

CÁLCULO DE LA EFICACIA TOTAL RECOGIDA EN LOS PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS. ESTADÍSTICA APLICADA A LA PRECIPITACIÓN.

C. Sans Rabellat *

Quaderns
d'enginyeria

3(1981)1 p.301-318

RESUMEN

En el diseño de un precipitador electrotáctico la determinación de la eficacia de recogida de las partículas de polvo constituye un capítulo importante para evaluar si la emisión de éstas, de un tamaño concreto, cumplen con las leyes establecidas.

El cálculo de la eficacia de recogida implica el conocimiento de la velocidad de migración de las partículas, la cual depende del mecanismo de carga y la distribución de tamaño de las mismas. Hasta ahora, sólo se ha tenido en cuenta la eficacia del precipitador para partículas grandes, gobernadas por el mecanismo de carga que depende del campo eléctrico; pero para las partículas finas (diámetros menores de $2 \mu\text{m}$) deben considerarse otros mecanismos de carga, como son el de difusión y el combinado.

El presente trabajo se ha estructurado de la siguiente forma: se inicia con el cálculo de la carga de las partículas según sea su mecanismo, a continuación se deducen las ecuaciones para la determinación de la velocidad de migración para de esta forma, hallar la eficacia de recogida correspondiente a cada diámetro de partícula. Seguidamente se presentan dos métodos, uno gráfico y otro analítico, mediante los cuales determinaremos la eficacia total de recogida y finalmente se introduce la aplicación de la estadística al proceso de precipitación electrostática. Como corolario del trabajo se ha considerado conveniente, para una mayor ilustración de todos estos conceptos, la aplicación a un caso particular.

SUMMARY

In designing an electrostatic precipitator, the overall collection efficiency of dust particles is an important subject for evaluating if its emission, of a definite size, fulfill the established laws.

Computing collection efficiency involves particles migration velocity knowledge, which depends on the charge and particle size distribution. Up to now, only the efficiency of the precipitator for large particles determined by the charging mechanism dependant of the electric field, has been considered; but for fine particles (diameters smaller than 2 microns), other charging mechanisms, as diffusion and combined, must be considered.

This work has been performed in the following way: It begins with the particles charge computing according to its mechanism, followed by the derivation of the particle migration velocity equations in order to know the respective collection efficiency for every diameter of particle. After this, two methods, graphic and analytic, are described for the overall collection efficiency and, finally, the application of statistics to the electrostatic precipitation is introduced. As a corollary of this work, it has been estimated suitable, for a wide illustration of all concepts, the application to a particular case.

1. INTRODUCCIÓN

En la década de 1980 la E.P.A. (Environmental Protection Agency) tiende a poner mayor énfasis en el control de las partículas menores de $15 \mu\text{m}$ y especialmente aquellas menores de $2 \mu\text{m}$, normalmente consideradas partículas finas [1].

Se ha comprobado que las partículas finas tienen efectos perjudiciales sobre la salud hu-

* Cátedra de Química II - Centre del Medi Ambient de la ETSIIUPB. Barcelona

mano, ya que, en contraste con los demás tipos de partículas, pueden pasar a través del sistema respiratorio y penetrar en el interior de los pulmones [2]. El manejo de sustancias tóxicas tales como ciertos sulfatos, sulfitos, nitratos y metales pesados

se emiten a la atmósfera en forma de partículas cuyo tamaño está comprendido dentro de las submicras.

Desde el punto de vista toxicológico, las partículas menores de $1 \mu\text{m}$ de diámetro tienen aún mayor importancia. Esto es debido a que la sangre humana puede extraer con elevado rendimiento (60-80%) esencias tóxicas de las partículas depositadas en la región pulmonar. En cambio la eficacia de extracción de las partículas grandes, las cuales se depositan en las regiones nasofaríngeas y traqueobronquial, es del 5-15%.

2. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

La carga y la velocidad de migración de las partículas son función de su diámetro; por tanto, la eficacia de recogida, bajo unas condiciones eléctricas dadas, dependerá así mismo de la distribución de su tamaño, la cual se representa normalmente mediante una curva logarítmica normal en que la proporción de partículas de un cierto tamaño se indica en función de la dimensión de ellas.

