

Um Robô Manipulador de Baixo Custo para a Educação

José Alberto Naves Cocota Júnior, Hideo Silva Fujita e Itamar Jorge da Silva
Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia
Universidade Paulista (UNIP)
Brasília, Brasil

Resumo—Nos últimos anos, o ensino de robótica industrial associado à prática tornou-se uma metodologia indispensável na condução dessa disciplina. Entretanto, a maioria dos robôs aplicáveis no ensino em nível de graduação, ou de pós-graduação, é muito cara ou possui uma arquitetura fechada de *hardware* e *software*. Isso restringe a exploração do conteúdo pelos alunos para compreensão das matérias relacionadas à robótica. Neste artigo, descreve-se uma experiência de ensino de robótica, que envolve o projeto e desenvolvimento de um robô manipulador com quatro graus de liberdade. Além disso, são apresentadas as atividades efetuadas pelos alunos durante a execução do trabalho. O robô desenvolvido pode ser uma plataforma ideal para pesquisa e ensino de robótica.

Palavras-chave—robô manipulador fixo, educação, cinemática, planejamento de trajetória.

I. INTRODUÇÃO

Em geral, os professores que ministram, pela primeira vez, a disciplina de robótica industrial ficam pensando em como motivar os alunos ao longo do curso. Robótica é um campo relativamente novo da tecnologia moderna que cruza as fronteiras tradicionais de engenharia. Compreender a complexidade dos robôs e sua aplicação requer conhecimento em engenharia elétrica, engenharia mecânica, engenharia industrial e de sistemas, ciência da computação, economia e matemática [1]. Devido à natureza multidisciplinar desse campo, o ensino de robótica é mais efetivo quando conceitos teóricos são associados a experimentos tangíveis. Fazer essa associação tornar-se efetiva requer uma maneira pragmática de aplicação do material tradicional de robótica em trabalhos de laboratórios motivadores [2].

O uso de robôs como plataformas experimentais nas universidades e nos institutos de pesquisa tem se tornado cada vez mais comum. Entretanto, a maioria dos sistemas disponíveis é destinada à robótica móvel e há poucas empresas que desenvolvem robôs manipuladores para cursos de robótica industrial. A Quanser possui em seu catálogo um robô de dois graus de liberdade (GDL) e o robô Hexapod, que são manipuladores em cadeia cinemática fechada [3]. Para criar um robô manipulador em uma cadeia cinemática aberta, com um controlador de arquitetura aberta, foi sugerido o uso do modelo de robô CRS CataLyst-5 da Thermo Fisher Scientific Inc. com uma placa de controle da Quanser [2]. Mas os sistemas da Quanser são caros para as universidades dos países em desenvolvimento. Para superar esse problema foi proposto o uso do LEGO®

MINDSTORMS® devido ao seu custo acessível, permitindo aos alunos adquirir experiência no projeto cinemático de robôs manipuladores fixos [4]. Embora tenha sido um esforço no sentido de ampliar o acesso a experiências práticas de robótica, o kit de robótica produzido pela LEGO® não é adequado para o ensino e pesquisa na universidade, devido às suas limitações de *hardware*. Mais recentemente, um robô modular de baixo custo para a pesquisa e educação de sistemas de controle, de mecatrônica e robótica foi introduzido em [5]. Há uma variedade de linhas de pesquisa para robótica, incluindo sistemas para cooperação de robôs manipuladores e sistemas de controle avançado. O desenvolvimento de um sistema com arquitetura aberta para executar tarefas de cooperação entre vários robôs foi apresentado em [6]. Na mesma linha de pesquisa, o conceito de projeto, para o desenvolvimento de um robô manipulador industrial, para uma fácil e segura cooperação humano-robô, usando um atuador inteligente com sensor de torque para cada junta, foi introduzido em [7]. Na área de controle há, e.g., o sistema de controle híbrido de posição e força proposto em [8]. Os resultados experimentais com um sistema robótico servovisual, usando uma câmera fixa, mas não-calibrada, com um controle por modo deslizante foram citados em [9]. Uma linha de pesquisa que tem ganhado força nesses últimos anos é o desenvolvimento de um robô manipulador com uma plataforma móvel, seja para uso doméstico ou industrial. Referência [10] propôs um sistema de robô manipulador móvel com 6 GDL, que representa uma estrutura similar ao do braço humano para ser usado em casa. A empresa KUKA desenvolveu uma plataforma aberta de um manipulador móvel, KUKAyouBot, com o objetivo de preencher a lacuna entre a pesquisa em manipuladores, o desenvolvimento de aplicação em manufatura e o ensino de robótica móvel [11].

Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de um manipulador em série (i.e., os elos são dispostos em uma cadeia cinemática aberta) com 4 GDL e uma garra de dois dedos. Ao desafiar os alunos de graduação com uma proposta de trabalho que envolva o projeto e a construção de um robô manipulador de baixo custo, deseja-se motivar os estudantes de Engenharia de Controle e Automação. Quando a disciplina de robótica industrial é conduzida com essa metodologia, os alunos se sentem como donos do projeto, adquirem maior responsabilidade e se sentem comprometidos a alcançar o objetivo. Entretanto, para que o sucesso na execução desse trabalho seja alcançado em um semestre letivo, é importante

que os requisitos do projeto mecânico e da eletrônica sejam os mais simples possíveis. Isso possibilita que os alunos adquiram experiência com o projeto mecânico dos elementos do robô, com desenvolvimento da eletrônica para o acionamento dos motores e para a aquisição dos sinais dos sensores de deslocamento angular, no desenvolvimento de um protocolo de comunicação dos dispositivos, na programação de microcontroladores e da interface com o usuário em MATLAB®. Além disso, permite explorar os conteúdos da disciplina de robótica industrial, e.g., o estudo das forças envolvidas; a determinação da cinemática (direta e inversa) e do espaço de trabalho do robô; e o planejamento de trajetória pelo método de aprendizagem por movimento ponto-a-ponto.

II. FILOSOFIA DE TRABALHO

As atividades relacionadas ao projeto e à construção do robô foram realizadas por quatro grupos de alunos e envolveram dois encontros para a apresentação de seus trabalhos. É importante destacar que a escolha dos materiais, dos componentes e da linguagem de programação foi de responsabilidade dos alunos, dando a eles maior liberdade. Apenas as metas a serem alcançadas pelos grupos foram definidas e, eventualmente, algumas sugestões para solucionar os problemas que surgiam durante a execução do projeto. Essa filosofia foi denominada de “sem regras, apenas metas”, o que estimulou a criatividade dos alunos e o espírito de equipe, e.g., liderança, a execução das atividades, o cumprimento das metas e dos prazos. Tais atividades os preparariam melhor para enfrentar os desafios no futuro, na condição de profissionais.

A. Grupos

As atividades de cada grupo requeriam um certo grau de interação com os demais grupos. O grupo 1 ficou responsável pelo projeto e construção do braço do robô com 3 GDL, bem como pelo desenvolvimento do *hardware* para o acionamento das juntas do braço. O grupo 2 desenvolveu o *hardware* para medir a rotação dos eixos das quatro juntas do robô e do ângulo de abertura da garra, e a programação da interface gráfica do usuário para a cinemática direta e inversa do robô. O terceiro grupo ficou responsável pelo projeto e construção do punho com 1 GDL, relativo ao movimento de rolamento (*roll*), e da garra de dois dedos, e pelo desenvolvimento do *hardware* para o acionamento dos motores do punho e da garra. O grupo 4 ficou responsável pela documentação do projeto, determinação do espaço de trabalho e simulação da cinemática direta e inversa usando o Toolbox de Robótica para o MATLAB® [12].

B. Apresentações

A primeira apresentação foi realizada no meio do semestre e tinha como finalidade verificar o acionamento dos atuadores das juntas do manipulador e da garra, medir a rotação dos eixos das juntas e do ângulo de abertura da garra, bem como apresentar a implementação da solução por trigonometria do problema de cinemática direta de posição para os diferentes valores dos ângulos das juntas que movimentam o braço e o

antebraço do manipulador no espaço, executando movimentos planares no plano cartesiano com as demais juntas fixas, como no exemplo do robô planar de dois elos em [1].

A segunda apresentação foi realizada no final do semestre e marca a consolidação do trabalho. Os alunos necessitavam apresentar a cinemática direta de posição de acordo com a convenção de Denavit-Hartenberg (DH) *standard*, a cinemática inversa de posição por aproximação geométrica, as singularidades, o controle de trajetória por ponto-a-ponto, e o desenho do espaço de trabalho conforme o algoritmo apresentado em [13].

