

# ANÁLISE E COMPARAÇÃO DA GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS LINEARES E CÚBICAS EM UM SISTEMA ROBÓTICO

André Guilherme Gembarowski<sup>1</sup>  
Aníbal Alexandre Campos Bonilla<sup>2</sup>

## RESUMO

Este artigo apresenta uma breve explicação com a teoria básica sobre robótica para a elaboração do projeto de um sistema composto por processos que exigem o controle de posicionamento, orientação e velocidade dos seus componentes. Para isso, utilizou-se um exemplo de situação composta por um robô que controla a manufatura de peças transportadas por esteiras e processadas em três etapas, com características distintas quanto ao modo como são movidas, sendo de grande importância um embasamento sobre cinemática direta, inversa e diferencial para a compreensão dos métodos utilizados. A partir dessas informações, são abordadas duas estratégias para a geração de trajetórias pelo robô, baseadas na interpolação por *spline* cúbica e no incremento linear com a realização da comparação gráfica dos resultados, com o intuito de demonstrar a eficiência de cada método.

**PALAVRAS-CHAVE:** Robótica. Cinemática inversa. Cinemática diferencial. Trajetória linear. Trajetória cúbica.

\*\*\*

1 Graduado, e-mail:  
andre.gembarowski@  
gmail.com

2 Doutor, e-mail:  
alexandre.campos@  
udesc.br

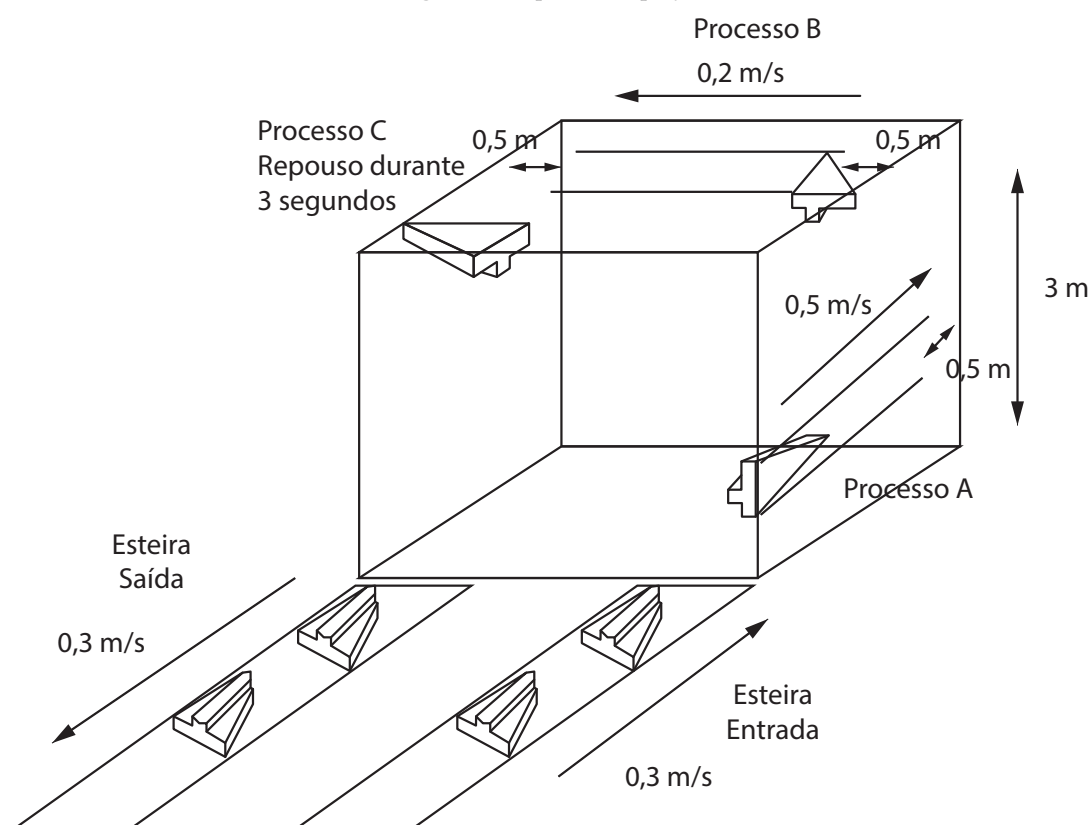
\*\*\*

# 1 INTRODUÇÃO

O projeto do sistema robótico industrial proposto consiste em uma esteira de entrada que alimenta peças para os processos A, B e C, dispostos de modo que a área de trabalho composta

por eles forma um cubo de 3 metros de aresta, cada um com um tipo de movimento, como mostra a Figura 1. Após o processamento, as peças são depositadas em uma esteira de saída.

Figura 1: Esquema do projeto



Fonte: Dos autores (2015)

A ordem dos processos pode ser alterada conforme desejado, mas é importante notar que cada caso possui uma orientação definida e um vetor de velocidade que indica como ocorre o deslocamento. No caso do processo C a velocidade é nula, pois a peça deve ficar em repouso durante 3 segundos.

