



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 Modelo Atmosférico e Vento



Jozias **Del Rios** Cap Eng



delriosjdrvgs@fab.mil.br



(12) 98177-9921

Abril 2018



AA-811

SIMULAÇÃO E CONTROLE
DE ARTEFATOS BÉLICOS

Modelo Atmosférico e Vento

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

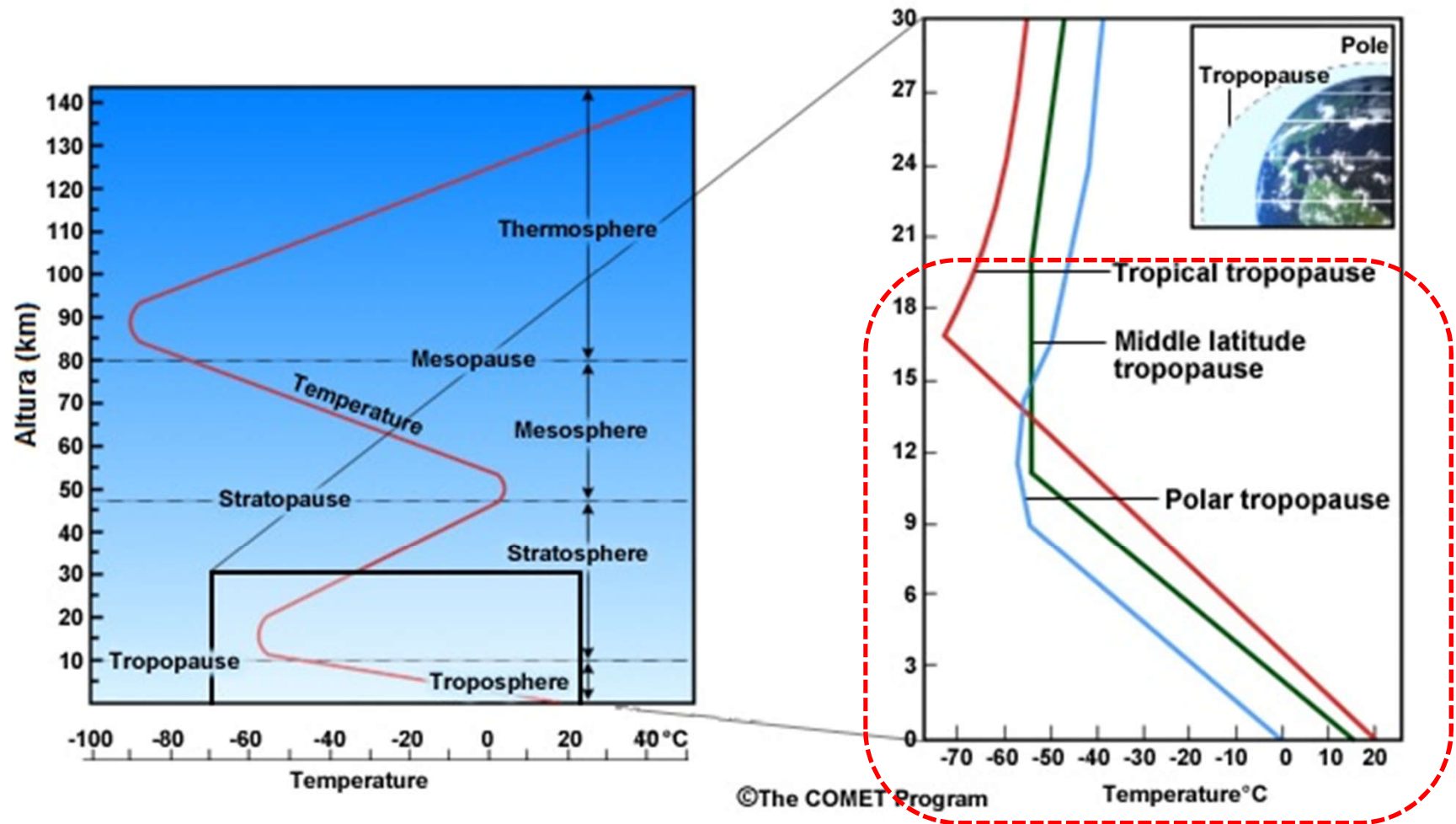
Autor do Material: Jozias **DEL RIOS** – rev. 20.mai.2016

