PROBLEMAS VARIADOS 4-2018

438.-Un cilindro adiabático A de sección 1 m² provisto de un émbolo adiabático, de masa despreciable y que puede deslizarse sin rozamiento, está situado inicialmente a una altura de 2 metros, contiene en su interior un depósito rígido diatérmano (que permite con facilidad el paso del calor) B, de capacidad 50 L que contiene 25 moles de un gas ideal de C_v= 2,5R a 300 K. El resto del cilindro está ocupado por el mismo gas a 10^5Pa de presión y 300 K.

A partir de este estado se comprime el gas de forma cuasiestática hasta que el émbolo disminuye su altura a 1,5 metros. En este instante y con el émbolo inmovilizado se produce la rotura del depósito B, alcanzándose un nuevo equilibrio.

A continuación el gas se expande contra una presión exterior de $1{,}5.10^{5}$ Pa hasta alcanzar el equilibrio con el entorno.

a. Determinar la temperatura y presión de los gases contenidos en A y B, justamente antes de romperse el depósito B.

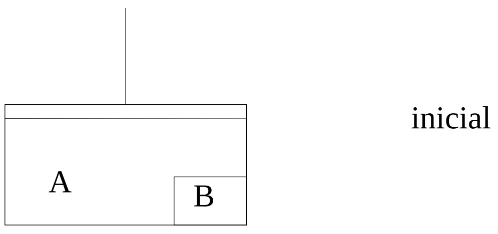
b. Temperatura y presión del gas del cilindro después de la rotura y de llegar al equilibrio.

c. Temperatura y presión del gas del cilindro cuando se ha alcanzado el equilibrio con el entorno

d. Variación de la entropía del sistema.

Examen. Escuela de Ingenieros Industriales. Madrid.

a) Calculamos el número de moles en A y la presión inicial en B, aplicando la ecuación de los gases perfectos.



$$V_A = 2 - 50.10^{-3} = 1{,}95\,m^3$$

$$10^5 \cdot \left(2 - 50.10^{-3}\right) = n \cdot 8{,}31 \cdot 300 \Rightarrow n = 78{,}2\,mol \quad ;$$

$$P_B \cdot 50.10^{-3} = 25 \cdot 8{,}31 \cdot 300 \Rightarrow P_B = 1{,}247.10^6\,Pa$$

El gas se comprime hasta que el émbolo queda a una altura de 1,5 metros

Calculamos el volumen y la presión en A, suponiendo que el proceso ocurre en dos etapas
.Primero se comprime el gas de A y segundo el gas de B se calienta y cambia su presión
El proceso de compresión de A es adiabático, lo que conlleva que la variación de entropía es cero

Esta etapa la denominamos 1.

$$V_{A1} = 1{,}5 - 50.10^{-3} = 1{,}45\,m^3$$
$$P_{A1} \cdot 1{,}45 = 78{,}2 \cdot 8{,}31 \cdot T_{A1}$$

$$\Delta S = n\left(C_V \ln\frac{T_f}{T_i} + R\ln\frac{V_f}{V_i}\right) \Rightarrow \quad \Delta S = 0 = n\left(C_V \ln\frac{T_{A1}}{300} + R\ln\frac{1{,}45}{1{,}95}\right) \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 78{,}2 \cdot 2{,}5 \cdot 8{,}31 \cdot \ln\frac{T_{A1}}{300} = -78{,}2 \cdot 8{,}31 \cdot (-0{,}2963) \qquad \Rightarrow \ln\frac{T_{A1}}{300} = 0{,}1185 \Rightarrow \quad \frac{T_{A1}}{300} = e^{0{,}1185}$$

$$\Rightarrow \quad T_{A1} = 337{,}7\,K$$

La segunda etapa es que parte de la energía de A se transmite al gas B hasta que se igualan las temperaturas.
Teniendo en cuenta que el cilindro está aislado la energía se conserva. Aplicamos el principio de equipartición de la energía

$$n_A \frac{3}{2} RT_A + n_B \frac{3}{2} R\,T_B = (n_A + n_B)\frac{3}{2} RT \quad \Rightarrow \qquad T = \frac{n_A\,T_A + n_B\,T_B}{n_A + n_B} \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad T = \frac{78{,}2 \cdot 337{,}7 + 25 \cdot 300}{78{,}2 + 25} = 328{,}6\,K$$

