



# Robótica Industrial

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica  
Mestrado em Engenharia de Automação Industrial

## Trabalho Prático nº 2

### Simulação de um célula com três robôs em operações de manipulação, paletização e gravação de objetos

#### Objetivo

O objetivo é o desenvolvimento de um programa em Matlab para simular o movimento de três manipuladores (A, B e C) em operação sincronizada numa célula de fabrico. Dois robôs (A e C) são do tipo SCARA e o outro (B) é um antropomórfico de 5 DOF (RRR+RR) que coexistem numa célula, para uma operação de manipulação e gravação de componentes, incluindo a sua despaletização e re-paletização. O robô antropomórfico é responsável por fazer a gravação numa superfície do componente, e os robôs SCARA são responsáveis por colocar e retirar o componente no suporte onde se faz a gravação.

#### Descrição geral

O robô A (SCARA) inicia a operação colocando a peça retirada de uma paleta de entrada no suporte para a gravação (X). O robô B (RRR+RR) faz a gravação na superfície da peça, e o robô C (SCARA) retira a peça do suporte X e coloca-a na paleta de saída. Os robôs A e C usam uma ventosa para pegar na peça, e o robô B grava a peça na sua face oblíqua usando uma ferramenta equivalente a uma fresa.

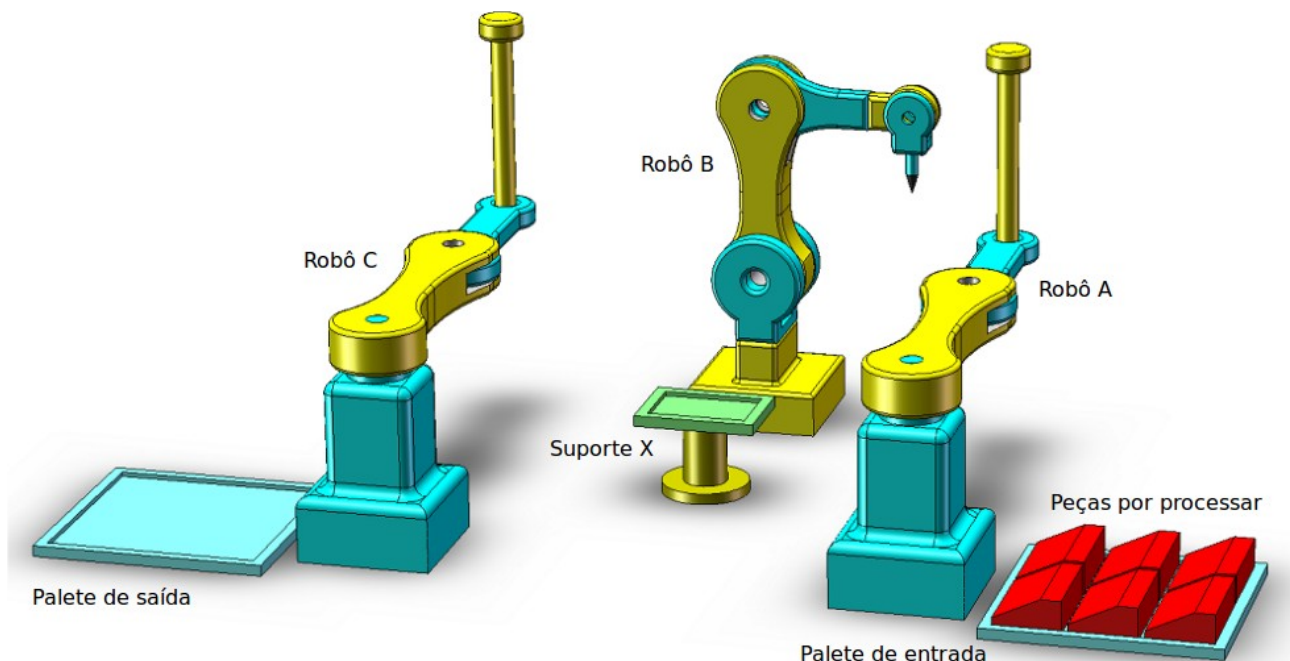


Fig. 1 – Vista geral da célula no seu estado inicial. As peças são retiradas da paleta de entrada pelo robô A que as colocada no suporte X. Aí são gravadas pelo robô B de acordo com as especificações dadas. Finalmente, o robô C retira a peça do suporte X e coloca-a na paleta de saída!

