



# MVO-31 Laboratório 2\*

Guilherme Soares / guilhermesoares@ita.br

2022

## Objetivo



Figura 1: Pouso de planador na competição de 2008 em Lüsse, Alemanha.

O objetivo desta aula prática é começar a usar o MATLAB para aplicações de mecânica do voo. Inicialmente, você criará a tabela que relaciona uma atmosfera real (dadas a temperatura de operação e a altitude-pressão da atmosfera real onde a aeronave opera) com a atmosfera ISA em termos de densidade, através do conceito de altitude-densidade. O exercício servirá

---

\*Baseado em exercícios preparados pelos Prof. Flávio Silvestre, Flávio Ribeiro, Maurício Morales e Guilherme Soares

para fixar os conceitos vistos em sala.

Também será proposto um exercício prático associado com fator de carga durante uma recuperação vertical.

A seguir, como motivação do próximo tema, programaremos a simulação das equações do movimento longitudinal da aeronave segundo a aproximação ponto-massa, usada para as aplicações de desempenho. A primeira simulação abordada é a mais simples no estudo do desempenho: o planeio. Neste caso, a aeronave não possui motor (caso de um planador), ou o mesmo está desligado (moto-planador com motor desligado, ou aeronave com perda total dos motores). Para o planeio, os dois casos de interesse, do ponto de vista do desempenho, são:

- máximo alcance: distância horizontal percorrida;
- máxima autonomia: tempo de voo.

## 1 Observações

- Pode haver amplas discussões sobre os temas entre todos os alunos;
- Deve ser confeccionado um relatório com entrega das atividades propostas;
- O relatório deve ser entregue até às 23:59 do dia 13 de MAIO de 2022;
- Caso exista atraso, a cada 12h haverá um decréscimo de 0,5 ponto do valor atribuído ao relatório;
- O relatório pode ser entregue por e-mail para contabilização do prazo, mas deve ser entregue impresso para que possa ser corrigido;
- Caso o aluno opte por entregar apenas a versão impressa, deve entregar na secretaria da Divisão de Engenharia Aeronáutica e Aeroespacial sempre escrevendo no documento o horário da entrega (há uma caixa de depósito na porta, caso a entrega seja feita após o horário de expediente).

## Exercício 1

-

(a) Para criar a tabela que relaciona a atmosfera real com a atmosfera ISA em termos de altitude-densidade, dadas a temperatura e a altitude-pressão, comece criando a função de atmosfera padrão (ISA), da forma:

$$[\rho, T, p] = \text{atmosferaISA} ( H )$$

A seguir, plote gráficos de:

- pressão com altitude;
- densidade com altitude.

(b) Crie uma função que permita que você obtenha as propriedades em uma atmosfera ISA+ $\Delta T$

$$[\rho, T, p] = \text{atmosferaISA} ( H, \Delta T )$$

Esta é uma forma de considerar variações da ISA, outra forma é variar a pressão de referência do nível do mar e mantendo o perfil de temperatura ISA.

(c) Agora crie uma função que permita que você obtenha altitude à partir da pressão

$$[Z_p] = \text{altitudePressao} ( p )$$

Usando a ISA neste equacionamento, será obtido a altitude-pressão, que é a altitude na ISA correspondente a pressão real de determinado ponto.

(d) Finalmente, crie uma função que permita que você obtenha altitude à partir da pressão com variação da pressão de referência do nível do mar

$$[Z_p] = \text{altimetro} ( p, p_o )$$

Apresente em um mesmo gráfico como varia a altitude em função da pressão  $p$ , variando  $p_o$  da seguinte forma::

d.1  $p_o = 1.013,25$  mb, este é o ajuste  $QNE$  (*nautical elevation*)<sup>1</sup> associado a pressão no nível do mar na atmosfera ISA;

d.2  $p_o = 900$  mb;

Caso você esteja em um campo em que a pressão vale 900 mb, avalie como varia a ISA em relação a pressão medida no campo através do gráfico obtido.

Esta equação obtida neste item é a presente em um altímetro ideal que vai a bordo de uma aeronave.

---

<sup>1</sup>o código Q é usado internacionalmente e é composto por três letras. Existe reserva do mesmo para a área aeronáutica de QAA até QNZ

## Exercício 2

Um novo sistema de apoio ao combate a incêndio esta sendo desenvolvido. Este sistema é constituído por uma carga que é lançada da aeronave, permitindo a extinção de fogo em áreas de difícil acesso com uma eficiência 300% maior. A figura abaixo descreve isto.

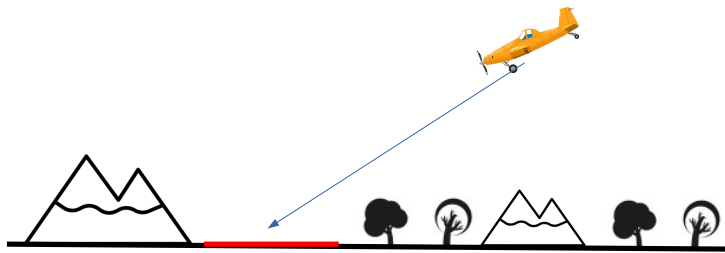


Figura 2: Novo sistema de combate de incêndio a ser instalado em aeronaves agrícolas.

