

SIMULAÇÃO MULTICORPOS DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO PLANAR DE BASE FLUTUANTE

Lucas dos Santos Keller, lucas.keller@estudante.ufscar.br¹

Anderson Antonio Ubices de Moraes, ubices@ufscar.br¹

Tatiana de Figueiredo Pereira Alves Taveira Pazelli, tatianapazelli@ufscar.br¹

Alexandre Tácito Malavolta, malavolta@ufscar.br¹

¹UFSCar, Rodovia Washington Luís km 235, São Carlos - SP, CEP 13565-905.

Resumo. Manipuladores robóticos espaciais podem ser compostos por um ou mais braços acoplados a uma base flutuante (por exemplo um satélite) e são projetados para cumprir, em órbita, tarefas como a manutenção de telescópios, missões de exploração planetária e remoção de detritos orbitais. O controle preciso do manipulador robótico é essencial para garantir o sucesso dessas missões e minimizar riscos de danos aos equipamentos envolvidos. O controle de posição e atitude demanda o desenvolvimento de complexos modelos dinâmicos do sistema, sujeito a diferentes perturbações uma vez que operam em ambientes hostis e extremos, onde a falta de gravidade, as variações de temperatura e as radiações podem afetar significativamente o comportamento do braço robótico. Neste contexto, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo computacional para simulação multicorpos de um manipulador robótico planar de base flutuante baseado em uma plataforma experimental disponível da UFSCar. Os resultados obtidos indicam que o modelo dinâmico de controle do manipulador fornece resultados satisfatórios quando comparados com o modelo multicorpos.

Palavras chave: Manipulador robótico. Modelo dinâmico. Simulação multicorpos.

Abstract. Space robotic manipulators can be composed of one or more arms attached to a floating base (for example, a satellite) and are designed to perform, in orbit, tasks such as maintaining telescopes, planetary exploration missions and removing orbital debris. Precise control of the robotic manipulator is essential to guarantee the success of these missions and minimize the risk of damage to the equipment involved. Position and attitude control requires the development of complex dynamic models of the system, subject to different disturbances as they operate in hostile and extreme environments, where lack of gravity, temperature variations and radiation can significantly affect the behavior of the arm. In this context, the present work presents the development of a computational model for multibody simulation of a planar robotic manipulator with a floating base based on an experimental platform available from UFSCar. The results obtained indicate that the dynamic manipulator control model provides satisfactory results when compared with the multibody model.

Keywords: Robotic manipulators, dynamic model, multibody simulation.

1. INTRODUÇÃO

Manipuladores robóticos espaciais podem ser compostos por um ou mais braços acoplados a uma base flutuante (como por exemplo um satélite) e são projetados para cumprir, em órbita, tarefas como a manutenção de outros satélites ou telescópios, missões de exploração planetária, remoção de detritos orbitais e manutenção de sistemas espaciais (Papadopoulos *et al.*, 2021). A utilização destes manipuladores tem se tornado cada vez mais frequente para atividades extraveiculares (EVAs) podendo evitar a exposição de astronautas aos riscos do ambiente espacial. A Fig. 1 ilustra uma operação do manipulador robótico Canadarm2 instalado na Estação Espacial Internacional (ISS) manobrando o cargueiro espacial orbital ATK.

O controle preciso do manipulador robótico é essencial para garantir o sucesso dessas missões e minimizar riscos de danos aos equipamentos envolvidos. O controle de posição e atitude demanda o desenvolvimento de complexos modelos dinâmicos do sistema, sujeito a diferentes perturbações uma vez que operam em ambientes hostis e extremos, onde a falta de gravidade, as variações de temperatura e as radiações podem afetar significativamente o comportamento do braço robótico. Uma característica importante desses sistemas é o acoplamento dinâmico existente entre a base flutuante e o(s) manipulador(es). Tal característica vem sendo motivadora para o desenvolvimento de diversos trabalhos que apresentam o equacionamento de modelos dinâmicos para o controle de trajetória de manipuladores com base flutuante (Christidi-Loumpasefski and Papadopoulos, 2023; Rousso and Chhabra, 2022; Rodrigues and Pazelli, 2021).