Os robôs SCARA são considerados iguais entre si, e fixam-se nas peças a manipular com um *end-effector* do tipo ventosa. As peças a manipular são sólidos com a geometria definida na Fig. 2 e podem ter duas das suas dimensões variáveis (L e H), obrigando os robôs a adaptar-se a essas dimensões. A medida L nunca será menor do que 5 unidades de comprimento, visto que define a dimensão da face a usar pelos SCARA para pegar na peça. Adicionalmente, a geometria a gravar é uma elipse centrada na face oblíqua sendo os seus eixos (a e b) frações dos lados dessa face. Ainda na Fig. 2 pode-se ver o suporte onde se coloca a peça a gravar. Esse suporte está devidamente posicionado na célula em relação aos robôs, tem as medidas exatas da peça e a sua única variável própria é a altura cujo valor de defeito é HS=38.



# Robótica Industrial

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica  
Mestrado em Engenharia de Automação Industrial

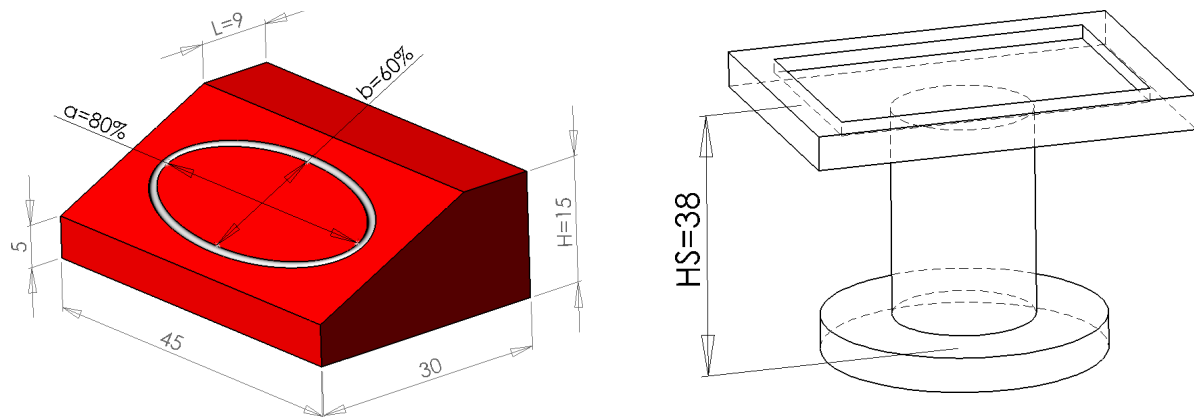


Fig. 2 – À esquerda: ilustração da peça gravada e das suas medidas. As medidas  $L$  e  $H$  são variáveis, sendo os valores apresentados os de defeito. A elipse é desenhada no centro da face oblíqua e os seus eixos  $a$  e  $b$  são frações dos lados respetivos do retângulo da face. À direita: ilustração do suporte para colocar a peça para gravação e indicação da sua altura de defeito.

## Operação dos robôs na célula

No arranque da operação da célula, os robôs devem partir da sua configuração zero dos motores (posição de repouso), e devem estar colocados corretamente na célula, conforme o ficheiro de configuração “cell\_tp2.csv”. A Fig. 1 ilustra essa configuração inicial da célula com os robôs na posição zero (ou de repouso ou de início e de fim de tarefa) e a Fig. 3 ilustra a célula em plena operação. Na cena da Fig. 3 tem-se uma peça já gravada na paleta de saída, outra em fase final de gravação no antropomórfico e outra em processo de recolha inicial pelo SCARA A. Os SCARA prendem as peças pela sua superfície plana superior, e o robô antropomórfico executa uma trajetória da ponta em forma de elipse em velocidade linear aproximadamente constante, mas com o eixo da ferramenta sempre perpendicular ao plano da face em gravação. Considerar que a basta que ferramenta entre em contacto com a superfície a gravar sem precisar de entrar na peça.

