

# ROBLIB

## Um Programa Educacional para a Robótica

Este artigo apresenta um programa educacional sobre robótica que adopta o ambiente Microsoft Windows. O programa *RobLib* é concebido para alunos não graduados e dedica especial atenção aos aspectos fundamentais da modelização e controlo de robôs. O programa usa menus, caixas de diálogo com figuras e menus de ajuda. Nesta perspectiva, os estudantes podem investigar aspectos tais como a cinemática, a dinâmica, o planeamento de trajectórias e o controlo de posição e de força dos manipuladores. A partir desta primeira experiência, o utilizador é motivado para desenvolver outros estudos na área da robótica envolvendo conceitos e programas mais sofisticados.

J. A. Tenreiro Machado\*  
N. M. Fonseca Ferreira\*\*

### 1. Introdução

Nas últimas duas décadas a robótica tornou-se numa área comum em cursos de engenharia tais como electrotécnica, computadores, controlo e mecânica. O progresso na pesquisa científica e o desenvolvimentos de aplicações industriais, conduziram ao aparecimento de currícula educacionais em Robótica, abrangendo um vasto leque de aspectos nomeadamente, a cinemática, dinâmica, controlo, programa-

ção, sensores, inteligência artificial, simulação e concepção mecânica. No entanto, cursos de robótica requerem laboratórios com equipamento sofisticado, o que envolve custos elevados, seja para a sua aquisição seja para a sua manutenção. Um sistema educacional baseado em computadores é uma alternativa bem estabelecida e que ultrapassa alguns dos problemas referidos. Nesta linha de pensamento, universidades e empresas [1-7] desenvolveram programas de simulação de robôs. Contudo, muitas vezes os programas de computador enfatizam capacidades tais como a simulação gráfica e a programação, dando pouca importância aos aspectos matemáticos da modelação e do controlo [12-13]. Para colmatar esta lacuna alguns investigadores propuseram a adopção de programas simbólicos [8-11] de modo a ilustrar a cinemática e a dinâmica de robôs. No entanto, estudantes não graduados, e com pouca experiência, podem sentir dificuldades em desenvolver o seu estudo, antes de ultrapassarem aspectos relacionados com os procedimentos e os comandos dos programas de tratamento simbólico. Esta situação motivou o desenvolvimento de um programa dando uma ênfase especial aos fundamentos da mecânica e controlo de robôs. Dada a popularidade da Microsoft Windows decidiu-se implementar o programa neste ambiente, usando a linguagem Borland Delphi. O projecto conduziu ao programa *RobLib* que foi adoptado como uma ferramenta educacional num primeiro curso de robótica. Este trabalho introduz o programa e faz a discussão dos correspondentes aspectos educacionais. O artigo está organizado em cinco secções. A secção dois apresenta uma panorâmica geral do programa e descreve as suas principais características e comandos. A secção três explora uma sessão típica de trabalho

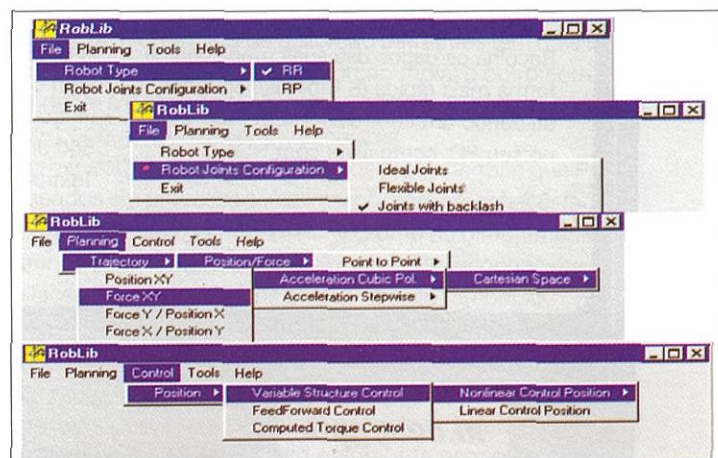


Figura 1 Selecções disponíveis no menu principal.