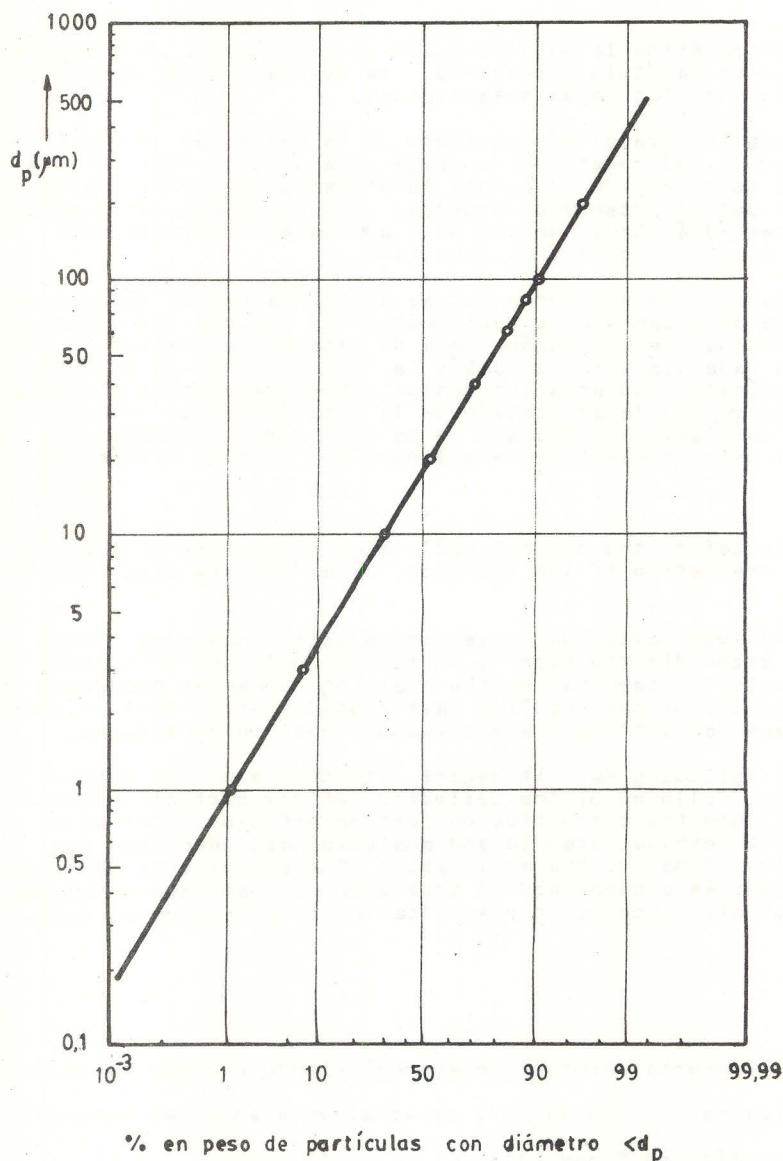


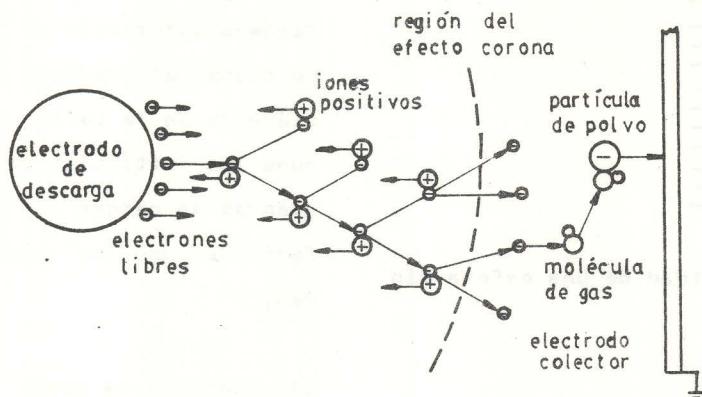
Fig. 1. Distribución del tamaño de partículas de cenizas volantes.

Como ejemplo, la figura 1 presenta una distribución típica del tamaño de las partículas producidas en las centrales térmicas que utilizan como combustible carbón pulverizado, presentando las cenizas volantes un 50% en peso

de partículas con un tamaño comprendido entre 0-20 μm .

3. MECANISMOS DE CARGA DE LAS PARTICULAS

Cuando los gases que transportan partículas en suspensión pasan a través del precipitador electrostático, la mayoría de las mismas adquieren una carga eléctrica de idéntica



polaridad que el electrodo de descarga. Esta carga ocurre preferencialmente en la región del efecto corona, esto es, la región donde se generan intensos pares iónicos, que está localizada alrededor del electrodo de descarga y que sólo ocupa una pequeña fracción de la sección total del precipitador. La figura 2 representa el proceso de generación del efecto corona.

Fig. 2. Proceso de generación del efecto corona.

Existen dos mecanismos responsables de la carga de las partículas que actúan en un precipitador electrostático: a) bombardeo de las partículas por iones bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado (carga dependiente del campo), y b) unión de las cargas iónicas a las partículas por difusión de los iones en concordancia con las leyes de la teoría cinética (carga por difusión).

3.1. Carga dependiente del campo

La presencia de partículas con una constante dieléctrica mayor que la unidad causan una deformación localizada en el campo eléctrico como se representa en la figura 3. Los iones negativos se mueven hacia el electrodo colector bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado, por lo que tienden aquellos a seguir las líneas del campo en la dirección del gradiente de máximo voltaje. Debido a que las líneas del campo intersección con las partículas, los iones chocarán con las mismas injicando una carga electrostática en la partícula, ver figura 4. Puesto que los iones continuarán chocando con las partículas, su carga aumentará hasta alcanzarse una carga de saturación, en la cual los iones adicionales serán rechazados. Una configuración del campo eléctrico en estas condiciones se representa en la figura 5.

La teoría electrostática del proceso muestra que el valor de saturación está relaciona

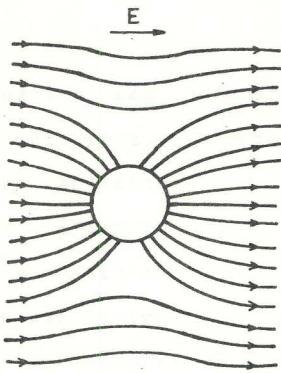


Fig. 3. Campo eléctrico en la proximidad de una esfera sin carga.

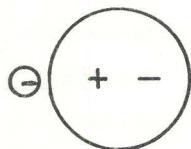


Fig. 4. Carga electrostática inducida en una partícula debido a la proximidad de un ión.

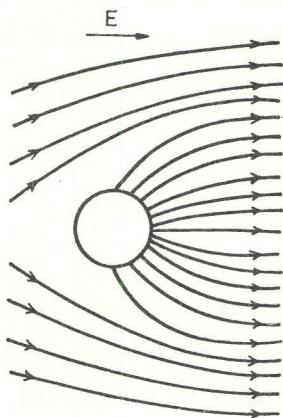


Fig. 5. Campo eléctrico en la proximidad de una esfera cargada en un campo de carga de saturación.

do con la magnitud del campo eléctrico en la región donde la carga tiene lugar, con el tamaño y la constante dielectrica de las partículas. La carga de saturación es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula, pues las partículas más grandes se cargan con más facilidad que las pequeñas.

El mecanismo de carga dependiente del campo predominante en las partículas con diámetro mayor de $1.0 \mu\text{m}$.

