

# Aerodinámica de altas velocidades y fenómenos de re-entrada

## Modelos de atmósferas planetarias

Sebastián Franchini

Curso 2020-2021



Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva”  
Universidad Politécnica de Madrid. IDR/UPM  
E.T.S.I. Aeronáutica y del Espacio  
[www.idr.upm.es](http://www.idr.upm.es)

## Motivación

- Los problemas de reentrada (o entrada) están relacionados con las fuerzas aerodinámicas sobre el vehículo.

## Motivación

- Los problemas de reentrada (o entrada) están relacionados con las fuerzas aerodinámicas sobre el vehículo.
- El decaimiento orbital se debe a la resistencia aerodinámica (LEO)
  - Puede determinar la vida del vehículo
  - Necesidad de sistemas de mantenimiento de órbita

## Motivación

- Los problemas de reentrada (o entrada) están relacionados con las fuerzas aerodinámicas sobre el vehículo.
- El decaimiento orbital se debe a la resistencia aerodinámica (LEO)
  - Puede determinar la vida del vehículo
  - Necesidad de sistemas de mantenimiento de órbita
- Parte de la trayectoria de los lanzadores es en la atmósfera
  - Aparecen cargas aerodinámicas

## Motivación

- Los problemas de reentrada (o entrada) están relacionados con las fuerzas aerodinámicas sobre el vehículo.
- El decaimiento orbital se debe a la resistencia aerodinámica (LEO)
  - Puede determinar la vida del vehículo
  - Necesidad de sistemas de mantenimiento de órbita
- Parte de la trayectoria de los lanzadores es en la atmósfera
  - Aparecen cargas aerodinámicas
- Maniobras orbitales aeroasistidas

## Motivación

- Los problemas de reentrada (o entrada) están relacionados con las fuerzas aerodinámicas sobre el vehículo.
- El decaimiento orbital se debe a la resistencia aerodinámica (LEO)
  - Puede determinar la vida del vehículo
  - Necesidad de sistemas de mantenimiento de órbita
- Parte de la trayectoria de los lanzadores es en la atmósfera
  - Aparecen cargas aerodinámicas
- Maniobras orbitales aeroasistidas

**Dependen de las condiciones de la atmósfera**

Para la predicción precisa de las trayectorias

**Es necesario un modelo de la atmósfera**

Para la predicción precisa de las trayectorias

**Es necesario un modelo de la atmósfera**

## Requerimientos

- Dependencia de la densidad, la temperatura y la composición con:
  - la posición (altitud, latitud, ángulo de hora solar)
  - actividad solar
  - perturbaciones geomagnéticas
  - ciclos estacionales
  - dinámica atmosférica



Para la predicción precisa de las trayectorias

**Es necesario un modelo de la atmósfera**

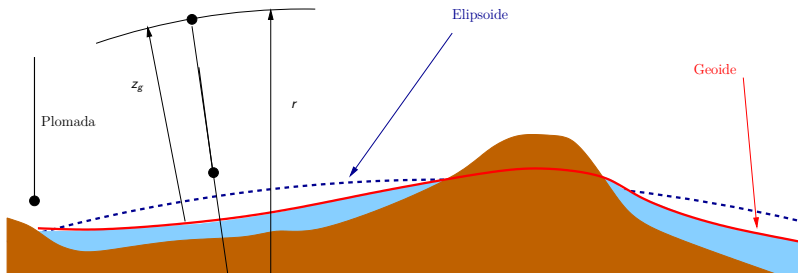
## Requerimientos

- Dependencia de la densidad, la temperatura y la composición con:
  - la posición (altitud, latitud, ángulo de hora solar)
  - actividad solar
  - perturbaciones geomagnéticas
  - ciclos estacionales
  - dinámica atmosférica
- Debería ser preciso, pero sencillo
  - Aplicaciones en tiempo real
  - Implementación a bordo de vehículos