Modelos computacionais de simulação multicorpos representam outra importante ferramenta de auxílio ao desenvolvimento de manipuladores robóticos (Setterfield *et al.*, 2020; Kaigom *et al.*, 2014; Banerjee, 2003). A simulação multicorpos é uma técnica eficaz para análise do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos em diferentes condi-



Figura 1. Manipulador robótico Canadarm2

ções de operação possibilitando o ajuste de parâmetros para maximizar seu desempenho. Essas simulações são baseadas em modelos matemáticos que descrevem o comportamento do sistema, por meio de juntas, links e atuadores. Um dos principais objetivos das simulações multicorpos de braços robóticos espaciais é prever o comportamento dinâmico do sistema em resposta a diferentes condições de operação. Isso inclui a previsão da trajetória do braço robótico, a força e a aceleração nas juntas, a posição e a velocidade do braço robótico em diferentes pontos da trajetória, além da identificação de potenciais pontos de falha no sistema. Desta forma, os resultados das simulações multicorpos podem ser utilizados para otimizar o projeto do braço robótico, identificar possíveis problemas de desempenho e avaliar o sistema em diferentes condições de operação. Além disso, as simulações podem ser utilizadas para avaliar diferentes estratégias de controle de movimento do braço robótico, permitindo o ajuste dos algoritmos de controle antes da implementação no sistema real.

Neste contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo computacional para simulação multicorpos de um manipulador robótico planar de base flutuante disponível no Laboratório de Robótica e Sistemas do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSCar. A plataforma é composta por um manipulador robótico planar e uma mesa de ar para flutuação do conjunto que emula os efeitos da ausência de gravidade. Este trabalho visa contribuir com a atualização e melhoria do sistema de controle dinâmico atual do manipulador. Espera-se que, com base nos resultados da simulação, seja possível o desenvolvimento de um sistema de controle mais preciso para otimizar o desempenho do sistema, maximizando a precisão e a segurança do movimento.

2. METODOLOGIA

Para atender os objetivos da pesquisa, inicialmente foi realizado um treinamento da parte de modelagem computacional multicorpos utilizando o *software* NX12 da Siemens. O treinamento foi iniciado com problemas simples de solução analítica conhecida para que as habilidades sobre os principais passos do processo de simulação multicorpos como a geração de *links* e juntas, imposição de movimentos e pós-processamento de resultados fossem adquiridas.

Em seguida, foram gerados os modelos sólidos dos componentes que compõe o manipulador robótico utilizando o módulo CAD do *software* NX12-Siemens. As modelagens realizadas neste trabalho baseiam-se em um manipulador robótico que é composto por uma base livre (sem atuação) e juntas rotativas conectadas por elos, conforme ilustrado na Fig. 2.

O sistema foi projetado por Pazelli (2011) para permitir que o conjunto seja modular e apresente uma quantidade variável de braços, elos e juntas. A Fig. 3 ilustra algumas combinações de montagem possíveis do manipulador.

A base abriga a eletrônica de comando e alimentação do manipulador sendo a comunicação do sistema com um computador remoto por padrão sem fio. Um sistema de controle básico em malha fechada permite a definição do plano de movimentação do efetuador e o acompanhamento de trajetória do manipulador robótico. As juntas contêm os motores responsáveis pela movimentação dos elos e também *encoders* para o monitoramento interno de posição sendo capazes de fazer a leitura da posição angular dos eixos. As informações coletadas pelos *encoders* são enviadas para o módulo de controle do sistema. Além do monitoramento interno, a posição do manipulador também é realizada pela captura de imagens realizadas por uma câmera posicionada sobre a plataforma experimental. Atualmente, a plataforma é tema de estudos para investigar estratégias de controle servo-visual aplicadas a manipuladores de base livre na execução de tarefas