La carga de las partículas adquirida en este proceso fue calculada por Pauthenier y Moreau-Hanot [4] mediante las siguientes ecuaciones:

$$q = q_{\max} \frac{t}{t + \tau} \quad (1)$$

donde

$$\tau = \frac{4 \epsilon_0}{N_0 \pi b}$$

$$q_{\max} = 4 \pi p a^2 \epsilon_0 \epsilon$$

$$p = 2 \left[\frac{k - 1}{k + 2} \right] + 1 = \frac{3k}{k + 2}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (1) resulta

$$q = 4\pi\epsilon_0 p a^2 E_0 \frac{t}{t + \frac{4\epsilon_0}{N_0 e b}} \quad (2)$$

Puede efectuarse algunas simplificaciones de la ecuación (2), Veamos:

1) Para partículas con alta constante dieléctrica κ , $\kappa/\kappa+2$ tiende a la unidad y la ecuación (2) se transforma en

$$q = 12\pi\epsilon_0 a^2 E_0 \frac{t}{t + \frac{4}{N_0 e b}} \quad (3)$$

2) El tiempo de residencia de una partícula es función del tamaño de la misma ($\tau = 1,23 \cdot 10^{-5} a^2$) y para partículas pequeñas el cociente τ/t tiende a cero [5] y la ecuación (2) se convierte en

$$q = 4\pi\epsilon_0 p a^2 E_0 \quad (4)$$

3) Para partículas pequeñas y con alta constante dieléctrica la ecuación (2) se transforma en $q = 12\pi\epsilon_0 a^2 E_0$ (5)

3.2. Carga por difusión

La carga por difusión resulta de las colisiones entre los iones con las partículas debido al movimiento térmico de los iones. Si estos iones son retenidos por las partículas de polvo, aquellos inducen en éstas una carga eléctrica. Los estudios teóricos del mecanismo de carga por difusión se han realizado con la hipótesis de que dicho mecanismo es independiente del campo eléctrico. El campo de aplicación de este proceso de carga predomina en las partículas con un diámetro menor de $0.2 \mu\text{m}$.

Ecuaciones para el cálculo de la carga por difusión.

Pauthenier [6] considera dos casos:

1) $E_0 = 0$ y para partículas inicialmente sin carga

$$q = \frac{4\pi\epsilon_0 a KT}{e} \ln \left[\frac{a N_0 e^2 \bar{v}}{4\pi\epsilon_0 KT} t + 1 \right] \quad (6)$$

2) $E_0 > 0$ y para una partícula conductora

$$q = \frac{4\pi\epsilon_0 a KT}{e} \ln \left[\frac{(8\pi)^{1/2}}{3} \frac{a N_0 e^2 \bar{v}}{4\pi\epsilon_0 KT} \frac{\sinh(E_0 ea/KT)}{E_0 ea/KT} t + 1 \right] \quad (7)$$

Para partículas finas el cociente $\sinh(E_0 ea/KT)/(E_0 ea/KT)$ tiende a la unidad y la ecuación (7) resulta

$$q = \frac{4\pi\epsilon_0 a k T}{e} \ln \left[\frac{(8\pi)^{1/2}}{3} \frac{a N_0 e^2 \bar{v}}{4\pi\epsilon_0 k T} t + 1 \right] \quad (8)$$

La velocidad térmica promedio de los iones puede calcularse mediante la expresión [20]:

$$\bar{v} = (3 p_g / \rho g)^{1/2}$$

3.3 Mecanismo combinado de carga por difusión y carga dependiente del campo

Cuando el tamaño de las partículas se encuentra en un campo intermedio ($0.2 \mu m < dp < 1.0 \mu m$) ambos mecanismos contribuyen al proceso de carga por lo que deben considerarse simultáneamente. El método de cálculo de la carga consiste en determinar primero la relación de carga para cada mecanismo y obtener posteriormente la del conjunto. Este procedimiento conduce a una ecuación diferencial no lineal cuya solución analítica no ha sido todavía hallada.

Liu-Yeh [7] considera para el proceso de carga las condiciones:

1) La carga de las partículas es menor que la carga de saturación debido al campo,

$$q < q_s$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{N_0 e b q_s}{4\epsilon_0} \left[1 - \frac{q}{q_s} \right]^2 + \frac{C^* \pi N_0 a^2 e}{2} \exp \left[\frac{q}{q_s} \right] \quad (9)$$

$$\text{y 2)} q > q_s$$

$$\frac{dq}{dt} = (\pi a^2 N_0 C^* e) \exp \left[-\frac{e \Delta V}{kT} \right] \quad (10)$$

$$\text{siendo } \Delta V = V_a - V_o$$

Gaoch y Francis [8] expresan la carga de las partículas suponiendo que ambos mecanismos son independientes mediante la ecuación diferencial

$$\frac{dq}{dt} = \frac{N_0 e b q_s}{4\epsilon_0} \left[1 - \frac{q}{q_s} \right]^2 + a^2 \pi N_0 e \bar{v} \exp \left[\frac{q e}{4\pi\epsilon_0 a k T} \right] \quad (11)$$

Cochet [9,10] determina la siguiente ecuación que concuerda con los datos experimentales

$$q = \left[\left(1 + \frac{\lambda}{a} \right)^2 + \frac{2}{1 + (\lambda/a)} \right] \frac{k - 1}{k + 2} 4 \pi \epsilon_0 E_0 a^2 \frac{t}{t + \tau} \quad (12)$$

4. VELOCIDAD DE MIGRACION DE LAS PARTICULAS

Una partícula cargada, suspenida en un gas y sometida a la influencia de un campo eléctrico está gobernada por la Ley de Newton de la mecánica clásica.

Las cuatro fuerzas principales que actúan sobre una partícula en un precipitador electrostático se representan en la figura 5 y son las siguientes:

$$1. \text{ Fuerza gravitacional : } F_g = m g$$

$$2. \text{ Fuerza eléctrica : } F_e = q E_0$$

$$3. \text{ Fuerza viscosa: } F_\mu = 6\pi a \mu w$$

$$4. \text{ Fuerza inercia: } F_i = m dw/dt$$

Si consideramos la partícula suspendida en un sistema estacionario y en un sistema de coordenadas como el de la figura 6, aplicando las leyes de la mecánica resulta:

$$\sum F_x = F_e(x) - F_\mu(x) - F_i(x) = 0$$

$$\sum F_y = F_g - F_i(y) - F_\mu(y) = 0$$

$$\sum F_z = 0$$

En la dirección x se obtiene la siguiente ecuación diferencial con coeficientes constantes

$$\frac{dw}{dt} + \frac{6\pi a \mu w}{m} = \left(\frac{q}{m} \right) E_0 \quad (13)$$

