Minicurso “Cálculo de Trajetória de Foguete com Aplicativo Trajetória 2.0”

# 1) Apresentação ao grupo.

# 2) Comentar a importância de reconhecer (inclusive na fase de projeto do EM) o comportamento de voo do EM.

# 3) Solicitar a abertura do arquivo “Capitulo\_05\_Trajetoria\_v2.pdf”

Fases do voo: Comentar sobre a importância da velocidade de saída da rampa na estabilidade de voo;

Fases do voo: Comentar sobre como achar o tempo de abertura do paraquedas?

A programação da abertura do paraquedas pode ser feita diretamente dentro do código fonte do programa (arquivo principal.f90). Se precisar de ajuda, envie um e-mail para antoniocarlos.foltran@gmail.com e explique sua necessidade. Para cada caso é possível adicionar linhas de programa para inserir o efeito da abertura do paraquedas.

# 4) Equação da trajetória.

$\sum\_{}^{}\vec{F}=m\vec{a}$ , onde $\left\{\begin{matrix}0<t<t\_{q}, m=m\_{\left(t\right)}\\t>t\_{q}, m=m\_{f}\end{matrix}\right.$

$\vec{E}+\vec{P}+\vec{D}=m\vec{a}$, onde se pode adotar como referencial o nível do solo e sentido positivo a direção para cima.

$\vec{E}>0$ ,

$\vec{P}<0$ ,

$\vec{D}=\left\{\begin{matrix}>0 na descida\\<0 na subida\end{matrix}\right.$ .

Equação diferencial da trajetória:

 $m\_{\left(t\right)}\frac{d^{2}x}{dt^{2}}+\frac{C\_{D}ρA}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^{2}+\frac{m\_{\left(t\right)g\_{0}R^{2}}}{\left(R+x\right)^{2}}=E\_{\left(t\right)}$ ,

e condições iniciais:

$\left\{\begin{matrix}em t=0, x=0\\em t=0, \frac{dx}{dt}=0\end{matrix}\right.$ .

# Exemplo 1: O Sondinha II

O Sondinha II é um espaçomodelo fornecido pela empresa Edge of Space de São José dos Campos e é um dos modelos mais apreciados pelos espaçomodelistas mais experientes. Seus dados principais são:

$m\_{f}=20 g$, massa final do modelo (massa do modelo sem motor + massa do motor após funcionamento);

$m\_{p}=10 g$, massa de propelente do motor;

$d\_{r}=20 mm$, diâmetro de referência (diâmetro do tubo foguete);

$E\_{c}=3N$, empuxo constante do motor BT A-6-4;

$t\_{q}=0,7 s$, tempo de queima do motor;

$C\_{D}=0,9$, coeficiente de arrasto constante do modelo (pode ser obtido com o programa CD1.0);

$Hreal≅110m$, baseado em lançamentos.

# Exemplo 2: O LAE-5

O LAE-5 é um espaçomodelo projetado pela equipe Alfa da UFPR e que participou no I Festival de Minifogeutes de Curitiba em 2014. Ele foi projetado como um modelo intermediário, ou seja, suas características ainda não eram bem conhecidas e ele foi propositalmente construído com massa menor que a estimada para atingir os 150 m (a equipe participou da classe apogeu fixo 150 m). Portanto era esperado que ele superasse 150 m.

Seus dados principais são:

$m\_{f}=78,743 g$, massa final do modelo (massa do modelo sem motor + massa do motor após funcionamento);

$m\_{p}=10,783 g$, massa de propelente do motor;

$d\_{r}=25,2 mm$, diâmetro de referência (diâmetro do tubo foguete);

Empuxo variável do motor BT C-6-5, obtido a partir da análise de 15 testes estáticos com lote de motores de 2013:

 

Figura 1: À esquerda curva de empuxo experimental típica e à direira curva programada com mesmo impulso total.

**Observação: Quando entrar com os dados no arquivo da curva de empuxo, a primeira coluna deve ser o tempo em segundos e a segunda o empuxo em newtons! O ponto é utilizado como separador de decimal!**

$t\_{q}=1,964 s$, tempo de queima do motor. Observação: Mesmo entrando com a curva de empuxo, que possui como último valor de abscissa o tempo de queima é necessário inserir o tempo de queima na página de entrada de dados principais do Trajetória 2.0.

Coeficiente de arrasto variável obtida com o programa CD1.0;

**Observação: Quando entrar com os dados no arquivo da curva de Cd, a primeira coluna deve ser a velocidade em quilômetros por hora e a segunda o coeficiente de arrasto, que é adimensional! O ponto é utilizado como separador de decimal!**

Resultados:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Valor Calculado (Trajetória 2.0) | Valor Experimental | Erro (%) |
| Apogeu [m] | 189,46 | 174 | 8,88 |
| Velocidade Máxima [km/h] | 219,7 | 196 | 12,10 |
| Aceleração Máxima [g] | 8,55 | 12,0 | 40,35 |
| Tempo de Apogeu [s] | 6,67 | 5,0 | 33,4 |