

ESTUDO DO ACOPLAMENTO DINÂMICO EM UM MANIPULADOR ROBÓTICO PLANAR DE BASE FLUTUANTE DURANTE CAPTURA DE ALVOS

Lucas dos Santos Keller, lucas.keller@estudante.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. Este trabalho investiga o acoplamento dinâmico de manipuladores robóticos planares com base flutuante durante operações de captura e reorientação de alvos. O objetivo principal é compreender o comportamento dinâmico desses sistemas e identificar desafios de controle, priorizando a segurança e a precisão operacional. A metodologia inclui revisão bibliográfica sobre robôs espaciais de dois braços, análise de diferentes configurações de manipuladores e simulações multicorpos para avaliar cenários diversos. Um aspecto crítico avaliado é a influência do centro de gravidade dos objetos capturados na trajetória e postura final do robô. Os resultados destacam os impactos da ausência de gravidade no desempenho do sistema e fornecem subsídios para futuras aplicações práticas em robótica espacial demonstrando a importância de prever o comportamento dinâmico para evitar instabilidades e garantir missões seguras. Conclui-se que a abordagem proposta contribui para o aprimoramento do projeto e controle de manipuladores espaciais, buscando a maior eficiência e precisão em operações complexas.

Palavras chave: Acoplamento Dinâmico. Base Flutuante. Captura de Alvo. Simulação Multicorpos

Abstract. This study investigates the dynamic coupling of planar robotic manipulators with floating bases during capture and reorientation operations of targets. The main objective is to understand the dynamic behavior of these systems and identify control challenges, prioritizing safety and operational precision. The methodology includes a literature review on two-arm space robots, analysis of different manipulator configurations, and multibody simulations to evaluate various scenarios. A critical aspect evaluated is the influence of the captured object's center of gravity on the robot's trajectory and final posture. The results highlight the impacts of microgravity on system performance and provide valuable insights for future practical applications in space robotics, demonstrating the importance of predicting dynamic behavior to avoid instabilities and ensure safe missions. It is concluded that the proposed approach contributes to the improvement of the design and control of space manipulators, aiming for greater efficiency and precision in complex operations.

Keywords: Dynamic Coupling. Floating-Base. Target Capture. Multibody simulation

1. INTRODUÇÃO

Sistemas robóticos utilizados no espaço podem contar com um ou mais braços articulados conectados a uma base que não está fixa, como no caso de satélites. Esses manipuladores são desenvolvidos para executar tarefas em órbita, incluindo manutenção de satélites e telescópios, apoio em missões de exploração planetária, remoção de lixo espacial e reparo de equipamentos espaciais (Papadopoulos et al., 2021). O uso desses dispositivos tem crescido consideravelmente em operações extraveiculares (EVAs), oferecendo uma alternativa segura que reduz a exposição direta dos astronautas aos perigos do ambiente espacial. A Fig. 1 mostra uma operação realizada pelo manipulador robótico Canadarm2, instalado na Estação Espacial Internacional (ISS).

O desempenho eficiente de manipuladores robóticos em missões espaciais depende diretamente de um sistema de controle preciso, essencial para garantir o sucesso das operações, como captura e expulsão de objetos, além de reduzir a possibilidade de danos aos sistemas envolvidos. A obtenção desse nível de controle requer o desenvolvimento de modelos dinâmicos avançados, capazes de representar o comportamento do sistema diante de perturbações típicas do ambiente espacial — um cenário caracterizado por microgravidade e condições extremas que afetam diretamente a resposta do manipulador — além de prever possíveis falhas em futuras trajetórias previamente traçadas e até mesmo do próprio sistema de controle.

Dentre os aspectos mais relevantes desses sistemas destaca-se o acoplamento dinâmico entre a base flutuante e os braços articulados, o que impõe desafios adicionais ao controle de movimento. Essa particularidade tem incentivado uma série de estudos voltados à formulação de modelos dinâmicos voltados ao controle de trajetória em manipuladores com base não fixa (Christidi-Loumpasefski and Papadopoulos, 2023; Rouso and Chhabra, 2022; Rodrigues and Pazelli, 2021).