TÓPICOS

Modelo Atmosférico e Vento

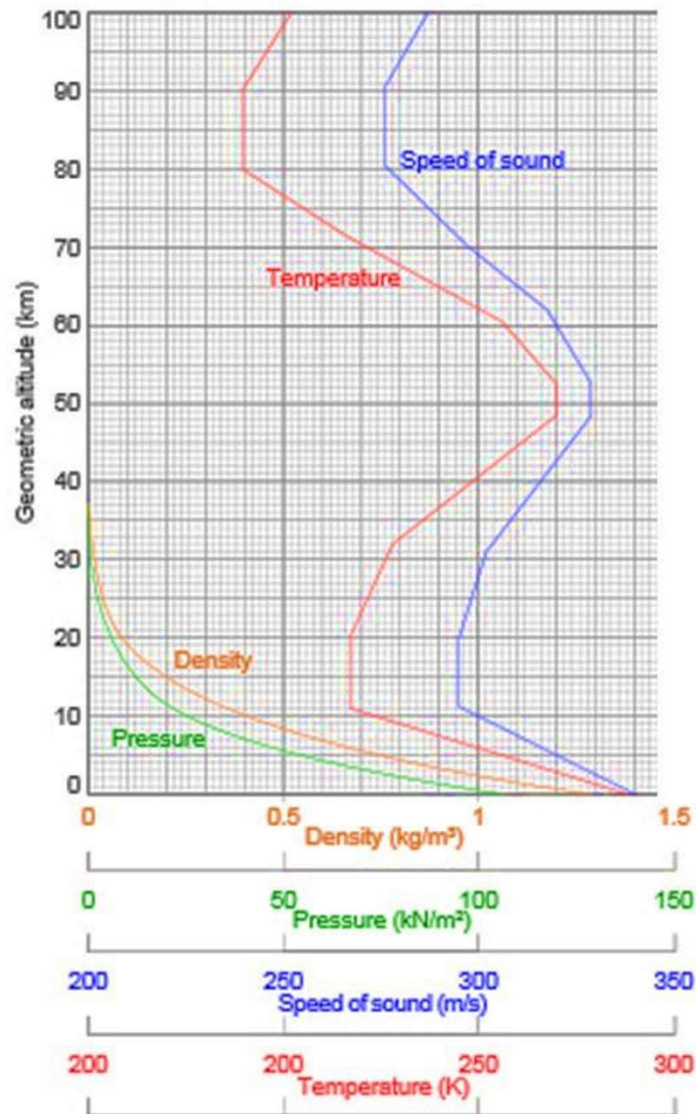
1. Características da Atmosfera
2. Atmosfera padrão
3. Simulação de atmosfera
4. Vento
5. Rajada
6. Turbulência

CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA (REALÍSTICO)



FAIXA DE INTERESSE: 20 km (60 kft)

CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA (MODELO)



MODELO DE ATMOSFERA PADRÃO

Usaremos a [International Standard Atmosphere](#) (ISA) de 1976 para modelar a atmosfera computacionalmente.

Obteremos fórmulas empíricas para:

- Pressão,
- Temperatura,
- Densidade da mistura do ar e
- Velocidade do som

MODELO DE ATMOSFERA PADRÃO

Derivado da ICAO (aviação civil) para latitude 45° .

Premissas deste modelo:

- Ar está seco
- Ar se comporta como um gás perfeito
- Aceleração da gravidade é constante
- Temperatura varia linearmente em cada camada

ATMOSFERA PADRÃO – TEMPERATURA

Definimos primeiramente a temperatura (T_{ISA}):

$$T_{ISA} = 288,15 \text{ K} = 15 \text{ °C} \quad (\text{padrão do modelo ISA})$$

$$a = 0,0065 \frac{\text{K}}{\text{m}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } h < 11 \text{ km} \end{array} \right. \quad T(h) = T_{MSL} - a \cdot h$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } h > 11 \text{ km} \end{array} \right. \quad T(h) = T_{MSL} - 71,5 \text{ K} = 216,65 \text{ K} = -56,5 \text{ °C}$$

