

Introducción a la filtración de aerosoles(*)

M. Alonso* y F.J. Alguacil**

| | |
|-----------------------|--|
| Resumen | El presente artículo es una revisión bibliográfica introductoria sobre la filtración de partículas líquidas o sólidas suspendidas en un gas (aerosol). La filtración es, posiblemente, el método más utilizado en la eliminación de partículas de corrientes gaseosas. Tras una breve historia de la filtración de aerosoles, se discuten los principales mecanismos de filtración (difusión <i>browniana</i> , interceptación, impacto inercial y captura electrostática) y, finalmente, los equipos más importantes de filtración de partículas, esto es, filtros de fibras, filtros de lechos granulares y filtros de mangas. |
| Palabras clave | Filtración. Aerosoles. Filtro de fibras. Filtro de lecho granular. Filtro de mangas. |

An introduction to aerosol filtration

| | |
|-----------------|--|
| Abstract | This review presents an introduction to the filtration of liquid or solid particles suspended in a gas medium (aerosol). Filtration is probably the most widely used technique for particle elimination from gas streams. After a brief history of aerosol filtration, the most important filtration mechanisms (Brownian diffusion, interception, inertial impaction, and electrostatic capture) are discussed. Most of this review is devoted to the description and design equations of the principal aerosol collection equipments, namely, fibrous filters, granular bed filters and industrial fabric filters. |
| Keywords | Filtration. Aerosols. Fibrous filter. Granular bed filter. Industrial fabric filter. |

1. INTRODUCCION

La presencia de partículas, líquidas o sólidas, en suspensión en la atmósfera puede plantear serios problemas, tanto al medio ambiente como a los seres vivos. Los, así llamados, aerosoles naturales presentan, salvo excepciones, escaso riesgo para la salud de los seres vivos. Entre ellos, podemos destacar los humos procedentes de erupciones volcánicas e incendios forestales no provocados por el hombre, las arenas y polvos transportados por el viento en zonas áridas y desiertos y los compuestos orgánicos volátiles procedentes de la vegetación, *v.g.*, terpenos (compuestos aromáticos policíclicos emitidos por los pinos). No obstante, exceptuando el caso de las emisiones volcánicas, la polución de origen natural no representa, en general, una amenaza grave a la vida. Esta amenaza procede, más bien, de la creciente contaminación inducida por el ser humano ("antropogénica"), hasta tal punto

que la reducción del nivel de polución atmosférica ha llegado a convertirse en uno de los deberes prioritarios de la sociedad industrial actual.

Para situar la presente revisión bibliográfica en su contexto adecuado, dentro del amplísimo campo de estudio que representa el control de la contaminación atmosférica, hay que señalar, en primer lugar, que el fenómeno de la polución consta de una secuencia de eventos: (i) la generación de los contaminantes y su emisión a partir de una fuente; (ii) su transporte y transformación físico-química en la atmósfera; y (iii) sus efectos en los seres vivos y en el ecosistema. El presente trabajo sólo está dedicado, parcialmente, a la primera etapa, en concreto, a la reducción de las emisiones. Ahora bien, las emisiones pueden contener gases tóxicos y/o partículas, sean éstas líquidas o sólidas. Aquí, solamente se abordará el control de las emisiones de partículas. Más aún, el trabajo se circunscribirá, exclusivamente, al estudio de la eliminación de partículas

(*) Trabajo recibido el día 3 de Abril de 2001 y aceptado en su forma final el día 1 de Octubre de 2001.

(**) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM (CSIC), Avda. Gregorio del Amo, 8. 28040 Madrid (España).

suspendidas en corrientes gaseosas, mediante el paso del gas contaminado a través de un medio sólido poroso ("filtración", propiamente dicha).

Los principales equipos de filtración de aerosoles son los filtros de fibras (los más antiguos de los que se tienen noticia escrita), los filtros de lechos granulares y los filtros de tejidos, comúnmente llamados filtros de mangas. Otro tipo de filtros de partículas son los filtros porosos (membranas de celulosa, membranas metálicas y filtros de policarbonato), pero no serán considerados aquí por su relativamente escasa utilización en comparación con los tres tipos de filtro citados anteriormente.

Por supuesto, existen otros medios de eliminación de partículas, pero no pueden considerarse filtros porque el gas contaminado no fluye a través de un medio filtrante y, por consiguiente, tampoco serán objeto de estudio en esta revisión. Entre éstos, destacan el precipitador electrostático, el ciclón, la cámara de sedimentación y los equipos de captura de partículas por vía húmeda (principalmente, *scrubber* de Venturi y torre de rociado).

Como ejemplo de la nocividad de los aerosoles antropogénicos cabe destacar que son, precisamente éstos, los que generan la lluvia ácida, que es uno de los cambios más drásticos que ha tenido lugar en la troposfera (la capa más baja de la atmósfera) hace relativamente poco tiempo. La lluvia ácida procede de la interacción de los óxidos de nitrógeno y azufre emitidos por la industria con vapor de agua y luz solar, dando lugar a partículas líquidas de ácidos nítrico y sulfúrico, que, conjuntamente con otros compuestos inorgánicos y orgánicos, se depositan sobre la tierra en forma de aerosoles, o bien son arrastrados hacia la misma por medio de gotas de lluvia, copos de nieve, niebla o escarcha. Por otra parte, los aerosoles atmosféricos, sean naturales o antropogénicos, absorben y reemiten la radiación solar, por lo que juegan un papel decisivo en el balance energético (absorción/reemisión) de la atmósfera; de hecho, pueden contrarrestar parcialmente el calentamiento por efecto invernadero porque, aunque aún no está definitivamente establecido, parece ser que el resultado del complejo balance energético de la interacción aerosol-radiación es que la presencia de partículas en la atmósfera tiende a disminuir la temperatura global de ésta^[1]. Pero, sin lugar a dudas, lo que más preocupa a las personas, como seres vivos que son, es que los aerosoles afectan negativamente a la salud. Una vez inhaladas y depositadas en los pulmones, las partículas, de por sí, pueden provocar afecciones respiratorias como, por ejemplo, enfisemas; y,

al ser transportadas por la sangre a otras partes del organismo pueden producir enfermedades nerviosas y renales, especialmente las partículas de plomo. Más aún, antes de ser inhaladas, han podido condensar sobre ellas gases nocivos, como óxidos de azufre que, por supuesto, penetran y se depositan en los pulmones. La penetración y deposición de partículas en el aparato respiratorio depende fundamentalmente del tamaño de las mismas. A título anecdótico, se puede señalar que las partículas mayores de 10 μm son de poco riesgo porque quedan retenidas en los pelos de la nariz; alrededor de un 40 % de las partículas con tamaño entre 1 y 2 μm se depositan en los bronquiolos y alveolos; las que tienen tamaño entre, aproximadamente, 0,25 y 1 μm presentan menos problemas porque, una vez inhaladas, se expulsan durante la expiración; finalmente, las partículas inferiores a 0,25 μm son las más peligrosas porque su intenso movimiento *browniano* las hace depositarse con suma facilidad en los pulmones, hasta el punto que, prácticamente, todas las partículas de unos pocos nanómetros quedan retenidas en los mismos^[1]. Solamente estos pocos ejemplos (de entre los muchos otros que podrían citarse) deberían servir para concienciarnos de la tremenda importancia que tiene la eliminación de partículas antes de ser emitidas a la atmósfera.

El esquema de este artículo es como sigue. En la sección 2 se describen someramente las principales fuentes de emisión de contaminantes. Tras un breve resumen de la historia de la filtración de aerosoles (sección 3), se pasa a la descripción de los mecanismos de filtración (sección 4), se enumeran los parámetros de importancia en la selección del equipo de filtración adecuado (sección 5) y se introducen las definiciones de eficacia de filtración (sección 6). Las últimas tres secciones (7, 8 y 9) se dedican a un examen, algo más profundo, del funcionamiento y diseño de los tres tipos de filtro citados arriba.

Debido a la limitada extensión que se supone ha de tener una revisión bibliográfica, se han omitido la mayoría de los pasos intermedios en la deducción de las ecuaciones de diseño. Asimismo, se han pasado por alto algunos aspectos que podríamos considerar más avanzados o que son resultados, muchos de ellos aún no verificados en su totalidad, de las últimas investigaciones. En definitiva, se trata de una revisión introductoria a la filtración de aerosoles dirigida, no al experto, sino al profesional o estudioso que pretende introducirse en este tema de tanta importancia para la industria

y el medio ambiente. Existen publicados algunos libros monográficos sobre la filtración de aerosoles^[2-4] que profundizan mucho más en los aspectos científicos y tecnológicos de la filtración, y que han sido de gran utilidad en la preparación de este trabajo.

