

3 METODOLOGIAS EXISTENTES

Nesse capítulo, é feita uma apresentação e comparação de duas das principais metodologias encontradas na literatura, a Teoria dos Helicoides e a Convenção de Denavit-Hartenberg, para a modelagem cinemática de robôs. Para isso, utiliza-se o robô Pegasus como estudo de caso, e por fim, é explicado porque foi adotada a Teoria dos Helicoides para a resolução da cinemática direta, mais especificamente, o Método dos Deslocamentos dos Helicoides Sucessivos.

3.1 CINEMÁTICA DE ROBÔS SERIAIS

Conforme SICILIANO et al. (2009), a modelagem de robôs industriais seriais é de extrema importância para a resolução da cadeia cinemática, a qual é formada por multicorpos (corpos rígidos), conectados por juntas (geralmente, de translação ou de revolução) que compõem o robô. A cadeia inicia-se na base do robô e termina no efetuador-final. A análise cinemática consiste na descrição matemática da capacidade que a variação da posição de cada junta possui em alterar a posição e orientação do efetuador final, em relação a um referencial fixo. Esse procedimento é conhecido como Cinemática Direta.

Existe uma outra forma de analisar a cinemática de um robô serial, a qual chama-se Cinemática Inversa, em que as posições de cada uma de suas juntas são determinadas em função da posição e orientação desejadas para o efetuador-final.

Além destas, existe a Cinemática Diferencial, a qual determina e relaciona as velocidades generalizadas do efetuador-final, em função das velocidades das juntas (linear ou angular). Essa relação das velocidades é descrita pelo Jacobiano (EQ. 7.106).

Para a resolução cinemática de robôs seriais, existem alguns métodos que podem ser empregados. Nas seções 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, é apresentado o procedimento para resolução da cinemática direta, por meio do principal método, a Convenção de Denavit-Hartenberg, e de uma metodologia alternativa que utiliza a Teoria dos Helicoides, mais especificamente, o Método dos Deslocamentos dos Helicoides Sucessivos.

3.2 CONVENÇÃO DE DENAVIT-HARTENBERG

A Convenção de Denavit-Hartenberg (D-H), segundo ROCHA et al. (2011), é um dos métodos mais utilizados pela comunidade científica na área de robótica, para resolução cinemática de robôs manipuladores. Com o objetivo de analisar o potencial de implementação, são mostrados procedimentos de forma genérica e um estudo de caso, utilizando o robô Pegasus da Amatrol. A Convenção de D-H, tem como objetivo apresentar uma série de regras para se definir a posição relativa e a orientação entre dois elos consecutivos. Desta forma, é possível estabelecer um procedimento (SICILIANO et al., 2009), a fim de operacionalizar a determinação da cinemática direta por esse método, com n elos e $n - 1$ juntas, conforme a seguir:

1. Identificar as juntas, elos e eixos:

- Numerar as juntas de 1 até n , conforme FIG. 3.1;
- Numerar os elos de zero (base) até n , ou seja, existem $n + 1$ elos, como pode ser visto na FIG. 3.2;
- Escolher o eixo z_i sobre o eixo da junta $i + 1$, para $i = 0, \dots, n - 1$, segundo a FIG. 3.3 .

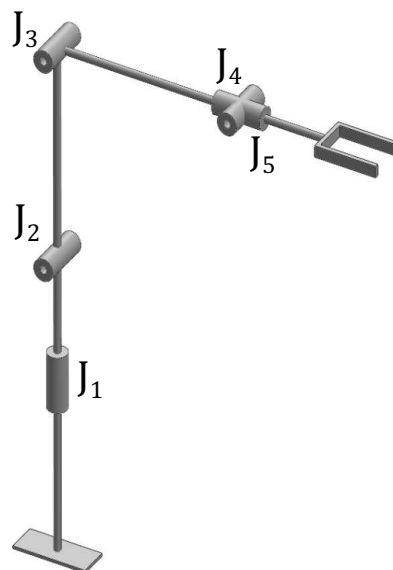


FIG. 3.1: Identificação dos elos do robô Pegasus, conforme Denavit-Hartenberg (Autoria Própria)