Durante a fase de ensaios em voo da análise de desempenho e integração do novo sistema a aeronave foi necessário realizar voos na altitude operacional de lançamento da carga, 1.500 ft.

Para a realização deste ensaio o Engenheiro de Ensaaios em Voo precisou determinar um procedimento de recuperação que permitisse um teste com baixo nível de risco. Porém o especialista não possuía nenhuma informação da aeronave usada como plataforma de lançamento (modelo propulsivo, aerodinâmico,...), a não ser a máxima velocidade operacional que era de 270 KTAS.

Assim, sabendo que:

- Não existe obstáculo acima de 200 m;
- O limite de fator de carga da aeronave é de 6g;
- O limite de carga considerado para o ensaio é de 5g (com intenção de reduzir carga de trabalho, dada a condição de risco do ensaio);
- Deve se usar um fator de segurança de 50% para a altitude de obstáculos;
- A aeronave possui um indicador de fator de carga a vista do piloto;

- A recuperação será feita mantendo-se um valor de fator de carga constante durante a recuperação;
- A carga deve ser lançada com um ângulo de trajetória de  $-25^\circ$ .

Realize as seguintes análises e produza os seguintes resultados:

- Através da equação de fator de carga de recuperação longitudinal, informe qual a dependência do raio em relação a outras variáveis;
- Estabeleça, com as informações fornecidas, em que condições é obtido um raio de recuperação crítico para o ensaio do ponto de vista de segurança;
- Com a expressão obtida, plote uma trajetória que possa ser considerada crítica e garanta a segurança do ensaio, plote a trajetória até o ponto mais baixo. Em um mesmo gráfico apresente o resultado para diversos fatores de carga;
- Informe sob que fator de carga a recuperação deve ser feita para que o ensaio seja seguro.

A informação obtida será usada no suplemento ao manual de voo da aeronave (AFMS). Assim, (e) escreva um texto informando ao operador como a recuperação deve ser feita após o lançamento do sistema para que seja inserido no AFMS do avião.

### Exercício 3

Considere um planador biplace com as seguintes características:

- massa (sem passageiros, nem tanques de água): 200kg
- massa do piloto: 100kg
- massa do co-piloto: 90kg
- modelo aerodinâmico:

$$\begin{aligned} \text{sustentação: } L &= \frac{1}{2}\rho V^2 SC_L \\ \text{arrasto: } D &= \frac{1}{2}\rho V^2 SC_D \end{aligned}$$

- polar de arrasto

$$C_D = C_{D0} + kC_L^2$$

$$- C_{D0} = 0,015$$

$$- k = 0,025$$

- área de referência (área da asa):  $S = 16\text{m}^2$

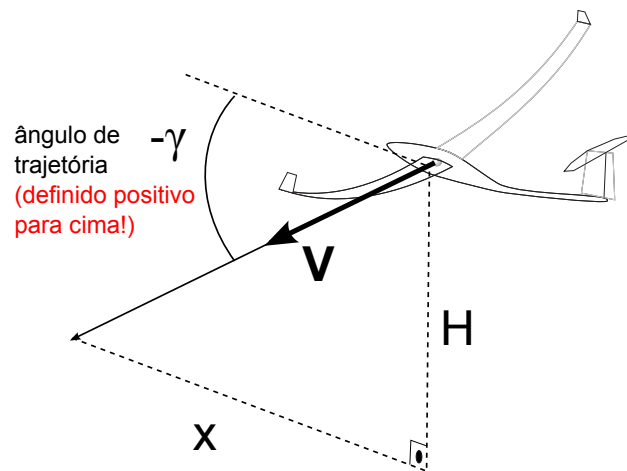


Figura 3: Esquema do voo planado

As equações que governam o movimento longitudinal da aeronave segundo a aproximação ponto-massa, na ausência de força propulsiva, são dadas por (você verá em breve nas aulas teóricas):

$$\dot{V} = \frac{-D - mg \sin \gamma}{m}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{L - mg \cos \gamma}{mV}$$

$$\dot{H} = V \sin \gamma$$

$$\dot{x} = V \cos \gamma$$

onde:

- $V$  [m/s] é a velocidade da aeronave em relação à massa de ar, TAS (estamos considerando que a atmosfera está em repouso);
- $\gamma$  [rad] é o ângulo de trajetória (ângulo entre o vetor velocidade e o horizonte, positivo para cima);

- $H$  [m] é a altura da aeronave em relação ao solo;
- $x$  [m] é o deslocamento horizontal da aeronave.

A aeronave foi abandonada pelo rebocador a 2000m em relação ao solo, em um terreno que está em nível do mar. Considere a aceleração da gravidade  $g$  valendo  $9,8\text{m/s}^2$ .

