

Meteorologia – Solução das séries de exercícios

1º Semestre - 2025/26

1. Termodinâmica do ar

Exercício 1.1.

Calcule as constantes dos gases ideais para (a) o ar seco (R_d), para (b) o vapor de água (R_v) e (c) para o ar húmido com 2 % de vapor de água (em volume). Considere $R = 8.3145 [J K^{-1} mol^{-1}]$, e que o ar seco é constituído por Azoto (78.08 %), Oxigénio (20.95 %), Árgon (0.93 %) e CO_2 (0.04 %).

Massas molares: $M(N_2) = 28 [g mol^{-1}]$, $M(O_2) = 32 [g mol^{-1}]$, $M(Ar) = 40 [g mol^{-1}]$, $M(CO_2) = 44 [g mol^{-1}]$, $M(H_2O) = 18 [g mol^{-1}]$

Solução:

a) Para obter a constante dos gases ideais para o ar seco é necessário obter a massa molar média do mesmo (ignoramos o conteúdo de H_2O):

$$\begin{aligned}\bar{M}_d &= M(N_2) \times f(N_2) + M(O_2) \times f(O_2) + M(Ar) \times f(Ar) + M(CO_2) \times f(CO_2) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \bar{M}_d &= 28[g mol^{-1}] \times 0.7808 + 32[g mol^{-1}] \times 0.2095 + 40[g mol^{-1}] \times 0.0093 + 44[g mol^{-1}] \times 0.0004 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \bar{M}_d = 28.956[g mol^{-1}]\end{aligned}$$

Após, simplesmente dividimos a constante universal dos gases ideais pela massa molar média do ar seco:

$$\begin{aligned}R_d &= \frac{R}{\bar{M}_d} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow R_d &= \frac{8.3145[J K^{-1} mol^{-1}]}{28.956[g mol^{-1}]} \times \frac{1000[g]}{1[kg]} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow R_d = 287.143 [J K^{-1} kg^{-1}]\end{aligned}$$

(b) O processo é similar, mas usando apenas a massa molar da água:

$$\begin{aligned}R_v &= \frac{R}{M(H_2O)} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow R_v &= \frac{8.3145[J K^{-1} mol^{-1}]}{18[g mol^{-1}]} \times \frac{1000[g]}{1[kg]} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow R_v = 462 [J K^{-1} kg^{-1}]\end{aligned}$$

(c) Combinando os resultados anteriores, podemos calcular a constante dos gases ideais para um ar húmido com 2 % de vapor de água:

$$\begin{aligned}R_{ah} &= R_d \times f(d) + R_v \times f(v) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow R_{ah} &= 287.143 [J K^{-1} kg^{-1}] \times 0.98 + 462 [J K^{-1} kg^{-1}] \times 0.02 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow R_{ah} = 290.640 [J K^{-1} kg^{-1}]\end{aligned}$$

Exercício 1.2.

O interior de um recipiente fechado encontra-se à pressão de uma atmosfera e temperatura de 15°C . Calcule a densidade, no caso desse gás ser constituído por:

- Azoto (78.08 %), Oxigénio (20.95%), Árgon (0.93%) e CO_2 (0.04%).
- Ar seco (98 %) e vapor de água (2 %).

Solução:

(a) Partindo da lei dos gases ideais, podemos deduzir a expressão da densidade:

$$\begin{aligned} pV &= nRT = n \frac{M_d}{M_d} RT = m_d R_d T \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{p}{R_d T} &= \frac{m_d}{V} \Leftrightarrow \\ \rho_d &= \frac{p}{R_d T} = \frac{M_d p}{R T} \end{aligned}$$

Calculando a massa molar média para o gás:

$$\begin{aligned} \overline{M}_d &= M(\text{N}_2) \times f(\text{N}_2) + M(\text{O}_2) \times f(\text{O}_2) + M(\text{Ar}) \times f(\text{Ar}) + M(\text{CO}_2) \times f(\text{CO}_2) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \overline{M}_d &= 28[\text{g mol}^{-1}] \times 0.7808 + 32[\text{g mol}^{-1}] \times 0.2095 + 40[\text{g mol}^{-1}] \times 0.0093 + 44[\text{g mol}^{-1}] \times 0.0004 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \overline{M}_d &= 28.956[\text{g mol}^{-1}] \end{aligned}$$

