Projeto e Implementação de um Robô Manipulador para a Educação

José Alberto Naves Cocota Júnior, Thiago D'Angelo, Paulo Marcos de Barros Monteiro, Paulo Henrique Vieira Magalhães
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, thiago.d.angelo@hotmail.com, pmemop@gmail.com, phvmag@gmail.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. Nesse artigo vamos discutir a experiência educacional associada à concepção e desenvolvimento de um robô manipulador de baixo custo com seis graus de liberdade (6-DOF) para motivar os alunos de graduação dos cursos de Engenharia de Controle e Automação e de Engenharia Mecânica, que cursaram a disciplina de Elementos de Robótica no período de 2012 a 2013. 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* — *robótica, aprendizagem ativa, cinemática direta e inversa, controle cinemático, CAE.

I. Introdução

Nos últimos anos, o ensino de engenharia associado à pratica tornou-se uma metodologia indispensável na motivação dos estudantes de graduação. No entanto, 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, i.e., 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 de elevado custo 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 de um 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].

Neste 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 posição para trajetórias. Será explicado 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.

Este projeto contou com o apoio da Fundação Gorceix.

II. OBJETIVOS

O principal objetivo do projeto proposto aos alunos foi motivá-los através do projeto e implementação de um robô manipulador de baixo custo, que permitisse 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 os seguintes:

- 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.
- Efetuar 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 ideias, pesquisas e competências 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 três semestres por estudantes de graduação da disciplina de Elementos de Robótica da Escola de Minas (UFOP), que iniciaram as atividades no final de 2012 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 trajetórias 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

Ao longo de três semestres, foram desenvolvidas três estruturas para o robô manipulador. 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 apresenta-se o modelo em CAD do braço do robô que foi utilizado na análise CAE por meio do software SolidWorks (Fig. 3).

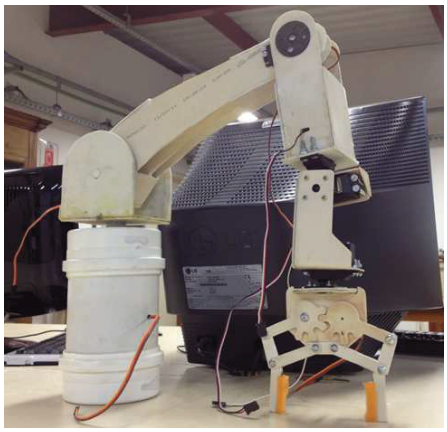

Fig. 1. Primeiro protótipo do robô com o punho e a garra em PVC.

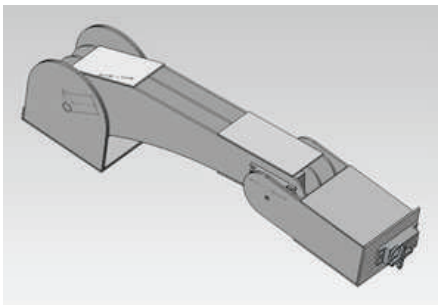

Fig. 2. Modelo em CAD do robô em PVC.

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).

No entanto, 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), com o uso do Depron. Esse material é comumente utilizado em aeromodelos e apresenta a densidade nominal de 40 $[kg/m^3]$. 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.

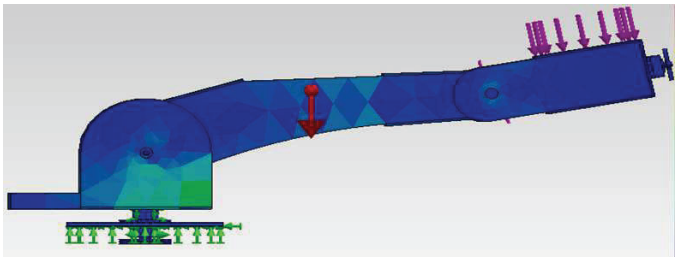

Fig. 3. Análise CAE do robô em PVC.

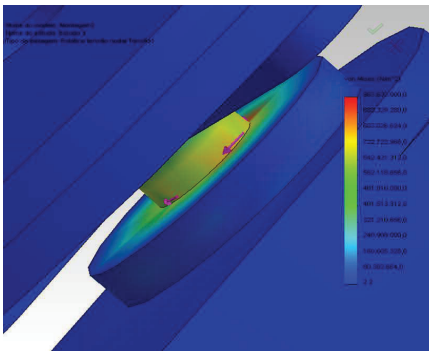

Fig. 4. Eixo de levantamento do braço do robô.