III. PROJETO

Os conceitos relacionados ao projeto e sua execução são apresentados a seguir.

A. Componentes e Estrutura do Robô

Em relação ao projeto mecânico do robô, foi especificado que apresentasse uma estrutura em cinemática aberta com 4 GDL, possuindo a configuração de um manipulador articulado (i.e., antropomórfico) em que as três primeiras juntas fossem de geometria do tipo RRR (seqüência começando da junta mais próxima à base), onde R denota uma junta de rotação, responsáveis pelo posicionamento da garra. O último grau de liberdade é responsável pelo movimento de rolamento do punho para a orientação da garra do robô. Um modelo em CAD da estrutura do manipulador é apresentado na Fig. 1.

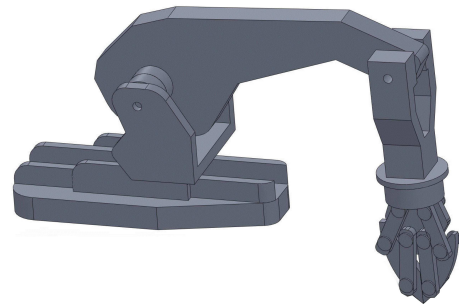


Figura 1. Um modelo em CAD do manipulador.

A garra foi feita com acrílico e os elos que compõem a estrutura do manipulador foram confeccionados com uma placa do tipo sanduíche, com a parte interna preenchida com poliestireno expandido (EPS) de densidade nominal de $18 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, faceado com PVC expandido com espessura de 2 [mm] . Foram utilizados dois modelos de servomotores que são comumente empregados em aeromodelos. O servomotor TowerPro MG995 foi utilizado para o acionamento das duas primeiras juntas do manipulador, para a rotação do corpo e para o movimento do elo do braço. Esse servomotor possui engrenagens metálicas, pesa 55 [g] e pode apresentar um torque superior a $9.8 \times 10^{-1} \text{ [N.m]}$. Para o movimento do antebraço, o giro do punho e o acionamento da garra foram utilizados três servomotores TG9e com um torque de $1.47 \times 10^{-1} \text{ [N.m]}$, pesando apenas 9 [g] cada um, o que auxilia na distribuição do peso na estrutura do robô.

B. Cinemática Direta

O objetivo da análise da cinemática direta é determinar o efeito acumulativo do conjunto das variáveis das juntas, i.e., determinar a posição e orientação do efetuador final (nesse caso a garra) dadas as variáveis de junta (ângulos entre os elos). É possível realizar essa análise fixando um sistema de coordenadas em cada elo. Para fazer isso de forma sistemática, a versão *standard* da convenção de DH foi utilizada. Dada a geometria do robô (ver a Fig. 2), os parâmetros de DH foram encontrados, e consistem em um conjunto de quatro quantidades, que descrevem a posição e orientação de um sistema de coordenadas de um elo em relação ao sistema de coordenadas do elo precedente ao longo da cadeia cinemática. Os parâmetros de Denavit-Hartenberg estão especificados na Tabela I.

Em relação aos sistemas de coordenadas, que foram definidos de acordo com a convenção DH, o parâmetro a_i é a distância entre os eixos z_{i-1} e z_i e é medido ao longo do eixo x_i (normal comum). O ângulo α_i é o ângulo entre os eixos z_{i-1} e z_i , medido ao redor do eixo x_i . O parâmetro d_i é a distância entre o sistema de coordenadas O_{i-1} e a interseção do eixo x_i com z_{i-1} medido ao longo do eixo z_{i-1} . Para a junta prismática, d_i é a variável da junta i . Finalmente, θ_i é o ângulo entre os eixos x_{i-1} e x_i medido ao redor do eixo z_{i-1} . Para a junta de revolução, θ_i é a variável da junta i .

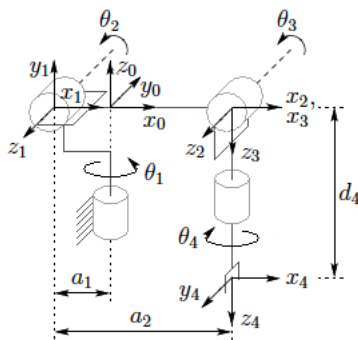


Figura 2. Representação do sistema de coordenadas do robô pela convenção de Denavit-Hartenberg.