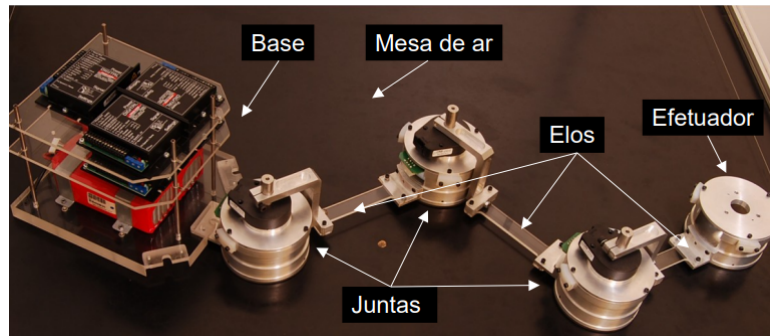


Figura 2. Manipulador robótico planar montado com 1 braço e 3 juntas

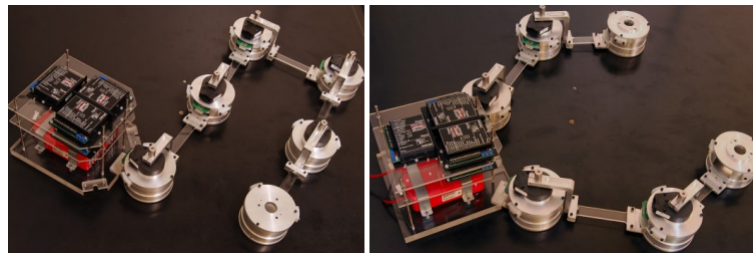


Figura 3. Manipulador robótico planar: (a) 1 braço e 5 juntas; (b) 2 braços e 2 juntas

de rastreamento, captura e re-orientação de alvos espaciais.

Após a modelagem dos componentes individuais foram gerados os modelos de conjunto com a montagem completa do manipulador em sua configuração de teste. O modelo CAD fornece valores das propriedades de massa do conjunto (centro de gravidade e momento de inércia de massa) que podem ser comparados e eventualmente atualizados em relação aos valores utilizados pelo atual *software* de controle do manipulador.

Em seguida, foi desenvolvido o modelo multicorpos do manipulador utilizando o módulo *Motion* do *software* NX12-Siemens. Nesta etapa, o modelo CAD do manipulador, já com suas propriedades de massa definidas e ajustadas, foi configurado para gerar os *links* e as juntas rotativas. A flutuação do conjunto sobre a mesa de ar foi representada por uma junta deslizante, permitindo a movimentação das bases apenas no plano de atuação da mesa e ignorando os efeitos gravitacionais. Os valores de torque nas juntas, fornecidos pelo *software* de controle ASCME (Ambiente de Simulação e Controle de Manipuladores Espaciais), para uma trajetória de movimentação pré-definida do braço, foram utilizados como carregamentos de entrada e atribuídos às juntas de revolução do modelo permitindo a movimentação do sistema.

Os principais resultados analisados foram a evolução da trajetória do manipulador (posição contra tempo), assim como velocidade e aceleração das juntas do mesmo e a compatibilidade dos resultados entre o *software* de controle ASCME e o modelo computacional multicorpos do *software* NX 12-Siemens.

3. RESULTADOS

A seguir são apresentados os principais resultados e discussões obtidos pelos modelos de simulação multicorpos. Inicialmente são apresentados resultados dos estudos iniciais de mecanismos simples de solução analítica conhecida. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos para o manipulador robótico planar de base flutuante.

3.1 Mecanismo quatro barras

O primeiro sistema modelado no *software* NX 12 corresponde ao mecanismo quatro barras ilustrado na Fig. 4. Os comprimentos de cada componente são apresentados na Tab. 1, sendo o Link 01 a barra fixa e os demais seguindo a numeração no sentido horário.

Tabela 1. Medidas dos links do mecanismo de barras

Links	Comprimento
Link 01	180 mm
Link 02	80 mm
Link 03	160 mm
Link 04	120 mm

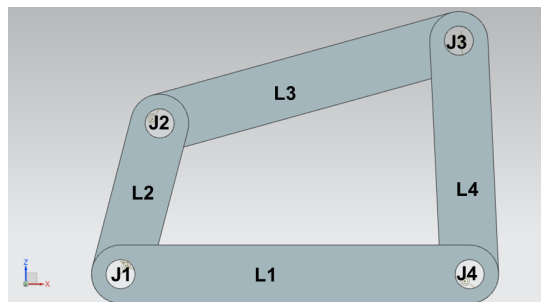


Figura 4. Mecanismo de 4 Barras modelado

O mecanismo foi submetido a imposição de uma velocidade angular de $90 [^\circ/s]$ na junta entre o Link 01 e o Link 02. Como resposta foi obtida a aceleração angular da junta que liga o Link 03 e o Link 04 em função da posição angular do Link 01. A comparação da aceleração angular da junta em análise e os valores teóricos obtidos pela abordagem clássica de mecanismos, conforme Norton (2010), são ilustrados na Fig. 5. Pode-se observar que os resultados do modelo multicorpos e analítico são praticamente os mesmos indicando que o procedimento adotado de modelagem foi adequado.