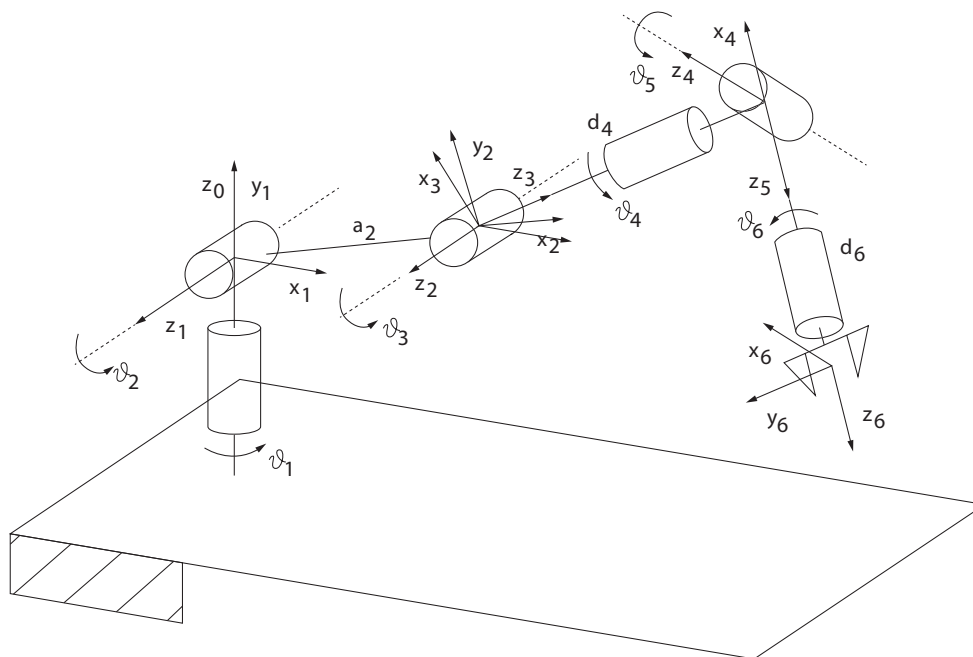
Um robô antropomórfico com 6 graus de liberdade fica disposto entre as duas esteiras, de modo que possa manipular as peças livremente, de acordo com as condições impostas.

## 2 PARÂMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG

Para referenciar o robô dado, utilizou-se a notação de Denavit-Hartenberg, que estabelece

alguns padrões para se realizar a sua análise matemática. Assim, têm-se as orientações, como mostra a Figura 2.

Figura 2: Orientações do robô antropomórfico



Fonte: Siciliano et al. (2009)

Observando as orientações determinadas, é possível definir os parâmetros de Denavit-Hartenberg que apresentam os ângulos de giro nos eixos das juntas ( $\theta$ ), os comprimentos dos

elos ( $d$ ), os deslocamentos de juntas ( $a$ ) e os ângulos de torção do elo ( $\alpha$ ) (SICILIANO et al., 2009). Esses valores estão organizados no Quadro 1.

Quadro 1: Parâmetros de Denavit-Hartenberg

Junta i	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	11	0	$-\pi/2$
2	$\theta_2$	0	12	0
3	$\theta_3 + \pi/2$	0	0	$\pi/2$
4	$\theta_4$	13	0	$-\pi/2$
5	$\theta_5$	0	0	$\pi/2$
6	$\theta_6$	16	0	0

Fonte: Dos autores (2015)

### 3 CINEMÁTICA DIRETA

A CINEMÁTICA DIRETA DEFINE A POSIÇÃO DO EFETUADOR DO ROBÔ COM BASE NOS ÂNGULOS DAS JUNTAS.

O cálculo da matriz de transformação homogênea final do robô, com base nos parâmetros de Denavit-Hartenberg, é uma maneira prática

de definir a cinemática direta, pois a posição do ponto é determinada a partir da última coluna da matriz, e a sua orientação é determinada com base nas três primeiras colunas. (SICILIANO et al., 2009).

A matriz homogênea parcial genérica, que relaciona duas juntas consecutivas a partir dos parâmetros de Denavit-Hartenberg, é representada pela equação (1):

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen} \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \text{sen} \theta_i \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Com o cálculo das matrizes de transformação homogêneas parciais, pode-se multiplicá-las e obter a matriz de transformação homogênea final, como mostra a equação (2):

$${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (2)$$

Com a matriz  ${}^0T_6$  encontra-se a posição do efetuador, representado por  ${}^0P_6$ , e sua orientação em relação a cada eixo cartesiano, dada pela matriz de rotação  ${}^0R_6$ , como mostram as equações (3), (4) e (5):

$$J = \begin{bmatrix} b_{x0} & b_{x1} & b_{x2} & b_{x3} & b_{x4} & b_{x5} \\ b_{y0} & b_{y1} & b_{y2} & b_{y3} & b_{y4} & b_{y5} \\ b_{z0} & b_{z1} & b_{z2} & b_{z3} & b_{z4} & b_{z5} \\ a_{x0} & a_{x1} & a_{x2} & a_{x3} & a_{x4} & a_{x5} \\ a_{y0} & a_{y1} & a_{y2} & a_{y3} & a_{y4} & a_{y5} \\ a_{z0} & a_{z1} & a_{z2} & a_{z3} & a_{z4} & a_{z5} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^0P_6 = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^0R_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 4 CINEMÁTICA INVERSA

O CÁLCULO DA CINEMÁTICA INVERSA É UTILIZADO QUANDO SE DESEJA OBTER OS ÂNGULOS DAS JUNTAS A PARTIR DA POSIÇÃO DO EFETUADOR.