Assumindo que $p = 1013.25 \text{ hPa} = 101325 [\text{Nm}^{-2}]$ e $T = 15 + 273.15 [\text{K}] = 288.15 [\text{K}]$, podemos então calcular:

$$\begin{aligned} \rho_d &= \frac{p}{R_d T} = \frac{M_d p}{R T} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \rho_d &= \frac{28.956 [\text{g mol}^{-1}] \times 101325 [\text{Nm}^{-2}]}{8.3145 [\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}] \times 288.15 [\text{K}]} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \rho_d &= 1224.62 [\text{g N m}^{-2} \text{J}^{-1}] \times \frac{1 [\text{kg}]}{1000 [\text{g}]} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \rho_d &= 1.225 [\text{kg m}^{-3}] \end{aligned}$$

(b) Relembrando que $R_{ah} = 290.640 [\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}]$ e usando a expressão da alínea a):

$$\begin{aligned} \rho_d &= \frac{p}{R_{ah} T} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \rho_d &= \frac{101325 [\text{Nm}^{-2}]}{290.640 [\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}] 288.15 [\text{K}]} \Leftrightarrow \\ \rho_d &= 1.210 [\text{kg m}^{-3}] \end{aligned}$$

Exercício 1.3.

A atmosfera de Neptuno é constituída por Hidrogénio (85 %), Hélio (13 %) e Metano (2 %). As massas molares são 2, 4 e 16 g mol^{-1} , respetivamente. Determine a constante dos gases ideais (mássica) para essa atmosfera. Tendo em consideração que a massa de Neptuno vale $1.02 \times 10^{26} \text{ kg}$ e que o seu raio é $24.7 \times 10^6 \text{ m}$, calcule a sua velocidade de escape. É superior ou inferior à da Terra? Quais as implicações disto para a atmosfera?

Solução:

Primeiro, calculamos a massa molar média da atmosfera de Neptuno:

$$\begin{aligned} \overline{M}_N &= M(\text{H}) f(\text{H}) + M(\text{He}) f(\text{He}) + M(\text{CH}_4) f(\text{CH}_4) \\ &= 2 \text{ g mol}^{-1} \times 0.85 + 4 \text{ g mol}^{-1} \times 0.13 + 16 \text{ g mol}^{-1} \times 0.02 \\ &= 2.54 \text{ g mol}^{-1} \times \frac{1 [\text{kg}]}{1000 [\text{g}]} \\ &= 2.54 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1} \end{aligned}$$

Depois, podemos obter a constante dos gases ideais para a atmosfera:

$$\begin{aligned} R_d &= \frac{R}{\overline{M}_N} \\ &= \frac{8.3145 [J \, K^{-1} \, mol^{-1}]}{2.54 \times 10^{-3} [kg \, mol^{-1}]} \\ &= 3273.43 [J \, K^{-1} \, kg^{-1}] \end{aligned}$$

Para calcular a velocidade de escape igualamos a expressão da energia cinética àquela exercida pela força gravítica sobre um corpo:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m v_e^2 &= \frac{G m_N m}{r_N} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow v_e &= \sqrt{\frac{2 G m_N m}{r_N m}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow v_e &= \sqrt{\frac{2 \times 6.673 \times 10^{-11} [m^3 \, kg^{-1} \, s^{-2}]}{24.7 \times 10^6 [m]} \times 1.02 \times 10^{26} [kg]} \Leftrightarrow \\ v_e &= 23476.166 [m \, s^{-1}] = 23.5 [km \, s^{-1}] \end{aligned}$$

De forma similar, para a Terra:

$$\begin{aligned} v_e &= \sqrt{\frac{2 G m_T m}{r_T m}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow v_e &= \sqrt{\frac{2 \times 6.673 \times 10^{-11} [m^3 \, kg^{-1} \, s^{-2}]}{6.378 \times 10^6 [m]} \times 5.972 \times 10^{24} [kg]} \Leftrightarrow \\ v_e &= 11178.75 [m \, s^{-1}] = 11.2 [km \, s^{-1}] \end{aligned}$$

Ou seja, Neptuno tem uma velocidade de escape mais de duas vezes superior à da Terra, o que quer isto dizer para a atmosfera? A velocidade de escape dum planeta dá-nos a ideia se este consegue reter uma atmosfera ao longo de milhões de anos. Neste exemplo, o planeta Terra, com uma atmosfera constituída de moléculas "pesadas" como N_2 e O_2 tem uma velocidade grande o suficiente para que estas fiquem sobre o planeta. Já Neptuno, com uma velocidade de escape muito maior, consegue reter elementos ainda mais leves como H ou He . Como sugestão, podemos calcular a muito inferior velocidade de escape da Lua, que não tem atmosfera, para verificar a ordem de grandeza com que se "deixa de ter" uma atmosfera estável e fixa sobre o planeta.

