

## INTERROGACIÓN 2

Lunes 16 de octubre de 2017

Sin apuntes – Sin preguntas en sala – 2 horas

### PAUTA

1. (10 puntos) En base a sus conocimientos sobre contaminación atmosférica responda las siguientes preguntas.
  - a) Suponga que a partir de hoy se comienza a aplicar una nueva norma para el control de emisiones contaminantes de fuentes móviles. En ella se indica que los nuevos vehículos diésel tendrán que estar homologados con esta nueva norma de emisión. La norma anterior indicaba que la restricción de emisiones de material particulado ( $MP_{10}$  de densidad  $1500 \text{ kg/m}^3$ ) a la salida del tubo de escape era de  $0,025 \text{ kg/km}$  mientras que la nueva indica que es de  $0,0005 \text{ kg/km}$  (en base a una velocidad de  $100 \text{ km/h}$ ). Si fuese posible diseñar y disponer un filtro tipo ciclón estándar para el tubo de escape de un vehículo fabricado bajo la norma antigua de tal forma que cumpla con la nueva norma, ¿Cuáles deberían ser las dimensiones del filtro ( $B$ ,  $H$ ,  $D_e$ ,  $L_1$  y  $L_2$ )? Consideré que el aire del tubo de escape lleva MP a una concentración de  $0,56 \text{ ppm}$  ( $840 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ ), una temperatura de  $105^\circ\text{C}$  y presión de  $110 \text{ kPa}$ .
  - b) Explique el fenómeno de lluvia ácida y cómo afecta negativamente las obras y estructuras de mármol.
  - c) En base a los conceptos de circulación atmosférica explique por qué los sectores cercanos a la línea del Ecuador muestran abundante vegetación, y qué origina la ocurrencia del desierto de Atacama.

Solución:

a)

Dado que se solicita reducir la emisión de  $MP_{10}$  de  $0,025 \text{ kg/km}$  a  $0,0005 \text{ kg/km}$ , se requiere un filtro de eficiencia:  $\frac{0,025 - 0,0005}{0,025} = 0,98 \rightarrow \eta = 98\%$  (1 punto)

De acuerdo a la Figure 6-32, se tiene que, para tal eficiencia,  $\frac{d}{d_{0,5}}$  está entre 4,5 y 4,7. Para efectos de cálculo considerar 4,6. Como se trata de  $MP_{10}$ , es decir, partículas de  $10\mu\text{m}$  de diámetro se tiene que:  $d_{0,5} = \frac{d}{4,6} = \frac{10}{4,6} = 2,174 \mu\text{m}$  (1 punto)

Del enunciado se tiene que el gas sale a  $105^\circ\text{C}$  y a una presión de  $110 \text{ kPa}$ , con ello:

$$\mu = 17,11 + 0,0537 * 105 + \frac{110}{8280} = 22,75 \mu\text{Pa} * s = 22,75 * 10^{-6} \text{ Pa} * s$$

Para el cálculo de la tasa de flujo de gas:  $Q_g = \frac{Q}{\rho_{gas}}$

$$\text{El caudal másico es: } Q = 0,025 \frac{\text{kg}}{\text{km}} * 100 \frac{\text{km}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 6,94 * 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,694 \frac{\text{g}}{\text{s}} \text{ (1 punto)}$$

Dado que el aire lleva una concentración de  $0,56 \text{ ppm}$ , lo que corresponde a  $840 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ ,

$$\text{obtener la densidad del gas: } \frac{0,56\text{m}^3}{10^6\text{m}^3} * \rho_{gas} = 840 * 10^{-9} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \quad \rho_{gas} = 1,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1500 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Con ello se tiene que: } Q_g = \frac{Q}{\rho_{gas}} = \frac{0,694 \frac{g}{s}}{1500 \frac{g}{m^3}} = 4,63 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \quad (1 \text{ punto})$$

De la Figure 6-31 se tiene que para un ciclón estándar:

$$B = 0,25D \rightarrow B^2 = 0,0625D^2, \quad L = 2D, \quad H = 0,5D$$

$$\text{En cuanto a } \theta \text{ se tiene que: } \theta = \frac{\pi}{0,5D} * (2 * 2D + 2D) = \frac{\pi}{0,5} * 6 = 12\pi$$