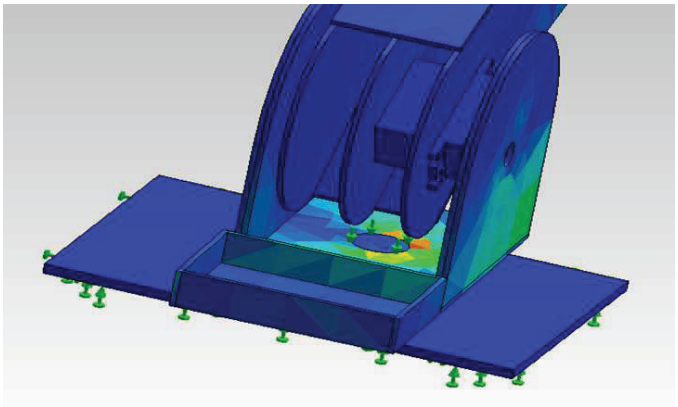

Fig. 5. Eixo de giro do corpo do robô.

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 do giro do corpo em Depron foi substituído por um elo em MDF com espessura de 5 $[mm]$ (Fig. 8). Além disso, reduziu-se a dimensão e o peso do punho esférico ao substituir a estrutura anterior, composta por Depron e três servomotores Futaba S3003, pelo kit SPT50 da ServoCity e três servomotores HS-5055MG. Essa última estrutura também apresentou melhorias na junta de união do elo do braço com o antebraço, com a substituição de uma bucha por um rolamento para o apoio do eixo dessa junta. Outra alteração de destaque, foi a substituição do servomotor responsável pelo levantamento do braço do modelo TowerPro MG995 para HD-1501MG, que permitiu aumentar o torque dessa junta de 13 $[kg/cm]$ para 17 $[kg/cm]$.

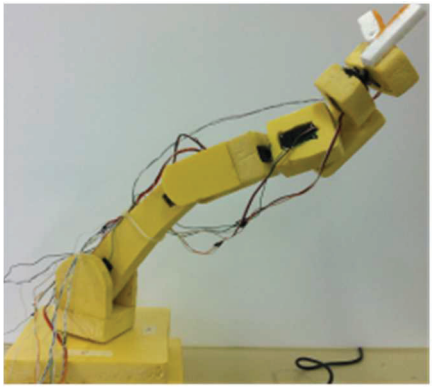

Fig. 6. Segundo protótipo do robô com o punho e a garra em Depron.

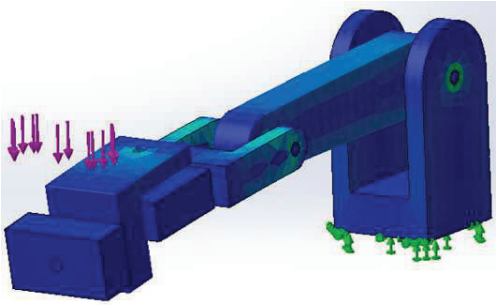

Fig. 7. Análise CAE do robô em Depron.

Fig. 8. Terceiro protótipo do robô em MDF e Depron.

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 foram amostradas através dos sinais analógicos dos potenciômetros 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 plataforma Arduino 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.

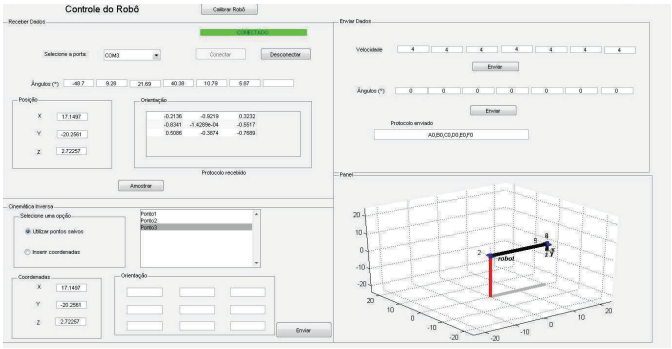

Fig. 9. GUI em MATLAB.

Para as práticas de controle cinemático de posição, o *software* de controle foi embarcado na plataforma Arduino, uma vez que se observou que o controle cinemático pelo MATLAB por meio de um microcomputador não seria possível, dado que o tempo para comunicação serial entre o Arduino e o MATLAB era maior do que o intervalo de amostragem estipulado. Assim, durante as práticas de controle cinemático as posições angulares eram armazenadas na memória do Arduino, sendo transmitidas ao microcomputador após a conclusão da trajetória. Esses resultados experimentais foram comparados com os resultados de simulação do controle cinemático por *feedforward*.