La solución es del tipo

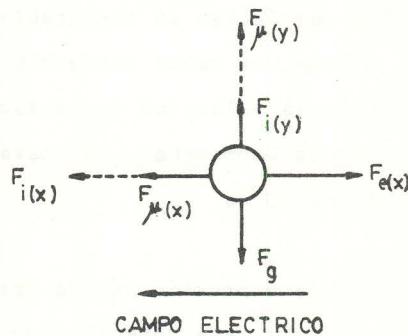


Fig. 6. Diagrama de fuerzas que actúan sobre una partícula cargada negativamente en un precipitador electrostático.

$$w = \frac{q E_p}{6 \pi a \mu} \left[1 - \exp (-6 \pi a \mu t/m) \right] \quad (14)$$

Si despreciamos la parte exponencial de (14) lo cual equivale a no tener en cuenta las fuerzas de aceleración, llegamos a

$$w = \frac{q E_p}{6 \pi a \mu} \quad (15)$$

Si el tamaño de las partículas es comparable con el recorrido libre medio (λ) de las moléculas del gas, existe una mayor tendencia de las mismas a deslizar entre tales moléculas y la expresión de la velocidad de migración se obtendrá ahora teniendo en cuenta el factor de corrección de Cunningham [11] para cada diámetro de partícula (Ver tabla 1), de modo que $w = C q E_p / 6 a$

La ecuación (15) es una expresión válida para el cálculo de la velocidad de migración para partículas finas. Para cada mecanismo de carga se obtendrán distintas velocidades de migración. (Ver tabla 2).

5. EFICACIA DE RECOGIDA

5.1. Ecuación de Deutsch-Anderson

La ecuación para calcular la eficacia de recogida de un precipitador electrostático fue descubierta experimentalmente por Anderson [12]. Por su parte Deutsch [13] encuentra una ecuación similar a partir de consideraciones teóricas y White [14] halla una expresión idéntica basada en la probabilidad de recogida para una partícula. La ecuación es de la forma:

$$\eta = 1 - \exp \left[- \left(\frac{A}{Q} \right) w \right] \quad (23)$$

La eficacia de recogida viene afectada por el tamaño de las partículas. Esta característica permite introducir el concepto de eficacia fracional [15], esto es, la eficacia sobre un campo dado de distribución de tamaño de partículas las cuales son recogidas dentro de dicho campo.

El desarrollo de la ecuación (23) se ha basado en las siguientes hipótesis:

- a) la concentración de las partículas es uniforme a lo largo del precipitador.
- b) las partículas se cargan instantáneamente.

d_p (μm)	C
0,01	22,218
0,05	4,969
0,1	2,866
0,2	1,869
0,3	1,561
0,4	1,415
0,5	1,330
0,6	1,274
0,8	1,205
1,0	1,164
1,5	1,109
2,0	1,082
3,0	1,055
4,0	1,041
5,0	1,033
10,0	1,016
15,0	1,011
20,0	1,008

TABLA 1

Factor de corrección de Cunningham (C) para partículas en aire ambiente a 21°C, 1 atm y $\lambda = 6,53 \cdot 10^{-8} \text{ m}$.

$$C = 1 + \left[1,257 + 0,04 \exp \left(-1,1 \frac{d_p}{2\lambda} \right) \right] \frac{2\lambda}{d_p}$$

TAMÀR DE LA PARTÍCULA	MECANISMO DE CARGA	VELOCIDAD DE MIGRACIÓN
$d_p < 0,2 \mu\text{m}$	DIFUSIÓN	<p>1) $E_0 = 0$ $w = C \cdot \frac{2 \epsilon_0 K T E_p}{3 \epsilon \mu} \ln \left[\frac{a \cdot N_a e^k \bar{v}}{4 \pi \epsilon_0 K T} t + 1 \right]$ (16)</p> <p>2) $E_0 > 0$ y partículas fijas $w = C \cdot \frac{2 \epsilon_0 K T E_p}{3 \epsilon \mu} \ln \left[\frac{(4n)^{\frac{1}{k}}}{3} \frac{a N_a e^k \bar{v}}{4 \pi \epsilon_0 K T} t + 1 \right]$ (17)</p>
$0,2 \mu\text{m} < d_p < 1,0 \mu\text{m}$	COMBINADO	$w = C \cdot \frac{2 \epsilon_0 E_0 E_p a}{3 \mu} \frac{t}{t+2} \left[\left(1 + \frac{1}{a} \right)^2 + \frac{2}{f + (1/a)} \frac{k-1}{k+2} \right]$ (18)
$d_p > 1,0 \mu\text{m}$	CAMPÒ	<p>$w = C \cdot \frac{2 \epsilon_0 p a E_0 E_p}{3 \mu} \frac{t}{t + \frac{4 \epsilon_0}{N_a e b}}$ (19)</p> <p>1) $\frac{k}{k+2} \rightarrow 1$ $w = C \cdot \frac{2 \epsilon_0 a E_0 E_p}{\mu} \frac{t}{t + \frac{4 \epsilon_0}{N_a e b}}$ (20)</p> <p>2) $\epsilon/t \rightarrow 0$ $w = C \cdot \frac{2 \epsilon_0 p a E_0 E_p}{3 \mu}$ (21)</p> <p>3) $\frac{k}{k+2} \rightarrow 1$ y $\epsilon/t \rightarrow 0$ $w = C \cdot \frac{2 \epsilon_0 a E_0 E_p}{\mu}$ (22)</p>

TABLA 2

Ecuaciones para el cálculo de la velocidad de migración de las partículas en función del mecanismo de carga.

c) no existen ni pérdidas ni reintroducción de partículas

6. EFICACIA TOTAL DE RECOGIDA

Los métodos para la predicción de la eficacia total de recogida dependen sobre todo del conocimiento de la distribución del tamaño de las partículas, y también de los parámetros de operación del sistema de eliminación empleado.

Es posible producir con razonable exactitud la eficacia total de recogida en un precipitador electrostático, mediante la utilización de dos métodos: el primero basado en la integración gráfica de la curva de eficacias en función del diámetro de las partículas [16] y el segundo que consiste en la aplicación de la eficacia fraccional. Veamos cada uno de ellos:

1. Integración gráfica.

La teoría básica proviene de la ecuación

$$\eta_t = 1 - \int_0^\infty K' f(d_p) dd_p \quad (24)$$

donde K' es una constante.