Figura 1. Manipulador robótico Canadarm2

Nesse contexto, a simulação multicorpos surge como uma abordagem computacional estratégica para a análise do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos complexos. Essa técnica permite investigar o desempenho do manipulador em diferentes condições operacionais, possibilitando ajustes estruturais e de controle para maximizar sua eficiência (Setterfield *et al.*, 2020; Kaigom *et al.*, 2014; Banerjee, 2003). Com base em modelos matemáticos que descrevem elementos como articulações, elos e atuadores, essas simulações permitem prever trajetórias, forças atuantes, acelerações e velocidades ao longo do movimento, além de identificar regiões críticas que possam comprometer o funcionamento do sistema. Tais previsões são fundamentais tanto para otimizar o projeto do manipulador quanto para validar estratégias de controle antes de sua aplicação real.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de simulação multicorpos para um manipulador robótico planar com base flutuante, atualmente em operação no Laboratório de Robótica e Sistemas, vinculado ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFSCar. A proposta visa contribuir para o aprimoramento do sistema de controle existente, permitindo, por meio dos resultados da simulação, a elaboração de um controle mais preciso e robusto, com foco na otimização da performance e na segurança operacional do sistema.

2. METODOLOGIA

Com o intuito de atingir plenamente os objetivos estabelecidos nesta pesquisa, deu-se início a um processo sistemático de capacitação técnica voltado ao domínio das ferramentas computacionais associadas à modelagem e simulação multicorpos. Essa etapa inicial concentrou-se no aprendizado aprofundado do ambiente de simulação NX-12 Simcenter Motion, desenvolvido pela empresa Siemens, amplamente utilizado em análises de sistemas mecânicos complexos e amplamente reconhecido por sua precisão na representação de comportamentos dinâmicos. A fim de garantir uma base sólida de conhecimento, optou-se por iniciar os estudos com exemplos clássicos da engenharia mecânica, mais especificamente com a modelagem e simulação do mecanismo biela-manivela-pistão, um sistema amplamente documentado e com respostas analíticas bem definidas na literatura.

Essa abordagem metodológica inicial possibilitou a compreensão detalhada dos fundamentos que regem o funcionamento do software, permitindo o domínio dos procedimentos essenciais à modelagem multicorpos. Entre esses procedimentos, destacam-se: a criação de modelos geométricos (elos), a definição de juntas cinemáticas entre os componentes, a imposição de restrições de movimento, a aplicação de forças e torques, bem como a condução de simulações dinâmicas completas, seguidas da análise pós-processada dos resultados obtidos, como posições, velocidades e acelerações ao longo do tempo. Esse treinamento foi essencial para garantir a confiabilidade das simulações mais complexas realizadas nas etapas subsequentes da pesquisa.

Superada a fase inicial de familiarização com a ferramenta computacional, a investigação evoluiu para a modelagem de sistemas robóticos mais complexos, voltados especificamente para aplicações em ambientes espaciais. Para isso, foi utilizado o módulo CAD integrado ao NX-12, no qual foram construídos os modelos tridimensionais sólidos que representam, com precisão, os principais componentes físicos de manipuladores robóticos com base flutuante. Tais manipuladores são caracterizados por uma base livre de atuação, sobre a qual estão acopladas juntas rotativas conectadas por elos rígidos, possibilitando diferentes configurações estruturais de acordo com a tarefa a ser desempenhada.

A fundamentação conceitual e estrutural desses manipuladores se baseia no sistema originalmente projetado por Pazelli (2011), que propôs uma plataforma modular, adaptável e expansível, concebida para estudos de dinâmica e controle de robôs em microgravidade. A modularidade proposta permite a montagem de manipuladores com número variável de braços, elos e articulações, o que amplia significativamente as possibilidades de experimentação e análise. Essa flexi-

bilidade é ilustrada por meio de diferentes configurações de montagem, conforme evidenciado nas Fig. 2 e Fig.3, que demonstram exemplos de sistemas com uma e duas estruturas de braços interligadas a uma base comum.

