

Projeto e Implementação de um Robô Manipulador para a Educação

José Alberto Naves Cocota Júnior, Paulo Henrique Vieira Magalhães, Thiago D'Angelo, João Gabriel Castilho Haine, Mariana de Souza Sanchez, Felipe Oliveira Tavares e Thiago Loureiro Carvalho

Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais (DECAT)

Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (EM/UFOP)

Ouro Preto, Brasil

cocota@em.ufop.br, phvmag@gmail.com, thiago.d.angelo@hotmail.com, joao.carioca@gmail.com, sanchez.mariana@hotmail.com, felipeo_tavares@hotmail.com e theguitas@hotmail.com

Resumo — Atualmente, a evasão dos cursos de engenharia ocorre praticamente em todas as universidades do mundo. Ao longo dos últimos anos, a aprendizagem ativa tem sido reconhecida pela comunidade educacional como o método de aprendizagem mais eficaz. Neste artigo vamos discutir a experiência educacional associada à concepção e desenvolvimento de um robô manipulador de baixo custo com seis graus de liberdade para motivar os alunos dos cursos de Engenharia de Controle e Automação e de Engenharia Mecânica, durante o semestre da disciplina de Elementos de Robótica. Além disso, são apresentadas as atividades efetuadas pelos alunos durante a execução do trabalho, bem como o resultado da avaliação pelos discentes da metodologia que foi proposta.

Palavras-chave — robô manipulador; educação; cinemática; programação; simulação; projeto; controle.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o ensino de engenharia associado à prática tornou-se uma metodologia indispensável na motivação dos estudantes de graduação. Entretanto, a maioria das bancadas didáticas aplicáveis no ensino em nível de graduação, ou de pós-graduação, é muito cara ou possui uma arquitetura fechada de *hardware* e *software*. Além disso, o emprego exclusivo dessas bancadas suprime ao aluno a possibilidade de desenvolver uma das características mais importantes do profissional de engenharia, a de projetar, acompanhar e executar um projeto.

Uma das áreas comuns na formação de engenharia de controle e automação e de engenharia mecânica é a robótica, que é considerada uma área relativamente nova 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 deste 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 três modelos de robôs, sendo dois em cadeia cinemática fechada (o Hexapod e o robô planar de 2 graus de liberdade – GDL) e um em cadeia cinemática aberta (Omni Bundle) [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 este 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, foi proposto o desenvolvimento robô manipulador de baixo custo, com quatro graus de liberdade (GDL), para motivar os alunos de graduação da disciplina de elementos de robótica [5]. Neste trabalho foi possível explorar os conteúdos da disciplina de elementos de robótica, e.g., o estudo das forças envolvidas; a determinação da cinemática direta, cinemática inversa de posição e do espaço de trabalho do robô; e o planejamento de trajetória pelo método de aprendizagem por movimento ponto-a-ponto. Posteriormente, foi desenvolvido um robô manipulador com 6 GDL, que possibilitou explorar com os alunos, além dos tópicos supracitados, o controle em malha aberta da velocidade angular de cada junta, a implementação da cinemática inversa de orientação, e a identificação da precisão e repetibilidade do robô [6].

Nesse artigo apresenta-se o aprimoramento do trabalhos anteriores [5] e [6], destacando-se a melhoria da interface com o usuário em MATLAB®, a amostragem da velocidade média angular de cada junta, e o controle cinemático de trajetória para o movimento planar do braço e antebraço. Vamos explicar como esses projetos têm contribuído na motivação dos alunos,

no desenvolvimento dos trabalhos de fim de curso, bem como, na melhoria das competências transversais dos discentes, a partir dos resultados da avaliação dessa experiência pelos alunos de graduação.

II. OBJETIVOS

O principal objetivo do projeto proposto aos alunos foi motivá-los através do projeto e implementação de um robô manipulador, que permitiu demonstrar conceitos básicos de robótica, tais como: cinemática direta, cinemática inversa, cinemática diferencial, espaço de trabalho, singularidades, planejamento de trajetória, controle cinemático, e engenharia auxiliada por computador (CAE). Os outros objetivos específicos foram:

- Desenvolver trabalhos interdisciplinares, promovendo a integração de conceitos das áreas de matemática, física, eletrônica, programação, mecânica e controle.
- Desenvolver competências transversais, tais como: análise crítica, aprendizagem autônoma, resolução de problemas, trabalho em equipe, gestão de conflitos, tomada de decisão, avaliação, gestão de fluxo de trabalho.
- Motivar o estudo teórico dos conteúdos da disciplina.
- Fazer um levantamento das dificuldades dos alunos para identificar as áreas do curso que devem ser aprimoradas.
- Aprimorar o conhecimento técnico dos alunos, de modo que possa contribuir no desenvolvimento do trabalho final de curso do discente.