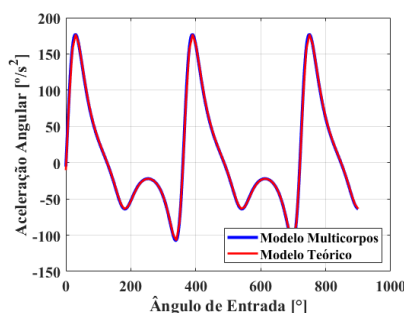


Figura 5. Comparação entre os dados do mecanismo de 4 barras simulado e o teórico

3.2 Mecanismo biela-manivela

O segundo sistema modelado representa o mecanismo biela-manivela ilustrado na Fig. 6. As dimensões adotadas para os componentes são apresentadas na Tab. 2.

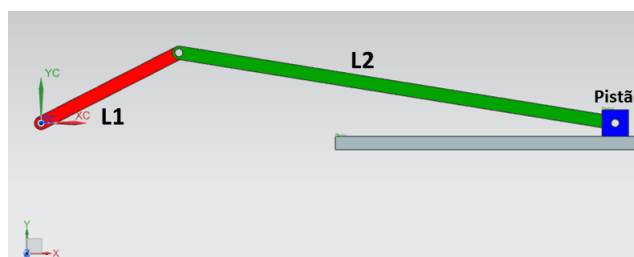


Figura 6. Mecanismo Biela-Manivela-Pistão modelado

Tabela 2. Dimensões dos links do mecanismo biela-manivela

Link	Nome popular	Comprimento
Link 01	Manivela	350 mm
Link 02	Biela	1000 mm

Neste caso, o carregamento aplicado foi o movimento rotativo da biela com uma velocidade angular constante de $180 [^\circ/s]$. O pistão foi apoiado em uma pista sem atrito para permitir seu movimento de translação. Como resultados foram coletados dados de posição, velocidade e aceleração do pistão. A Fig. 7 mostra a comparação dos resultados do modelo e do teórico. Novamente, pode-se observar a boa correlação entre as respostas.

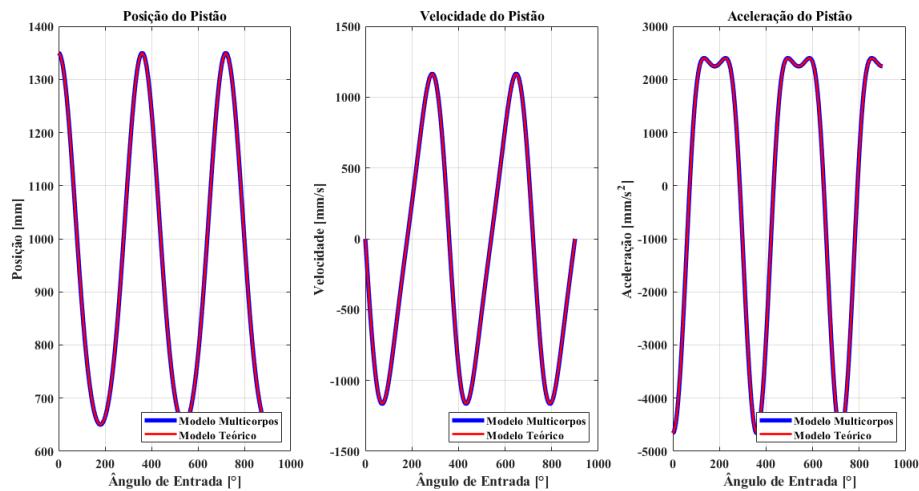


Figura 7. Gráfico de comparação entre os dados teóricos e os simulados

3.3 Manipulador robótico

O modelo elaborado para o manipulador robótico planar de base flutuante é ilustrado na Fig. 8. A configuração adotada para o estudo apresenta um braço com duas juntas, configuração esta denominada de UARM-E, que parte de uma posição inicial até uma posição final pré-definida.