No caso do robô do projeto proposto, optou-se pelo método geométrico para a definição de sua cinemática inversa.

Para isso, o robô foi dividido em duas partes, considerando que as três primeiras juntas definem a posição do punho, e as três últimas juntas definem a orientação do efetuador, pois se trata de um punho esférico. (SICILIANO et al., 2009).

Assim, os ângulos  $\theta_1, \theta_2$  e  $\theta_3$  são obtidos a partir da posição desejada, subtraída do tamanho do punho esférico com o efetuador, como mostra a equação (6):

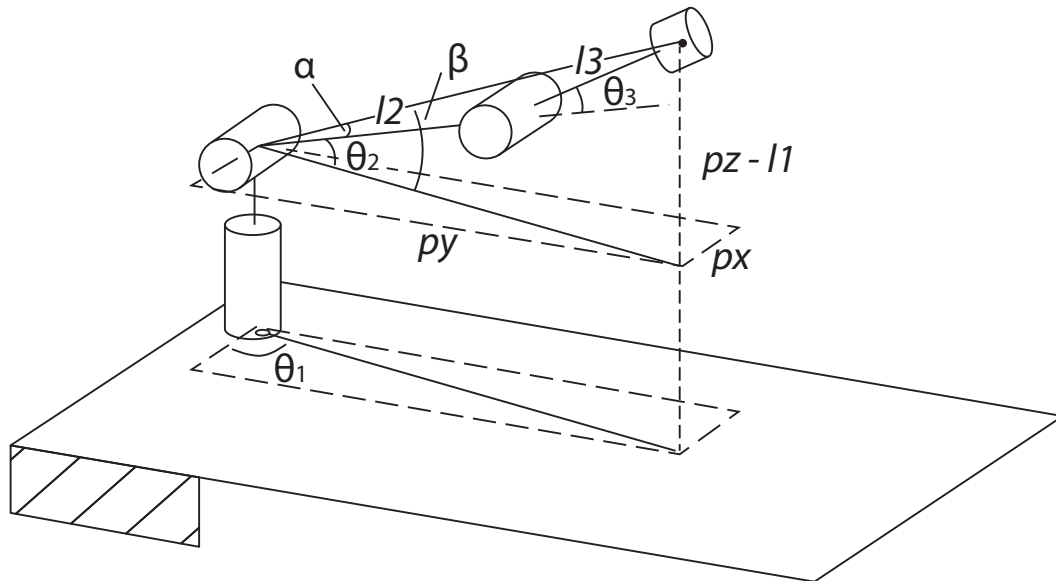
$${}^0P_3 = {}^0P_6 - l_6 \vec{a} \quad (6)$$

Considerando:

$${}^0P_3 = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

É possível simplificar as três primeiras juntas em um robô RRR, como mostra a Figura 3:

Figura 3: – Robô RRR simplificado



Fonte: Adaptado de Siciliano et al. (2009)

Assim, pela análise geométrica é possível calcular o ângulo da junta 1 por meio da equação (7):

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \quad (7)$$

O ângulo da junta 3, por sua vez, é obtido pela relação (8) a partir do análise baseada na lei dos cossenos:

$$(p_x^2 + p_y^2) + (p_z - l_1)^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos(\pi - \theta_3)$$

$$p_x^2 + p_y^2 + (p_z - l_1)^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos \theta_3$$

$$\cos \theta_3 = \frac{p_x^2 + p_y^2 + (p_z - l_1)^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

$$\text{sen} \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}}{\cos \theta_3}\right) \quad (8)$$

Por fim, o ângulo da junta 2 é obtido pela subtração do ângulo  $\alpha$  no ângulo  $\beta$ , demonstrado na equação (9):

$$\beta = \arctan\left(\frac{(p_z - l_1)}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l_3 \sin\theta_3}{l_2 + l_3 \cos\theta_3}\right)$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{(p_z - l_1)}{\pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) - \arctan\left(\frac{l_3 \sin\theta_3}{l_2 + l_3 \cos\theta_3}\right)$$

(9)

Para o cálculo de  $\theta_4$ ,  $\theta_5$  e  $\theta_6$  é necessário obter a orientação do efetuador a partir da matriz de rotação, já que considera-se que a base do punho esférico é o ponto dado pela matriz. Assim, de acordo com os eixos de rotação das juntas 4, 5 e 6, a orientação do efetuador será obtida por meio da matriz de rotação dos ângulos de Euler ZYZ.

