

MODELAGEM DINÂMICA 6-DOF DE UM VEÍCULO DE SUPERFÍCIE DO TIPO CATAMARÃ EM MISSÕES COLABORATIVAS

ALINE DA GRAÇA GOUVÊA TIMM¹; RÉGIS SPEROTTO DE QUADROS²;

¹Universidade Federal de Pelotas 1 – alinetimm1510@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas 1 – 99quadros@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O crescente avanço dos veículos não tripulados têm possibilitado a execução de tarefas complexas em ambientes de difícil acesso ou perigosos. Neste contexto, os Veículos de Superfície Não Tripulados (USVs) se destacam como plataformas robustas para operações marítimas, enquanto os Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs) oferecem agilidade na coleta de dados aéreos. O principal problema abordado neste trabalho é a autonomia de voo severamente limitada dos UAVs, que restringe seu alcance em missões oceânicas. A solução proposta é um sistema colaborativo, onde um USV tipo catamarã atua como uma plataforma móvel de lançamento e recuperação, estendendo drasticamente a capacidade operacional do UAV.

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento e a análise de um modelo matemático em seis graus de liberdade (6-DOF) para um Veículo de Superfície Não Tripulado (USV) do tipo catamarã, visando avaliar seu comportamento como plataforma de pouso e decolagem para um Veículo Aéreo Não Tripulado (UAV).

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento do modelo matemático seguiu o formalismo vetorial de Newton-Euler, que relaciona as forças e momentos externos com a aceleração linear e angular do corpo. Este formalismo foi aplicado a um modelo de 6 graus de liberdade (6-DOF) — abrangendo os movimentos de *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* e *yaw* — conforme a convenção da SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers), detalhada em Fossen (2021). Primeiramente, os parâmetros físicos e inerciais do USV, como massa, centro de gravidade, dimensões e a matriz de inércia do corpo rígido (MRB), foram extraídos com precisão de um modelo tridimensional detalhado, desenvolvido no software CAD Fusion 360, utilizando suas ferramentas de análise de propriedades de massa.

Sendo assim, o modelo dinâmico padrão para veículos marinhos, consolidado por Fossen (Fossen, 2021), estende as equações de Newton-Euler para incluir os termos hidrodinâmicos, é dado por:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

Posteriormente, cada termo da equação dinâmica foi modelado, incluindo a matriz de massa adicionada hidrodinâmica (MA), as matrizes de amortecimento linear e quadrático (D) e o vetor de forças de restauração hidrostática ($g(\eta)$). Para a estimativa dos coeficientes hidrodinâmicos, que dependem diretamente da geometria do casco, foram utilizadas fórmulas empíricas bem estabelecidas na literatura de arquitetura naval, conforme discutido por autores como Faltinsen (2010) e Molland, Turnock e Hudson (2017). Esta abordagem foi adotada por sua validade e eficiência computacional para a fase de análise passiva.

Finalmente, o modelo não linear completo foi implementado em um ambiente de simulação em Python, utilizando bibliotecas como NumPy para as operações matriciais e SciPy para a integração numérica das equações de movimento. A simulação analisou a resposta passiva do USV aos cenários de pouso e decolagem de um UAV de 10 kg.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados da simulação concentra-se nos dois cenários operacionais mais críticos para a missão colaborativa.

Complete 6-DOF USV Response: Drone Takeoff

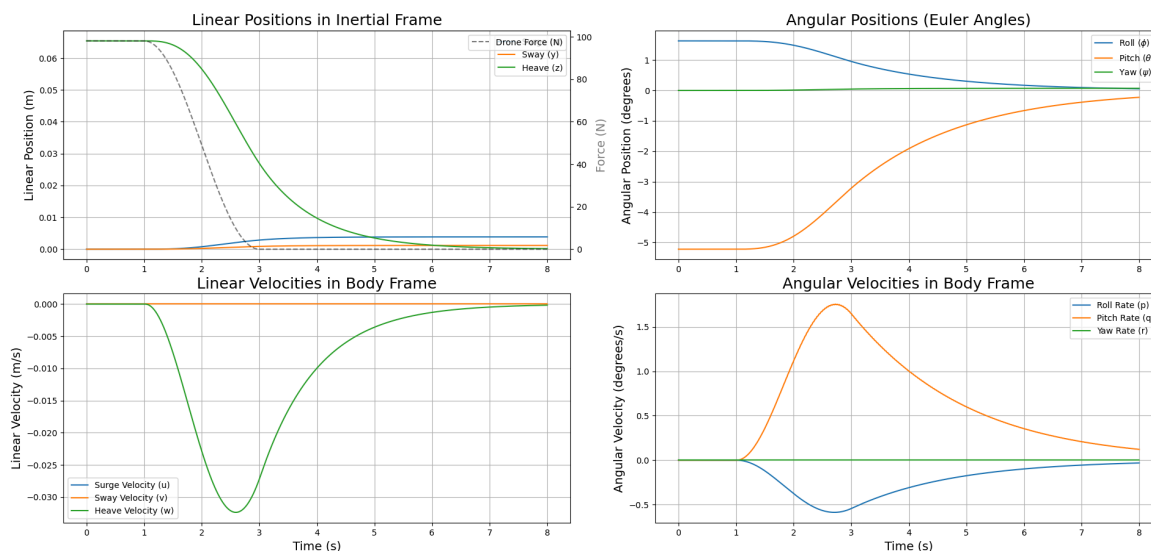


Figura 1 - Dinâmica do USV durante a decolagem do drone. Fonte: Os autores.

