



Centro de Instrução Almirante Wandenkolk - CIAW Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA



Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Armas



SAB: Simulação e Controle de Artefatos Bélicos
Simulações Balísticas em 6DoF



Jozias **Del Rios** Cap Eng



delriosjdrvgs@fab.mil.br



(12) 98177-9921

Abril 2018



AA-811

SIMULAÇÃO E CONTROLE
DE ARTEFATOS BÉLICOS

Simulações Balísticas 6DOF

Instrutor: 1ºTen Eng Jozias **DEL RIOS**

Autor do Material: Jozias **DEL RIOS** – rev. 21.ago.2016

OBJETIVO

Estenderemos as implementações de
simulações balísticas de armamento aéreo
para 6 graus de liberdade
para aplicar ao estudo de
distribuição do ponto de impacto

TÓPICOS

Simulações Balísticas 6DOF

1. Resumo escalar das equações de Euler
2. Simulação balística em 6DOF de uma BA-FG
3. Simulação Monte-Carlo
4. Erro Circular Provável (**CEP**)
5. Simulação 6DOF com Quaternions e DCM

MOTIVAÇÃO: SIMULAÇÃO 6DOF

Ferramenta para prever o
desempenho global do armamento,
considerando as variações
do ponto de lançamento,
dos parâmetros intrínsecos do armamento,
das condições ambientais e
de manobra do alvo

O simulador 6DOF deve se manter atualizado
durante o projeto e certificação de engenharia.

EQUAÇÕES DE EULER 6DOF - RESUMO

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u(c\psi c\theta) + v(c\psi s\theta s\varphi - s\psi c\varphi) + w(c\psi s\theta c\varphi + s\psi s\varphi) \\ \dot{y} &= u(s\psi c\theta) + v(s\psi s\theta s\varphi + c\psi c\varphi) + w(s\psi s\theta c\varphi - c\psi s\varphi) \\ \dot{z} &= u(-s\theta) + v(c\theta s\varphi) + w(c\theta c\varphi)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{u} &= \sum F_x / m + r v - q w \\ \dot{v} &= \sum F_y / m + p w - r u \\ \dot{w} &= \sum F_z / m + q u - p v\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= p + (q \sin \varphi + r \cos \varphi) \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \varphi - r \sin \varphi \\ \dot{\psi} &= (q \sin \varphi + r \cos \varphi) \sec \theta\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{p} &= J_{xx}^{-1} \left(\sum M_x + q r (J_{yy} - J_{zz}) \right) \\ \dot{q} &= J_{yy}^{-1} \left(\sum M_y + p r (J_{zz} - J_{xx}) \right) \\ \dot{r} &= J_{zz}^{-1} \left(\sum M_z + p q (J_{xx} - J_{yy}) \right)\end{aligned}$$

COEFICIENTES AERODINÂMICOS

FORÇAS SEM VENTO

$$C_X = C_{X_0} (M)$$

$$C_Y = \beta \cdot C_{Y_\beta} (M) + r \cdot C_{Y_r} \frac{L_{\text{ref}}}{2 v_a}$$

$$C_Z = \alpha \cdot C_{Z_\alpha} (M) + q \cdot C_{Z_q} \frac{L_{\text{ref}}}{2 v_a}$$

$$v_a = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

Ângulo de Ataque

$$\alpha = \arctan\left(\frac{w}{u}\right)$$

Ângulo de Derrapagem

$$\beta = \arctan\left(\frac{v}{u}\right)$$

COEFICIENTES AERODINÂMICOS - MOMENTOS

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{\ell} = C_{\ell_0}(M) + \alpha \cdot C_{\ell\alpha} + \beta \cdot C_{\ell\beta} + p \cdot C_{\ell p} \frac{L_{\text{ref}}}{2v_a} \\ C_m = C_{m_0}(M) + \alpha \cdot C_{m\alpha} + q \cdot C_{mq} \frac{L_{\text{ref}}}{2v_a} \\ C_n = C_{n_0}(M) + \beta \cdot C_{n\beta} + r \cdot C_{nr} \frac{L_{\text{ref}}}{2v_a} \end{array} \right.$$