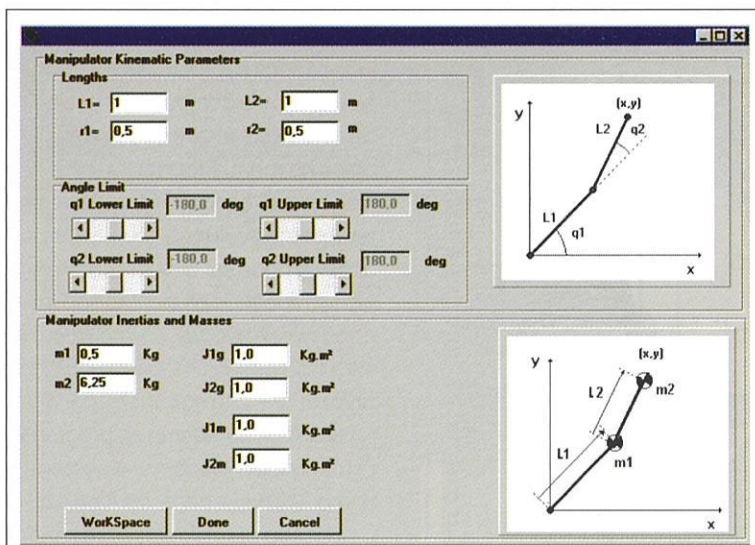


Figura 2 Configuração da estrutura de um robô

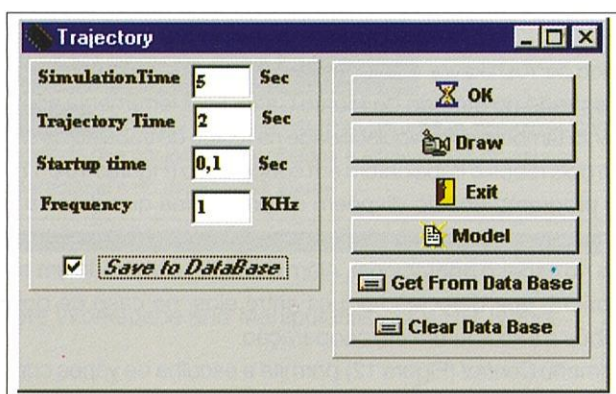


Figura 3 Definição da trajectória do robô

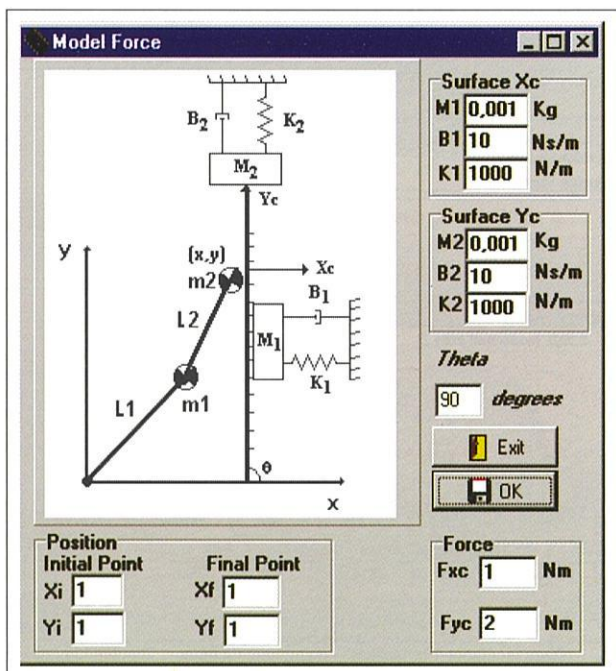


Figura 4 Definição da trajectória do robô e o contacto de superfície

## 2. Visão geral do programa

O programa educacional *RobLib* foi concebido de modo a aproveitar as potencialidades do ambiente Windows. Todos os comandos e parâmetros requeridos são introduzidos através de menus e caixas de diálogo. O programa pretende ser auto-explanatório para encorajar uma exploração, pelos estudantes. Assim, estão disponíveis, menus de ajuda nas diferentes janelas e muitas das caixas de diálogo incluem figuras para clarificar definições que dependem do contexto. As experiências são restritas a manipuladores planares, isto é, a robôs com dois graus de liberdade. Esta estratégia para além de diminuir o peso da simulação gráfica permite dar uma certa importância aos aspectos matemáticos da modelização e controlo, mantendo o programa num nível

de baixa complexidade. Além disso, o *RobLib* torna exequível o uso de PCs comuns devido aos baixos requisitos computacionais. Por outro lado, os ficheiros de dados numéricos e os ficheiros de dados gráficos têm formatos compatíveis com outras aplicações do ambiente Windows, permitindo assim o intercâmbio de dados e o cálculo de dados externos.

Como é habitual a barra do topo inclui as opções: *File, Planning, Tools, Control* e *Help*. A Figura 1 mostra as seleções disponíveis em cada menu. Estes comandos e as acções relacionadas são analisadas na secção seguinte.

## 3. Uma sessão típica de trabalho

Para demonstrar as capacidades do programa, apresenta-se de seguida uma sessão típica de trabalho.

A sessão começa com a definição do tipo de robô ou seja com a selecção das estruturas planares RP e RR (eixos R-Rotacional; P- Prismático) e os fenómenos dinâmicos das juntas do robô, nomeadamente flexibilidade, folga, saturação do motor, atrito não-linear e quantificação de sinal. Depois de se seleccionar o tipo e os fenómenos dinâmicos nas juntas do robô, o *RobLib* apresenta uma caixa de diálogo (Figura 2) para introduzir os parâmetros numéricos, nomeadamente os limites das juntas, os comprimentos e massas dos elos e as inércias dos actuadores. Posteriormente, estes parâmetros numéricos podem ser visualizados e armazenados.