Para outras temperaturas T_{MSL} ao nível do mar, a temperatura tem o perfil deslocado (offset):

$$T_{MSL} = T_{ISA} + \Delta_{ISA}$$

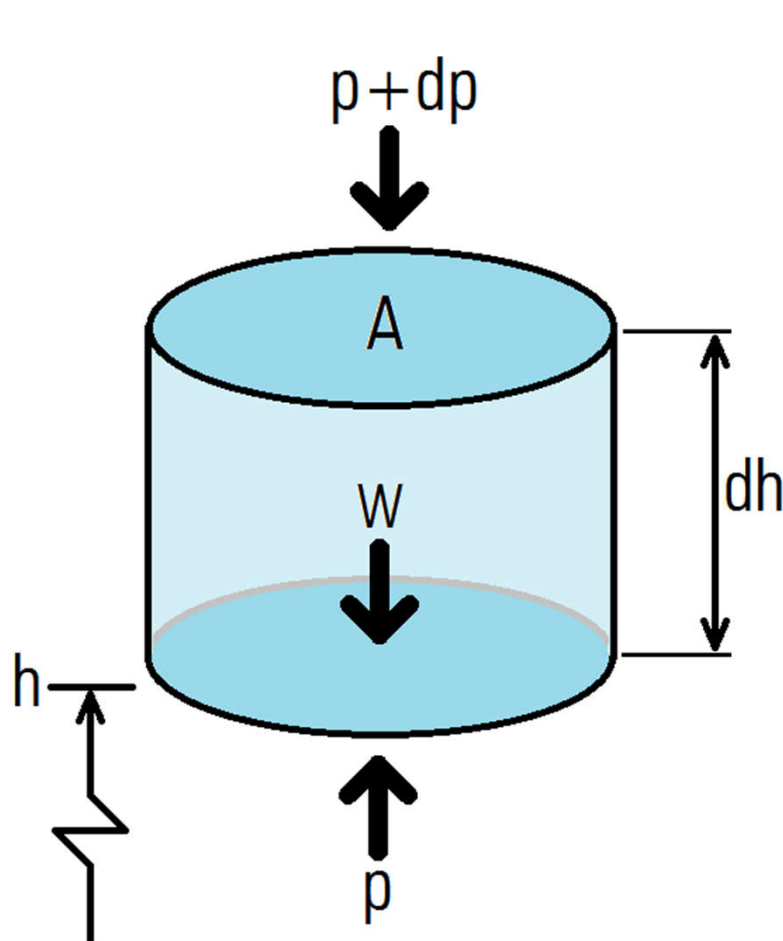
SIMULAÇÃO DA ATMOSFERA

Quando os resultados de uma simulação forem comparados com dados de ensaios em voo, as condições atmosféricas (temperatura) de um regime de altitude precisam ser amostradas durante, antes ou depois do ensaio e inseridas nas condições iniciais do simulador (Δ_{ISA}).

As medidas de temperatura podem ser tomadas em solo e extrapoladas para a altitude de voo.

ATMOSFERA PADRÃO – PRESSÃO

Pressão de um elemento de volume da atmosfera:



$$\begin{array}{ccc} \text{força da} & & \text{força da} \\ \text{pressão} & & \text{pressão} \\ \text{superior} & \text{força peso: } W & \text{inferior} \\ \hline A(p + dp) + (\rho \cdot A \cdot dh \cdot g) = & A \cdot p \end{array}$$

$$\cancel{A \cdot p} + \cancel{A} \cdot dp + \rho \cdot \cancel{A} \cdot dh \cdot g = \cancel{A \cdot p}$$

$$\boxed{dp = \rho \cdot g \cdot dh}$$

Eq. de Clapeyron: $p = \rho \cdot R \cdot T$

Então: $p = \left(\frac{dp}{g \cdot dh} \right) \cdot R \cdot T$

$$\frac{1}{p} dp = -\frac{g}{R \cdot T} dh$$

ATMOSFERA PADRÃO – PRESSÃO

Se $h < 11$ km, a temperatura decai linearmente: $dT = -a \cdot dh$

Então:
$$\frac{dp}{p} = \left(\frac{g}{a \cdot R} \right) \frac{dT}{T}$$

$$\int_{p_{MSL}}^{p(h)} \frac{dp}{p} = \left(\frac{g}{a \cdot R} \right) \cdot \int_{T_{MSL}}^{T(h)} \frac{dT}{T}$$

$$\ln \left(\frac{p(h)}{p_{MSL}} \right) = \left(\frac{g}{a \cdot R} \right) \cdot \ln \left(\frac{T(h)}{T_{MSL}} \right)$$

$$p(h < 11 \text{ km}) = p_{MSL} \left(\frac{T(h)}{T_{MSL}} \right)^{\frac{g}{a \cdot R}}$$

$$\begin{aligned} p_{MSL} &= 101\,325 \text{ Pa} \\ R &= 287,053 \text{ J/kg K} \\ g &= 9,80665 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