Tabela I
PARÂMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG

Elo	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	$-a_1$	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	0	$\frac{\pi}{2}$	0	θ_3
4	0	0	d_4	θ_4

Note que o arranjo cinemático do robô é diferente do tradicional manipulador articulado, pelo fato de a junta 2 estar posicionada na parte de trás do eixo da junta 1. Os valores dos parâmetros de DH são $a_1 = 5$ [mm], $a_2 = 138$ [mm] e $d_4 = 136$ [mm]. As principais características das juntas estão resumidas na Tabela II.

Dados os parâmetros de DH, os estudantes puderam escrever um *script* em MATLAB® para calcular a transformada homogênea que fornece a posição e orientação do efetuador expressas em coordenadas da base.

C. Cinemática Inversa

A cinemática inversa possibilita determinar as variáveis das juntas em função da posição e orientação do efetuador. O conhecimento da solução do problema de cinemática inversa é indispensável para o controle de trajetória. Quando a posição do centro do efetuador não é alterada com o movimento das suas juntas, é possível utilizar o método de desacoplamento cinemático, que permite dividir o problema da cinemática inversa em dois problemas mais simples, conhecidos, respectivamente, por cinemática inversa de posição (em função das juntas do braço), e cinemática inversa de orientação (em função das juntas do punho).

Devido ao curto período para se projetar e construir o manipulador durante o semestre acadêmico, apenas a cinemática inversa de posição foi implementada.

Considere o manipulador mostrado na Fig. 3, com as componentes no centro da garra denotados por p_x , p_y , p_z . Essas componentes são descritas em relação ao sistema de coordenadas O_0 , e r é a projeção dos elos do braço e antebraço no plano $x_0 - y_0$.

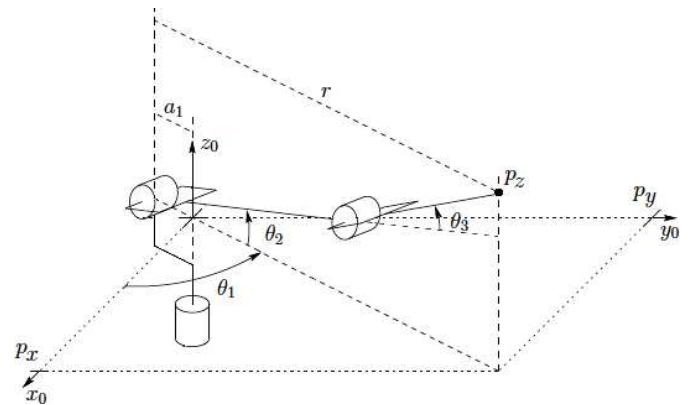


Figura 3. Robô Manipulador.

Vemos a partir dessa projeção que

$$\theta_1 = \text{atan2}(p_y, p_x), \quad (1)$$

se p_x e p_y não forem nulos, posição que caracteriza uma singularidade quando o centro da garra cruza o eixo z_0 . Nessa

Tabela II
CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS JUNTAS

Joint	Range [rad]	Speed [rad/s]
θ_1	$\pm \frac{\pi}{2}$	$\frac{5}{3}\pi$
θ_2	$+2.618 / -\frac{\pi}{6}$	$\frac{5}{3}\pi$
θ_3	$+2.269 / -0.873$	$\frac{10}{3}\pi$
θ_4	$\pm \frac{\pi}{2}$	$\frac{10}{3}\pi$

configuração ($p_x = p_y = 0$) infinitas soluções existem para θ_1 .