Para un tamaño concreto de partículas — por ejemplo $0 \leq d_p \leq 2 \mu\text{m}$, la ecuación (24) se convierte en

$$\eta_{0-2\mu\text{m}} = 1 - \int_0^2 K' f(d_p) dd_p \quad (25)$$

la solución de la integral exige la integración gráfica de la función.

2. Eficacia Fraccional.

Este método para el cálculo de η_t deriva de la aplicación directa de la ecuación de Deutsch-Anderson para cada tamaño de partícula

$$\eta_t = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sum x_i} \exp \left[- \left(\frac{A}{Q} \right)^{w_i} \right] \quad (26)$$

siendo x_i y w_i la fracción en peso y la velocidad de migración, respectivamente, de las partículas comprendidas en el tamaño i .

7. ESTADISTICA APLICADA A LA PRECIPITACION

El diseño de precipitadores electrostáticos industriales presenta dos requisitos conflictivos: minimizar los altos costes del capital y simultáneamente predecir las dimensiones del precipitador introduciendo factores de seguridad para asegurar con suficiente garantía la eficacia deseada. Considerando útiles los datos de los precipitadores de tipo similar en funcionamiento, el diseño de un nuevo precipitador no sólo se deberá basar en dicha información, sino que se verificará por métodos estadísticos. Una forma sistemática de aplicar estos métodos ha sido descrita por la suya [17].

El método supone que son conocidas las velocidades de migración efectivas \bar{w} , obtenidas empíricamente para cada tipo particular de partículas, a un grupo de 30 o más precipitadores de similares características y condiciones de operación y que, así mismo, estas velocidades siguen una distribución normal, con un valor medio \bar{w} y una desviación standard $\sigma \leq \bar{w}/3$.

Dejando a que las velocidades de migración varían de una instalación a otra y además con el tiempo en la misma instalación es imposible fijar el tamaño de un nuevo precipitador con exactitud, lo que si podemos es conocer la probabilidad $P(\eta \leq P \leq 1)$ en que η sea superior o igual a un valor especificado η_0 ($\eta \geq \eta_0$). Los resultados de este método han sido resumidos por medio de una representación gráfica de las variables adimensionales P , B y $A^* \sigma / Q$ donde

$$B = (1 - \eta_0) \exp(A \bar{w} / Q) \quad (27)$$

$$A^* \sigma / Q = A \sigma / Q \quad (28)$$

La figura 7 presenta las curvas de diseño correspondientes a este método.

Si el tamaño de la muestra es menor que 30, no se puede emplear la aproximación gráfica de la figura 7. En tales casos será necesario aplicar directamente las ecuaciones dadas en la bibliografía [17].

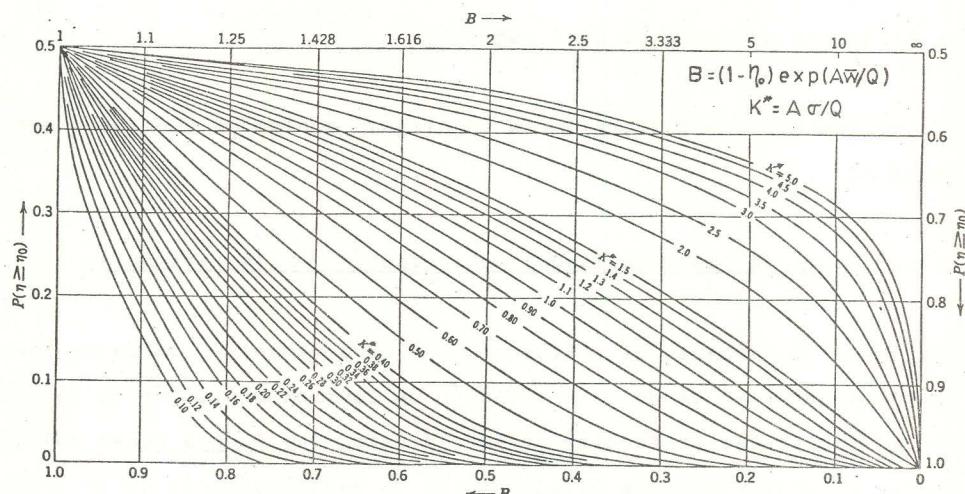


Figura 7. Gráfica para el diseño estadístico de los precipitadores electrostáticos.

La utilización normal consiste en fijar un valor de A/Q conociendo \bar{w} , y σ de otros precipitadores electrostáticos que operan con el mismo tipo de partículas y similares con-

diciones de funcionamiento. El problema se centra en diseñar un nuevo precipitador de la misma clase con una probabilidad P que garantiza una eficacia η . Aplicando las ecuaciones (27) y (28) se halla el valor de B y K^* , que introducidos en la figura 7 nos determinan gráficamente el valor de P . Si dicho valor no coincide con el valor prefijado anteriormente, se debe tomar otro valor de A/Q hasta que satisfaga las condiciones impuestas inicialmente.

8. APLICACION A UN CASO PARTICULAR

Consideremos un precipitador electrostático de placas con una superficie total de redonda de 10.000 m^2 , el cual debe tratar un caudal de $20.000 \text{ m}^3/\text{min}$ de gases a 150°C de temperatura y $1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ de presión, cargados de cenizas volantes cuya distribución del tamaño de las partículas es la representada en la figura 2. Supóngase las siguientes condiciones:

1. El campo eléctrico de carga y el de precipitación son respectivamente de $5 \cdot 10^5$ y $3 \cdot 10^5 \text{ V/m}$ [19].
2. La constante dieléctrica de las partículas es infinita.
3. La concentración de iones N_0 , es de $10^{14} \text{ iones/m}^3$ [19].
4. El tiempo de carga es de 1 segundo.
5. Los factores de corrección de Cunningham empleados son los que se representan en la tabla 1.