A partir dos ângulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  obtidos nas equações (7), (9) e (8), determina-se a matriz de transformação homogênea a partir da multiplicação das matrizes de transformação homogênea parciais. Em seguida, deve-se extrair a matriz de rotação a partir dos elementos das três primeiras linhas com as três primeiras colunas.

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow {}^0R_3 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix}$$

Com essa matriz, pode-se obter pela equação (10), visto que a matriz de rotação é a própria orientação desejada para o efetuador (SICILIANO et al., 2009).

$${}^0R_6 = {}^0R_3 {}^3R_6$$

$${}^3R_6 = ({}^0R_3)^{-1} {}^0R_6 \quad (10)$$

Então a matriz de rotação dos ângulos de Euler ZYZ pode ser expressa pela equação (11):

$${}^3R_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6 & c_4 s_5 \\ s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6 & -s_4 c_5 s_6 + c_4 c_6 & s_4 s_5 \\ -s_5 c_6 & s_5 s_6 & c_5 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Sendo:

- $\text{sen}\theta_i = s_i$
- $\text{sen}(\theta_i + \theta_j) = s_{ij}$
- $\text{sen}(\theta_i + \theta_j + \theta_k) = s_{ijk}$
- $\text{cos}\theta_i = c_i$
- $\text{cos}(\theta_i + \theta_j) = c_{ij}$
- $\text{cos}(\theta_i + \theta_j + \theta_k) = c_{ijk}$

Dessa forma, obtêm-se os ângulos  $\theta_4, \theta_5$  e  $\theta_6$  pelas equações (12), (13) e (14):

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{a_y}{a_x}\right) \quad (12)$$

$$\theta_5 = \arctan\left(\frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2}}{a_z}\right) \quad (13)$$

$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{s_z}{-n_z}\right) \quad (14)$$

## 5 CINEMÁTICA DIFERENCIAL

A cinemática diferencial trata de descrever os movimentos desenvolvidos pelo efetuador e pelas juntas.

**NO CASO DA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO EFETUADOR, REALIZA-SE A CINEMÁTICA DIFERENCIAL DIRETA, OU SEJA, A PARTIR DO DESLOCAMENTO DAS JUNTAS TEM-SE O VALOR DO DESLOCAMENTO TOTAL NO EFETUADOR. A RELAÇÃO ENTRE ESSES DESLOCAMENTOS É DADA PELO JACOBIANO DO ROBÔ. (SICILIANO ET AL., 2009).**

A solução da matriz do Jacobiano no projeto foi definida levando em consideração a orientação dos eixos  $z_i$  das coordenadas das juntas  $i$  (já que se trata de juntas rotativas) e o produto vetorial deles, com o braço de alavanca dado pela diferença da posição do efetuador em relação ao ponto onde está a junta. Dessa forma, é possível determinar o Jacobiano do robô segundo a matriz (15):

$$z_i = \begin{bmatrix} a_{xi} \\ a_{yi} \\ a_{zi} \end{bmatrix}$$

$$b_i = \begin{bmatrix} b_{xi} \\ b_{yi} \\ b_{zi} \end{bmatrix} = z_i \times ({}^0P_6 - {}^0P_i)$$

Sendo que  $0 \leq i \leq 5$

$$J = \begin{bmatrix} b_{x0} & b_{x1} & b_{x2} & b_{x3} & b_{x4} & b_{x5} \\ b_{y0} & b_{y1} & b_{y2} & b_{y3} & b_{y4} & b_{y5} \\ b_{z0} & b_{z1} & b_{z2} & b_{z3} & b_{z4} & b_{z5} \\ a_{x0} & a_{x1} & a_{x2} & a_{x3} & a_{x4} & a_{x5} \\ a_{y0} & a_{y1} & a_{y2} & a_{y3} & a_{y4} & a_{y5} \\ a_{z0} & a_{z1} & a_{z2} & a_{z3} & a_{z4} & a_{z5} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Dessa maneira, é possível determinar a função das velocidades lineares e angulares do efetuador em função da velocidade das juntas, como mostra a equação (16):