La presión del gas en el recipiente B la deducimos aplicando La ley de los gases perfectos

$$P_{B1} = \frac{n_B R\,T}{V_B} = \frac{25 \cdot 8{,}31 \cdot 328{,}6}{50.10^{-3}} = 1{,}37.10^6\,Pa$$

En resumen el gas A se encuentra ocupando un volumen de 1,45 m^3, a una temperatura de 328,6 K, siendo su presión

$$P_{A1} = \frac{n_{A1} R\,T}{V_{A1}} = \frac{78{,}2 \cdot 8{,}31 \cdot 328{,}6}{1{,}45} = 1{,}47.10^5\,Pa$$

El gas en B está también a 328,6 K, ocupa el volumen de 50 litros y su presión es $1,37.10^6$ Pa.

b) Al romperse el recipiente B los gases se mezclan ocupando todo el volumen que es 1,5 m^3, la temperatura es la misma anterior 328,6 K y el numero de moles n = 78,2+25=103,2.

Calculamos la nueva presión aplicando la ley de los gases perfectos

$$P_2 = \frac{(n_A + n_B)R\,T}{V} = \frac{103{,}2\cdot 8{,}31\cdot 328{,}6}{1{,}5} = 1{,}88.10^5\,\mathrm{Pa}$$

c) Expansión del gas contra la presión exterior de $1,5.10^5$ Pa. El proceso finaliza cuando se igualen las presiones, esto es, cuando el gas del cilindro tenga una presión de $1,5.10^5$ Pa.

Ahora el gas ejerce un trabajo contra el entorno. Aplicamos el primer principio de la Termodinámica. En este caso Q=0 ya que no se intercambia calor con el exterior

$$\Delta U = Q + W \Rightarrow n\,C_V\left(T_3 - 328{,}6\right) = W$$

El criterio de signos empleado es que un trabajo hecho por el sistema contra el entorno es negativo

$$W = -P_{exterior}\Delta V = -1{,}5.10^5\left(V_3 - 1{,}5\right) \;\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\; 103{,}2\cdot 2{,}5\cdot 8{,}31\left(T_3 - 328{,}6\right) = -1{,}5.10^5\left(V_3 - 1{,}5\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_3 - 328{,}6 = -69{,}96\left(V_3 - 1{,}5\right) \;\Rightarrow T_3 = 328{,}6 + 104{,}94 - 69{,}96\,V_3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad V_3 = \frac{433{,}54 - T_3}{69{,}96}$$

Aplicamos la ecuación de los gases perfectos entre los dos estados

$$\frac{1{,}88.10^5\cdot 1{,}5}{328{,}6} = \frac{1{,}5.10^5\cdot V_3}{T_3} \quad\Rightarrow\quad T_3 = \frac{328{,}6\cdot 1{,}5.10^5}{1{,}88.10^5\cdot 1{,}5}V_3 = 174{,}78\,V_3 \quad\Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad V_3 = \frac{433{,}54 - 174{,}78\,V_3}{69{,}96} \Rightarrow 69{,}96\,V_3 = 433{,}54 - 174{,}78\,V_3 \Rightarrow \quad V_3 = 1{,}77\,m^3$$

$$T_3 = 174{,}78\cdot 1{,}77 = 309{,}4 \quad K$$

d) La primera variación de entropía ocurre cuando el recipiente de 50 L se rompe y los gases se mezclan.

El primer estado es el gas A (78,2 mol , $1{,}47.10^5$ Pa; 1,45 m^3 ; 328,6 K) y el gas B (25 mol ; $1{,}37.10^6$Pa ; 50.10^{-3} m^3; 328,6 K) y el sistema evoluciona a (103,2 mol, $1{,}88.10^5$ Pa ; 1,5 m^3, 328,6 K)

Cambio de entropía $\Delta S = n\left(C_V \ln \frac{T_f}{T_i} + R \ln \frac{V_f}{V_i}\right)$; $T_f = T_i$