Note que a origem do sistema não coincide com a extremidade da projeção r na junta 2, como mostrado na Fig. 4, que permite que a expressão r seja encontrada por

$$r = \sqrt{(p_x)^2 + (p_y)^2} + a_1. \quad (2)$$

Uma vez que θ_1 é calculado, é possível encontrar θ_2 e θ_3 usando a lei do cosseno para a projeção dos elos 2 e 3 no plano formado por r e p_z (ver Fig. 5), como em

$$r^2 + (p_z)^2 = (a_2)^2 + (d_4)^2 - 2a_2d_4 \cos(\pi - \theta_3). \quad (3)$$

Substituindo-se $\cos(\pi - \theta_3)$ por $-\cos(\theta_3)$ em (3), tem-se

$$\cos(\theta_3) = \frac{r^2 + (p_z)^2 - (a_2)^2 - (d_4)^2}{2a_2d_4}. \quad (4)$$

Então, considere

$$\sin(\theta_3) = +\sqrt{1 - (\cos(\theta_3))^2}, \quad (5)$$

a partir de (4) e (5), θ_3 pode ser expresso por

$$\theta_3 = \frac{\pi}{2} \pm \text{atan2}(\sin(\theta_3), \cos(\theta_3)), \quad (6)$$

onde existem duas soluções, representando a singularidade do cotovelo para cima (sinal negativo) e cotovelo para baixo (sinal positivo). A constante $\pi/2$ foi inserida em (6) de forma que a posição angular referente ao zero da junta 3 corresponda à representação apresentada na Fig. 2.

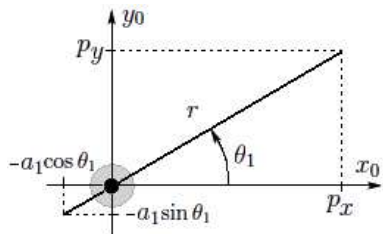


Figura 4. Projeção do centro da garra no plano $x_0 - y_0$.

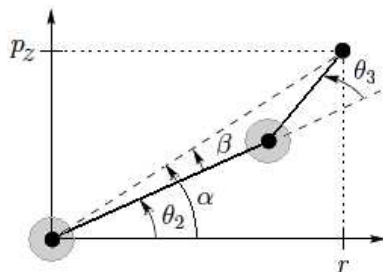


Figura 5. Projeção no plano formado pelos elos 2 e 3.

A variável θ_2 é calculada usando-se a seguinte relação (como mostrado na Fig. 5)

$$\theta_2 = \alpha \pm \beta, \quad (7)$$

onde o sinal positivo corresponde à postura do cotovelo para cima e o sinal negativo à postura do cotovelo para baixo, de forma que

$$\alpha = \text{atan2}(p_z, r), \quad (8)$$

$$\beta = \text{acos} \left(\frac{r^2 + p_z^2 + a_2^2 - d_4^2}{2a_2 \sqrt{r^2 + p_z^2}} \right). \quad (9)$$

Depois de determinadas as expressões para o cálculo da cinemática inversa de posição, os alunos escreveram um *script* para encontrar as variáveis das juntas a partir da posição do centro da garra. Além disso, o código deveria detectar se as soluções encontradas estavam dentro dos limites apresentados na Tabela II, caso contrário, a solução deveria ser descartada.

D. Espaço de Trabalho

Devido à geometria do robô (Fig. 2) e aos limites de deslocamento das juntas (Tabela II), o manipulador aqui apresentado demonstrava grande liberdade de movimento no espaço de trabalho, sendo capaz de alcançar objetos abaixo da sua base, e, com relativa liberdade, poderia até posicionar seu efetuator acima de seu corpo (ver Fig. 6).

Os alunos implementaram um *script* em MATLAB® para plotar os gráficos da visão lateral e visão superior do espaço de trabalho. Eles posicionaram o robô em diferentes configurações, nas quais se alterava uma variável de junta por vez, gerando trajetórias que representavam o volume total coberto pelo efetuator, de acordo com o algoritmo apresentado para a projeção do espaço de trabalho do robô planar de dois elos em [13]. Com o propósito de melhor visualizar os gráficos da visão lateral e superior foi usado um passo de 7.65×10^{-2} [rad] para a iteração de cada junta, e o passo de 9 [mm] para a projeção dos elos dos braço e antebraço no plano $x_0 - y_0$.

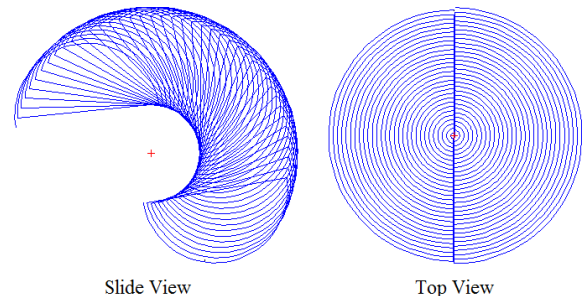


Figura 6. Espaço de trabalho.