$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} \quad (16)$$

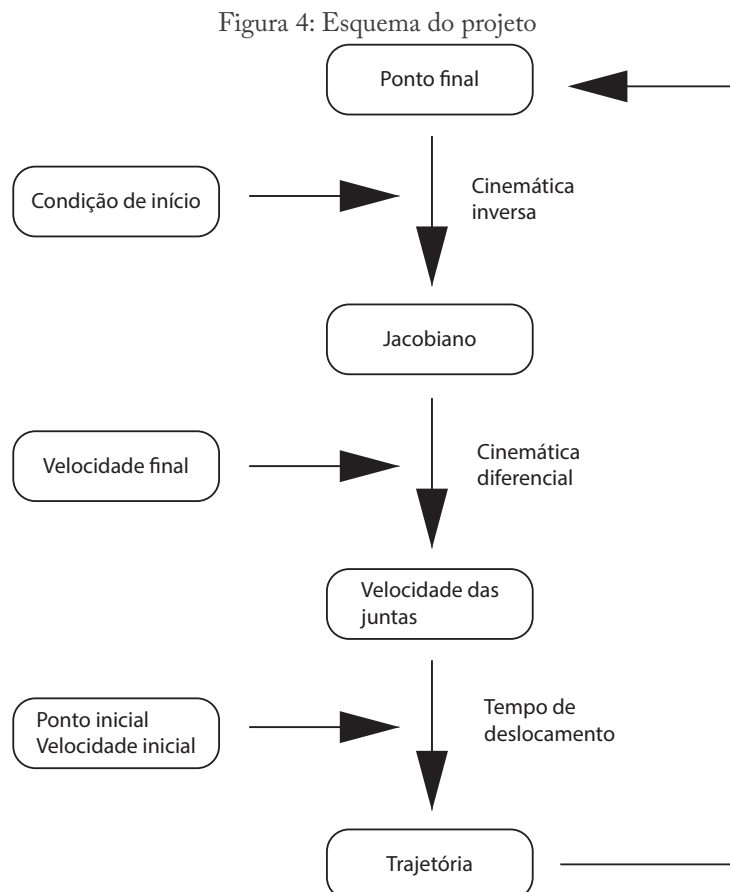
Para o caso do projeto proposto, o Jacobiano é uma matriz quadrada, bastando invertê-la para obter essa relação, como demonstra a equação (17). Se o Jacobiano não possuísse uma matriz quadrada, seria necessário realizar outros métodos para a solução da cinemática diferencial inversa, como a matriz pseudo-inversa (SICILIANO et al., 2009).

Assim como existe a cinemática inversa em relação à cinemática direta de um robô, também é possível obter a cinemática diferencial inversa para determinar o valor das velocidades das juntas em relação a uma dada velocidade no efetuador.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

## 6 GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS

A partir dos assuntos abordados e dos resultados obtidos, é possível desenvolver o projeto proposto a partir de um algoritmo baseado no fluxograma demonstrado na Figura 4:



Fonte: Dos autores (2015)

Para o desenvolvimento do projeto, as trajetórias desenvolvidas foram realizadas de duas formas: linear ou cúbica. Para o desenvolvimento de trajetórias lineares, determina-se uma variação constante da posição em função do tempo (GROOVER et al., 1986), como mostra a equação (18), com, sendo o número de cada junta.

$$\theta_j = a_{0j} + a_{1j}t$$

É importante salientar que esse método é realizado de uma forma bastante simples. No entanto, o caso estudado terá o valor dos intervalos de tempo suficientemente pequenos para traçar trajetórias retilíneas com uma velocidade constante. Por esse fato, a aceleração e a desaceleração do efetuador possuirão um valor muito elevado.

As trajetórias cúbicas são determinadas por uma interpolação (*spline* cúbica) que leva em conta os tempos, os ângulos das juntas e as velocidades angulares (inicial e final) entre dois pontos (GROOVER et al., 1986), como demonstra a equação (19).

$$S = \begin{bmatrix} 1 & t_i & t_i^2 & t_i^3 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_i & 3t_i^2 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix}$$

Com  $1 \leq j \leq 6$ , sendo o número de cada junta:

$$a_j = \begin{bmatrix} a_{0j} \\ a_{1j} \\ a_{2j} \\ a_{3j} \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} \theta_{inicial} \\ \theta_{final} \\ \dot{\theta}_{inicial} \\ \dot{\theta}_{final} \end{bmatrix}$$

$$\theta_j = a_{0j} + a_{1j}t + a_{2j}t^2 + a_{3j}t^3 \quad (19)$$

As trajetórias retilíneas podem ser desenvolvidas nos processos A e B, nos quais os movimentos possuem uma velocidade constante e ocorrem em apenas uma direção e sentido. Para o método linear, realiza-se um incremento constante no eixo da direção do movimento proporcional ao tempo do processo (encontrado pela razão entre a distância que será percorrida pelo efetuador e a velocidade do processo). Esse tipo de trajetória desenvolve um movimento mais preciso, sendo recomendado para aplicações mais delicadas ou complexas, porém exige um esforço bem maior do controlador do robô, já que a cinemática inversa de todas as juntas deverá ser calculada para cada interação do processo, enquanto pelo método da trajetória por *spline* cúbica o cálculo é feito apenas duas vezes por processo (ponto inicial e final). (OHNISHI et al., 2011).