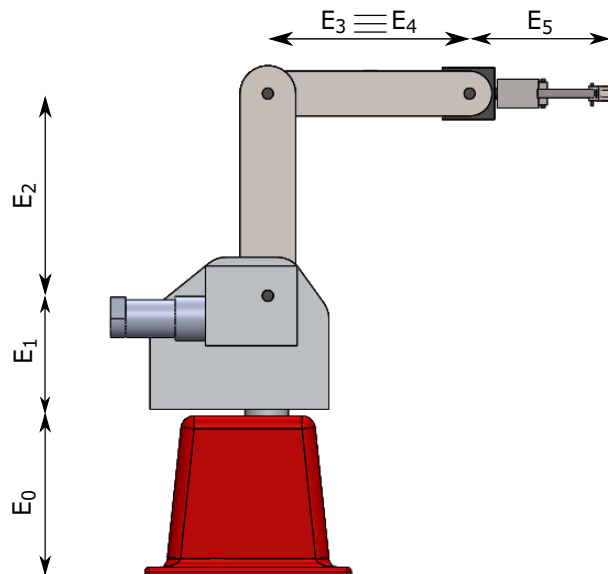


FIG. 3.2: Identificação das juntas do robô Pegasus, conforme Denavit-Hartenberg (Autoria Própria)

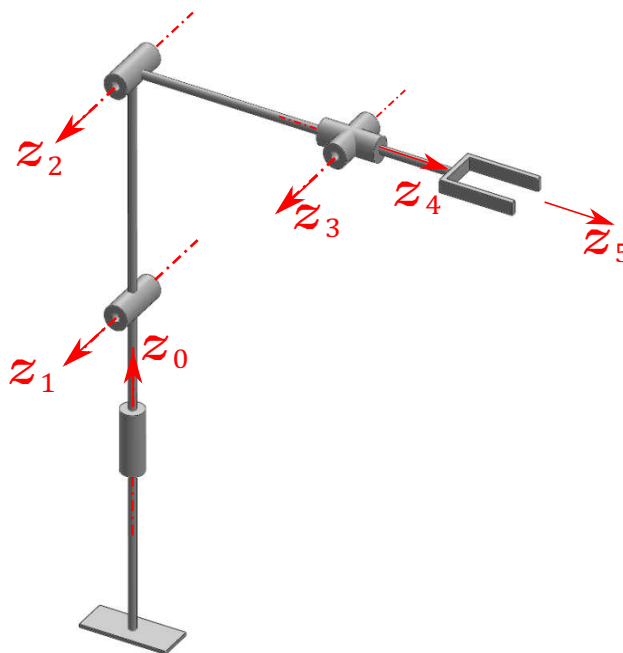


FIG. 3.3: Identificação do eixo z_i do robô Pegasus, conforme Denavit-Hartenberg (Autoria Própria)

2. Determinar o sistema de coordenadas absoluto 0 (zero), conforme pode ser verificado na FIG. 3.4, utilizando o esquemático do robô Pegasus:

- O_0 é definido sobre a direção do eixo z_0 , na menor distância possível entre z_0 e z_1 . Quando $z_0 \perp z_1$, O_0 estará na interseção dos dois eixos. Quando não for possível utilizar essa regra, coincidir O_0 com a interseção do eixo z_0 com a base do robô;
- Escolher o sentido de z_0 sempre da base para a junta 1 e x_0 e y_0 seguindo a regra da mão-direita.

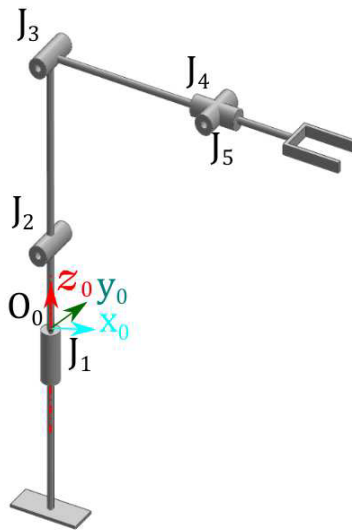


FIG. 3.4: Determinação do sistema de coordenadas absoluto por D-H (Autoria Própria)

Os passos de 3 a 9 a seguir devem ser repetidos para $i = 1, \dots, n-1$.

3. Determinar o ponto O'_i (sistema linha) na interseção do eixo z_{i-1} com a normal comum dos eixos z_{i-1} e z_i , observando se:
 - z_i for colinear a z_{i-1} e a junta $i + 1$ for de translação, definir O'_i no limite da junta $i+1$, ou seja na sua posição de *home*;
4. Determinar as origens dos sistemas coordenados O_i na interseção do eixo z_i com a normal comum aos eixos z_{i-1} e z_i , observando se:
 - $z_{i-1} \parallel z_i$, e a junta i for de rotação, escolher O_i , tal que $d_i = 0$ (ou seja, coordenada de O_i sobre o eixo z_{i-1} ;

- $z_{i-1} \parallel z_i$, e a junta i for de translação, escolher O_i , em uma posição de limite da junta (na posição de zero da junta).