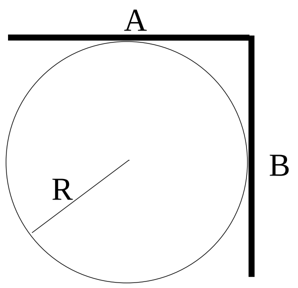
$$\Delta S_1 = 78{,}2 \cdot \left(8{,}31 \cdot \ln\frac{1{,}5}{1{,}45}\right) + 25\left(8{,}31 \cdot \ln\frac{1{,}5}{50.10^{-3}}\right) = 22{,}03 + 706{,}60 = 728{,}6\,\frac{J}{K}$$

El segundo es el cambio de (103,2 mol; $1{,}88.10^5$ Pa, 1,5 m^3 ; 328,6 K) a
(103,2 mol ; $1{,}5\ .10^5$ Pa , 1,77 m^3 ; 309,7 K)

$$\Delta S = n\left(C_V \ln \frac{T_f}{T_i} + R \ln \frac{V_f}{V_i}\right)$$

$$\Delta S_2 = 103{,}2\left(2{,}5 \cdot 8{,}31 \cdot \ln \frac{309{,}7}{328{,}6} + 8{,}31 \cdot \ln \frac{1{,}77}{1{,}5}\right) = 14{,}94\ \frac{J}{K}$$

439.- Dos superficies iguales unidas entre sí forman un ángulo diedro recto. Estas superficies se apoyan sobre un cilindro de radio R, tal como indica la figura inferior.
Determinar el coeficiente de rozamiento estático mínimo para que las superficies no resbalen sobre el cilindro.



Designamos con m a la masa de cada superficie.

Las fuerzas que actúan se representan en la figura 1

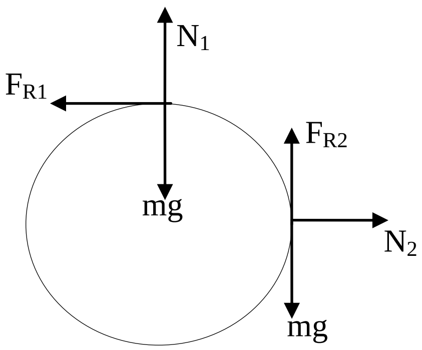


Fig.1

Si el sistema está en equilibrio se cumplen las siguientes ecuaciones

$$N_1 + F_{R2} - 2\,mg = 0 \qquad (1)$$

$$N_2 - F_{R1} = 0 \qquad (2)$$

Los momentos respecto a A y B son nulos

$$N_2 R - mg\,R + F_{R2} R = 0 \;\Rightarrow\; N_2 + F_{R2} = mg \qquad (3)$$

$$mg\,R + F_{R1} R - N_1 R = 0 \;\Rightarrow\; N_1 - F_{R1} = mg \qquad (4)$$

De las ecuaciones (2) y (3) resulta: $F_{R1} + F_{R2} = mg \qquad (5)$

Las relaciones entre las fuerzas normales y las de rozamiento son:

$$F_{R1} \le \mu\, N_1 \quad ; \quad F_{R2} \le \mu\, N_2$$

Despejando N_1 de (4) y sustituyendo en la desigualdad primera

$$F_{R1} \le \mu\left(mg + F_{R1}\right) \Rightarrow F_{R1} \le \mu\, mg + \mu\, F_{R1} \Rightarrow F_{R1} - \mu F_{R1} \le \mu\, mg \Rightarrow \quad F_{R1} \le \frac{\mu}{1-\mu} mg \qquad (6)$$

Despejando N_2 de (3) y sustituyendo en la desigualdad segunda

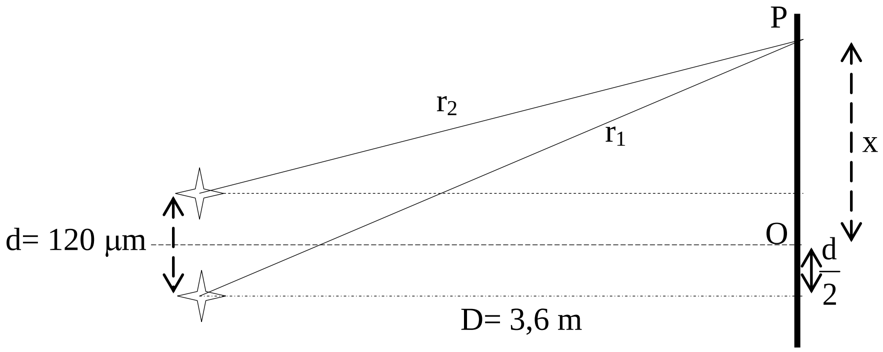
$$F_{R2} \le \mu\left(mg - F_{R2}\right) \Rightarrow F_{R2} \le \mu\, mg - \mu\, F_{R2} \Rightarrow F_{R2} + \mu F_{R2} \le \mu\, mg \Rightarrow \quad F_{R2} \le \frac{\mu}{1+\mu} mg \qquad (7)$$

