

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PME3380 - Modelagem de Sistemas Dinâmicos

Guilherme Paina de Camargo
Leonardo Faria de Oliveira
Lucas Souza Vieira
Luís Felipe Biancardi Palharini

Modelagem da Dinâmica de voo de um *Parafoil*

São Paulo
Outubro de 2020

1 Introdução

Em 1999 a Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA - *National Aeronautics and Space Administration*) iniciou uma série de experimentos e de frentes de pesquisa para oferecer uma alternativa de emergência para que astronautas que estavam na Estação Espacial Internacional (ISS - *International Space Station*) pudessem retornar para a superfície quando houvesse necessidade. Com o codinome X-38, este projeto tinha como missão usar um sistema de recuperação capaz de levar uma grande quantidade de carga, além de ser seguro para atender a requisitos de segurança para transporte de pessoas, dotado de um sistema de controle que pudesse direcioná-lo para uma localização especificada. Esta tecnologia possui o nome de *Parafoil*.

Figura 1: Protótipo do X-38



Disponível em: <https://rb.gy/zuyj7g>

O *parafoil*, apresentado na Figura 1, é um tipo de paraquedas que funciona como um parapente com sistema de controle projetado para guiá-lo por uma trajetória pré-definida. Ele foi utilizado pela indústria aeroespacial especialmente pela sua alta eficiência mássica, i.e., ele possui um alto grau de empacotamento do tecido. Além disso, proporciona um baixo impacto na inflagem do paraquedas, alta tolerância a falhas e estabilidade durante o voo com a implementação de diversos estágios de *disreefing* (estágios de inflagem dos paraquedas).

A escolha deste tema tão relevante está fundamentada na possibilidade de desenvolver esta mesma tecnologia dentro do ambiente da Escola Politécnica, no Projeto Jupiter, o grupo de foguetemodelismo da instituição. A equipe, da qual os autores fazem parte, representa a Escola em competições internacionais e possui um grupo interno dedicado aos sistemas de recuperação dos foguetes lançados. Com o desenvolvimento deste trabalho, além de atender às demandas da disciplina de Modelagem de Sistemas Dinâmicos, será possível dimensionar e desenvolver um novo sistema de recuperação para os foguetes do Projeto Jupiter, com maior competitividade, destaque e controle.

2 Proposta de trabalho

A partir da dupla motivação relacionada tanto à disciplina de Modelagem de Sistemas Dinâmicos quanto ao desenvolvimento técnico e tecnológico do Projeto Jupiter, propõe-se elaborar e simular um modelo para a dinâmica de voo de um paraquedas tipo *parafoil*, cuja carga associada (*payload*) seja um dos foguetes da equipe. O trabalho proposto não visa modelar a ejeção dos paraquedas no apogeu do foguete, mas apenas a sua dinâmica de voo após inflado.

Futuramente, tem-se como intenção o desenvolvimento de um sistema de controle de trajetória a partir do modelo dinâmico aqui desenvolvido. O resultado final destes dois trabalhos acadêmicos deve ser aplicado ao sistema de recuperação dos futuros foguetes do Projeto Jupiter. Assim, temos como objetivo a diminuição de riscos associados à descida do foguete e sua posterior localização e busca, visando também difundir todo este conhecimento desenvolvido para futuros membros da equipe.

3 Estado da arte dos modelos dinâmicos

A literatura disponível sobre o tema é bastante vasta e apresenta diversas alternativas para se fazer a modelagem do problema. Equações derivadas da mecânica dos fluidos ditam boa parte das forças externas atuando sobre os corpos, sendo acopladas às equações de corpo rígido da mecânica geral para a descrição completa da dinâmica do sistema. De modo geral, modela-se o *parafoil* inflado como um corpo rígido, desprezando eventuais deformações superficiais ao longo do voo. A carga associada a paraquedas também é um corpo rígido, cuja liberdade de movimento varia de modelo para modelo.

