



Universidade Federal de Alagoas
Instituto de Computação

RESOLUÇÃO DE REDUNDÂNCIA APLICADA A UM MANIPULADOR ROBÓTICO COM CINCO GRAUS DE LIBERDADE

Aluno: Hugo Tallys Martins Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Glauber Rodrigues Leite

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

OBJETIVOS

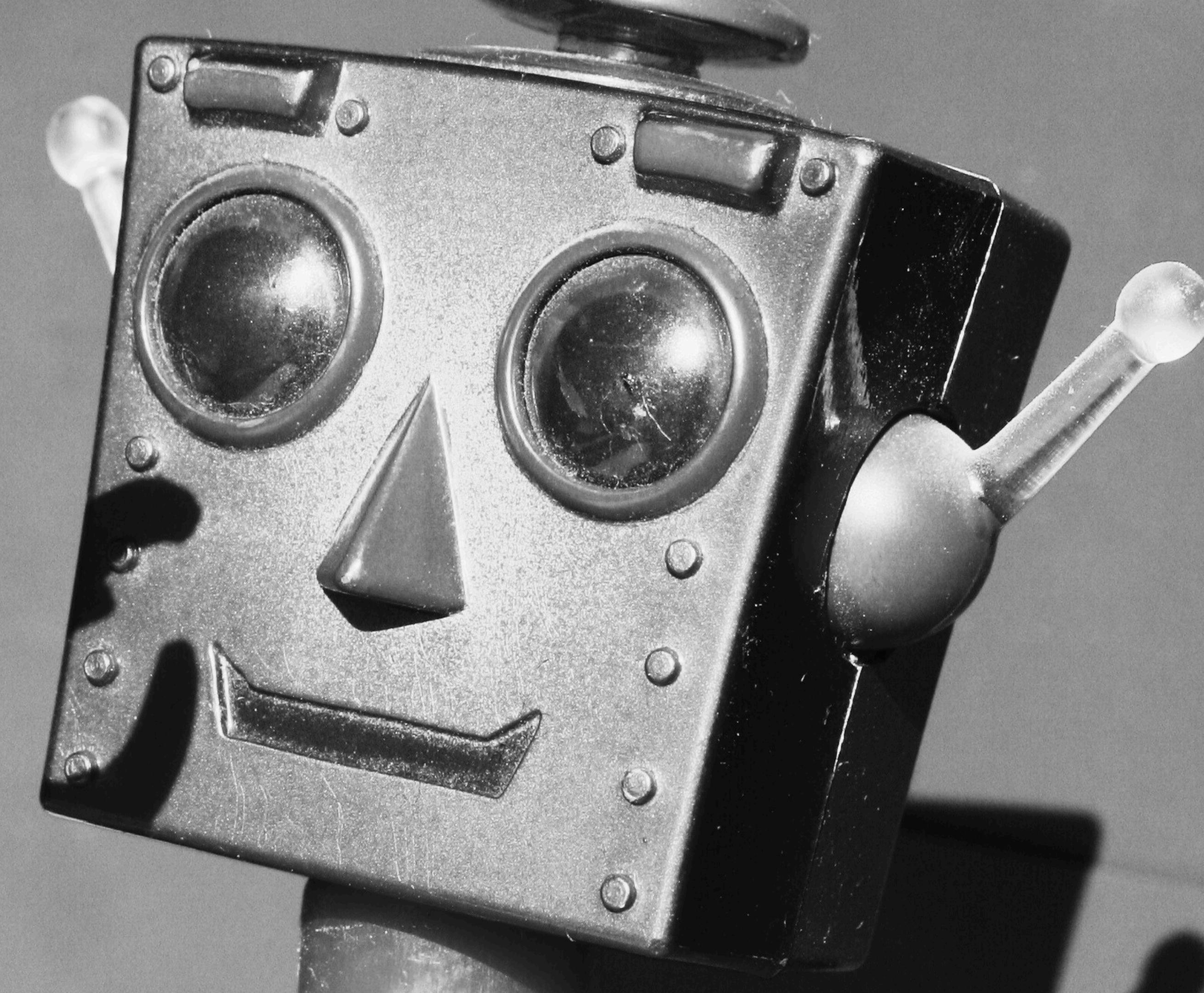
REFERÊNCIAL TEÓRICO

METODOLOGIA

RESULTADOS

CONCLUSÃO

REFERÊNCIAS



INTRODUÇÃO

- Manipuladores robóticos seriais
 - Cadeia aberta (*elos e juntas*)
- Cinemática de manipuladores
 - Espaço de configuração (*C-Space*)
 - Graus de Liberdade (*DoF*)
 - Espaço de trabalho (*Task-Space*)

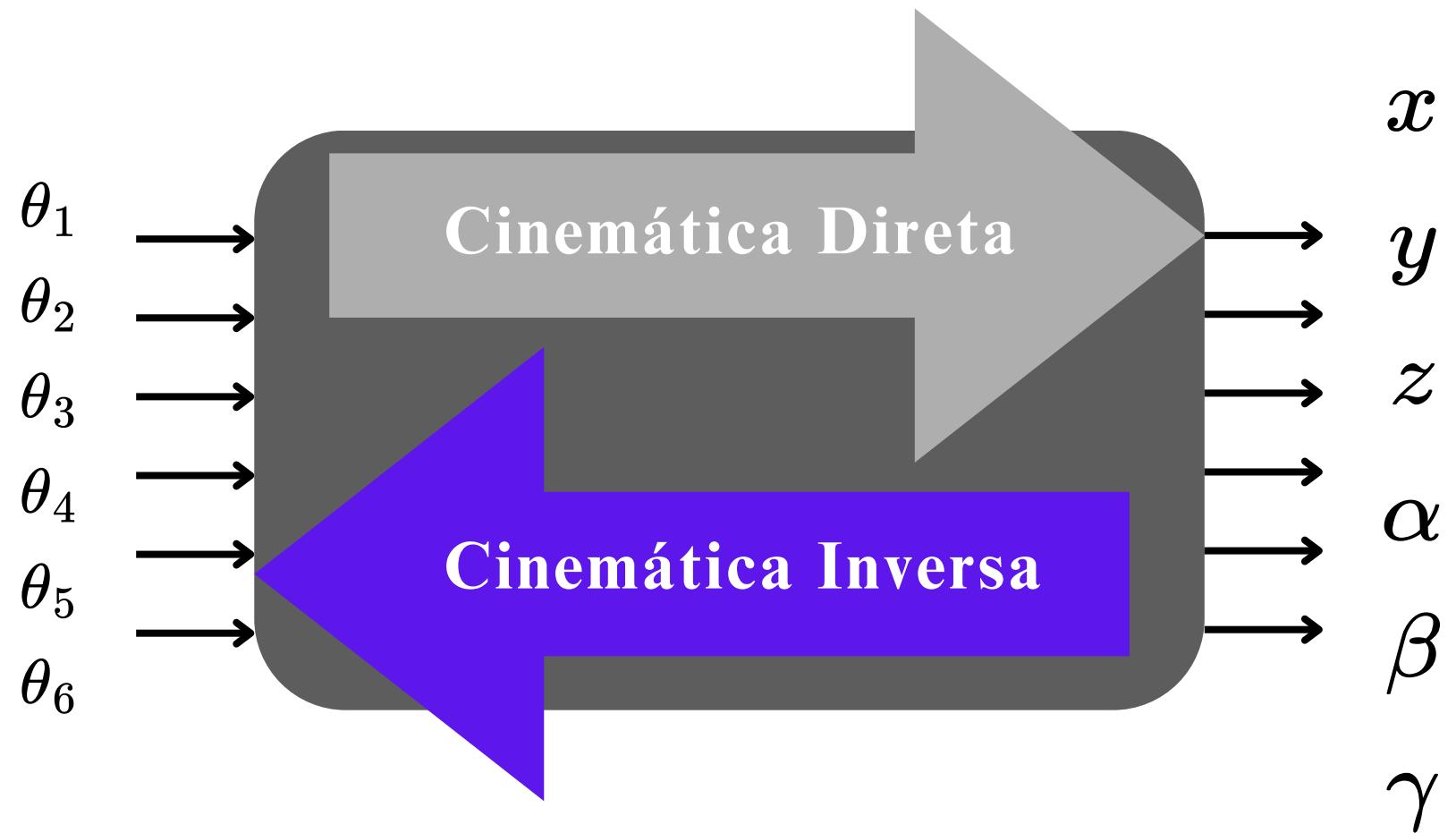


Figura: Braço Robótico Serial ACROBOT com 6-DoF.
Disponível em: [Introduction to Robotic Manipulators](#).

REDUNDÂNCIA CINEMÁTICA

- Cinemática Inversa e seus desafios
 - Singularidades Cinemáticas (internas e externas)
 - Ambientes dinâmicos (*Obstacle Avoidance - OA*)
- Manipuladores Redundantes
 - Possuem mais DoFs do que o necessário para executar a tarefa (usualmente 7 DoFs)
 - Infinitas soluções para o problema de cinemática inversa (redundância)

$$\dim(\text{C-Space}) > \dim(\text{Task-Space})$$

MOTIVAÇÃO

- Abordagem tradicional
 - Minimização de custos (projeto, operação e manutenção)
 - SCARA - *Selective Compliance Assembly Robot*
- Manipuladores redundantes são mais versáteis
 - Por outro lado o controle é mais complexo (resolução de redundância)

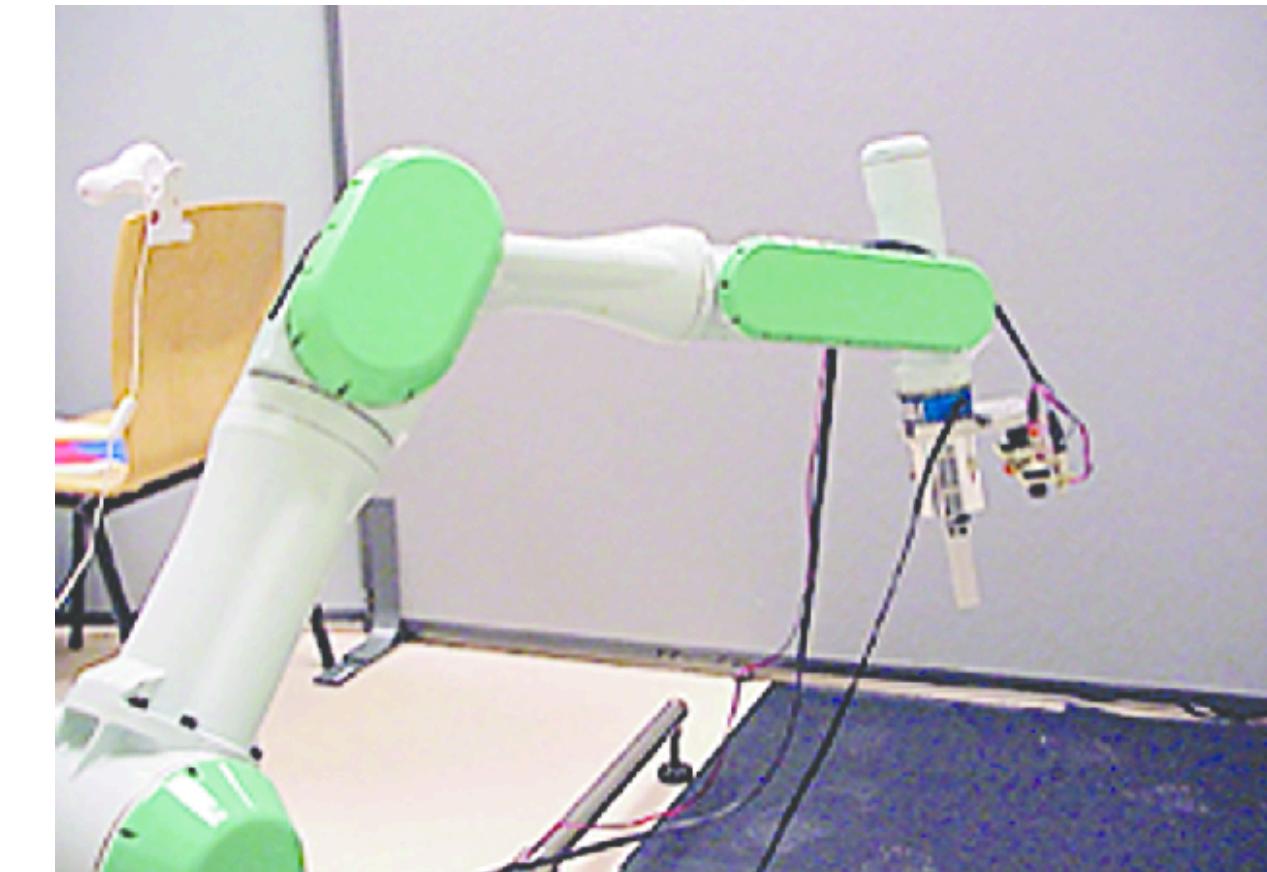


Figura: Robô SCARA - 4 DoF (esquerda) e Mitsubishi PA10 - 7 DoF (direita).