ATMOSFERA PADRÃO - PRESSÃO

Mas se $h > 11$ km, então a temperatura é constante (isotérmico):

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R \cdot T} dh \Rightarrow \int_{p_0}^{p(h)} \frac{dp}{p} = \left(-\frac{g}{R \cdot T_0} \right) \int_{h_0}^h dh$$

$$\ln\left(\frac{p(h)}{p_0}\right) = \left(-\frac{g}{R \cdot T_0} \right) (h - h_0)$$

$$p(h > 11 \text{ km}) = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{g}{R \cdot T_0} (h - h_0) \right)$$

$$h_0 = 11 \text{ km} \quad T_0 = T(h_0) \quad p_0 = p_{\text{MSL}} \left(\frac{T_0}{T_{\text{MSL}}} \right)^{\frac{g}{a \cdot R}}$$

ATMOSFERA PADRÃO – DENSIDADE DO AR

Novamente pela eq. de Clapeyron dos gases ideais:

$$\rho(h) = \frac{p(h)}{R \cdot T(h)}$$

ATMOSFERA PADRÃO – VELOCIDADE DO SOM

Novamente para gases ideais:

$$c(h) = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T(h)}$$

$$\gamma = 1,4$$

(índice adiabático para
moléculas diatômicas)

SIMULAÇÃO BALÍSTICA

Os artefatos balísticos geralmente...

...não tem controle/guiamento (malha aberta),

...são empregados contra alvo parado (no solo)

e terão a precisão afetada somente...

...pelas **imperfeições** de fabricação (desalinhamentos),

...pelas **condições iniciais** de lançamento,

...pelas **forças aerodinâmicas** durante o voo livre.

Portanto, é importante considerar:

... **fenômenos aerodinâmicos** (vento e rajada),

...**incertezas estatísticas** (de lançamento e características),

para avaliar a **distribuição do ponto de impacto**.

VENTO (WIND)

Vento modelado com as premissas:

- Vento **constante** e **paralelo** ao solo (componente \hat{u}_z nula).
- Vento é um **vetor velocidade**.
- Descrito pelos parâmetros:
 - Intensidade em knots (milhas náuticas por hora).
 - Direção em proa verdadeira de onde vem.

➤ Exemplo: Qual o vetor do vento de **030°** com **5 knots**?

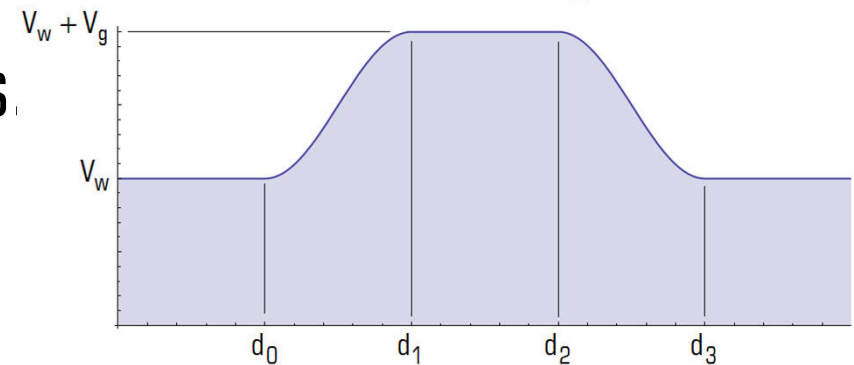
$$5,0 \text{ [NM/h]} \times (1852 \text{ [m/NM]} / 3600 \text{ [s/h]}) = 2,57 \text{ [m/s]}$$

$$\mathbf{V}_w = 2,57 \text{ [m/s]} \times (\hat{u}_x \cos 210^\circ + \hat{u}_y \sin 210^\circ)$$

RAJADA DISCRETA (WIND GUSTS)

Eventos inseridos em distribuição aleatória no espaço que **temporariamente ampliam** o vento numa direção.