8.1. Cálculo de las velocidades de migración de las partículas

Una forma de comparar la influencia que cada mecanismo de carga tiene sobre la velocidad de migración y su campo de aplicación es la representación de la velocidad de migración de las partículas en función de su diámetro, ver figura 8. Las velocidades de migración se han obtenido mediante la aplicación de las ecuaciones 17, 18 y 22 (ver tabla 2) correspondientes a los mecanismos de carga por difusión, combinado y por campo respectivamente. De la observación de dicha figura extraemos la conclusión de que los intervalos de actuación de los mecanismos de carga coinciden con la teoría expuesta anteriormente.

8.2. Cálculo de la eficacia de recogida para cada tamaño de partícula

La figura 9 es el resultado obtenido de la aplicación de la ecuación de Deutsch-Anderson

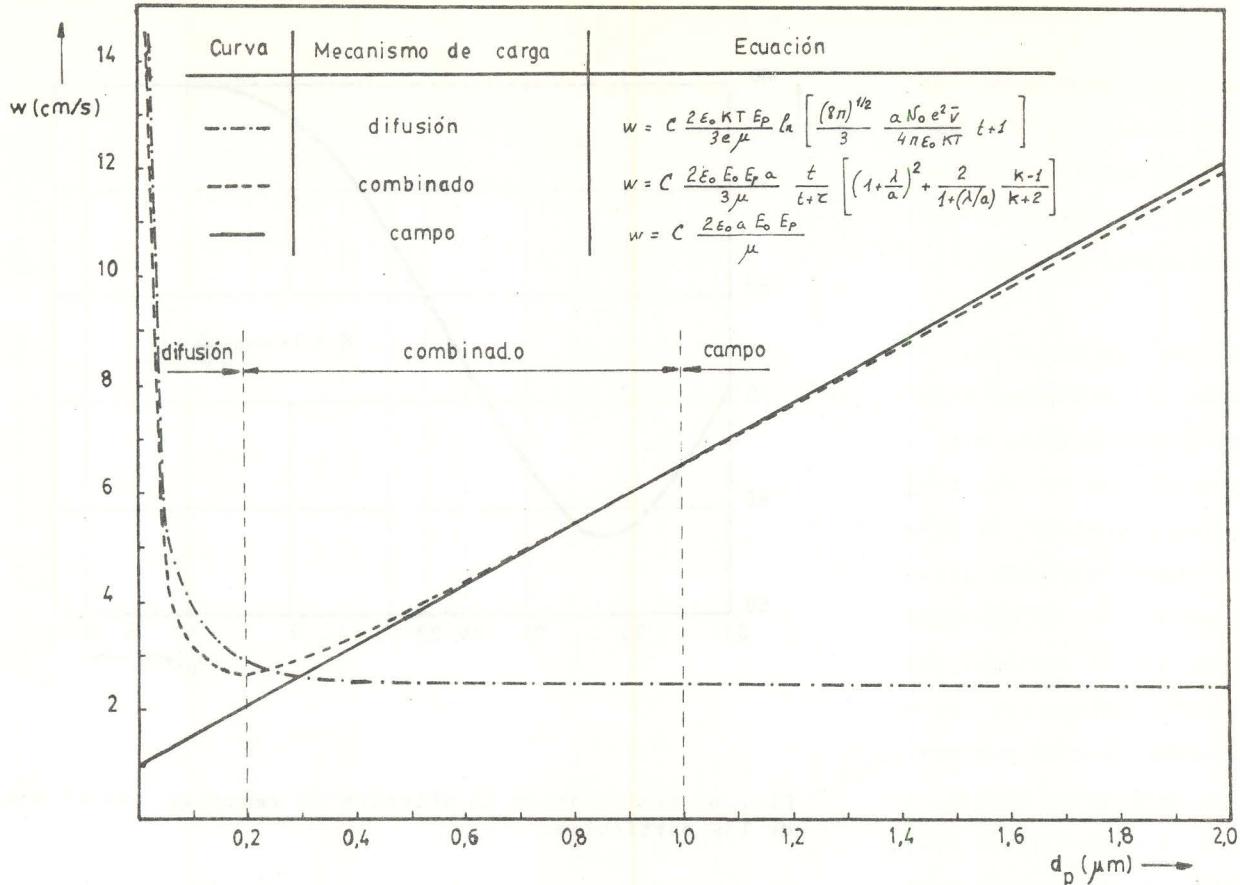


Fig. 8. Velocidad de migración de las partículas en función del mecanismo de carga y de su diámetro.

(23) para cada tamaño de partícula. deduciéndose de ella que la eficacia presenta un mínimo para un diámetro de $0,25 \mu\text{m}$, correspondiente al punto de intersección de las curvas de las velocidades de migración, una debido al mecanismo de carga por difusión y la otra al efecto combinado. A partir de dicho punto la velocidad de migración aumenta, y por tanto aumenta la eficacia de colección de las partículas finas.

Las eficacias obtenidas son mayores que las que se presentan en la realidad, ya que se despreciado fenómenos importantes que actúan en el precipitador como son la reintroducción de partículas, fenómenos de turbulencia, efectos de la temperatura, presión y composición de los gases, resistividad de las partículas, etc.

8.2. Cálculo de la eficacia de recogida para cada tamaño de partícula.

El empleo práctico de los dos métodos expuestos anteriormente para la predicción de la eficacia total de recogida en los precipitadores electrostáticos se utiliza en este caso particular. La figura 10 es el resultado obtenido de la aplicación del método de la integración gráfica dentro del tamaño de las partículas finas, resultando una eficacia total del 86%.

El método de la eficacia fraccional exige la aplicación de la ecuación de Deusth-Ander →

son para cada tamaño de partícula comprendidas dentro del campo de interés. ver tabla 3. obteniéndose $\eta_t = 88\%$.

Si las normas de emisión de artículos a la atmósfera exigen, por ejemplo, un 80% de partículas recogidas, el precipitador diseñado anteriormente no es adecuado pues sus dimensiones son insuficientes. Por tanto será preciso revisar los parámetros empleados, o añadir algún sistema de eliminación para recoger las partículas que no han podido ser captadas y de esta forma conseguir la emisión necesaria que cumpla con las normas establecidas.