A segunda fase da sessão consiste na definição da trajectória do robô. A opção *Trajectory* permite definir a linha recta baseada na definição dos pontos inicial e final. Este planeamento pode ser feito quer no espaço operacional quer no espaço das juntas e requer a definição de parâmetros, tais como o tempo da simulação e da trajectória, os pontos iniciais e a frequência de amostragem (Figura 3)

O planeamento das trajectórias pode envolver as variáveis posição e força pelo que se consideram dois casos na opção *Planning*. Quando se pretende planejar a força pode-se configurar o ambiente nos dois eixos através do botão *Model* (Figura 4). O ambiente é modelizado através de um sistema linear de segunda ordem com uma mola, uma massa e um

com o *RobLib*. A secção quatro discute futuros desenvolvimentos de programas e, por último, a secção cinco apresenta as principais conclusões.

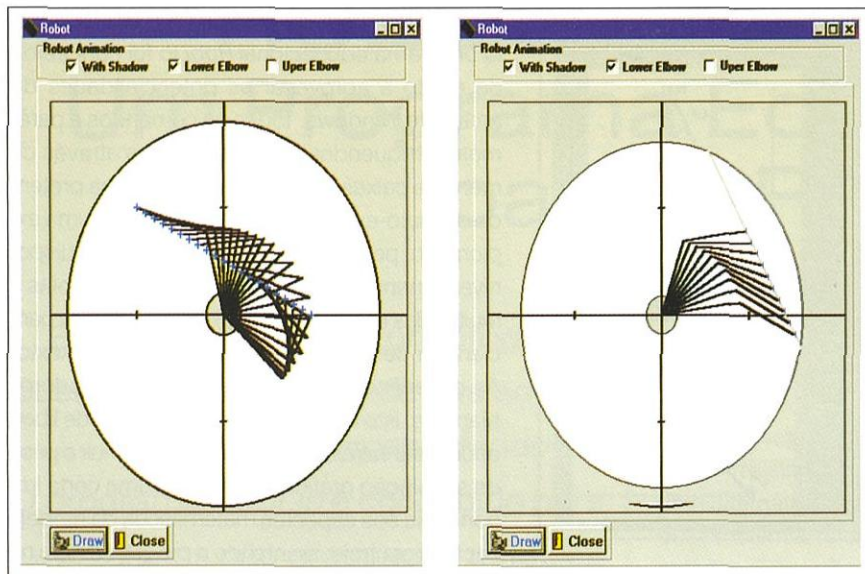


Figura 5 Animação do robô nos espaços: operacional e das juntas.

amortecimento. Assim, o modelo da superfície, nas direcções dos eixos  $x_c$  e  $y_c$  é caracterizado pelas constantes  $M_i$ ,  $B_i$  e  $K_i$  ( $i=1,2$ ), enquanto que a variável  $\theta$  permite a definição da sua inclinação. Está também contemplada a possibilidade de executar o movimento animado do robô (Figura 5) bem como a de guardar a trajectória numa base de dados integrada (Figura 6). A base de dados incluída no simulador *RobLib* permite procurar simulações anteriores. Desta maneira, o utilizador pode comparar experiências, nomeadamente para diversos controladores e para vários fenómenos dinâmicos.

O *RobLib* permite ver todas as variáveis das trajectórias. Estes gráficos apresentam a evolução temporal nas variáveis, tanto no espaço operacional como no espaço das juntas (Figura 7).

O botão *Print* imprime a janela que está activa e o botão *Save* guarda em ficheiros no formato BMP. Os botões *Zoom in* e *Zoom out* permitem maximizar e minimizar o tamanho do gráfico, para além da possibilidade de se fazer *zooming* a uma área específica do gráfico.

Depois de definir uma trajectória é activada a opção de *Control*, possibilitando ao estudante a simulação de diversos controladores, tanto no espa-

ço cartesiano como no espaço das juntas. Após cada simulação podem-se observar e comparar as evoluções das variáveis através da opção *Graphics* no menu *Tools* (Figura 7).

No primeiro caso a amplitude versus tempo da evolução das forças ou binários pode ser definida como uma função linear cujos pontos são inseridos ou apagados com o rato. No segundo caso os dados numéricos podem ser carregados a partir de uma aplicação externa ao programa. O menu *Tools* dispõe de opções tais como *Workspace* e *Manipulability* permitindo a análise das propriedades do robô (Figura 8). Na Figura 9 está apresentada a manipulabilidade de um robô através do método analítico de Yoshikawa e alternativamente um método numérico inspirado no método de Monte Carlo. Esta ferramenta apresenta também a manipulabilidade na região de trabalho de um ou dois robôs a trabalharem em cooperação (Figuras 10 e 11).

O programa *RobLib* dispõe de uma rotina que detecta a passagem por singularidades quando a trajectória é planeada no espaço operacional. Além disso, foi elaborado um algoritmo que detecta choques entre elos, no caso de dois robôs a trabalharem em cooperação.