Acreditamos que esses objetivos podem ser alcançados por meio de uma experiência de graduação baseada em projeto-execução-teste, visando incentivar os alunos a desenvolver de idéias, pesquisas e habilidades para resolver problemas, fatores essenciais para o projeto de engenharia.

III. METODOLOGIA

Para a execução deste projeto com os alunos de graduação foi utilizado a metodologia de aprendizagem baseada em problemas (Problem Based Learning - PBL), na qual o aprendizado é centrado no aluno, que deixa de ser o receptor passivo, para ser o principal responsável pelo seu aprendizado.

As atividades relacionadas ao projeto e a implementação do robô foram realizadas ao longo de dois semestres por estudantes de graduação da disciplina de Elementos de Robótica da Escola de Minas (UFOP), que iniciaram em 2013 com o trabalho [6]. Os alunos de Engenharia Mecânica realizaram atividades relacionadas ao projeto dos mecanismos que compõe o robô, ensaios para caracterização dos materiais utilizados no robô, bem como a análise estática do robô quando submetido a esforços. As atividades dos estudantes de Engenharia de Controle e Automação, foram voltadas para a eletrônica, programação, modelagem cinemática do robô, simulação e implementação do controle cinemático para uma trajetória planar.

IV. PROJETO

Para estimular a criatividade dos alunos, foi dada a liberdade de escolha dos materiais, dos componentes e da linguagem de programação a serem utilizados no desenvolvimento do robô.

A. Projeto Mecânico

A primeira versão do robô foi confeccionada com placas de PVC rígido com espessura de 2 [mm] (Fig. 1). Na fase de projeto foram realizados ensaios de tração, compressão, flexão e torção de PVC, para a caracterização do material empregado. Os dados obtidos nesses ensaios subsidiaram a análise estática do robô quando submetido a uma carga em seu último elo. Na Fig. 2 temos o modelo em CAD do braço do robô que foi utilizado na análise CAE por meio do software SolidWorks (Fig. 3).



Fig. 1. Protótipo do robô com o punho e a garra em PVC.

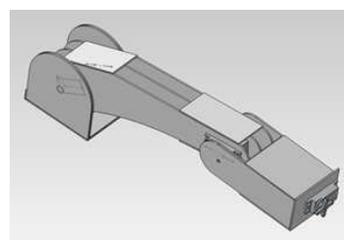


Fig. 2. Modelo em CAD do robô em PVC.

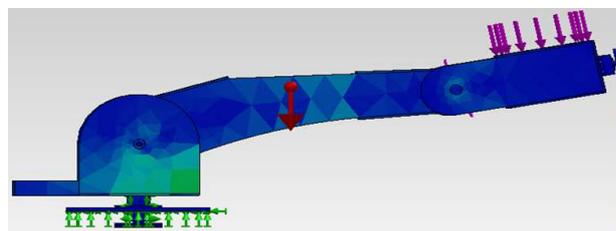


Fig. 3. Análise CAE do robô em PVC.

Na fase de análise CAE, observou-se que os elementos sujeitos a maiores esforços eram os eixos de levantamento do braço (Fig. 4) e de giro do corpo do robô (Fig. 5).

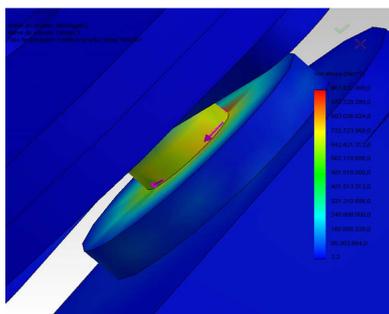


Fig. 4. Eixo de levantamento do braço do robô.