C. *Espaço de Trabalho*

A determinação do espaço de trabalho foi necessária, para a escolha das trajetórias a serem realizadas pelo robô. Com base nos limites máximo e mínimo de cada junta da estrutura do robô da Fig. 8, que estão apresentados na Tab. I, e nas dimensões dos elos do robô, 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].

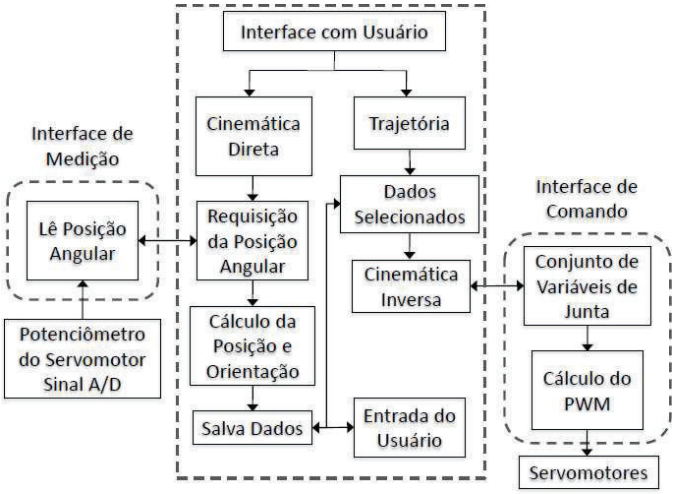

Fig. 10. A arquitetura do *software*.

TABELA I. LIMITES DAS JUNTAS DO ROBÔ

Junta	Ângulo Mínimo	Ângulo Máximo
θ1	-90º	+90º
θ2	0º	165º
θ3	-25º	+90º
θ4	-90º	+90º
θ5	-55º	+90º
θ6	-90º	+90º

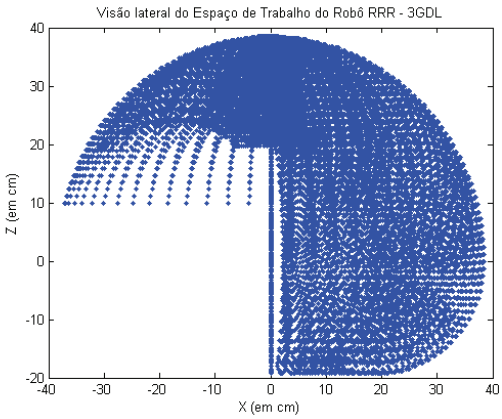

Fig. 11. Vista lateral do espaço de trabalho.

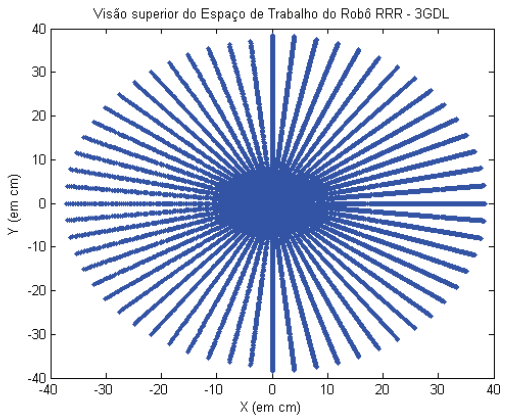

Fig. 12. Vista superior do espaço de trabalho.

D. Controle Cinemático

Nesse trabalho foi implementado pelos alunos uma estrutura de controle cinemático de posição por *feedforward*. O controle cinemático de orientação não foi implementado, por questão de simplificação. O desenvolvimento do programa para o controle cinemático foi realizado em duas etapas: (1) no primeiro semestre de 2013 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; (2) com base no conhecimento adquirido pelos discentes, no segundo semestre de 2013 foi proposto aos alunos o projeto de controle cinemático para uma trajetória no espaço, movimentando assim as três primeiras juntas do robô.

O controle cinemático de posição resulta em uma malha de controle de velocidades em nível de juntas (Fig. 13), onde u_i é o sinal de controle de velocidade aplicado ao motor da i-ésima junta. O motor, por sua vez, tem a ação de um integrador, no qual dada uma entrada em velocidade angular, apresenta em sua saída a posição angular da junta associada ao motor. Sendo K_p uma matriz positiva definida, e o ponto de equilíbrio $e = 0$ assintoticamente estável.