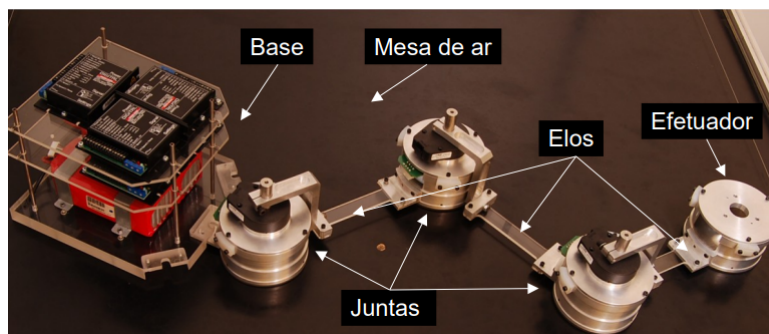


Figura 2. Manipulador robótico planar montado com 1 braço e 3 juntas

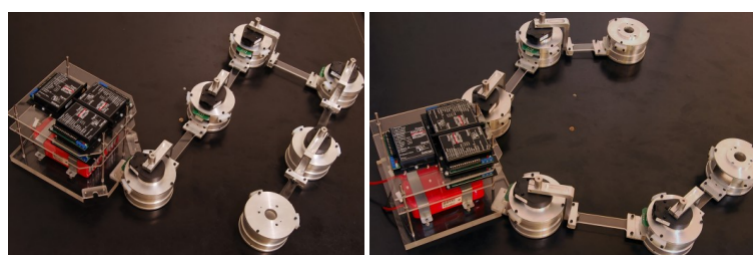


Figura 3. Manipulador robótico planar: (a) 1 braço e 5 juntas; (b) 2 braços e 2 juntas

A partir disso, foi desenvolvida uma série de modelos computacionais representando diferentes configurações do manipulador, iniciando-se pelo modelo de um braço único — denominado Uno-Arm —, o qual foi inteiramente construído no ambiente NX-12 com base no sistema modular de Pazelli, 2011. Após a modelagem tridimensional do Uno-Arm, este foi associado ao ambiente de controle desenvolvido no software ASCME (Ambiente de Simulação e Controle de Manipuladores Espaciais), ferramenta complementar construída sobre a plataforma MATLAB/Simulink. Essa integração permitiu a simulação de comportamentos programados, tanto para fins de movimentação controlada do manipulador quanto para o estudo de estratégias de rejeição de objetos indesejados ou perigosos que possam ameaçar a operação do sistema em órbita.

Na etapa seguinte, foi concebido o modelo do Duo-Arm, um manipulador robótico com dois braços articulados, concebido com o propósito de simular missões de captura ativa de objetos em órbita, como satélites, peças soltas ou detritos espaciais. Esse sistema apresenta maior complexidade cinemática e dinâmica, o que exigiu um refinamento nas estratégias de modelagem e na análise dos movimentos gerados. O Duo-Arm foi projetado para operar em condições de microgravidade, e o modelo computacional correspondente foi configurado para refletir as características dinâmicas reais da operação espacial, incluindo graus de liberdade compatíveis com os movimentos observados em robótica orbital.

Esse conjunto de atividades — que envolve desde o domínio inicial das ferramentas computacionais até a modelagem e simulação de manipuladores robóticos avançados — proporcionou uma compreensão abrangente do comportamento dinâmico desses sistemas quando submetidos às condições do espaço. As análises realizadas ao longo do processo possibilitaram a identificação de aspectos críticos relacionados ao desempenho dinâmico e eficiência do controle, contribuindo significativamente para a formulação de estratégias de controle mais robustas e otimizadas.