3.4. Aplicación de la estadística a la precipitación

A partir de la tabla 3, conociendo las velocidades de migración de las partículas finas en cada intervalo de tamaños y su frecuencia es fácil hallar la velocidad de migración promedio \bar{w} y la desviación tipo s , resultando ser $\bar{w} = 7,2 \text{ cm/s}$

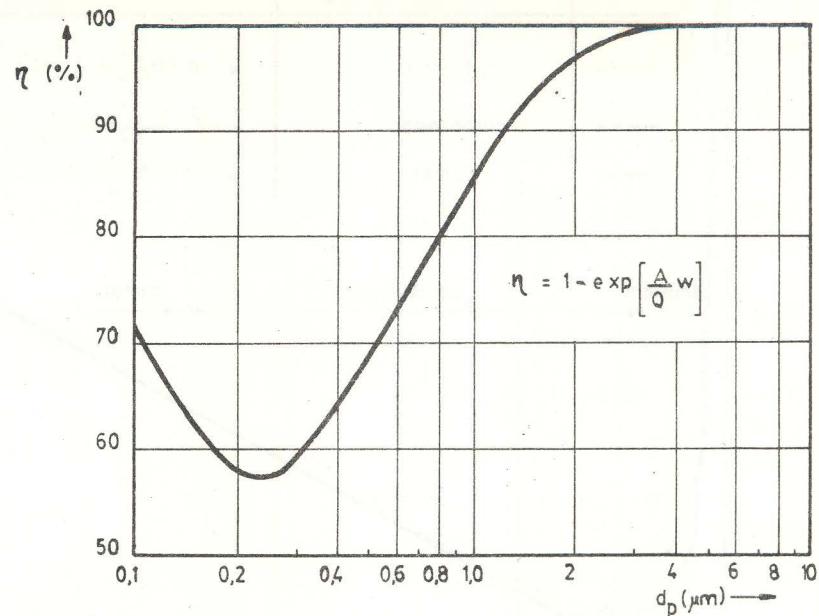


Fig. 9. Variación de la eficacia de recogida con el tamaño de las partículas.

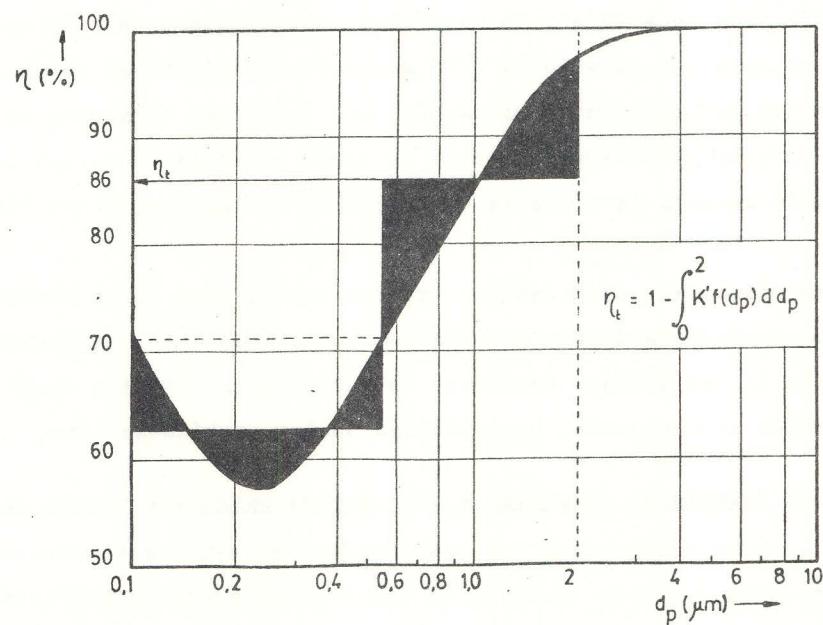


Fig. 10. Determinación de la eficacia total de recogida mediante la aplicación del método de la integración gráfica.

y $\sigma = 2,13$ cm/s. Como que en este caso se cumple la condición necesaria para aplicar la estadística al proceso de precipitación electrostática ($\bar{w} < \sigma/3$) y suponiendo que si los valores corresponden con las autorizadas o otras recibidas en similares condiciones, sólo resta calcular las variaciones y a partir de las ecuaciones 27 y 28 respectivamente introducirlas en la figura 7 para hallar el valor de la probabilidad P cuando sea la eficacia η dada. En la figura 11 se representa la variación de P en función de η .

CONCLUSIONES

El procedimiento para determinar la eficacia de recogida para partículas finas a partir del tamaño de las mismas y su tránsito de carga se expone en este trabajo de forma sencilla y resumida. Se tiene en cuenta la gran variedad de parámetros que intervienen en su cálculo. Se ha omitido la justificación de muchas de las fórmulas, las cuales pueden consultarse en los artículos incluidos en la bibliografía, pero se ha intentado dar las hipótesis de partida de las ecuaciones más importantes para de esta forma poder apreciar la influencia de los parámetros que no se han tenido en cuenta. Mientras que la técnica de la integración gráfica es un método muy simple, para predecir la eficacia total de recogida esencialmente de las partículas finas el presentado aquí debe considerarse como un método aproximado. Para garantizar una mayor confianza en el resultado debe aumentarse la precisión de la distribución del tamaño de las partículas y de los parámetros de operación del precipitador. El método de la integración gráfica produce una primera buena aproximación para el dimensionamiento y para el proceso de modificación de los equipos de eliminación de las partículas. A su vez, la aplicación del método de la eficacia frac-