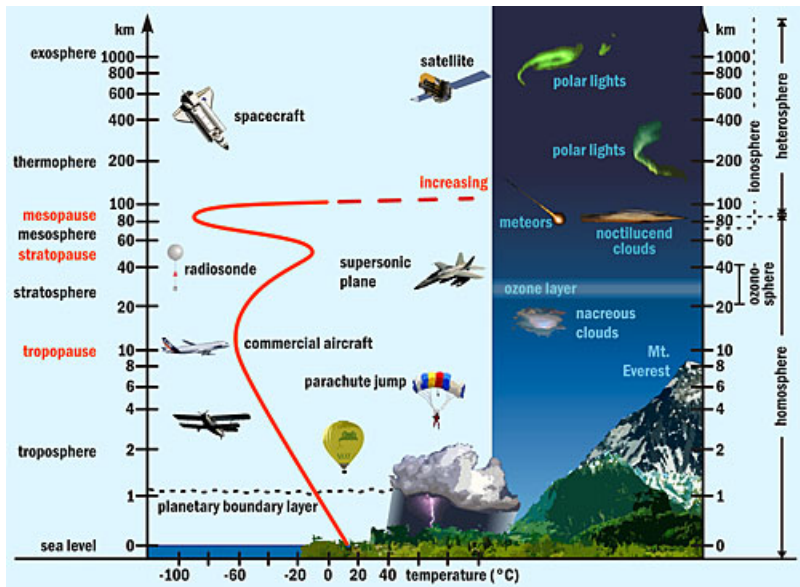
# Definición de altitud

## Altitudes

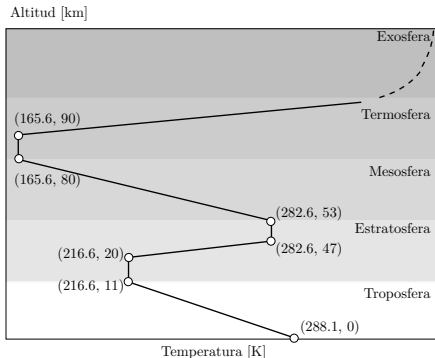
- **Altitud absoluta** ( $r$ ): distancia medida desde el centro de la Tierra
- **Altitud geométrica** ( $z_g$ ): distancia medida desde el nivel medio del mar.
- Considerando la Tierra como esférica  $\triangleright r = z_g + R_T$



# La atmósfera terrestre



# Atmósfera Estándar Internacional (ISA)



$$T = T_i + \lambda_i (z - z_i)$$

## ¿Qué es?

- Referencia común para problemas de diseño y operación de aeronaves.
- Obtenida de valores medios mundiales.
- Actividad solar media.

## Hipótesis

- Atmósfera en reposo con respecto a la tierra.
- El aire es un gas perfecto.
- A nivel del mar ( $z = 0$ )
  - $P_0 = 101325 \text{ Pa}$
  - $T_0 = 288.15 \text{ K} (15.15^\circ \text{ C})$
- La aceleración de la gravedad es constante  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

# Atmósfera Estándar Internacional (ISA)

- Variación de la temperatura con la altitud:

$$T = T_i + \lambda_i (z - z_i)$$

- Ref: ESDU 77021

$i$	$z_i$ [m]	$T_i$ [K]	$\lambda_i$ [K/m]	$p_i$ [N/m <sup>2</sup> ]
0	0	288.15	$-6.5 \times 10^{-3}$	$1.01325 \times 10^5$
1	$11 \times 10^3$	216.65	0	$0.22632 \times 10^5$
2	$20 \times 10^3$	216.65	$1.0 \times 10^{-3}$	$0.05474 \times 10^5$
3	$32 \times 10^3$	228.65	$2.8 \times 10^{-3}$	$0.00868 \times 10^5$
...				

- Variación de la temperatura con la altitud:

$$T = T_i + \lambda_i (z - z_i)$$

- Variación de la temperatura con la altitud:

$$T = T_i + \lambda_i (z - z_i)$$

- Variación de la presión con la altitud cuando  $\lambda_i \neq 0$ :

$$\frac{p}{p_i} = \left( \frac{T_i}{T} \right)^{\frac{g_0}{R\lambda}} = \left( \frac{T_i}{T_i + \lambda_i (z - z_i)} \right)^{\frac{g_0}{R\lambda}}$$

- Variación de la temperatura con la altitud:

$$T = T_i + \lambda_i (z - z_i)$$

- Variación de la presión con la altitud cuando  $\lambda_i \neq 0$ :

$$\frac{p}{p_i} = \left( \frac{T_i}{T} \right)^{\frac{g_0}{R\lambda}} = \left( \frac{T_i}{T_i + \lambda_i (z - z_i)} \right)^{\frac{g_0}{R\lambda}}$$

- Variación de la presión con la altitud cuando  $\lambda_i = 0$ :

$$\frac{p}{p_i} = \exp \left( -\frac{g_0}{RT_i} (z - z_i) \right)$$



- Para obtener las ecuaciones de la ISA se considera que  $g = g_0$ , es decir  $g \neq g(z)$