2. CONTAMINANTES DEL AIRE

El aire contiene una serie de contaminantes naturales tales como polen, esporas, aerosoles salinos y humo y polvo procedente de incendios forestales y erupciones volcánicas. Además de estas partículas, el aire también presenta contaminantes gaseosos naturales, como CO formado por degradación natural de CH₄, hidrocarburos en forma de terpenos procedentes de los pinos y H₂S y CH₄ formados en la descomposición anaeróbica de materia orgánica.

Los procesos de combustión (procesos industriales, vehículos a motor, incineración de residuos, etc.) constituyen la principal fuente de contaminantes antropogénicos. No obstante, en, prácticamente, todos los procesos industriales se emiten contaminantes al aire. Incluso actividades domésticas como la cocina o la calefacción contribuyen también a la polución. Cualquier actividad humana es, de hecho, una fuente potencial de polución del aire. Por ello, la emisión cero de contaminantes es, o bien socioeconómicamente inviable o técnicamente imposible, por lo que, en la práctica, lo que debe hacerse es controlar las emisiones de contaminantes a un nivel tal que sus efectos nocivos sean mínimos. Así pues, aunque es posible reducir la formación de contaminación en el lugar de producción, lo normal es que los gases deban pasar por algún tipo de tratamiento antes de ser emitidos a la atmósfera.

Entre los agentes contaminantes generados en los procesos industriales (principal, pero no únicamente, en la combustión) destacan los óxidos de nitrógeno y azufre, el monóxido de carbono, los hidrocarburos inquemados y las partículas sólidas en suspensión. La eliminación de éstas últimas constituye, precisamente, el objeto central de estudio de esta revisión.

Las principales emisiones industriales de partículas tienen lugar en la combustión de carbón y, en menor medida, en la combustión de combustibles derivados del petróleo^[2]. Las partículas generadas a partir de la combustión del carbón consisten fundamentalmente en carbón, sílice, alúmina y óxidos de hierro. Por su parte, las partículas generadas en la combustión de derivados del petró-

leo contienen generalmente cadmio, cobalto, cobre, níquel y vanadio. Otras fuentes importantes de emisiones de partículas son las industrias metalúrgicas y químicas y las incineradoras de residuos industriales y urbanos.

3. BREVE HISTORIA DE LA FILTRACIÓN DE AEROSOLES

La investigación y desarrollo de filtros para la captura de partículas ha recibido estímulos de varios sectores de naturaleza muy dispar: protección de trabajadores ante polvos nocivos, respiradores de uso médico, protección de bomberos para prevenir la inhalación de humo, muestreo de polvos y aerosoles, reducción de las emisiones gaseosas industriales, etc. Debido al enorme interés práctico de esta ciencia multidisciplinar, no es de extrañar que el estudio de la filtración de polvos y aerosoles tenga una historia de unos 2.000 años. La historia del desarrollo de esta ciencia hasta 1970 ha sido descrita por Davies^[5]. En el resto de esta sección se señalan, brevemente, los hitos más significativos de este desarrollo, tal como aparece en el libro de Davies.

Los primeros datos publicados de los que tenemos conocimiento datan de la época del imperio romano. El problema de los polvos industriales aparece mencionado en la *Historia Natural* de Plinio el Viejo (siglo I), quién propone el uso de trapos húmedos para prevenir la inhalación, mientras que Julius Pollux (siglo II) describió el problema de los polvos en las minas de Egipto. Bastante más adelante, Georg Bauer, en su libro *De Re Metallica* (1556), también describió el problema de la inhalación de polvos en minas y recomendó como métodos de protección una buena ventilación y el uso de formas primitivas de respiradores. La primera observación sobre los riesgos para la salud de la inhalación de polvos se debe a Paracelso (1560). Cien años después, Stockhausen publicó su libro *Libellus de Lythargyrill Fumio Noxto Morbifico* (1656), sobre la protección contra la inhalación de polvos de minerales. Sin embargo, el que puede considerarse como el primer filtro "moderno", debido a Brisé Faden, no se desarrolló hasta 1814. Este dispositivo consistía en una caja rellena de algodón y provista de un tubo para introducir en la boca.

El primer paso hacia el desarrollo de filtros de uso médico se debe a Louis Pasteur, quién demostró, en 1860, que la putrefacción era debida a microorganismos suspendidos en el aire. El primer

prototipo de respirador de uso médico fue diseñado y, posteriormente, mejorado por Feldhaus, en 1929. A principios del siglo XX, comenzaron a comercializarse respiradores rellenos de fibras de algodón.

En cuanto a la protección contra la inhalación del humo de los incendios, ya se utilizaban las llamadas “máscaras de alambre” en Inglaterra, Francia y Austria. Posteriormente, Shaw y Tindall inventaron la “máscara de humo”, un filtro hecho de fibras de algodón con alta densidad de empaquetamiento. Precisamente, fue Tyndall el pionero en la medición de la eficacia de filtración, usando técnicas de dispersión de luz para medir la concentración de partículas de humo a la entrada y salida del filtro.

Otro campo que propició el desarrollo y la mejora de filtros fue, lamentablemente, la industria militar, a consecuencia, sobre todo, de las dos Guerras Mundiales. En este caso, hubo que desarrollar filtros, no sólo para las partículas sino también para gases tóxicos. Con respecto a estos últimos, se desarrollaron filtros a base de gránulos, relativamente grandes, de carbón para adsorber los compuestos nocivos.

A partir de aquí, comenzaron a desarrollarse lo que podríamos denominar “filtros modernos”. Así, en 1930, el danés Hansen inventó el primer filtro eléctrico, un filtro de fibras con carga eléctrica permanente, consistente en polvo de madera impregnado en resina y sometido a la acción de un campo eléctrico intenso para cargar eléctricamente el material aislante. Durante la Segunda Guerra Mundial aparecieron filtros fibrosos de tejido y de papel. Se comprobó, experimentalmente, que las fibras de asbestos, por ser muy finas, eran especialmente adecuadas para la filtración de alta eficacia, por lo que, durante bastantes años, se utilizaron en la fabricación de respiradores, máscaras de gas, filtros para sistemas de ventilación e incluso para filtros de líquido; estos últimos se empleaban en, por ejemplo, la fabricación de bebidas alcohólicas. Como es bien sabido, este tipo de filtros fueron prohibidos durante la década de 1970 porque liberaban las fibras finas de asbestos, material altamente cancerígeno, contaminando los gases o líquidos que se pretendían depurar. Es, así, como empezaron a desarrollarse filtros con otros tipos de fibras, especialmente de vidrio, carbón, materiales cerámicos e incluso orgánicos.

Aparte de los “filtros fibrosos” descritos arriba, en el siglo XX han ido apareciendo toda una gama de filtros de muy variada estructura y campo de

aplicación. Toda esta gama de filtros puede clasificarse atendiendo a los diferentes mecanismos de filtración por los que las partículas pueden ser recolectadas. Dichos mecanismos se describen brevemente en la siguiente sección.

4. MECANISMOS DE ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS

La operación de los equipos de captura de partículas se basa en hacer pasar la corriente gaseosa contaminada sobre una región en la que las partículas, o bien son sometidas a fuerzas externas o son interceptadas por obstáculos, de modo que, en cualquiera de los dos casos, las partículas se separan del gas. En presencia de fuerzas externas, la velocidad de las partículas adquiere una dirección distinta a la de la corriente gaseosa.

