

INGENIERÍA AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS

Transporte de contaminantes atmosféricos

- Dispersión física
- Absorción por lluvia
- Transformaciones fotoquímicas

El perfil vertical de temperatura del aire, es un factor determinante en el mecanismo de dispersión atmosférica de los contaminantes. Una de las características de la troposfera es la disminución gradual de la temperatura con la altura. Cuando una pequeña porción de aire está más caliente que el aire en su entorno, su menor densidad lo hace ascender. En la medida que asciende, experimenta una dilatación, debido a la menor presión atmosférica que existe a mayor altura. Si se dilata adiabáticamente, su temperatura disminuye, generándose un perfil de temperatura decreciente con la altura. El gradiente de temperatura adiabático ideal del aire seco es de aproximadamente $-1^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$. Es decir, por cada 100 m de altura, la temperatura ambiente disminuye en 1°C .

En la realidad, el aire tiene un contenido de humedad significativo y, al ascender, parte del vapor de agua presente en el aire sufre condensación, por lo que el gradiente de temperatura adiabático promedio es del orden de $-0,65^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$.

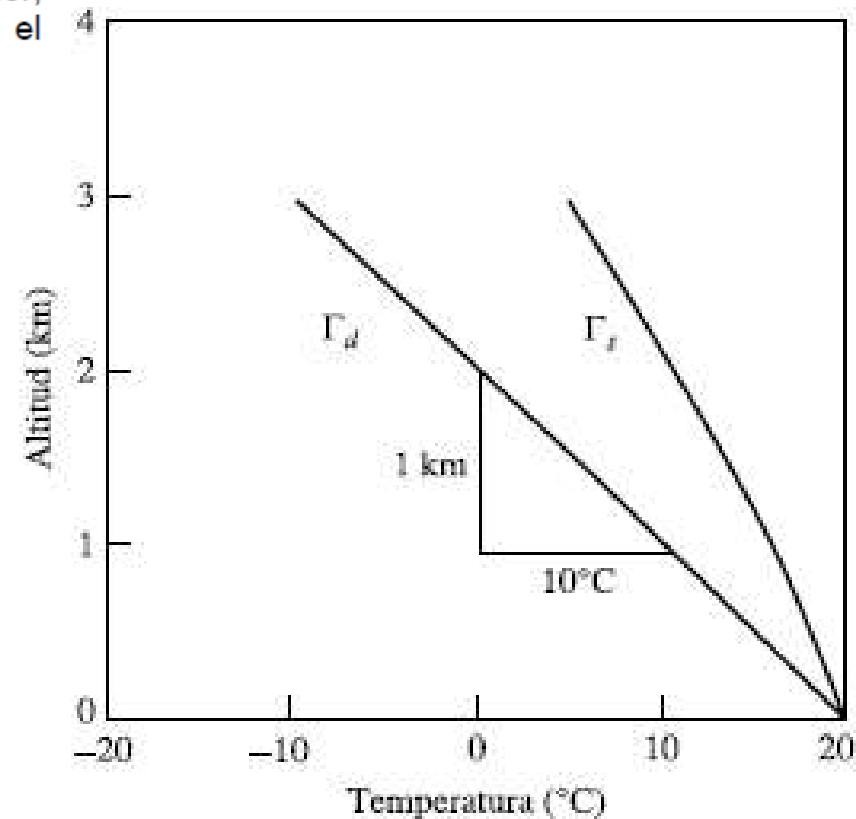


FIGURA 7.39. La tasa adiabática seca Γ_d es una constante con un valor de $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$, pero la tasa adiabática saturada Γ_s difiere con la temperatura. En la troposfera, Γ_s es aproximadamente $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Ejercicio: Estimar el cambio de temperatura con la altura

$$\frac{dP}{dz} = -g\rho = -g \frac{MP}{RT}$$

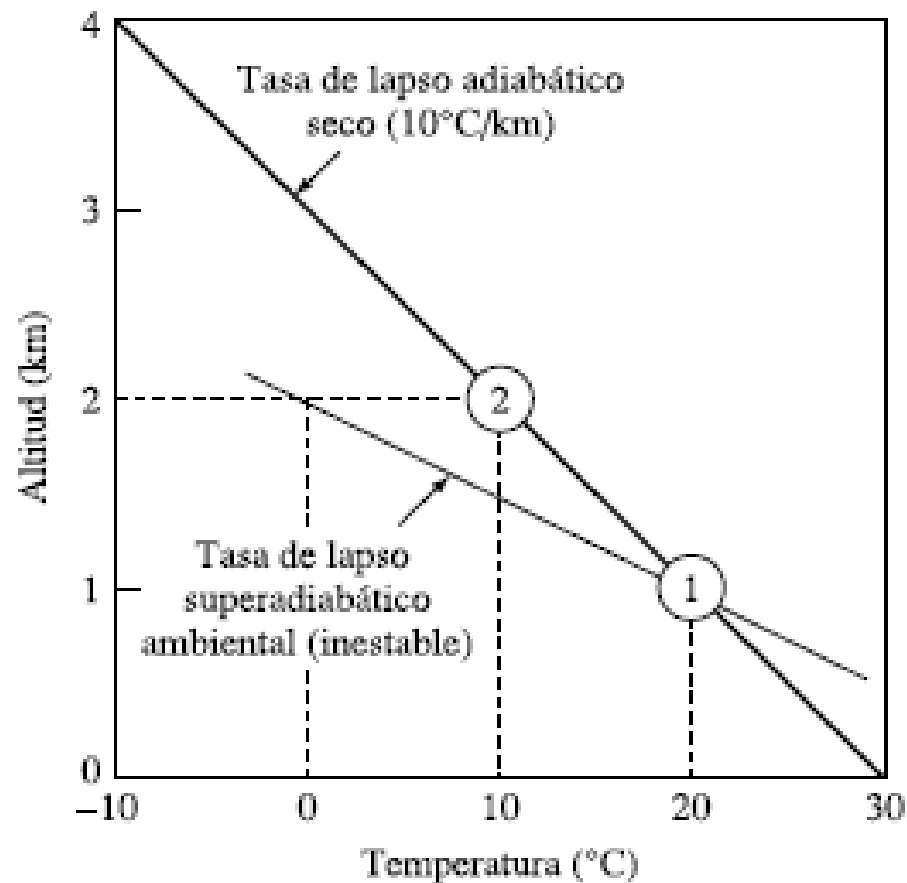
$$\frac{dP}{P} = -\frac{gM}{RT} dz$$

Para gases ideales en proceso irreversible adiabático $\frac{dP}{P} = \frac{C_p}{R} \frac{dT}{T}$

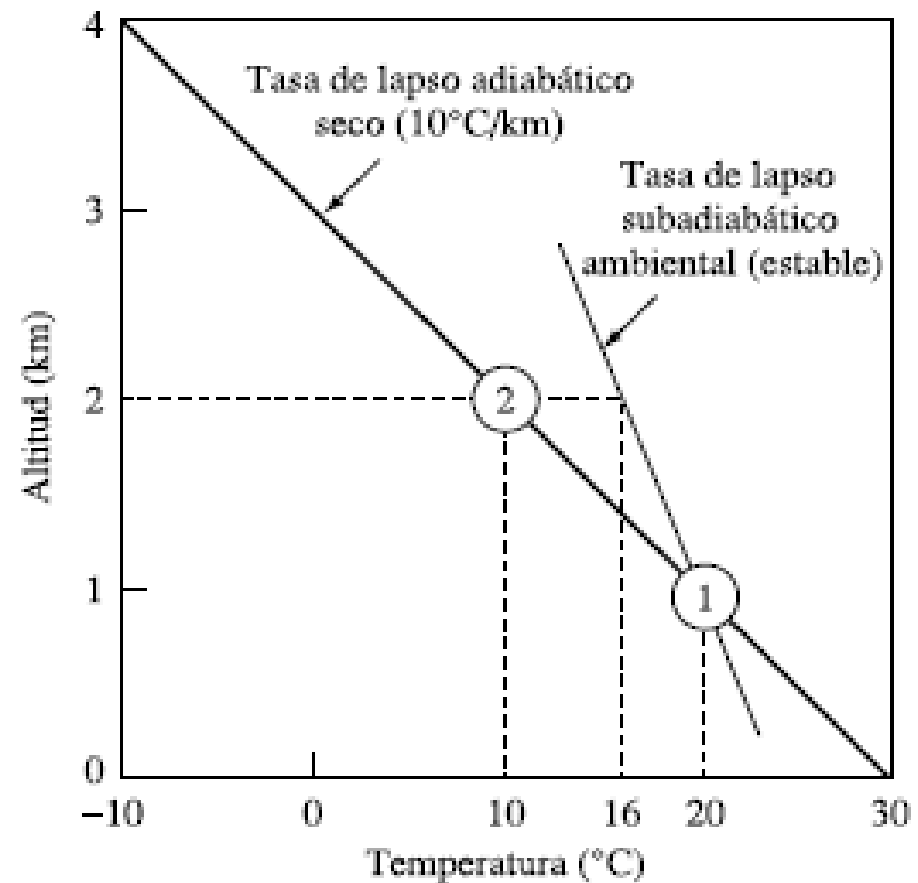
Entonces $\frac{dT}{dz} \Big|_{\text{adiabático, gas ideal}} = -\frac{gM}{C_p} = -\frac{gM}{3.5R}$

$$\begin{aligned} &= -\frac{9.8 \frac{m}{s^2} * 29 \frac{g}{mol}}{3.5 * 8.314 \frac{m^3 Pa}{mol.K}} * \frac{kg}{1000g} * \frac{Pa.m.s^2}{kg} \\ &= -0.00978 \frac{K}{m} \approx -10 \frac{^\circ C}{km} \end{aligned}$$

- Como no se cumple que sea adiabático ni gas ideal el valor real es aprox. -6.5°C/km



(a)



(b)

FIGURA 7.40. Demostrando la estabilidad atmosférica en una atmósfera seca. Cuando una masa de aire de 20 °C a 1 km (posición 1) avanza a 2 km (posición 2), su temperatura desciende a 10 °C (siguiendo la tasa de lapso adiabático seco). En (a) la masa de aire creado a 2 km está más caliente que el aire del ambiente circundante, así es que la masa se eleva (inestable). En (b) la masa a 2 km está más fría que el ambiente, así es que se hunde de nuevo (estable).

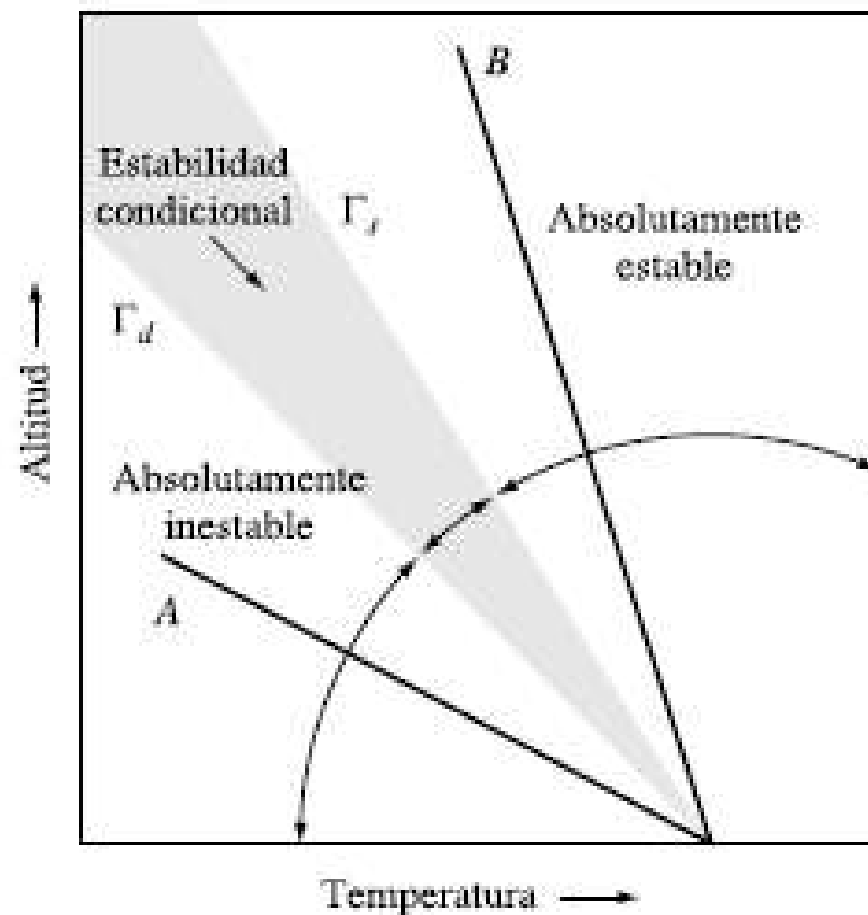


FIGURA 7.41. Las atmósferas en las que el perfil de temperatura ambiental se enfría más rápidamente que el lapso adiabático seco (Γ_d), como el de la curva A, son absolutamente inestables. Si las temperaturas ambientales descienden más lentamente que la tasa de lapso adiabático saturada, como B, la atmósfera es absolutamente estable. Entre las dos curvas se crea una región de estabilidad condicional.

Inversión por radiación

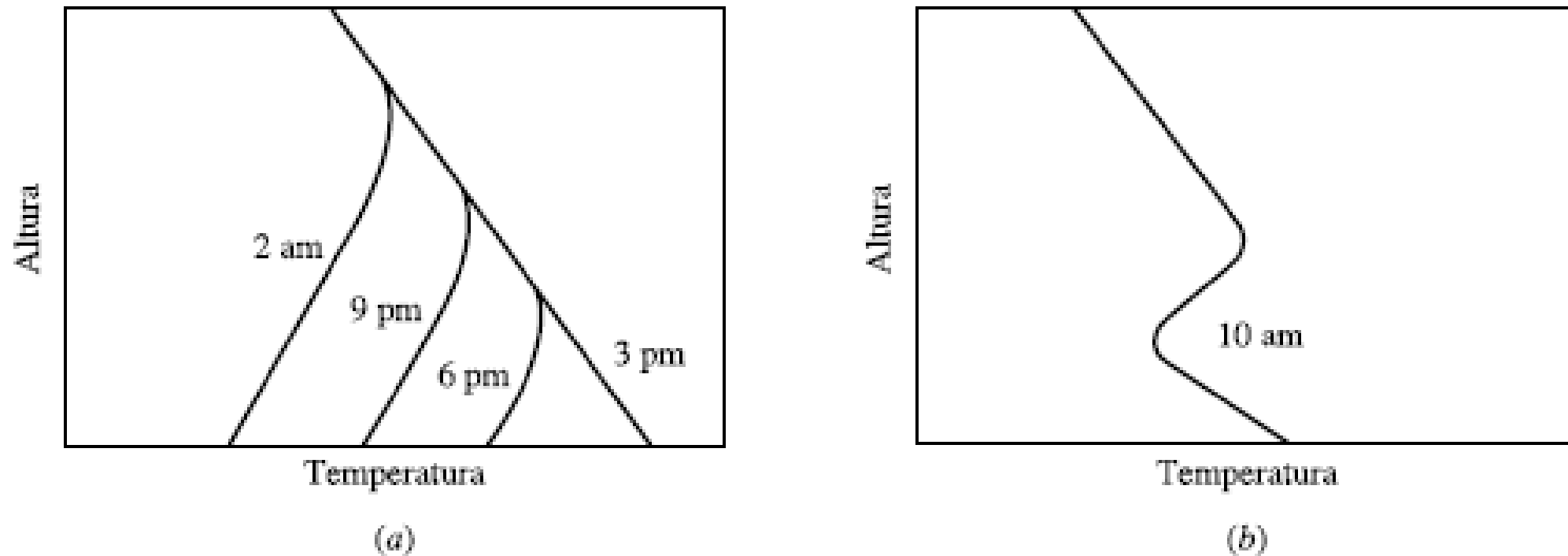


FIGURA 7.42. Desarrollo de una inversión por radiación (a), y la subsiguiente erosión de la inversión (b). Los tiempos son solo representativos. La desintegración de la inversión por la mañana conduce a un proceso denominado fumigación durante el cual la contaminación a ras de tierra puede aumentar rápidamente.