Os passos 3 e 4 estão representados na FIG. 3.5.

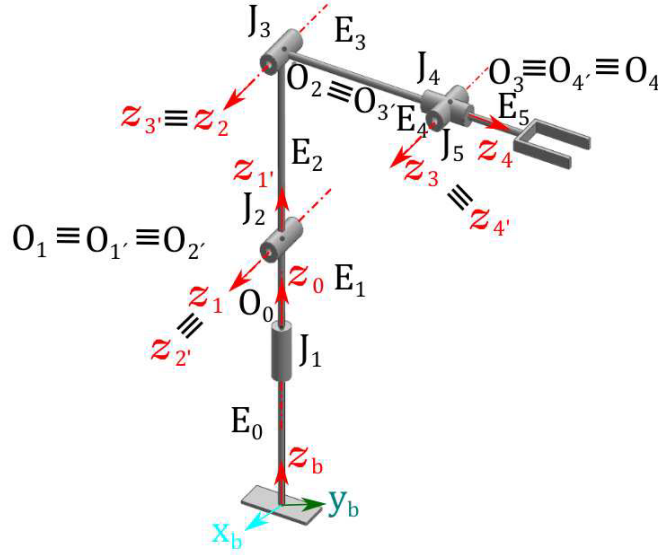


FIG. 3.5: Determinação dos sistemas O_i e O'_i por D-H (Autoria Própria)

5. Escolher o eixo x_i sobre a normal comum aos eixos z_{i-1} e z_i ;

6. Escolher o eixo y_i , obedecendo a regra da mão direita;

A FIG. 3.6 representa os passos 5 e 6.

7. Definir $z_{i'}$, sabendo que este é colinear (ou seja, os eixos devem estar sobre uma mesma reta) a z_{i-1} ;

8. Definir $x_{i'}$ sobre a normal comum aos eixos z_{i-1} e z_i com sentido da junta i para a junta $i + 1$, sabendo que $x_{i'}$ é colinear a x_i ;

9. Definir $y_{i'}$ de acordo com a regra da mão direita;

Os passos 7, 8 e 9 são representados pela FIG. 3.7, utilizando o esquemático do robô Pegasus.

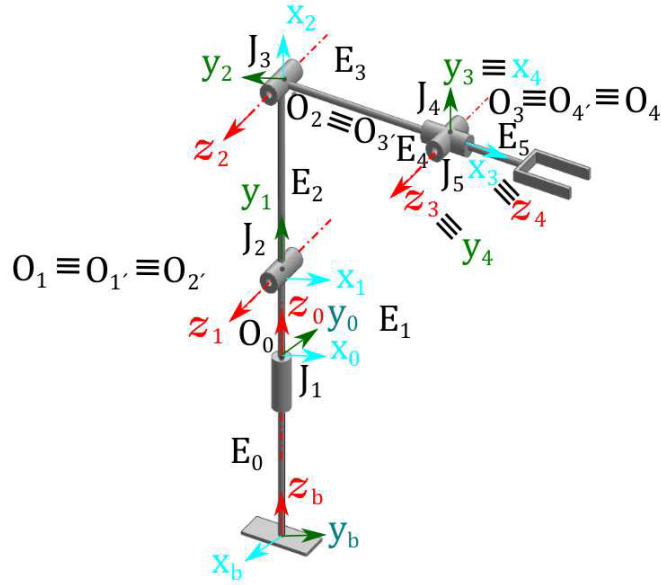


FIG. 3.6: Determinação dos eixos x_i e y_i por D-H (Autoria Própria)

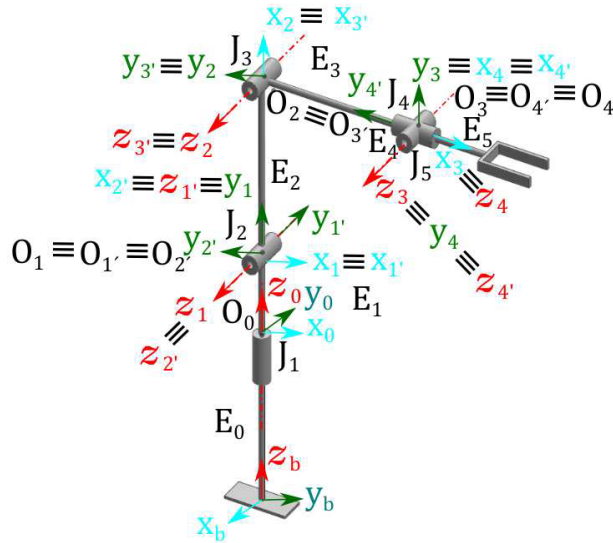


FIG. 3.7: Determinação dos eixos z_i' , x_i' e y_i' por D-H (Autoria Própria)