Para se ter uma melhor ideia de que elementos podem ser retidos ou não por cada planeta, podemos calcular a velocidade média (térmica) de uma partícula ou molécula.

Exercício 1.4.

Se à temperatura de $0^\circ C$ a densidade do ar seco for de $1.275 \, kg \, m^{-3}$ e a do vapor de água de $4.770 \times 10^{-3} \, kg \, m^{-3}$, qual a pressão exercida por uma mistura de ambos, à mesma temperatura?

Solução:

De acordo com a Lei de Dalton, a soma da pressão parcial exercida por cada um dos gases numa mistura é igual à pressão total exercida pelo gás. Assim, podemos obter (através da lei dos gases ideais, e de resultados anteriores):

$$\begin{aligned} P &= P_d + P_v \Leftrightarrow \\ P &= R_d \rho_d T + R_v \rho_v T \Leftrightarrow \\ P &= (R_d \rho_d + R_v \rho_v) \times T \Leftrightarrow \\ P &= (287.143 [J \, K^{-1} \, kg^{-1}] \times 1.275 [kg \, m^{-3}] + 462 [J \, K^{-1} \, kg^{-1}] \times 4.770 \times 10^{-3} [kg \, m^{-3}]) \times 273.15 [K] \Leftrightarrow \\ P &= 100602.16 [J \, m^{-3}] = 1006.02 [hPa] \end{aligned}$$

Exercício 1.5.

Considere ar húmido com 1 % de vapor de água e uma temperatura real de 288 K. Qual a correção na temperatura virtual ($\equiv T_v - T$)?

Solução:

Por definição, a temperatura virtual é aquela que seria necessário colocar uma partícula de ar seco para que, à mesma pressão, tenha a mesma densidade que uma partícula de ar húmido. Assim, podemos tomar a aproximação:

$$\begin{aligned} T_v &\approx T(1 + 0.61r) \Leftrightarrow \\ T_v &\approx 288 \text{ [K]} \times \left(1 + 0.61 \times \frac{0.01}{0.99}\right) \Leftrightarrow \\ T_v &\approx 289.78 \text{ [K]} \end{aligned}$$

Assim, temos $T_v - T \equiv 289.78 \text{ [K]} - 288 \text{ [K]} = 1.78 \text{ [K]}$

Exercício 1.6.

Partindo da equação hidrostática $\left(\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g\right)$,

- Mostre que, para uma atmosfera isotérmica se tem $p = p_0 e^{-\frac{g(z-z_0)}{R_d T}}$.
- Mostre que para uma atmosfera com um gradiente térmico vertical de $\Gamma = -\partial T/\partial z = 6.5 \text{ K km}^{-1}$, se tem $p = p_0 \frac{T_0 - \Gamma}{T_0 - \Gamma} \frac{z}{z_0} \frac{g}{R_d \Gamma}$.
- Calcule a pressão no topo do monte Everest (8848 m), assumindo uma pressão de 1013 hPa e temperatura de 15 °C ao nível do mar: (i) Usando a expressão da alínea a); ii) Usando a expressão da alínea b); (iii) Usando a expressão da alínea a), mas admitindo uma temperatura média na camada supondo que a temperatura no topo é de -40 °C. Compare os resultados.

Solução:

a) Sendo uma atmosfera isotérmica, temos a temperatura constante, podemos então integrar tendo em conta a lei dos gases ideais:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial z} &= -\rho g \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \partial p &= -\rho g \partial z \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \partial p &= -\frac{p}{R_d T} g \partial z \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{1}{p} \partial p &= -\frac{g}{R_d T} \partial z \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \int_{p_0}^p \frac{1}{p} dp &= -\frac{g}{R_d T} \int_{z_0}^z dz \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln p - \ln p_0 &= -\frac{g}{R_d T} (z - z_0) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln \frac{p}{p_0} &= -\frac{g(z - z_0)}{R_d T} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow p &= p_0 e^{-\frac{g(z - z_0)}{R_d T}} \quad \square \end{aligned}$$