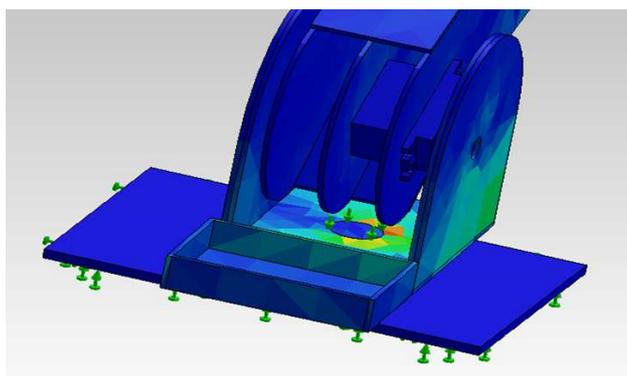


Fig. 5. Eixo de giro do corpo do robô.

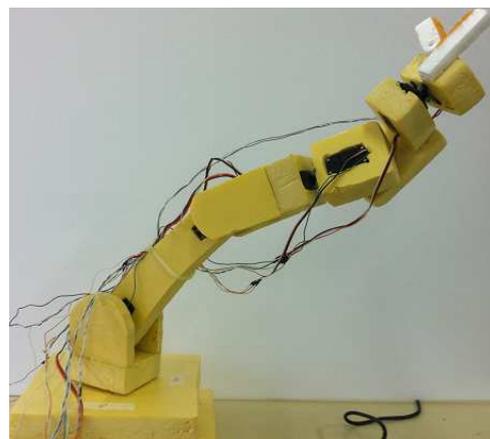


Fig. 6. Protótipo do robô com o punho e a garra em Depron.

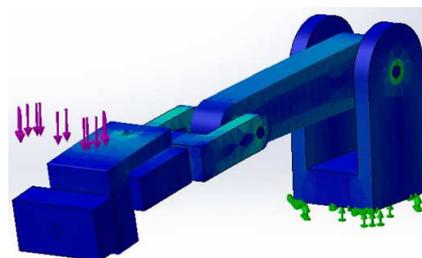


Fig. 7. Análise CAE do robô em Depron.

Entretanto, a estrutura em PVC não se demonstrou satisfatória durante o uso do robô. Com frequência, ocorreram fissuras nas uniões das placas que formavam os elos do robô.

Um segundo protótipo foi confeccionado (Fig. 6), sendo utilizado como material base o Depron, que é um poliestireno extrudado, sendo um material leve e com boa resistência. Esse material é comumente utilizado em aeromodelos e apresenta a densidade nominal de $40 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. Para a análise CAE foi elaborado um novo modelo em CAD (Fig. 7). Nessa análise, também foram observados que os elementos sujeitos a maiores tensões eram os eixos de levantamento do braço e de giro do corpo do robô.

A estrutura em Depron possibilitou utilizar servomotores de menor torque para o levantamento do braço e giro do corpo, em comparação com a estrutura anterior em PVC. Durante o uso do robô, observou-se um rápido desgaste nos pontos de apoio do levantamento do braço, como foi previsto na análise CAE. Para solucionar esse problema, o elo que realiza a união entre a junta de giro do corpo e a junta do levantamento do braço foi substituída por um elo em MDF com espessura de 5 [mm] (Fig. 8), e os excessos de material dos elos do braço e do antebraço foram removidos para reduzir a massa do robô, sem prejudicar a estrutura do mesmo.



Fig. 8. Protótipo do robô em Depron com alterações.

B. Hardware e Softwares

Para o acionamento das juntas do robô e a leitura de suas respectivas posições angulares foi utilizado a plataforma de Arduino MEGA 2560. As posições angulares de cada junta do robô eram amostradas através dos sinais analógicos dos servomotores. Os alunos desenvolveram um protocolo próprio de comunicação, que possibilitou a troca de dados entre a plataforma Arduino e o microcomputador pela porta USB.

O protocolo possibilitou o usuário por uma interface em MATLAB enviar a referência da posição angular e a velocidade angular de cada junta durante uma trajetória, bem como permitiu a leitura da posição angular e a velocidade angular média de cada junta. A identificação da velocidade

média de cada junta foi necessária para o projeto de controle cinemático do robô.

A interface gráfica do usuário (GUI) em MATLAB permitiu realizar práticas de cinemática direta, cinemática inversa e de trajetória por ponto-a-ponto (Fig. 9). A GUI foi desenvolvida através da Toolbox GUIDE do MATLAB, e utilizou o Toolbox de Robótica [7] para plotar a trajetória do robô durante o movimento do protótipo. A arquitetura do software do microcomputador, bem como suas interfaces de comunicação com a plataforma Arduino MEGA 2560 está representada na Fig. 10.