3. RESULTADOS

A seguir são apresentados os principais resultados e discussões obtidos pelos modelos de simulação multicorpos para o manipulador robótico planar de base flutuante e algumas atividades atribuídas ao mesmo.

3.1 Manipulador Robótico Uno-Arm: Configuração Final e Expulsão de Objetos

Após a conclusão da montagem final do manipulador robótico Uno-Arm, representado na Fig. 4, foram atribuídas às suas juntas de rotação, como entrada, as curvas de torque obtidas por meio do software ASCME. Esse procedimento teve como objetivo determinar a posição e a orientação das juntas, bem como do efetuador final, conforme ilustrado na Fig. 5.

Com base nas curvas de torque aplicadas e na configuração final obtida para o manipulador, foi possível atribuir a esta disposição funcionalidade voltada à rejeição de objetos indesejados que possam representar ameaça à integridade de satélites ou mesmo de estações espaciais. Para simular tal cenário, foi modelado um objeto com massa de 1 kg — valor

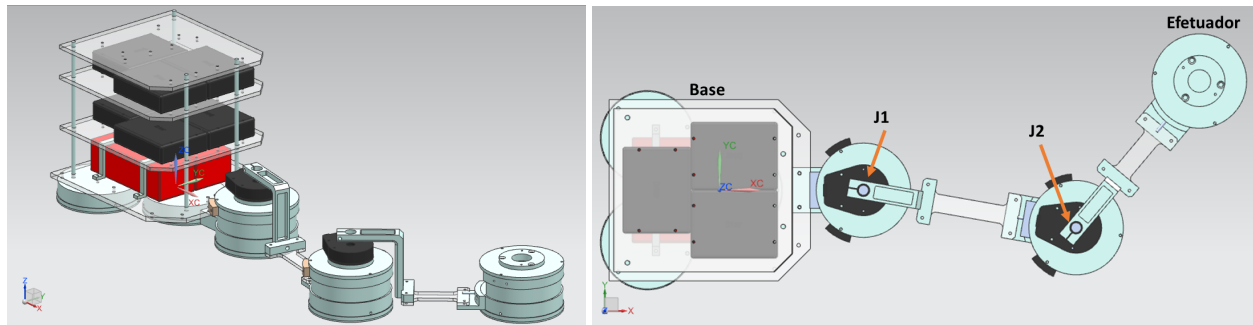


Figura 4. Vista isométrica do robô e sua respectiva vista superior com a identificação de seus componentes

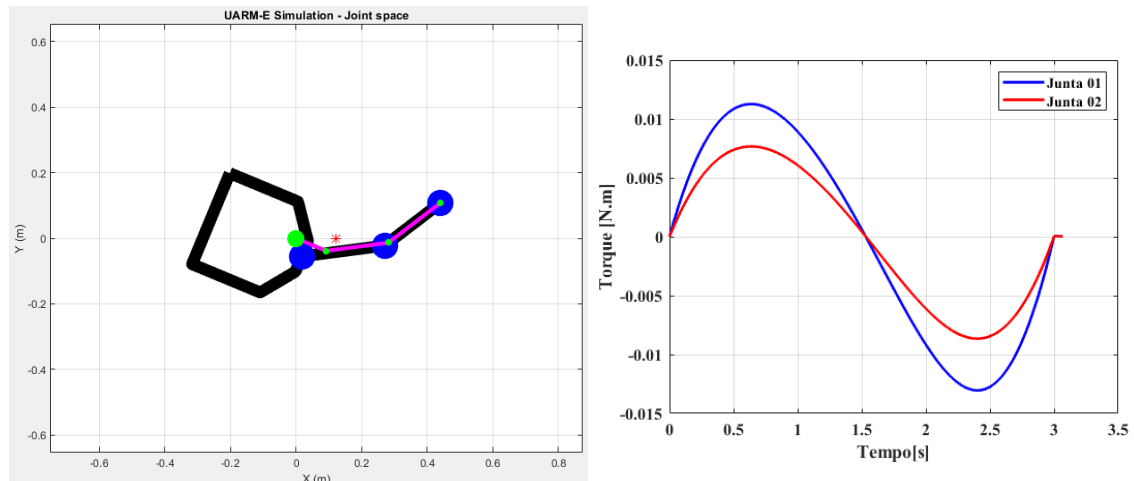


Figura 5. (a)Configuração final do manipulador para as curvas de torques (b) Curvas de torque - ASCME