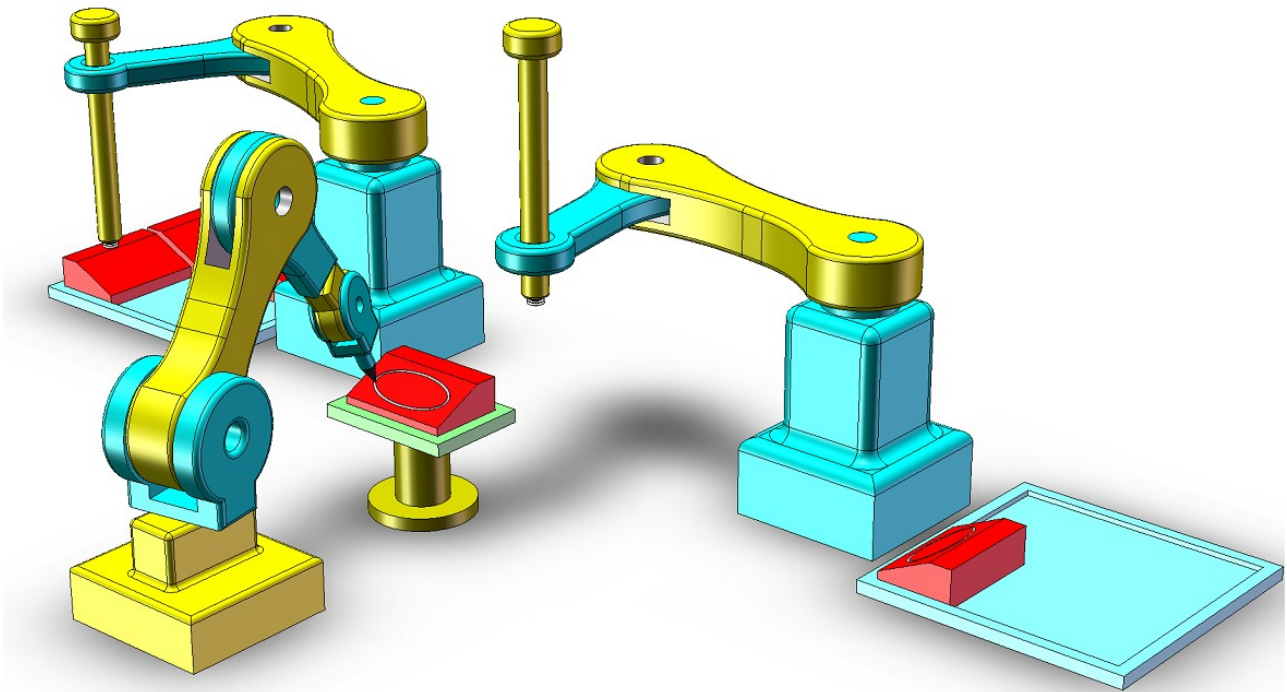


Fig. 3 - Uma configuração intermédia da célula.

Uma vez iniciada, a operação da célula decorre em contínuo até terminar o número de peças a produzir. No fim, depois de esgotada a paleta de entrada, a simulação termina com o regresso dos robôs às posições iniciais de repouso. Para efeitos de simulação da junta linear dos robôs SCARA, se necessário, pode-se admitir que se trata de um elo telescópico e que o seu comprimento varia na direção vertical, podendo ser dessa forma representado



# Robótica Industrial

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica  
Mestrado em Engenharia de Automação Industrial

durante a animação. As redundâncias são deixadas ao arbítrio do aluno, dentro dos limites permitidos pelas juntas, como descrito adiante. Note-se que o robô antropomórfico precisa efetivamente de usar as suas 5 juntas e, portanto, serão todas envolvidas nas diversas cinemáticas, incluindo no cálculo do jacobiano.

## Variantes da simulação e do processo a simular

A metodologia de simulação pode ser feita de duas formas principais:

- 1) Simulação com movimentos sequenciais dos três robôs presentes na célula (SEQ);
- 2) Simulação com movimento simultâneo dos robôs presentes na célula (SYNC) sem colisão de robôs.