Pedem-se:

---

(A) Considere a aeronave voando em atmosfera padrão (ISA). A condição de voo é dada pelo coeficiente de sustentação:

$$C_L = \sqrt{\frac{C_{D0}}{k}}$$

Resolva o sistema de equações para o voo planado na condição acima utilizando a função `ode45` do MATLAB. Para os **valores iniciais** da velocidade e do ângulo de trajetória adote:

$$V_{\text{inicial}} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S}} \frac{1}{(C_L^2 + C_D^2)^{1/4}}$$

$$\gamma_{\text{inicial}} = -\arctan\left(\frac{1}{E}\right)$$

onde  $E$  é a chamada eficiência aerodinâmica da aeronave, dada por:

$$E = \frac{C_L}{C_D}$$

Forneça um gráfico da altura da aeronave *versus* a distância horizontal percorrida nesta situação. **Não se esqueça de apontar no gráfico os nomes dos eixos bem como as unidades!**

Forneça também um gráfico contendo as velocidades, em m/s, *versus* tempo.

Determine o alcance [km] e a autonomia [min] do planador para a condição fornecida. Para a determinação do alcance e da autonomia, considere a função `interp1` de interpolação do MATLAB.

---

(B) Considere as seguintes situações de voo:

- $C_L = \sqrt{\frac{C_{D0}}{k}}$  (# 1)
- $C_L = \sqrt{\frac{3C_{D0}}{k}}$  (# 2)
- $C_L = 0,5$  (# 3)
- $C_L = 1,0$  (# 4)
- $C_L = 1,4$  (# 5)

Para cada condição acima, em atmosfera ISA, preencha a tabela abaixo:

#	$C_L$	$E = \frac{C_L}{C_D}$	$V_{\text{inicial}}$ [m/s]	$\gamma_{\text{inicial}}$ [°]	Alcance [km]	Autonomia [min]
1						
2						
⋮						
5						

Qual a condição de máxima autonomia? Qual a condição de máximo alcance?

---

(C) Mostre como os parâmetros acima se alteram (máxima autonomia e máximo alcance) se a temperatura atmosférica estiver 20 graus Celsius acima da temperatura ISA (ISA + 20).

(D)

- 1 Faça um gráfico de velocidade versus gamma (você pode usar os dados obtidos na questão B), o que representa o máximo encontrado?
- 2 Faça um gráfico de velocidade versus alcance, o que representa o máximo?
- 3 Faça um gráfico de razão de descida versus velocidade. O que representa a tangente a cada ponto deste gráfico? Qual o significado da tangente máxima, compare o valor máximo com o obtido em 1 e 2.



- 4 Usando seus conceitos de física para uma aeronave em equilíbrio (lembre que para ela deve estar em equilíbrio de forças e rotação) e sabendo que o profundor é responsável por manter este equilíbrio no eixo longitudinal, o que aconteceria com cada um dos gráficos acima caso o CG fosse alterado (dianteiro e traseiro), por que?

(E)

- 1 Discuta operacionalmente, qual é a informação gráfica para o piloto sabendo que um painel de um planador costuma ter as informações da Figura 4.
- 2 Caso você fosse o criador do projeto de um planador, você colocaria a indicação de ângulo de ataque da sua aeronave? Você deve discutir baseado-se, pelo menos, nas informações de velocidade de planeio ótima restrito a critérios de segurança.



Figura 4: painel de um planador típico.

(F) O acidente (devido a perda material da aeronave) do voo US 1549 da companhia US Airways teve que realizar um pouso de emergência devido a perda dos motores (você pode descobrir mais sobre este evento aqui: [Aviation Herald Voo US 1549](#)).

- Baseado nos conceitos que aprendeu sobre voo planado discuta se é interessante haver uma velocidade de planeio ótima em aeronave motorizada e para que ela seria interessante, bem como qual parâmetro deseja-se otimizar.

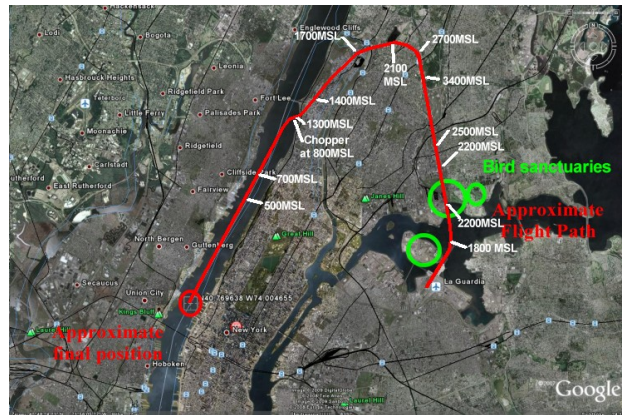


Figura 5: Mapa do pouso de emergência.

- Ainda, discuta, baseado na manutenção de uma velocidade de planeio ótima (segundo questão 1) o que aconteceria com o desempenho da aeronave devido a necessidade de realizar curvas para alinhamento e pouso no rio Hudson? Neste caso seria interessante haver outras velocidades ótimas de planeio? Caso existissem outras velocidades ótimas de planeio seria seguro operacionalmente (contextualize seus argumentos dentro de um cenário de pane da aeronave).