformações sucessivas, podem ser obtidas as coordenadas do elemento terminal de um robô (último elo), expressas matematicamente no sistema de coordenadas fixo à base. (ROSÁRIO, 2005)

Esse é o modelo da matriz de transformação homogênea.

$$\begin{bmatrix} r1 & r2 & r3 & \Delta x \\ r4 & r5 & r6 & \Delta y \\ r7 & r8 & r9 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Parâmetros rotacionais. Essas matrizes fornecem as rotações nos respectivos eixos e sua ordem é sempre de Grau 3.

Matriz de rotação no eixo X

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \text{sen} \theta \\ 0 & -\text{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad [\text{Eq. 02}]$$

Matriz de rotação no eixo Y

$$R_{y,\beta} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\text{sen} \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen} \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad [\text{Eq. 03}]$$

Matriz de rotação no eixo Z

$$R_{z,\Psi} = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \text{sen} \Psi & 0 \\ -\text{sen} \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [\text{Eq. 04}]$$

Matriz de translação nos eixos: X, Y, Z.

$$L_{x,y,z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Dx \\ 0 & 1 & 0 & Dy \\ 0 & 0 & 1 & Dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [\text{Eq. 05}]$$

A matriz transformações do manipulador Cilíndrico.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \Psi_1 & \sin \Psi_1 & 0 & \Delta x_1 \\ -\sin \Psi_1 & \cos \Psi_1 & 0 & \Delta y_1 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Dx_1 \\ 0 & 1 & 0 & Dy_1 \\ 0 & 0 & 1 & Dz_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Dx_1 \\ 0 & 1 & 0 & Dy_1 \\ 0 & 0 & 1 & Dz_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad [\text{Eq. 06}]$$

A matriz transformações do manipulador Scara.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \Psi_1 & \sin \Psi_1 & 0 & \Delta x_1 \\ -\sin \Psi_1 & \cos \Psi_1 & 0 & \Delta y_1 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \Psi_2 & \sin \Psi_2 & 0 & \Delta x_2 \\ -\sin \Psi_2 & \cos \Psi_2 & 0 & \Delta y_2 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Dx \\ 0 & 1 & 0 & Dy \\ 0 & 0 & 1 & Dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad [\text{Eq. 07}]$$

A matriz transformações do manipulador Articulado.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \Psi_1 & \sin \Psi_1 & 0 & \Delta x_1 \\ -\sin \Psi_1 & \cos \Psi_1 & 0 & \Delta y_1 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & 0 & -\sin \beta_2 & \Delta x_2 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_2 \\ \sin \beta_2 & 0 & \cos \beta_2 & \Delta z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \beta_3 & 0 & -\sin \beta_3 & \Delta x_3 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_3 \\ \sin \beta_3 & 0 & \cos \beta_3 & \Delta z_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. [\text{Eq. 08}]$$

A matriz transformações do manipulador Articulado.

$$T = \begin{bmatrix} \cos \Psi_1 & \sin \Psi_1 & 0 & \Delta x_1 \\ -\sin \Psi_1 & \cos \Psi_1 & 0 & \Delta y_1 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \Psi_2 & \sin \Psi_2 & 0 & \Delta x_2 \\ -\sin \Psi_2 & \cos \Psi_2 & 0 & \Delta y_2 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \beta_3 & 0 & -\sin \beta_3 & \Delta x_3 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_3 \\ \sin \beta_3 & 0 & \cos \beta_3 & \Delta z_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} \cos \beta_4 & 0 & -\sin \beta_4 & \Delta x_4 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_4 \\ \sin \beta_4 & 0 & \cos \beta_4 & \Delta z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_5 \\ 0 & \cos \theta_5 & \sin \theta_5 & \Delta y_5 \\ 0 & -\sin \theta_5 & \cos \theta_5 & \Delta z_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_6 \\ 0 & \cos \theta_6 & \sin \theta_6 & \Delta y_6 \\ 0 & -\sin \theta_6 & \cos \theta_6 & \Delta z_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[Eq.09]

Uma vez determinadas as matrizes de transformação, seus cálculos podem ser organizados em um programa simples de solução das matrizes, ou mesmo em uma planilha eletrônica. Desta maneira, basta ao usuário da modelagem especificar as medidas dos valores angulares de cada articulação e com isto obter o ponto XYZ da posição do atuador do robô (em geral uma garra ou similar).

### 3. RESULTADOS DO MODELO CINEMÁTICO.

Para demonstrar a utilização dos modelos especificados na Seção 3, são apresentadas dez simulações para obtenção dos pontos de posição dos robôs nas três estruturas apresentadas ao longo deste artigo.

Os manipuladores têm valores angulares nas juntas, sendo que os Cilíndrico e Scara têm três, os Articulados têm quatro, e os didáticos têm seis. A Tabela 1 apresenta os pontos simulados para todas juntas de todas as estruturas, mas como algumas delas não possuem todos os valores angulares, devemos levar em consideração apenas os valores angulares equivalentes ao número de juntas para cada manipulador.