Los mecanismos físicos en que se basan los equipos de eliminación de partículas son los siguientes^[2] (Fig. 1):

- Tamizado: La corriente gaseosa con partículas en suspensión pasa a través de una malla con apertura inferior al tamaño de las partículas, por lo que éstas quedan retenidas. Este mecanismo es apropiado solamente para partículas muy grandes, superiores a, aproximadamente, 100 μm . De hecho, el tamizado no se emplea industrialmente en el control de la contaminación.
- Sedimentación: El efluente es alimentado a una cámara en la que las partículas se depositan sobre el fondo de la misma, simplemente por la acción de la gravedad. A estos dispositivos se les conoce con el nombre de “cámaras de

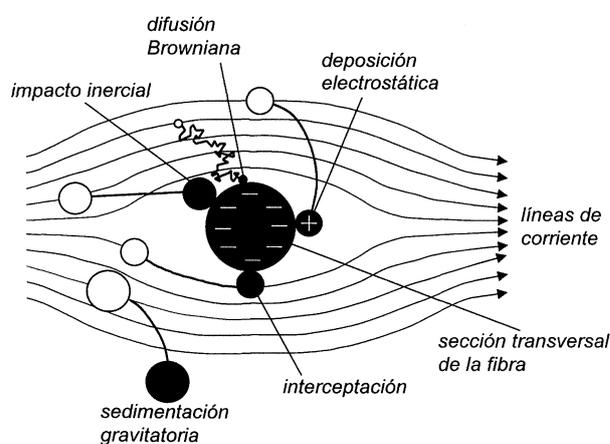


Figura 1. Mecanismos de captura de partículas.

Figure 1. Particle capture mechanisms.

sedimentación". La sedimentación gravitatoria es efectiva para partículas con diámetro mayor de unas 50 μm .

- Impacto inercial: Cuando la corriente gaseosa cambia de dirección al encontrar un obstáculo en su camino, las partículas en suspensión, por su mayor inercia, tienden a seguir moviéndose en la dirección original que llevaban aguas arriba del obstáculo, impactando con éste. Entre los equipos captadores de partículas que operan en base a este mecanismo podemos citar los ciclones, los *scrubbers*, los filtros de fibras y los filtros de lechos granulares. La deposición inercial es un medio de captura efectivo para partículas de diámetro superior a unas 2-3 μm .
- Interceptación: Consiste en la colisión de la partícula con un obstáculo, quedando adherida sobre él. La diferencia con el mecanismo de impacto inercial es que en la interceptación no es necesario que la partícula se desvíe de su trayectoria original, sino que es, más bien, el gas transportando la partícula, lo que colisiona con el obstáculo. Los mecanismos de interceptación e impacto inercial pueden actuar simultáneamente, si bien, este último se hace predominante a altas velocidades del gas. Ejemplos de equipos basados en este mecanismo son los filtros de fibras y los filtros de lechos granulares.
- Migración de partículas cargadas en un campo eléctrico: El efluente se hace pasar por un dispositivo en el que las partículas suspendidas son cargadas eléctricamente y, seguidamente, se somete a un campo eléctrico. La fuerza electrostática sobre las partículas hace que éstas migren hacia una de las superficies del equipo, donde quedan retenidas. Estos aparatos, denominados "precipitadores electrostáticos", son eficaces para partículas de tamaño del orden de 1 μm (la eficacia de captura disminuye para partículas submicrónicas debido a que, a medida que disminuye el tamaño de partícula, se hace más y más difícil el cargado eléctrico). En este caso, a diferencia de los restantes, la fuerza externa se aplica, no conjuntamente a las partículas y al gas, sino selectivamente a aquéllas.
- Difusión *browniana*. Las partículas suspendidas en un gas ejecutan incesantemente un movimiento *browniano*, en zigzag, de naturaleza aleatoria, superpuesto al movimiento determinista causado por el arrastre del gas. Cuando el gas se hace fluir alrededor de obstáculos, el zigzag de las partículas puede hacerlas incidir sobre el

obstáculo quedando adheridas a él. Puesto que la intensidad del movimiento *browniano* aumenta al disminuir el tamaño de partícula, es de prever que este mecanismo de captura adquiere importancia en el caso de partículas pequeñas submicrónicas. De hecho, en el caso de partículas nanométricas, la difusión *browniana* se convierte, prácticamente, en el único mecanismo posible de recolección.

- Termoforesis: Cuando existe un gradiente térmico, las partículas suspendidas tienden a moverse en la dirección de temperatura descendente. Aunque no existe ningún equipo de control de la contaminación basado exclusivamente en el fenómeno de la termoforesis, este efecto puede ser útil para mejorar la eficacia de captura de partículas suspendidas en corrientes gaseosas calientes empleando, por ejemplo, superficies frías de recolección. De hecho, la eficacia de deposición termofóretica es superior a la de deposición por difusión y por sedimentación, excepto en el caso de partículas nanométricas, para las que la difusión es predominante^[1].

5. SELECCIÓN DEL EQUIPO ADECUADO DE FILTRACIÓN

La selección preliminar del equipo adecuado de captura de partículas se basa en cuatro factores principales^[2]:

- la concentración de partículas en el efluente contaminado,
- la distribución de tamaños de partícula,
- el caudal de efluente, y
- la concentración máxima permitida en la emisión final.

Tras la selección preliminar de los equipos potencialmente eficaces para el sistema específico en cuestión, la decisión final se basa en los costes totales de construcción y operación. El tamaño del equipo y, consiguientemente, su coste de construcción son proporcionales al caudal volumétrico del efluente contaminado. Los principales costes de operación provienen de la pérdida de carga a través de la unidad, del consumo energético requerido y, en el caso de procesos en húmedo, de la cantidad necesaria de líquido.

El parámetro clave para la elección del equipo de captura es, en la mayoría de los casos, el tamaño de las partículas. La eficacia de cualquiera

de los mecanismos de captura descritos en la sección anterior varía considerablemente, dependiendo del tamaño de partícula. Así, los colectores mecánicos (cámaras de sedimentación, ciclones) son útiles, solamente para partículas relativamente grandes, mientras que las partículas extremadamente pequeñas (orden de nanómetros), sólo pueden captarse si se es capaz de aprovechar su vigoroso movimiento *browniano*. Para tamaños de partícula intermedios, son útiles los filtros de fibras, los filtros porosos y la precipitación electrostática.

6. EFICACIA DE FILTRACIÓN

La eficacia numérica de filtración para partículas de diámetro D_p se define como:

$$e(D_p) = 1 - \frac{n_{sal}(D_p)}{n_{ent}(D_p)} \quad (1)$$

donde $n_{ent}(D_p)$ y $n_{sal}(D_p)$ son, respectivamente, las concentraciones numéricas (número de partículas por unidad de volumen) de partículas de diámetro, D_p , en el gas, a la entrada y a la salida del equipo de filtración. La eficacia total se define como

$$e_{total} = 1 - \frac{N_{sal}}{N_{ent}} \quad (2),$$

siendo

$$N = \int_0^{\infty} n(D_p) dD_p \quad (3)$$

el número total de partículas por unidad de volumen, y $n(D_p)dD_p$ el número de partículas por unidad de volumen con diámetro comprendido entre D_p y $D_p + dD_p$.

Del mismo modo, se pueden definir las eficacias másicas, expresando las concentraciones como masa por unidad de volumen. Los estándares de emisión de partículas suelen expresarse como concentraciones másicas y no numéricas, lo cuál es, ciertamente, engañoso. Teniendo en cuenta que, por un lado, la masa es proporcional al cubo del diámetro de partícula y que, por otro lado, generalmente, los equipos de filtración captan más eficazmente las partículas grandes (excepto en el caso en que el mecanismo de filtración sea el de difusión *browniana*), decir que un determinado equipo

tiene una eficacia másica del 99 % no significa, necesariamente, que el equipo sea, realmente, bueno: el 1 % restante de la masa no retenida puede contener numerosísimas partículas muy pequeñas, cada una de las cuáles aporta muy poca masa al conjunto.

Además, son, precisamente, las partículas muy pequeñas las que resultan ser más peligrosas para el medio ambiente y los seres vivos. En primer lugar, una vez emitidas permanecen en suspensión largos períodos de tiempo y pueden ser transportadas por los vientos hasta regiones enormemente alejadas del punto de emisión (la velocidad terminal de sedimentación es proporcional al cuadrado del tamaño de partícula, de modo que, por ejemplo, una partícula de 0,1 μm tarda unas 100 veces más en sedimentar que una partícula de 1 μm). En segundo lugar, la superficie específica de las partículas pequeñas es muy alta, por lo que constituyen centros preferentes de condensación de contaminantes gaseosos: es un hecho corroborado experimentalmente en numerosas ocasiones que la concentración relativa de metales pesados tóxicos (masa de metal / masa de partícula) en las partículas aumenta al disminuir el tamaño de estas^[6 y 7]; además, sobre las partículas pequeñas se adsorben, con relativa facilidad, muchos compuestos orgánicos hidrofóbicos tóxicos, tales como alcanos de larga cadena e hidrocarburos aromáticos policíclicos^[8]. En tercer lugar, y esto es lo más preocupante, resulta que son, precisamente, las nanopartículas las que con mayor facilidad penetran y se depositan en el aparato respiratorio^[9 y 10]. Por todas estas razones, desde un punto de vista científico y como medida preventiva para minimizar el riesgo de enfermedades pulmonares, los estándares de emisión y la eficacia de un equipo recolector de partículas deberían expresarse, no en términos de porcentaje másico, sino tomando como base el número de partículas por unidad de volumen (concentración numérica).