Inversión por hundimiento

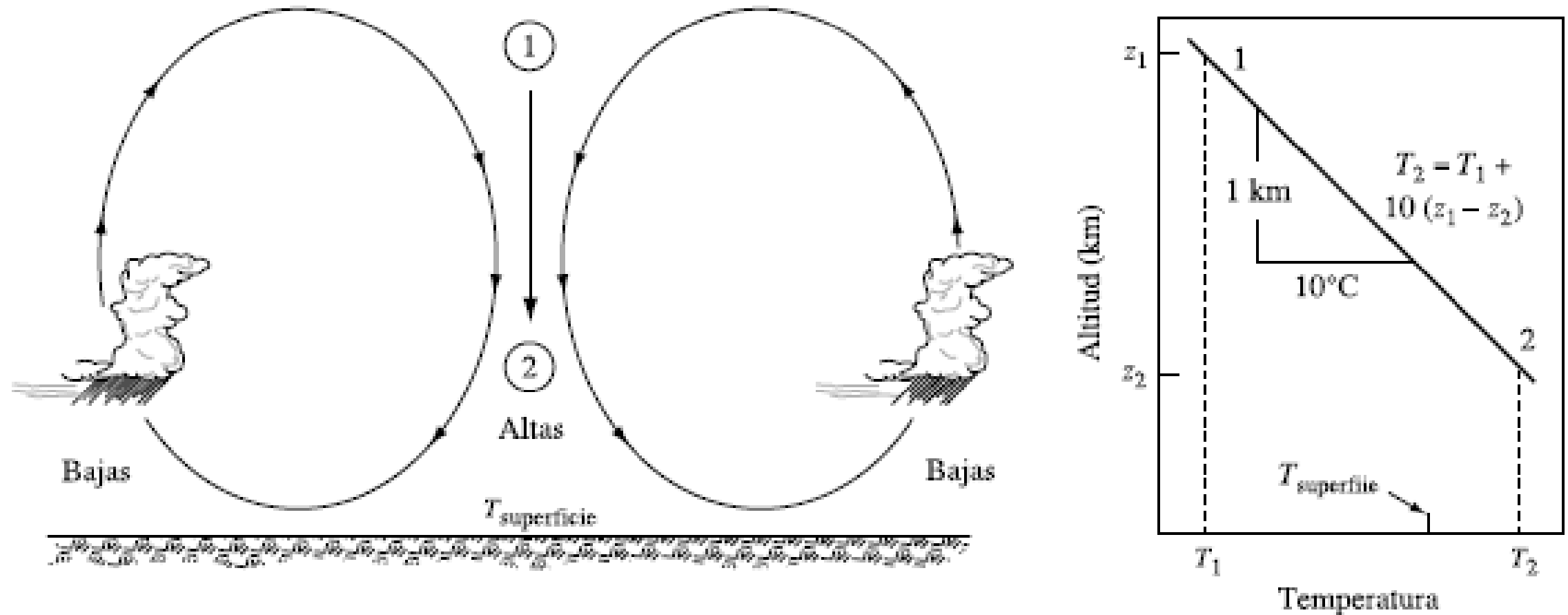


FIGURA 7.43. Al descender el aire se calienta a $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$ por compresión. Es común que este hundimiento cálido cree condiciones más tibias en altura que cerca de la superficie, lo que causa una inversión de temperaturas. Los cielos claros son típicos en regiones de altas presiones mientras que los cielos nublados y las precipitaciones son comunes en áreas de bajas presiones.

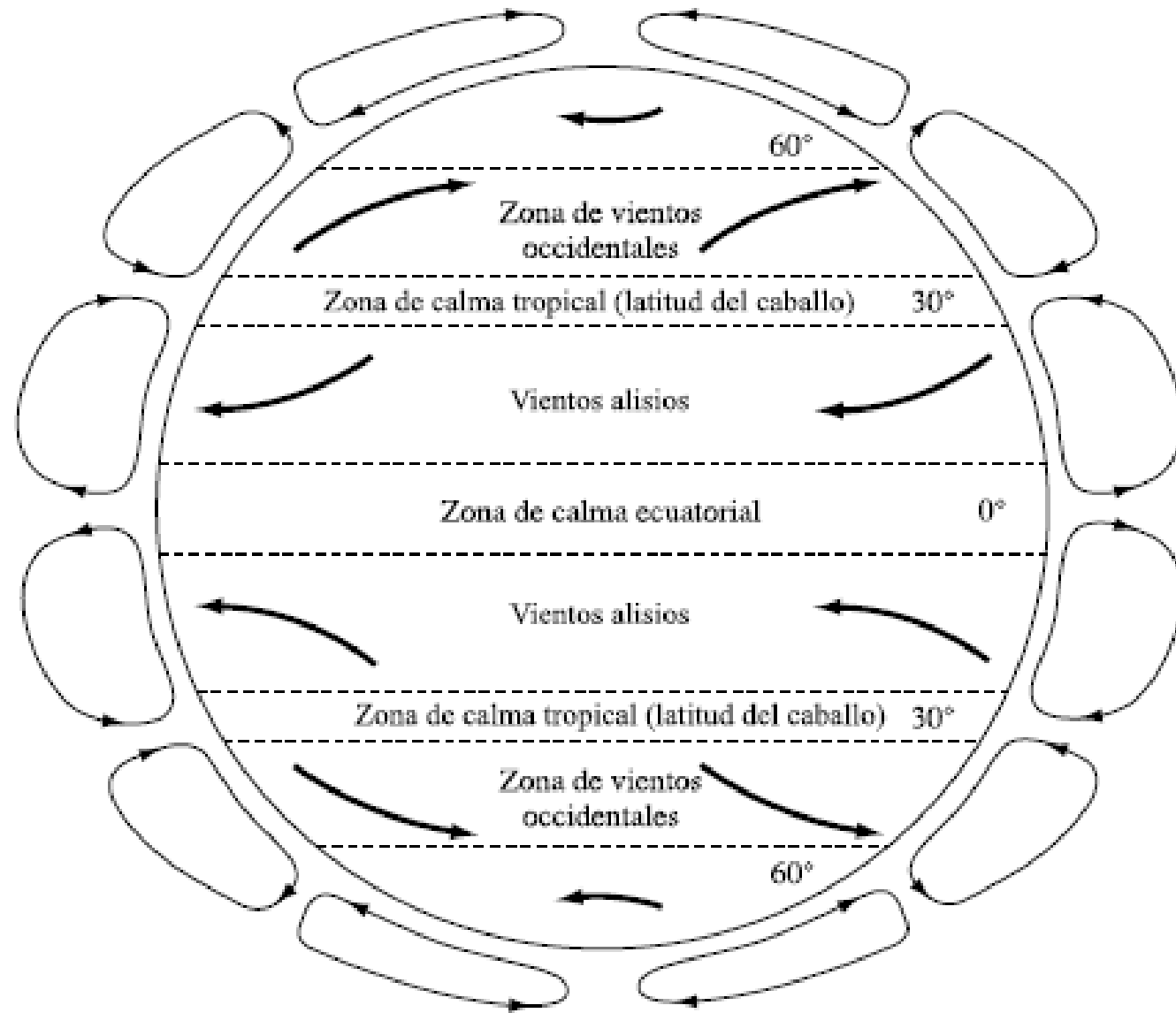
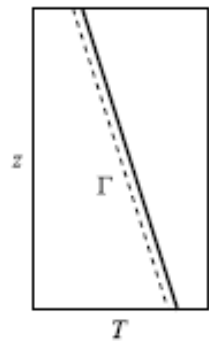
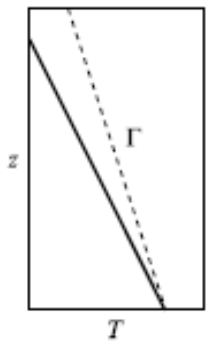
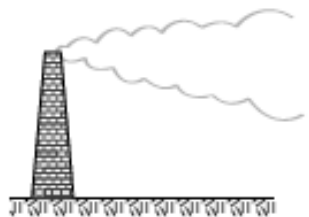


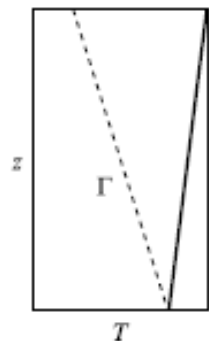
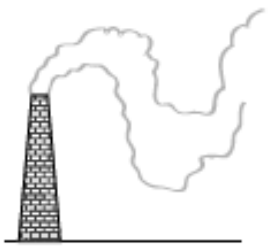
FIGURA 7.45. Comportamiento ideal del patrón de circulación del aire en el equinoccio. Las zonas de altas presiones son comunes alrededor de los 30° de latitud produciendo cielos claros e inversiones por hundimiento.



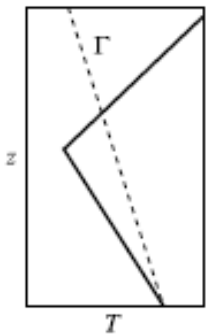
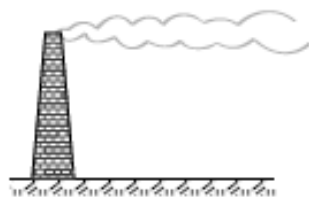
Cono
(a)



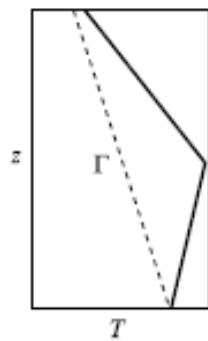
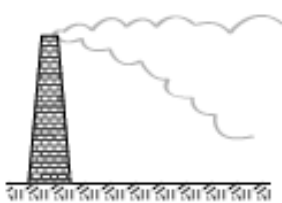
Ondulante
(b)



Ventilación
(c)



Fumigación
(d)



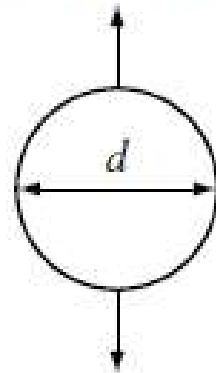
Elevada
(e)



Partículas en suspensión.

Cálculo de la velocidad de asentamiento, Ley de Stokes

Fuerza de rozamiento



Fuerza gravitacional = fuerza de rozamiento

$$mg = \frac{\pi}{6} d^3 \rho g = 3\pi\eta vd$$
$$v = \frac{d^2 \rho g}{18\eta}$$

donde

m = Masa de la partícula.

g = Aceleración gravitacional = $9,80\text{m/s}^2$.

d = Diámetro de la partícula.

ρ = Densidad de la partícula (g/m^3).

η = Viscosidad de aire = $0,0172 \text{ g/m} \cdot \text{s}$.

v = Velocidad de asentamiento (m/sec).

Ejercicio:

Encontrar la velocidad de sedimentación de una gota esférica de agua con un diámetro de $2 \mu\text{m}$, y estimar el tiempo de residencia de cada partícula si se distribuyen uniformemente a lo largo de 1.000 m por la atmósfera y su tasa de eliminación está determinada por la rapidez de sedimentación en el aire.

$$v = \frac{d^2 \rho g}{18 \eta} = \frac{(2 \times 10^{-6} \text{ m})^2 \cdot (10^6 \text{ g/m}^3) \cdot (9,8 \text{ m/s}^2)}{18 \times 0,0172 \text{ g/m} \cdot \text{s}}$$
$$v = 1,27 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

que es aproximadamente $0,5 \text{ m/hr}$.

$$\text{Tasa de eliminación de partículas} = \frac{N \text{ (partículas)}}{h \text{ (m)}} \cdot v \text{ (m/s)} = \frac{Nv}{h} \text{ partículas/s}$$

El tiempo de residencia τ es el ratio del número de partículas en la casilla dividido por la tasa de eliminación de partículas

$$\tau = \frac{\text{Partículas en casilla}}{\text{Tasa de eliminación de partículas}} = \frac{N}{(Nv/h)} = \frac{h}{v}$$

$$\tau = \frac{1.000 \text{ m}}{1,27 \times 10^{-4} \text{ m/s}} = 7,9 \times 10^6 \text{ s} \approx 91 \text{ días}$$

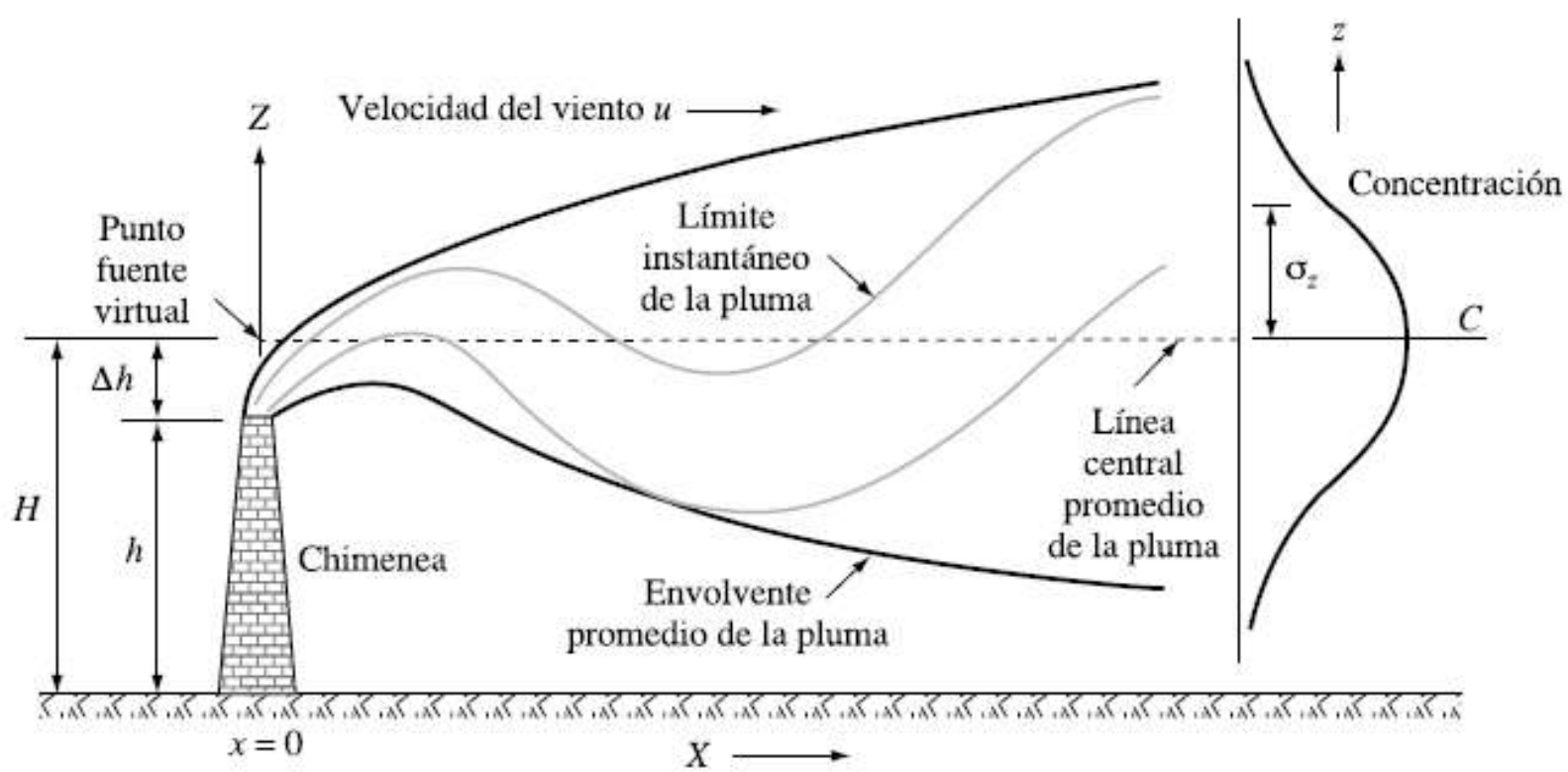


FIGURA 7.48. Límites instantáneos de la columna y tiempo medio envolvente de la columna.

$$C(x, y) = \frac{Q}{\pi u_H \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

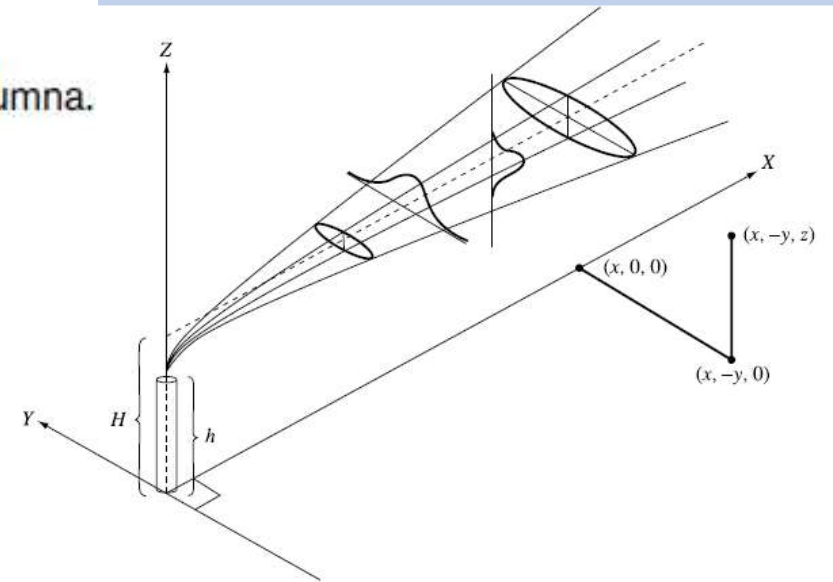


FIGURA 7.49. Sistema de coordenadas de dispersión de la columna. Muestra su distribución en las direcciones vertical y horizontal.