Y del enunciado  $\rho_p = 1500 \frac{kg}{m^3}$ . Así la ecuación para  $d_{0,5}$  es:

$$2,174 * 10^{-6} m = \left[ \frac{9 * 22,75 * 10^{-6} [Pa * s] * 0,0625 D^2 [m^2] * 0,5D [m]}{1500 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 4,63 * 10^{-4} \left[ \frac{m^3}{s} \right] * 12\pi} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Despejando D se tiene que:

$$D = \left[ \frac{(2,174 * 10^{-6})^2 * 1500 * 4,63 * 10^{-4} * 12\pi}{9 * 22,75 * 10^{-6} * 0,0625 * 0,5} \right]^{\frac{1}{3}} = [19,34 * 10^{-6}]^{\frac{1}{3}} = 0,0268 m$$

$$D = 26,8 \text{ mm} \quad (1 \text{ punto})$$

Luego, las dimensiones pedidas son:

$$B = 6,7 \text{ mm}$$

$$H = 13,4 \text{ mm}$$

$$D_e = 13,4 \text{ mm}$$

$$L_1 = 53,6 \text{ mm}$$

$$L_2 = 53,6 \text{ mm}$$

$$(1 \text{ punto})$$

b) La lluvia ácida de forma a partir de la combinación de los gases contaminantes y la humedad atmosférica. La lluvia acida disuelve los carbonatos de calcio de las obras y estructura de mármol y con ella deteriora sus superficies. (2 puntos)

c) El centro de baja presión en la línea de Ecuador mueve las masas de aire hacia arriba y arrastra humedad que precipita en las cercanías promoviendo la vegetación. En el caso del desierto de Atacama, se da el caso contrario, centro de alta presión, baja aire seco y deseca aún más la superficie. (2 puntos)

2. (10 puntos) Un sistema de tratamiento de aguas residuales cuenta con cuatro clarificadores primarios para tratar un afluente de  $40.000 \text{ m}^3/\text{d}$ . El diámetro de los clarificadores es de 8 m, y la viscosidad dinámica del agua es de  $10^{-3} \text{ kg/(s}\cdot\text{m)}$ . El agua a tratar contiene tres tipos de partículas, cuyos parámetros se detallan a continuación.

Partícula	Diámetro (mm)	Densidad relativa	Concentración (g/L)
Grava	1	1,8	5
Arena gruesa	0,1	2,2	12
Arena fina	0,04	2,6	15

- a) ¿Cuál será la concentración total de partículas en el efluente (g/L)? (4 puntos)  
 b) ¿Cuántos kilogramos de partículas sedimentan en total por día? (1 punto)

- c) Si el lodo sedimentado luego es enviado a un espesador, ingresando a este con una concentración de 4%, ¿Cuál es el caudal de agua que se debe remover desde el espesador para que la concentración de lodos a la salida de este sea de 10%? Considere que la densidad del lodo húmedo es igual a la del agua. (3 puntos)
- d) Explique la diferencia entre un clarificador primario y uno secundario. (2 puntos)

Solución:

a) Se calcula la eficiencia de remoción para cada tipo de partícula. Calcular primero la velocidad de sedimentación de cada tipo de partícula

$$u_t = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho) \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu}$$

$$u_{t \text{ grava}} = \frac{9,81 \cdot (1800 - 1000) \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2}{18 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}} = 0,436 \frac{m}{s}$$

$$u_{t \text{ arena fina}} = 6,54 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}$$

$$u_{t \text{ arena gruesa}} = 1,39 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}$$

(1 punto)

Área de cada clarificador

$$A = \pi \cdot \frac{8^2}{4} = 50,3 \text{ m}^2$$

$$\text{Capacidad de carga de cada clarificador: } u_0 = \frac{Q}{A} = \frac{10.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \cdot \frac{1\text{d}}{86400\text{s}}}{50,3 \text{ m}^2} = 2,303 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

(1 punto)

Eficiencia de remoción de cada tipo de partícula:  $\eta = \frac{u_t}{u_0}$

Eficiencias de remoción:

Partícula	Eficiencia
Grava	1
Arena gruesa	1
Arena fina	0,605

(0,5 puntos)

Con la eficiencia de remoción se calcula la masa de cada partícula precipita y cuanta va en el efluente