E. Singularidades

A configuração da geometria desse manipulador permite abordar o tema de singularidades com os alunos. O robô apresenta as singularidades típicas de um manipulador articulado para a cinemática inversa de posição, e.g., a configuração na qual o centro do efetuador intercepta o eixo z_0 ou para as configurações do cotovelo para cima e cotovelo para baixo (em ambos os casos, ver Fig. 7). Na primeira situação, infinitas soluções existem para obter o valor da variável para a junta 1 pela cinemática inversa de posição. Na segunda situação, duas soluções existem para a configuração do manipulador, para que o efetuador alcance a mesmo ponto no espaço. As outras configurações de singularidade são determinadas pelos alunos usando-se a matriz Jacobiana para o manipulador.

Depois de identificarem as singularidades, os alunos devem incorporar as singularidades como obstáculos no espaço de configuração.

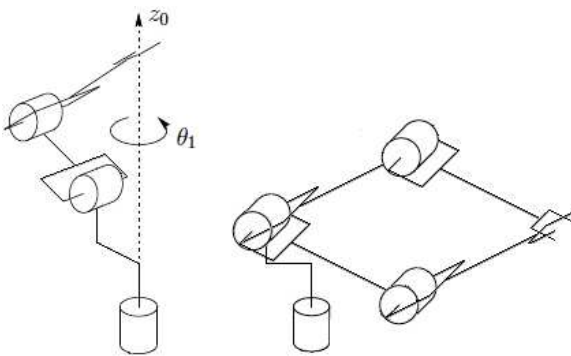


Figura 7. Singularidades do manipulador. Esquerda: o centro da garra intercepta o eixo z_0 . Direita: configurações do cotovelo para cima e cotovelo para baixo.

F. Hardware

O *hardware* foi totalmente desenvolvido pelos alunos sem intervenção do docente. O *hardware* consistia em um mínimo de 10 canais de E/S, incluindo 5 saídas para enviar os sinais de referência para os servomotores e 5 entradas analógicas para medir os transdutores de deslocamento (potenciômetros) dos servomotores. Os circuitos deveriam ter uma interface para comunicação serial com um PC usando uma conexão USB com um chip FTDI [14] para a conversão dos sinais TTL em sinais USB e vice versa.

Para acionar os servomotores a partir das 3 primeiras juntas do robô, o grupo 1 optou por utilizar um microcontrolador ATmega328P. Por sua vez, o grupo 3, responsável pelo desenvolvimento do circuito para acionar os motores do punho e da garra, optou pelo microcontrolador MSP430G2231. O *hardware* de ambos os grupos era simples e necessitou apenas comunicar com um PC e ter 5 saídas para enviar os sinais de referência para os servomotores. Um diagrama esquemático simplificado para o circuito de comandos dos servomotores é mostrado em Fig. 8.

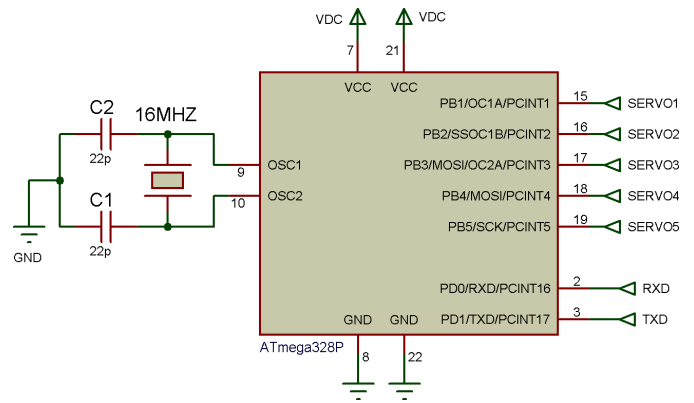


Figura 8. Diagrama esquemático do circuito para o comando dos servomotores.