Coeficiente de rolamento adicional causado pela deflexão de empenas na cauda da bomba:

$$C_{\ell\delta}(M) \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4)$$

CARACTERÍSTICAS ADICIONAIS DA BAFC-460

Inércia:

$$J_{xx} = 8.2 \text{ kg m}^2$$

$$J_{yy} = J_{zz} = 155 \text{ kg m}^2$$

Condições iniciais:

$$y = 0 \text{ m}$$

$$v_{y0} = 0 \text{ knots}$$

$$\psi = \varphi = 0^\circ$$

$$p = r = 0^\circ/\text{s}$$

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = +3.0^\circ$$

Coeficientes Aerodinâmicos:

$$C_{Y\beta} = C_{Z\alpha} = -5.6$$

$$C_{Yr} = -C_{Zq} = +42.4$$

$$C_{n\beta} = -C_{m\alpha} = +6.8$$

$$C_{nr} = C_{mq} = -177$$

$$C_{\ell_0} = C_{\ell\alpha} = C_{\ell\beta} = 0$$

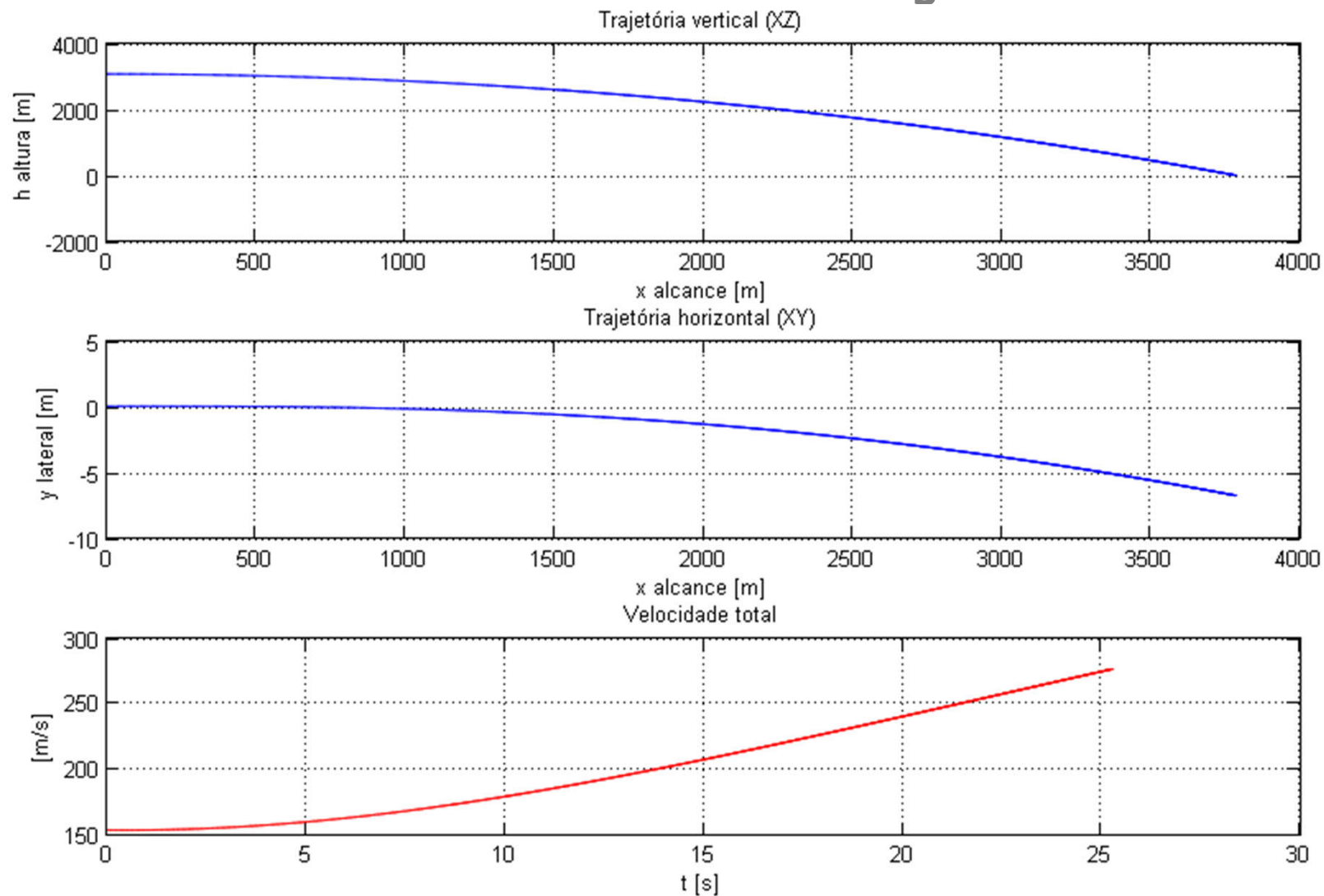
$$C_{\ell\delta} = +0.2$$

$$C_{\ell p} = -1.4$$

AA-811 – Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

Simulações Balísticas 6DOF

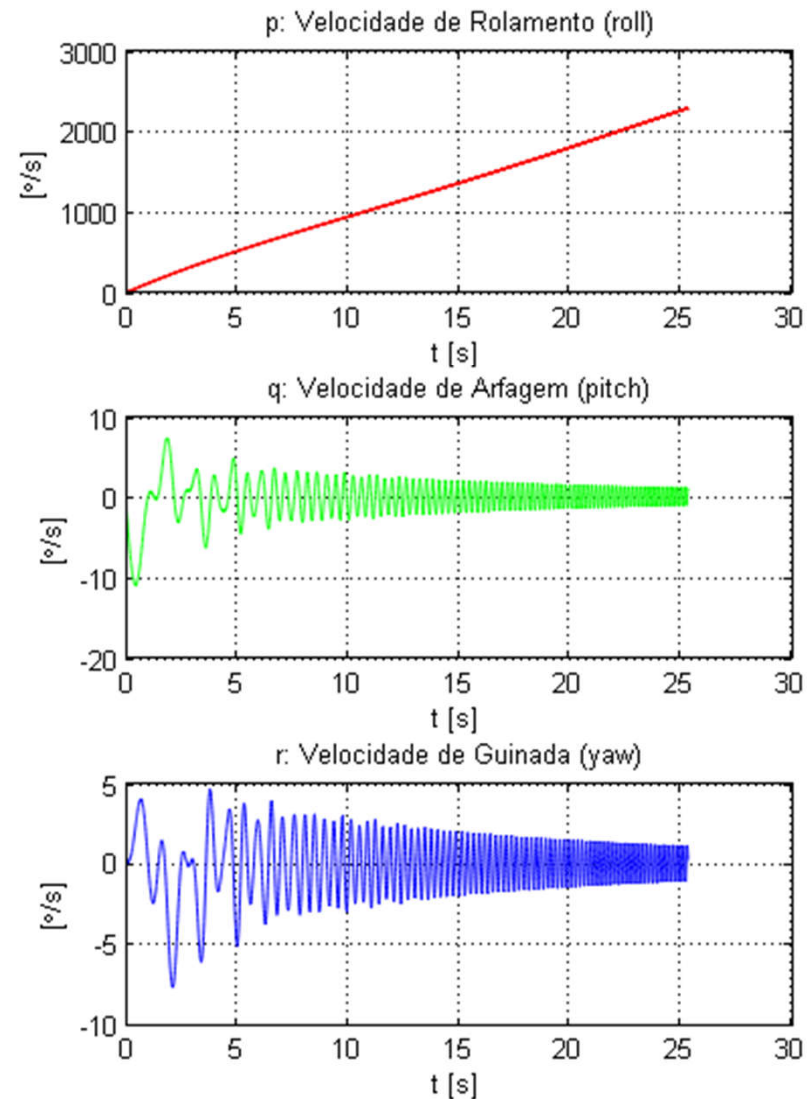
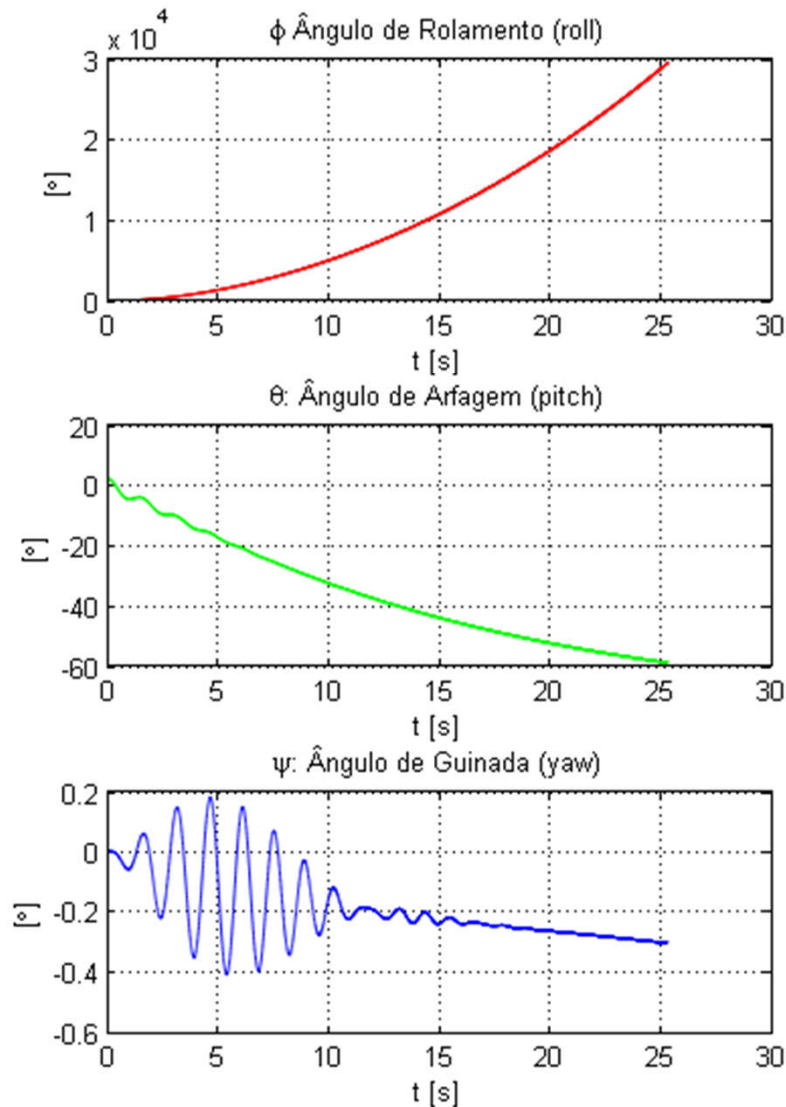
RESULTADOS de SIMULAÇÃO 6DOF



AA-811 – Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

Simulações Balísticas 6DOF

RESULTADOS de SIMULAÇÃO 6DOF



ATIVIDADES SIMULAÇÃO BALÍSTICA 6DOF

1. (3,5) Termine **balistico_6dof_euler** e **sab_bomb_aero**
→ Copie os gráficos e saídas de texto.
2. (0,5) Quantas voltas a bomba fez ao redor de si mesma?
3. (0,5) Qual a direção do desvio lateral do ponto de impacto?
4. (0,5) Qual a justificativa matemática/dinâmica para o desvio?
5. (4,0) Termine **balistico_6dof** e **sab_quat2euler**
→ Copie os gráficos e as saídas de texto
6. (1,0) ... continua na próxima aula: Simulação Monte-Carlo...