CONTEXTO DE PESQUISA

- Nenhum manipulador é *inherentemente* redundante
 - Um manipulador 5 DOF com controle da posição (2 DOFs excedentes)

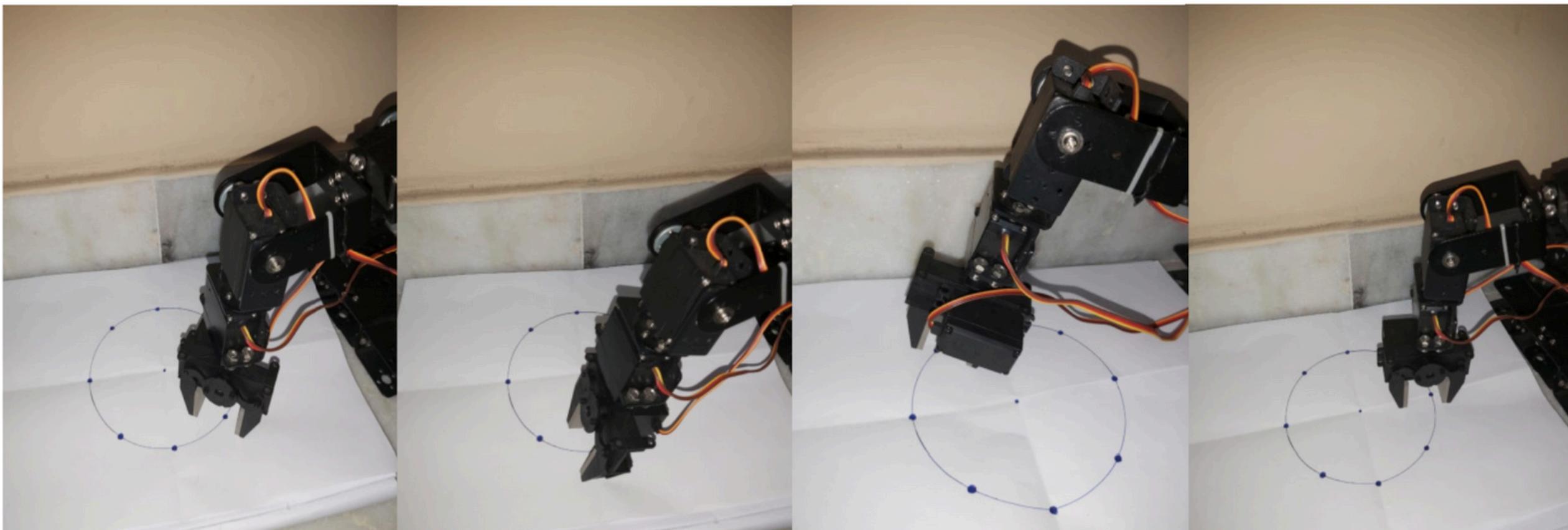


Figura: Execução de trajetórias circulares por um manipulador 5DOF. Fonte: [Kuri et al., 2023]

CONTEXTO DE PESQUISA

- [Ancona, 2017] Mostrou uma abordagem generalista para o problema de resolução de redundância

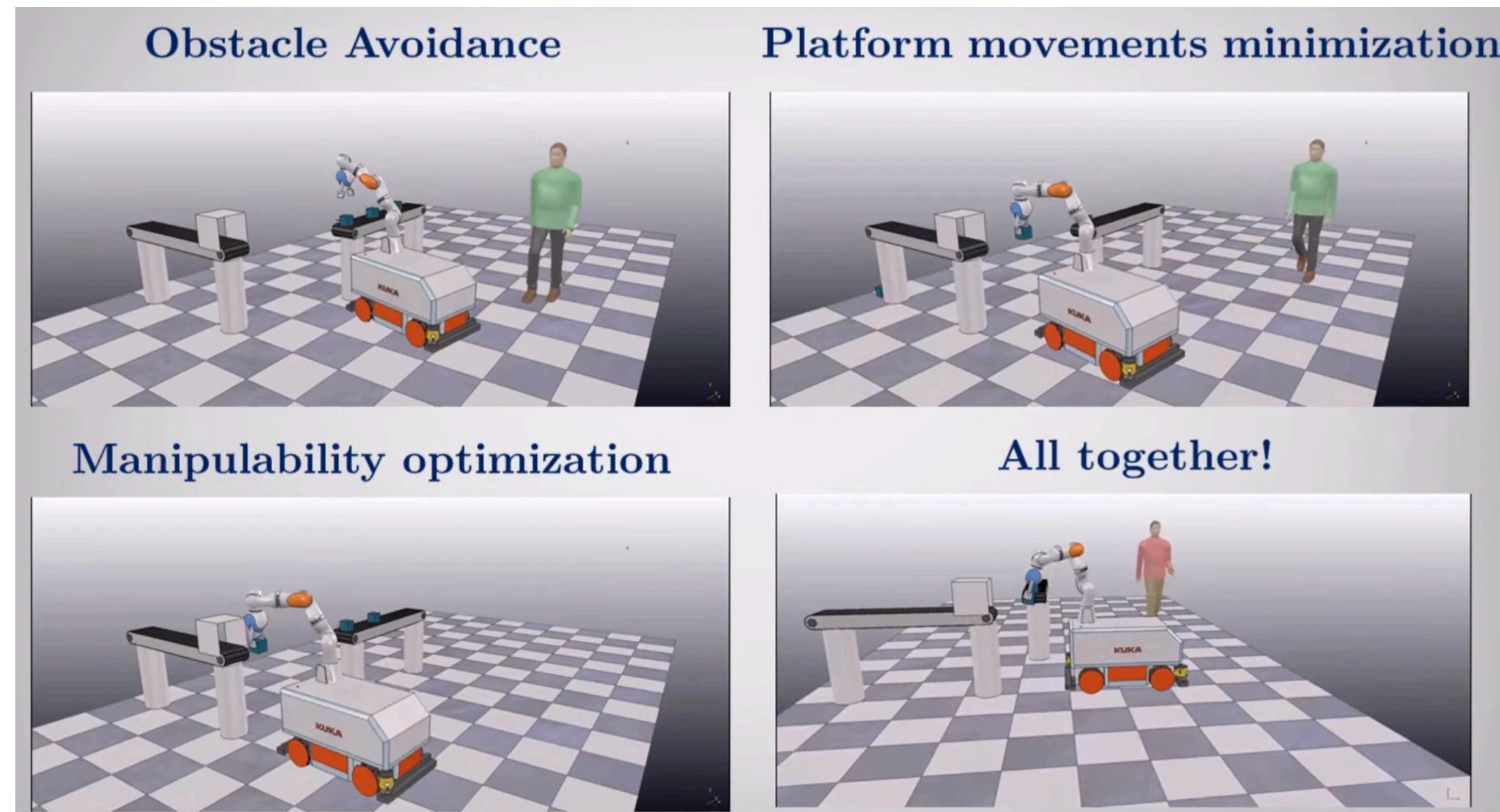
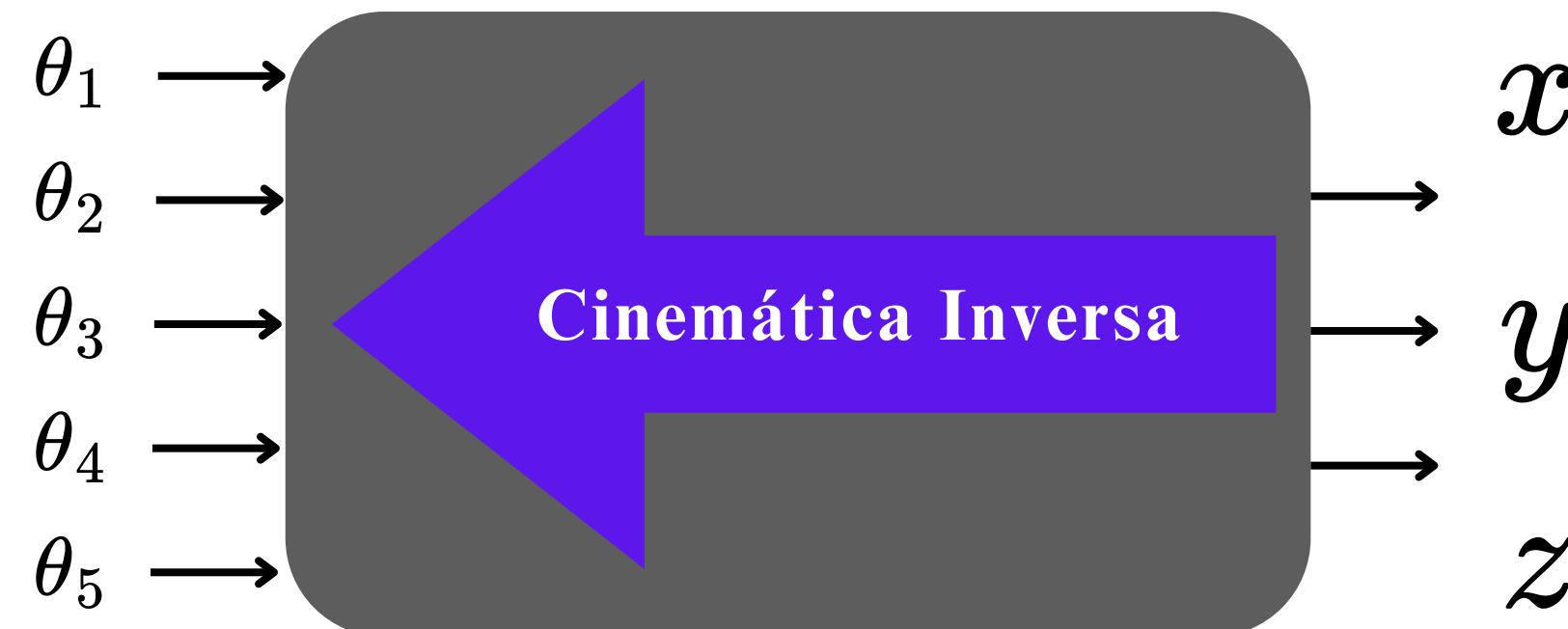


Figura: Diferentes cenários de utilização da resolução de redundância. Fonte: [Ancona, 2017].