O grupo 2 usou um microcontrolador PIC16F877 para medir as saídas analógicas dos potenciômetros dos servomotores. Como as saídas do potenciômetro tinham uma escala típica de valores de 0 a 2.5 [Vdc], dois circuitos integrados LM324 foram usados para amplificar esse sinais com uma configuração que permite um ganho de 2. O microcontrolador usado com conversor A/D de 10-bit apresenta uma resolução de 1.53×10^{-2} [rad/bit]. A Fig. 9 é um diagrama esquemático simplificado para essa interface.

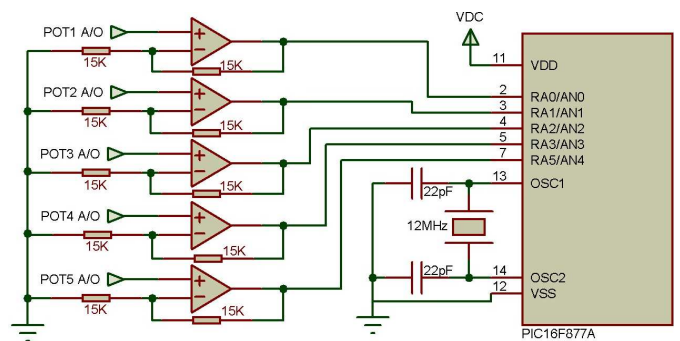


Figura 9. Diagrama esquemático da interface de amostragem.

Uma das vantagens do desenvolvimento do *hardware*, além da motivação dos alunos, é o completo domínio da eletrônica utilizada para a interface com o robô, o que não é viável com placas de controle comerciais que são como caixas-pretas.

G. Software

Para as práticas de cinemática direta e cinemática inversa, uma interface gráfica com o usuário foi desenvolvida em MATLAB®. O usuário pode optar pelo modo de cinemática direta, na qual o PC requisita ao circuito de medida os valores dos ângulos de cada junta do manipulador para uma dada configuração no espaço. Depois de realizar as medidas, os dados são transmitidos ao PC, que calcula a transformada homogênea e fornece a posição e orientação do efetuador expressas em coordenadas da base. O segundo modo disponível

permite ao usuário executar a trajetória pelo controle ponto-a-ponto, no qual a seqüência de pontos pode ser inserida pelo usuário ou obtida pela amostragem usando o modo de cinemática direta (como método de aprendizagem para o movimento ponto-a-ponto). Assim, por meio do cálculo da cinemática inversa de posição, a seqüência de valores para as variáveis das juntas do manipulador é encontrada. Esse vetor é enviado ao circuito responsável pelo acionamento dos servomotores que posicionarão os elos dos manipuladores na seqüência desejada para realizarem uma trajetória ponto-a-ponto. Em ambos os modos, a visualização do robô em 3D é gerada usando o Robotic Toolbox. A arquitetura do *software* é apresentada na Fig. 10.

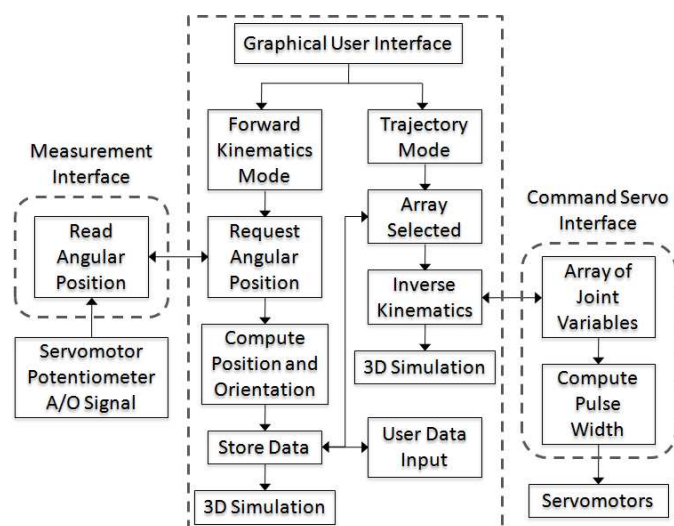


Figura 10. A arquitetura do *software*.

IV. RESULTADO

O principal resultado foi a motivação dos alunos pela prática do projeto, construção e programação do robô, auxiliada pelo conteúdo da disciplina de robótica industrial que foi apresentado em sala de aula. A fim de ilustrar o trabalho, a Fig. 11 mostra a plataforma robótica desenvolvida.