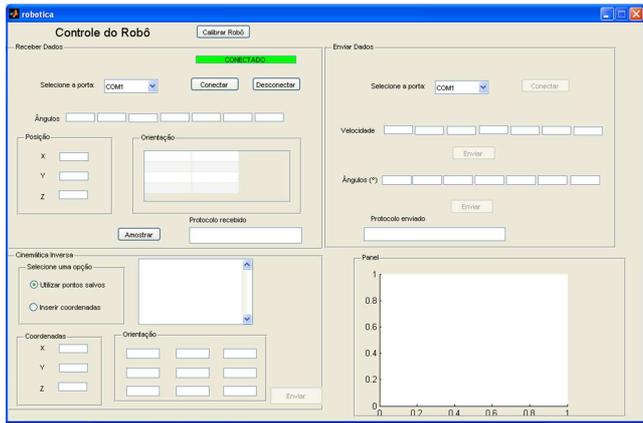


Fig. 9. GUI em MATLAB.

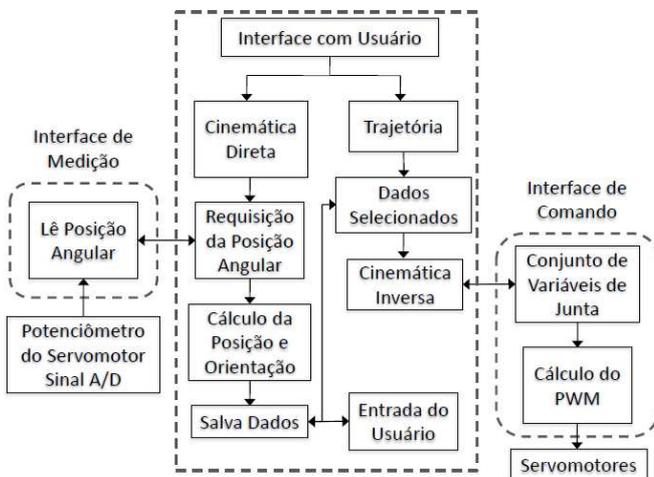


Fig. 10. A arquitetura do software.

C. Espaço de Trabalho

Os alunos implementaram um script em MATLAB para plotar os gráficos da visão lateral (Fig. 11) e visão superior (Fig. 12) 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 efetuador, de acordo com o algoritmo

apresentado para a projeção do espaço de trabalho do robô planar de dois elos em [8].

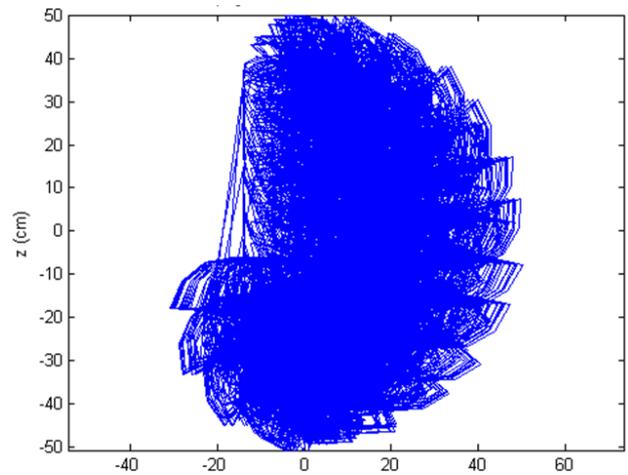


Fig. 11. Vista lateral do espaço de trabalho.

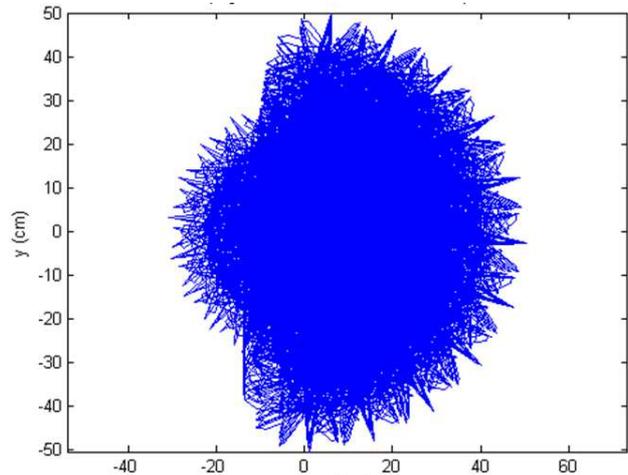


Fig. 12. Vista superior do espaço de trabalho.