10. Definir o sistema n da seguinte forma:

(a) Determinar o eixo z_n , observando se a junta $n - 1$ for:

- de rotação, alinhar z_n com z_{n-1} ;

- prismática, escolher z_n de forma arbitrária.
- (b) Determinar x_n , conforme o passo 5;
- (c) Determinar y_n , conforme o passo 6.
- (d) Determinar $z_{n'}$, conforme o passo 7;
- (e) Determinar $x_{n'}$, conforme o passo 8;
- (f) Determinar $y_{n'}$, conforme o passo 9.

Assim, a representação do passo 10 encontra-se na FIG. 3.8.

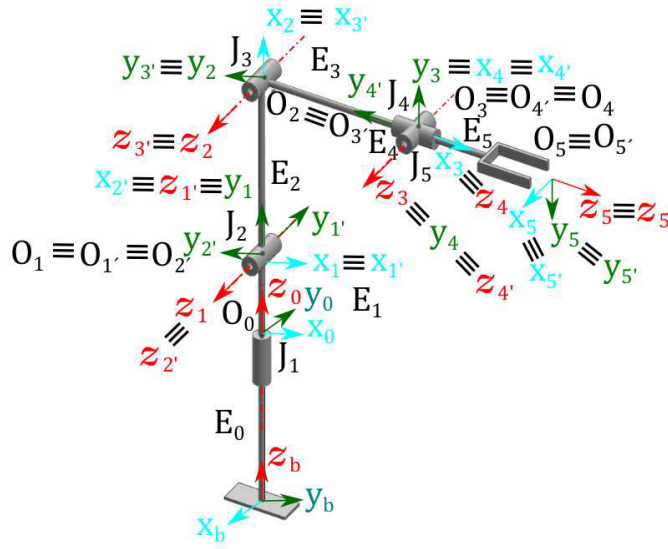


FIG. 3.8: Determinação do sistema n e n' por D-H (Autoria Própria)

11. Definir os quatro parâmetros de Denavit-Hartenberg construindo uma tabela para $i = 1, \dots, n$, onde:

- a_i - distância entre O_i e $O_{i'}$;
- d_i - coordenada de $O_{i'}$ sobre o eixo z_{i-1} ;
- α_i - ângulo entre os eixos z_{i-1} e z_i em torno do eixo x_i ; e,
- ϑ_i - ângulo entre os eixos x_{i-1} e x_i em torno do eixo z_{i-1} .

É importante mencionar que dentre os 4 parâmetros, 2 são sempre constantes (a_i e α_i). Em relação aos outros dois, um varia de acordo com o tipo de junta que conecta o elo $i - 1$ ao elo i . Isto é:

- Se a junta i for de rotação, a variável é ϑ_i , tendo um parâmetro fixo, calculado pela regra supracitada, adicional de θ_i que representa a rotação da junta i ;
- Se a junta i for prismática, a variável é d_i , tendo um valor fixo, calculado pela regra supracitada, com um adicional de t_i que representa a translação de junta i .

Assim, para o robô Pegasus, os parâmetros podem ser definidos, conforme TAB. 3.1.

TAB. 3.1: Parâmetros de Denavit-Hartenberg do robô Pegasus

JUNTAS	a_i	d_i	α_i	ϑ_i
1	0	5,25	90°	ϑ_1
2	9	0	0	$\vartheta_2 + 90^\circ$
3	9	0	0	$\vartheta_3 - 90^\circ$
4	0	0	90°	$\vartheta_4 + 90^\circ$
5	0	6	0	$\vartheta_5 + 90^\circ$

12. Determinar as Matrizes de Transformação Homogêneas (MTH's), para $i = 1, \dots, n$:

$$T_i^{(i-1)}(q_i) = \begin{bmatrix} c\vartheta_i & -s\vartheta_i c\alpha_i & s\vartheta_i s\alpha_i & a_i c\vartheta_i \\ s\vartheta_i & c\vartheta_i c\alpha_i & -c\vartheta_i s\alpha_i & a_i s\vartheta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

13. Determinar a composição das Matrizes de Transformação Homogêneas:

$$T_n^0(q) = T_1^0(q_1) T_2^1(q_2) \dots T_i^{(i-1)}(q_i) \dots T_n^{(n-1)}(q_n) \quad (3.2)$$