próximo à massa do efetuator — com o intuito de avaliar a influência de uma perturbação externa sobre o sistema. A comparação visual entre a configuração final do manipulador na ausência e na presença desse objeto pode ser observada nas Fig. 6 e Fig. 7, respectivamente.

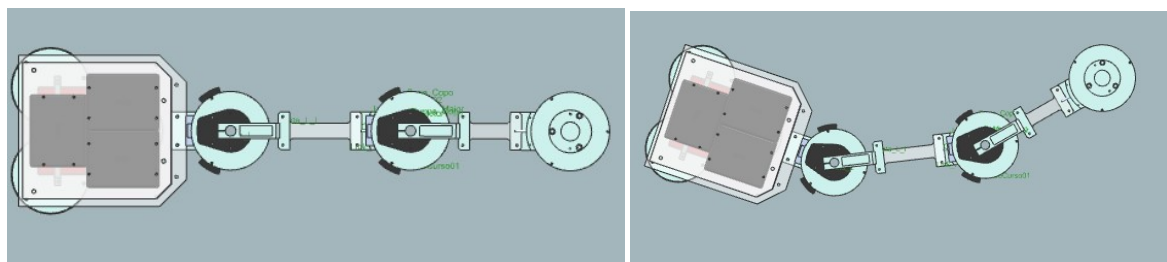


Figura 6. Configuração final do Manipulador com as curvas de torque - Simulação Multicorpos

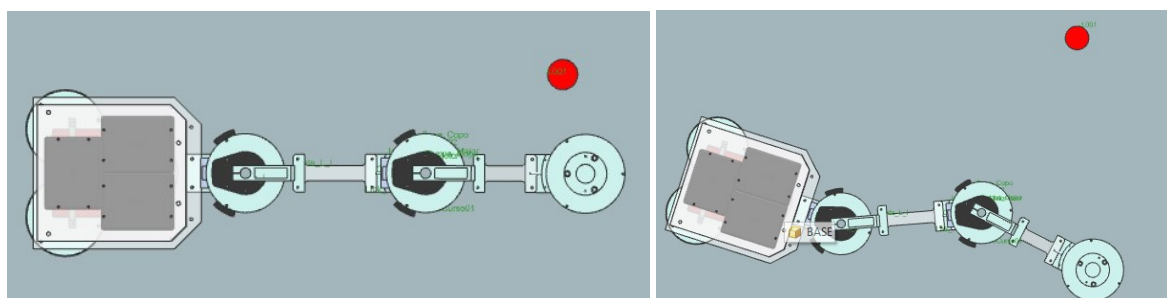


Figura 7. Configuração final após a colisão entre efetuator e objeto alvo

Apresenta-se a seguir uma análise comparativa por meio de representações gráficas, ilustradas na Fig. 8, contemplando os deslocamentos angulares das juntas do manipulador robótico em torno de seus respectivos eixos de rotação. Tal análise tem como propósito examinar as variações nas respostas dinâmicas do sistema quando submetido a diferentes condições

de perturbação, mantendo-se constante uma trajetória de referência previamente definida. Dessa forma, é possível avaliar o comportamento do manipulador frente a cenários distintos.