Sustituyendo en la ecuación (5) en el caso de que (6) y (7) sean igualdades

$$\frac{\mu}{1-\mu} mg + \frac{\mu}{1+\mu} mg = mg \;\Rightarrow\; \mu \frac{2}{1-\mu^2} = 1 \Rightarrow \; \mu^2 + 2\mu - 1 = 0 \;\Rightarrow$$

$$\Rightarrow \mu = \frac{-2 \pm \sqrt{4+4}}{2} \;\Rightarrow\; \mu = -1 \pm \sqrt{2} \;\Rightarrow\; \mu = \sqrt{2} - 1 = 0{,}414$$

440.- Una radiación de λ = 480 nm que proviene de dos fuentes coherentes que distan entre sí 120 μm inciden sobre una pantalla que dista de las fuentes 3,6 m.
a) Se pide la distancia entre dos mínimos consecutivos del patrón de interferencia que aparece en la pantalla. ¿Cuál sería la distancia si la longitud de onda fuese 650 nm?
b) Si las longitudes de onda fuesen 480 nm y 600 nm, cuándo se produce la primera coincidencia de máximos aparte del máximo principal.
c) Si las longitudes de onda fuesen 550 nm y 962,5 nm, cuándo se produciría coincidencia entre un mínimo de λ= 550 nm con un máximo de λ = 965,5 nm



Consideramos un punto P de la pantalla, siendo r_1 y r_2 las distancias que ha de recorrer la luz de cada fuente luminosa para llegar a él.
Calculamos la diferencia de esas distancias

$$\Delta = r_1 - r_2 = \sqrt{D^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2} - \sqrt{D^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2}$$

Utilizamos un recurso matemático para intentar eliminar las raíces cuadradas

$$\Delta \cdot (r_1 + r_2) = (r_1 - r_2)\cdot(r_1 + r_2) = r_1^2 - r_2^2 = D^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 - \left[D^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2\right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta \cdot (r_1 + r_2) = x^2 + \frac{d^2}{4} + x\,d - \left(x^2 + \frac{d^2}{4} - x\,d\right) = 2\,x\,d \Rightarrow \quad \Delta = \frac{2\,x\,d}{r_1 + r_2}$$

Experimentalmente cuando se obtiene un patrón de interferencias D>>d y $r_1 \approx r_2 \approx D$ por lo que

$$\Delta = \frac{2\,x d}{2D} = \frac{x\,d}{D}$$

Si en P se produce una interferencia destructiva (oscuridad) es porque la diferencia de caminos es un múltiplo impar de la semilongitud de onda

$$\Delta = (2n+1)\frac{\lambda}{2} = \frac{x\,d}{D} \Rightarrow \quad x = \frac{(2n+1)\frac{\lambda}{2}\cdot D}{d} \quad ; \quad n = 0,1,2.......$$

La distancia entre dos mínimos consecutivos es:

$$\Delta x = \frac{[2n'+1]\frac{\lambda}{2}\cdot D}{d} - \frac{(2n+1)\frac{\lambda}{2}\cdot D}{d} = \frac{\lambda D}{2d}[(2n'+1)-(2n+1)] = \frac{\lambda D}{2d}2(n'-n) = \frac{\lambda D}{d}$$

Cuando λ = 480 nm $\quad \Delta x = \dfrac{480.10^{-9}.3,6}{120.10^{-6}} = 0,0144 \text{ m} = 1,44 \text{ cm}$