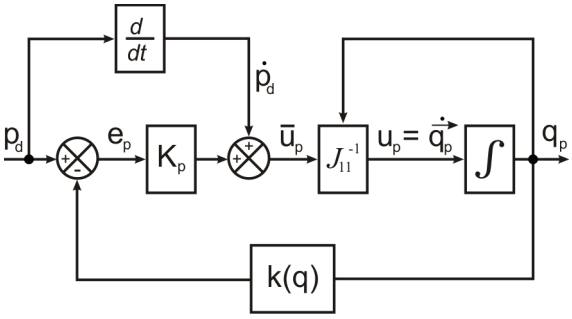

Fig. 13. Diagrama de blocos para o controle cinemático de posição do robô.

A implementação de uma estrutura de controle cinemático foi possível, pois pode-se desprezar a dinâmica do manipulador. Esta hipótese pode ser realizada, uma vez que as juntas, que são acionadas por servomotores, apresentam elevados fatores de redução nas engrenagens, bem como foram utilizadas baixas velocidades angulares durante a realização das trajetórias.

V. Resultados

Nesta seção iremos apresentar os resultados experimentais que foram alcançados com a plataforma robótica que foi desenvolvida pelos alunos, bem como vamos divulgar os resultados da avaliação pelos discentes do uso da metodologia de PBL na disciplina de Elementos de Robótica.

A. Resultados Experimentais

Para a análise de precisão e repetibilidade da plataforma de robótica que foi desenvolvida, foram realizados dez ensaios de posicionamento do robô para o mesmo ponto e orientação no espaço. Para a realização dessa tarefa utilizou-se a estrutura de controle de trajetória por ponto-a-ponto. O robô do presente trabalho apresentou melhor repetibilidade e precisão (Fig. 14) em relação ao trabalho anterior [6].

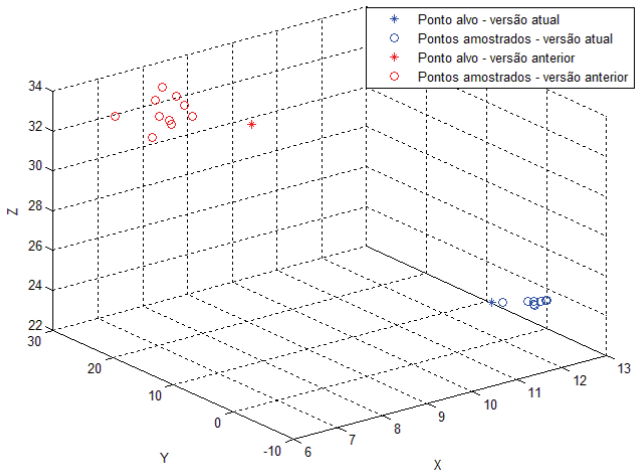

Fig. 14. Resultados dos ensaios para a determinação da repetibilidade e precisão do robô.

Embora o ponto programado para a avaliação da repetibilidade e precisão dos robôs não tenha sido o mesmo, notou-se uma significativa melhora na repetibilidade do robô, quando observou-se a redução na dispersão dos pontos que foram alcançados pelo robô durante os ensaios. Além disso, o robô do presente trabalho apresentou a precisão de 1,09 $[cm]$ contra a precisão de 3,00 $[cm]$ do robô anterior. Esses resultados foram alcançados, após efetuado as alterações mecânicas do segundo para o terceiro protótipo da plataforma robótica, conforme descrito na seção do Projeto Mecânico.

Os resultados experimentais e de simulação para a execução de trajetória linear e de trajetória circular no espaço estão apresentados nas Figuras 15 e 16. As trajetórias foram divididas em 80 pontos, com intervalo de amostragem de 60 $[ms]$. As velocidades angulares das juntas ficaram abaixo de 40º/s na simulação do controle cinemático. O erro médio dos resultados

experimentais para a trajetória retilínea foi de 0,86 [cm], e para a trajetória circular foi de 1,26 [cm]. A matriz K_p utilizada, possuía uma diagonal com o ganho dado por 10.

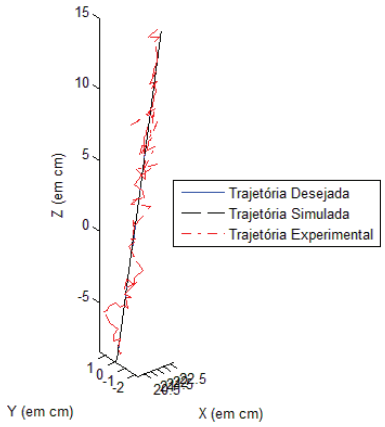

Fig. 15. Resultado experimental e de simulação para controle cinemático de trajetória linear.