Partícula	Masa entra (Kg/s)	Masa sedimenta (Kg/s)	Masa sale (Kg/s)
Grava	0,58	0,58	0
Arena gruesa	1,39	1,39	0
Arena fina	1,74	1,05	0,68

donde

$$\text{Masa entrante} = Q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \cdot C \left[ \frac{\text{g}}{\text{L}} \right] \cdot \frac{1000L}{\text{m}^3} \cdot \frac{1\text{Kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$\text{Masa sedimenta} = \text{Masa entrante} \cdot \eta$$

(1 punto)

$$\text{Concentración salida} = \frac{\text{Masa sale} \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right]}{Q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}$$

Concentraciones de salida en efluente:

Partícula	Concentración en efluente (g/L)
Grava	0
Arena gruesa	0
Arena fina	5,91

(0,5 puntos)

b) Sedimentan 3,02 kg/s en cada clarificador. En total sedimentan 12,08 kg/s en el sistema (1.043.556 kg/d)

(1 punto)

c)

Si la concentración a la entrada del espesador es de 4%, significa que hay 0,04 kg de lodo por cada litro de lodo húmedo. Se puede calcular el caudal de entrada como

$$Q_e = \frac{1.043.185,4 \frac{kg}{d}}{0,04 \frac{kg}{L}} = 26.088.899,99 \frac{L}{d}$$

(1 punto)

A la salida del espesador hay 0,1 kg de lodo por cada litro de lodo húmedo. Se calcula el caudal de salida como

$$Q_s = \frac{1.043.185,4 \frac{kg}{d}}{0,1 \frac{kg}{L}} = 10.435.559,99 \frac{L}{d}$$

(1 punto)

Por lo tanto el caudal que debe salir del espesador es

$$Q_w = Q_s - Q_e = 15.653.339,99 \frac{L}{d}$$

(1 punto)

d) El clarificador primario se utiliza en la remoción de material sedimentable en el tratamiento físico y el clarificador secundario en la remoción de material sedimentable luego del tratamiento biológico.

(2 puntos)

3. (10 puntos) Los tribunales ambientales han recibido un recurso de protección de los habitantes de una ciudad quienes señalan que el efluente de una industria ubicada aguas arriba afecta negativamente la toma de agua potable desde el río. Considere que todo el río y sus tramos tienen una velocidad media de 1 m/s,  $OD_{saturación}=10 \text{ mg/L}$ , y que para la descarga y río los valores de las constantes de decaimiento y de reaireación son  $0,8 \text{ d}^{-1}$  y  $0,5 \text{ d}^{-1}$ , respectivamente.

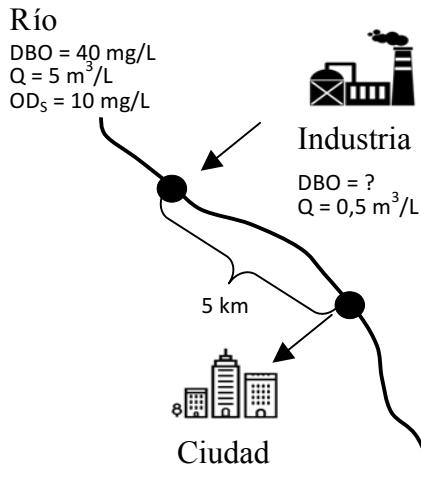


Figura 1. Disposición del río y descarga.

- Si para que se cumpla la norma ambiental la DBO del efluente de la industria no debe superar los 300 mg/L, indique si la industria cumple o no con la normativa. Como dato adicional se sabe que justo después de la descarga del efluente el OD en el río es de 8 mg/L y que 3 km aguas abajo el OD es de 6 mg/L. (7 puntos)
- Si los afectados en la ciudad señalan que además hay problemas de eutrofización en el río, explique en qué consiste este fenómeno, por qué se produce, y qué relación tiene con los distintos tipos de tratamientos que pueden existir en el tratamiento de aguas servidas. (3 puntos)

Solución:

a)

Se utiliza la ecuación del déficit para obtener  $L_0$

$$D = D_0 e^{-\frac{k_2}{U}x} + \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} \left( e^{-\frac{k_1}{U}x} - e^{-\frac{k_2}{U}x} \right) \quad (1)$$