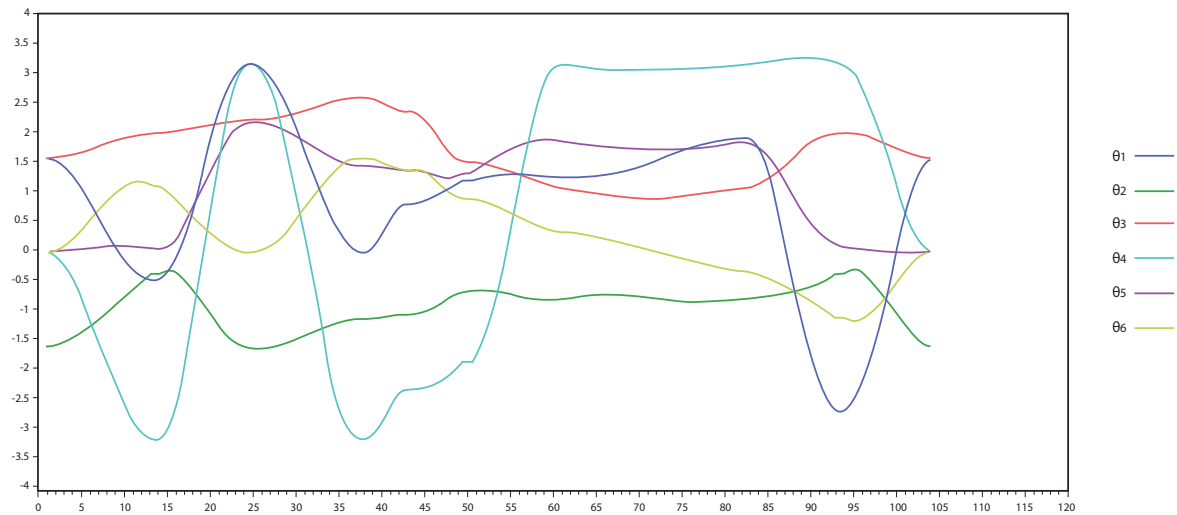
Com a intenção de demonstrar os resultados obtidos, realizou-se a simulação do projeto com diferentes sequências de processos, realizando as trajetórias apenas por *splines* cúbicas, e outro caso utilizando trajetórias lineares nos processos A e B. Os deslocamentos de todas as juntas

**ESSE MÉTODO PRETENDE CRIAR TRAJETÓRIAS SUAVES COM BASE NO TEMPO NECESSÁRIO PARA O EFETUADOR IR DE UM PONTO AO OUTRO, O QUE FAZ AS JUNTAS ACELERAREM E DESACELERAREM DE MANEIRA CONVENIENTE.**

foram armazenados e representados graficamente com o robô partindo da posição inicial (home) e voltando no fim do processo.

A Figura 5 ilustra os deslocamentos das juntas para a sequência C-A-B, utilizando apenas *splines* cúbicas.

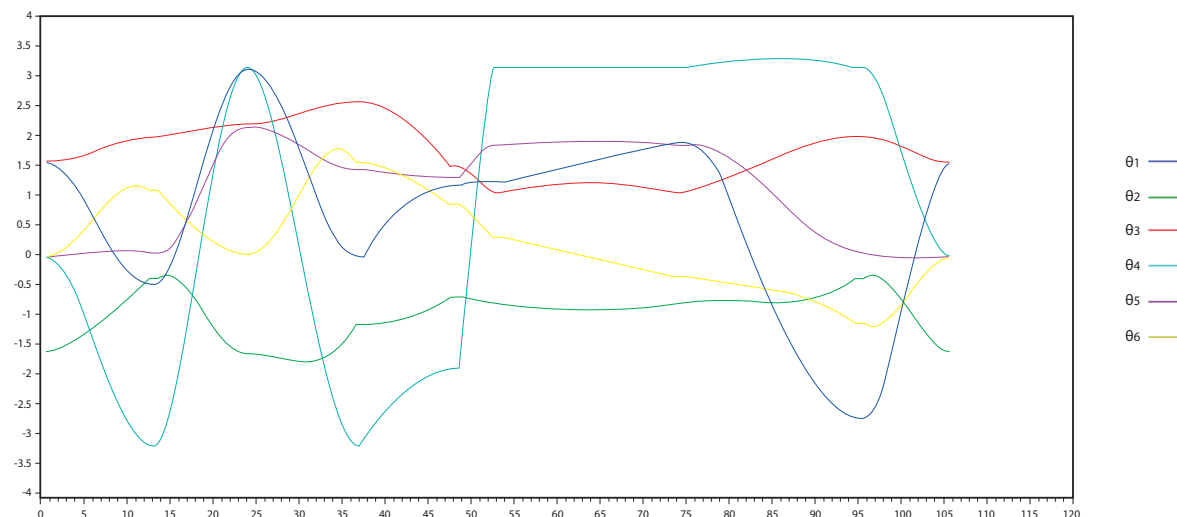
Figura 5: Deslocamento angular das juntas para a sequência C-A-B por *splines* cúbicas



Fonte: Dos autores (2015)

O caso em que se utiliza trajetórias lineares para os processos A e B pode ser demonstrado pela Figura 6:

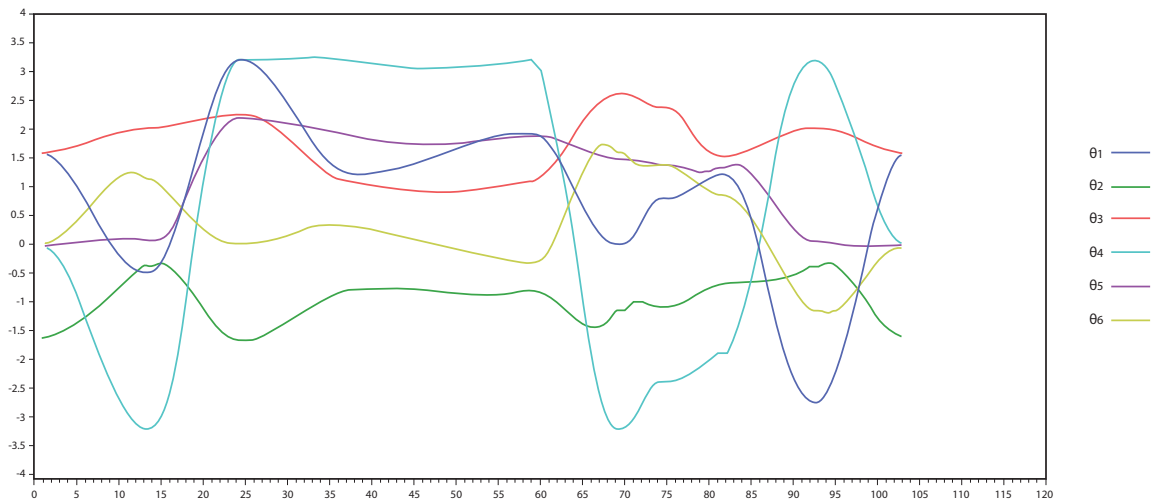
Figura 6: Deslocamento angular das juntas para a sequência C-A-B por *splines* cúbicas e trajetórias retilíneas



Fonte: Dos autores (2015)

Para a sequência C-B-A, os deslocamentos das juntas por *splines* cúbicas são demonstrados na Figura 7.

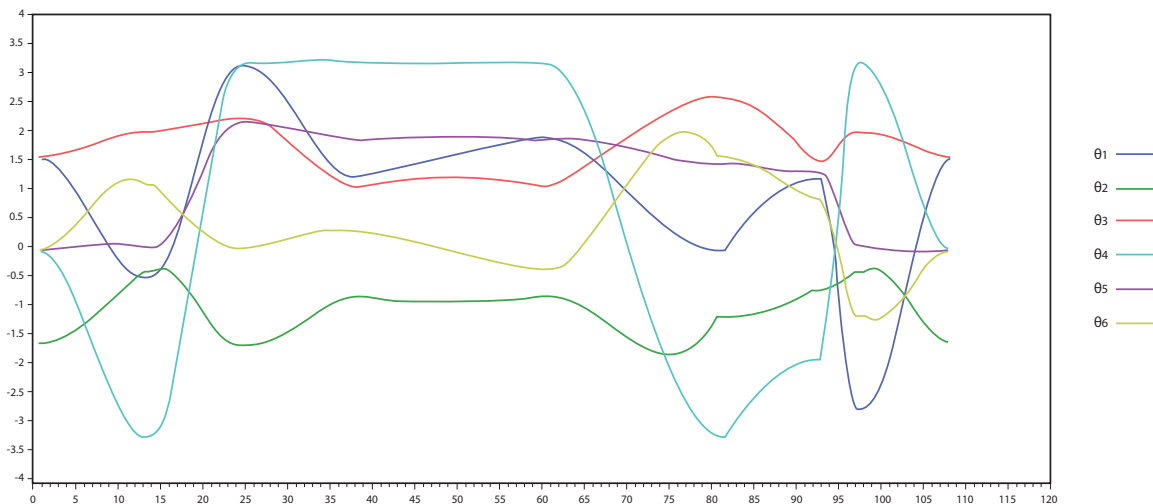
Figura 7: Deslocamento angular das juntas para a sequência C-B-A por *splines* cúbicas



Fonte: Dos autores (2015)

Inserindo trajetórias lineares nos processos A e B, têm-se os resultados vistos na Figura 8:

Figura 8: Deslocamento angular das juntas para a sequência C-B-A por *splines* cúbicas e trajetórias retilíneas



Fonte: Dos autores (2015)

Nota-se que o comportamento gráfico das juntas é semelhante nos dois casos de trajetória, e apresentam um comportamento adequado ao projeto. Percebe-se ainda que a trajetória utilizando apenas *splines* cúbicas utiliza um número menor de interações, se comparado ao caso em que se utiliza trajetórias lineares, o que representa uma economia no processamento. É importante salientar que para o processo A foi necessária a inclusão de um ponto intermediário entre o início e o fim do processo para o cálculo da *spline* cúbica, com o intuito de manter a

direção do movimento dentro dos limites de tolerância da trajetória desejada.

Levando em conta que as trajetórias retilíneas são mais precisas quando o projeto exige movimentos desse tipo, uma rápida comparação entre os gráficos permite concluir que o trajeto por *splines* cúbicas apresenta um comportamento satisfatório em deslocamentos retilíneos do efetuador, apesar de, nesse caso, não ter um desempenho tão bom quanto o linear.