# Altitud geométrica y altitud geopotencial

- Para obtener las ecuaciones de la ISA se considera que  $g = g_0$ , es decir  $g \neq g(z)$
- Se define la altitud geopotencial de presión,  $z$ , altitud ficticia que no es la altitud geométrica  $z_g$

# Altitud geométrica y altitud geopotencial

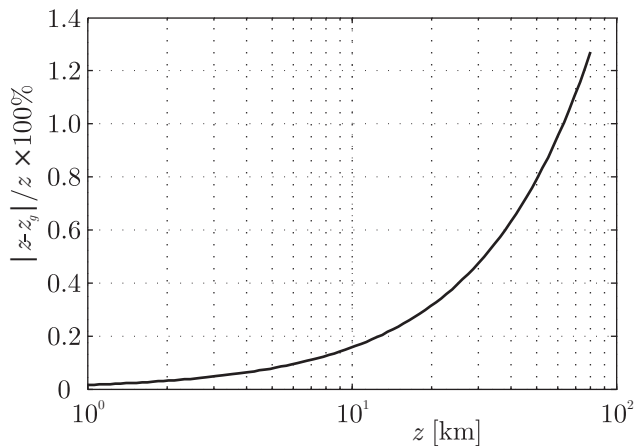
- Para obtener las ecuaciones de la ISA se considera que  $g = g_0$ , es decir  $g \neq g(z)$
- Se define la altitud geopotencial de presión,  $z$ , altitud ficticia que no es la altitud geométrica  $z_g$
- La variación de presión como  $dp = -\rho g_0 dz$ , cuando realmente debería ser  $dp = -\rho g(z_g) dz_g$ , de donde:

$$z = \frac{z_g R_T}{R_T + z_g},$$

o bien:

$$z_g = \frac{R_T z}{R_T - z}.$$

# Altitud geométrica y altitud geopotencial



- Velocidad del sonido

$$a = \sqrt{\gamma \frac{R_g}{M_a} T}$$

donde  $\gamma = c_P/c_V = 1.4$ ,  $R = R_g/M_a = 287 \text{ m}^2/(\text{s}^2\text{K})$

- Velocidad del sonido

$$a = \sqrt{\gamma \frac{R_g}{M_a} T}$$

donde  $\gamma = c_P/c_V = 1.4$ ,  $R = R_g/M_a = 287 \text{ m}^2/(\text{s}^2\text{K})$

- Viscosidad dinámica (formula de Sutherland):

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S_1}{T + S_1},$$

donde para el aire  $\mu_0 = 18.27 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$ ,  $S_1 = 120 \text{ K}$  y  $T_0 = 291.15 \text{ K}$

- Para obtener soluciones analíticas de la dinámica de la re-entrada se busca un modelo más sencillo aún.

- Para obtener soluciones analíticas de la dinámica de la re-entrada se busca un modelo más sencillo aún.
- Variación de la presión con la altitud cuando  $\lambda_i = 0$ :

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \exp \left( -\frac{g_o}{RT_i} (z - z_i) \right)$$

o bien:

$$\rho = \rho_s e^{-\frac{z}{z_s}}$$

donde  $z_s = RT_i/g_0$  es la *altitud de escala atmosférica*.



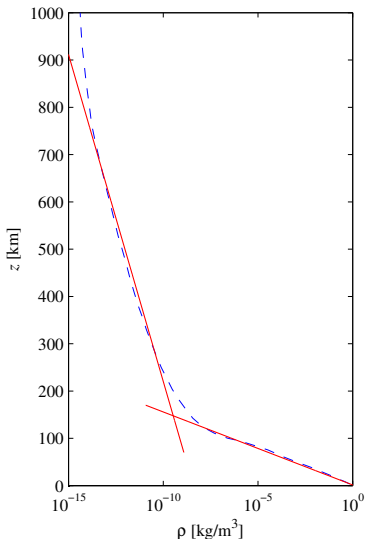
# Modelo de atmósfera exponencial I

- Ajuste del modelo

$$\rho = \rho_s e^{-\frac{z}{z_s}}$$

a datos empíricos.