Para ello, en primer lugar se calcula:

$$D_0 = 10 - 8 = 2 \text{ mg/L} \quad (1 \text{ punto})$$

$$D = 10 - 6 = 4 \text{ mg/L} \quad (1 \text{ punto})$$

Luego con los demás datos del enunciado, se despeja  $L_0$  de la ecuación del déficit:

$$L_0 = 71,9 \text{ mg/L} \quad (2 \text{ puntos})$$

Se tiene  $L_0$  y con eso obtiene por la mezcla la DBO que descarga la industria

$$L_0 = \frac{Q_{\text{río}} \cdot \text{DBO}_{\text{río}} + \text{DBO}_{\text{industria}} \cdot Q_{\text{industria}}}{Q_{\text{río}} + Q_{\text{industria}}}$$

Reemplazando los valores, se llega a:

$$\text{DBO}_{\text{industria}} = 390,9 \text{ mg/L} \quad (2,5 \text{ punto}), \text{ por lo que supera la norma de } 300 \text{ mg/L} \quad (0,5 \text{ puntos})$$

b)

Se denomina eutrofización al desarrollo explosivo de algas a causa de la abundancia de nutrientes en el agua (N y P) (2 puntos). En el caso de existir tratamiento terciario (remoción de nutrientes), se reduce el riesgo de ocurrencia de este fenómeno en las aguas receptoras (1 punto).

## Fórmulas y constantes

### Velocidad terminal de Stokes:

$$u_t = \frac{(\rho_p - \rho)g d_p^2}{18\mu}$$

$\rho_p$ : densidad de la partícula  
 $\rho$ : densidad del fluido  
 $g$ : aceleración de la gravedad

$d_p$ : diámetro de la partícula  
 $\mu$ : viscosidad dinámica

### Régimen de carga de superficie:

$$\frac{Q}{A} = \frac{H}{t_0}$$

Proporción separada:  $u_t/u_0$

### Streeter-Phelps:

$$L = L_0 e^{-\frac{k_1}{U}x}$$

$$D = D_0 e^{-\frac{k_2}{U}x} + \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} \left( e^{-\frac{k_1}{U}x} - e^{-\frac{k_2}{U}x} \right)$$

$$t_c = \frac{1}{k_2 - k_1} \ln \left[ \frac{k_2}{k_1} \left( 1 - \frac{D_0(k_2 - k_1)}{k_1 L_0} \right) \right] = x_c / U$$

### Filtro tipo ciclón:

Eficiencia de colección de partículas ( $\eta$ ) (Figura 6-32):  $d_{0,5} = \left[ \frac{9\mu B^2 H}{\rho_p Q_g \theta} \right]^{\frac{1}{2}}$

donde:

$d_{0,5}$ : diámetro de corte, tamaño de partícula para el cual la eficiencia es 50%