Devido à geometria do robô e aos limites de deslocamento das juntas, 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, posicionar seu efetuador acima de seu corpo.

D. Precisão e Repetibilidade

Para a análise do desempenho da plataforma de robótica que foi desenvolvida, foram realizados dez ensaios de posicionamento do robô para o mesmo ponto e orientação no espaço. O robô apresentou boa repetibilidade e moderada precisão (Fig. 13). A precisão do robô foi de 5,1 [cm]. A junta com o menor desempenho, foi a de levantamento do braço do robô, que chegou a apresentar um erro de 8° em um dos ensaios.

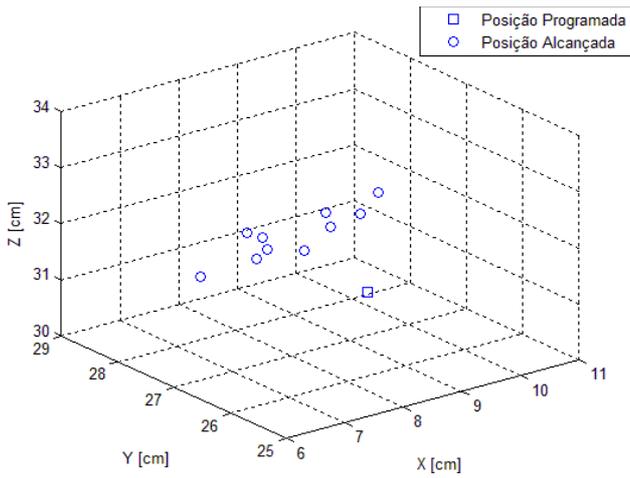


Fig. 13. Resultados dos ensaios para a determinação da repetibilidade e precisão do robô.

E. Controle Cinemático

Foi proposto aos alunos o projeto de controle cinemático de uma trajetória planar, no qual apenas os elos do braço e do antebraço se movimentariam. Essa simplificação da trajetória em um movimento planar foi necessária, para que os alunos pudessem concluir as atividades em um semestre letivo.

Como nosso robô utiliza servomotores, que contam com caixas de redução, sendo possível trabalhar com baixas velocidades nos deslocamentos angulares dos elos, a dinâmica do manipulador pode ser desprezada para a execução de trajetórias. Assim, é possível implementar o controle cinemático de um manipulador com o uso da matriz inversa do Jacobiano, com a ação de controle proporcional mais um termo de antecipação (*feedforward*).

Os resultados de simulação para a execução de trajetória linear e trajetória circular estão apresentados nas figuras 14 e 15. As variações angulares das juntas durante as trajetórias supracitadas estão presentes nas figuras 16 e 17. Na simulação foi considerado o intervalo de amostragem de 70 [ms], e o ganho proporcional (K_p) igual a 10 para cada laço de controle. Na simulação, as velocidades angulares das juntas ficou abaixo de 30°/s.

V. RESULTADOS

O principal resultado deste trabalho foi a motivação dos alunos uma vez que o desenvolvimento do robô manipulador contemplou atividades interdisciplinares na área de formação dos discentes, contribuindo para a fixação do conteúdo teórico ministrado em sala de aula. Para a avaliação da metodologia proposta à disciplina e de suas possíveis contribuições, uma pesquisa com 3 questões foi respondida pelos discentes. Quando questionamos aos alunos se a experiência ajudou no desenvolvimento de competências transversais: 57% afirmaram que foi bom; e 43% informaram que foi uma excelente oportunidade para o desenvolvimento destas competências.

71% dos alunos acreditam que as habilidades desenvolvidas e os conhecimentos adquiridos durante a execução do projeto contribuirão na elaboração do projeto de final de curso. De acordo com os alunos, as tarefas mais difíceis estavam relacionadas à eletrônica (29%) e à documentação (29%). Esse resultado nos sinalizou que é necessário o aprimoramento das disciplinas de eletrônica da matriz curricular, bem como o desenvolvimento de atividades de documentação nas disciplinas ofertadas ao curso.