7. FILTROS DE FIBRAS

El filtro de fibras es una estructura tridimensional de fibras dispuestas de forma aleatoria, en la que los puntos de contacto entre fibras son relativamente infrecuentes. A pesar de que, generalmente, el lecho de fibras posee una fracción volumétrica sólida (volumen de fibra / volumen total del filtro) muy baja, esta estructura suele ser considerablemente rígida. Además, debido a que la fracción volumétrica sólida o densidad de empaquetamiento es bastante

baja, estos filtros ofrecen una resistencia muy baja al flujo del gas, de forma que la pérdida de carga a través de ellos es, relativamente, pequeña. Como se mencionó anteriormente, las fibras suelen ser de vidrio, carbón, materiales cerámicos y orgánicos.

La teoría de la filtración a través de lechos fibrosos se basa en el hecho de que el filtro puede considerarse como un conjunto de cilindros dispuestos de forma aleatoria, con una densidad de empaquetamiento tan baja (normalmente, alrededor del 5 %) que la distancia típica de separación entre fibras es mucho mayor que el tamaño de las partículas suspendidas en el gas que se pretende filtrar. De aquí, se sigue que la captura de partículas tiene lugar mediante el transporte de las mismas, desde el gas hasta la superficie de una única fibra. Por ello, el tratamiento teórico se puede realizar considerando solamente un único cilindro (fibra) sobre el que fluye el gas con las partículas en suspensión.

En primer lugar, consideraremos la eficacia global del lecho de fibras en función de la eficacia unitaria de captura, es decir, de la eficacia de una fibra individual. Seguidamente, resumiremos la teoría de la eficacia unitaria de captura. El desarrollo que sigue se basa en el libro de Flagan y Seinfeld^[2].

7.1. Eficacia global de captura

Aunque en un lecho fibroso real las fibras están orientadas aleatoriamente, para el tratamiento teórico se supone que todas las fibras están dispuestas perpendicularmente al flujo del gas. Además, como se comentó anteriormente, se supone que cada una de las fibras actúa independientemente de las demás, de forma que la eficacia global viene determinada por la eficacia unitaria de colección y el número de fibras por unidad de volumen.

La fracción volumétrica sólida α del lecho fibroso viene dada por:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} D_f^2 L_f \quad (4),$$

siendo D_f el diámetro de la fibra (se supone igual para todas las fibras) y L_f la longitud total de fibra por unidad de volumen del lecho.

El balance de partículas que entran y salen de un elemento de volumen de espesor dx , perpendicular al flujo de gas, conduce a la expresión

$$\frac{dN}{dx} = -\frac{4\alpha\eta}{\pi D_f(1-\alpha)} N \quad (5),$$

donde N es el número de partículas por unidad de volumen y η es la eficacia de colección de una fibra individual. Usando la condición límite de que $N = N_0$, aguas arriba del lecho y, utilizando la definición (2), la eficacia global del lecho resulta ser:

$$e_{\text{total}} = 1 - \frac{N_L}{N_0} = 1 - \exp\left[-\frac{4\alpha\eta L}{\pi D_f(1-\alpha)}\right] \quad (6),$$

siendo L el espesor del lecho de fibras. También, se emplea con bastante frecuencia la “penetración”, P , relacionada con la eficacia según:

$$P = 1 - e_{\text{total}} \quad (7)$$

que, obviamente, representa la fracción de partículas que atraviesan el filtro sin ser retenidas.

7.2. Mecanismos de filtración

En los filtros de fibras se pueden dar, simultáneamente, tres diferentes mecanismos de captura de partículas: difusión *browniana*, interceptación e impacto inercial, que ya fueron descritos, brevemente, en la sección 4. En el caso en que las partículas, las fibras o ambas, estén cargadas eléctricamente, habría que incluir también el mecanismo de captura por fuerzas electrostáticas.

Cada uno de estos mecanismos es particularmente eficiente sólo para un determinado intervalo de tamaños de partícula. Así, la difusión *browniana* es efectiva para partículas menores de, aproximadamente, $0,3 \mu\text{m}$; la interceptación y el impacto inercial, para partículas mayores de $1 \mu\text{m}$; y la captura electrostática, para partículas inferiores a, aproximadamente, $5 \mu\text{m}$. Estos valores son aproximados, porque la eficacia unitaria de retención para cualquiera de estos mecanismos depende de la velocidad del gas y de las características geométricas del filtro (diámetro de fibra y densidad de empaquetamiento, fundamentalmente).

Por lo general, cuando las partículas presentan una distribución de tamaños suficientemente ancha (desviación estándar alta), de forma que coexisten dos o más mecanismos de captura, cada uno de ellos operando para una fracción de partículas de tamaño distribuido en un intervalo de tamaños relativamente estrecho, el problema se suele resolver analizando cada uno de los mecanismos por separado y sumando cada una de las contribuciones para determinar la eficacia unitaria global. Por ejemplo, si

tenemos dos mecanismos, de eficacias unitarias η_1 y η_2 , la eficacia unitaria total viene dada por $\eta = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1\eta_2$. Esta expresión resulta del hecho que una fracción, $(1-\eta_1)$, de partículas sobrevive al mecanismo 1 y, por tanto, una fracción, $(1-\eta_1)(1-\eta_2)$ de partículas sobrevive a los dos mecanismos de filtración. Ahora bien, lo normal es que uno de los dos mecanismos sea claramente dominante en un cierto intervalo de tamaños de partícula, por lo que el producto $\eta_1\eta_2$ es bastante más pequeño que la suma $\eta_1 + \eta_2$ y puede despreciarse. Por ello, la eficacia unitaria global para n mecanismos simultáneos suele determinarse con la expresión simplificada

$$\eta = \sum_{j=1}^n \eta_j \quad (8).$$

7.2.1. Deposición de partículas sobre un cilindro por difusión browniana

Para valores bajos del número de Reynolds, la concentración numérica de partículas difundiendo hacia un cilindro (fibra) en estado estacionario, viene dada por

$$u \cdot \nabla N = D \nabla^2 N \quad (9),$$

donde D es el coeficiente de difusión y u la velocidad del gas. Por su parte, el flujo de partículas hacia la superficie del cilindro viene dado por

$$\Phi = -D \left(\frac{\partial N}{\partial r} \right)_{r=D_f/2} \quad (10).$$

A partir de las dos ecuaciones anteriores, se puede calcular, teóricamente, la eficacia unitaria de captura, definida como la razón entre el número de partículas depositadas por unidad de tiempo en el área proyectada de la fibra ($\pi D_f L_f$) y el flujo total de partículas sobre dicha área, resultando ser^[11]:

$$\eta_{\text{dif}} = 3,68 A_f^{1/3} Pe_f^{-2/3} \quad (11).$$

En esta última expresión, el valor de A_f depende del modelo teórico de flujo alrededor del cilindro (suele emplearse el campo de velocidades de Kuwabara^[12]) y

$$Pe_f = \frac{u D_f}{D} \quad (12)$$

es el número de Peclet referido a la fibra, que expresa la razón entre los transportes convectivo y difusivo. Puesto que el coeficiente de difusión es inversamente proporcional al diámetro de partícula, D_p , la eficacia unitaria de captura por difusión browniana es proporcional a $D_p^{-2/3}$. De hecho, este es el único de los mecanismos importantes de filtración en el que la eficacia unitaria aumenta al disminuir el tamaño de partícula.

Trabajando con los llamados filtros modelo de ventilador, Cheng y Yeh^[13] obtuvieron la siguiente correlación semiempírica para la eficacia unitaria de captura por difusión:

$$\eta_{\text{dif}} = 2,7 Pe_f^{-2/3} \quad (13)$$

Esta expresión es válida solamente para flujo reptante alrededor del cilindro (régimen de Stokes), esto es, para números de Reynolds muy inferiores a 1:

$$Re_f = \frac{u D_f \rho_g}{\mu_g} \quad (14)$$

En la ecuación anterior, ρ_g y μ_g son, respectivamente, la densidad y viscosidad del gas.