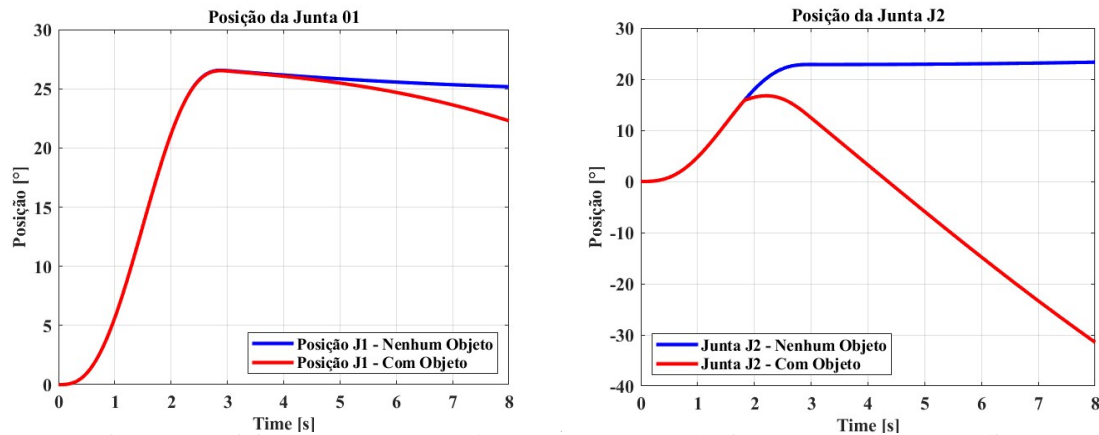


Figura 8. Posicionamento Angular das Juntas em torno do eixo de rotação após a colisão

A discrepância observada entre as curvas de cada gráfico ocorre porque o sistema recebe uma determinada quantidade de energia e, por se tratar de uma base flutuante, essa energia não é dissipada adequadamente. Conforme ilustrado na Fig. 8, a junta 2 é a mais afetada por essa conservação de energia, o que leva a uma instabilidade significativa no manipulador robótico. Essa instabilidade pode ser mitigada por meio da implementação de um sistema de controle eficiente, cujo objetivo seria manter a junta em uma posição angular específica, garantindo assim um regime permanente estável.

3.2 Manipulador Robótico Duo-Arm: Processo de Captura com mudança na localização do CG

A configuração Dual-Arm tem como principal finalidade a realização da captura de objetos localizados no espaço. Para fins de modelagem, adota-se, por conveniência, a suposição de que o Centro de Gravidade (CG) encontra-se no centro geométrico do objeto. No entanto, essa condição raramente se concretiza, uma vez que tais objetos apresentam distribuições de massa não uniformes, decorrentes de suas geometrias específicas. Com o intuito de viabilizar a simulação do processo de captura, foi realizada a modelagem de um desses objetos, com 6,5Kg, no software Siemens NX-12 juntamente com a definição do posicionamento do Centro de Gravidade, conforme ilustrado na Fig. 9. Nessa modelagem, foram incorporados ressalto com o objetivo de proporcionar um melhor acoplamento entre o efetuator do manipulador robótico e o objeto espacial. Ressalta-se, contudo, que o enfoque deste estudo não está no mecanismo de acoplamento em si, mas sim na influência da posição do CG do alvo no processo de captura.

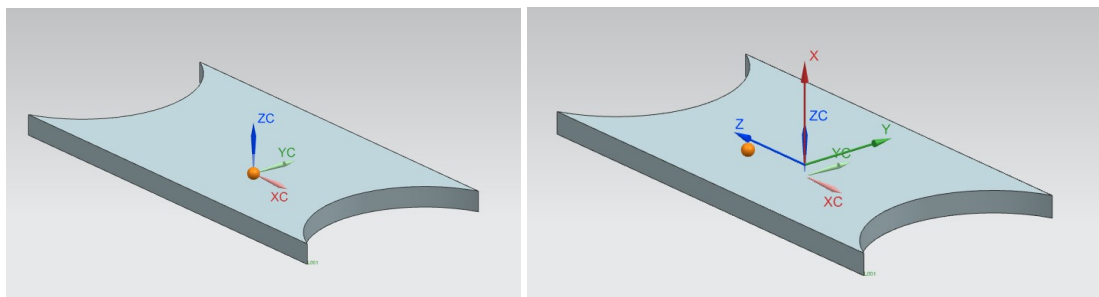


Figura 9. Localização do CG na modelagem do objeto alvo com ressalto

Ao simular a ação de captura do alvo considerando duas diferentes configurações — uma com o Centro de Gravidade (CG) posicionado no centro geométrico do objeto e outra com o CG deslocado — é possível observar, de forma clara e visual, comportamentos distintos por parte do Manipulador Robótico de Base Flutuante. Essas diferenças são evidenciadas na Fig. 10, na qual se percebe que a posição do CG influencia diretamente a dinâmica do sistema durante o processo de aproximação e captura.