b) De forma similar à alínea anterior, procedemos, agora com a temperatura a variar de acordo com

o gradiente térmico vertical $T = T_0 - \Gamma z$, assim, integramos:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p}{\partial z} &= -\rho g \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \partial p &= -\rho g \partial z \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \partial p &= -\frac{p}{R_d T} g \partial z \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{1}{p} \partial p &= -\frac{g}{R_d (T_0 - \Gamma z)} \partial z \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \int_{P_0}^P \frac{1}{p} dp &= -\frac{g}{R_d} \int_{z_0}^z \frac{1}{T_0 - \Gamma z} dz \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \ln p - \ln p_0 &= \frac{g}{R_d \Gamma} [\ln (T_0 - \Gamma z) - \ln (T_0 - \Gamma z_0)] \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \ln \frac{p}{p_0} &= \frac{g}{R_d \Gamma} \ln \frac{T_0 - \Gamma z}{T_0 - \Gamma z_0} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow p &= p_0 \left(\frac{T_0 - \Gamma z}{T_0 - \Gamma z_0} \right)^{\frac{g}{R_d \Gamma}} \quad \square
 \end{aligned}$$

c.i) Aplicando os dados à equação obtida em a):

$$\begin{aligned}
 p &= p_0 e^{-\frac{g(z-z_0)}{R_d T}} \Leftrightarrow \\
 p &= 1013 [hPa] e^{-\frac{9.81[m.s^{-2}] \times 8848[m]}{287.143 [J K^{-1} kg^{-1}] \times 288.15[K]}} \Leftrightarrow \\
 p &= 354.822 [hPa]
 \end{aligned}$$

c.ii) Da mesma forma:

$$\begin{aligned}
 p &= p_0 \left(\frac{T_0 - \Gamma z}{T_0 - \Gamma z_0} \right)^{\frac{g}{R_d \Gamma}} \Leftrightarrow \\
 p &= 1013 [hPa] \left(\frac{288.15 [K] - 6.5 \times 10^{-3} [K m^{-1}] \times 8848 [m]}{288.15 [K]} \right)^{\frac{9.81[m.s^{-2}]}{287.143 [J K^{-1} kg^{-1}] \times 6.5 \times 10^{-3} [K m^{-1}]} } \Leftrightarrow \\
 p &= 314.35 [hPa]
 \end{aligned}$$

c.iii) De novo, aplicando os dados à equação obtida em a), mas tendo em conta que $T = (T_0 + T_1)/2 = (288.15 + 233.15)/2 = 260.65 [K]$:

$$\begin{aligned}
 p &= p_0 e^{-\frac{g(z-z_0)}{R_d T}} \Leftrightarrow \\
 p &= 1013 [hPa] e^{-\frac{9.81[m.s^{-2}] \times 8848[m]}{287.143 [J K^{-1} kg^{-1}] \times 260.65 [K]}} \Leftrightarrow \\
 p &= 317.65 [hPa]
 \end{aligned}$$

Exercício 1.7.

Calcule a densidade do ar no topo da Serra da Estrela (2000 m de altitude), considerando uma temperatura 0 °C. Considere ar húmido com 2 % de vapor de água (em massa, humidade específica), e que a pressão atmosférica ao nível do mar vale 1013 hPa.

Solução:

Utilizando a expressão da alínea a) do exercício anterior, podemos calcular:

$$\begin{aligned}
 p &= p_0 e^{-\frac{g(z-z_0)}{R_d T}} \Leftrightarrow \\
 p &= 1013 [hPa] e^{-\frac{9.81[m.s^{-2}] \times 2000[m]}{287.143 [J K^{-1} kg^{-1}] \times 273.15 [K]}} \Leftrightarrow \\
 p &= 788.807 [hPa] \times \frac{100 [Pa]}{1 [hPa]} \Leftrightarrow \\
 p &= 78880.7 [Pa]
 \end{aligned}$$

Aplicando o resultado à lei dos gases ideais (ver exs anteriores):