O menu *Control* (Figura 12) permite a escolha de vários controladores. Neste caso, o utilizador pode investigar os efeitos

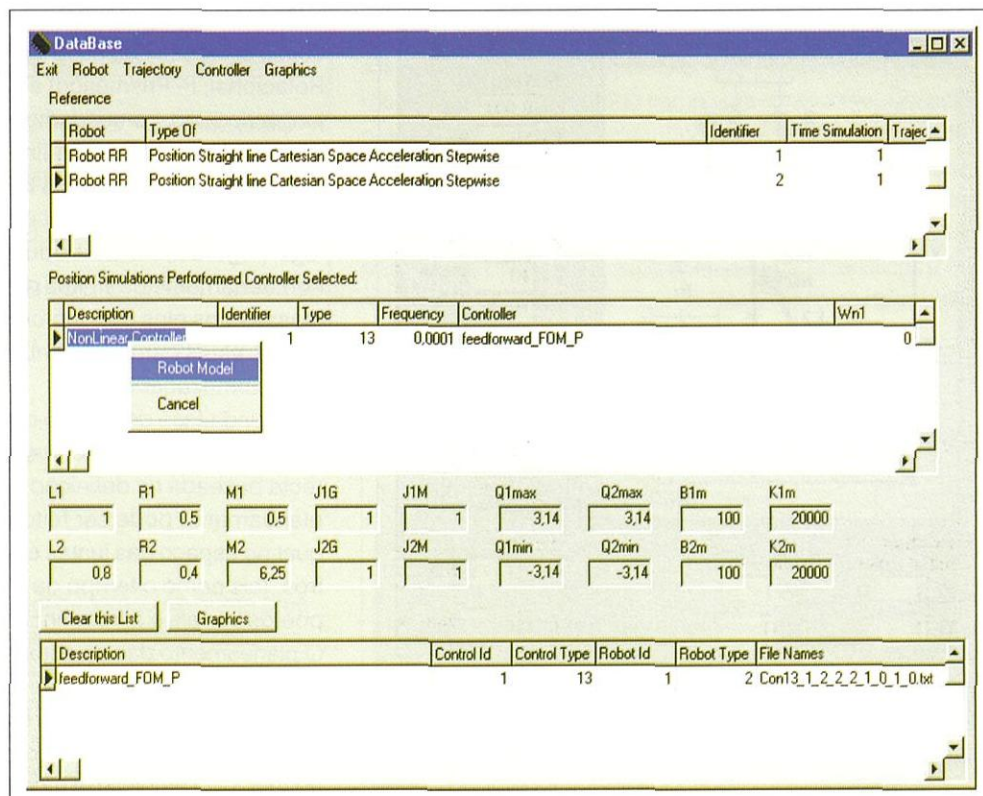


Figura 6 A base de dados integrada no *RobLib*.

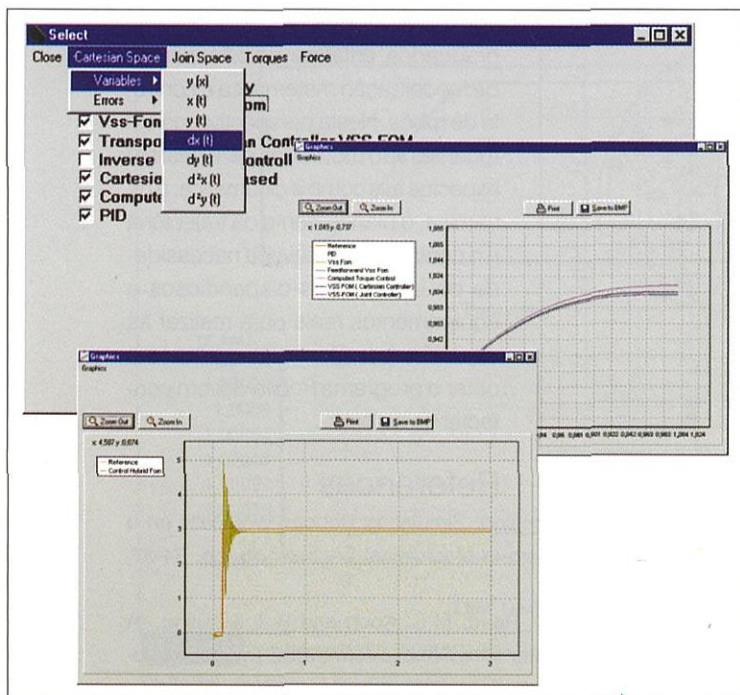


Figura 7 Usando a selecção Graphics para visualizar a evolução temporal das posições, velocidades e acelerações no espaço operacional e no espaço das juntas.

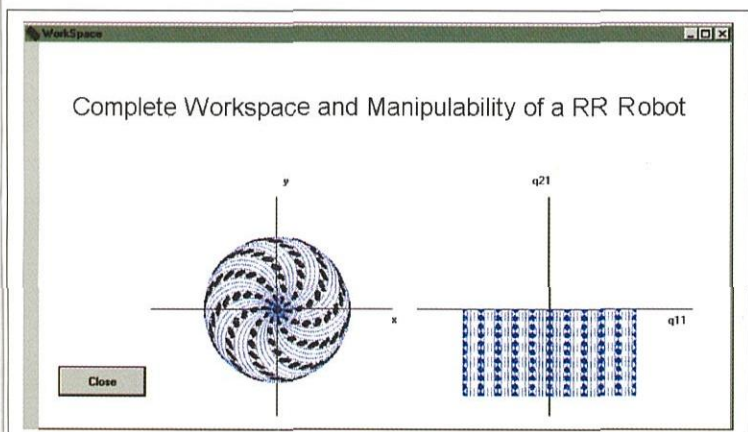


Figura 8 As ferramentas integradas no Roblib para analisar o Espaço de Trabalho e a Manipulabilidade.