A processo geral a levar a cabo na célula pode ter duas tipologias com graus de exigência diferentes. Assim, as duas alternativas possíveis de processos são:

- 1) **Parcial:** A paleta de entrada tem uma única peça colocada na origem da paleta, e portanto apenas essa peça é processada até à sua colocação na paleta de saída. Nesta tipologia, não há preocupações de paletização/despaletização.
- 2) **Integral:** Todas as peças de uma paleta completa são processadas. Será necessário acautelar a despaletização e repaletização sem colisões.

O processo conclui-se quando as peças da paleta de entrada são colocadas na paleta de saída e os robôs regressam à sua posição de repouso. Para que uma simulação seja considerada do tipo SYNC, os três robôs devem estar em movimento simultâneo em pelo menos uma etapa do processo, e isso deve ser visível na simulação.

## Operacionalização do trabalho e estruturas de dados

Para além das funções já desenvolvidas nas aulas, devem ser desenvolvidas novas funções auxiliares e uma função principal por onde a simulação é iniciada. As funções auxiliares devem estar numa pasta designada *lib* para uma mais fácil organização. Entre as funções a criar, recomenda-se uma função *AnimateCell()* que permita a simulação dos diversos elementos presentes na célula, nomeadamente os robôs e as peças quando fixadas nos *end-effectors*. Rumo a uma abordagem de movimentação síncrona dos diversos objetos, e seguindo a filosofia praticada nas aulas, e adotando a mesma nomenclatura, a função *AnimateCell()* aceitaria uma hipermatriz de 5 dimensões (designada por AAAA) que conteria os movimentos dos diversos objetos independentes na célula ao longo dos diversos instantes de tempo; ou seja, as dimensões dessa matriz AAAA teriam o seguinte significado:

AAAA( : , : , : , : , : )	Significado	Dimensão máxima
→	Índice do robô na célula	Número de objetos em movimento
→	Índice do instante de tempo	Número de passos do movimento
→	Índice do elo no robô	Número de elos do robô (ou objeto)
→	Coluna da matriz de transf. geom.	4
→	Linha da matriz de transf. geom.	4

Numa abordagem destas, e uma vez que o tempo é igual para todos os objetos na cena (mesmo número de instantes de simulação), e sempre numa tipologia de movimento síncrono, se por algum motivo for necessário ter um objeto parado enquanto outro se move, basta impor-lhe movimento zero, ou seja, as transformações geométricas a partir desse momento, para esse objeto, não lhe devem alterar as coordenadas.

A definição dos pontos intermédios de passagem dos robôs, durante os movimentos entre a recolha e libertação de peças, fica a cargo do aluno.

Para efeitos de simplificação da gestão dos diversos movimentos e etapas da tarefa global, nomeadamente na variante SYNC da simulação, é admissível que um ou mais robôs possam executar movimentos mesmo antes de ter peça para processar. Embora possa parecer estranho, isto pode eventualmente simplificar a programação.

## Etapas intermédias da operação da célula

Sem prejuízo de outras etapas ou sub-etapas em que o trabalho se possa decompor, é imediato reconhecer as seguintes etapas mais relevantes:



# Robótica Industrial

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica  
Mestrado em Engenharia de Automação Industrial

- 1-O robô SCARA A retira a peça da paleta de entrada e coloca-a no suporte X;
- 2-O robô SCARA A retorna à paleta de entrada para obter nova peça ou à posição de repouso se tiver sido a última peça;
- 3-Robô B avança até à peça colocada em X e marca-a com o seu *end-effector*;
- 4-Robô B recua o seu *end-effector* para libertar a acessibilidade a X para uma uma posição segura de colisões, ou à posição de repouso se tiver sido a última peça;
- 5-O robô SCARA C pega na peça marcada em X e coloca-a na paleta de saída;
- 6-Se não tiver sido a última peça, retomar para a etapa 1;
- 7-Se tiver sido a última peça, os robôs vão para a posição de repouso e termina a tarefa.