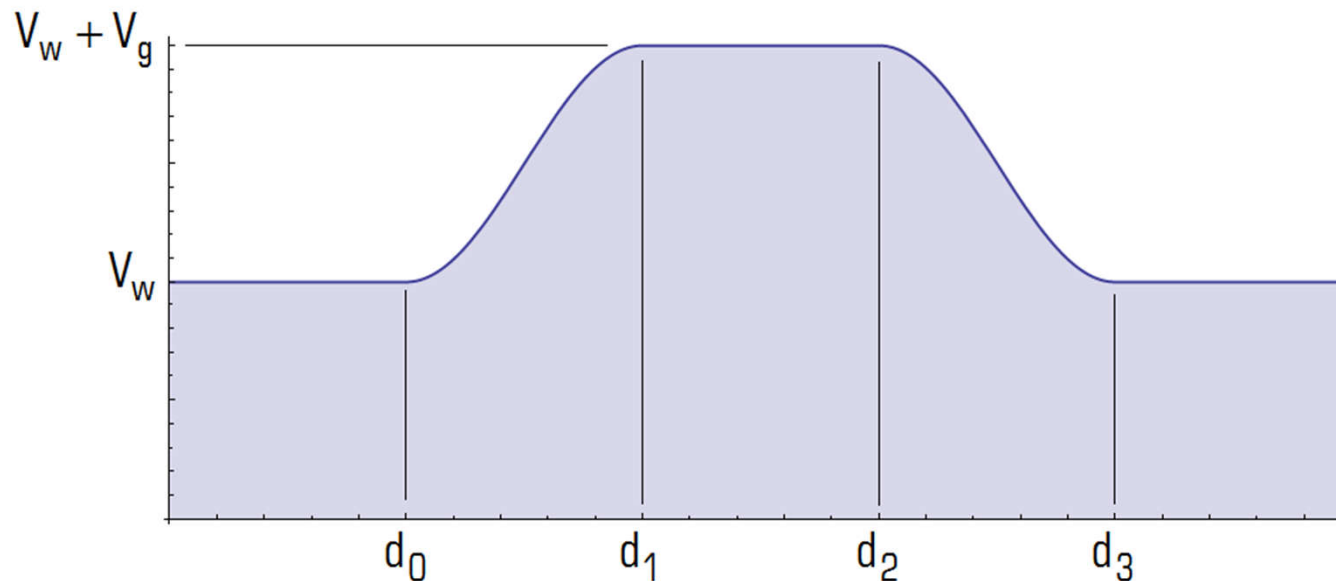
Tem início e término suavizados



Exemplo
em uma
dimensão

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{se } x < d_0 & V_{w \text{ total}} = V_w \\ \text{se } d_0 < x < d_1 & V_{w \text{ total}} = V_w + V_g \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\pi \frac{x - d_0}{d_1 - d_0} \right) \right) \\ \text{se } d_1 < x < d_2 & V_{w \text{ total}} = V_w + V_g \\ \text{se } d_2 < x < d_3 & V_{w \text{ total}} = V_w + V_g \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\pi \frac{x - d_2}{d_3 - d_2} \right) \right) \\ \text{se } x > d_3 & V_{w \text{ total}} = V_w \end{array} \right.$$

RAJADA DISCRETA



A distância $d_m = d_1 - d_0$ deve ser escolhida tal que excite modos normais de vibração e **frequências naturais** do sistema.

A distância $(d_2 - d_1)$ pode ser nula.