Para o caso de estudo desse artigo:

$$T_5^0(q) = T_1^0(q_1) T_2^1(q_2) T_3^2(q_3) T_4^3(q_4) T_5^4(q_5) \quad (3.3)$$

14. Determinar as MTH's T_0^b entre o referencial absoluto e a base escolhida, e T_e^n entre o efetuador-final e a última junta:

$$T_e^b(q) = T_0^b(q) T_n^0(q) T_e^n(q) \quad (3.4)$$

Para o caso específico:

$$T_e^b(q) = T_0^b(q) T_5^0(q) T_e^5(q) \quad (3.5)$$

Assim, de forma genérica, ou seja, sem atribuir valores a ϑ , utilizando os parâmetros de D-H da TAB. 3.1 para o robô Pegasus:

$$T_0^b = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 7,25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6) \quad T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 5,25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 9c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & 9s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8) \quad T_3^2 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 9c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & 9s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & -c_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10) \quad T_5^4 = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

É importante ressaltar que é feita uma rotação de 90° em Z , apresentada na matriz T_0^b , a fim de seguir o mesmo referencial do fabricante do robô. A matriz T_e^5 é uma identidade, não tendo assim necessidade de inseri-la no cálculo.

3.3 ROBÓTICA BASEADA EM HELICOIDES

Pela Teoria dos Helicoides, também é possível seguir um procedimento de atividades necessárias para a resolução da cinemática direta, apresentando as Matrizes de Transformação Homogênea de forma genérica, e, como estudo de caso, os cálculos e resultados são obtidos utilizando o robô Pegasus da Amatrol, como enumerado a seguir. Vale ressaltar que todos os detalhes acerca desse método estão apresentados no Apêndice 7.1.

1. Identificar os elos e juntas, conforme pode ser visto na FIG. 3.9.

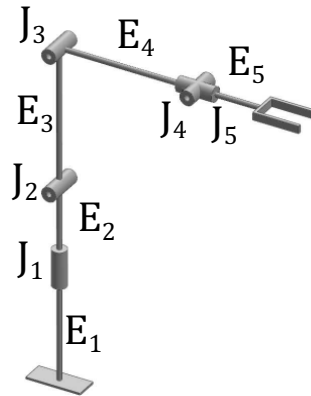


FIG. 3.9: Identificação de elos e juntas do Robô Pegasus (Autoria Própria)

2. Encontrar os parâmetros S e S_0 de cada junta, ou seja, o eixo em torno do qual as juntas rotacionam ou ao longo do qual as mesmas transladam, e as distâncias em relação ao referencial absoluto, respectivamente. Analisando as FIG. 3.10 e 3.11, é possível verificar, respectivamente, cada um destes.

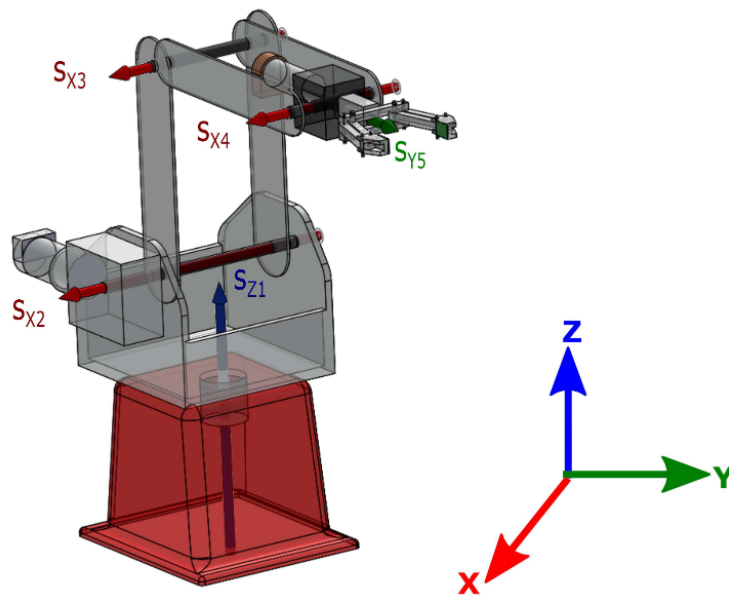


FIG. 3.10: Representação do parâmetro s no Robô Pegasus (Autoria Própria)