(Fuente: Turner, 1970.)

$$C_{X,Y} = \frac{Q}{\pi v \sigma_Y \sigma_Z} \left(\exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_Z^2}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-Y^2}{2\sigma_Y^2}\right) \right)$$

donde:

- $C_{X,Y}$ = concentración a nivel del suelo, en el punto X,Y (mg/m³)
 X = distancia en la dirección del viento desde el punto de emisión de los gases (m)
 Y = distancia horizontal desde el eje central de la pluma (m)
 Q = flujo másico de contaminantes emitidos (mg/s)
 h = altura de la chimenea (m)
 H = altura efectiva de elevación de la pluma (m)
 V = velocidad del viento a la altura efectiva de la pluma (m/s)
 σ_Y = coeficiente de dispersión horizontal (m)
 σ_Z = coeficiente de dispersión vertical (m)

$$v = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^P$$

CLASE DE ESTABILIDAD	PARÁMETRO P
A, B	0,15
C	0,20
D	0,25
E	0,40
F	0,60

- A = Atmósfera muy inestable
 B = Atmósfera moderadamente inestable
 C = Atmósfera levemente inestable
 D = Atmósfera neutra
 E = Atmósfera moderadamente estable
 F = Atmósfera estable

$$\sigma_Y = a X^{0,894}$$

$$\sigma_Z = c X^d + f$$

ESTABILIDAD	X < 1 km				X > 1 km		
	a	c	d	f	c	d	f
A	213	440,8	1,94	9,3	459,7	2,09	-9,6
B	156	106,6	1,15	3,3	108,2	1,10	2,0
C	104	61,0	0,91	0	61,0	0,91	0
D	68	33,2	0,73	-1,7	44,5	0,52	-13,0
E	51	22,8	0,68	-1,3	55,4	0,31	-34,0
F	34	14,4	0,74	-0,4	62,6	0,18	-48,6

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s) (a 10 m de altura)	RADIACIÓN SOLAR DURANTE EL DÍA			NUBOSIDAD NOCTURNA	
	Fuerte	Moderada	Baja	Nublado (>4/8)	Claro (<3/8)
< 2	A	A - B	B	E	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Ejercicio:

Una central térmica de 1.000 MW (10^6 kW) alimentada con carbón que tiene un rendimiento del 40%, emite SO_2 a la tasa legalmente permitida de 0,6 lb de SO_2 por millón de Btu de energía de entrada en la central. La columna tiene una altura efectiva de 300 m. Un anemómetro situado a 10 m mide una velocidad de viento de 2,5 m/s, en un día estival nublado. Predecir la concentración de SO_2 a nivel del suelo 4 km en la dirección del viento.

$$\text{Energía entrante} = \frac{\text{Energía saliente}}{\text{Rendimiento}} = \frac{1,0 \times 10^6 \text{ kW}}{0,40} \times \frac{4.412 \text{ Btu}}{\text{kWh}} = 8.530 \times 10^6 \text{ Btu/h}$$

$$Q = \frac{8.530 \times 10^6 \text{ Btu}}{\text{h}} \times \frac{0,6 \text{ lb SO}_2}{10^6 \text{ Btu}} \times \frac{\text{kg}}{2,2 \text{ lb}} \times \frac{10^9 \mu\text{g}}{\text{kg}} \times \frac{\text{h}}{3.600 \text{ s}} = 6,47 \times 10^8 \mu\text{g de SO}_2/\text{s}$$

A	=	Atmósfera muy inestable
B	=	Atmósfera moderadamente inestable
C	=	Atmósfera levemente inestable
D	=	Atmósfera neutra
E	=	Atmósfera moderadamente estable
F	=	Atmósfera estable

$$v = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^P$$

CLASE DE ESTABILIDAD	PARÁMETRO P
A, B	0,15
C	0,20
D	0,25
E	0,40
F	0,60

$$u_H = u_a \left(\frac{H}{z_a} \right)^p = 2,5 \cdot \left(\frac{300}{10} \right)^{0,2} = 4,9 \text{ m/s}$$

$$C(x, y) = \frac{Q}{\pi u_H \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

Distancia x (km)	Clase de estabilidad y σ_y						Clase de estabilidad y σ_z					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
0,2	51	37	25	16	12	8	29	20	14	9	6	4
0,4	94	69	46	30	22	15	84	40	26	15	11	7
0,6	135	99	66	43	32	22	173	63	38	21	15	9
0,8	174	128	85	56	41	28	295	86	50	27	18	12
1	213	156	104	68	50	34	450	110	61	31	22	14
2	396	290	193	126	94	63	1.953	234	115	51	34	22
4	736	539	359	235	174	117		498	216	78	51	32
8	1.367	1.001	667	436	324	218		1.063	406	117	70	42
16	2.540	1.860	1.240	811	602	405		2.274	763	173	95	55
20	3.101	2.271	1.514	990	735	495		2.904	934	196	104	59

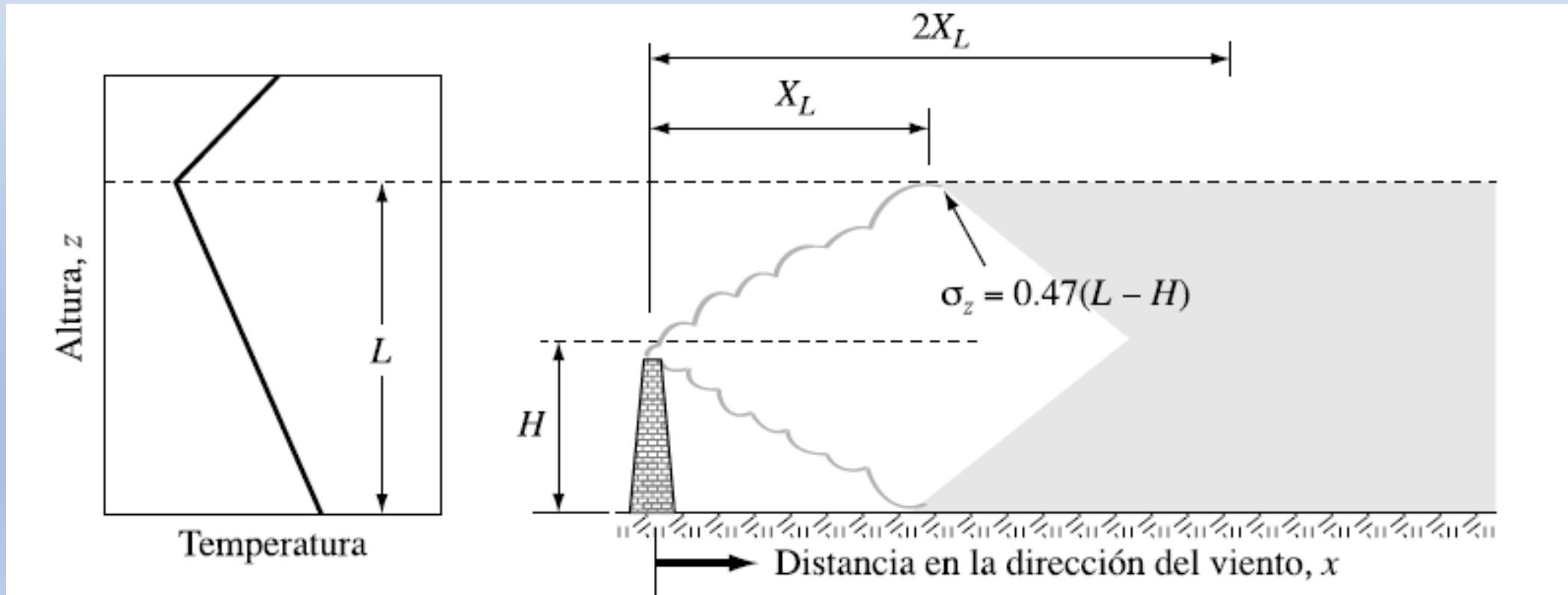
$$C(4,0) = \frac{6,47 \times 10^8 \mu\text{g/s}}{\pi \times 4,9 \text{ m/s} \times 359 \text{ m} \times 216 \text{ m}} \exp\left[\frac{-(300)^2}{2 \times (216)^2}\right] = 206 \mu\text{g/m}^3$$

Utilizando $24.465 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ (a una atm, y 25°C) junto con el peso molecular del SO_2 ($32 + 2 \times 16 = 64 \text{ g/mol}$), podemos convertir las unidades en las más utilizadas ppm:

$$C = \frac{206 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3 \times 24,465 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}}{64 \text{ g/mol}} = 0,109 \times 10^{-6} = 0,109 \text{ ppm}$$

Concentración en la dirección del viento en condiciones de inversión térmica

$$C(x, 0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u_H \sigma_y L} \quad \text{para } x \geq 2X_L$$



Ejercicio:

Consideremos una chimenea con una altura efectiva de 100 m, que emite SO_2 a una velocidad de $2 \times 10^8 \mu\text{g/s}$. La velocidad del viento a 10 m es de 5,5 m/s, y a 100 m es de 10 m/s. Es un día estival claro con el sol cercano al cénit y tenemos en cuenta una capa de inversión que comienza a 300 m. Calcular la concentración de SO_2 a nivel del suelo a una distancia en dirección del viento el doble de la existente hasta el punto donde comienza a tener lugar la reflexión a consecuencia de la capa de inversión.

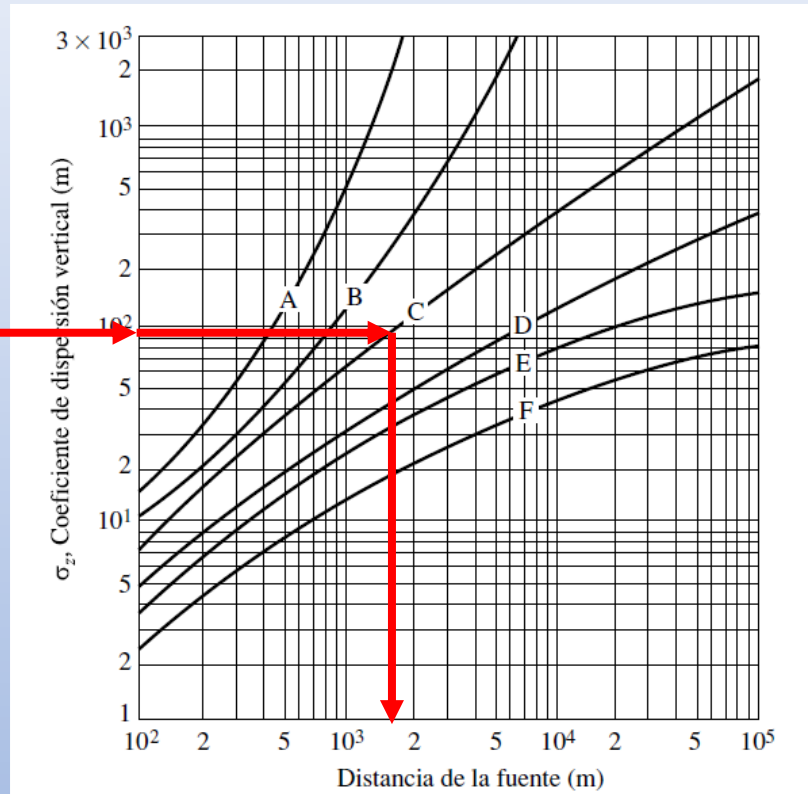
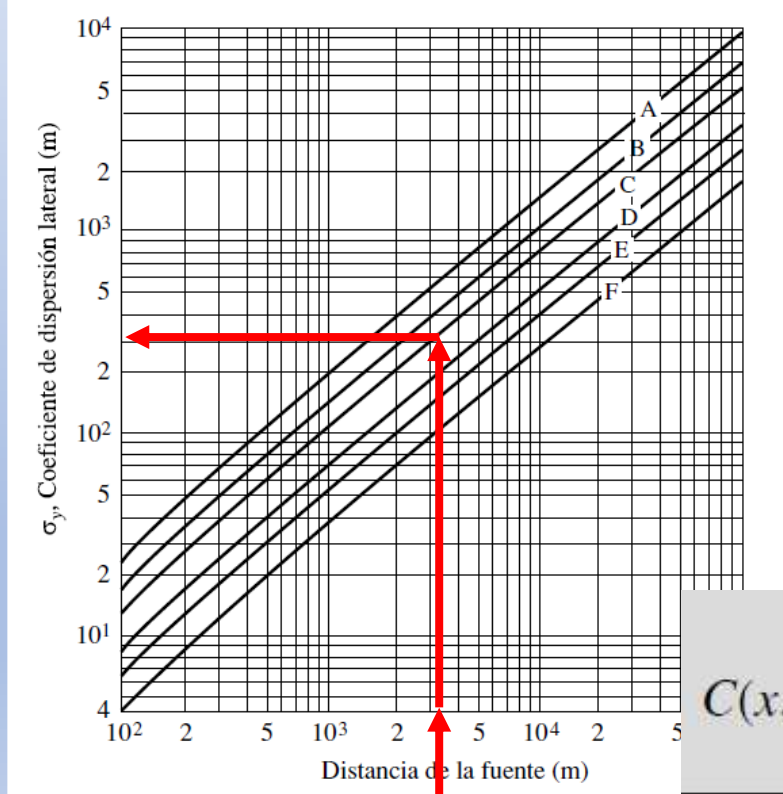
$$\sigma_z = 0,47(L - H) = 0,47(300 - 100) = 94 \text{ m}$$

Para averiguar X_L , podemos utilizar la Figura 7.50b, pero primero necesitamos conocer la clase de estabilidad por debajo de la inversión. De la Tabla 7.7, un día claro de verano con una velocidad del viento de 5,5 m/s corresponde a una estabilidad de clase C. Nece-

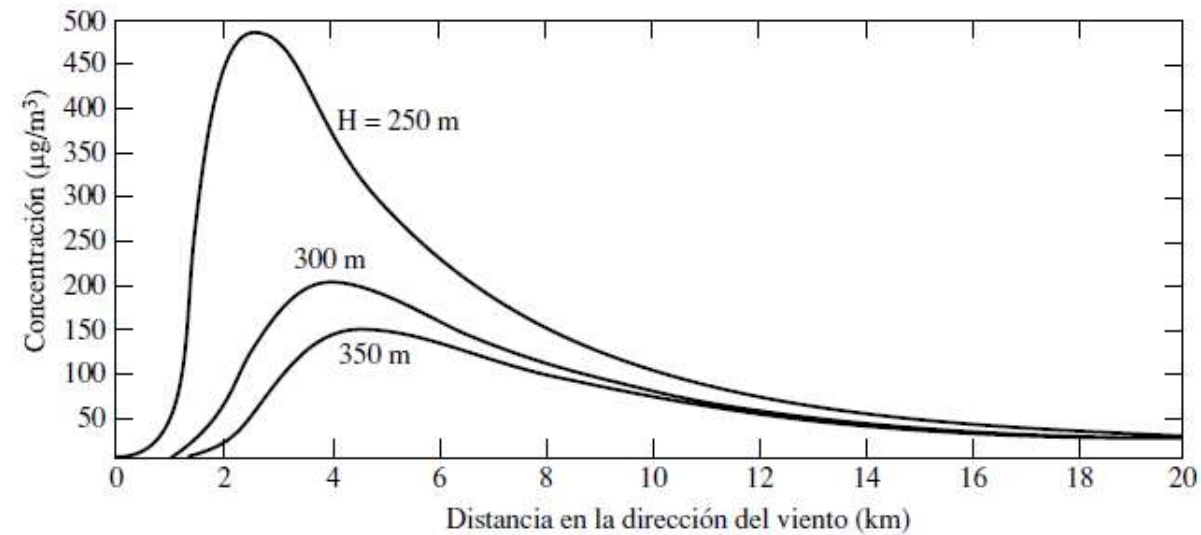
Velocidad del viento superficial (m/s)	Insolación diurna			Nubosidad nocturna ^(e)	
	Fuerte ^(b)	Moderada ^(c)	Leve ^(d)	Nublado ($\geq 4/8$)	Despejado ($\leq 3/8$)
<2	A	A-B ^(f)	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

sitamos hallar X_L para determinar σ_y en (7.55). Introduciendo la Figura 7.50b en el eje vertical para $\sigma_z = 94$ m consultando la indicación acerca de la clase C y consultando el dato en la base del eje horizontal, nos conduce a un resultado aproximado de $X_L = 1.600$ m.

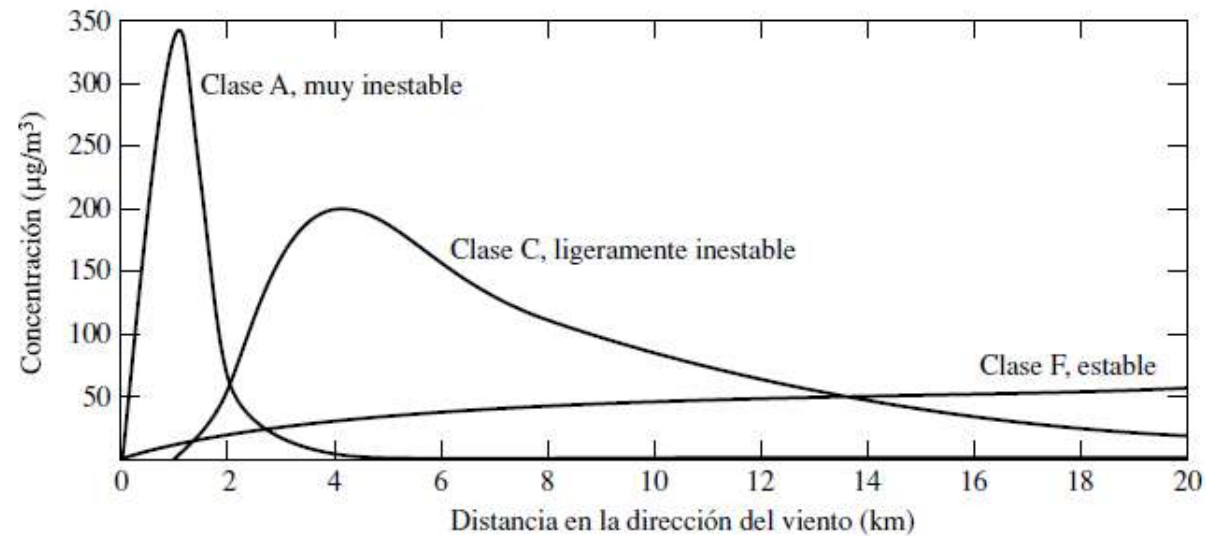
Para hallar la concentración para $x = 2X_L = 2 \times 1.600$ m = 3.200 m, necesitamos calcular σ_y en ese punto. Utilizando la Figura 7.47a para $x = 3.200$ m y clase C, podemos calcular σ_y a unos 300 m (podríamos haber utilizado la Ecuación 7.47 con la Tabla



$$C(x, 0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u_H \sigma_y L} = \frac{2 \times 10^8 \mu\text{g/s}}{(2\pi)^{1/2} \times 10 \text{ m/s} \times 300 \text{ m} \times 300 \text{ m}} = 90 \mu\text{g/m}^3$$



(a)



(b)

FIGURA 7.51. El efecto de las variaciones de los parámetros clave sobre la columna de SO_2 de la central del Ejemplo 7.12. (a) El efecto de los cambios en la altura efectiva de la chimenea para una clase de estabilidad constante, y (b) la variación de clase de estabilidad para una altura efectiva de chimenea constante.