Cuando λ = 650 nm $\quad \Delta x = \dfrac{650.10^{-9}.3,6}{120.10^{-6}} = 0,0195 \text{ m} = 1,95 \text{ cm}$

b) Los máximos ocurren cuando la diferencia de marcha de los rayos es un múltiplo entero de la longitud de onda

$$\Delta = n\lambda = \frac{x\,d}{D} \Rightarrow x = \frac{n\lambda D}{d}$$

Si los máximos han de coincidir

$$x = \frac{n\lambda D}{d} = \frac{n'\lambda' D}{d} \Rightarrow n\lambda = n'\lambda' \Rightarrow n\cdot 480 = n'600$$

Cuando n=0 , n´ =0 , los dos máximos son principales están ambos en el punto O.

Si n= 1 , n´= 0,8 , no hay coincidencia ya que n´ ha de ser un número entero
Si n= 2 , n´= 1,6 , no hay coincidencia
Si n= 3 , n´ = 2,4, no hay coincidencia
Si n= 4 , n´ = 3,2, no hay coincidencia
Si n= 5 , n´ = 4, hay coincidencia

c) La coincidencia de un mínimo con un máximo supone que

$$(2n+1)\frac{550}{2} = n'\cdot 962,5 \Rightarrow \quad 2n+1 = 3,5\, n'$$

Cuando n= 3 , n´= 2, luego el tercer mínimo con λ =550 nm coincide con el segundo máximo de 965,5 nm.

441.- Un haz de protones de 1,00 microamperios se acelera mediante una diferencia de potencial de 10000 voltios.
a) Calcular la densidad de carga después de la aceleración de los protones, suponiendo que la densidad de corriente es uniforme dentro de un diámetro d= 2,00 mm y nula fuera de ese diámetro.
b) Calcular la componente radial de la intensidad del campo eléctrico fuera y dentro del haz.
c) Representar gráficamente el campo frente a la distancia
d) Suponiendo ahora que el haz está situado en el eje de un tubo cilíndrico conductor a potencial cero y radio interior 1,00 cm. Representar gráficamente el potencial dentro del tubo

Datos . Carga del protón, q_p= 1,602.10^{-19} C,
Masa del protón, m_p =1,672.10^{-27} kg ;
Permitividad del espacio vacío ε_o= 8,85.10^{-12} $C^2N^{-1}m^{-2}$

a) Calculamos la velocidad de los protones cuando han sido sometidos a la diferencia de potencial de diez mil voltios.

$$\frac{1}{2}m_p v^2 = q_P\,\Delta V \quad\Rightarrow\quad v=\sqrt{\frac{2q_p\,\Delta V}{m_p}}=\sqrt{\frac{2\cdot 1{,}602.10^{-19}\cdot 10^4}{1{,}672.10^{-27}}}=1{,}38.10^6\ \frac{m}{s}$$

La velocidad es pequeña respecto a la de la luz y por eso nos sirve la mecánica clásica.

La relación entre la intensidad en amperios y la carga en culombios es: $Q = I\,t$.
En un tiempo t los protones se desplazan una longitud v t ocupando el volumen de un cilindro de altura v t y sección S .
La densidad volumétrica de carga es:

$$\rho=\frac{Q}{S\,v\,t}=\frac{I\,t}{S\,v\,t}=\frac{10^{-6}}{\pi\frac{\left(2.10^{-3}\right)^2}{4}\cdot 1{,}38.10^6}=2{,}31.10^{-7}\ \frac{C}{m^3}$$

b) Para calcular la componente radial del campo eléctrico aplicamos el teorema de Gauss

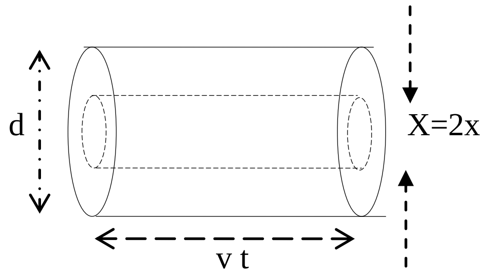


Fig .1

En la figura 1 la línea continua representa el cilindro con los protones y dentro de él se ha representado otro cilindro (en línea discontinua) que representa la superficie gaussiana. de radio x, siendo $2x \le d$. El área lateral de esta superficie es $2\pi x v t$ y la carga contenida en su interior es:

$$\frac{Q}{\pi \frac{d^2}{4} v t} = \frac{q}{\pi x^2 v t} \quad \Rightarrow \quad q = 4Q\frac{x^2}{d^2}$$