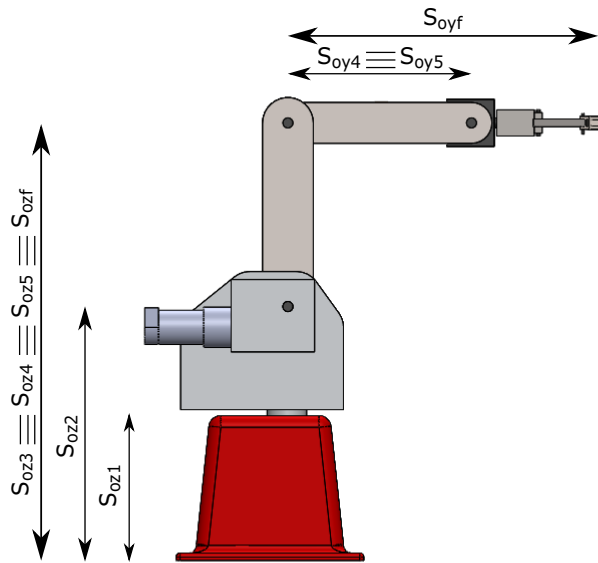


FIG. 3.11: Representação do parâmetro s_0 no Robô Pegasus (Autoria Própria)

Na TAB. 3.2, são mostrados os valores de cada um desses parâmetros. Esses dados foram obtidos a partir do próprio robô real, instalado no IDR Lab.

TAB. 3.2: Parâmetros s e s_0 da Teoria dos Helicoides do robô Pegasus

JUNTAS	s			So (em polegadas)		
	Sx	Sy	Sz	Sox	Soy	Soz
1	0	0	1	0	0	7,25
2	1	0	0	0	0	12,50
3	1	0	0	0	0	21,50
4	1	0	0	0	9	21,50
5	0	1	0	0	9	21,50
f	1	0	0	0	15	21,50

3. Montar a Matriz de Transformação Homogênea (EQ. 7.83) para cada junta. Para isso, deve-se determinar as componentes da matriz de rotação (EQ. 7.54) de cada junta. Em seguida, associar os termos da translação q (EQ. 7.84, 7.85, 7.86) para cada junta. Como o robô Pegasus não possui junta de translação, todos os parâmetros t serão iguais a zero. Os parâmetros para realizar esse passo estão localizados na TAB. 3.2.

Utilizando o robô Pegasus, é possível montar as matrizes de transformação homogênea de cada junta, sem alterar os ângulos de rotação (θ), conforme a seguir:

$$T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & -s_2 & 12,5s_2 \\ 0 & s_2 & c_2 & 12,5c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_3 & -s_3 & 21,5s_3 \\ 0 & s_3 & c_3 & 21,5 - 21,5c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_4 & -s_4 & 21,5s_4 - 9c_4 + 9 \\ 0 & s_4 & c_4 & 21,5 - 9s_4 - 21,5c_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$T_5 = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & -21,5s_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_5 & 0 & c_5 & 21,5 - 21,5c_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

4. É necessário obter a MTH para ajustar a orientação do referencial da ferramenta para que esteja conforme o robô Pegasus, que tem o eixo z do efetuador final como mostra a FIG. 3.12.

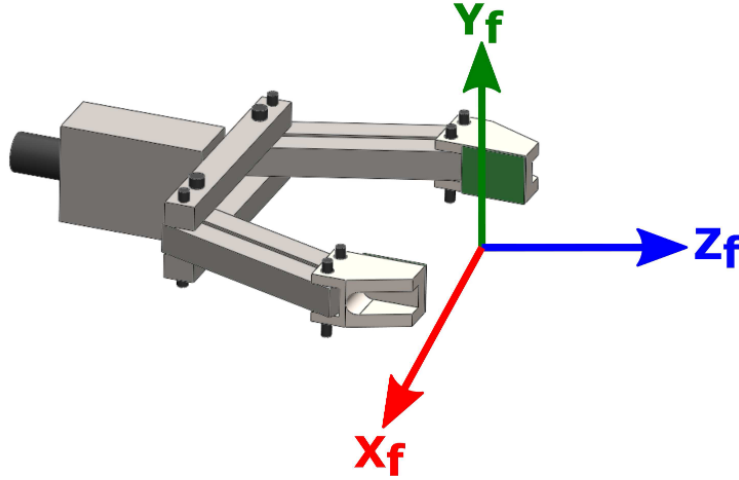


FIG. 3.12: Referencial da ferramenta do robô Pegasus (Autoria Própria)

O resultado é a matriz T_f que equivale a uma rotação elementar de -90° em torno de X em relação ao referencial absoluto.

$$T_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 15 \\ 0 & -1 & 0 & 21,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

5. Aplicar o Método de Deslocamentos dos Helicoides Sucessivos para obter o produtório das matrizes de transformação homogênea de cada junta, a posição e a orientação da ferramenta. Assim, para o robô em questão, a matriz final pode ser representada como $T=T_1T_2T_3T_4T_5T_f$. A forma numérica das matrizes, para determinadas posições das juntas, será apresentada na seção 3.4.