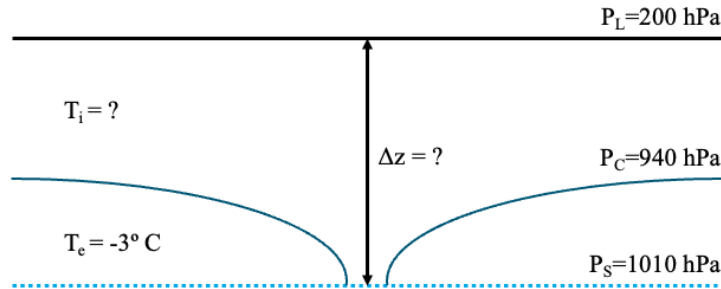
$$\begin{aligned}\rho &= \frac{p}{R_d T} \Leftrightarrow \\ \rho &= \frac{78880.7 \text{ [Pa]}}{287.143 \text{ [J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}] \times 273.15 \text{ [K]}} \Leftrightarrow \\ \rho &= 1.006 \text{ [kg m}^{-3}]\end{aligned}$$

Exercício 1.8.

Um furacão com uma pressão no centro de 940 hPa está embebido numa região com uma pressão (à superfície) de 1010 hPa . A tempestade está localizada sobre o oceano. Aos 200 hPa o furacão já não tem expressão (i.e., a superfície isobárica torna-se plana, sem cavamento). Estime a diferença de temperatura entre o centro do furacão e as zonas envolventes na camada entre a superfície e os 200 hPa . Assuma que a temperatura média na região exterior ao furacão é de -3°C e ignore a correção de temperatura virtual (i.e., $T_v = T$).

Solução:

Para melhor visualização sobre o problema:



No centro da estrutura, temos uma pressão de $P_C = 940 \text{ [hPa]}$ e no exterior $P_S = 1010 \text{ [hPa]}$. Existem certas propriedades que são constantes tanto no interior como no exterior, usando isto, podemos utilizar a fórmula aplicada nos exs anteriores:

$$\begin{aligned}\ln \frac{p}{p_0} &= -\frac{g}{R_d T} \Delta z \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow T \ln \frac{p}{p_0} &= -\frac{g}{R_d} \Delta z\end{aligned}$$

À esquerda, temos propriedades constantes entre o interior e o exterior do furacão (com $T_v = T$). Podemos então igualar à esquerda:

$$\begin{aligned}T_i \ln \frac{p}{p_i} &= T_e \ln \frac{p}{p_e} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow T_i &= T_e \frac{\ln \frac{p}{p_e}}{\ln \frac{p}{p_i}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow T_i &= 270.15 \text{ [K]} \times \frac{\ln \frac{200 \text{ [hPa]}}{1010 \text{ [hPa]}}}{\ln \frac{200 \text{ [hPa]}}{940 \text{ [hPa]}}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow T_i &= 282.68 \text{ [K]}\end{aligned}$$

Assim, dentro do furacão temos uma temperatura média de 282.68 [K] (assumindo uma atmosfera isotérmica), enquanto fora temos uma temperatura média de 270.15 [K] . Temos portanto uma diferença de aproximadamente 12.53 [K] .

Exercício 1.9.

O sonho do Gervásio é viajar num balão de passageiros. Para tal, conseguiu alugar um balão com lugar para 1 passageiro, com um volume de 600 m^3 e cujo invólucro tem uma massa de 40 kg . O cesto tem 30 kg e transporta 30 kg em bilhas de gás que vão servir para aquecer o ar no interior do balão. No dia da viagem a pressão atmosférica era de 1013 hPa e a temperatura 15°C à superfície. Considere que a atmosfera é isotérmica e que se despreza a resistência do ar.

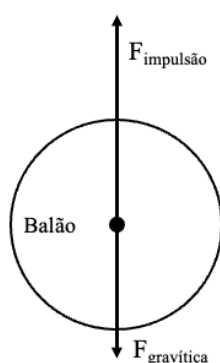
a) Considerando que o Gervásio pesa 70 kg e o ar no invólucro foi aquecido até 120°C , a que altitude estava o balão ao fim de 10 s ? Admita que a temperatura e a pressão do ar são constantes durante esse período.

b) Se porventura o Gervásio se encontrar a 800 hPa com uma temperatura de 0°C e o gás restante não permitisse aquecer o ar mais que 75°C , estaria o Gervásio condenado a cair?

c) A que temperatura teria que estar o ar no invólucro caso o Gervásio quisesse manter o balão na mesma altitude? Considere as mesmas condições da alínea anterior.