Control de emisiones

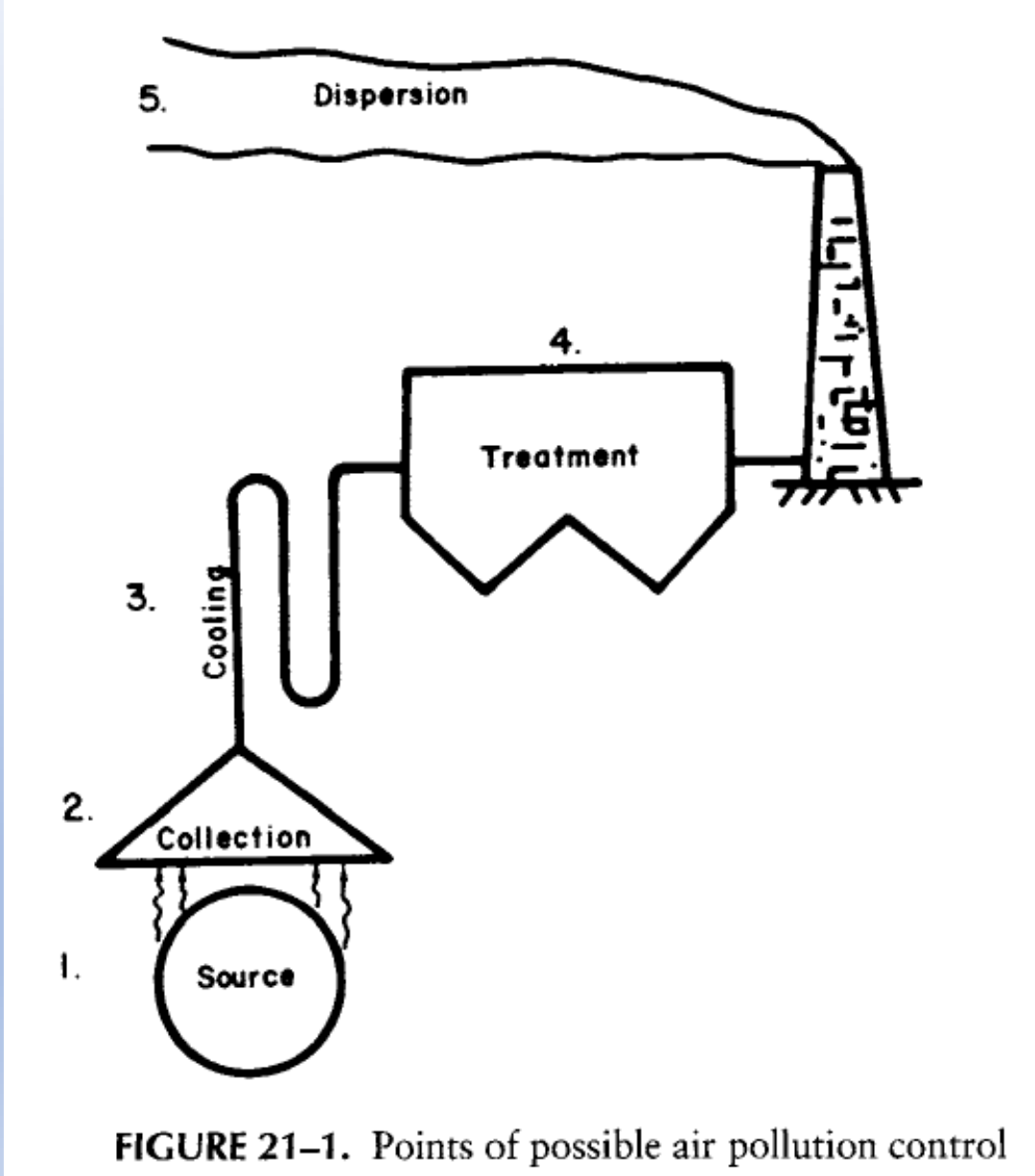
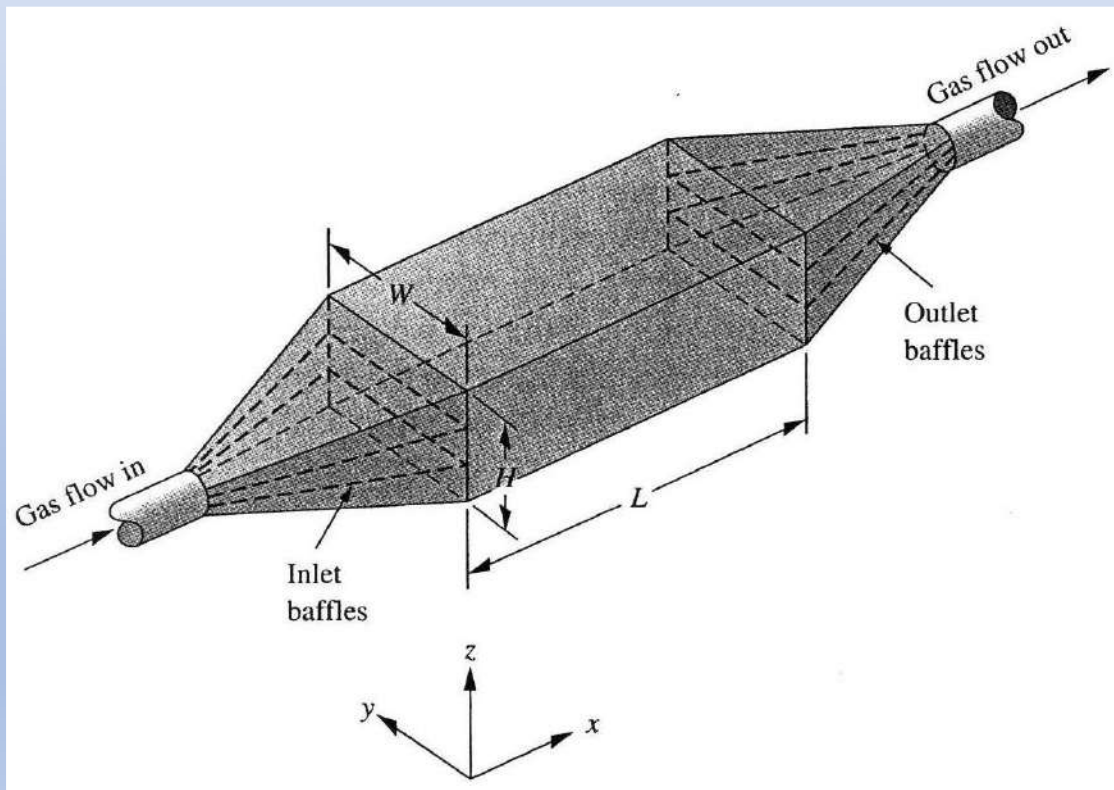


FIGURE 21-1. Points of possible air pollution control

Control de partículas primarias

- Sedimentadores por gravedad



$$V_{\text{avg}} = \frac{Q}{WH}$$

$$t = \frac{L}{V_{\text{avg}}}$$

$$\text{Vertical settling distance} = t V_t = V_t \frac{L}{V_{\text{avg}}}$$

$$\text{Fraction captured} = \eta = \frac{L V_t}{H V_{\text{avg}}} \quad \text{for block flow}$$

Flujo
pistón

$$\eta = \frac{L g D^2 \rho_{\text{part}}}{H V_{\text{avg}} 18 \mu} \quad \text{for block flow}$$

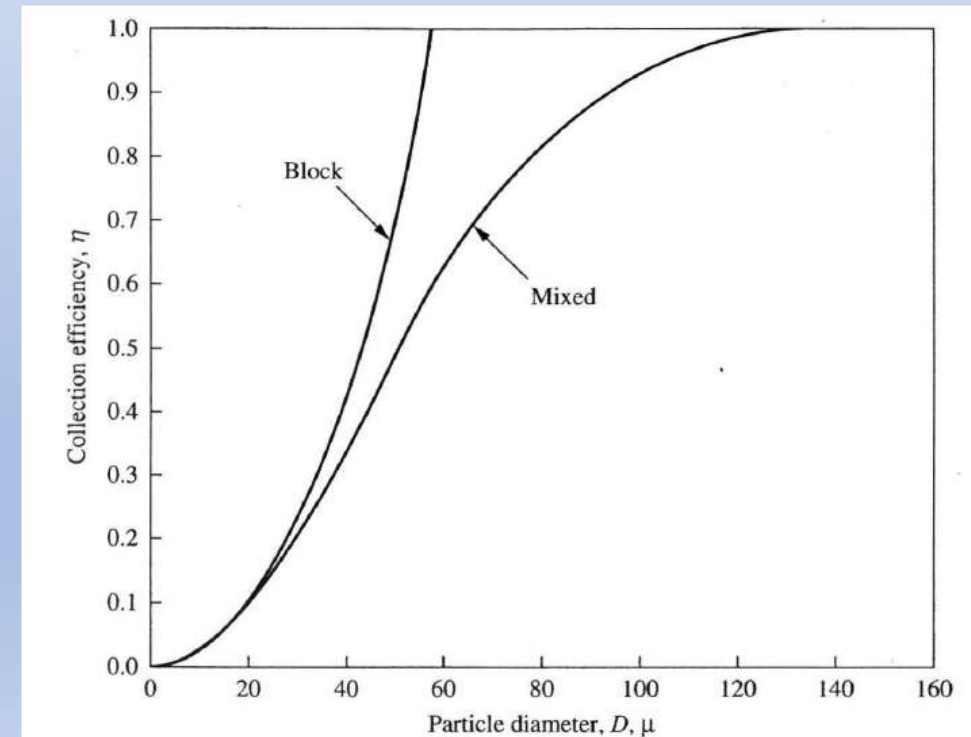
$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{L g D^2 \rho_{\text{part}}}{H V_{\text{avg}} 18 \mu}\right) \quad \text{mixed flow}$$

Mezcla
completa

Ejercicio: Calcular la eficiencia de un sedimentador por gravedad con $H = 2\text{ m}$ $L = 10\text{ m}$ y $V_{\text{avg}} = 1\text{ m/s}$. Considerar en principio partículas de 1μ de diámetro y luego discutir cómo cambia el resultado con el tamaño.

$$\eta = \frac{LgD^2\rho_{\text{part}}}{18\mu HV_{\text{avg}}} = \frac{(10\text{ m})(9.81\text{ m/s}^2)(10^{-6}\text{ m})^2(2000\text{ kg/m}^3)}{(18)(1.8 \times 10^{-5}\text{ kg/m}\cdot\text{s})(2\text{ m})(1\text{ m/s})} = 3.03 \times 10^{-4}$$

$$\eta_{\text{mixed}} = 1 - \exp(-3.03 \times 10^{-4}) = 3.029 \times 10^{-4}$$



Ciclones

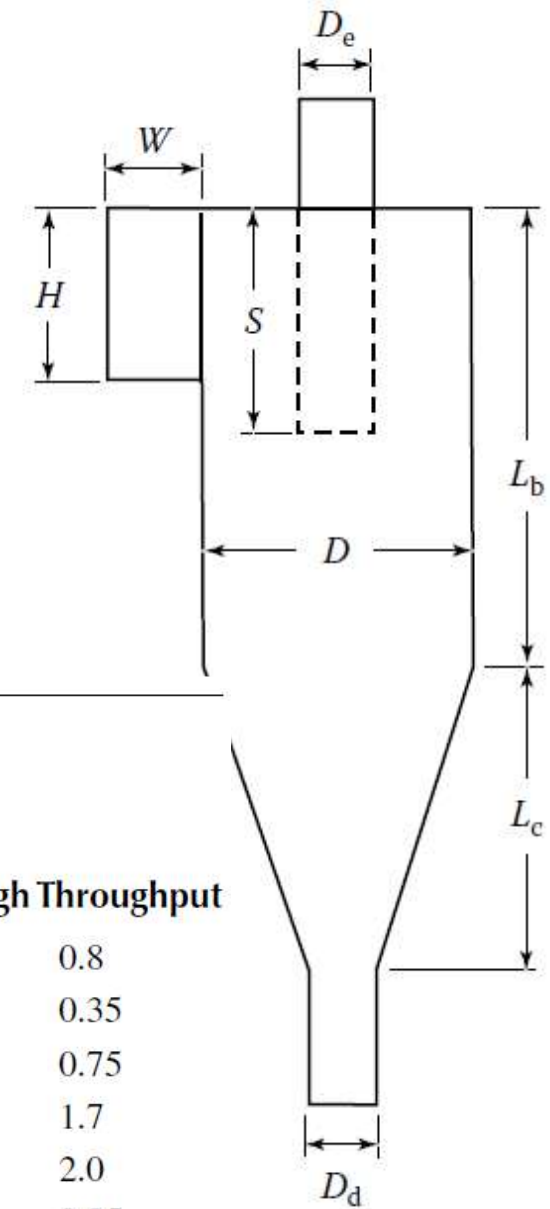
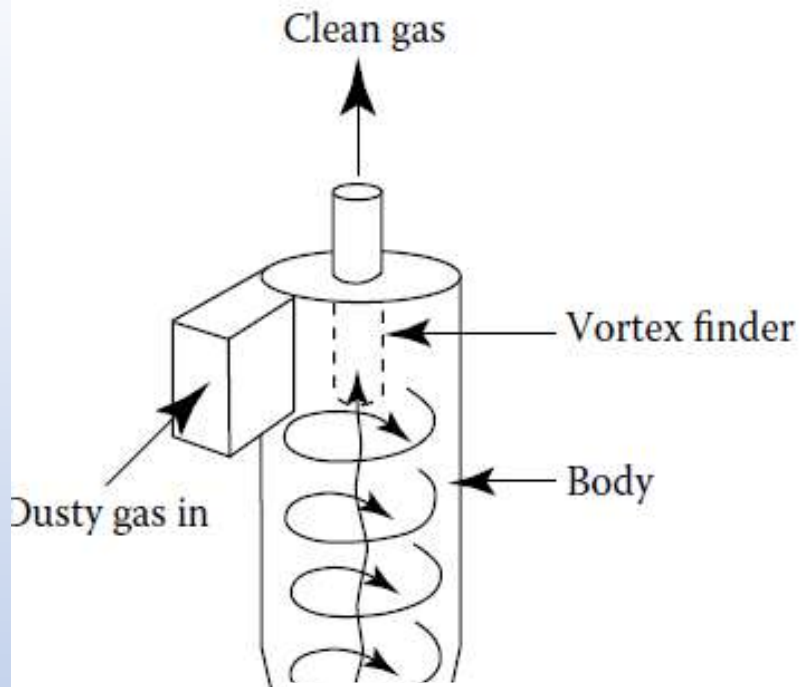


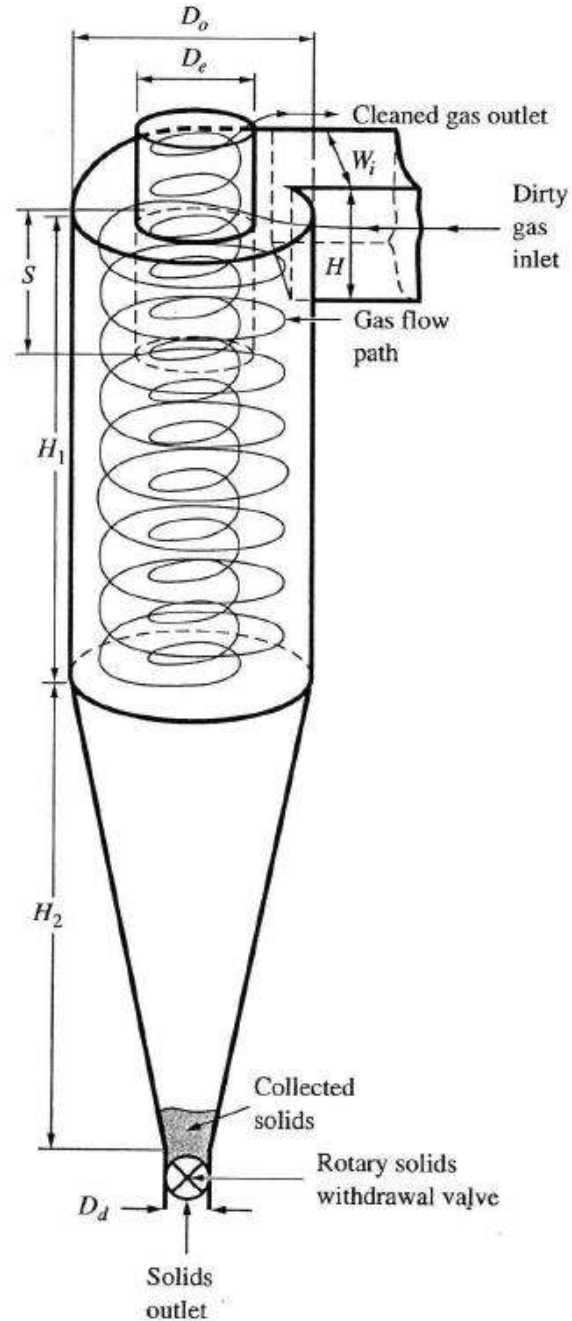
TABLE 21.1
Typical Cyclone Dimensions

Dimension	Fractional Ratio	High Efficiency	Standard	High Throughput
Inlet height	H/D	0.44	0.5	0.8
Inlet width	W/D	0.21	0.25	0.35
Gas exit diameter	D_e/D	0.4	0.5	0.75
Body length	L_b/D	1.4	1.75	1.7
Cone length	L_c/D	2.5	2.0	2.0
Vortex finder	S/D	0.5	0.6	0.85
Dust outlet diameter	D_d/D	0.4	0.4	0.4

Como alternativa a la gravedad puede utilizarse la fuerza centrífuga.

$$\text{Centrifugal force} = \frac{mV_c^2}{r} = m\omega^2 r$$

$$V_t = \frac{V_c^2 D^2 \rho_{\text{part}}}{18\mu r}$$



and

$$\eta = \frac{\pi N V_c D^2 \rho_{\text{part}}}{9W_i \mu} \quad \text{block flow}$$

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\pi N V_c D^2 \rho_{\text{part}}}{9W_i \mu}\right) \quad \text{mixed flow}$$

$$N = 5$$

Diámetro de corte:

$$D_{\text{cut}} = \left(\frac{9W_i \mu}{2\pi N V_c \rho_{\text{part}}}\right)^{1/2} \quad \text{block flow}$$

FIGURE 9.4

Schematic of a cyclone separator. Dimensions are typically based on the overall diameter D_o . Taken as ratios to that dimension, $W_i = 0.25$, $H = 0.5$, $H_1 = 2$, $H_2 = 2$, $D_e = 0.5$, $S = 0.625$, $D_d = 0.25$. For example, if $D_o = 1$ ft, then $W_i = 0.25$ ft, etc. Ashbee and Davis [2] show a table with six sets of values for these dimension ratios. The principal differences are that high-efficiency cyclones have smaller values of W_i whereas high-throughput cyclones have larger values of W_i and of D_e . The dimension ratios here are for the "conventional" design.