Quando o CG está centralizado, o manipulador apresenta uma trajetória mais estável e controlada, refletindo um equilíbrio mais favorável na aplicação de forças e torques. Em contrapartida, com o CG deslocado, surgem variações na resposta do manipulador, evidenciadas por oscilações e ajustes adicionais exigidos pelo sistema de controle para compensar o desequilíbrio introduzido. Tal comportamento reforça a relevância da análise precisa da distribuição de massa dos objetos a serem manipulados, especialmente em cenários de microgravidade, onde pequenas variações podem impactar significativamente a eficiência e a segurança da operação.

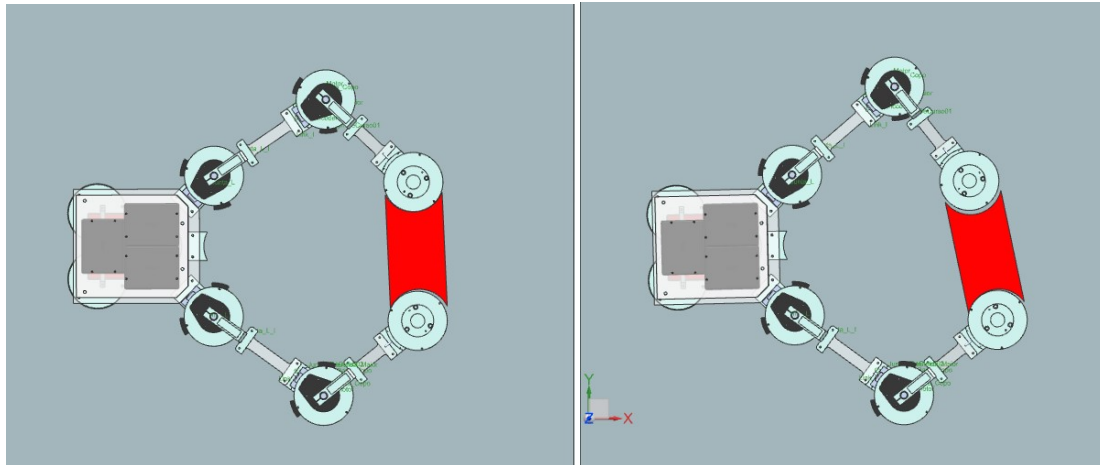


Figura 10. Configuração de Captura para CG no centro geométrico (à esquerda) e para o CG deslocado (à direita)

Conforme ilustrado na Fig. 11, observa-se que o deslocamento do Centro de Gravidade (CG) do alvo provocou uma resposta significativa por parte do Manipulador Robótico, especialmente no que se refere às rotações de suas juntas. Essa alteração dinâmica impacta diretamente a trajetória inicialmente prevista, que foi simulada sob determinadas simplificações, como a suposição de um CG centralizado.