Solução:

Para facilitar a resolução partimos do esquema de forças do problema:



a) A força total exercida sobre o balão enquanto sobe pode ser descrita pela expressão (ver esquema acima):

$$\begin{aligned} F_T &= F_{imp} - F_g \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow m_T a &= \rho_{ar} V_T g - m_T g \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow a &= \frac{\rho_{ar} V_T g}{m_T} - g \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow a &= \frac{p_{ar} V_T g}{R_d T_{ar} m_T} - g \end{aligned}$$

Para calcular a aceleração da subida do balão, necessitamos de obter a massa total do conjunto:

$$\begin{aligned} m_T &= m_{solido} + m_{ar} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow m_T &= m_{inv} + m_{cesto} + m_{gas} + m_{Gerv} + \frac{pV_T}{R_d T_i} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow m_T &= 40 [\text{kg}] + 30 [\text{kg}] + 30 [\text{kg}] + 70 [\text{kg}] + \frac{101300 [\text{Pa}] \times 600 [\text{m}^3]}{287.05 [\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}] \times (120 + 273.15) [\text{K}]} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow m_T &= 708.57 [\text{kg}] \end{aligned}$$

Podemos agora inserir na expressão inicial:

$$\begin{aligned} a &= \frac{p_{ar} V_T g}{R_d T_{ar} m_T} - g \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow a &= \frac{101300 [\text{Pa}] \times 600 [\text{kg}] \times 9.81 [\text{ms}^{-2}]}{287.05 [\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}] \times (15 + 273.15) [\text{K}] \times 708.57 [\text{kg}]} - 9.81 [\text{ms}^{-2}] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow a &= 0.364 [\text{ms}^{-2}] \end{aligned}$$

De seguida, aplicamos uma expressão da mecânica clássica que descreve o movimento dum corpo sobre aceleração:

$$\begin{aligned} y_f &= y_i + v_{y_i} t + \frac{1}{2} a t^2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow y_f &= 0 + 0 + \frac{1}{2} \times 0.364 [ms^{-2}] \times 10^2 [s^2] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow y_f &= 18.2 [m] \end{aligned}$$

b) Começamos por calcular a massa total do sistema (ignoramos a alteração na massa de gás no tempo de viagem):

$$\begin{aligned} m_T &= m_{solido} + m_{ar} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow m_T &= m_{inv} + m_{cesto} + m_{gas} + m_{Gerv} + \frac{pV_T}{R_d T_i} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow m_T &= 40 [kg] + 30 [kg] + 30 [kg] + 70 [kg] + \frac{80000 [Pa] \times 600 [m^3]}{287.05 [Jkg^{-1}K^{-1}] \times (75 + 273.15) [K]} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow m_T &= 650.31 [kg] \end{aligned}$$

Usando este valor na expressão da alínea anterior:

$$\begin{aligned} a &= \frac{p_{ar} V_T}{R_d T_{ar} m_T} - g \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow a &= \frac{80000 [Pa] \times 600 [m^3] \times 9.81 [ms^{-2}]}{287.05 [Jkg^{-1}K^{-1}] \times (0 + 273.15) [K] \times 650.31 [kg]} - 9.81 [ms^{-2}] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow a &= -0.575 [ms^{-2}] \end{aligned}$$

Como a aceleração é negativa, eventualmente, o Gervásio terá um encontro com o solo.

c) Usando as expressões da alínea a) e igualando $F_T = 0$, podemos resolver para T_i :

$$\begin{aligned} F_T &= F_{imp} - F_g \Leftrightarrow \\ F_g &= F_{imp} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow m_T g &= \rho_{ar} V_T g \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow m_{solid} + \frac{p_{ar} V_T}{R_d T_i} &= \frac{p_{ar} V_T}{R_d T_{ar}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{p_{ar} V_T}{R_d T_i} &= \frac{p_{ar} V_T}{R_d T_{ar}} - m_{solid} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{1}{T_i} &= \frac{R_d}{p_{ar} V_T} \left(\frac{p_{ar} V_T}{R_d T_{ar}} - m_{solid} \right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{1}{T_i} &= \frac{1}{T_{ar}} - \frac{R_d m_{solid}}{p_{ar} V_T} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{1}{T_i} &= \frac{1}{(0 + 273.15) [K]} - \frac{287.05 [Jkg^{-1}K^{-1}] \times 170 [kg]}{80000 [hPa] \times 600 [m^3]} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{1}{T_i} &= 0.00264 [K^{-1}] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow T_i &= 378.16 [K] = 105.16^\circ C \end{aligned}$$