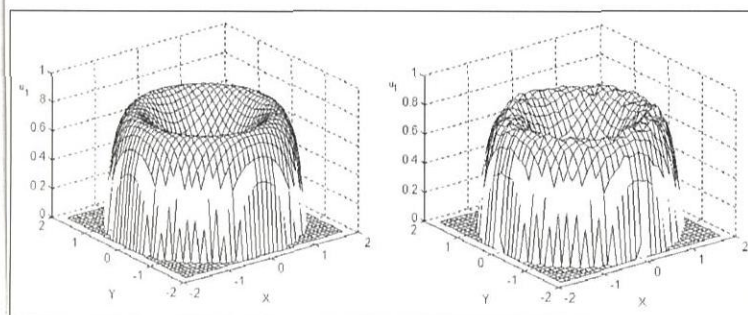


Figura 9 Manipulabilidade  $\mu$  de um robô RR com  $I_1 = l$  e  $I_2 = 0.8$  obtida por: a) método analítico, b) algoritmo numérico para uma amostragem de  $n = 1000$  pontos.

de uma frequência de amostragem finita, de um determinado ajuste dos ganhos e de uma modelização imperfeita. Assim, o estudante pode experimentar e comparar o desempenho dos

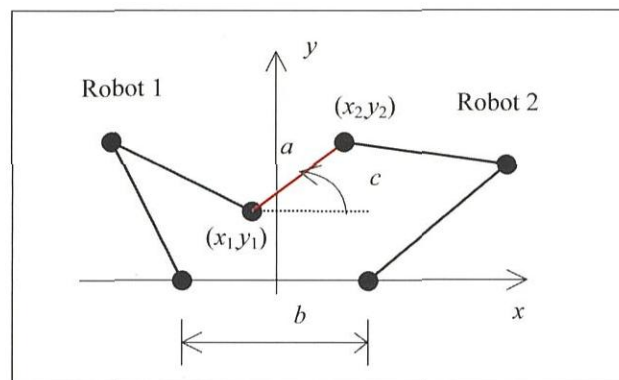


Figura 10 Dois robôs RR em cooperação manipulando um objecto com um comprimento a e orientação c.

diferentes algoritmos de controlo bem como os diversos fenómenos dinâmicos existentes nas juntas dos robôs, tais como a flexibilidade, o atrito e a saturação dos actuadores. Por exemplo, a Figura 13 mostra a posição da mão de um robô RR ideal usando o controlador de estrutura variável de segunda ordem com  $\omega_n = 100 \text{ rads}^{-1}$ ,  $\zeta = 1$  e uma frequência de amostragem de  $f_c = 10 \text{ kHz}$ . Num outro exemplo, analisa-se o controlo de posição e o controlo de força de um robô com flexibilidade nas juntas. Considera-se uma força de  $F = 3 \text{ N}$  ao longo do eixo  $x_c$ , para uma superfície com  $\theta = 90^\circ$ , enquanto está a controlar a posição ao longo do eixo  $y_c$ . A restrição de contacto foi modelizada por um sistema mola-massa-amortecedor com os parâmetros  $M_i = 0,001 \text{ kg}$ ,  $B_i = 1 \text{ Nsm}^{-1}$  e  $K_i = 100 \text{ Nm}^{-1}$ . Em qualquer momento, durante a sessão de trabalho, os utilizadores dispõem de uma ajuda em cada janela. No entanto, o RobLib tem também um menu Help, onde podem ser encontradas ajudas adicionais. Além disso, a opção Tutorial permite o estudo das principais fórmulas e das definições adoptadas no programa.

#### 4. Futuros desenvolvimentos do Roblib

Está planeado incluir vários novos elementos no RobLib. Assim, na definição do robô, a selecção de estruturas adicionais, tais como estruturas em paralelogramo e estruturas com contrapesos permitirão, o estudo de esquemas de compensação conduzindo a uma nova dinâmica [14]. Esta versão do RobLib inclui algoritmos de força e controlo pelo que está a ser implementado um controlador de impedância.