- Hasta  $\approx 100$  km
  - $\rho_s = 1.2 \text{ kg/m}^3$
  - $z_s = 6.7 \times 10^3 \text{ m}$
- Hasta  $1000$  km
  - $\rho_s = 3.9 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^3$
  - $z_s = 60 \times 10^3 \text{ m}$



- Dependencia de la densidad, la temperatura y la composición con:
  - la posición (altitud, latitud, ángulo de hora solar)
  - actividad solar
  - perturbaciones geomagnéticas
  - ciclos estacionales
  - dinámica atmosférica

- Dependencia de la densidad, la temperatura y la composición con:
  - la posición (altitud, latitud, ángulo de hora solar)
  - actividad solar
  - perturbaciones geomagnéticas
  - ciclos estacionales
  - dinámica atmosférica
- Formulaciones semi-empíricas

- Dependencia de la densidad, la temperatura y la composición con:
  - la posición (altitud, latitud, ángulo de hora solar)
  - actividad solar
  - perturbaciones geomagnéticas
  - ciclos estacionales
  - dinámica atmosférica
- Formulaciones semi-empíricas
- Ejemplos:
  - Jacchia (J77)
  - NRLMSISE-00 Model
  - Earth Global Reference Atmospheric Model (GRAM)
  - ... (Ver “Guide to Reference and Standard Atmosphere Models”, AIAA)

## Formulación Homosfera

- Para  $z < 80$  km

$$\frac{d\rho}{\rho} = - \left[ \frac{T}{\bar{M}} d \left( \frac{\bar{M}}{T} \right) + \frac{\bar{M}g}{\Re T} dz \right]$$

$$g(z) = g_0 \left( \frac{R_T}{R_T + z} \right)^2$$

- La distribución de temperatura,  $T(\phi, \lambda, z, t)$ , se determina empíricamente.
  - Mediante ajuste de datos de satélites y/o estaciones de tierra
  - En general es un modelo de 5 DoF ( $T_0, z_0, T_x, z_x, T_\infty$ )
- La masa molecular,  $M(\phi, \lambda, z, t)$ , se determina empíricamente.

## Formulación Heterosfera

- Para  $z > 80$  km. Ecuación de difusión

$$\frac{dn_i}{n_i} = - (1 + \alpha_i) \frac{dT}{T} - \frac{M_i g}{\Re T} dz$$

donde:

- $n_i$  densidad numérica
- $M_i$  Masa molecular
- $\alpha_i$  coeficiente de difusión térmica
- La masa molecular media y la densidad:

$$\bar{M} = \sum_i n_i M_i / N$$

$$\rho = \bar{M} N / A$$

- $T(\phi, \lambda, z, t)$ , se determina empíricamente.

## Space engineering - Space environment (ECSS-E-ST-10-04C)

“A good knowledge of temperature, total density, concentrations of gas constituents and pressure is important for many space missions exploiting the low-earth orbit regime (LEO), below approx. 1 000 km altitude.

Aerodynamic forces on the spacecraft, due to the orbital motion of a satellite through a rarefied gas which itself can have variable high velocity winds, **are important for the combination of planning satellite lifetime, for the maintenance of orbits, for sizing the necessary propulsion system, for the design of attitude control system, and for estimating the peak accelerations and torques imposed on sensitive payloads.”**

## NRLMSISE-00

- NRL Mass Spectrometer, Incoherent Scatter Radar Extended Model
- Proporciona la temperatura y la densidad de los componentes
- Basado en mucha información de satélites, cohetes y radar
- Tiene una “formulación matemática flexible”
- Válido desde la superficie hasta la exosfera
- Usa 2 índices:
  - $F_{10.7}$ : índice de la actividad solar.
    - Flujo solar a una longitud de onda de 10.7 cm
    - Medido por un radio telescopio cerca de Ottawa desde 1947 y Penticton desde 1991
  - $A_p$ : índice de la actividad geomagnética



## Jacchia-Bowman 2006 (JB-2006)

- Proporciona la temperatura y la densidad de los componentes
- Modelos de densidad mejores y más precisos
- Válido desde 120 km hasta la exosfera
- Usa 4 índices:
  - $F_{10.7}$ : índice de la actividad solar.
  - $S_{10.7}$ : Medido por el SOHO - Solar Extreme-ultraviolet Monitor (SEM) 26–34 nm
  - $M_{10.7}$ : Medido por el NOAA16 y 17 - Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) spectrometer
  - $A_p$ : índice de la actividad geomagnética

## GLOBAL Reference Atmosphere Models - GRAM

- Código abierto (Fortran 77)
- Disponible bajo licencia
- Similar al NRLMSISE-00

## Júpiter

- “Bastante” información (Cassini y Galileo) de las capas superiores y su composición

## Venus

- Venus International Reference Atmosphere, VIRA

## Marte

- MarsGRAM-2005
- Martian Climate Database (EMCD)
- Ver referencias ECSS-E-ST-10-04C