La correlación (13), válida para filtros modelo de ventilador y $Re_f < 1$, ha sido ampliamente verificada^[14 y 15], incluso para partículas inferiores a 5 nm y *clusters* iónicos^[16 y 17].

La derivación de las ecuaciones anteriores se basa en una suposición, ciertamente especial, a saber, que todas las colisiones partícula-fibra tienen eficacia unidad, esto es, siempre que la partícula colisiona con la fibra se produce una adhesión irreversible entre ambas. Sin embargo, se ha propuesto^[18] una modificación consistente en suponer que no todas las colisiones partícula-fibra son efectivas, especialmente en el caso de nanopartículas fluyendo a una velocidad de aproximación relativamente alta. De acuerdo con este modelo, algunas partículas pequeñas, a gran velocidad, pueden rebotar de la fibra, con lo que tendrían una “segunda oportunidad” para pasar el filtro sin ser capturadas (“rebote térmico”). Hasta la fecha, sin embargo, no hay ninguna evidencia experimental de la existencia de tal rebote térmico^[17].

En el caso de números de Reynolds mayores que, aproximadamente, 1 (es decir, más allá del régimen de Stokes), la ecuación (13) deja de ser válida. La única correlación propuesta hasta la fecha es de los autores de este artículo^[19], que utilizaron

mallas metálicas y midieron las eficacias unitarias de captura para nanoaerosoles (D_p entre 2 y 10 nm), a diferentes valores del número de Reynolds. El estudio experimental permitió concluir que la eficacia unitaria se correlaciona, no con el número de Reynolds basado en el diámetro de la fibra sino con el número de Reynolds para el fluido, aguas arriba de la malla, $Re = (D_t / D_f) Re_f$ (D_t es, aquí, el diámetro del tubo en el que está colocada la malla o, equivalentemente, el diámetro de la malla):

$$\eta_{dif} = (2,53 + 5,14 \times 10^{-4} Re) Pe_f^{(-0,65 + 2,58 \times 10^{-5} Re)} \quad (15)$$

Es interesante hacer notar que, en el límite de números de Reynolds muy bajos, la ecuación (15) se reduce a $\eta_{dif} = 2,53 Pe_f^{0,65}$, que es muy similar a la expresión (13) válida para el régimen de Stokes. Este trabajo se puede, también, considerar como una nueva confirmación de la validez de la correlación (13).

7.2.2. Deposición de partículas sobre un cilindro por interceptación

La captura de una partícula de diámetro D_p sobre la superficie del cilindro recolector tiene lugar cuando la partícula se aproxima a una distancia $D_p/2$ de dicha superficie. Por consiguiente, para determinar la eficacia unitaria de captura por interceptación, η_{int} , basta con calcular la fracción de partículas que pasan sobre la fibra a una distancia $D_p/2$ de la superficie de la misma. En el tratamiento teórico de este mecanismo se desprecian tanto la interacción hidrodinámica entre la partícula y el cilindro como las fuerzas intermoleculares entre ambos^[20]. Otras aproximaciones que simplifican el problema consisten en suponer despreciable la inercia de las partículas y que, éstas siguen las líneas de corriente sin desviarse de ellas. El análisis teórico, basado en el campo de velocidades de Kuwabara^[12], conduce a la expresión^[21]

$$\eta_{int} = \frac{1}{2\xi} \{ (1 + R_f)[1 + R_f] - (1 - \alpha) \} + (1 + R_f)^{-1} (1 - \alpha/2) - (1 + R_f)^3 \alpha/2 \quad (16)$$

donde R_f es la razón entre los diámetros de partícula y fibra, la densidad de empaquetamiento y

$$\xi = -\frac{1}{2} \ln \alpha - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} \quad (17)$$

para el campo de velocidades de Kuwabara.

Para diámetros de fibra muy pequeños, menores de, aproximadamente, 2 μm , Pich^[22] ha demostrado que la ecuación (16) ha de modificarse así:

$$\eta_{int} = \frac{(1 + R_f)^{-1} - (1 + R_f) + 2(1 + 1,996Kn_f)(1 + R_f) \ln(1 + R_f)}{1,996Kn_f(-0,5 - 1, \alpha) - 1,5 - \ln \alpha} \quad (18)$$

donde $Kn_f = D_f / 2\lambda$ es el número de Knudsen referido a la fibra ($\lambda =$ recorrido libre medio de las moléculas del gas). La ecuación (18) es especialmente válida para el caso de densidades de empaquetamiento del filtro relativamente bajas.

7.2.3. Deposición de partículas sobre un cilindro por impacto inercial

El tercer mecanismo de captura de partículas en filtros de fibras es el de impacto inercial que, como se comentó anteriormente, tiene lugar cuando las partículas de suficiente masa no pueden seguir las líneas de corriente curvilíneas del gas al bordear la fibra sino que, por el contrario, tienden a seguir la línea recta que llevaban aguas arriba del obstáculo y colisionan con la fibra. En la figura 2 se muestra un esquema ilustrativo de los mecanismos de interceptación e impacto inercial. (En el ejemplo de la figura, el mecanismo de recolección ilustrado es, realmente, el de impacto inercial, porque la partícula se desvía de la línea de corriente – línea gruesa – siguiendo la línea discontinua o trayectoria límite. Si la verdadera línea de corriente de la partícula fuera la línea discontinua, es decir, si la partícula no se desviara de la línea de corriente, el mecanismo de captura sería el de interceptación).

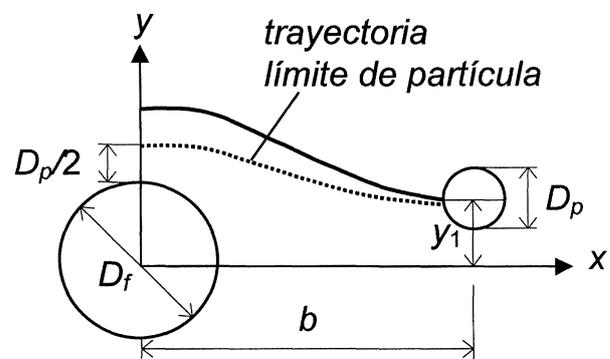


Figura 2. Captura de partículas por interceptación e impacto inercial.

Figure 2. Particle capture by interception and inertial impact.

La evaluación de la eficacia unitaria de captura por impacto inercial consiste en calcular las trayectorias de las partículas aguas arriba de la fibra y determinar cuáles son las que la bordean a una distancia $D_p/2$ de su superficie. En la figura 2, se muestra la trayectoria de una partícula, inicialmente a una distancia γ_1 de la línea central que pasa por el centro de la fibra. Si todas las partículas, entre γ_1 y la línea central, son recolectadas por la fibra y todas las demás partículas, alejadas de la línea central, no son capturadas, la línea de corriente que pasa por γ_1 es la que determina la trayectoria límite o crítica. Una vez que γ_1 ha sido calculada, la eficacia unitaria se expresa, simplemente, como $\eta_{imp} = 2\gamma_1 / D_f$.

Las trayectorias de las partículas están determinadas por el número de Stokes, definido, en este caso, como la razón entre la distancia de detención de la partícula y el diámetro de la fibra:

$$St_g = \frac{\rho_p C_c u D_p^2}{18 \mu_g D_f} \quad (19),$$

donde ρ_p es la densidad de la partícula y C_c el factor de corrección de Cunningham. El cálculo de las trayectorias, por supuesto, debe incluir el efecto de la tortuosidad del campo de velocidades, controlado por la densidad de empaquetamiento y el número de Reynolds. Hasta la fecha, no existe un modelo teórico del campo de velocidades que, simultáneamente, incorpore los efectos de α y R_f . Stechkina *et al.*^[23], utilizando un método aproximado de cálculo, válido para valores pequeños del número de Stokes, llegaron a la siguiente solución:

$$\eta_{int+imp} = \eta_{int} + \frac{J}{4 \xi^2} St_g \quad (20)$$

En la ecuación (20), el subíndice “int+imp” indica que se trata de la eficacia unitaria de captura por la acción simultánea de los mecanismos de interceptación e impacto inercial. En esta expresión, válida para $R_f = D_p / D_f < 0.4$,

$$J = (29,6 - 28\alpha^{0,62})R_f - 27,5R_f^{2,8} \quad (21)$$

Nguyen y Beekmans^[24], basándose en datos experimentales de filtros reales, propusieron la expresión empírica

$$\eta_{imp} = \frac{St_g^3 f^3}{St_g^3 f^3 + 0,77 \left(1 + \frac{4}{Re_f^{1/2}} + \frac{65}{Re_f} \right) St_g^2 f^2 + 0,58} \quad (22),$$

siendo $f = 1 + 4\alpha + 2250\alpha^2$.