Ej.: Una partícula está viajando en una trayectoria circular (en un ciclón) en una corriente gaseosa a una velocidad de 60 ft/s y con un radio de 1 ft. ¿Cuál es la relación entre la fuerza centrífuga y la correspondiente a la fuerza gravitatoria?

$$\frac{\text{Centrifugal force}}{\text{Gravity force}} = \frac{mV_c^2/r}{mg} = \frac{(60 \text{ ft/s})^2/(1 \text{ ft})}{32.2 \text{ ft/s}^2} = 111.8$$

Ej.: Calcular en las condiciones anteriores la velocidad terminal de sedimentación (puede ignorarse la densidad del fluido).

$$V_t = \frac{V_c^2 D^2 \rho_{\text{part}}}{18\mu r}$$

$$\begin{aligned} V_t &= \frac{(18.29 \text{ m/s})^2 (10^{-6} \text{ m})^2 (2000 \text{ kg/m}^3)}{(18)(1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s})(0.3048 \text{ m})} = 0.0068 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ &= 0.68 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0.022 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Ej.: Estimar el diámetro de corte para un ciclón con una ancho de entrada de 0.5 ft, $V_c = 60$ ft/s y $N = 5$

$$D_{\text{cut}} = \left(\frac{9W_i\mu}{2\pi NV_c\rho_{\text{part}}} \right)^{1/2} D_{\text{cut}} = \left(\frac{(9)(0.5 \text{ ft})(1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s})}{2\pi(5)(60 \text{ ft/s})(2000 \text{ kg/m}^3)} \right)^{1/2} = 4.63 \times 10^{-6} \text{ m} \approx 5 \mu$$

and

$$\eta = \frac{\pi NV_c D^2 \rho_{\text{part}}}{9W_i\mu} \quad \text{block flow}$$

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\pi NV_c D^2 \rho_{\text{part}}}{9W_i\mu}\right) \quad \text{mixed flow}$$

$$\eta = \frac{(D/D_{\text{cut}})^2}{1 + (D/D_{\text{cut}})^2}$$

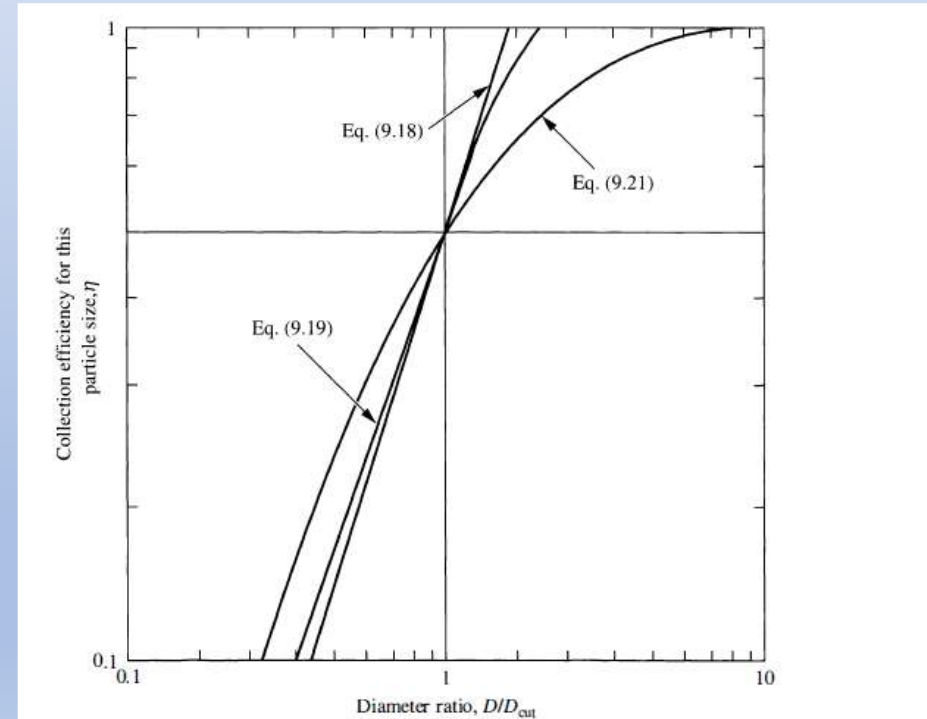


FIGURE 9.6

Collection efficiency vs. particle diameter curves for cyclones. Here, all three curves must pass through 0.5 at $D = D_{\text{cut}}$ because of the definition of D_{cut} . Equation (9.21) is very close to the experimental results for typical cyclones.

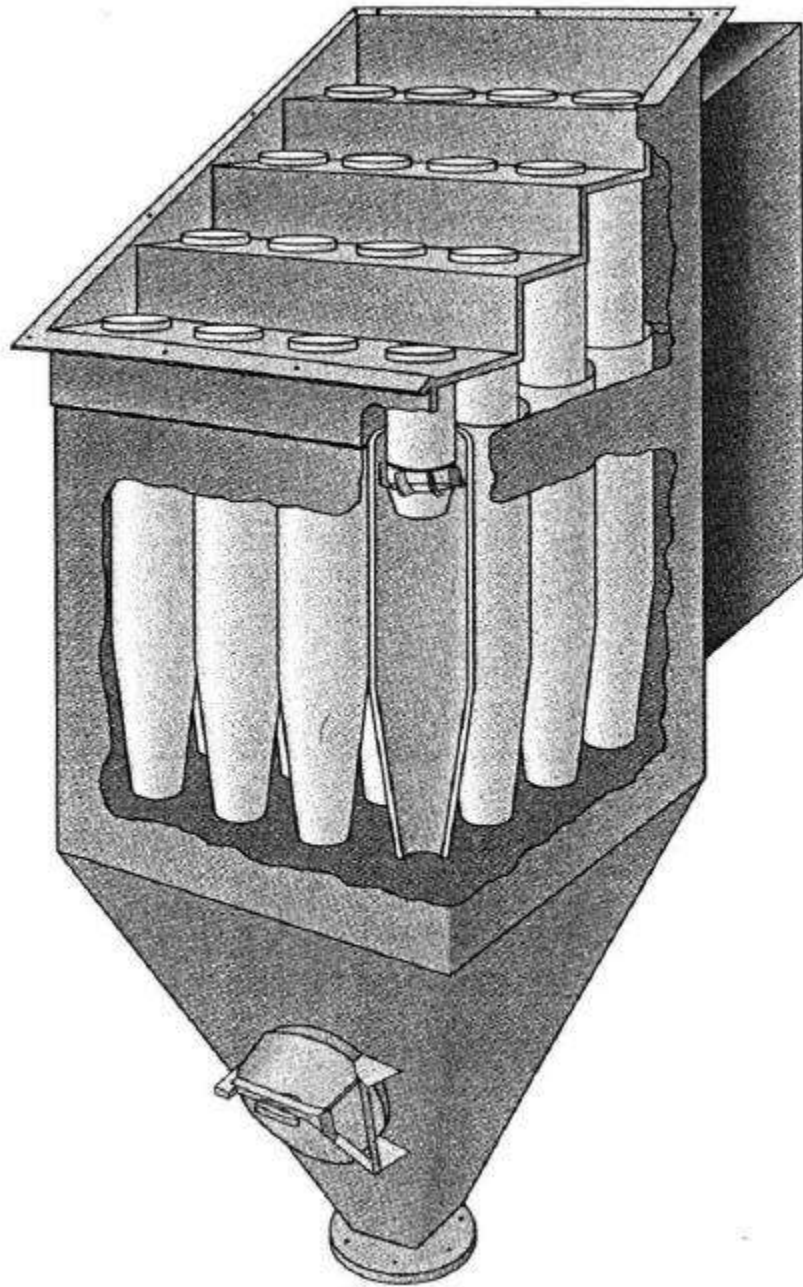


FIGURE 9.5

A multicyclone, which places a large number of small cyclones in parallel. The dirty gas flows through an entrance duct, the edge of which is shown in the sketch at the rear, into the chamber shown in the cutaway, then flows downward into the individual tubes, getting its spiral motion from the turning vanes shown. The cleaned gas flows up the central tubes and out through the top of the device (through an outlet flue, not shown, which bolts to the slanting top of the device). The collected particles fall to the conical bottom. (Courtesy of Joy Environmental.)

Lavadores (wet scrubbers)

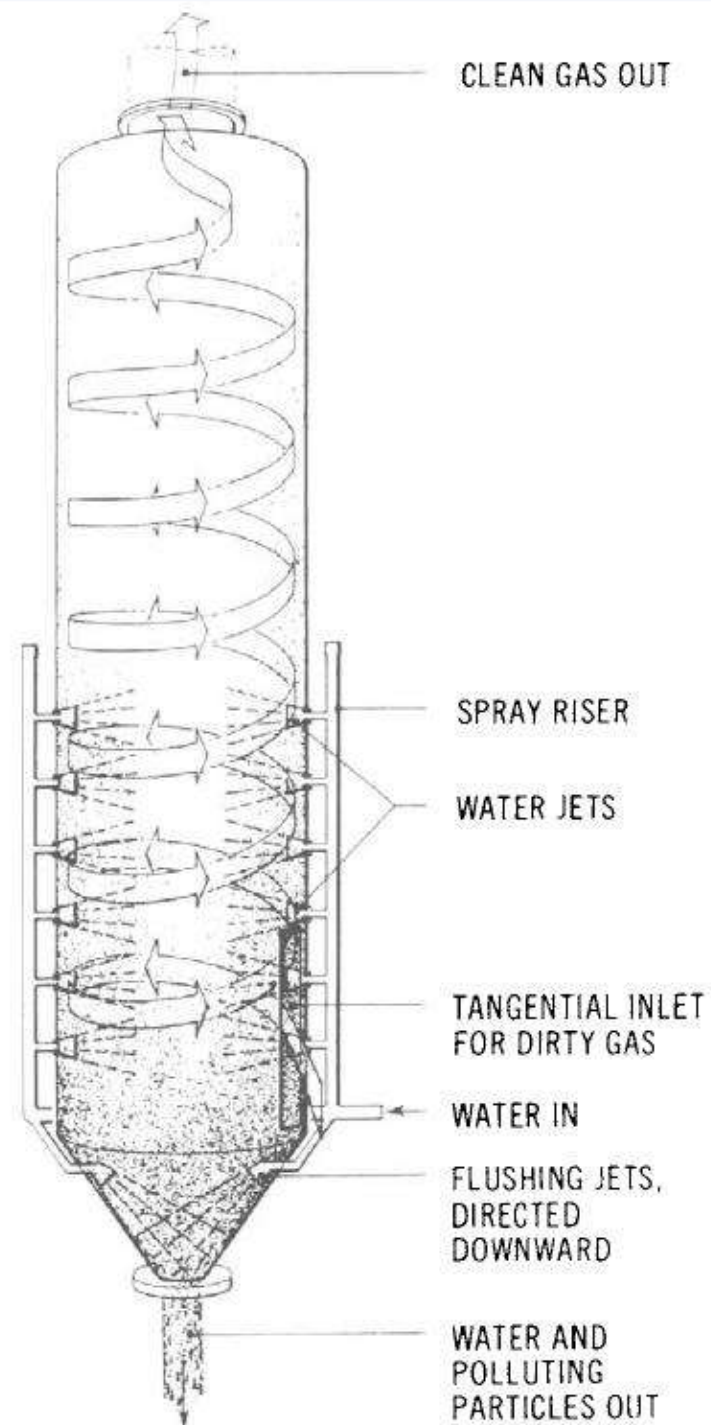


FIGURE 21-5
Spray tower [Courtesy the American Lung Association.]