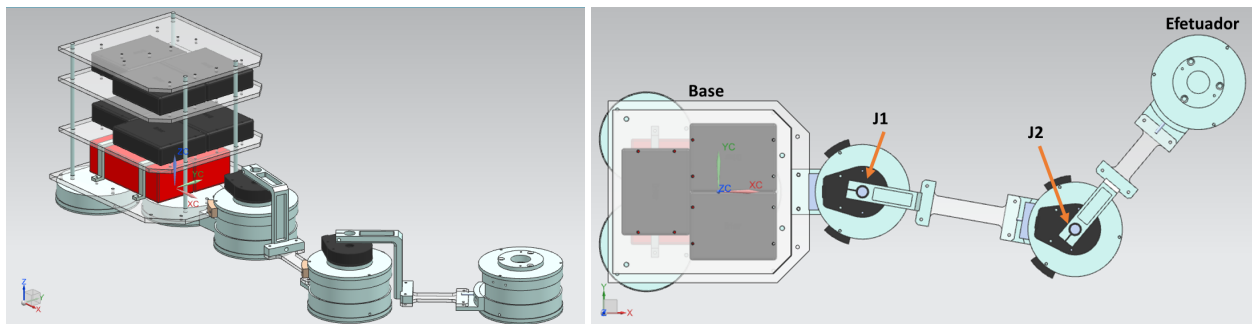


Figura 8. Vista isométrica do robô e sua respectiva vista superior com a identificação de seus componentes

A posição final desejada para as juntas, apresentada na Fig. 9, foram definidas no *software* de controle ASCME. Neste caso, a posição inicial do braço é alinhada com o eixo x .

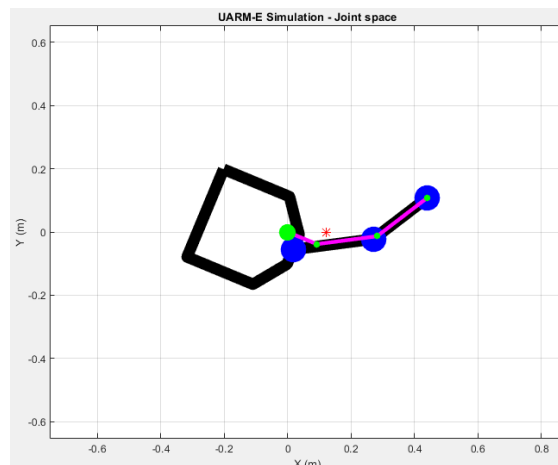


Figura 9. Posições desejadas das juntas - Software ASCME

A partir destas posições, o *software* determinou as curvas de torques necessárias para que as juntas cumprissem a trajetória de movimento até a posição final planejada (Fig. 10). Os dados das curvas de torques foram aplicadas como

carregamentos nas suas respectivas juntas do modelo.

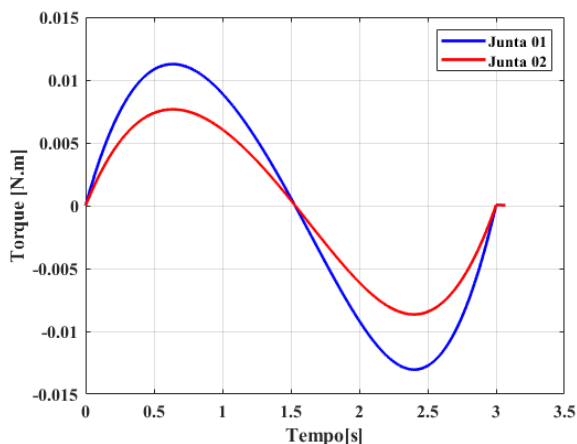


Figura 10. Gráfico dos torques necessários a se aplicar nas juntas do manipulador

Na Fig. 11 são mostradas a comparação entre os resultados fornecidos pelo ASCME, na configuração UARM-E, e pela simulação multicorpos realizada pelo NX 12-Siemens para posicionamento e velocidade, respectivamente, da primeira junta.