O PROBLEMA

Como explorar os 2 DoFs excedentes em um manipulador serial simples com 5 DoFs para controle de posição ? Quais critérios utilizar para melhorar a destreza do manipulador na execução de trajetórias ?



OBJETIVOS I

Objetivo Geral

Estudar e implementar a modelagem de cinemática inversa diferencial em manipuladores seriais redundantes, possibilitando a execução de trajetórias no espaço de trabalho que levam em conta não só as restrições cinemáticas do movimento mas também critérios de desempenho do manipulador.

OBJETIVOS II

Objetivos específicos

- Estudar a modelagem de cadeias cinemáticas em manipuladores robóticos seriais
- Investigar o uso da cinemática direta e inversa diferenciais para execução de trajetórias cartesianas
- Implementar a lei de controle utilizando a cinemática direta diferencial e esquemas de resolução de redundância utilizando a *pseudo-inversa* da matriz jacobiana
- Propor um ambiente simulado para execução de experimentos utilizando o modelo virtual do manipulador robótico com 5 graus de liberdade
- Analisar o desempenho do esquema de controle em diferentes cenários de execução de trajetórias e critérios de desempenho.

REFERÊNCIAL TEÓRICO

Resolução de
Redundância

Cinemática Inversa
Diferencial

Cinemática Direta

REPRESENTAÇÃO DE POSES NO ESPAÇO

- Deslocamento Rígido $SE(3)$
 - Encapsulam rotações $SO(3)$
 - Translações \mathbb{R}^3
- Transformações homogêneas expressam a relação entre dois sistemas de coordenadas (*frames*)

$$\begin{bmatrix} p^0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^0 & o_1^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

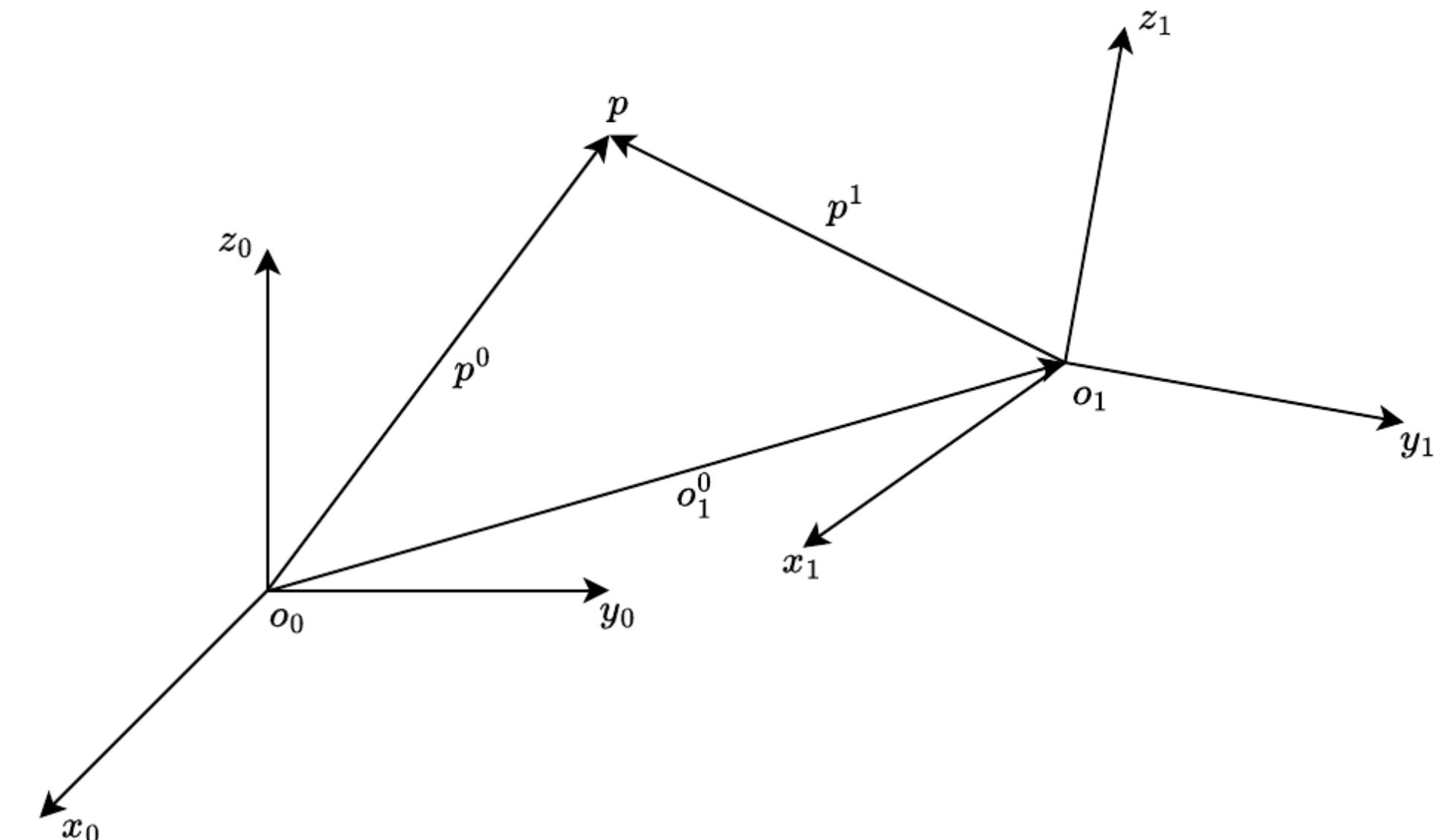


Figura: A relação entre dois *frames* é descrita por um deslocamento rígido.

CINEMÁTICA DIRETA

- Fixação de frame em cada *elo*
 - **Base até Efetuador Final**
- Transformações homogêneas A_i expressam a pose de efetuador final relativa à base

$$T_n^0(q) = A_1(q_1)A_2(q_2) \cdots A_n(q_n) = \begin{bmatrix} R_n^0 & o_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Parâmetros de *Denavit-Hartenberg*:

Parâmetro	Definição
θ_i	O ângulo entre os eixos \mathbf{x}_{i-1} e \mathbf{x}_i em torno do eixo \mathbf{z}_{i-1}
d_i	A distância da origem do sistema de coordenadas $\{i-1\}$ até o eixo \mathbf{x}_i ao longo do eixo \mathbf{z}_{i-1}
a_i	A distância entre os eixos \mathbf{z}_{i-1} e \mathbf{z}_i ao longo do eixo \mathbf{x}_i ; para eixos que se intersectam, é paralela a $\mathbf{z}_{i-1} \times \mathbf{z}_i$
α_i	O ângulo entre o eixo \mathbf{z}_{i-1} e o eixo \mathbf{z}_i em torno do eixo \mathbf{x}_i

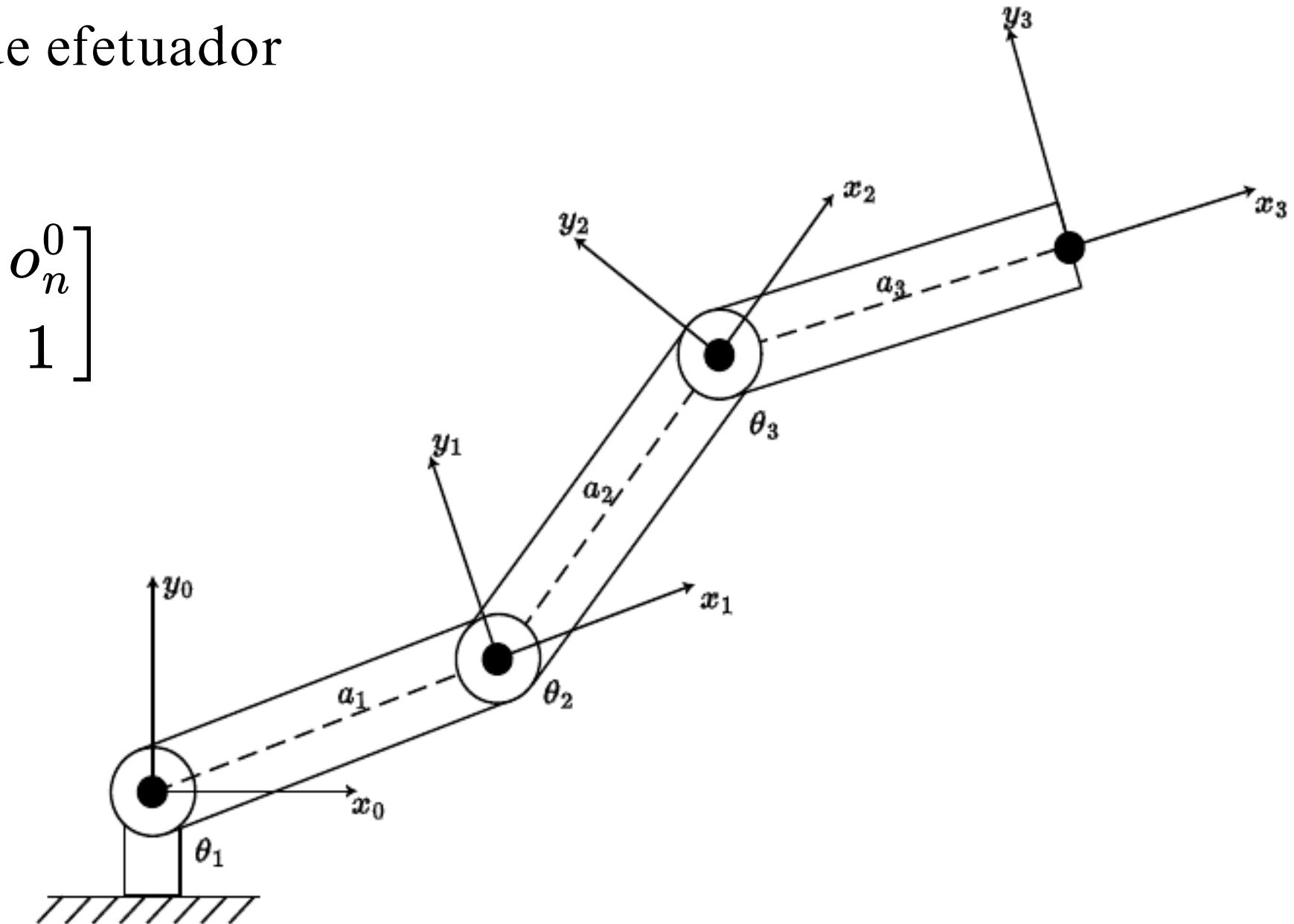


Figura: Robô planar 3R.

CINEMÁTICA DIFERENCIAL

- A Matriz Jacobiana
 - Relaciona velocidades no espaço de configuração e de trabalho (linearização local)

$$\xi = J(q)\dot{q}$$

- Método Geométrico

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix}$$

$$J_{v_i} = z_{i-1}^0 \times (o_n^0 - o_{i-1}^0)$$

$$J_{\omega_i} = z_{i-1}^0$$

CINEMÁTICA INVERSA DIFERENCIAL

- Quando J admite inversa (matriz quadrada 6x6, 3x3, ...)