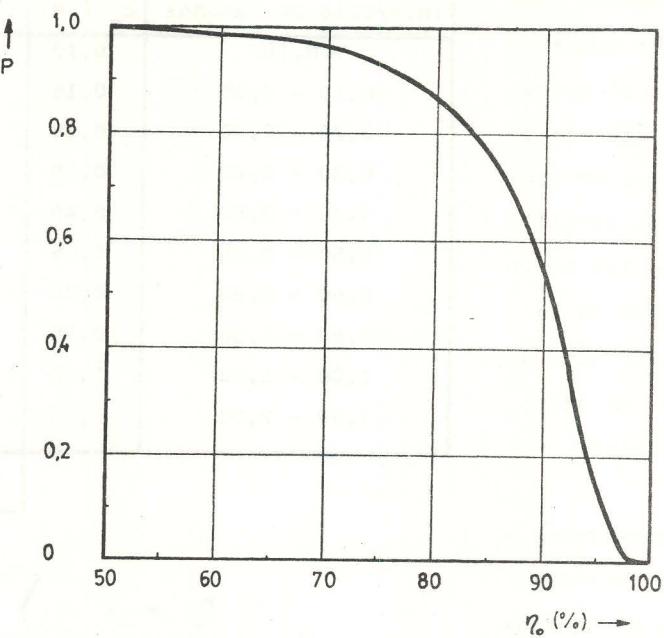


Fig. 11. Variación de la probabilidad P en la que la eficacia η sea superior o igual a un valor especificado η_0 ($\eta \geq \eta_0$).

cional ofrece un resultado mucho más exacto, pese a tener que aumentar el proceso de cálculo y sin olvidar los errores cometidos en las estimaciones de la distribución del tamaño de las partículas.

Intervalo de tamaños	d_p (μm)	x_i (%)	w_i (cm/s)	$x_i e^{-Aw_i/Q}$
<0,10	0,10	0,25	4,12	0,073
0,10 - 0,20	0,15	0,25	3,26	0,094
0,20 - 0,30	0,25	1,00	2,79	0,433
0,30 - 0,40	0,35	1,75	3,24	0,662
0,40 - 0,50	0,45	2,25	3,70	0,802
0,50 - 0,60	0,55	3,25	4,19	0,924
0,60 - 0,80	0,70	8,75	4,98	1,964
0,80 - 1,00	0,90	7,50	5,96	1,254
1,00 - 1,50	1,25	50,00	7,89	4,689
1,50 - 2,00	1,75	25,00	10,69	1,012
		100,00		11,907

Los conocimientos adquiridos sobre el funcionamiento de otros precipitadores electros estáticos del mismo tipo que operan en similares condiciones, inducen al empleo de métodos estadísticos, con lo que se acumulan una serie de datos complementarios para el diseño del precipitador.

$$\eta_t = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sum x_i} e^{-Aw_i/Q} = 88,1\%$$

TABLA 3

Determinación de la eficacia total de recogida a partir de la ecuación (26).

REFERENCIAS

1. A.J. Buonicore, Chem. Eng., June 30, 81-101 (1980)
2. M.O. Amdur, M. Corn, Amer. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 24, July-Aug., 326-333 (1963)
3. R.B. Engdahl, Stationary Sources, "Air Pollution", Vol. III, A.C. Stern, Academic Press, New York (1968)
4. M. Pauthenier, M. Moreau-Hanot J. Phys. Rad., 3, 590 (1932).
5. S. Oglesby, G.B. Nichols, "Electrostatic Precipitation", Marcel Dekker New York (1978).
6. M. Pauthenier, Compt. Rend., 240, 1610 (1955).
7. B.Y.H. Liu, H.C. Yeh, J. Appl. Phys., 39, 1396 (1968)
8. J.P. Gooch, N.L. Francis, J. Air Pollut. Control Assoc., 25, 108 (1975)
9. R. Cochet, Compt. Rend., 247, 343 (1956).

10. R. Cochet, Collq. Intern. Centre Natl. Rech. Sci (Paris), 102, 331(1961).
11. E. Cunningham, Proc. R. Soc. London Ser. A., 83, 357 (1910).
12. E. Anderson, Trans. Amer. Inst. Chem. Eng., 16, 69 (1924).
13. W. Deutsch, Ann. Phys., (Leipzig), (4), 68, 335 (1922).
14. H.J. White, "Industrial Electrostatic Precipitation", Addison-Wesley, Reading, Mass. (1963).
15. P.W. Spaita, J.O. Burckle, Selection Evaluation, and Application of Control Devices, "Air Pollution", Vol. IV, Academic Press, New York (1977)
16. J.M. Peters, Chem. Eng., April 16, 99-102 (1973).
17. S. Masuda, Staub, 26 (11), 6 (1966).
18. "Air pollution Engineering Manual", USPHS Manual 999-AP-40, U.S. Public Health Service, Cincinnati (1967).
19. E.T. Mignett, Proc. Inst. Elect. Engrs., 114, 1325 (1967).
20. M. Robinson, Electrostatic Precipitation, "Air Pollution Control", Part I. W. Strauss Interscience New York (1971).

NOTA ENCLATURA

A	superficie total de recogida, m^2
a	radio de la partícula, m
B	variable, adimensional
b	mobilitad iónica, $m^2/V \cdot s$
C	factor de corrección de Cunningham, adimensional
c*	velocidad efectiva de los iones, m/s
d _p	diámetro de la partícula, m
E _o	campo eléctrico de carga, V/m
E _p	campo eléctrico de precipitación, V/m
e	carga electrónica C
K	constante de Boltzman, J/K
k*	variable adimensional
k	constante dieléctrica relativa de la partícula, adimensional
m	masa de la partícula, kg
N _o	concentración iónica, iones/ m^3
P	parámetro, adimensional
P _g	presión del gas, N/m ²
Q	caudal, m^3/s
q	carga de la partícula, C
q _s	carga de saturación, C
T	temperatura, °K

t	tiempo de carga, s
V_a	potencial en la superficie de la partícula, V
V_o	potencial mínimo en la cercanía de la partícula debido a la oposición del propio campo y el campo aplicado, V
\bar{v}	velocidad térmica promedio de los iones, m/s
v_0	velocidad del gas, m/s
w	velocidad de migración de la partícula, m/s
\bar{w}	velocidad de migración promedio de las partículas, m/s
w_e	velocidad de migración efectiva, m/s
w_i	velocidad de migración de las partículas de tamaño i, m/s
x_i	fracción en peso de partículas de tamaño i, %
ϵ_0	permeabilidad en el vacío, F/m
η	eficacia de recogida adimensional
η_t	eficacia total de recogida adimensional
λ	recorrido libre medio de los iones, m
μ	viscosidad del gas decapósies
ρ_g	densidad del gas, kg/m ³
σ	desviación tipo de la velocidad de migración efectiva, m/s
τ	tiempo de residencia de las partículas s.