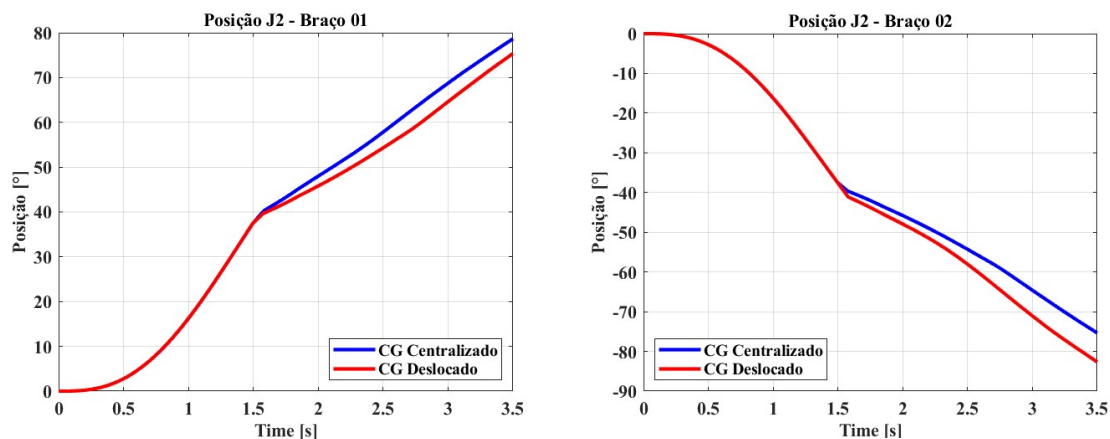


Figura 11. Gráficos de Posicionamento angular das Juntas após a ação de captura do objeto alvo

Além disso, algumas configurações de posicionamento do manipulador, que seriam estáveis e viáveis sob a hipótese de simetria de massa, demonstram-se ineficientes ou mesmo instáveis quando a distribuição de massa do objeto carregado é assimétrica. Esse comportamento evidencia a necessidade de uma modelagem mais precisa, que incorpore de maneira adequada a localização do centro de gravidade (CG), uma vez que essa consideração é fundamental para assegurar a robustez e a confiabilidade das estratégias de controle em ambientes espaciais, onde distúrbios dinâmicos podem comprometer significativamente o desempenho do sistema.

4. CONCLUSÕES

As simulações multicorpos configuram-se como uma ferramenta essencial para a investigação de problemas em engenharia, sendo amplamente aplicáveis tanto a mecanismos clássicos quanto a sistemas mais complexos, como os Manipuladores Robóticos. Sua utilização permite uma análise detalhada do comportamento dinâmico de sistemas mecânicos em diferentes condições operacionais, contribuindo significativamente para o aprimoramento de projetos e estratégias de controle.

No contexto do Manipulador Uno-Arm, o uso dessa abordagem possibilita a previsão de possíveis configurações de posicionamento do robô no plano de análise, tanto antes quanto após eventuais colisões com objetos espaciais. Além disso, a simulação permite estimar a trajetória desses objetos após o contato, contribuindo para o planejamento de manobras e para a mitigação de riscos operacionais. Ressalta-se ainda que a massa do objeto-alvo exerce influência direta sobre o comportamento rotacional das juntas do manipulador, especialmente em situações onde há uma elevada discrepância entre as massas envolvidas, o que pode comprometer a precisão e a estabilidade do sistema.

No que diz respeito à aplicabilidade da configuração Dual-Arm, voltada para a captura de objetos no espaço, o prin-

cial foco da análise foi a variação na posição do Centro de Gravidade (CG) do alvo. Observou-se que, dependendo da distribuição de massa do objeto, tanto a configuração dos braços do manipulador quanto o comportamento da base flutuante sofrem alterações significativas quando comparados a cenários idealizados, nos quais o CG é considerado centralizado. Essa diferença evidencia a necessidade de modelagens mais realistas, que levem em conta as assimetrias inerentes à geometria e distribuição de massa dos corpos manipulados.

A partir das simulações realizadas, é possível obter curvas representativas da variação angular das juntas em função do tempo, o que permite uma análise aprofundada do comportamento do mecanismo ao longo da operação. Tais dados são valiosos não apenas para entender a dinâmica do sistema, mas também para prever — e, em certos casos, evitar — possíveis falhas de trajetória, contribuindo para a confiabilidade e eficiência das operações em ambiente de microgravidade.

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 robotics approach”. In *ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics*. VDE, pp. 1–6.
- 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.