Várias das etapas indicadas são paralelizáveis (simulação SYNC), e para se obter um tempo de ciclo o menor possível, os movimentos de robôs, com ou sem peças em nos *end-effectors*, podem ser todos simultâneos.

## Medidas dos robôs

As medidas dos robôs são as indicadas na Fig. 4. As dimensões da ventosa (*end-effector*) são desprezáveis.

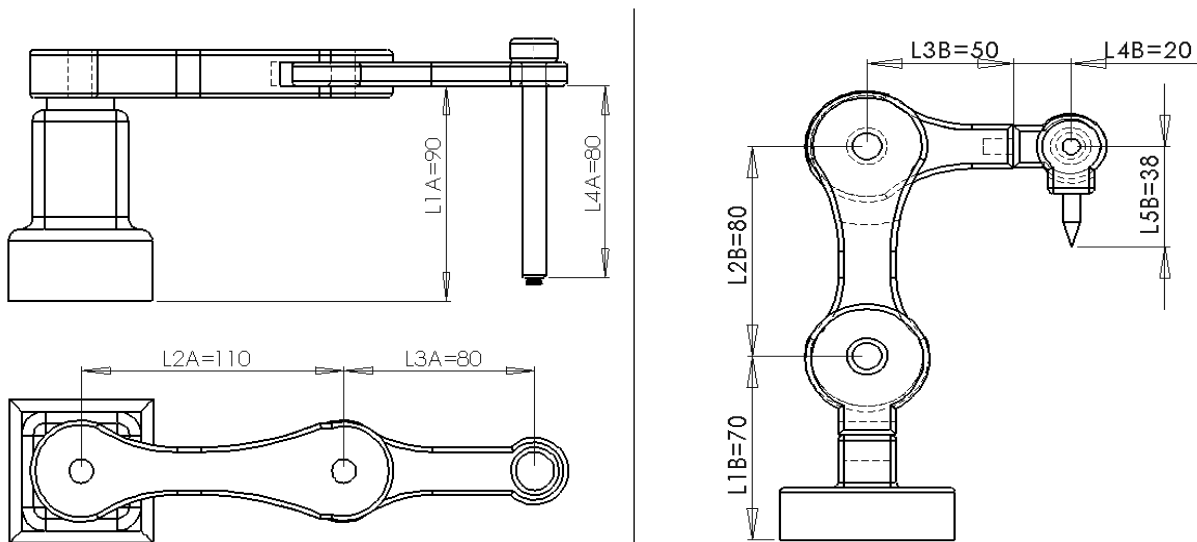


Fig. 4 - Medidas de defeito dos dois robôs: à esquerda o robô A e C (SCARA): a medida L4A representa o valor máximo da junta linear estendida. À direita o robô B (RRR+RR)..

## Limites de juntas

Para efeitos práticos da simulação, admitir que as primeiras juntas de cada robô não têm limites (rodam livremente). Assim, restam as seguintes restrições de natureza mecânica.

Para o robô SCARA, as juntas, medindo em relação à posição ilustrada na Fig. 4, apresentam os seguintes limites:

$$J2 \in [-150; +150], \text{ Eixo linear} \in [0, L4A],$$

Considera-se que o SCARA tem uma junta rotacional na extremidade do eixo linear (J4) e que, para efeitos práticos, também não tem limites (roda livremente).

Para o robô RRR+RR, as juntas, medindo em relação à posição ilustrada na Fig. 4, apresentam os seguintes limites:

$$J2 \in [-120^\circ; +120^\circ], J3 \in [-60^\circ; +240^\circ], J4 \in [-180^\circ; +180^\circ], J5 \in [-180^\circ; +60^\circ]$$

## Medidas e posições na célula

A célula é assim constituída por três robôs, duas paletes e 6 objetos a manipular (também referidos como “peças” ou “componentes”). Na célula, podem ser variáveis as posições relativas indicadas na Fig. 5 onde se indicam valores de defeito para os quais a tarefa tem solução.