7.2.4. Eficacia unitaria total por la acción combinada de difusión, interceptación e impacto inercial

En la figura 3 se muestra un ejemplo ilustrativo de eficacias unitarias de captura por difusión, por el mecanismo combinado de interceptación e impacto inercial y por la acción combinada de los tres mecanismos.

En primer lugar, es importante hacer notar que las eficacias unitarias pueden tomar valores superiores a 1. Esto no es incorrecto; lo importante es que la “eficacia global”, dada por la ecuación (6) sea, como siempre ocurre, menor o igual que 1, porque dicha eficacia global es la que, en definitiva, representa la fracción de partículas retenidas por el filtro.

En segundo lugar, se observa que la eficacia unitaria de captura por difusión disminuye al aumentar el tamaño de partícula, esto es, al disminuir el coeficiente de difusión de la misma. Por el contrario, en los casos de interceptación e impacto

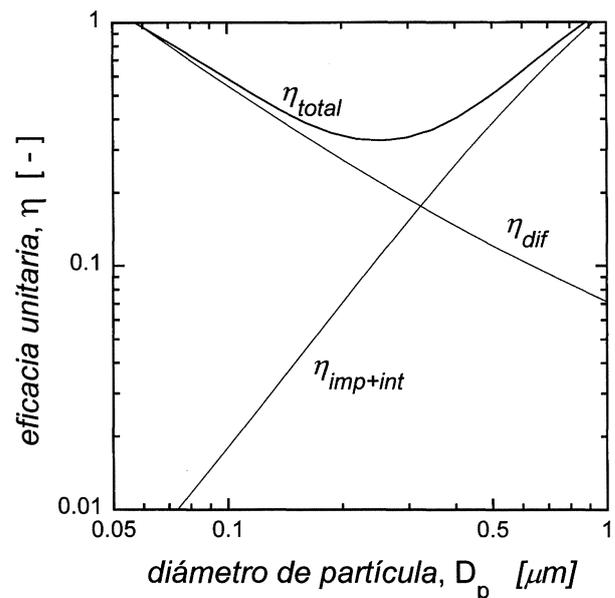


Figura 3. Eficacias unitarias de captación por diferentes mecanismos.

Figure 3. Single fiber efficiency for several capture mechanisms.

inercial, la eficacia unitaria aumenta con el tamaño de partícula. Por consiguiente, la eficacia unitaria de captura por la acción combinada de estos tres mecanismos presenta un mínimo, es decir, una penetración máxima, para tamaños de partícula de, aproximadamente, $0,25 \mu\text{m}$, en el ejemplo de la figura 3. A la partícula de este tamaño se le conoce como partícula más penetrante. El tamaño crítico de partícula para el que la eficacia unitaria es mínima, depende de la velocidad del gas, de la densidad y forma de las partículas y de las características geométricas del filtro; para filtros típicos y velocidades usuales del gas suele estar entre $0,2$ y $0,8 \mu\text{m}$. Este intervalo de tamaños de partícula es crítico porque, por un lado, son partículas demasiado grandes para que el mecanismo de captura por difusión *browniana* sea efectivo y, por otro y al mismo tiempo, son demasiado pequeñas para que cualesquiera de los mecanismos de interceptación o impacto inercial sea eficaz.

7.2.5. Efectos electrostáticos en los filtros de fibras

Un mecanismo adicional de captura en filtros de fibras puede aparecer cuando las fibras, las partículas o ambas, están cargadas eléctricamente. Además de aumentar, en general, la eficacia de filtración, la presencia de cargas eléctricas tiene la ventaja de no representar ninguna pérdida de carga adicional. Actualmente, existen filtros de fibras con carga eléctrica permanente, que han encontrado una gran aplicación en los respiradores, donde se requiere una alta eficacia de filtración y, al mismo tiempo, baja resistencia al aire.

Las fibras con carga eléctrica atraen tanto a las partículas cargadas como a las neutras. El caso de atracción entre una fibra cargada y una partícula cargada de polaridad opuesta es evidente y no requiere ningún comentario adicional. Pero, las partículas neutras también son atraídas por la fibra, independientemente del signo de la carga de ésta. En este caso, el campo eléctrico de la fibra induce un dipolo en la partícula neutra (e incluso en una partícula cargada). La partícula polarizada se orienta de modo que su parte más cercana a la superficie de la fibra es aquella que tiene una polaridad opuesta a la de ésta. Puesto que el campo eléctrico de la fibra disminuye con la distancia, la atracción que ejerce sobre la parte de la partícula-dipolo, más cercana a ella, es mayor que la repulsión que sufre la parte de la partícula más alejada de la fibra, por lo que el efecto neto es de atrac-

ción. La eficacia de éste mecanismo, así como el de la atracción coulombiana, depende de la razón entre la velocidad de aproximación partícula-fibra debida al campo eléctrico y la velocidad de aproximación debida al flujo del gas. De aquí, se sigue que los "filtros electrostáticos" son más eficaces a velocidades pequeñas del gas.

7.2.5.1. Captura de partículas mediante fibras con carga permanente

Los mecanismos de cargado eléctrico de las fibras se han tratado, en profundidad, por Brown^[3] y no serán considerados aquí. El campo eléctrico a una distancia, r , de un cilindro con carga uniforme, Q , está dirigido en la dirección radial y viene dado por:

$$E - R = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (23),$$

siendo ϵ_0 la constante dieléctrica del medio, normalmente tomada como la del vacío. La velocidad de aproximación de una partícula situada a una distancia r de la fibra es igual al producto del campo eléctrico a la distancia r y la movilidad eléctrica de la partícula. La movilidad eléctrica de una partícula de carga q y diámetro D_p viene dada por la expresión:

$$Z_p = \frac{qC_c}{3\pi\mu_g D_p} \quad (24)$$

(La movilidad eléctrica está relacionada con el coeficiente de difusión mediante la ecuación $Z_p = peD/kT$, donde p es el número de cargas eléctricas en la partícula, e , la carga elemental k la constante de Boltzmann y T , la temperatura absoluta.)

Un parámetro adimensional de importancia fundamental en la teoría que nos ocupa es, como se ha mencionado antes, la razón entre la velocidad de aproximación partícula-fibra debida al campo eléctrico y la velocidad de aproximación debida al flujo del gas:

$$N_{Qq} = \frac{Z_p E}{u} = \frac{Qq}{3\pi^2 \epsilon_0 \mu_g D_p D_f u} \quad (25)$$

Como se observa en esta última expresión, el campo eléctrico se ha calculado a una distancia característica, en concreto, en la superficie de la

fibra, ($r = D_f / 2$). Esto es necesario porque la velocidad de la partícula, debida a la acción del campo eléctrico, depende de su distancia a la fibra. Por conveniencia, se toma $r = D_f/2$ como referencia^[3], que es, precisamente, el punto en que la velocidad de la partícula sería máxima si no fuera porque, al mismo tiempo, es la mínima, cero, toda vez que la partícula queda adherida a la fibra.

En el caso en que la partícula sea originalmente neutra, la fibra cargada induce un dipolo en aquella. La fuerza de atracción entre la fibra y el dipolo,

$$F = \frac{\pi \epsilon_0 D_p^3}{4} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \nabla (E^2) \quad (26),$$

depende del gradiente del campo eléctrico, lo que significa que en un campo uniforme la fuerza se anula. Esto es así porque, en un campo uniforme, la fuerza de atracción entre la fibra y la parte de la partícula más cercana a ella sería igual a la de repulsión entre la fibra y la parte más alejada de la partícula, con lo que la fuerza neta se anularía. En la ecuación anterior, ϵ_p es la constante dieléctrica del material del que está hecha la partícula.