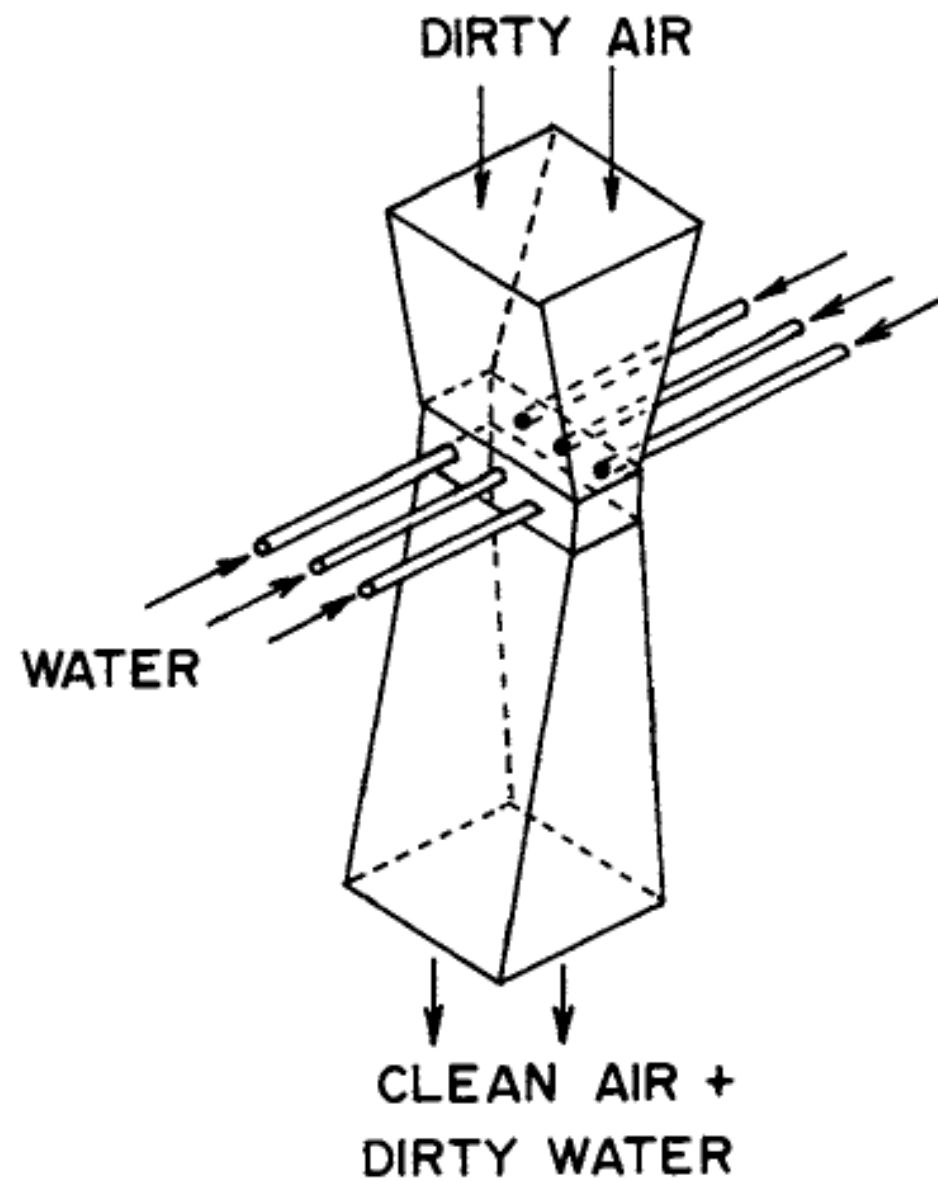


FIGURE 21-6
Venturi scrubber

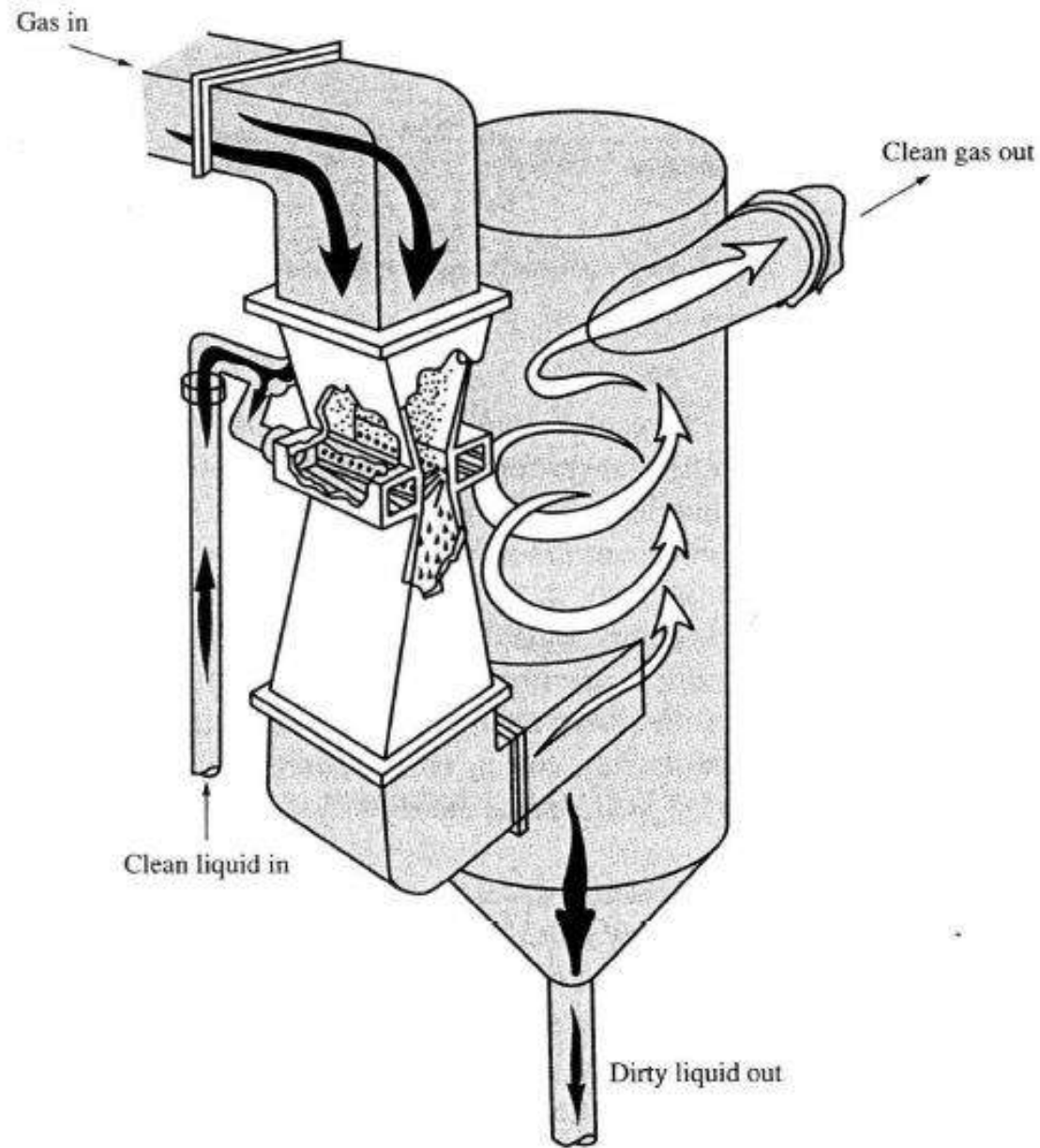
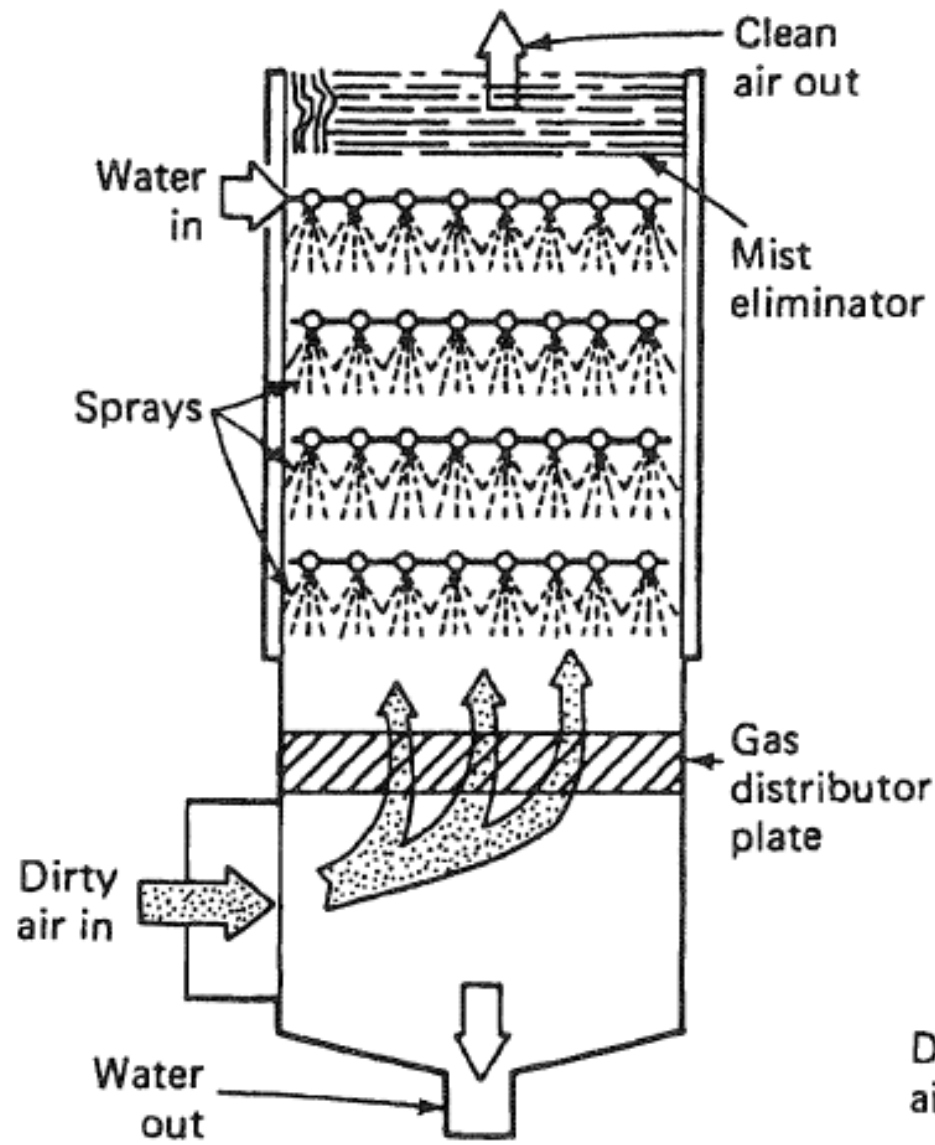
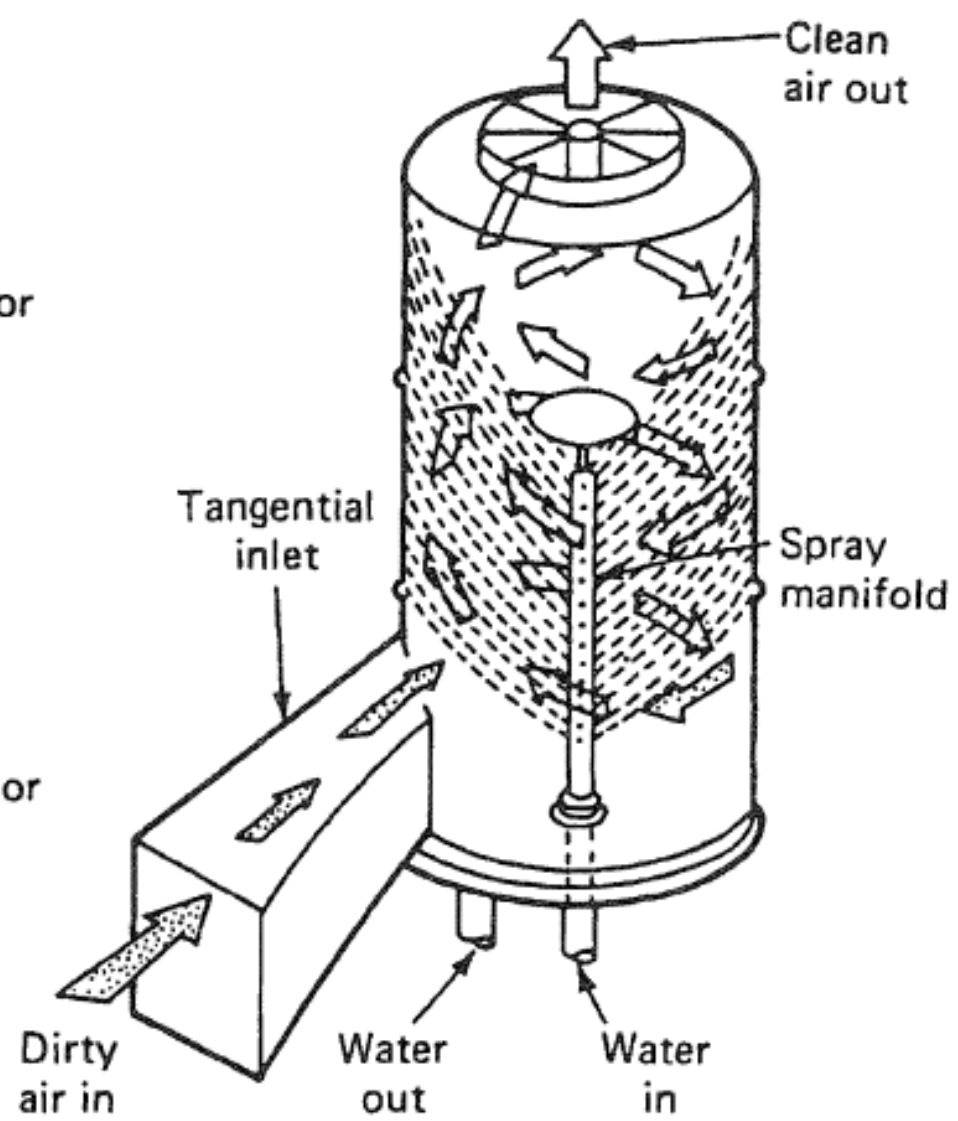


FIGURE 9.26

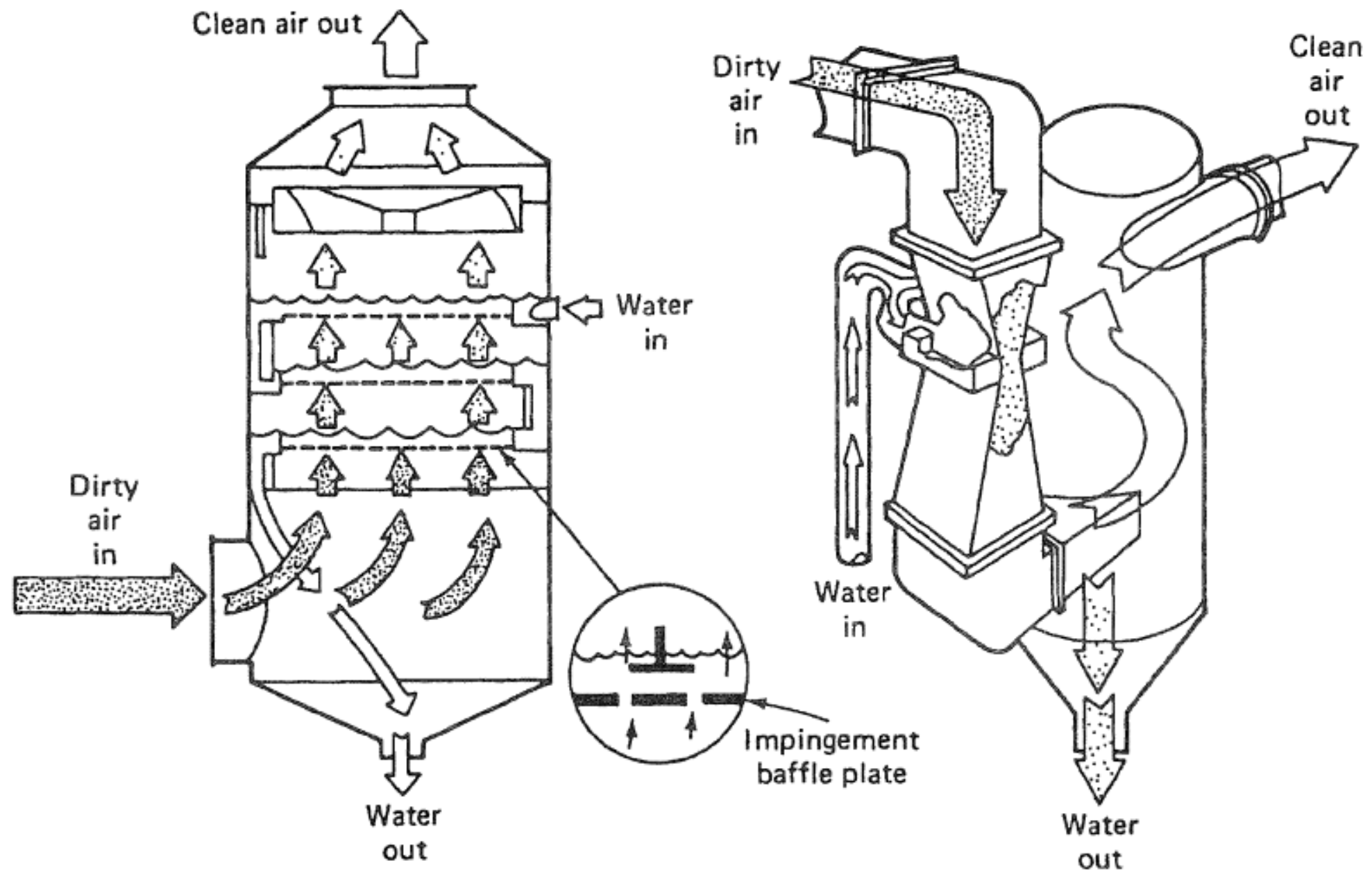
Schematic of a typical downflow venturi scrubber, with liquid injection at the throat and the discharge passing to a large cyclone separator. (Courtesy of Wheelabrator Air Pollution Control Inc.)



(a)



(b)



Precipitadores Electrostáticos

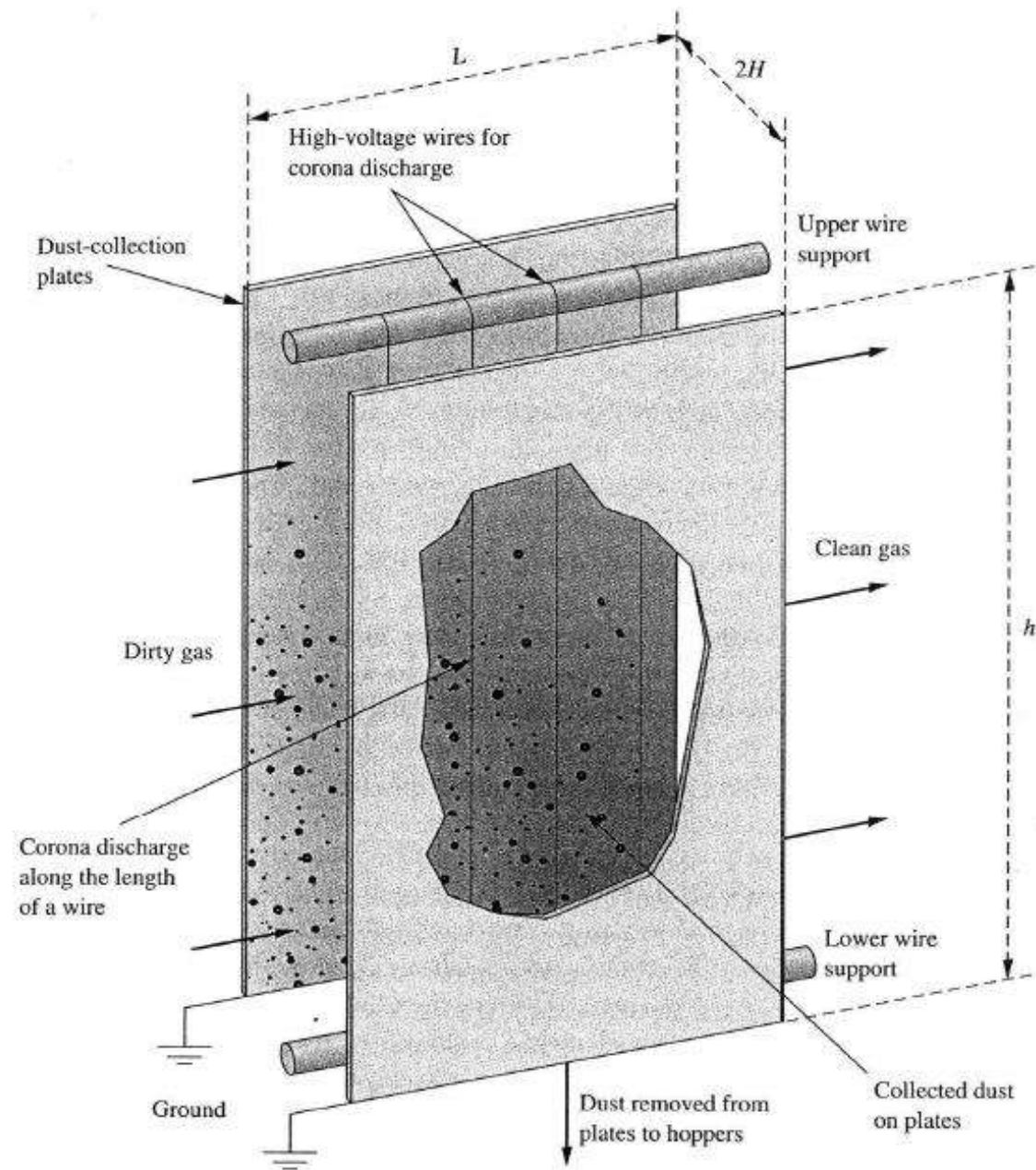


FIGURE 9.7

Diagrammatic sketch of a simplified ESP with two plates, four wires, and one flow channel. Industrial-size ESPs have many such channels in parallel; see Fig. 9.8.