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\xi \quad q(t) = q(0) + \int_0^t \dot{q}(\tau) d\tau$$

- E se J NÃO admite inversa ?
 - Configurações singulares
 - *Infinitas soluções* para manipuladores redundantes

$$det(J) = 0$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & \dots & j_{15} \\ j_{21} & j_{22} & \dots & j_{25} \\ j_{31} & j_{32} & \dots & j_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}$$

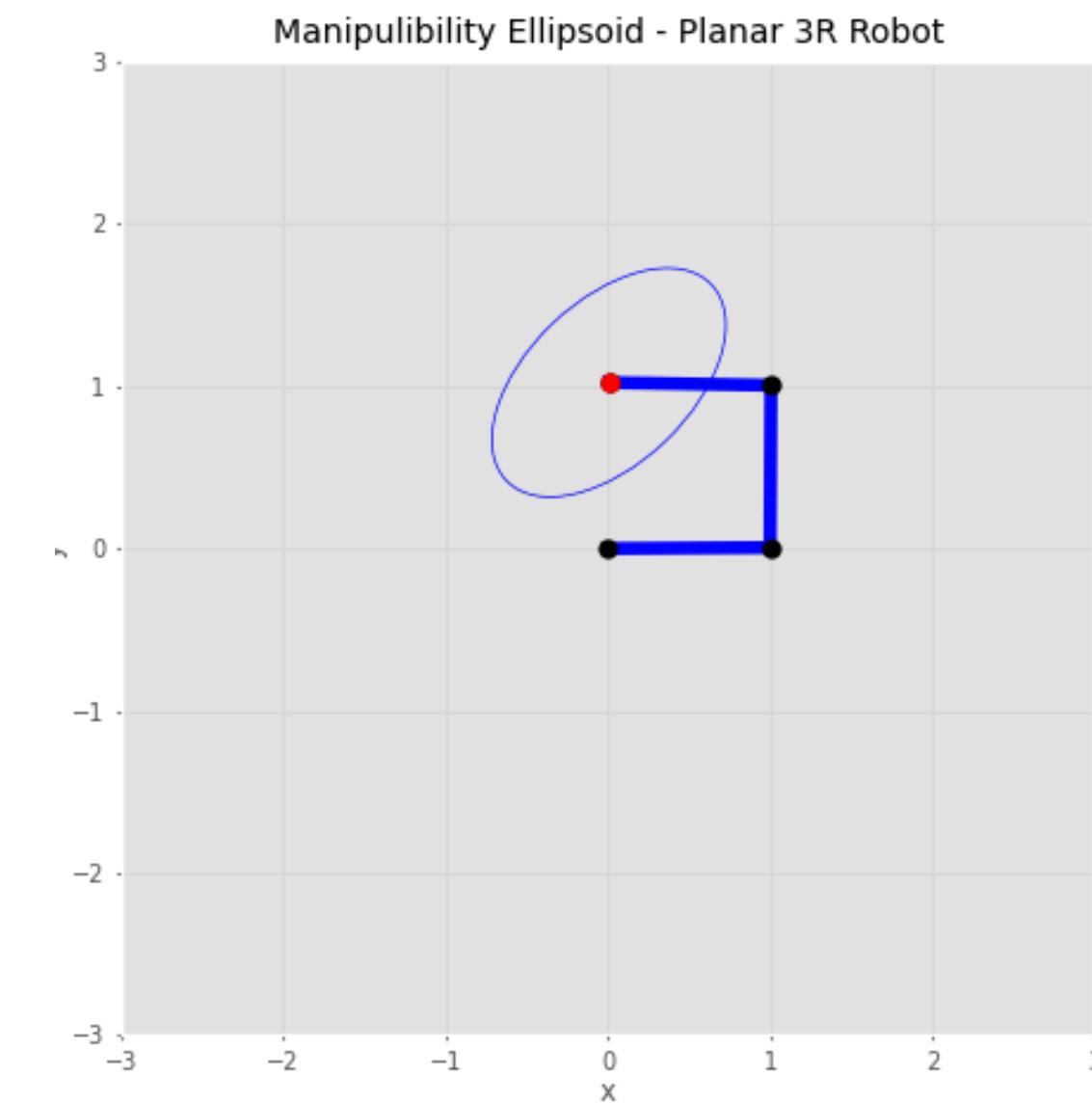
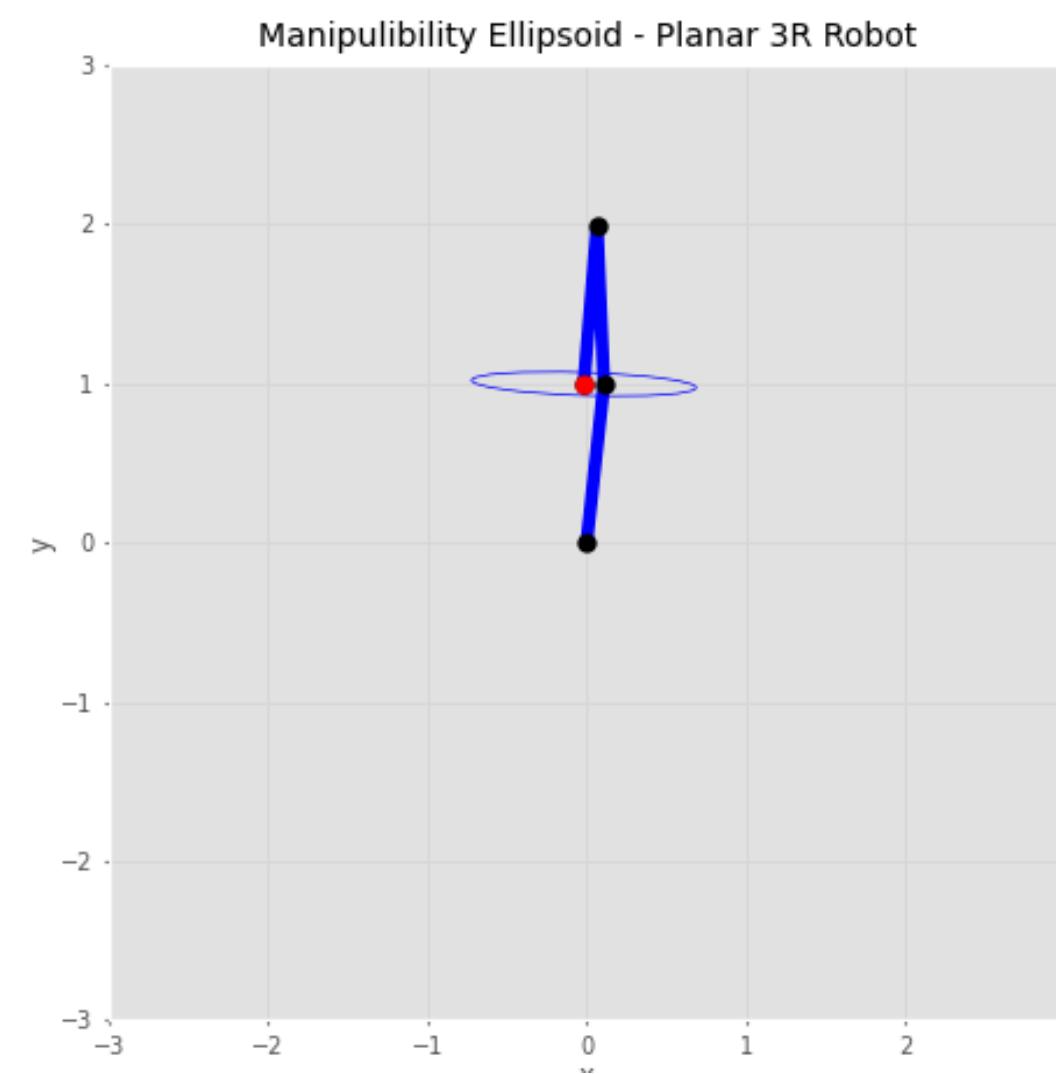
5 × 3

ELIPSOIDE DE MANIPULABILIDADE

- Mapeamento da Jacobiana
 - Conjunto de velocidades de norma unitária

$$qq^\top \leq 1$$

- “Volume” do Elipsoide caracteriza a *manipulabilidade*



RESOLUÇÃO DE REDUNDÂNCIA

- Tratamos como um problema de otimização:

$$\arg \min_{\dot{q}} \|\dot{q} - \dot{q}_0\|^2 \text{ sujeito a } J\dot{q} = \xi$$

- Solução geral utiliza a *Pseudo-Inversa* da Jacobiana
 - Espaço nulo da Jacobiana provoca *movimentos internos*

$$\dot{q} = J^\dagger \xi + (I_n - J^\dagger J) \dot{q}_0$$

RESOLUÇÃO DE REDUNDÂNCIA

- Como escolher \dot{q}_0 ?

$$\dot{q}_0 = k_0 \left(\frac{\partial w(q)}{\partial q} \right)^\top$$

- Algumas métricas que visam melhorar a destreza
 - *Medida de Manipulabilidade de Yohikawa*

$$w(q) = \sqrt{\det(J(q)J(q)^\top)}$$

- *Distância para os limites mecânicos das juntas*

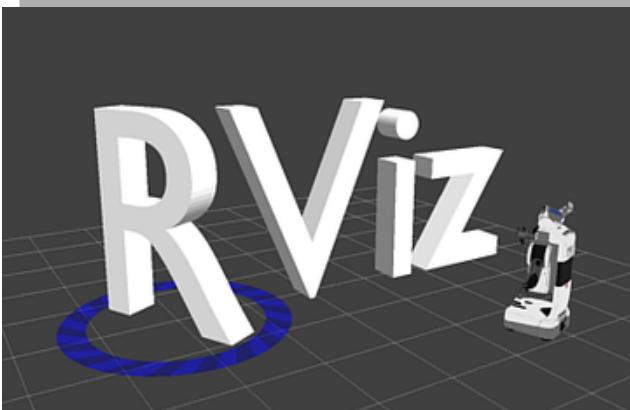
$$w(q) = -\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_{iM} - q_{im}} \right)^2$$