La velocidad de aproximación de la partícula a la fibra es el producto de la fuerza, dada por la ecuación (26), y la movilidad mecánica. Esta última se define como la movilidad eléctrica (Eq. (24)) dividida por la carga, q , de la partícula, ($q = pe$). El número adimensional análogo al de la expresión (25) es, en este caso,

$$N_{Q0} = \frac{Q^2 D_p^2}{3 \pi^2 \epsilon_0 \mu_g D_f^3 u} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \quad (27).$$

En esta ecuación, al igual que antes, se ha evaluado el campo en la superficie de la fibra.

Hasta la fecha, no se conoce la forma exacta de la relación entre la eficacia unitaria de captura y los correspondientes números adimensionales dados por las ecuaciones (25) y (27). De, entre varias ecuaciones semiempíricas que han aparecido en la literatura se reproducen, seguidamente, dos de ellas, basadas en el campo de velocidades de Kuwabara^[25]:

$$\eta_{Qq} = \frac{\pi N_{Qq}}{(1 + \alpha N_{Qq}^{1/2})} \quad (28)$$

para la eficacia unitaria de captura cuando, tanto la fibra como la partícula están cargadas, y

$$\eta_{Q0} = \left(\frac{1 - \alpha}{\xi} \right)^{1/8} \frac{\pi N_{Q0}}{(1 + 2 \pi N_{Q0}^{1/4})} \quad (29)$$

para el caso de fibra cargada y partícula neutra.

El análisis es, aún, más complicado cuando la carga de la fibra no está uniformemente repartida por su superficie, que es la situación más normal en la realidad. El tratamiento teórico de este caso puede encontrarse en el libro de Brown^[3].

7.2.5.2. Captura de partículas cargadas mediante fibras neutras

El mecanismo de captura es idéntico al descrito en la sección anterior. La única diferencia es que, ahora, la carga eléctrica está en la partícula y es la fibra la que se polariza. El número adimensional correspondiente resulta ser^[3]:

$$N_{0q} = \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} \right) \frac{q^2}{12 \pi^2 \epsilon_0 \mu_g u D_p D_f^2} \quad (30),$$

donde ϵ_f es la constante dieléctrica del material del que está hecha la fibra. A partir de experimentos con filtros de fibras de vidrio se han obtenido, entre otras, dos correlaciones^[26 y 27]:

$$\eta_{0q} = 1,5 N_{0q}^{1/2} \quad (31)$$

y

$$\eta_{0q} = 2,3 N_{0q}^{1/2} \quad (32),$$

en las que la constante es distinta, pero la potencia del número adimensional, N_{0q} , es la misma.

7.2.5.3. Captura de partículas cargadas mediante fibras dieléctricas neutras

El último ejemplo de efecto electrostático que trataremos es la filtración de partículas cargadas monopares (cargas del mismo signo en todas las partículas), a través de un filtro de fibras de material dieléctrico que, inicialmente, es neutro. En experimentos llevados a cabo por los autores^[28], se emplearon mallas de fibras de tereftalato de polietileno (PET) y partículas nanométricas de NaCl. El tamaño tan extremadamente pequeño del aerosol

(diámetro inferior a 10 nm) implica que, efectos electrostáticos aparte, el único mecanismo de captura efectivo en este sistema es el de difusión *browniana*, para el cuál, la eficacia unitaria de captura en el régimen de Stokes obedece la ecuación (13). La eficacia del filtro, expresada como penetración, viene dada por (ver Eqs.(6) y (7))

$$P_{\text{dif}} = \exp(-S\eta_{\text{dif}}) \quad (33)$$

siendo,

$$S = \frac{4\alpha L}{\pi D_f(1-\alpha)} \quad (34)$$

el llamado parámetro de malla.

A medida que las partículas monopolarmente cargadas van siendo capturadas por las fibras de PET, éstas van acumulando carga, puesto que la velocidad de disipación de la carga a tierra es muy pequeña. Cuando el nivel de carga en las fibras alcanza un valor crítico empiezan a cobrar importancia, además del mecanismo de difusión, los efectos electrostáticos: se crea un campo eléctrico que va creciendo con el tiempo (a medida que la carga acumulada va aumentando), entre la malla de PET y la pared del cilindro metálico que la contiene. A partir de entonces, parte de las partículas incidentes se depositan sobre la malla por difusión, parte de ellas son dirigidas por el campo eléctrico hacia la pared del cilindro, donde quedan capturadas, y el resto de las partículas penetran a través de la malla sin ser retenidas. El número adimensional correspondiente que describe este proceso es análogo a los introducidos en las secciones precedentes, esto es, la razón entre la velocidad de la partícula debida al campo eléctrico ($Z_p E$) y la velocidad debida al arrastre del gas (u). Puesto que este mecanismo es distinto a los anteriores, (de hecho es, simplemente, un efecto de repulsión por fuerzas de Coulomb), el parámetro adimensional se designará por N_C :

$$N_C = \frac{q\lambda C_c}{3\pi^2 \epsilon_0 \mu_g u D_p D_f} \quad (35),$$

donde λ es la densidad lineal de carga en la fibra, que es función del tiempo y que puede estimarse mediante el método propuesto en el artículo original^[28].

En la figura 4 se muestra un ejemplo típico del efecto de la acumulación de carga sobre la malla en la eficacia de filtración. A medida que la carga acumulada aumenta, esto es, a medida que el campo eléctrico de las fibras aumenta, la penetración disminuye. La disminución de la penetración (aumento de eficacia) es drástica en el caso de las partículas más pequeñas. Del análisis de los datos experimentales se llegó a la correlación

$$P = \exp\left[-S\left(2,7Pe_f^{-2/3} + 3,73Pe_f^{-1/2}N_C^{0,69}\right)\right] \quad (36a)$$

que, también, puede escribirse como

$$P = \exp\left[-S(\eta_{\text{dif}} + \eta_{\text{de}})\right] \quad (36b)$$

siendo

$$\eta_{\text{de}} = 3,73Pe_f^{1/2}N_C^{0,69} \quad (37)$$

la eficacia unitaria de captura por el mecanismo combinado de difusión y repulsión coulombiana.

7.3. Consideraciones adicionales

Además de la eficacia unitaria, a la que le hemos dedicado especial atención en las secciones precedentes, existen, también, otros parámetros de

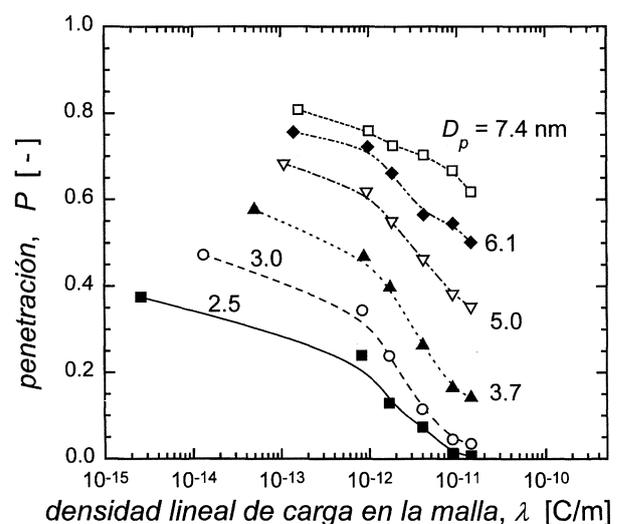


Figura 4. Efecto sobre la filtración de la carga eléctrica acumulada en las fibras.

Figure 4. Effect on filtration of the electric charge accumulated on the fiber.

importancia en la evaluación de la efectividad del filtro. Entre ellos, podemos destacar la pérdida de carga, Δp , a través del filtro. La mayoría de los filtros operan a números de Reynolds bajos (<1), por lo que Δp es directamente proporcional a la velocidad, u , del gas (para valores de Re_f mayores, la relación entre Δp y u deja de ser lineal). La pérdida de carga es proporcional también al espesor, L , del filtro. Por consiguiente, para poder hacer una comparación cuantitativa entre filtros distintos se ha propuesto la utilización del llamado factor de calidad^[3], definido como

$$QF = \frac{-\ln P}{\Delta p} \quad (38)$$

que, por lo dicho anteriormente, es independiente del espesor del filtro. Eso sí, el factor de calidad depende del tamaño de partícula y de la velocidad del gas.