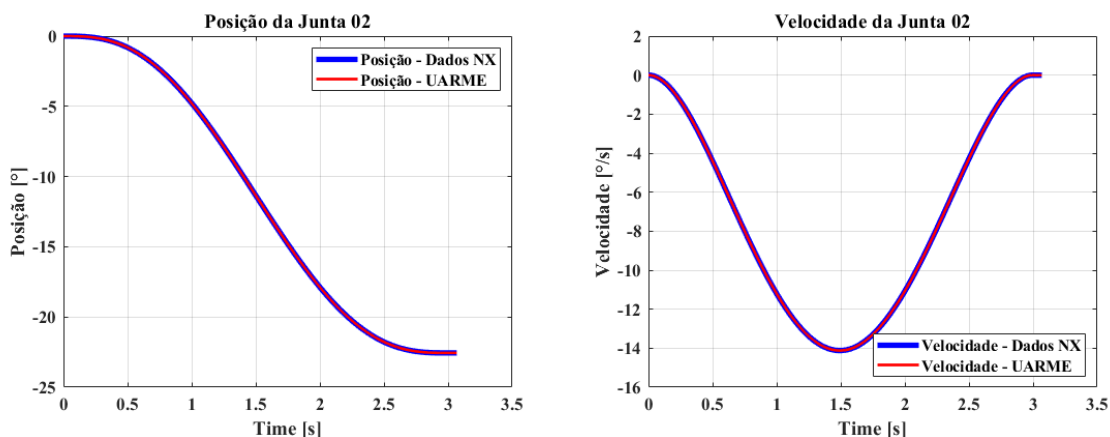


Figura 11. Resultados: Simulação multicorpos NX 12 e Software ASCME na configuração UARME - Junta 01

Na Fig. 12 são mostradas a comparação entre os resultados fornecidos pelo UARME e pela simulação multicorpos para posicionamento e velocidade, respectivamente, da segunda junta.

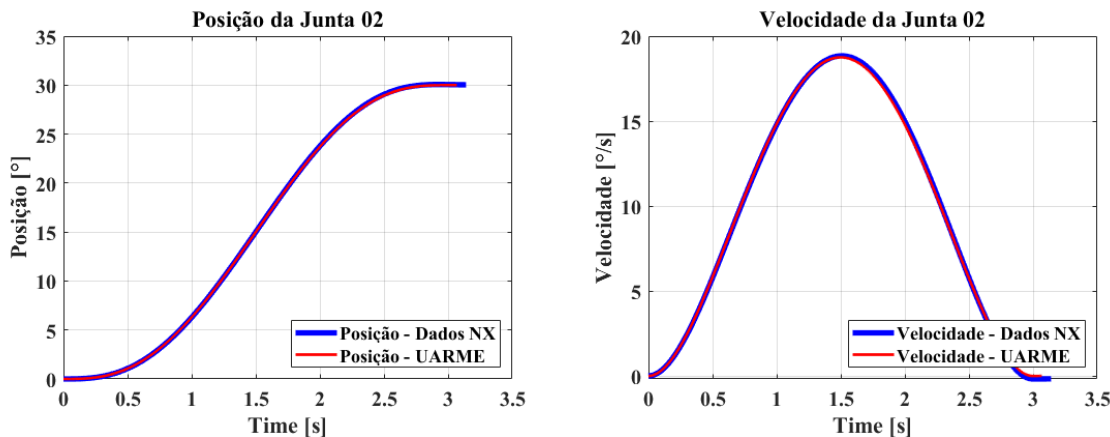


Figura 12. Resultados: Simulação multicorpos NX 12 e Software ASCME na configuração UARME - Junta 02

O resultado visual da simulação pode ser verificado na Fig. 13, onde é apresentado a evolução do posicionamento do robô com o tempo.