METODOLOGIA

MODELAGEM

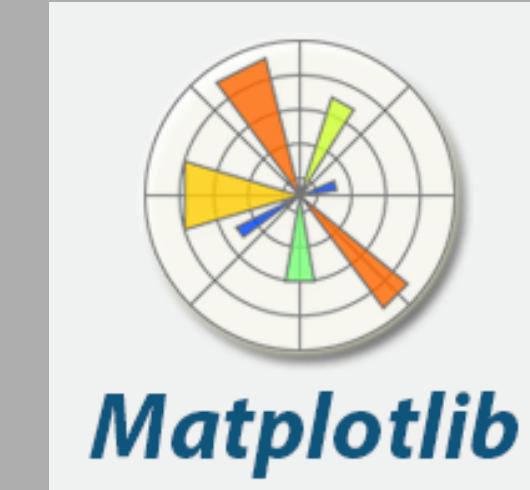


SIMULAÇÃO

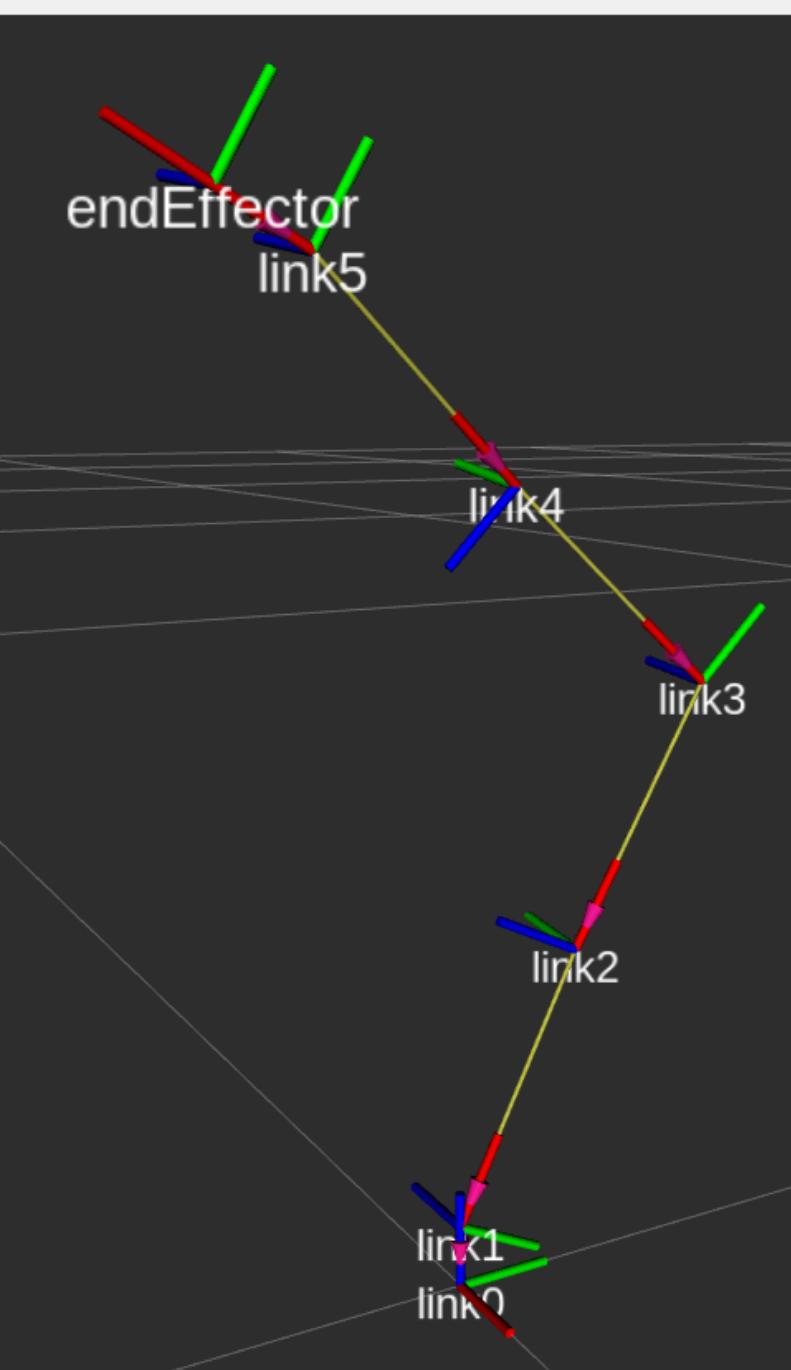
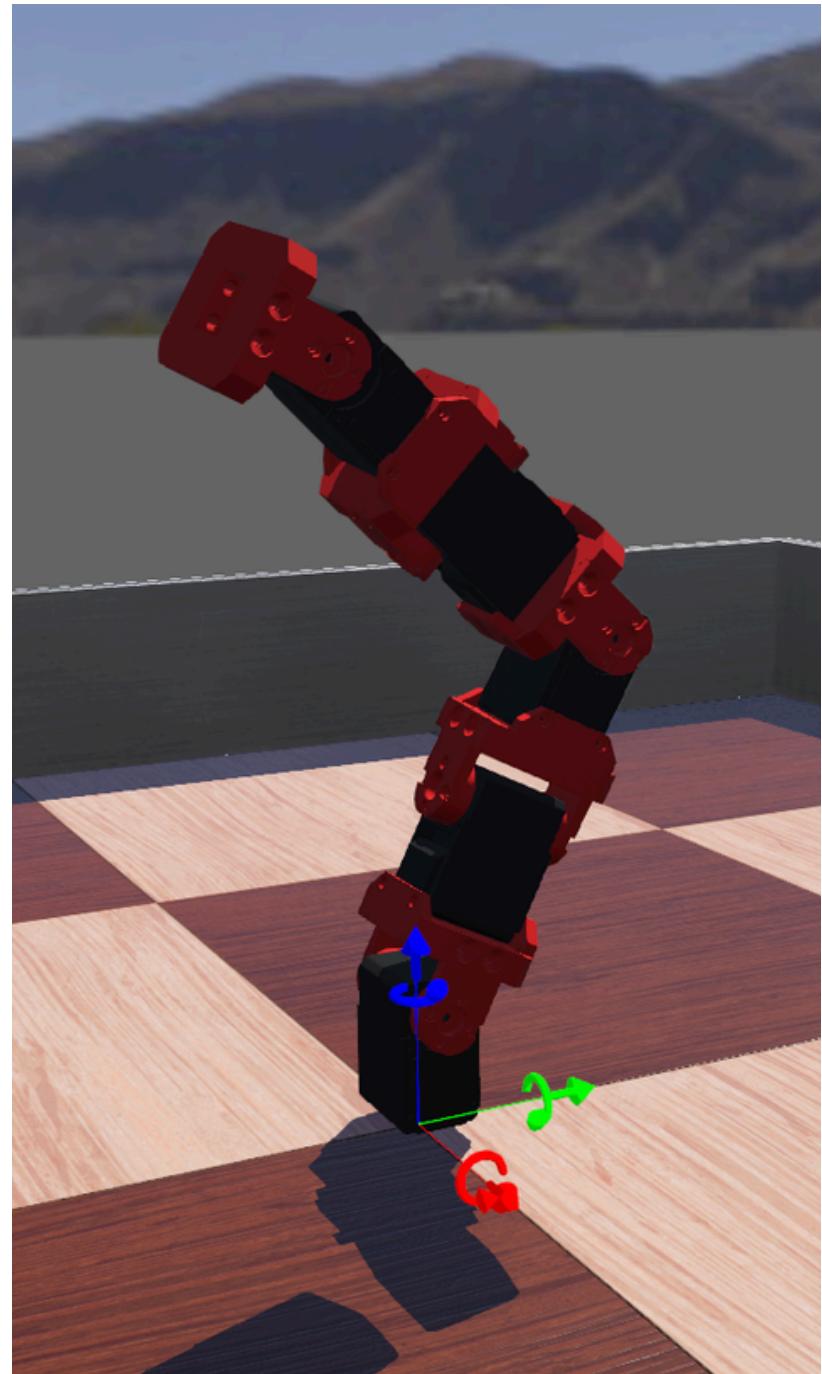


2

EXPERIMENTOS



MODELO VIRTUAL 5 DOF



Elo	θ	d	a	α
1	θ_1	0	0.06	$\pi/2$
2	θ_2	0	0.06	$-\pi/2$
3	θ_3	0	0.06	$\pi/2$
4	θ_4	0	0.06	$-\pi/2$
5	θ_5	0	0.02	$\pi/2$

Tabela: Parâmetros DH para o Snake 5R.

Figura: Modelo virtual do 5DoF (Snake 5R) e frames fixados no RViZ.

ESPECIFICAÇÃO DAS VELOCIDADES

- *Frame* da base $\{0\}$ não coincide com o mundo $\{w\}$ (restrições DH)
 - Relação entre $\{w\}$ e $\{0\}$

$$\mathbf{T}_0^w = Trans_z(0.04) \cdot Rot_z(\pi) \cdot Rot_y(\pi/2)$$

- Cinemática direta

$$\mathbf{T}_5^w = \mathbf{T}_0^w \cdot \mathbf{T}_1^0 \cdot \mathbf{T}_2^1 \cdot \mathbf{T}_3^2 \cdot \mathbf{T}_4^3 \cdot \mathbf{T}_5^4$$

- Especificamos velocidades no frame do mundo relativas à base do robô

$$\boldsymbol{\xi}^0 = Rot(\mathbf{T}_0^w)^\top \boldsymbol{\xi}^w$$

GEOMETRIAS DE COLISÃO

- Caráter mais realista (dinâmica)
- Posição é controlada através de um PID (Webots)
- Geometrias aproximadas por caixas
 - Massa dos servos (fabricante)
 - Massa dos *sockets* (densidade do material)
- Matrizes de inércia calculadas pelo simulador

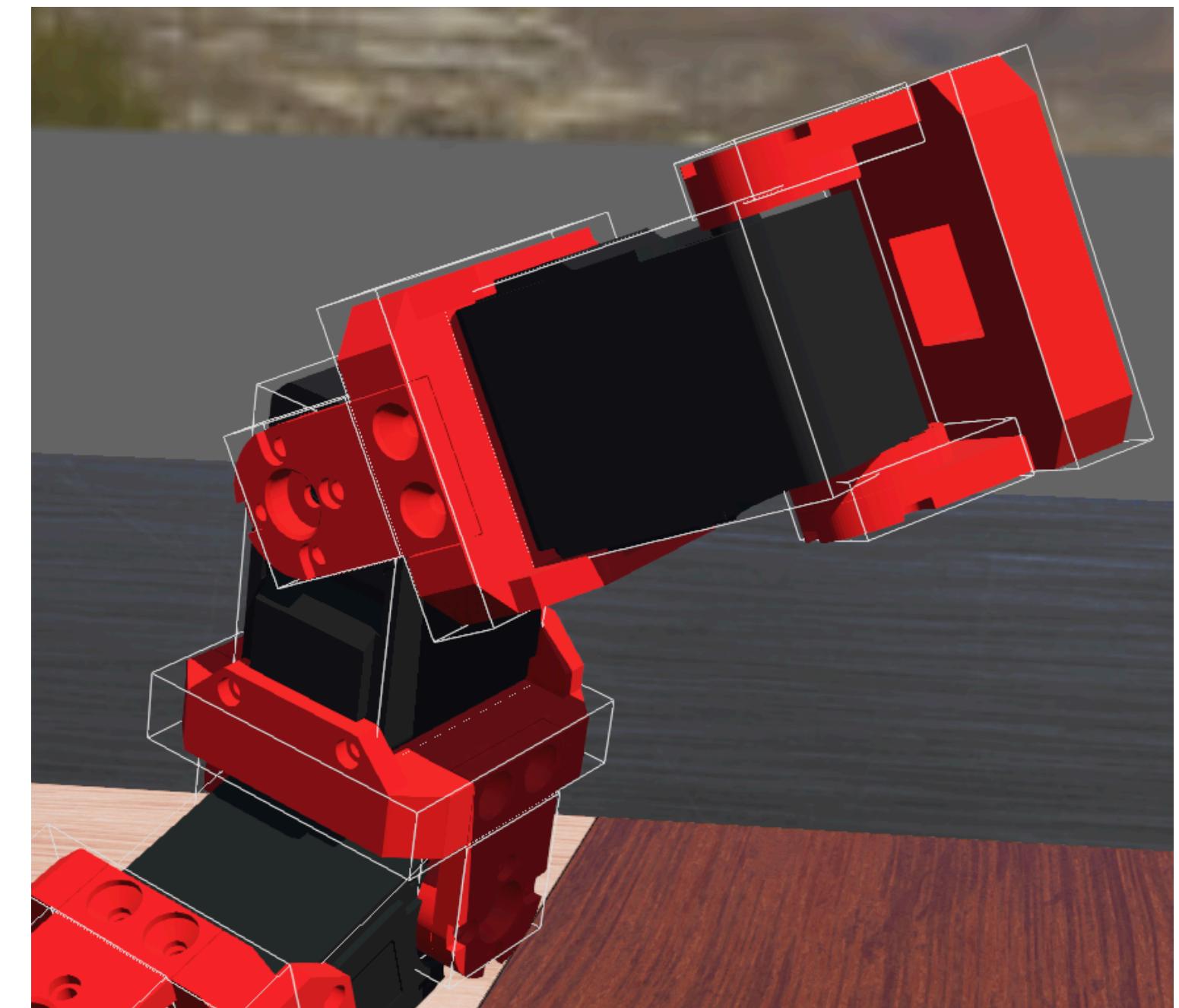


Figura: Geometrias de colisão adicionam física à simulação.

ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO

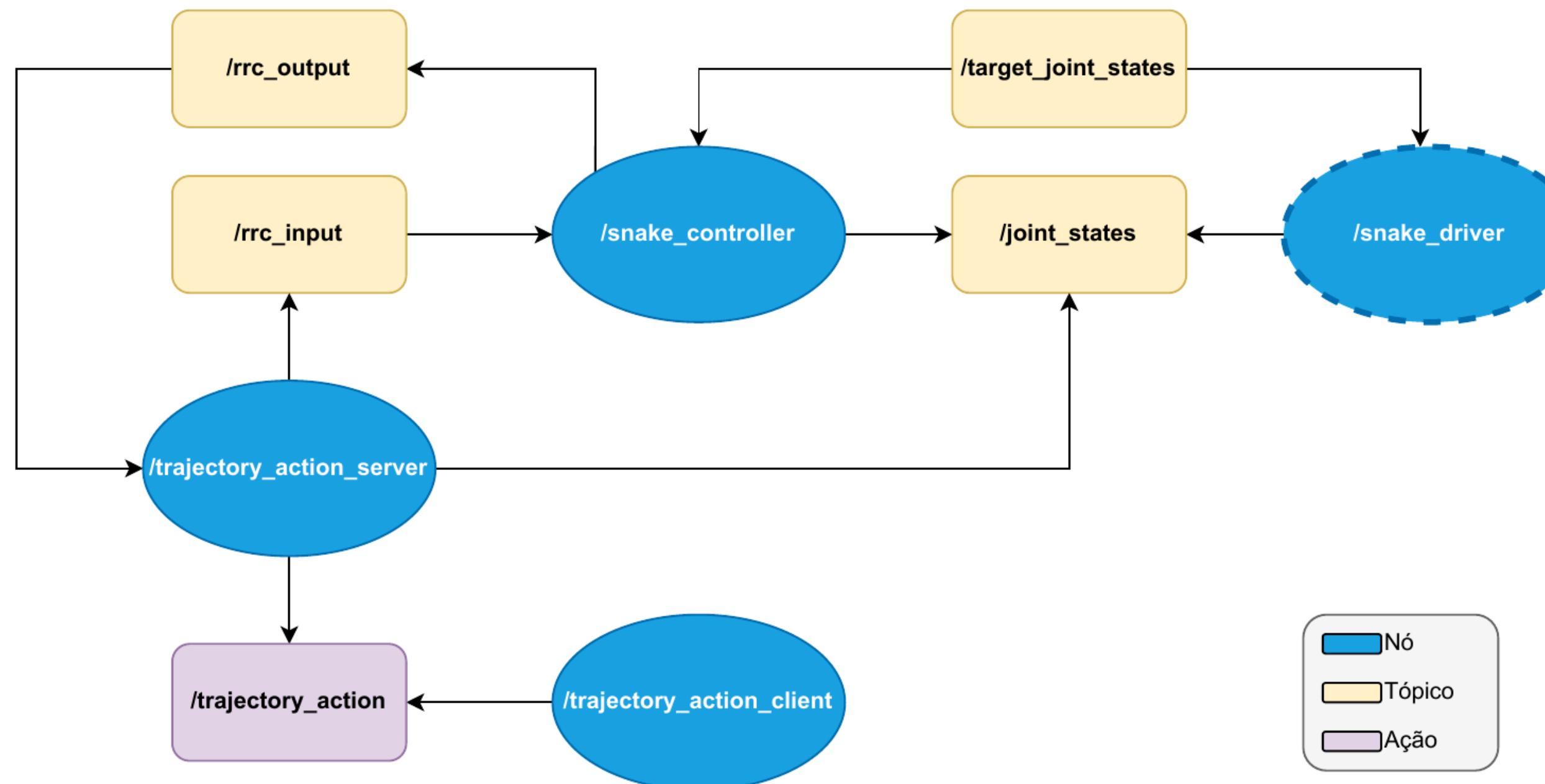


Figura: *ROS Graph* da arquitetura de comunicação proposta.

ALGORITMO RRM

- Implementado pelo nó **/snake_controller**
- Aproximação numérica do gradiente da manipulabilidade

$$w'(q) \approx \frac{w(q+h) - w(q-h)}{2h}$$

Algoritmo 1 *Resolved Rate Motion Controller* - Atualizando o estado das juntas

```

1: procedure UPDATEJOINTPOSITION( $q$ ,  $\xi$ ,  $k_0$ ,  $\delta_t$ , metricName)
2:    $\xi \leftarrow \text{Rot}(\mathbf{T}_0^w)^\top \xi$ 
3:    $J \leftarrow \text{Jacobian}(q)$ 
4:    $J^\dagger \leftarrow J^\top (JJ^\top)^{-1}$ 
5:    $n \leftarrow \text{length}(q)$ 
6:    $\dot{q}_0 \leftarrow \text{array}(\text{size} : n)$ 
7:   for  $i \leftarrow 0$  to  $n - 1$  do                                 $\triangleright$  Calculando o gradiente da métrica
8:     if metricName = joint_distance then
9:        $q_{mid} \leftarrow 0.5 \times (q_{\max}[i] + q_{\min}[i])$ 
10:       $\dot{q}_0[i] \leftarrow (-k_0/n) \times (q[i] - q_{mid}) \div (q_{\max}[i] - q_{\min}[i])^2$ 
11:    else if metricName = manipulability then
12:       $q_+, q_- \leftarrow \text{copy}(q), \text{copy}(q)$ 
13:       $q_+[i] \leftarrow q_+[i] + h$ 
14:       $q_-[i] \leftarrow q_-[i] - h$ 
15:       $\dot{q}_0[i] \leftarrow k_0 \times (\text{manipulability}(q_+) - \text{manipulability}(q_-)) \div (2 \times h)$ 
16:    end if
17:   end for
18:    $\dot{q} \leftarrow J^\dagger \xi + (I - J^\dagger J)\dot{q}_0$ 
19:   return clipLimits( $q + \dot{q}\delta_t$ ,  $q_{\max}$ ,  $q_{\min}$ )           $\triangleright$  Restringe aos limites das juntas
20: end procedure

```

EXPERIMENTOS

- Cenário I
 - Efetuador final parado, otimização da configuração
- Cenário II
 - Efetuador final tenta chegar em outra posição, além de otimizar a configuração
- Variar ganho k_0
- Cálculo do índice de desempenho $I(w)$

$$I(w) = \int_0^t |w(q(\tau))| d\tau$$

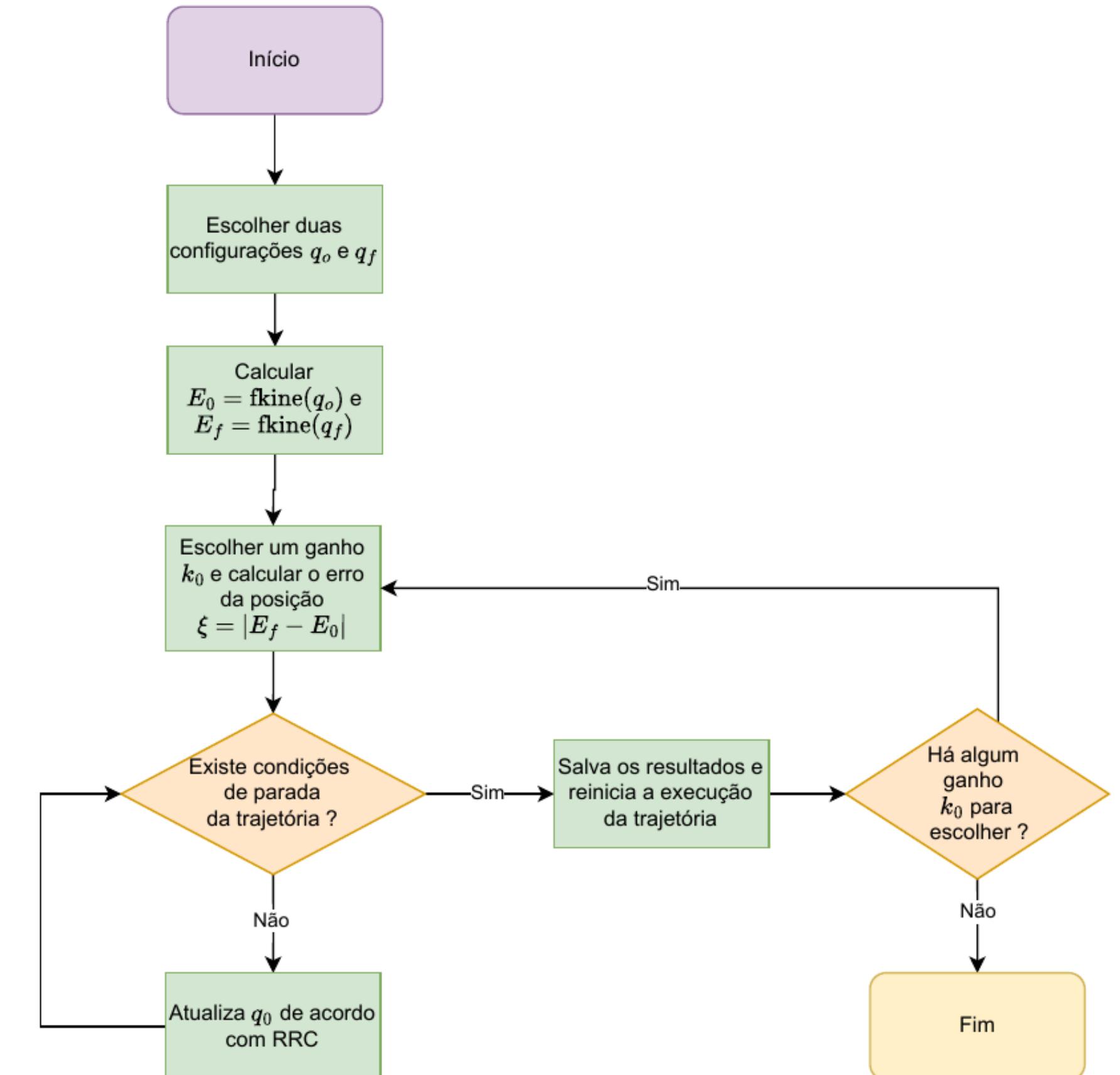


Figura: Etapas de um experimento.