Aplicamos el teorema de Gauss

$$\int E_i \cdot dS = \frac{\sum Q}{\varepsilon_O} \quad \Rightarrow \quad E_i \cdot 2\pi x v t = \frac{4Q\frac{x^2}{d^2}}{\varepsilon_O} \Rightarrow \quad E_i \cdot 2\pi x v t = \frac{4 I x^2 t}{\varepsilon_O d^2} \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad E_i = \frac{2 I x}{\cdot\pi\ v d^2 \varepsilon_o} = \frac{2.10^{-6}\ x}{\pi \cdot 1{,}38.10^6 \cdot 4.10^{-6} \cdot 8{,}85.10^{-12}} = 1{,}30.10^4\, x\ \frac{N}{C}$$

Este campo radial está dentro del haz de protones siendo $x \le \frac{d}{2}$

Para calcular el campo radial en el exterior del haz tomamos un cilindro de radio $x > \frac{d}{2}$ envolviendo al haz. La carga abarcada por este cilindro es la total del haz, esto es, Q. Aplicando el teorema de Gauss para este cilindro.

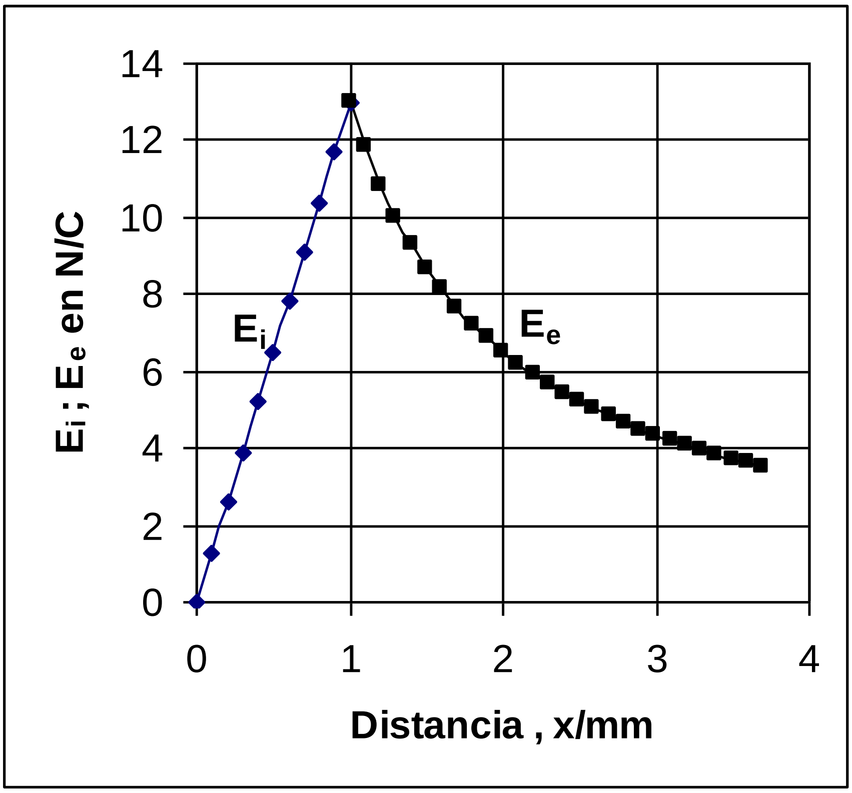
$$E_e \cdot 2\pi x v t = \frac{Q}{\varepsilon_o} = \frac{I t}{\varepsilon_o} \Rightarrow \quad E_e = \frac{I}{2\pi x v \varepsilon_o} = \frac{10^{-6}}{2\pi \cdot 1{,}38.10^6 \cdot 8{,}85.10^{-12}}\frac{1}{x} = \frac{1{,}30.10^{-2}}{x}$$

Este campo radial es exterior del haz de protones siendo $x \ge \frac{d}{2}$.