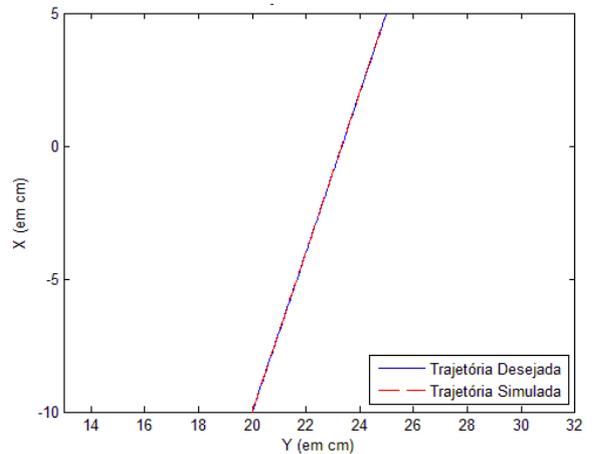


Fig. 14. Vista superior do espaço de trabalho.

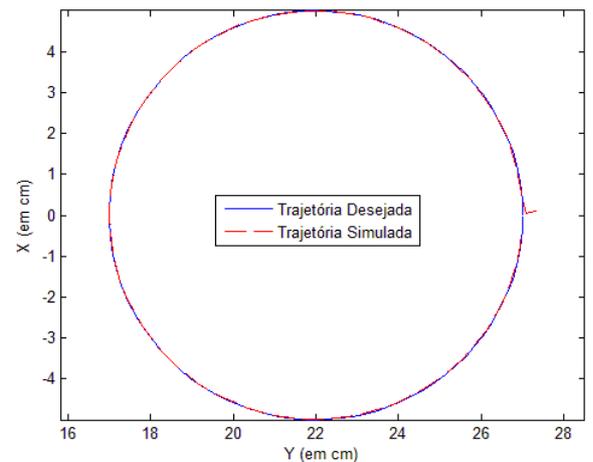


Fig. 15. Vista superior do espaço de trabalho.

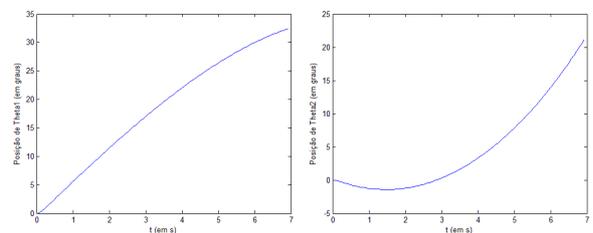


Fig. 16. Variações angulares das juntas do levantamento do braço e do antebraço durante a trajetória linear.

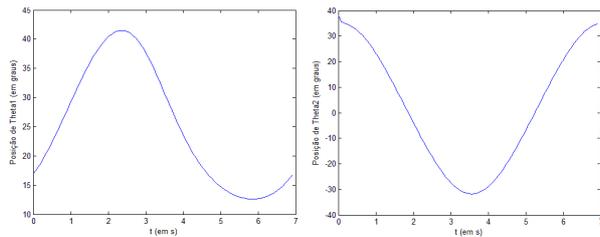


Fig. 17. Variações angulares das juntas do levantamento do braço e do antebraço durante a trajetória circular.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho relatamos a experiência do emprego da metodologia de aprendizagem baseada em problemas (PBL) para o desenvolvimento de um robô antropomórfico com punho esférico na disciplina de Elementos de Robótica. A execução desse trabalho possibilitou explorar conceitos básicos de robótica com os alunos de graduação, e.g., cinemática direta, cinemática inversa, programação de trajetória por ponto-a-ponto, precisão e repetibilidade de manipulador. Os alunos foram capazes de identificar e documentar as diferentes etapas do projeto, identificar os problemas além de buscar, analisar e implementar soluções. Este cenário é semelhante ao mercado de trabalho. Acreditamos que os objetivos foram alcançados e que o sucesso foi possível graças ao envolvimento dos alunos. Esperamos que essas experiências possam ser úteis a outros grupos de estudantes de graduação.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a todos os alunos que se dedicaram ao desenvolvimento do projeto, bem como à Fundação Gorceix que apoiou este projeto.

REFERENCIAS

- [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] J. A. N. J. Cocota, H. S. Fujita, I. J. Silva, "A low-cost robot manipulator for education", *IEEE Int. Conf. on Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE)*, p. 164-169, Jun. 2012.
- [6] J. A. N. J. Cocota, R. C. Barbosa, A. D. Moreira, and V. Lage, "Desenvolvimento de um robô antropomórfico com punho esférico para práticas de robótica com alunos de graduação (Accepted for publication)", *SBAI/DINCON*, Oct. 2013.
- [7] P. Corke. (2013, Feb.) *Robotics Toolbox*. [Online]. Available: <http://www.petercorke.com/>
- [8] L. Siciliano and B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Great Britain: Springer, 2000.