**Tabela 1 – Valor angular para cada junta.**

Valores angulares

Pontos simulados	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	$\alpha 4$	$\alpha 5$	$\alpha 6$	Posição do elemento terminal
1	10°	15°	45°	45°	0°	0°	-
2	-10°	0°	45°	0°	0°	0°	-
3	15°	-15°	-45°	0°	45°	0°	-
4	25°	0°	30°	0°	35°	0°	-
5	30°	0°	20°	0°	45°	0°	-
6	0°	25°	30°	45°	10°	0°	-
7	15°	15°	45°	0°	0°	0°	-
8	10°	0°	45°	0°	-10°	0°	-
9	35°	-45°	45°	0°	-35°	0°	-
10	-10°	15°	-45°	-45°	15°	0°	-

Após a substituição dos valores angulares da Tabela 1 nas matrizes de transformação homogênea, nos respectivos elos e uma vez concluída o produto das matrizes em um aplicativo específico ou uma planilha eletrônica, é encontrado a posição do elemento atuador do manipulador que vai estar localizado no espaço tridimensional em um ponto XYZ.

### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Podemos determinar que a partir da aplicação do modelo Denavit-Hatenberg, representa uma ferramenta adequada para as estruturas: Cilíndrico, Scara, Articulada e o robô didático. A simulação aplicada as planilhas eletrônicas mostrou-se eficiente para ser utilizada na modelagem de robô por estudantes na área de modelagem.

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPEAM (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas) pelo auxílio através do Programa de Apoio a Iniciação Científica (PAIC), ao CEFET-AM pelo uso dos laboratórios e equipamentos, ao Prof. Dr. José Pinheiro de Queiroz Neto e ao Prf. MSc. Flávio Aguiar Soares por suas valiosas contribuições.

**Tabela 2 – Posição do elemento terminal.**

Pontos simulação	Cilíndrico	Scara	Articulado	Robô Didático.
1	X =93,23 Y = 0,00 Z =-34,64	X= 188,10 Y=-16,74 Z= 75,21	X =253,89 Y = -83,16 Z =154,54	X =239,20 Y = -108,15 Z =286,02
2	X =93,23 Y = 0,00 Z =-34,64	X =188,10 Y = -16,74 Z =75,21	X =293,66 Y = -19,49 Z =83,02	X =289,13 Y = 57,07 Z =238,15
3	X =96,42 Y = 0,00 Z =-96,64	X =189,55 Y = -24,96 Z =13,21	X =269,14 Y = -102,19 Z =46,46	X =291,48 Y = -18,07 Z =28,84
4	X =93,23 Y = 0,00 Z =-34,64	X =189,55 Y = -24,96 Z =13,21	X =246,23 Y = -130,93 Z =83,02	X =290,90 Y = -129,03 Z =207,51
5	X = 93,23 Y = 0,00 Z =-34,64	X =180,62 Y = -40,62 Z =75,21	X =234,24 Y = -143,77 Z =83,02	X =287,99 Y = -159,34 Z =184,12
6	X =96,42 Y = 0,00 Z =-96,64	X =176,73 Y = -48,21 Z =75,21	X =183,13 Y = -51,19 Z =31,02	X =234,22 Y = -108,69 Z =249,93
7	X =93,23 Y = 0,00 Z =-34,64	X =189,55 Y = -24,96 Z =82,04	X =256,14 Y = -101,11 Z =62,95	X =267,47 Y = -119,70 Z =238,15
8	X =93,23 Y = 0,00 Z =-34,64	X =188,19 Y = 16,74 Z =75,21	X =260,06 Y = -98,84 Z =72,04	X =289,13 Y = 57,07 Z =238,15
9	X =93,23 Y = 0,00 Z =-34,64	X =172,21 Y = -55,30 Z =75,21	X =192,11 Y = -135,16 Z =17,35	X =227,26 Y = 86,18 Z =206,33
10	X =93,23 Y = 0,00 Z =-34,64	X =188,19 Y = 16,74 Z =75,21	X =285,79 Y = -85,84 Z =58,25	X =213,49 Y = 79,61 Z =2,19

## REFERÊNCIAS

BISHOP, Robert H. **The mechatronics handbook**. USA: CRC Press.

CAPELLI, Alexandre. **Automação industrial: Controle do movimento e processos contínuos**. São Paulo: Érica, 2006.

GROOVER, Mikell P. **Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing**. USA: Prentice Hall, 2001.

HISTAND, Michael B., ALCIATORE, David G. **Introduction to mechatronics and measurement systems**. International Editions 1999: Colorado State University.



NATALE, Ferdinando. **Automação industrial**. 2ª ed. atualizada e ampliada. São Paulo: Érica, 1997.

ROSÁRIO, João Maurício. **Princípios de mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

SOISSON, Harold E. **Instrumentação industrial**. Editora Hemus, 2001.