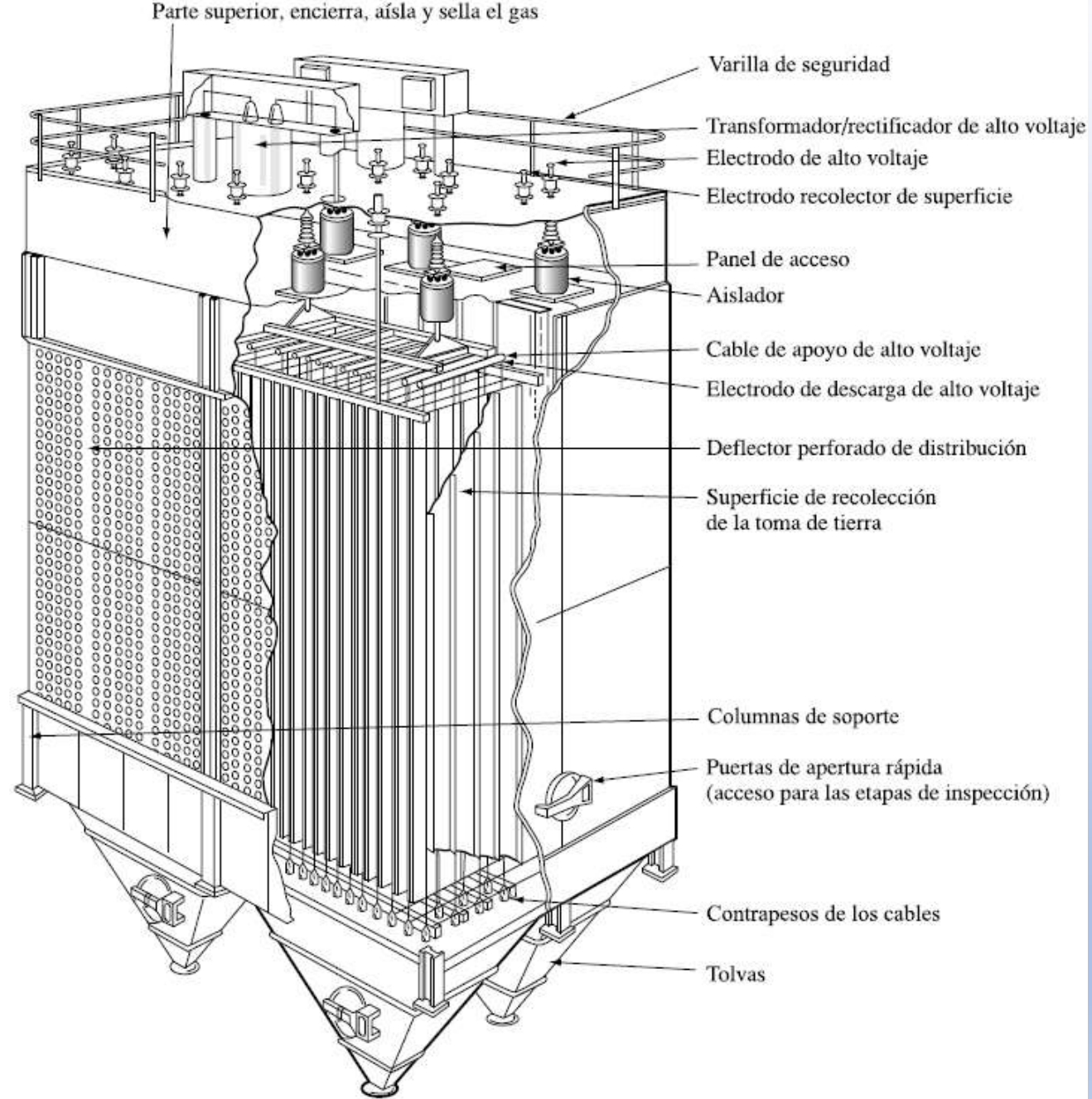


FIGURA 7.34. Corte del plano horizontal de un precipitador electrostático tipo.
 (Fuente: U.S. HEW, 1969.)

Filtros de tela (baghouse)

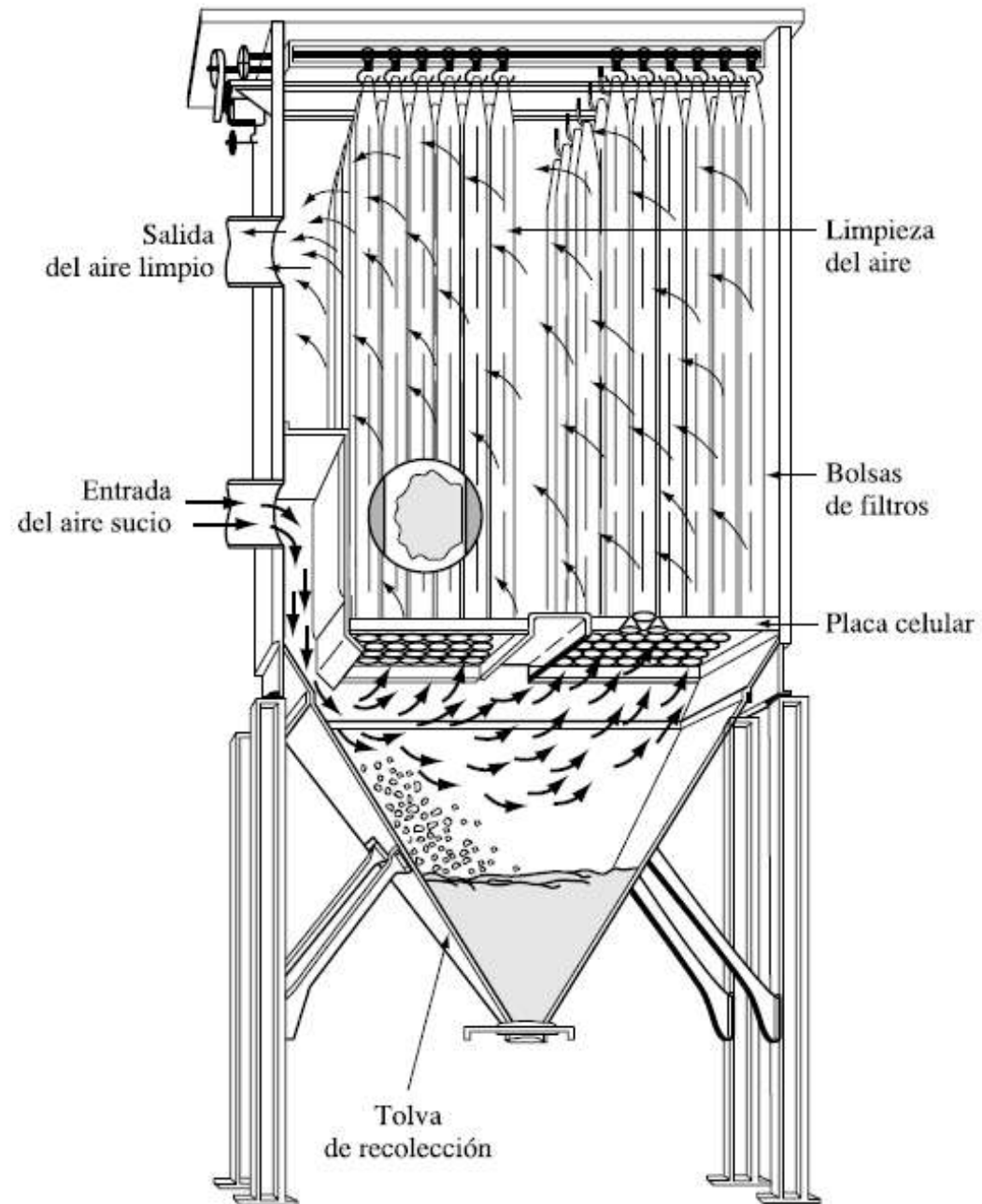
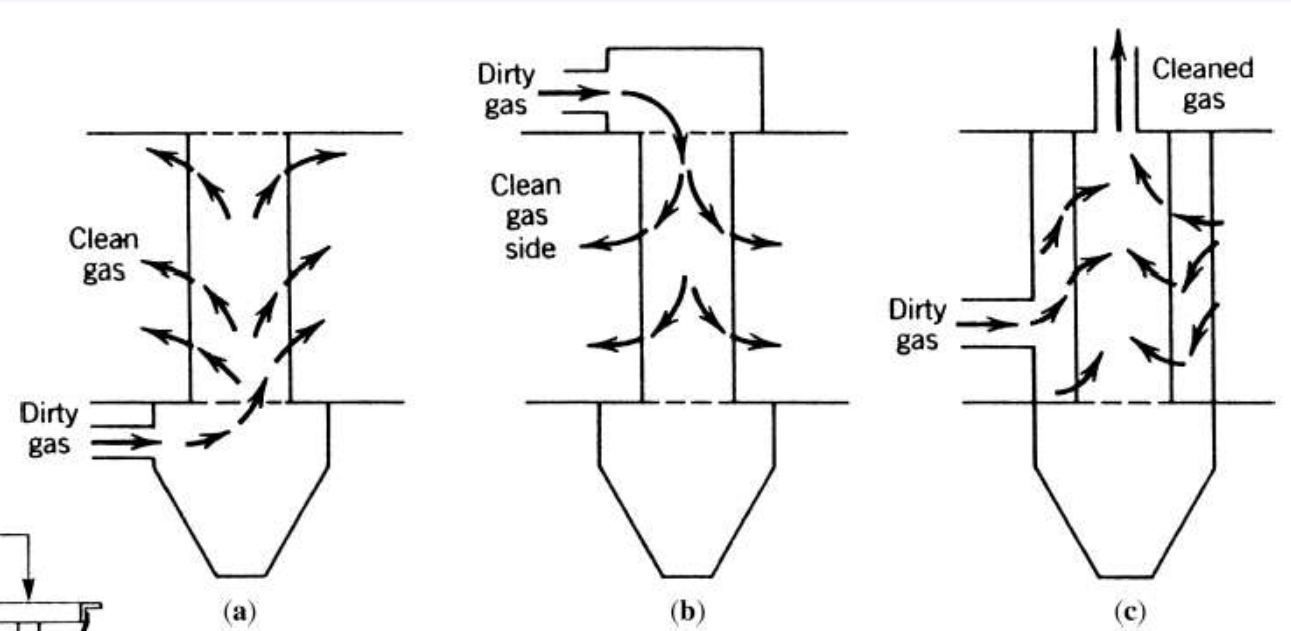


FIGURA 7.35. Típica cámara de filtros de tela.
(Fuente: Cortesía de Wheelabratos Air Pollution Control.)

Filtros de tela (baghouse)



12.1 Baghouse filtration methods: (a) bottom feed; (b) top feed; (c) exterior filtration.

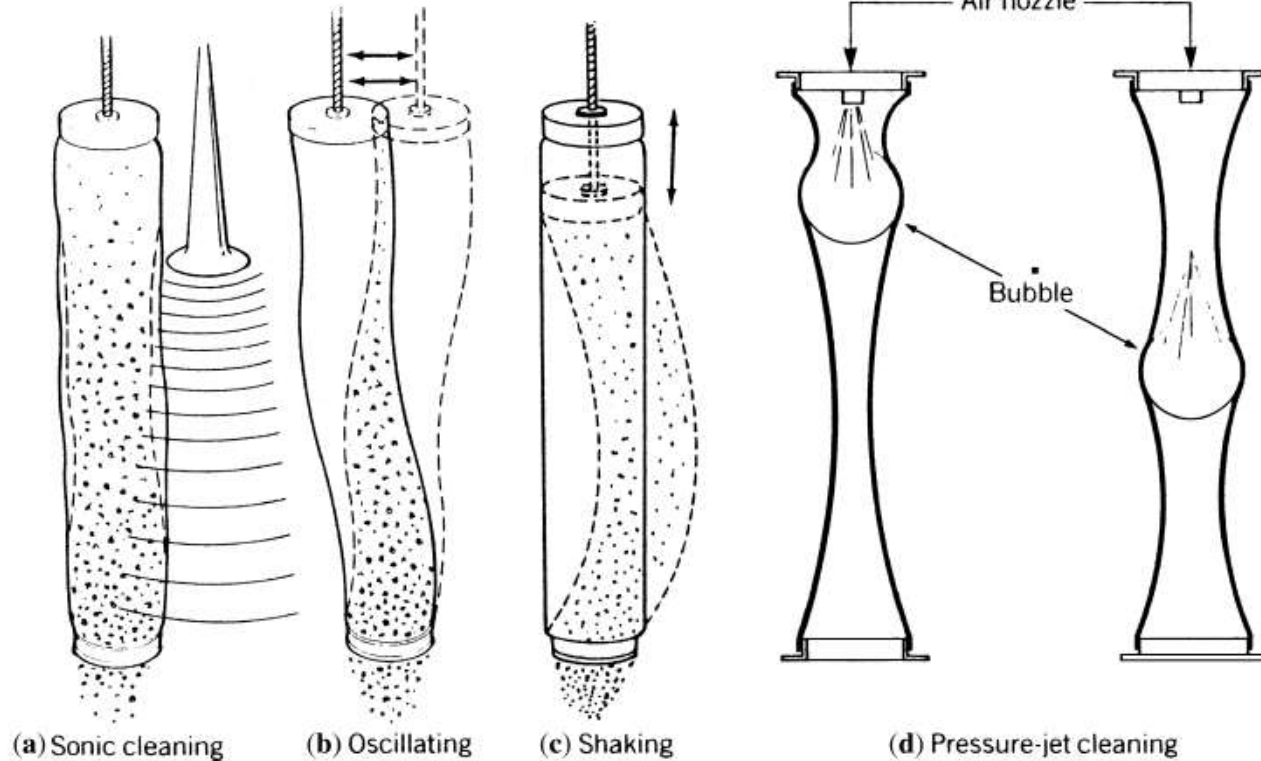
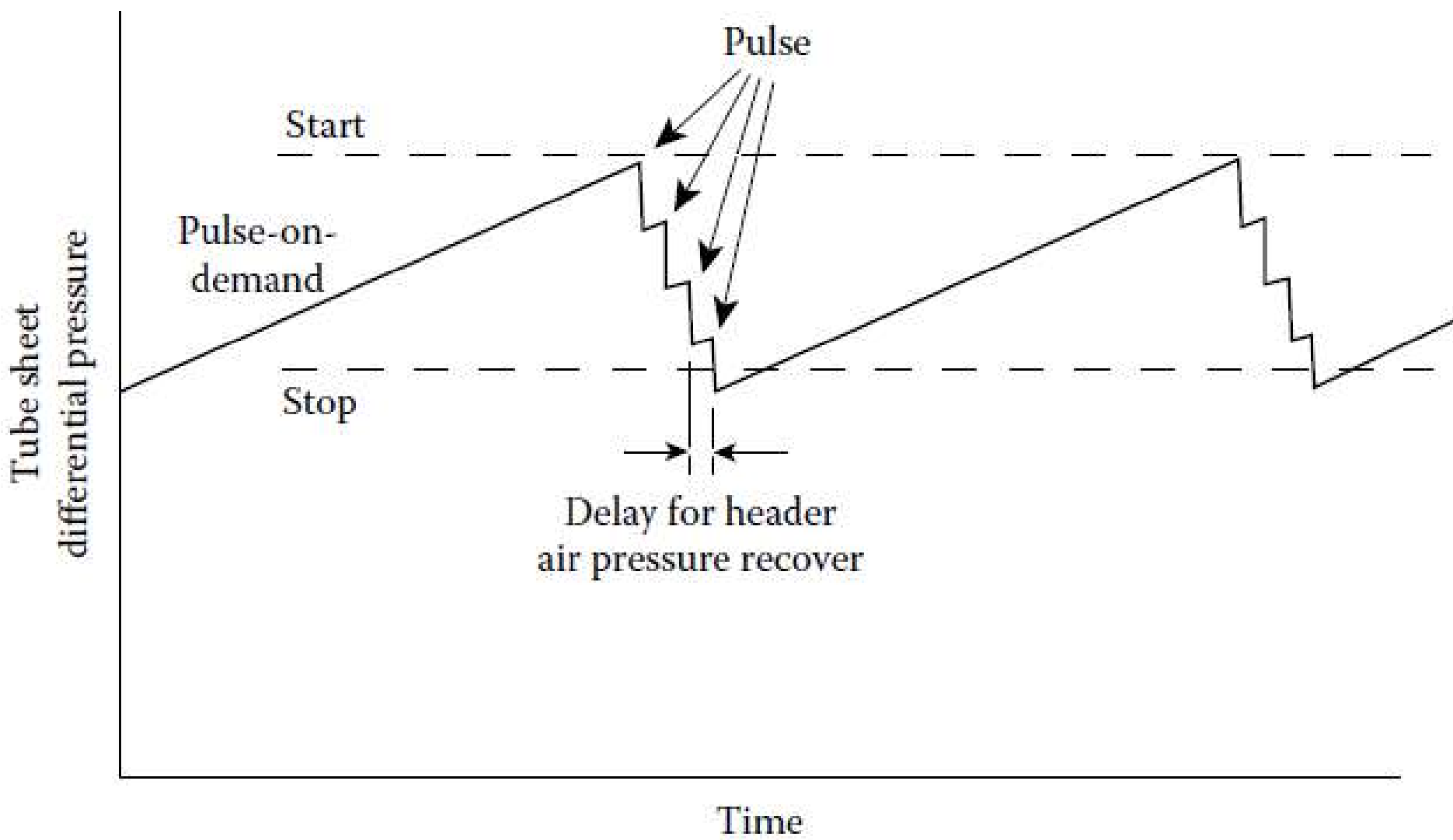


Figure 12.2 Fabric-flexing cleaning methods: (a) sonic cleaning; (b) oscillating; (c) shaking; (d) pressure-jet cleaning.