## 7 CONCLUSÃO

---

O estudo apresentado sobre a teoria básica para a modelagem de um sistema robótico e as deduções demonstradas permite a simulação de um robô antropomórfico com 6 graus de liberdade, cujos valores para as dimensões dos seus elos podem ser definidos da maneira que for conveniente. Assim, a primeira ideia tratada neste artigo visa a fazer uma breve explicação dos conceitos sobre cinemática direta, inversa e diferencial, com aplicação em um exemplo prático.

COM O MODELO ROBÓTICO CONFECCIONADO FOI POSSÍVEL REALIZAR A ANÁLISE DOS MÉTODOS DE GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS E COMPARÁ-LOS A PARTIR DOS GRÁFICOS DOS DESLOCAMENTOS ANGULARES DAS JUNTAS PARA CADA CASO E EM SITUAÇÕES DIFERENTES.

Dessa forma, é possível afirmar que a interpolação por spline cúbica é uma ótima estratégia quando se deseja traçar uma trajetória no espaço sem a necessidade de precisão no movimento, ou seja, sem que o efetuator do robô tenha que respeitar uma trajetória bem definida entre dois pontos. O método por incremento linear, por sua vez, é uma boa solução para os movimentos retilíneos e que exigem precisão, fato que impõe o custo de um número maior de interações do controlador, se comparado com a interpolação por *spline* cúbica, além de se restringir a movimentos com velocidade constante e gerar problemas com as acelerações. No entanto, o resultado das simulações realizadas demonstra que se uma trajetória retilínea sem a necessidade de uma precisão muito grande for traçada, a interpolação por *spline* cúbica apresenta um desempenho satisfatório. Se o movimento extrapolar os limites toleráveis da trajetória, basta adicionar os pontos intermediários necessários entre o ponto inicial e final para aumentar a precisão do movimento.



# ANALYSIS AND COMPARISON OF GENERATION OF LINEAR AND CUBIC PATHS IN A ROBOTIC SYSTEM

## ABSTRACT

*This article presents a brief description of the basic theory of robotics used to formulate the project of a system composed of processes that require control of positioning, orientation and speed of its components. For this, we used an example of a situation involving a robot which controls the manufacture of parts which are transported by conveyor belts and processed in three steps with different characteristics about the way they are moved, being of great significance a knowledge of forward kinematics, reverse kinematics and differential kinematics for understanding the methods used. From these information, two strategies to generate trajectories for robot and based upon cubic spline interpolation and linear increase are addressed together with the realization of graphical comparison of the results in order to demonstrate the effectiveness of each method.*

\*\*\*

**KEYWORDS:** *Robotics. Inverse Kinematics. Differential kinematics. Cubic Spline.*

\*\*\*

## REFERÊNCIAS

GROOVER, M. P.; WEISS, M.; NAGEL, R. N.; ODREY, N. G. **Industrial robotics: technology, programming and applications**. 1. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1986.

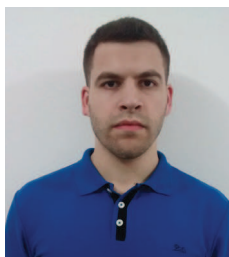
OHNISHI, K.; SABANOVIC, A. **Motion control systems**. 1. ed. Noida: John Wiley and Sons, 2011.

SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L.; VILLANI, L.; ORIOLO, G. **Robotics: modelling, planning and control**. Londres: Springer, 2009.

Data de recebimento: 14/09/2015

Data de aprovação: 15/12/2015

## SOBRE OS AUTORES



**André Guilherme  
Gembarowski**

Engenheiro eletricista  
graduado pela  
Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná (2013)

e mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina na área de automação de sistemas. Possui experiência na prestação de serviços de automação industrial, no desenvolvimento de projetos de segurança eletrônica e na implantação de cabeamento estruturado. É docente de cursos técnicos nas áreas de automação, eletrotécnica e eletrônica no SENAI/SC em Joinville.



**Aníbal Alexandre  
Campos Bonilla**

Possui graduação em  
Oficial de Máquinas de  
Altura – Escuela Naval  
Almirante Padilla (1991),  
graduação em Engenharia

Mecânica – Universidad de Los Andes (1996), mestrado em Engenharia Mecânica – Universidad de Los Andes (1999), doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2004), pós-doutorado na Universidade Técnica de Braunschweig na Alemanha (2005-2006) e é doutor contratado pelo programa “Juan de la Cierva” do Governo da Espanha, no departamento de Automação e Eletrônica da Universidad Politécnica de Madrid. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Robótica e Controle, atuando principalmente nos seguintes temas: cinemática/dinâmica de manipuladores (robôs),

singularidades e manipuladores paralelos, construção e controle de robôs. Tem experiência docente na área de automação em atuação de sistemas (hidráulicos, pneumáticos, CLP, FMS e sensores), projeto mecânico, mecânica dos sólidos, vibrações, sistemas de medição e robótica.