# Robótica Industrial

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica  
Mestrado em Engenharia de Automação Industrial

As variáveis do *layout* da célula são as seguintes:

DSP – distância do SCARA à sua respetiva paleta;

DSC – distância entre os SCARAs;

DSS – distância do SCARA ao suporte;

DAS – distância do antropomórfico ao suporte.

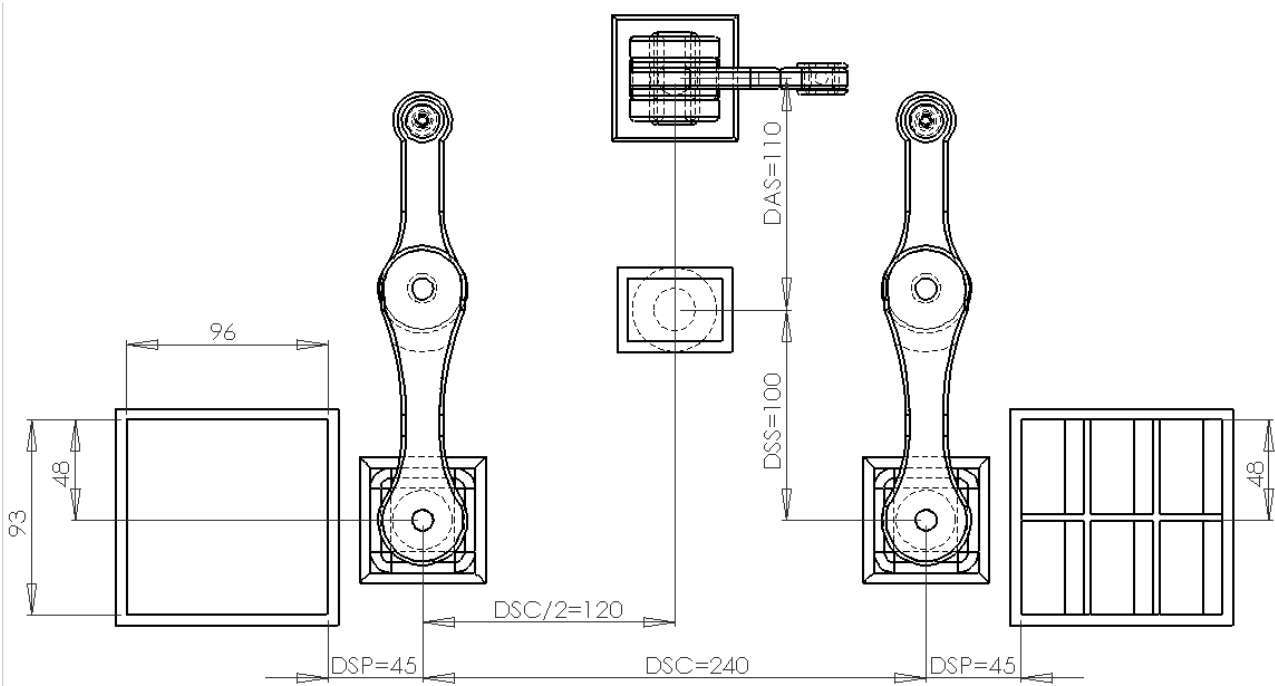


Fig. 5 - Medidas fixas e medidas de defeito de alguns elementos da célula e da sua posição relativa (DSP – distância do SCARA à paleta; DSC – distância entre os SCARAs; DSS – distância do SCARA ao suporte; DAS – distância do antropomórfico ao suporte).

Todas as medidas não expressas traduzem-se em alinhamentos ou simetrias como se depreende das figuras, em especial da Fig. 5.

## Formato do ficheiro “cell\_tp2.csv”

Os valores de defeitos das medidas e posições dos objetos estão indicadas nas figuras anteriores, mas é necessário que a célula possa ser reconfigurável, e para isso os valores indicados poderão variar. Assim, a configuração da célula é obtida do ficheiro “cell\_tp2.csv” que tem os diversos valores arranjados por linhas e com separação por vírgulas, no seguinte formato:

L1A, L2A, L3A, L4A  
L1B, L2B, L3B, L4B, L5B  
HS, L, H, a, b  
DSC, DSP, DSS, DAS

## Resumo dos pontos principais do trabalho a desenvolver

- 1) Estabelecer a cinemática direta dos três robôs (metodologia de Denavit-Hartenberg).
- 2) Implementar as funções para a cinemática inversa dos robôs necessárias para este trabalho.
- 3) Obter as configurações da célula a partir do ficheiro “cell\_tp2.csv”. Se o ficheiro não existir, devem usar-se os valores de defeito indicados no enunciado.
- 4) Representar graficamente a célula na sua configuração inicial. Devem ser visíveis as peças e os manipuladores numa representação pelo menos similar às usadas nas aulas, mas podem obviamente ser enriquecidos, como usar objetos sólidos em vez de simples linhas para representar os elos. Para efeitos de mais fácil perceção da simulação, representações das paletes e do suporte são também recomendadas.



# Robótica Industrial

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica  
Mestrado em Engenharia de Automação Industrial

- 5) Aquando do cálculo da cinemática inversa, deve-se verificar se o ponto de destino está no espaço de trabalho (soluções reais da cinemática) e se os limites das juntas foram ultrapassados. Se houver uma situação de um destino fora do espaço de trabalho ou se algum limite de junta for ultrapassado, a simulação da célula deve terminar com informação ao utilizador de onde ocorreu o problema: em qual dos robôs aconteceu, e qual era o ponto a atingir; esse ponto deve ser assinalado na representação da célula.
- 6) Obter o jacobiano do robô antropomórfico para poder fazer os cálculos da trajetória na superfície da peça a gravar. De igual modo, eventuais situações de singularidade devem ser detetadas e o programa igualmente interrompido.
- 7) Fazer o planeamento da trajetória nas juntas de todos os movimentos restantes dos robôs.
- 8) Calcular antecipadamente todos os movimentos da célula, e gerar gráficos com as seguintes grandezas ao longo de um ciclo completo (uma peça processada):
  - Velocidades de cada junta primária dos SCARA A e C (6 gráficos)
  - Trajetórias da ponta dos SCARA A e C (6 gráficos: [x,y,z] de cada robô)
  - Trajetórias e velocidades das juntas do antropomórfico. (
- 9) Calcular e representar os esforços (momentos/torques desenvolvidos pelos motores) nos atuadores do robô antropomórfico durante o processo completo de uma gravação. Admitir que a força resistente tangencial ao avanço da ponta do robô é constante e igual a 10 N.
- 10) Ainda sem animação, ilustrar na figura da célula os caminhos das pontas dos robôs durante um ciclo (uma peça processada). Esta facilidade deve ser possível de ativar ou desativar pelo utilizador com uma metodologia deixada ao critério do aluno. No trabalho entregue, ela deve vir ativada por defeito.
- 11) Com base nos cálculos efetuados, animar o movimento da célula e gerar um filme demonstrativo da tarefa.

## Material a entregar

- 1) Código matlab. Uma função principal e as **funções auxiliares** necessárias. Ficheiro empacotado.
- 2) Um relatório em PDF (6 páginas max.) a explicar os cálculos e as funções desenvolvidas e os procedimentos principais da abordagem, incluindo eventuais instruções de operação do simulador. Incluir uma capa com o tema e identificação do autor.
- 3) Vídeo colocado on-line no Youtube com a simulação do trabalho, e cujo “link” deve constar no relatório.
- 4) *Opcional*: ficheiro PDF (ou HTML) gerado automaticamente pelo Matlab com base nos comentários devidamente inseridos no código usando a ferramenta “publish” do Matlab.

## Avaliação

Para a avaliação, será considerado o grau de execução de todos os pontos enumerados acima (~80%) bem como o material entregue (~20%). As variantes da simulação e da tipologia do processo usadas correspondem a graus diferentes de complexidade e, conseqüentemente, de níveis diferentes de valorização do trabalho. Para obter uma classificação acima de 18 valores, o trabalho tem de implementar uma simulação do tipo SYNC. Se o aluno optar por simular um processo Parcial em vez de um processo Integral, isso limitará também a nota final em menos um valor.

**PERÍODO PARA ENTREGA:** Dezembro de 2015, conforme indicações no e-learning.