$\mu$ : viscosidad dinámica del gas, Pa·s

$B$ : ancho de entrada, m

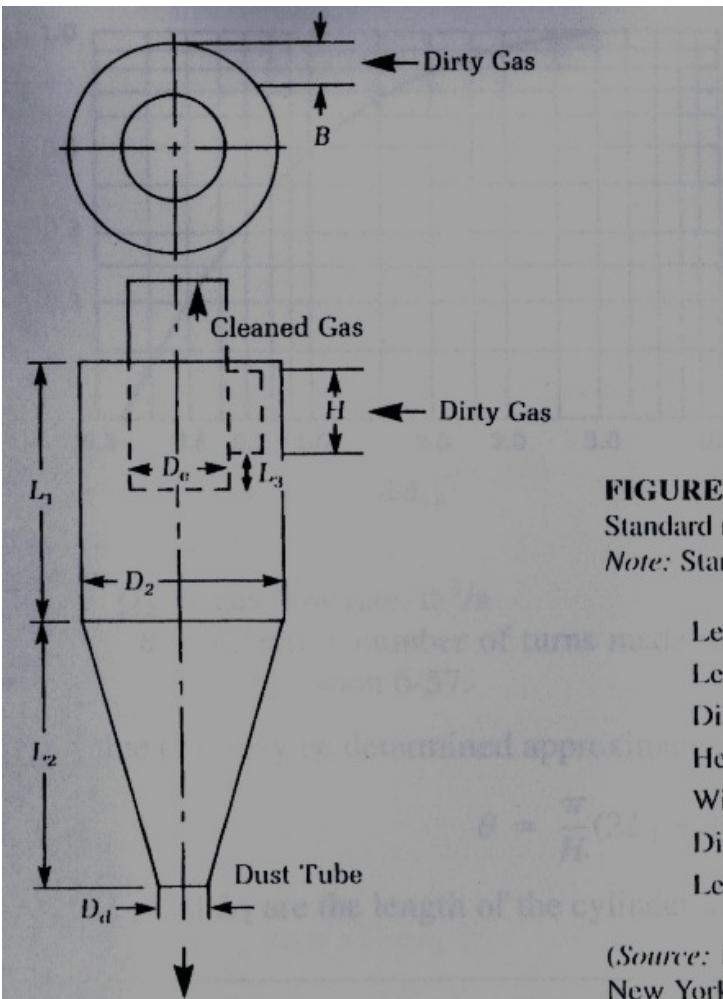
$H$ : alto de la entrada, m

$\rho_p$ : densidad de la partícula, kg/m<sup>3</sup>

$Q_g$ : tasa de flujo de gas, m<sup>3</sup>/s

$\theta$ : número efectivo de vueltas realizado al atravesar el ciclón como se define a continuación:  $\theta = \frac{\pi}{H}(2L_1 + L_2)$ ,  $L_1$  y  $L_2$  son los largos del cilindro y del cono respectivamente, m

Viscosidad dinámica:  $\mu [\mu Pa * s] = 17,11 + 0,0536T + \frac{P}{8280}$ , donde T está en °C y P en kPa.



**FIGURE 6-31**

Standard reverse flow cyclone proportions.

Note: Standard cyclone proportions are as follows:

$$\text{Length of cylinder, } L_1 = 2D_2$$

$$\text{Length of cone, } L_2 = 2D_2$$

$$\text{Diameter of exit, } D_e = 0.5D_2$$

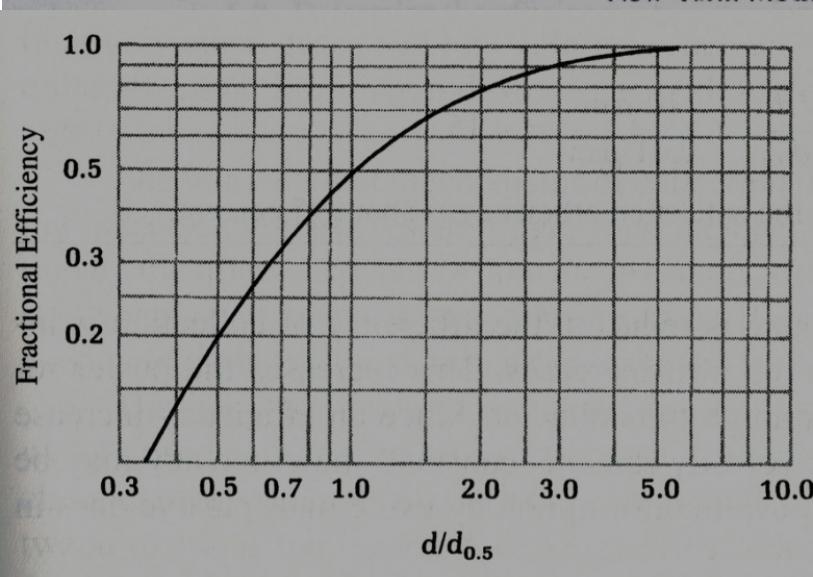
$$\text{Height of entrance, } H = 0.5D_2$$

$$\text{Width of entrance, } B = 0.25D_2$$

$$\text{Diameter of dust exit, } D_d = 0.25D_2$$

$$\text{Length of exit duct, } L_3 = 0.125D_2$$

(Source: M. Crawford, *Air Pollution Control Theory*, New York: McGraw-Hill, 1976. Reprinted by permission.)



**FIGURE 6-32**

Empirical cyclone collection efficiency. (Source: C. E. Lapple, "Processes Use Many Collection Types," *Chemical Engineer*, vol. 58, p. 147, 1951.)