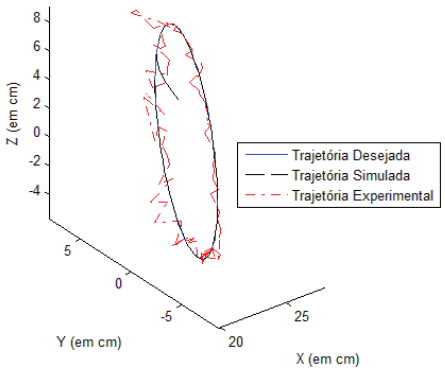

Fig. 16. Resultado experimental e de simulação para controle cinemático de trajetória circular.

B. *Resultados da Avaliação da Metodologia do Curso pelos Discentes*

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 9 questões foi respondida por 37 dos 46 alunos que cursaram a disciplina em 2012/2 e 2013/2. O questionário foi respondido voluntariamente pelos discentes, e de forma anônima.

Quando questionamos aos alunos se participaram ativamente na execução do trabalho, a maioria (91,9%) afirmou que sim. De acordo com os alunos, as tarefas mais difíceis estavam relacionadas à programação (40,5%) e ao controle (29,7%), seguida pela eletrônica (18,9). Esse resultado nos sinalizou que é necessário o aprimoramento das disciplinas que abordam esses conteúdos na matriz curricular. As demais respostas ao questionário estão agrupadas na Tabela II.

TABELA II. RESPOSTAS AO QUESTIONÁRIO

Respostas	A%	B%	C%	D%	E%
A execução do projeto contribuiu em minha motivação para a conclusão do curso.	48,6	51,4	0	0	0
O trabalho possui vínculo com o conteúdo teórico da disciplina.	40,5	40,5	13,5	5,4	0
A execução do trabalho me motivou no estudo da disciplina.	43,2	45,9	10,8	0	0
Eu recomendaria a outros discentes cursar a disciplina com a metodologia adotada.	45,9	48,6	2,7	2,7	0
O período para a execução dos trabalhos foi adequado.	32,4	35,1	10,8	21,6	0
O trabalho contribuiu no desenvolvimento de habilidades para minha formação profissional.	62,2	32,4	5,4	0	0
As habilidades desenvolvidas e o conhecimento adquirido no projeto irão contribuir na elaboração do meu trabalho de fim de curso.	21,6	24,3	18,9	35,1	0

A = Concordo Plenamente, B = Concordo, C = Neutro, D = Discordo, e E = Discordo Totalmente

No formulário do questionário também havia um campo disponível para eventuais comentários. Alguns discentes relataram que foi a primeira experiência prática de controle, outros sugeriram que a metodologia de aprendizagem ativa fosse adotada nas demais disciplinas do curso, em especial nas disciplinas de teoria de controle.

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 de baixo custo 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, controle cinemático, precisão e repetibilidade de manipulador. O conteúdo teórico da disciplina foi explorado em conjunto com o projeto que foi desenvolvido ao longo de três semestres. Os conceitos básicos relacionados ao controle cinemático, e.g., a análise de singularidades por meio do Jacobiano no planejamento de uma trajetória a ser efetuada pelo robô, e a estrutura de controle por *feedforward*, foram explorados pelos discentes.

Os alunos se sentiram motivados com a experiência que tiveram. Além disso, a maioria dos discentes (94,6%) acreditam que o projeto contribuiu no desenvolvimento de competências transversais. Este resultado pode ser explicado pelo conteúdo

multidisciplinar que foi explorado pelos grupos de estudantes que desenvolveram o trabalho ao longo de três semestres. Cada grupo desenvolveu atividades em determinadas áreas do conhecimento, e necessitaram trabalhar de forma conjunta, com o intercâmbio do conhecimento, para concluírem as metas que foram estabelecidas em cada semestre. Este cenário foi semelhante ao do mercado de trabalho, o que possibilitou desenvolver competências transversais com os estudantes. Em relação às contribuições da experiência com o projeto no trabalho de fim de curso, observou-se que alguns discentes não haviam iniciado o trabalho de fim de curso quando responderam o questionário. Dessa forma, notou-se que esse indicador não era adequado a avaliação da metodologia de aprendizagem ativa pelos discentes, uma vez que a disciplina de Elementos de Robótica era ofertada no período inicial das atividades do trabalho de fim de curso.

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.

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] 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, SBAI/DINCON, Oct. 2013.

[7] P. Corke. (2013, Feb.) Robotics Toolbox. [Online]. Available: http://www.petercorke.com/

[8] L. Siavicco and B. Siciliano, Modelling and Control of Robot Manipulators. Great Britain: Springer, 2000.