O RobLib terá disponível na opção Tools uma entrada para a análise de diferentes métodos de cálculo da dinâmica inversa [13] o que permitirá ao estudante investigar vários métodos, tais como Lagrange-Euler, Newton-Euler e fórmulas simbólicas. A análise da carga computacional dos diferentes algoritmos motivará os estudantes para os aspectos de optimização do programa para aplicações em tempo real. A inclusão de robôs redundantes e hiper-redundantes, tais como as estruturas planares RRR e RRRR está também em vias de desenvolvimento, incluindo o planeamento de trajectórias através da matriz pseudo-inversa do jacobiano [16]. Um outro aspecto educacional importante, consiste na introdução do programa RobLib. Nesta linha de ideias um vídeo AVI para a Internet

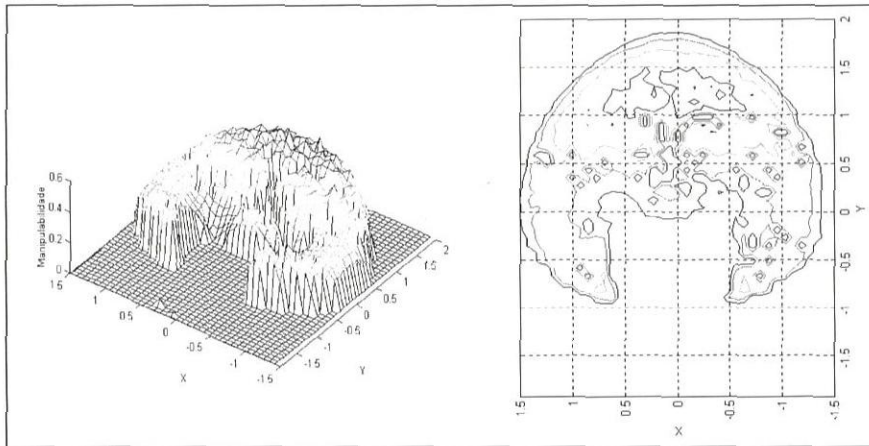


Figura 11 Manipulabilidade  $\mu$  para o comprimento do objecto  $a = 1$  e  $b = 0,0$  com  $m = 1000$ ,  $n = 1000$ ,  $\rho = 0,1$  rad, Robot 1 = Robot 2:  $\{l_1 = l_2 = 1m\}$

num nível introdutório por alunos não graduados, enfatizando os aspectos de modelização matemática e controlo de robôs. Nesta perspectiva, os estudantes são motivados para analisar aspectos tais como a cinemática, a dinâmica, o planeamento da trajectória e o controlo, sem haver a necessidade de laboratórios dispendiosos e equipamentos reais para realizar as experiências. Os interessados em obter o programa *Roblib* devem contactar os autores.

## References

- [1] S. Derby, "In Position: Simulating Robotic Workcells on a Micro", Computers in Mechanical Engineering, pp. 34-37, Sept. 1986.
- [2] R.B. White, R.K. Read, M.C. Koch and R.J. Schilling, "A Graphics Simulator for a Robotic Arm", IEEE Trans. on Education, vol. 32, no. 4, pp. 417-429, Nov. 1989.
- [3] T. Raz, "Graphics Robot Simulator for Teaching Introductory Robotics", IEEE Trans. on Education, vol. 32, no. 2, pp. 153-159, May 1989.
- [4] R.E. Parkin, "An Interactive Robotic Simulation Package", Simulation, vol. 56, no. 5, pp. 337-345, May 1991.
- [5] A.M. Eydgahi and J.J. Sheehan, "A Computer Animation of Robotic Manipulators and Workcells", IEEE Control Systems, vol. 11, n. 4, pp. 56-59, June 1991.