RESULTADOS CENÁRIO I

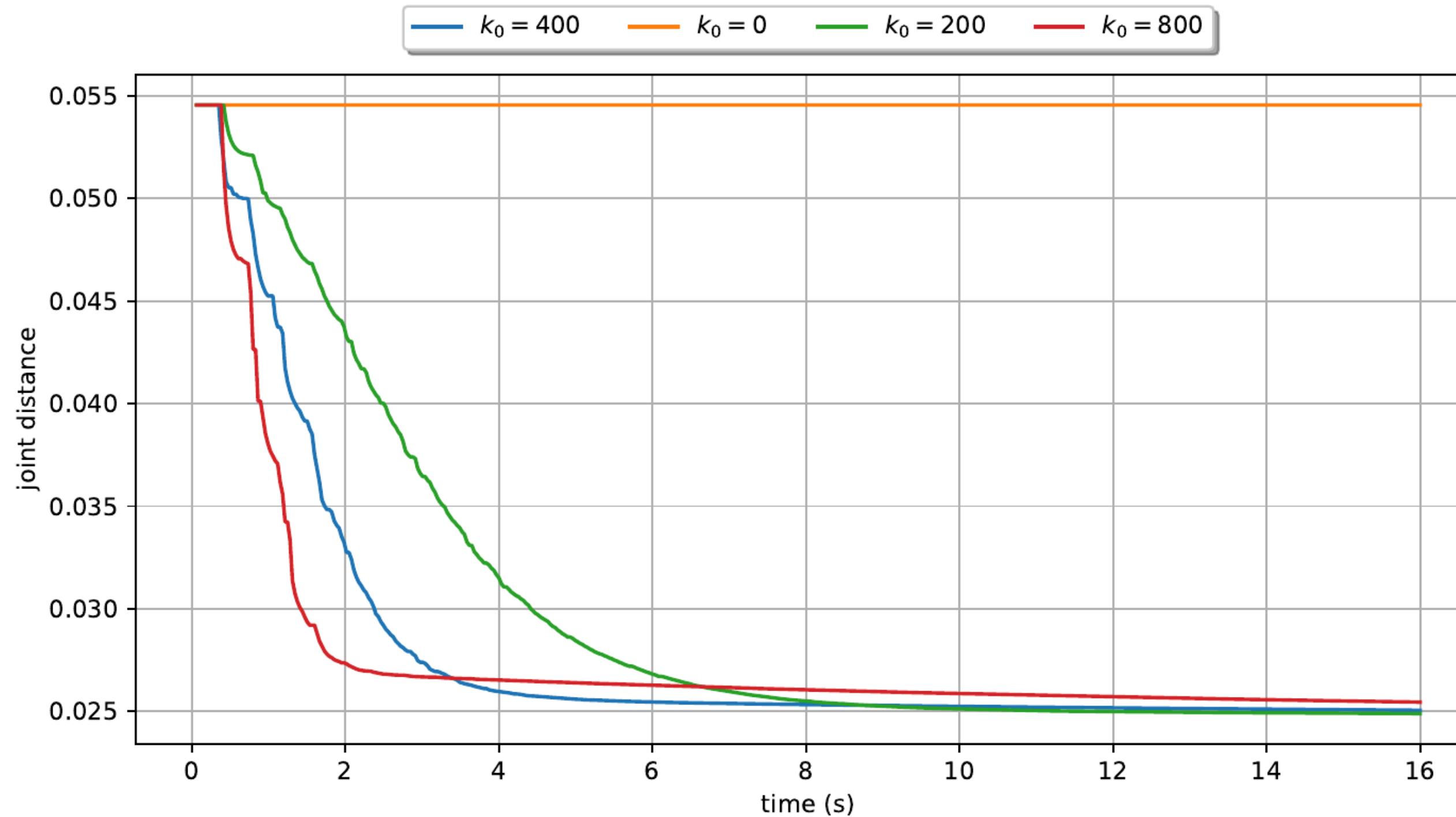


Figura: Otimização da métrica de distância para o limite mecânico das juntas.

RESULTADOS CENÁRIO I

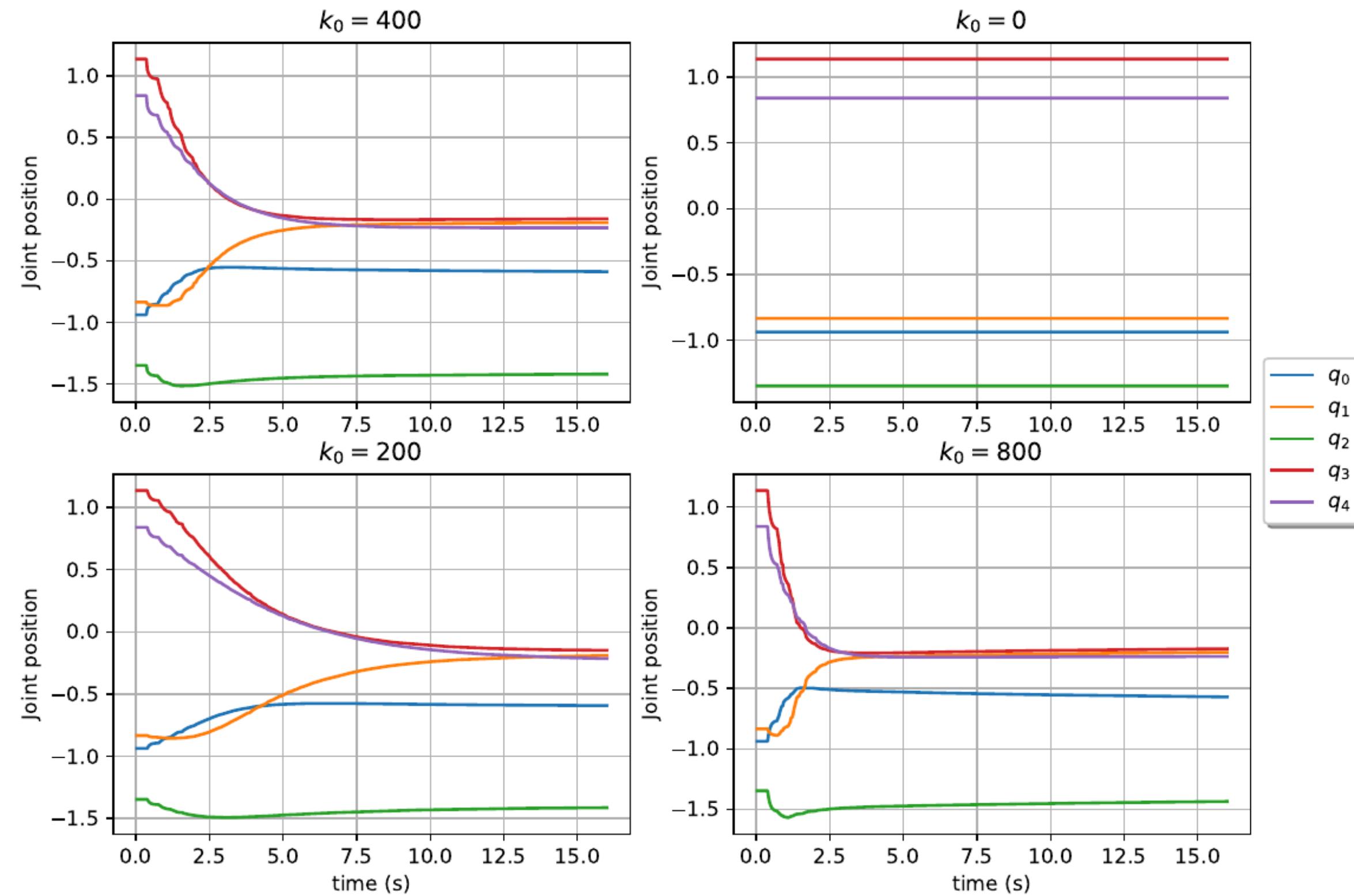


Figura: Configuração do manipulador convergindo para a solução ótima (local).

RESULTADOS CENÁRIO I

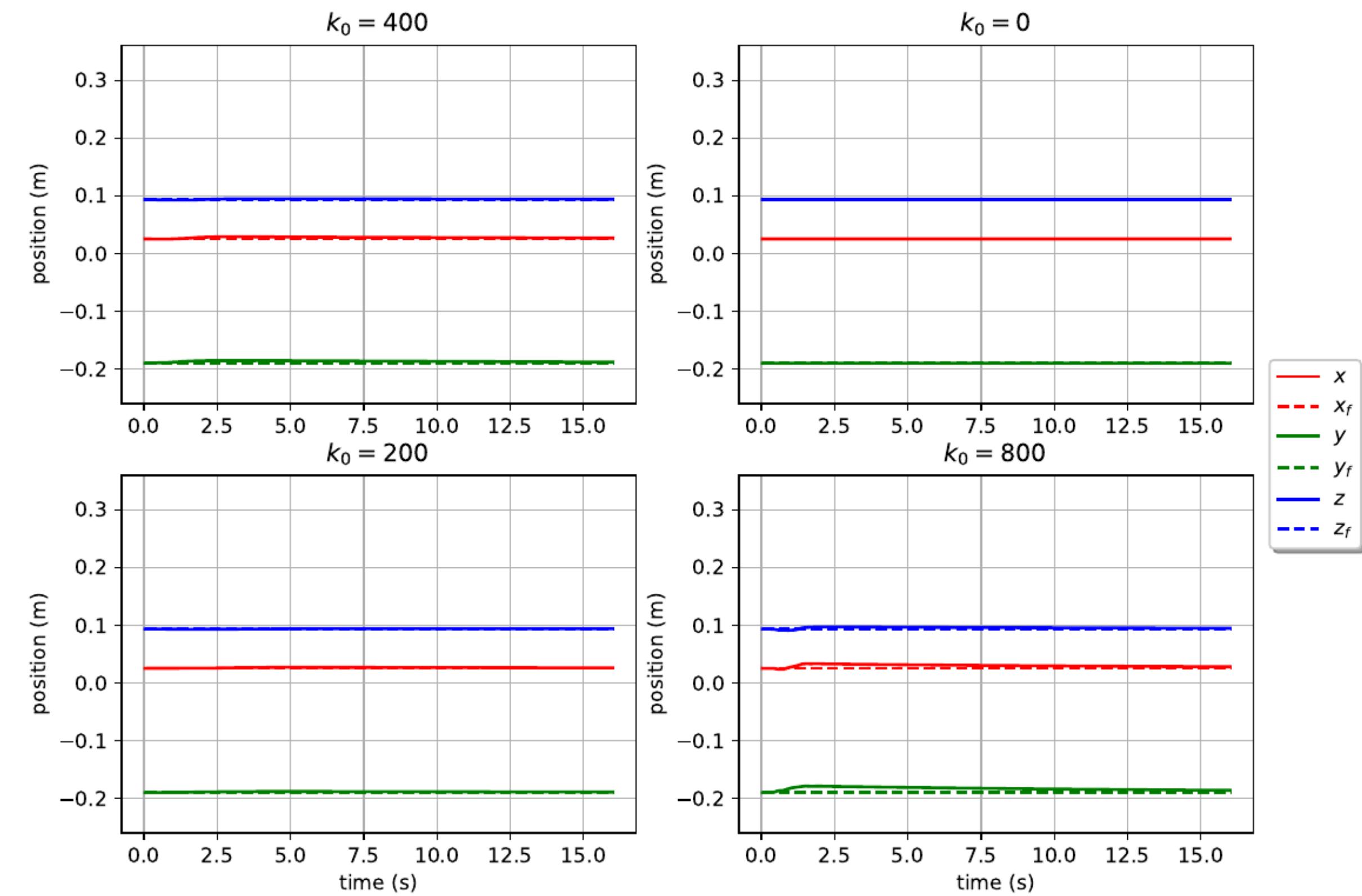


Figura: Posição do efetuador final permanece constante.