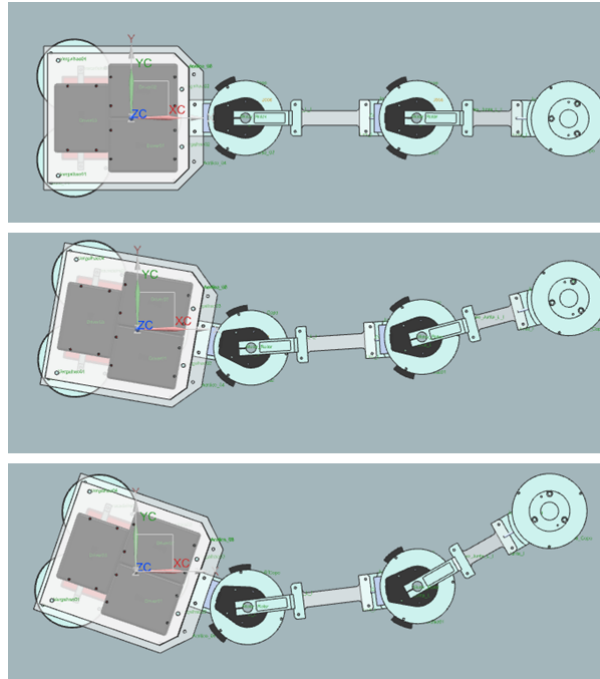


Figura 13. Evolução do posicionamento do robô com o tempo

4. CONCLUSÕES

A utilização da simulação multicorpos para a investigação de sistemas mecânicos representa uma importante ferramenta de análise, tanto em problemas simples, como mecanismos de barras, quanto em problemas mais complexos, como um manipulador robótico planar de base flutuante.

Os resultados obtidos para as simulações multicorpos, através do *software* NX 12, do mecanismo quatro barras e do sistema biela-manivela apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com a resposta analítica fornecida pela teoria clássica de mecanismos.

No caso do manipulador robótico planar de base flutuante, o modelo foi capaz de capturar a movimentação das juntas e da base a partir dos torques de entrada fornecidos pelo *software* de controle ASCME para uma trajetória pré-definida.

Os resultados indicaram que a previsão de movimentação do modelo multicorpos realizada pelo *software* NX 12 é adequada quando comparada com a resposta do *software* de controle ASCME. Adicionalmente, animações visuais permitiram uma compreensão mais detalhada de posicionamento e velocidade das juntas a partir das curvas de torques que fornecidas pelo *software* de controle.

A partir disso, curvas com dados de aceleração poderão ser geradas para uma análise de esforços nas juntas, podendo prever, ou até evitar, possíveis falhas de uma determinada trajetória.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) e Elétrica (DEE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pelo suporte e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do trabalho (Projeto 407721/2022-3).

6. REFERÊNCIAS

- Banerjee, A.K., 2003. "Contributions of multibody dynamics to space flight: a brief review". *Journal of guidance, control, and dynamics*, Vol. 26, No. 3, pp. 385–394.
- Christidi-Loumpasefski, O.O. and Papadopoulos, E., 2023. "On the parameter identification of free-flying space manipulator systems". *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 160, p. 104310.
- Kaigom, E.G., Priggemeyer, M. and Rossmann, J., 2014. "3d advanced simulation approach to address energy consumption issues of robot manipulators-an erobotics approach". In *ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics*. VDE, pp. 1–6.
- Norton, R.L., 2010. *Cinémática e dinâmica dos mecanismos*. AMGH Editora.
- Papadopoulos, E., Aghili, F., Ma, O. and Lampariello, R., 2021. "Robotic manipulation and capture in space: A survey". *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 8, p. 686723.

- Pazelli, T.F.P.A., 2011. *Montagem e controle H Infinito não linear de manipuladores espaciais com base flutuante*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Rodrigues, G.S. and Pazelli, T.F., 2021. “Dynamic modeling and control optimization of free-floating dual-arm space robots in task space”. In *2021 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2021 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2021 Workshop on Robotics in Education (WRE)*. IEEE, pp. 168–173.
- Rouso, P. and Chhabra, R., 2022. “Workspace control of free-floating space manipulators with non-zero momentum on lie groups”. In *2022 American Control Conference (ACC)*. IEEE, pp. 3879–3884.
- Setterfield, T.P., McCormick, R., Kim, J. and Mukherjee, R., 2020. “Multibody simulation of remora cubesat docking to and pushing a spent rocket booster”. In *2020 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, pp. 1–12.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.