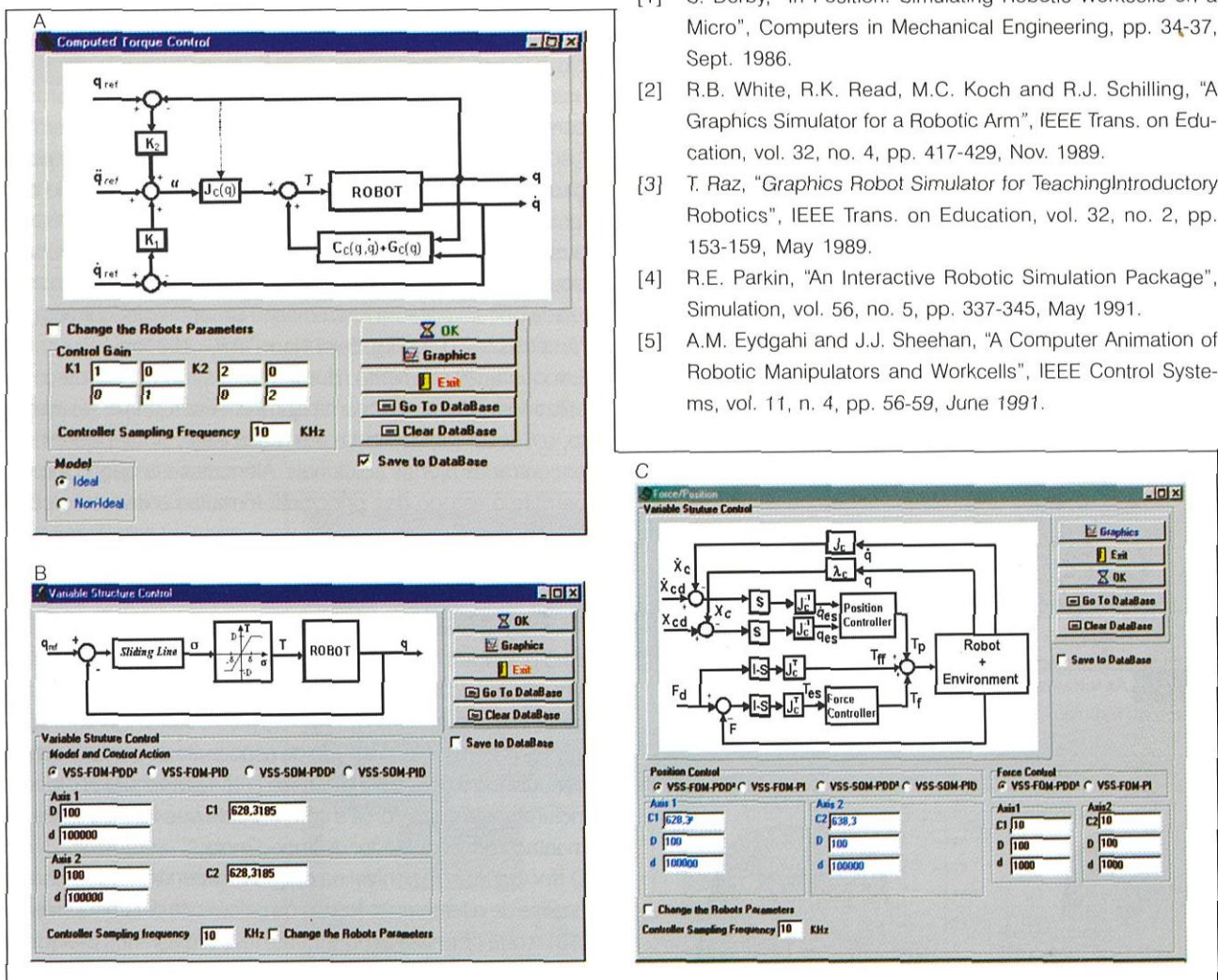


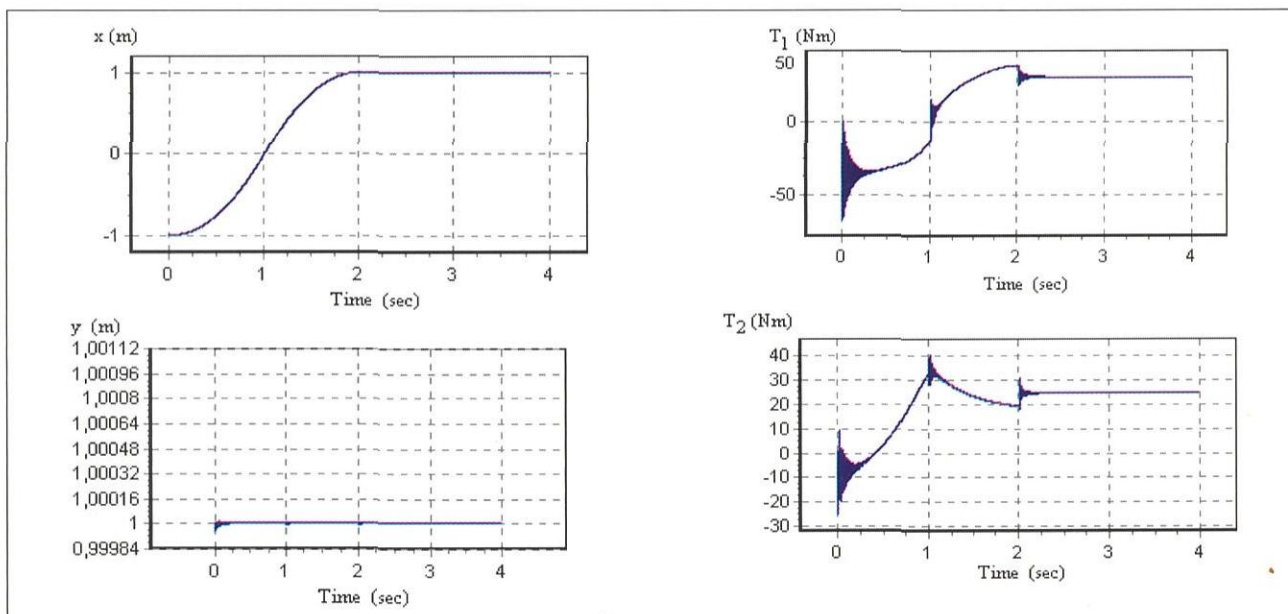
Figura 12 Controladores a) Algoritmo do binário calculado, b) Algoritmo de estrutura variável, c) Controlador híbrido.

foi preparado para uso do professor e um manual de exercícios para o *RobLib* está presentemente a ser desenvolvido.