3.4 VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS

Com o objetivo de validar a cinemática direta do Robô Pegasus, por meio das duas metodologias, foram posicionadas as juntas do manipulador em locais conhecidos. A primeira posição foi com todas as juntas em posição de **Home**, ou seja, com os ângulos iguais a zero grau, conforme a FIG. 3.13. Assim, as matrizes de transformação homogênea de cada junta, bem como, a MTH resultante (T), obtida através da produtório dessas matrizes, utilizando a Convenção de Denavit-Hartenberg, estão representadas a seguir:

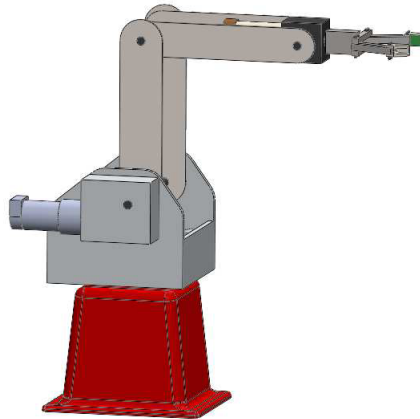


FIG. 3.13: Postura de *Home* com variáveis de junta $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ (Autoria Própria)

$$\mathbf{T}_0^b = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 7,25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18) \quad \mathbf{T}_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 5,25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{T}_2^1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20) \quad \mathbf{T}_3^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{T}_4^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22) \quad \mathbf{T}_5^4 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Como:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_0^b \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T}_4^3 \mathbf{T}_5^4 \mathbf{T}_f^5 \quad (3.24)$$

Logo:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 15 \\ 0 & -1 & 0 & 21,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Pelo Método dos Deslocamentos dos Helicoides Sucessivos, as matrizes de cada junta do manipulador, bem como a MTH resultante (T), podem ser verificadas pelas EQ. 3.26 a 3.31:

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26) \quad \mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28) \quad \mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30) \quad \mathbf{T}_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 15 \\ 0 & -1 & 0 & 21,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Como:

$$T = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_f \quad (3.32)$$

Logo:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 15 \\ 0 & -1 & 0 & 21,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Já o segundo posicionamento de cada junta ficou determinado como: ângulo da junta 1 igual a 45° , das juntas 2, 4 e 5 iguais a 0° e da junta 3 igual a 30° , como pode ser visto na FIG. 3.14. Dessa forma, pela Convenção de Denavit-Hartenberg, foram obtidos os seguintes resultados:

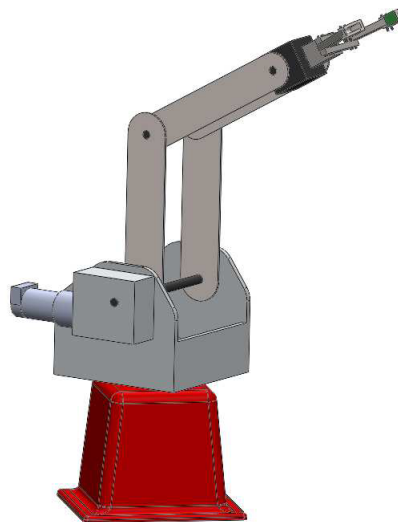


FIG. 3.14: Postura com variáveis de junta $[45 \ 0 \ 30 \ 0 \ 0]^T$ (Autoria Própria)

$$T_0^b = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 7,25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} 0,7071 & 0 & 0,7071 & 0 \\ 0,7071 & 0 & -0,7071 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 5,25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,866 & 0 & 4,5 \\ -0,866 & 0,5 & 0 & -7,7942 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0,7071 & -0,3536 & -0,6124 & -9,1856 \\ 0,7071 & 0,3536 & 0,6124 & 9,1856 \\ 0 & -0,866 & 0,5 & 29 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Para o Método dos Deslocamentos dos Helicoides Sucessivos, foram encontrados os seguintes valores:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0,7071 & -0,7071 & 0 & 0 \\ 0,7071 & 0,7071 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,866 & -0,5 & 10,75 \\ 0 & 0,5 & 0,866 & 2,8805 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$T_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 15 \\ 0 & -1 & 0 & 21,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0,7071 & -0,3536 & -0,6124 & -9,1856 \\ 0,7071 & 0,3536 & 0,6124 & 9,1856 \\ 0 & -0,866 & 0,5 & 29 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

3.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

A partir dos dados apresentados nas seções 3.2, 3.3, 3.4, pode-se fazer uma comparação entre os resultados apresentados com as duas metodologias, a Convenção de Denavit-Hartenberg, e o Método dos Deslocamentos dos Helicoides Sucessivos, apontando as vantagens e desvantagens do seu emprego.