RESULTADOS CENÁRIO II

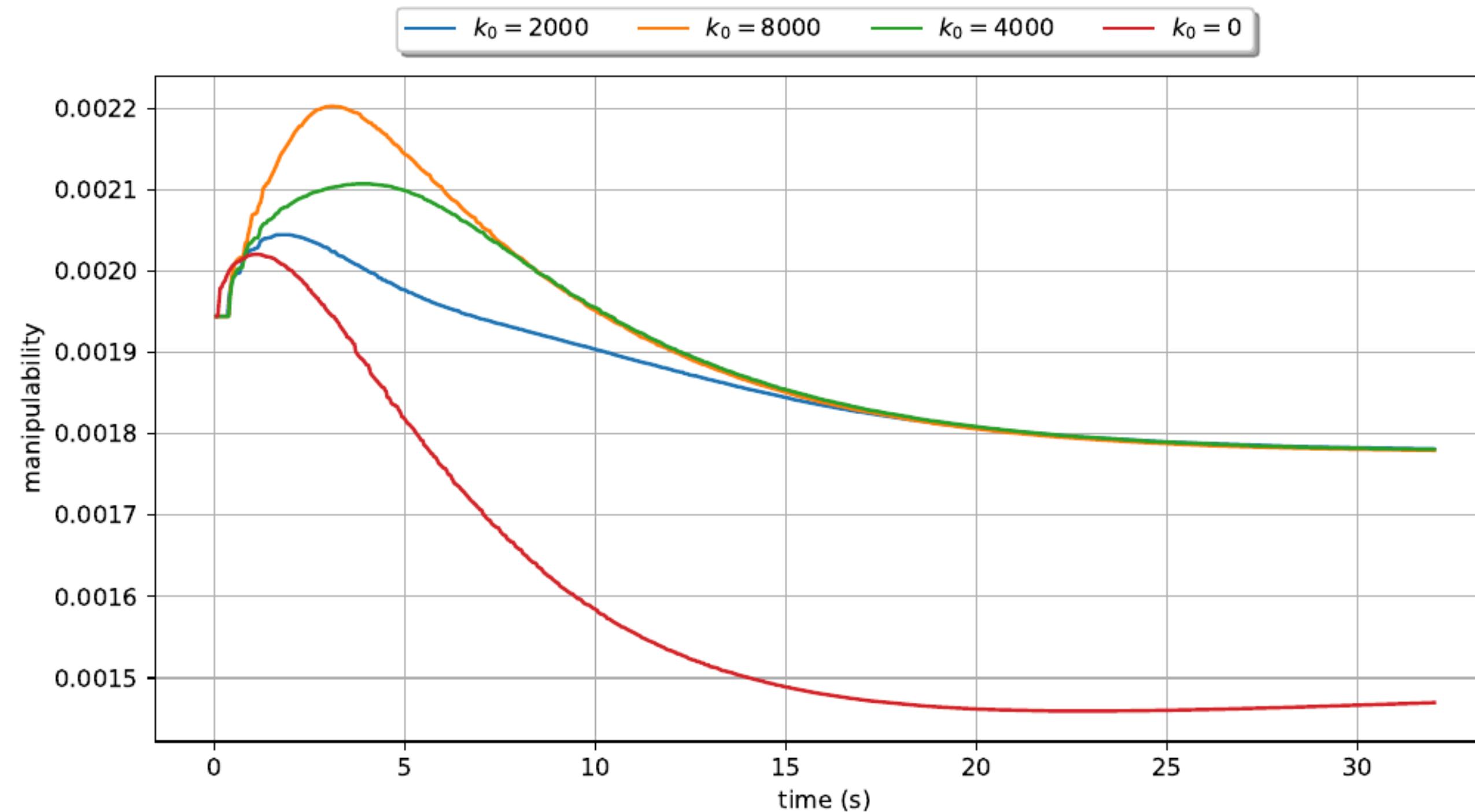


Figura: Maximização da manipulabilidade.

RESULTADOS CENÁRIO II

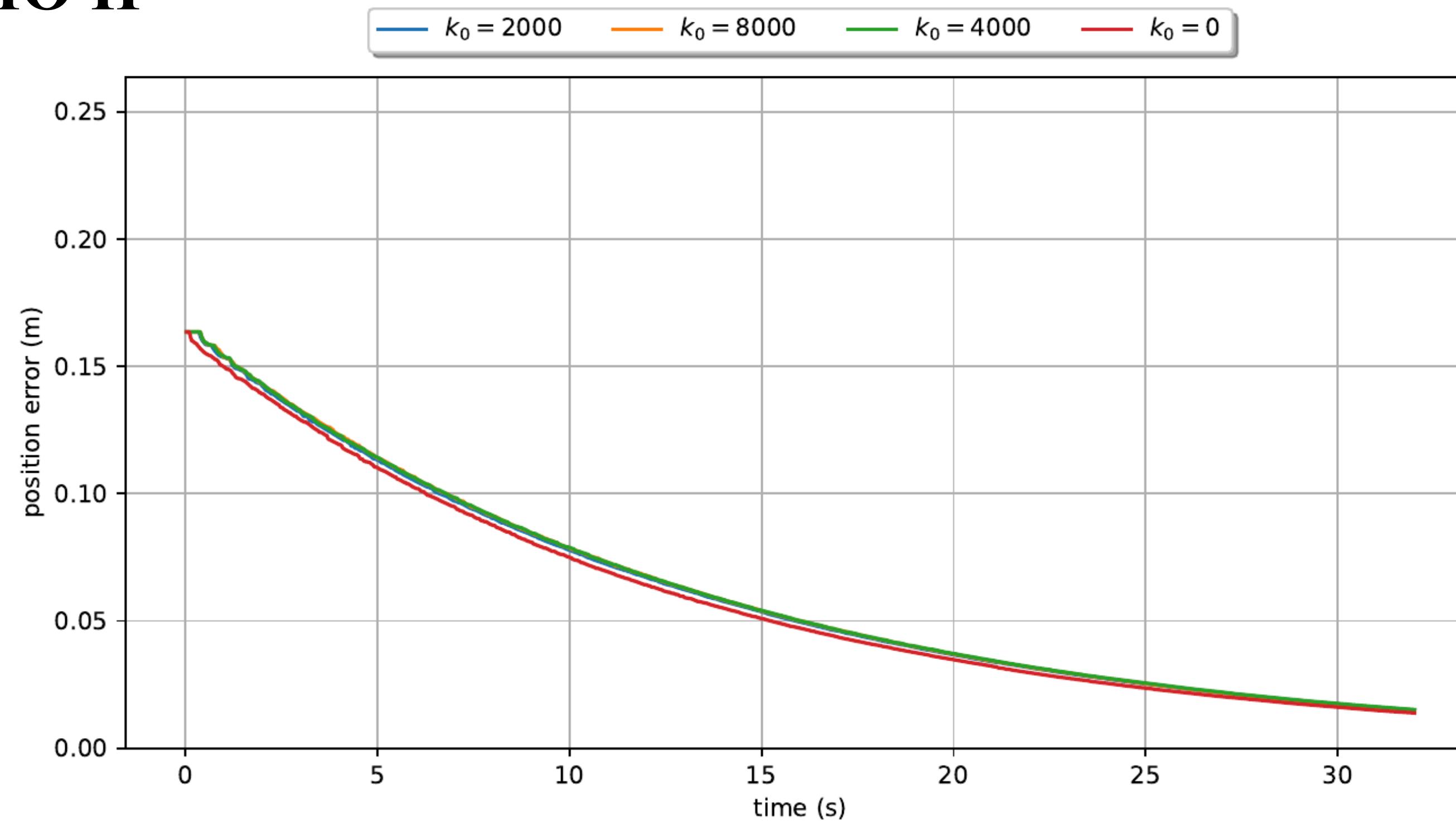


Figura: Erro da posição em relação ao tempo.

RESULTADOS CENÁRIO II

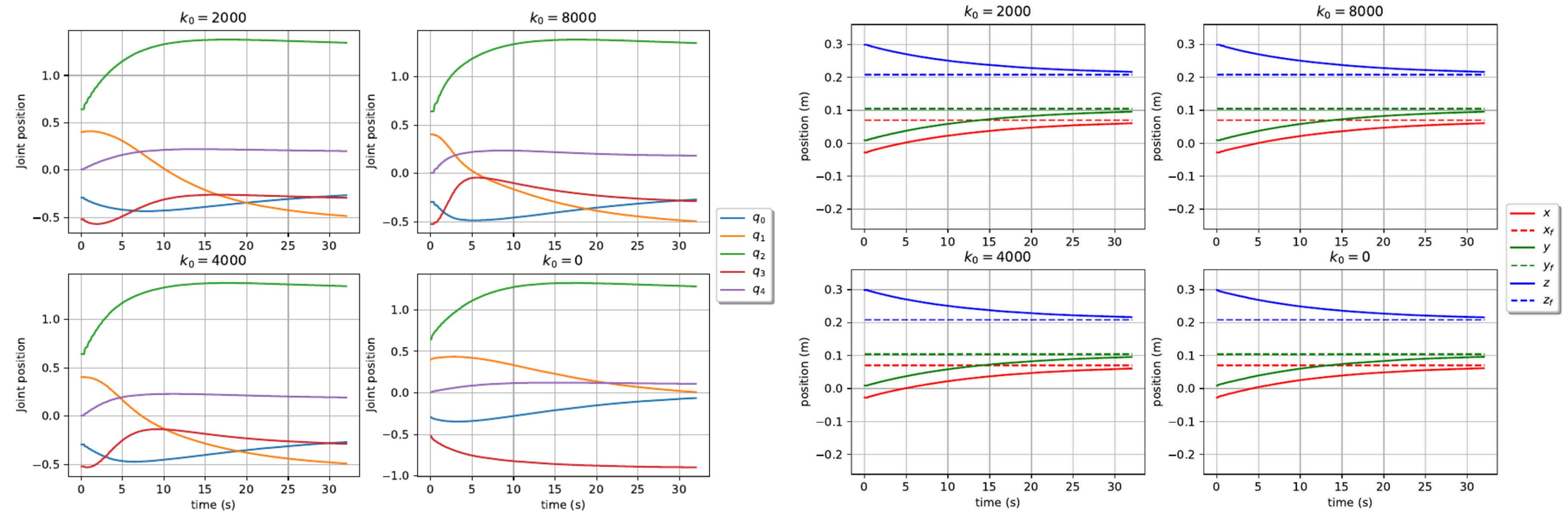


Figura: Posição do efetuador final não muda em cada execução.

PERFORMANCE EM CADA CENÁRIO

k_0	$I(w)$	Erro posição (m)
0	0.8729	1.8535e-06
200	0.4829	0.0013
400	0.4488	0.0023
800	0.4435	0.0048

Tabela: Desempenho (distância para o limite das juntas) no primeiro cenário.

k_0	$I(w)$	Erro posição (m)
0	0.0507	0.0138
2000	0.0597	0.0150
4000	0.0606	0.0151
8000	0.0609	0.0149

Tabela: Desempenho (manipulabilidade) no segundo cenário.

RESULTADOS SIMULAÇÃO

EXERTOS

CONCLUSÃO

- Implementação de um esquema de resolução de redundância para otimização da destreza do manipulador na execução de trajetórias evitando singularidades
- Teste e validação da estratégia de controle em ambiente simulado com comunicação modularizada utilizando ROS
- Avaliação de trajetórias em diferentes condições de restrições cinemáticas e de desempenho
- Trabalhos Futuros
 - Escolha ótima do k_0
 - Análise teórica/estatística aprofundada dos resultados
 - Exploração de outras estruturas cinemáticas (7 DoFs) e critérios (OA)
 - Transferência para o robô real, com uso de *frameworks* próprios do ROS

REFERÊNCIAS I

- [Corke, 2023] Corke, P. I. (2023). *Robotics, vision and control: fundamental algorithms in Python*. Springer, Cham, 3rd ed., 2023 edition. OCLC: 1378937773.
- [Siciliano, 2009] Siciliano, B., editor (2009). *Robotics: modelling, planning and control*. Advanced textbooks in control and signal processing. Springer, London. OCLC: ocn144222188.
- [Siciliano and Khatib, 2008] Siciliano, B. and Khatib, O., editors (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Spong et al., 2020] Spong, M. W., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M. (2020). *Robot modeling and control*. Wiley, Hoboken, NJ, second edition edition.

REFERÊNCIAS II

- [Ancona, 2017] Ancona, R. (2017). *Redundancy modelling and resolution for robotic mobile manipulators: a general approach*. Advanced Robotics, 31(13):706–715.
- [Kuri et al., 2023] Kuri, S. K., Halder, K., and Orlando, M. F. (2023). *Som network with weighted least norm matrix based redundancy resolution for a 5-dof spatial robotic manipulator*. In 2023 7th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA), pages 1–6. IEEE.