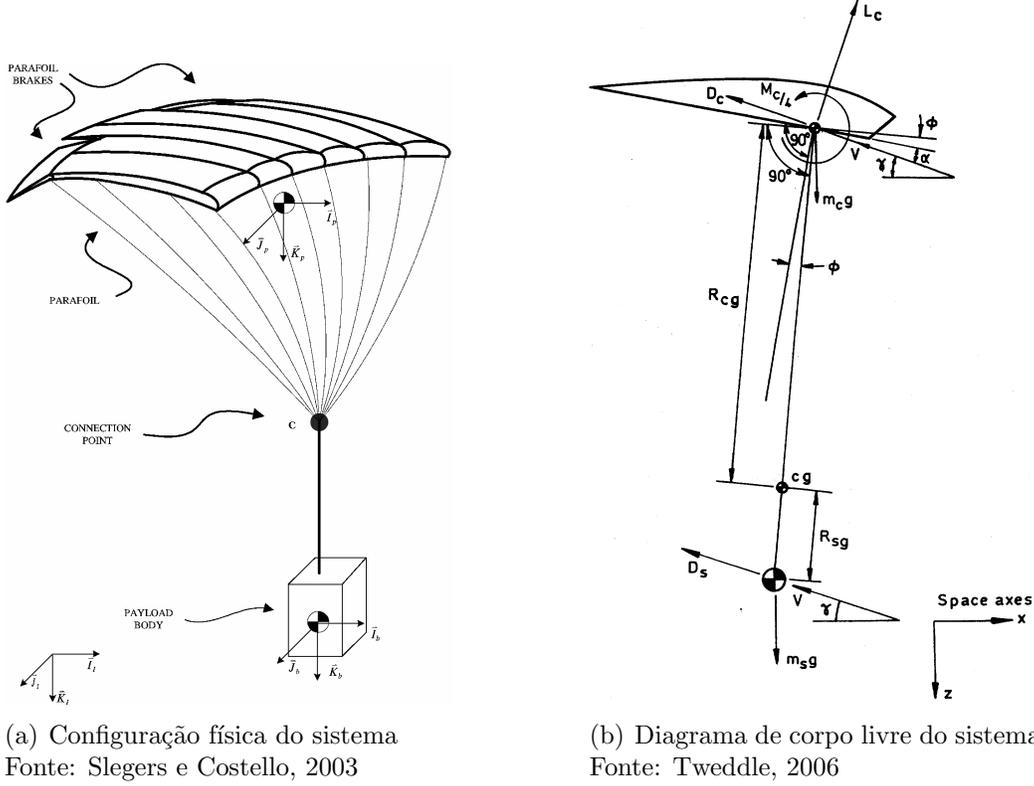
Alguns autores, como Tweddle (2006), tratam o sistema composto pelos dois corpos como apenas um corpo rígido, dotado de 6 graus de liberdade (três componentes de velocidade linear e três de velocidade angular). Desta forma, a carga não tem liberdade de movimento em relação ao paraquedas e vice-versa. Autores, como Feikai et al. (2019) aprimoram esse modelo, considerando que as cordas (*suspension lines*) que compõe o modelo do *parafoil* não sejam inextensíveis. Utilizando um modelo viscoelástico para as cordas, obtém-se um sistema dotado de 8 graus de liberdade.

Outros autores, como Prakash e Ananthkrishnan (2006), preferem tratar o sistema como dois corpos separados, vinculados por uma junta esférica com esforços vinculares viscoelásticos lineares, resultando em 9 graus de liberdade. Esta última abordagem possibilita os movimentos de rotação em torno da junta. A Figura 2 ilustra a configuração do modelo físico do sistema tratado.

Em todos os trabalhos estudados, estabelecem-se um referencial inercial e outros solidários aos corpos rígidos do sistema, sendo estes relacionados entre si por uma matriz de transformação baseadas nos ângulos de Euler. As equações diferenciais não lineares que regem a dinâmica do problema são escritas em espaço de estados no referencial solidário aos corpos. Tal espaço de estados contém as variáveis de velocidades lineares e angulares

dos corpos, cujas definições variam em função do modelo adotado e dos graus de liberdade necessários para a descrição do problema.