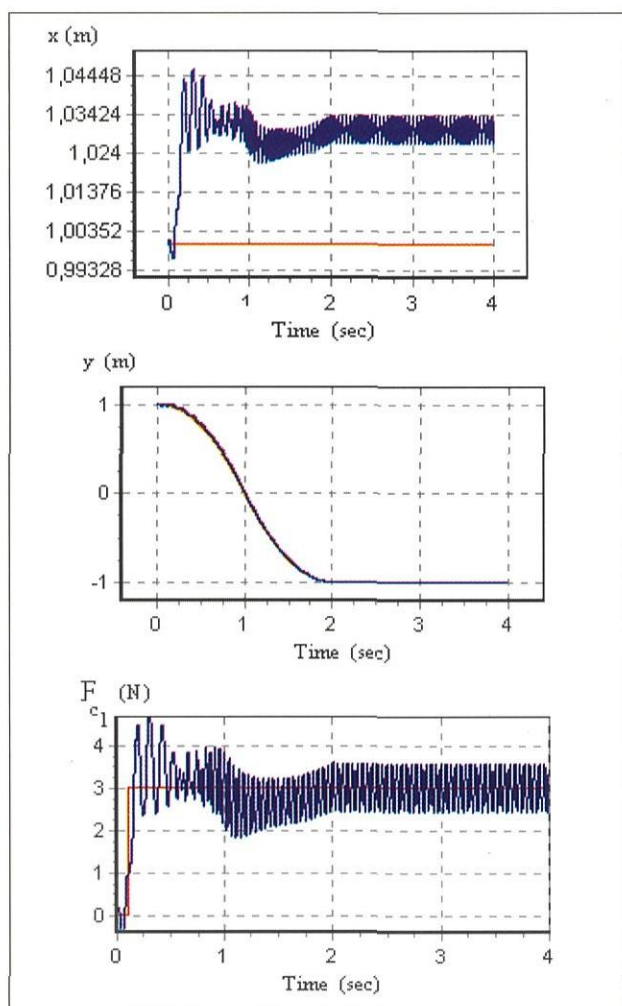
## 5. Conclusões

Neste artigo foi apresentado um programa educacional sobre robótica. O *RobLib* é um programa que adopta o ambiente Microsoft Windows e que está vocacionado para ser usado

- [6] WorkSpace User-Manual, Robot Simulations, Newcastle-Upon-Tyne, England, 1997.
- [7] SYMORO: Software Package of SYmbolic MOdelling of RObots, Rapid Data Ltd, 1990.
- [8] J. Lloyd and V. Hayward, "Kinematics of Common Industrial Robots", Robotics and Autonomous Systems, vol. 4, no. 2, pp. 169-191, 1988.



**Figura 13** As posições e binários do robô RR para o algoritmo de estrutura variável, com  $\omega_n = 100 \text{ rads}^{-1}$ ,  $\zeta = 1$  e uma frequência de amostragem de  $f_c = 10\text{kHz}$ .



**Figura 14** Controlo das posições a força, para um robô com flexibilidade nas juntas usando o algoritmo do Controlador Híbrido com  $\omega_n = 100 \text{ rads}^{-1}$ ,  $\zeta = 1$  e uma frequência de amostragem de  $f_c = 10\text{kHz}$ .

[9] M.C. Leu and Y.S. Wang, "Studying Robot Kinematics and Dynamics with the Aid of MATHEMATICA", *Int. J. of Mechanical Engineering Education*, vol. 19, n. 3, pp. 213-228, 1990.

[10] N. Vira and E. Tunstel, "Use of Symbolic Computation in Robotics Education", *IEEE Trans. on Education*, vol. 35, no. 1, pp. 18-30, Feb. 1992.

[11] J.F. Nethery and M.W. Spong, "Robotica: A Mathematica Package for Robot Analysis", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 13-20, March 1994.

[12] J.A. Tenreiro Machado, J.L. Martins de Carvalho and Alexandra M. Galhano, "Analysis of Robot Dynamics and Compensation Using Classical and Computed Torque Techniques", *IEEE Trans. on Education*, vol. 36, no. 4, pp. 372-379, Nov. 1993.

[13] J.A. Tenreiro Machado and Alexandra M. Galhano, "Benchmarking Computer Systems for Robot Control", *IEEE Trans. on Education*, vol. 38, no. 3, pp. 205-210, Aug. 1995.

[14] J.A. Tenreiro Machado and Alexandra M. Galhano, "Win-Rob: A Educational Program for Robotics", *Int. Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 34, no. 1, pp. 37-47, Jan. 1997.

[15] S.M. Megahed, "Principles of Robot Modelling and Simulation", John Wiley and Sons, 1993.

[16] F. Duarte and J. A. Tenreiro Machado, "chaos Dynamics in the Trajectory Control of Redundant Manipulators", 2000 *IEEE Int. Cont. on Robotics and Automation S. Francisco, USA, Abril 2000*.

\*Inst. Superior de Engenharia do Porto - Dep. de Eng. Electrotécnica  
Rua Dr António Bernardino de Almeida 4200-072 Porto Codex, Portugal  
Tel.: (351) 22 8340500, Fax: (351) 22 8321159, E-mail: jtm@dee.isep.ipp.pt

\*\*Inst. Superior de Engenharia de Coimbra - Dep. de Eng. Electrotécnica  
Quinta da Nora, Apartado-10057 3031-601 Coimbra Codex, Portugal  
Tel.: (351) 39 790200, Fax: (351) 39 790270, E-mail: nunomig@isec.pt