Complete 6-DOF USV Response: Drone Landing

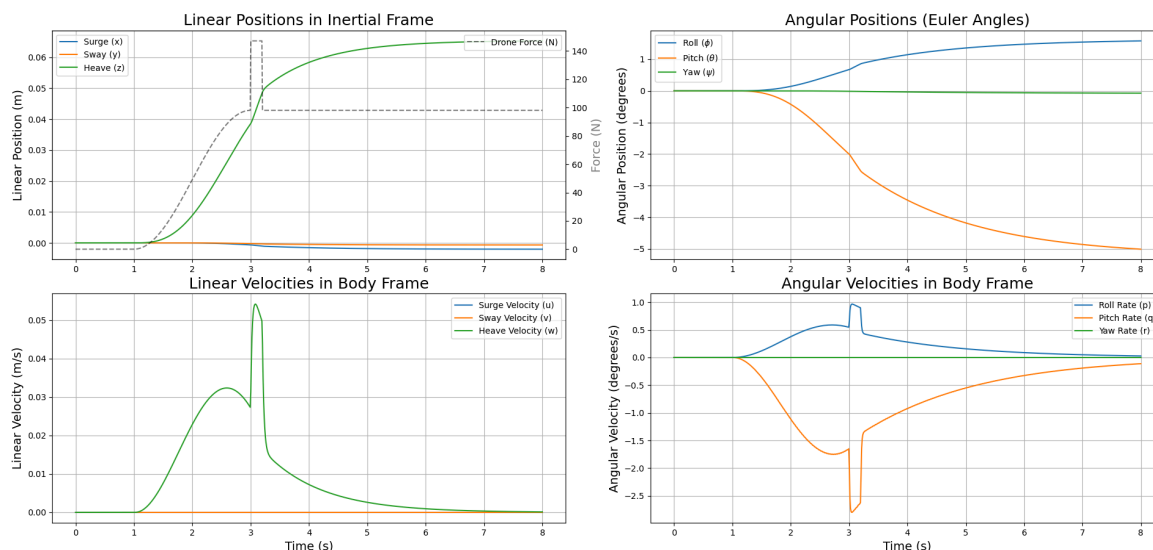


Figura 2 - Dinâmica do USV durante o pouso do drone. Fonte: Os autores.

No cenário de pouso, a simulação demonstra que, sob a carga estática do UAV, o USV atinge um novo estado de equilíbrio de forma estável e bem amortecida. Os resultados quantificam um afundamento de 6,4 cm e, devido à carga descentralizada, a criação de uma superfície de pouso permanentemente inclinada, com -4,6 graus de arfagem e +1,5 graus de rolagem. Este resultado é de suma importância, pois define um requisito claro para o sistema de controle do UAV, que deve ser capaz de pousar com segurança em uma plataforma com inclinação previsível.

O cenário de decolagem revelou dinâmicas mais complexas. Antes do UAV deixar o convés, o efeito de *downwash* gerou um pico de força descendente de quase 140 N, um aumento de 40% em relação ao peso do drone. Este fenômeno induziu um "mergulho pré-decolagem", no qual a inclinação de arfagem do USV piorou para -5,4 graus. Após a decolagem, a plataforma exibiu um "salto" seguido de oscilações bem amortecidas, indicando um curto tempo de assentamento (*settling time*), o que é desejável para que o USV possa iniciar sua próxima tarefa rapidamente. A quantificação desses efeitos é essencial, pois a estabilidade da plataforma durante a decolagem é um fator crítico para a segurança da missão, como apontado em estudos de sistemas cooperativos por WANG et al. (2022).

4. CONCLUSÕES

Sendo assim, a principal contribuição deste trabalho é a formulação e análise de um modelo matemático em 6-DOF especializado para um USV catamarã, focado em sua aplicação como plataforma para operações com UAVs. O modelo se mostrou capaz de prever e quantificar com sucesso os fenômenos dinâmicos que ocorrem durante as manobras de pouso e decolagem, como a inclinação estática e o impacto do efeito de *downwash*. A inovação do trabalho reside na parametrização detalhada do modelo com dados de CAD e na análise

focada nas implicações diretas para a segurança e viabilidade de missões colaborativas.

Uma evolução natural deste trabalho são ensaios de campo que possam validar e contribuir ainda mais com o modelo sugerido, transformando o modelo em uma ferramenta de simulação validada, servindo como base para o projeto e teste de futuros sistemas de controle.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FOSSSEN, T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. New York: Wiley, 2011.

FOSSSEN, T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. 2. ed. John Wiley & Sons, 2021.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. *Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

WANG, H. L. et al. Cooperative path following control of UAV and USV cluster for maritime search and rescue. *Chinese Journal of Ship Research*, v.17, n.5, p.157-165, 2022.

ZHU, H.; XU, C.; LIU, X. Model of UAV and Downwash for Multi-UAV Path Planning. In: AIAA SCITECH 2022 FORUM, 2022. Anais... 2022.

DREWS, P. et al. Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicle: Modeling and Simulation. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2014. Anais... 2014.

FALTINSEN, O. M. *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. New York: Cambridge University Press, 2010.

HONG, S. M.; HA, K. N.; KIM, J-Y. Dynamics modeling and motion simulation of usv/uuv with linked underwater cable. *Journal of Marine Science and Engineering*, v.8, n.5, p.318, 2020.

KIM, J.; LEE, S.; KIM, H. J. Vision-Based Autonomous Landing of a UAV on a Moving USV with Estimation of USV's 6-DOF Motion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v.68, n.8, p.7278-7288, 2021.

LIU, Z. et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, v.41, p.71-93, 2016.

NOVÁK, F. et al. Towards uav-usv collaboration in harsh maritime conditions including large waves. *arXiv preprint arXiv:2408.10163*, 2024.

ORIA-AGUILERA, H. J.; VALERIANO-MEDINA, Y.; HERNÁNDEZ, L. Dynamic Model of 6 DOF for a Catamaran. *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*, p.94-102, 2016.