Figura 2: Modelo físico do sistema dinâmico tratado



Para o caso com menos graus de liberdade, Tweddle (2006) escreve o sistema de equações não lineares de sexta ordem segundo as equações (1) e (2). Os vetores \mathbf{F} , \mathbf{G} e \mathbf{M} referem-se, respectivamente, à soma de forças externas (aerodinâmicas e massa aparente), à força peso e à soma de momentos externos em relação a um dado polo do corpo. As variáveis de estado são as componentes de velocidade linear $\mathbf{v} = (u, v, w)$ e angular $\boldsymbol{\omega} = (p, q, r)$ do corpo rígido, escritas em um referencial solidário a si próprio, somando 6 componentes ao todo. O vetor de estados está escrito em (3). O mesmo autor demonstra que a linearização do sistema em torno do equilíbrio produz um sistema de sexta ordem, da forma $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$, satisfazendo assim o requisito mínimo para o trabalho da disciplina.

$$\dot{\mathbf{v}} = \frac{1}{m}\mathbf{F} + \mathbf{G} - \boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{v} \quad (1)$$

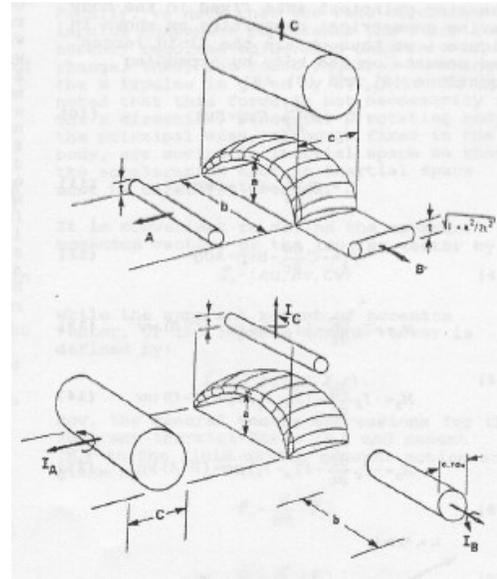
$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{M} - \boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}) \quad (2)$$

$$\mathbf{x} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (3)$$

Quanto aos esforços externos aplicados ao o sistema, modelam-se esforços aerodinâmicas proporcionais ao quadrado da velocidade absoluta dos corpos. Também é unânime na literatura a consideração de forças e momentos devidos à ação de massa aparente sobre o sistema. Dada a baixa massa do parafoil, fatores de força e momentos devidos a massa aparente terão grande influência na dinâmica estudada. Para construção dos tensores de massa aparente, Lissaman e Brown (1993) modelam os termos relativos a cada eixo do paraquedas a partir de cilindros de geometria por ele especificada, conforme indicado pela Figura 3.

Finalmente, a maior parte dos trabalhos disponíveis sobre o assunto versam não apenas sobre a modelagem, mas também sobre controle do sistema. Controlando deflexões e mudanças de orientação do parafoil, é possível ditar sua trajetória ao longo do tempo. Isso abre um grande leque de possibilidades para aplicações práticas e também para a continuidade do projeto na próxima disciplina de Controle e Aplicações.

Figura 3: Representação volumétrica da massa aparente



Fonte: Lissaman e Brown, 1993.

Referências

FEIKAI, L. V.; WEILIANG, H.; ZHAO, L. An improved nonlinear multibody dynamic model for a parafoil-UAV system. **IEEE Access**, Beijing, v. 7, p. 139994-140009, 2019.

LISSAMAN, P. B. S.; BROWN, G. J. **Apparent mass effects on parafoil dynamics**. Technical Report 93-1236, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993. 7 p.

SLEGGERS, N.; COSTELLO, M. Aspects of Control for a Parafoil and Payload System. **Journal of guidance, control, and dynamics**, v. 46, n. 6, p. 898-905, nov./dec. 2003.

STEIN, M. Jenny; MADSEN, M. Chris **An Overview of the Guided Parafoil System Derived from the X-38 Experience**. Technical Report, NASA Johnson Space Center, Houston, State, 2005. 11p.

STEVENS, B. L.; LEWIS, F. L.; JOHNSON, E. N. **Aircraft control and simulation**. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. 764 p.

TWEDDLE, B. E. **Simulation and Control of Guided Ram Air Parafoils**. 2006. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso - University of Waterloo, Waterloo, 2006.