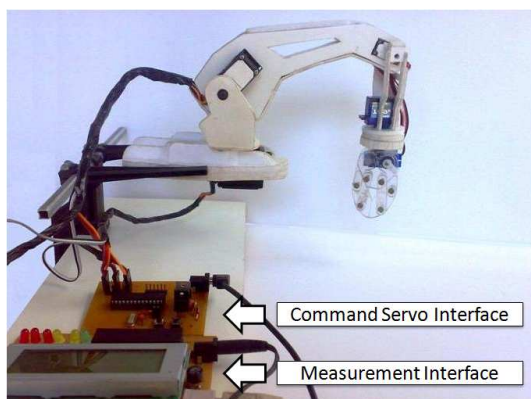


Figura 11. A plataforma robótica desenvolvida.

V. CONCLUSÕES E PESQUISA FUTURA

Esse trabalho propôs o desenvolvimento de um robô com o objetivo de motivar os alunos de graduação da disciplina de robótica industrial. Para que fosse possível executar o projeto no semestre escolar, algumas simplificações foram determinadas, e.g., o uso de servomotores no manipulador, que facilitou a montagem mecânica e o controle de posição de cada junta. Todas as fases do desenvolvimento do manipulador e suas relações com o curso de robótica industrial foram apresentadas. O custo do robô foi de aproximadamente US\$ 150, o que o tornou uma excelente e acessível plataforma para pesquisa e docência em robótica.

Em trabalhos futuros, o manipulador pode ser fixado a uma plataforma móvel, ou os potenciômetros dos servomotores podem ser desacoplados e substituídos por encoders incrementais desenvolvidos pelos alunos, o que permitirá implementar algoritmos para o controle da velocidade de cada junta e até mesmo implementar o controle da orientação do efetuador final durante a execução de uma trajetória, explorando, assim, a área de controle relacionada à robótica.

AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer a todos os alunos que se dedicaram ao desenvolvimento do robô.

REFERÊNCIAS

- [1] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*. USA: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] R. J. Wood, "Robotic manipulation using an open-architecture industrial arm: A pedagogical overview," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, pp. 17–18, Sep. 2008.
- [3] Quanser Consulting Inc., *Mechatronics Controls Collection*. [Online]. Available: <http://www.quanser.com/>
- [4] S. Galvan, D. Botturi, A. Castellani, and P. Fiotini, "Innovative robotics teaching using lego sets," *IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp. 721–726, May 2006.
- [5] Z. Fang, Y. Fu, and T. Chai, "A low-cost modular robot for research and education of control systems, mechatronics and robotics," *IEEE Int. Conf. on Ind. Electron. and Appl.*, pp. 2828–2833, May 2009.
- [6] M. Moallem and R. Khoshbin, "An environment for programming and control of multi-robot manipulators," *IEEE Int. Conf. on Mechatronics*, pp. 587–591, Jul. 2006.
- [7] C. Park, J. H. Kyung, and D. I. Park, "Development of an industrial robot manipulator for the easy and safe human-robot cooperation," *IEEE Int. Conf. Contr., Autom. and Syst.*, pp. 678–681, Oct. 2010.
- [8] A. C. Leite, F. Lizarralde, and L. Hsu, "Hybrid vision-force robot control for tasks on unknown smooth surfaces," *IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, pp. 2244–2249, May 2006.
- [9] T. R. Oliveira, A. J. Peixoto, A. C. Leite, and L. Hsu, "Sliding mode control of uncertain multivariable nonlinear systems applied to uncalibrated robotics visual servoing," *IEEE American Contr. Conf.*, pp. 71–76, Jun. 2009.
- [10] J. Lee, B. Park, Y. Lee, J. Ahn, S. Lee, S. Lim, and C. Han, "The development of 6 d.o.f. robot manipulator with human-friendly design," *IEEE Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics*, pp. 1–6, Sep. 2007.
- [11] R. Bischoff, U. Huggenberger, and E. Prassler, "Kuka youbot a mobile manipulator for research and education," *IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, May 2011.
- [12] P. Corke. (2011, Sep.) *Robotics Toolbox*. [Online]. Available: <http://www.petercorke.com/>
- [13] L. Siciliano and B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Great Britain: Springer, 2000.
- [14] Future Technology Devices International. [Online]. Available: <http://www.ftdichip.com/>