Filter Material Properties

Material	Recommended Max		Chemical Resistance		Abrasion Resistance	Cost (per 8-ft bag)
	Operating Temp (°F)	Excursion Temp (°F)	Acid	Base		
	Cotton	180	200	Poor	Good	Good
Wool	200	230	Good	Poor	Fair	—
Nylon	200	250	Poor	Good	Excellent	—
Polypropylene	200	200	Excellent	Excellent	Excellent	\$8
Polyester	275	300	Good	Fair	Excellent	\$9
Acrylic	260	285	Good	Fair	Good	\$13
Nomex [®]	375	400	Fair	Good	Excellent	\$22
Ryton [®]	375	400	Excellent	Excellent	Excellent	—
Teflon [®]	450	500	Excellent	Excellent	Fair	\$26
Fiberglass	500	550	Good	Good	Fair	\$24
Coated high-purity silica	900	1050	Good	Good	Fair	\$150
Ceramic candle	1650	1830	—	—	—	\$1000 ^a

^a 60 mm diameter × 1.5 m.



Maximum Filtering Velocities for Various Dusts in Shaker or Reverse Air Baghouses

Dusts	Maximum Filtering Velocity, cfm/ft ² or ft/min
Aluminum oxide, carbon, fertilizer, graphite, iron ore, lime, paint pigments	2.0
Aluminum, clay, coke, charcoal, cocoa, lead oxide, mica, soap, sugar, talc	2.25
Bauxite, ceramics, chrome ore, feldspar, flour, flint, glass, gypsum, plastics	2.50
Asbestos, limestone, quartz, silica	2.75
Cork, feeds and grain, marble, oyster shell	3.0–3.25
Leather, paper, tobacco, wood	3.50

$$V_s = \frac{Q}{A} = \left(\frac{-\Delta P}{\mu} \right) \left(\frac{k}{\Delta x} \right)$$

$$V_s = \left(\frac{P_1 - P_2}{\mu} \right) \left(\frac{k}{\Delta x} \right)_{\text{cake}} = \left(\frac{P_2 - P_3}{\mu} \right) \left(\frac{k}{\Delta x} \right)_{\text{f.m.}}$$

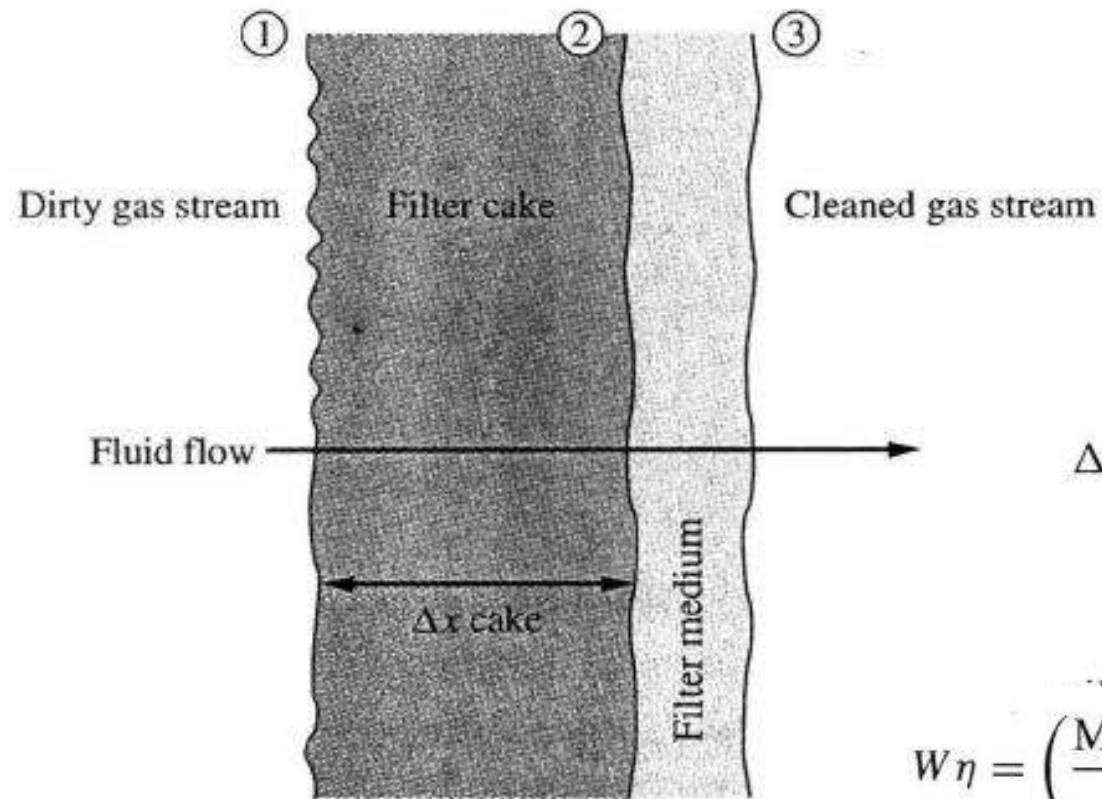
$$V_s = \frac{(P_1 - P_3)}{\mu [(\Delta x/k)_{\text{cake}} + (\Delta x/k)_{\text{f.m.}}]} = \frac{Q}{A_{\text{filter}}}$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{\text{cake}} &= \left(\frac{\text{Mass of cake}}{\text{Area}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{\text{cake}}} \right) \\ &= \left(\frac{1}{\rho_{\text{cake}}} \right) \left(\frac{\text{volume of gas}}{\text{area}} \right) \left(\frac{\text{mass of solids removed}}{\text{volume of gas}} \right) \end{aligned}$$

$$W\eta = \left(\frac{\text{Mass of solids removed}}{\text{Volume of gas}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{\text{cake}}} \right) = \frac{\text{volume of cake}}{\text{volume of gas processed}}$$

$$\Delta x_{\text{cake}} = \left(\frac{V}{A} \right) W \quad \text{and} \quad \frac{d(\Delta x_{\text{cake}})}{dt} = V_s W$$

$$V_s = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \left(\frac{dV}{dt} \right) = \frac{(P_1 - P_3)}{\mu [(VW/kA) + \alpha]}$$



Ej.: Una baghouse que tiene 6 compartimientos cada uno con 112 bags de 8 in de diámetro y 22 ft de largo, con un área activa de 46 ft² por bag. El flujo de gas es de 86240 ft³/min y la caída de presión a través de una bag limpia se estima en 0.5 in de H₂O. Las bags son operadas hasta una caída de presión de 3 in de H₂O, momento en el que salen de servicio para ser limpiadas, con una frecuencia de una vez por hora. El gas tiene una concentración de partículas de 13 grains/ft³. La eficiencia de recolección es de 99% y se estima que la torta de filtración tiene un 50% de sólido (de densidad 2 g/cm³) y el resto vacío. Estimar el espesor de la torta cuando sale fuera de servicio para limpiar y la permeabilidad de la torta.

Velocidad superficial (se consideran 5 compartimientos porque uno siempre está fuera de servicio)

$$V_s = \frac{Q}{A} = \frac{86\,240 \text{ ft}^3/\text{min}}{(5)(112)(46 \text{ ft}^2)} = 3.35 \frac{\text{ft}}{\text{min}} = 1.02 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$\begin{aligned} \frac{m}{A} &= cV_s\eta t = \left(13 \frac{\text{gr}}{\text{ft}^3}\right) \left(3.35 \frac{\text{ft}}{\text{min}}\right) (0.99) \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{h}}\right) \left(\frac{\text{lbm}}{7000 \text{ gr}}\right) \\ &= 0.369 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^2} = 1.80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Thickness} &= \frac{m/A}{\rho} \\ &= \frac{0.369 \text{ lbm/ft}^2}{(2 \text{ g/cm}^3)(0.5)(62.4 \text{ lbm} \cdot \text{cm}^3/\text{ft}^3 \cdot \text{g})} \\ &= 5.9 \times 10^{-3} \text{ ft} = 0.071 \text{ in.} = 1.8 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$V_s = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \left(\frac{dV}{dt}\right) = \frac{(P_1 - P_3)}{\mu[(VW/kA) + \alpha]}$$

Despreciando la resistencia de la tela

$$\alpha = 0,$$

$$\begin{aligned} k &= \frac{V_s \Delta x \mu}{(-\Delta P)} \\ &= \frac{(3.35 \text{ ft/min})(0.071 \text{ ft}/12 \text{ in.})(0.018 \text{ cp})(2.09 \times 10^{-5} \text{ lbf} \cdot \text{s}/\text{ft}^2 \cdot \text{cp})(\text{min}/60 \text{ s})}{(3 \text{ in. H}_2\text{O})(5.202 \text{ lbf}/\text{ft}^2 \cdot \text{in. H}_2\text{O})} \\ &= 7.96 \times 10^{-12} \text{ ft}^2 = 7.40 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

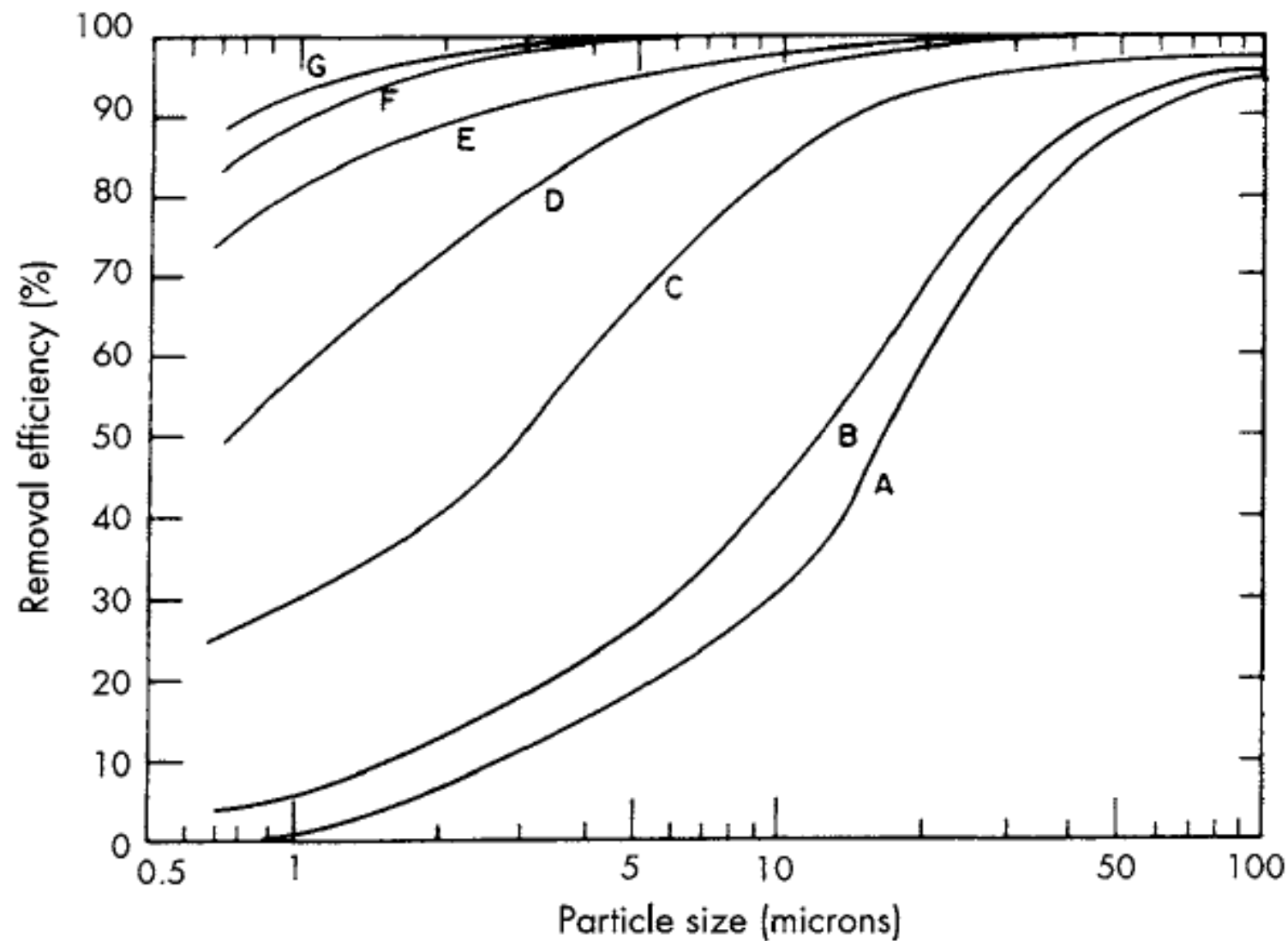
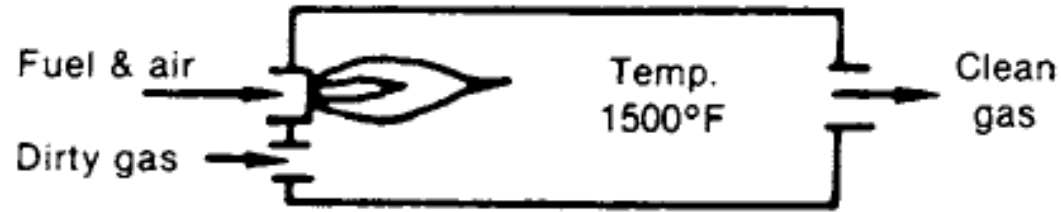
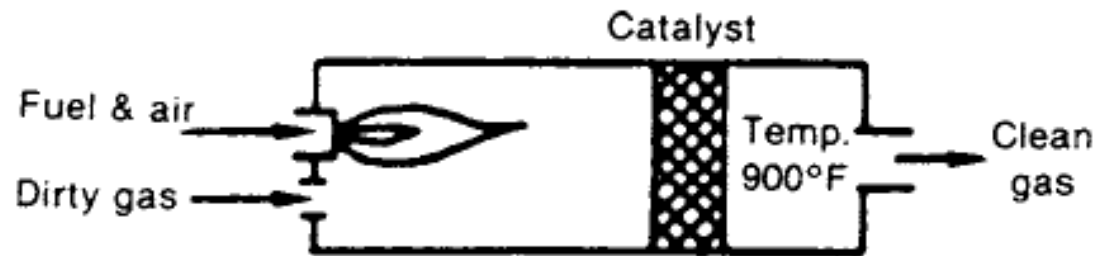


FIGURE 21-8. Comparison of removal efficiencies: (A) baffled settling chamber, (B) cyclone "off the shelf," (C) carefully designed cyclone, (D) electrostatic precipitator, (E) spray tower, (F) venturi scrubber, (G) bag filter

Incineración



Incineration



Catalytic Combustion

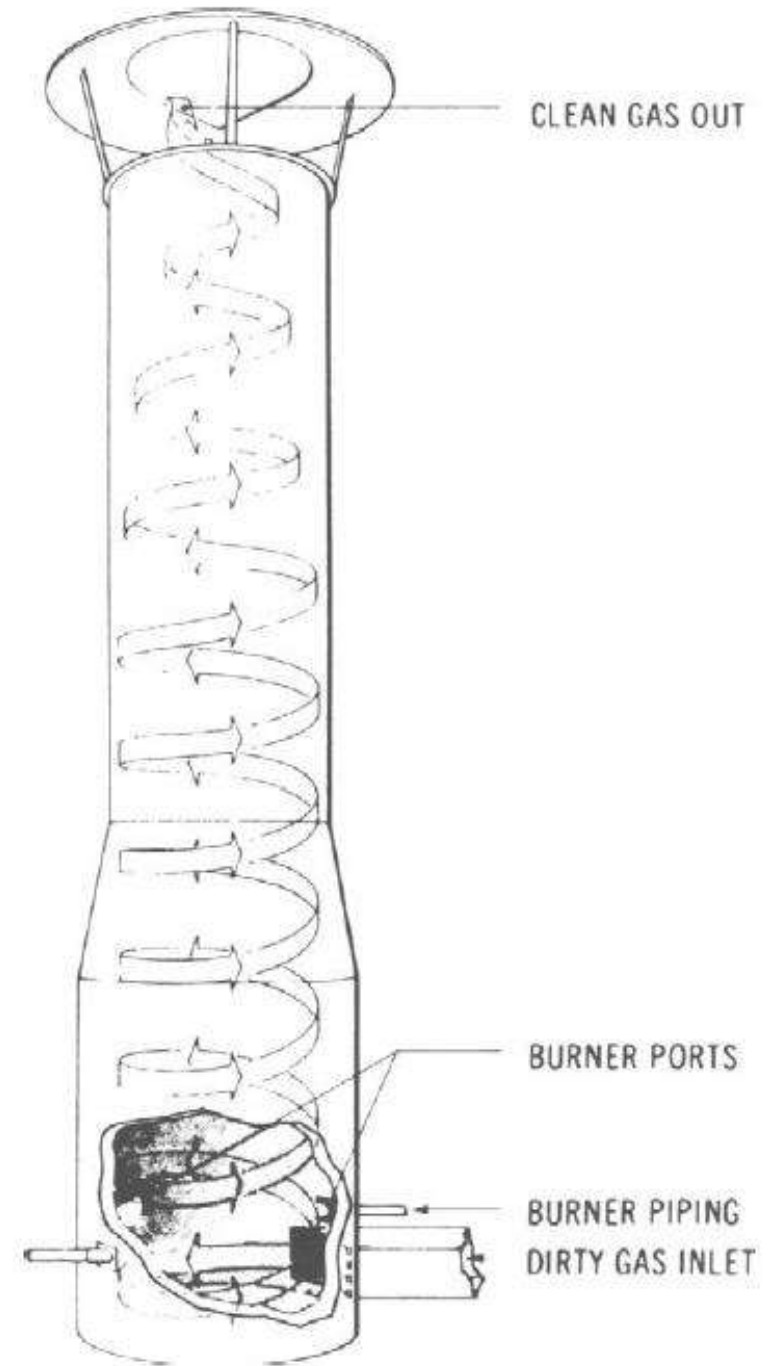


FIGURE 21-9
Incinerator for controlling gaseous pollutants [Courtesy the American Lung Association.]