TURBULÊNCIA DE DRYDEN

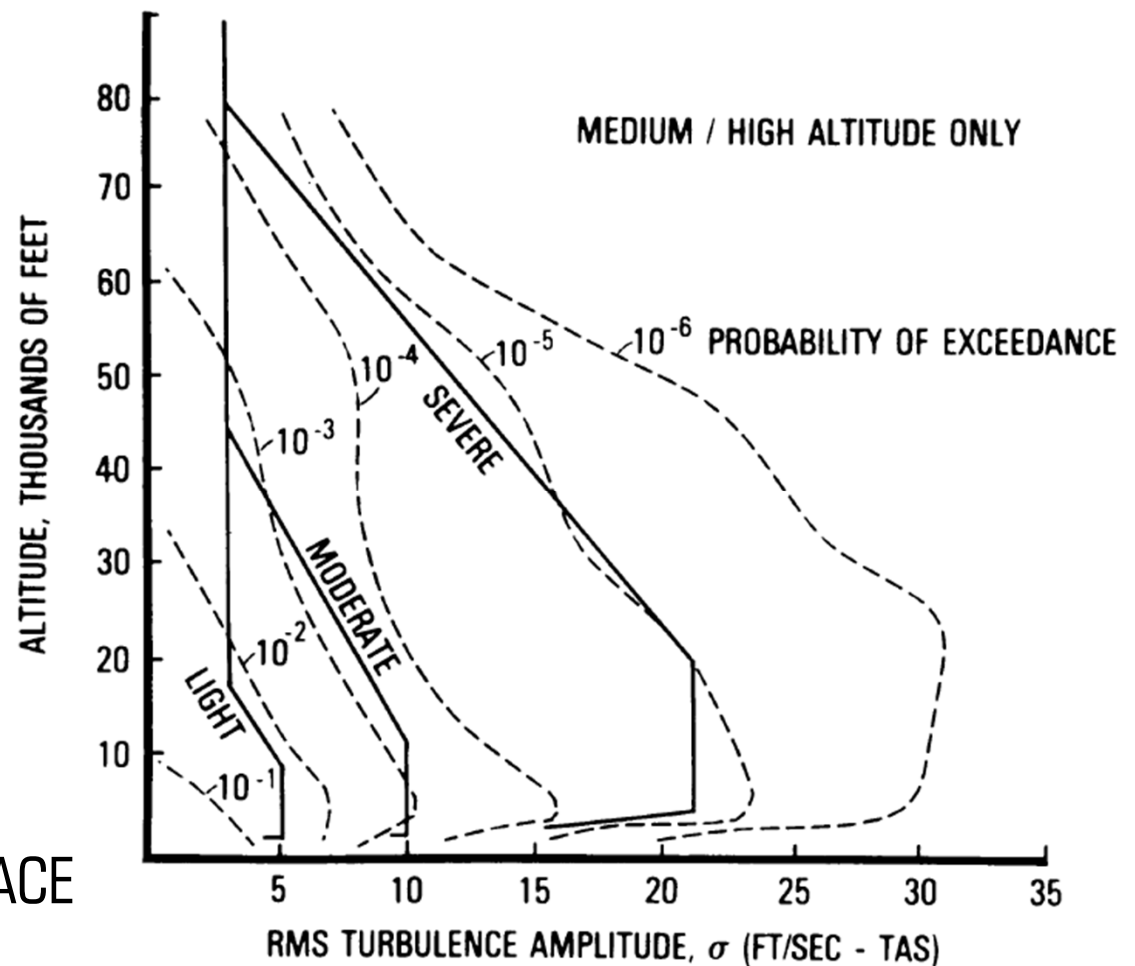
Modelo estocástico: perfil de **distribuição espectral** definida para cada altitude.

Normas de Referência:

- MIL-STD-1797A
- MIL-HDBK-1797A
- MIL-F-8785C

“Flying Qualities of
Piloted Airplanes”

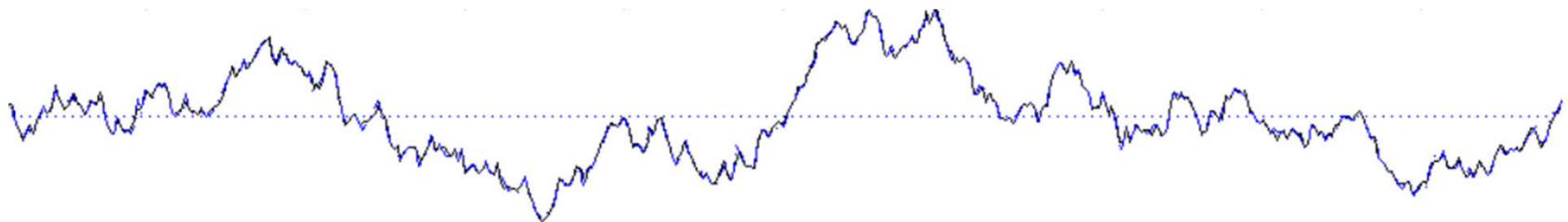
Está implementado no
MATLAB/SIMULINK/AEROSPACE



TURBULÊNCIA DE DRYDEN

Para cada altitude, é definido um padrão aleatório (ruído) de perturbação nas velocidades lineares e angulares usando o sistema de coordenadas do corpo e a direção do vento.

Comportamento browniano:



Perfil espectral de formato (intensidade) bem definido.
Probabilidade de ocorrência de eventos severos definida.