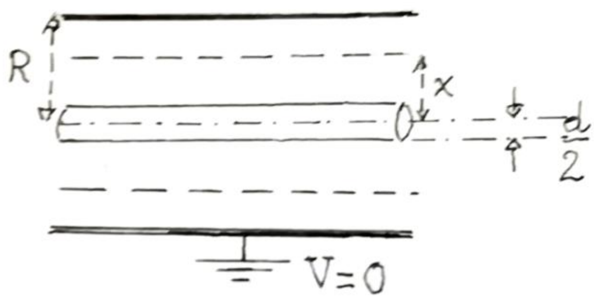
Cuando x=d/2 los dos campos deben dar el mismo valor

$$E_i = 1{,}30.10^4 \cdot 1.10^{-3} = 13\frac{N}{C}\ ;\ E_e = \frac{1{,}30.10^{-2}}{1.10^{-3}} = 13\frac{N}{C}$$

c)



d) *Calculamos el potencial exterior*, esto es, entre la parte externa del haz y la interior del cilindro. Si designamos con R el radio interior del cilindro conductor, x toma los siguientes valores $\frac{d}{2} \leq x \leq R$. El valor del campo está ya calculado $E_e = \frac{I}{2\pi v \varepsilon_o} \frac{1}{x}$.



$$E_e = -\frac{dV_e}{dx} \Rightarrow \int -dV_e = \int \frac{I}{2\pi v \varepsilon_o} \frac{dx}{x} \Rightarrow \quad -V_e = \frac{I}{2\pi v \varepsilon_o} \ln x + Cte$$

Según el enunciado cuando x=R , el potencial V_e es nulo

$$0=\frac{I}{2\pi v\varepsilon_o}\ln R+Cte \quad\Rightarrow\quad Cte=-\frac{I}{2\pi v\varepsilon_o}\ln R \quad\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\quad -V_e=\frac{I}{2\pi v\varepsilon_o}\ln x-\frac{I}{2\pi v\varepsilon_o}\ln R=\frac{I}{2\pi v\varepsilon_o}(\ln x-\ln R)=1{,}30.10^{-2}(\ln x+4{,}61)\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\qquad V_e=-1{,}30.10^{-2}(\ln x+4{,}61)$$

Cálculo del potencial interior

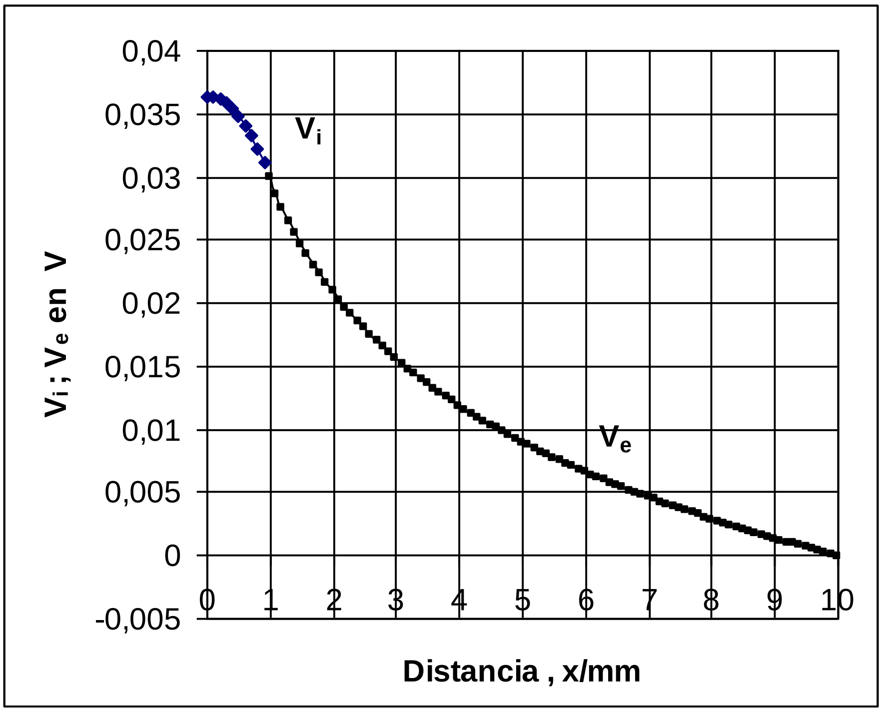
$$E_i=1{,}30.10^4\,x=-\frac{dV_i}{dx}\Rightarrow\quad -V_i=1{,}30.10^4\,\frac{x^2}{2}+Cte$$

Para calcular la Cte, hacemos uso del hecho de que los potenciales exterior e interior son iguales cuando $x=\frac{d}{2}$.