A Convenção de Denavit-Hartenberg possui MTH's mais simples do que as de Helicoide, além de ser o método mais utilizado pela comunidade científica.

Entretanto, o método do Deslocamentos dos Helicoides Sucessivos apresenta algumas vantagens sobre o primeiro:

- necessita de menos etapas para a resolução cinemática, apenas 5, enquanto que a Convenção de Denavit-Hartenberg exige 14 etapas;
- apesar de ser necessário determinar 2 vetores (s e s_0) e as magnitudes t e θ para a sua resolução, enquanto para D-H devem ser encontrados apenas 4 parâmetros (a , d , α , ϑ), os mesmos são facilmente obtidos a partir do *Datasheet* do Robô, porém por D-H não é tão intuitivo quanto, sendo necessário realizar os 11 passos para encontrá-los;
- possui somente 2 referenciais, um de base e outra da ferramenta (FIG. 3.15 (a)), enquanto que D-H exige, pelo menos, $2n + 1$ (n = número de juntas) referenciais (FIG. 3.15 (b)); e,
- o deslocamento de cada junta é sempre em relação ao referencial de base, o que torna mais fácil sua verificação. Já para D-H, o deslocamento é relativo ao referencial da junta anterior.

Finalmente, é importante ressaltar que a complexidade para serem encontrados os parâmetros de D-H, fazem com que, em um primeiro momento, este se torne um método complicado de se entender quando modelado por um iniciante, podendo propiciar erros mais facilmente. Em contrapartida, os parâmetros necessários para a utilização da teoria dos Helicoides podem ser encontrados com mais facilidade, diminuindo assim as chances de erros.

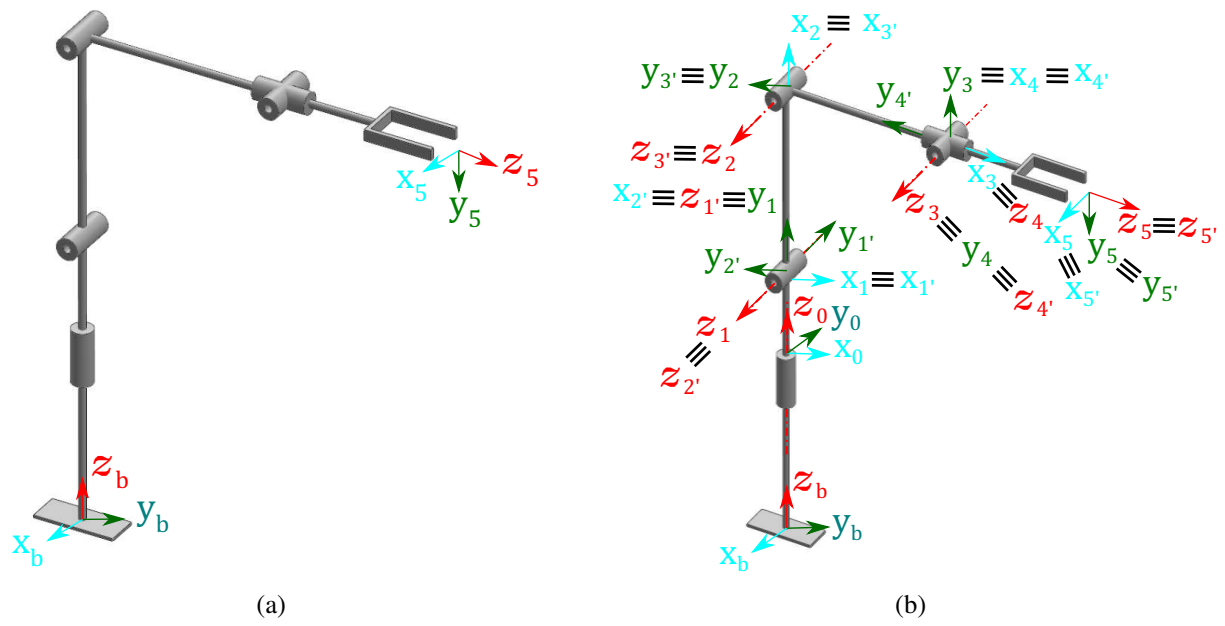


FIG. 3.15: Referenciais utilizados por (a) Teoria dos Helicoides e (b) D-H (Autoria Própria)