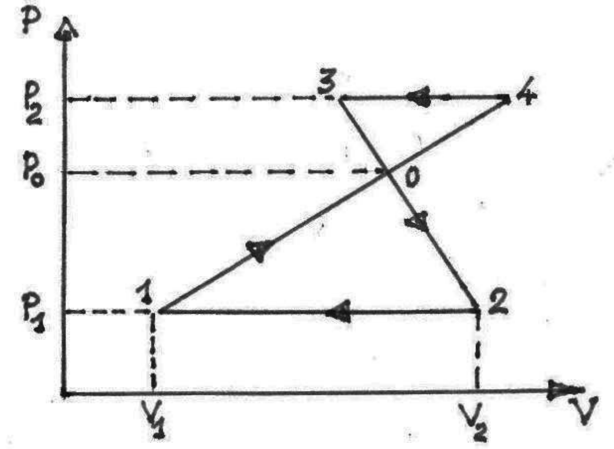
$$1{,}30.10^{-2}\left(\ln\frac{d}{2}+4{,}61\right)=1{,}30.10^4\cdot\frac{d^2}{8}+Cte \quad\Rightarrow$$

$$Cte=1{,}30.10^{-2}\left(\ln\frac{2.10^{-3}}{2}+4{,}61\right)-1{,}30.10^4\cdot\frac{\left(2.10^{-3}\right)^2}{8}=-0{,}0299-6{,}5.10^{-3}=-3{,}64.10^{-2}\Rightarrow$$

$$\Rightarrow -V_i=1{,}30.10^4\,\frac{x^2}{2}-3{,}64.10^{-2}\quad\Rightarrow\qquad V_i=3{,}64.10^{-2}-6{,}5.10^3\,x^2$$



442.- En la figura inferior está representado un ciclo cerrado efectuado por un mol de gas ideal 1-4; 4-3 ; 3-2 ; 2-1, con los siguientes valores: $P_1=10^5$ Pa ; $P_0=3.10^5$ Pa ; $P_2=4.\ 10^5$ Pa; V_2-V_1 = 10 L.
Calcular el trabajo realizado en el ciclo completo.



Olimpiadas de Moscú

El área del ciclo representa el trabajo pedido. El área del triángulo 102 representa un trabajo que sale del sistema al exterior. El valor numérico del área del triángulo O43 representa un trabajo que desde el exterior se realiza sobre el sistema. Para hallar el trabajo debemos calcular ambas áreas.
Los dos triángulos son semejantes ya que tiene los tres ángulos internos iguales.

Área del triángulo 1O2

$$\text{Área} = \frac{\text{base} \cdot \text{altura}}{2} = \frac{(V_2 - V_1)}{2} \cdot (P_o - P_1) = \frac{10.10^{-3}}{2} \cdot (3.10^5 - 10^5) = 10^3$$

El trabajo realizado por el sistema es: -10^3 J . El signo negativo indica que según el criterio que hemos adoptado en esta web es un trabajo realizado por el sistema sobre el exterior.

Área del triángulo O43

Desconocemos los volúmenes correspondientes a 4 y 3 y los designamos con V_4 y V_3 respectivamente. Dado que los triángulos son semejantes

$$\frac{V_4 - V_3}{V_2 - V_1} = \frac{P_2 - P_o}{P_o - P_1} \Rightarrow \quad V_4 - V_3 = 10.10^{-3}\,m^3 \cdot \frac{4.10^5 - 3.10^5}{3.10^5 - 10^5} = 5.10^{-3}\,m^3$$

$$\text{Área} = \frac{\text{base} \cdot \text{altura}}{2} = \frac{(V_4 - V_3)}{2} \cdot (P_2 - P_o) = \frac{5.10^{-3}}{2} \cdot (4.10^5 - 3.10^5) = +250\,J$$

Área total= -750 J