Otra cuestión importante en relación con este tipo de filtros es que tanto la eficacia como la pérdida de carga van aumentando con el tiempo, a medida que más y más partículas se van depositando sobre la superficie de las fibras. A pesar del beneficioso aumento de la eficacia de filtración, cuando la pérdida de carga a través del filtro llega a ser excesiva es necesaria su sustitución. Por consiguiente, cada filtro tiene su propia esperanza media de vida, parámetro, éste, de gran importancia económica. Sin embargo, el tratamiento teórico de este problema es considerablemente complejo y no existe en la actualidad ninguna correlación fiable. En el caso más simple, el de filtros uniformes con partículas sólidas monodispersas (todas del mismo tamaño) sin efectos electrostáticos, etc., hay que tener en cuenta que la cantidad de partículas retenidas por unidad de volumen es máxima a la entrada y mínima a la salida del filtro. Por consiguiente, las ecuaciones (6) y (7) no son aplicables. En este caso, hay que dividir el lecho de fibras en secciones de espesor diferencial, perpendiculares al flujo del aerosol. La eficacia de captura en cada sección es, en un instante de tiempo dado, una función de la eficacia inicial (es decir, cuando no hay todavía ninguna partícula depositada en la fibra) y del volumen de partículas retenidas en esa fibra un instante anterior de tiempo Δt . Si se conociera esta función, podrían integrarse las eficacias locales en función del tiempo, para obtener la eficacia total del filtro como una función del tiempo. El problema es que no se conoce, actualmente, tal

función. Mucho más difícil es, aún, el tratamiento teórico si el lecho de fibras no fuera uniforme o si hubiera efectos electrostáticos como los descritos en la sección 7.2.5 o si el aerosol contuviera, también, partículas líquidas. Se han publicado numerosos estudios teóricos y experimentales sobre este tema (algunos^[29-34] son ilustrativos, entre los innumerables que pueden encontrarse en la literatura) y se han propuesto algunas correlaciones, pero, por lo general, cada una de ellas es válida, solamente, en reducidos intervalos de valores de ciertos parámetros.

En el caso de lechos de fibras con carga eléctrica permanente, ocurre lo contrario: la eficacia del filtro disminuye con el tiempo^[35], porque las partículas depositadas hacen un efecto pantalla sobre las cargas y, por consiguiente, la fuerza atractiva de polarización entre la fibra y las partículas que se le aproximan es menor. Sin embargo, esta disminución de la eficacia global no es ilimitada, puesto que, aunque la importancia relativa del mecanismo de captura electrostática va disminuyendo, el de captura mecánica (difusión, interceptación, impacto inercial) va, por el contrario, aumentando a medida que el número de partículas capturadas por las fibras aumenta. Por consiguiente, en este caso, la eficacia global pasa por un mínimo^[34 y 36].

8. FILTROS DE LECHOS GRANULARES

Estos filtros son, hasta cierto punto, similares a los de lechos de fibras, excepto en que las fibras son sustituidas por gránulos. Los lechos granulares pueden ser fijos, fluidizados o móviles. En el análisis de la operación de un lecho granular, se supone que el lecho es, simplemente, un sistema de esferas sólidas, entre las que fluye el gas con partículas en suspensión. Aquí, también, los posibles mecanismos de captura son los de difusión, interceptación e impacto inercial. En algunos casos, la captura por sedimentación gravitatoria puede llegar a ser relativamente importante, pero no es lo usual. Las partículas menores de, aproximadamente, $0,3 \mu\text{m}$, son capturadas eficazmente por el mecanismo de difusión, mientras que las mayores de, aproximadamente, $2 \mu\text{m}$, lo son por impacto inercial. En el intervalo intermedio de tamaños de partícula, entre $0,3$ y $2 \mu\text{m}$, la eficacia de los lechos granulares es menor^[37].

Si bien el filtro de lecho granular provoca pérdidas de carga mayores que el de fibras es, potencialmente, uno de los pocos tipos de filtro con aplicación a la filtración de aerosoles a altas

temperaturas y presiones (v.g., filtros de gránulos cerámicos)^[38].

8.1. Eficacia global de captura

Del mismo modo que en el caso de los lechos de fibras, la eficacia global de captura se determina a partir de la eficacia unitaria de captura, esto es, de la eficacia de captura por una sola esfera. Mediante un balance de materia para las partículas que entran y salen del lecho granular, se llega a la siguiente expresión para la eficacia global del lecho^[2]:

$$e_{total} = 1 - \exp\left[-\frac{3}{2}\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)\frac{\eta L}{D_g}\right] \quad (39),$$

donde α es la densidad de empaquetamiento del lecho, L la longitud del mismo y D_g el diámetro medio de los gránulos.

8.2. Eficacia unitaria de captura

Bastantes investigadores han realizado estudios experimentales y teóricos sobre la captura de partículas por una esfera (entre otras muchas, referencias^[39-46]). Otros han realizado, también, simulaciones por ordenador^[47 y 48]. Sin embargo, las ecuaciones de eficacia unitaria para cada uno de los posibles mecanismos y combinaciones de mecanismos ni están tan desarrolladas ni, en la mayoría de los casos, han sido tan ampliamente confirmadas como en el caso de los lechos de fibras.

8.2.1. Deposición de partículas sobre una esfera por difusión browniana

Otani *et al.*^[38] realizaron experimentos de filtración de aerosoles monodispersos de tamaño comprendido entre 0,02 y 2 μm , a través de lechos de esferas de tamaños entre 0,5 y 2 mm, con densidades de empaquetamiento entre 0,57 y 0,66, a diferentes números de Reynolds. Estos autores llegaron a la siguiente correlación empírica para la eficacia unitaria de captura por difusión:

$$\eta_{dif} = A(\text{Re}_g) \cdot \left(\frac{\text{Pe}_g}{\text{Pe}_g}\right)^{f_1(\text{Re}_g)} \text{Re}_g^{f_2(\text{Re}_g)} \quad (40a),$$

donde Pe_g y Re_g son, respectivamente, los números de Peclet y Reynolds referidos a los gránulos (es decir, sustituyendo D_f por D_g en las ecuaciones (12) y (14)),

$$f_1(\text{Re}_g) = -\frac{2}{3} + \frac{\text{Re}_g^3}{6\text{Re}_g^3 + 1,2 \times 10^6} \quad (40b)$$

y

$$\begin{aligned} A(\text{Re}_g) &= 8,0 \text{ y } f_2(\text{Re}_g) = -2/3 \text{ para } \text{Re}_g < 30 \\ A(\text{Re}_g) &= 40,0 \text{ y } f_2(\text{Re}_g) = -2/3 \text{ para } 30 < \text{Re}_g < 100 \\ A(\text{Re}_g) &= 2,1 \text{ y } f_2(\text{Re}_g) = -2/3 \text{ para } \text{Re}_g > 100 \end{aligned} \quad (40c).$$

8.2.2. Deposición de partículas sobre una esfera por interceptación

En los filtros de lechos granulares, el mecanismo de interceptación es, generalmente, de poca importancia en relación con los otros. Su importancia relativa es detectable, solamente, en las regiones de transición, donde los otros mecanismos son ineficaces.

A partir del análisis de sus propios datos experimentales, Otani *et al.*^[38] llegaron a la siguiente correlación:

$$\eta_{int} = 16R_g^{f_3(\text{Re}_g)} \quad (41a),$$

donde $R_g = D_p / D_g$ y

$$f_3(\text{Re}_g) = 2 - \frac{\text{Re}_g}{(1 + \text{Re}_g^{1/3})^3} \quad (41b)$$

Debido a los bajos valores de la eficacia por interceptación y a que es posible que los autores no pudieran delimitar bien las zonas de transición comentadas arriba, la correlación (41) no se ajusta demasiado bien a sus propios datos experimentales. Pero es, sin embargo, una de las escasas correlaciones que han aparecido en la literatura y, además y hasta la fecha, es la única que puede considerarse relativamente válida para un amplio intervalo de números de Reynolds.

8.2.3. Deposición de partículas sobre una esfera por impacto inercial

Este mecanismo es efectivo para partículas relativamente grandes, fluyendo a velocidad relativamente alta, a través del lecho de granulos. En el mismo trabajo, Otani *et al.*^[38] propusieron la expresión siguiente:

$$\eta_{imp} = \frac{St_{g,eff}^3}{0.014 + St_{g,eff}^3} \quad (42),$$

donde el número efectivo de Stokes se define como^[49]:

$$St_{g,eff} = \left[1 + \frac{1.75(1-\alpha)Re_g}{150\alpha} \right] St_g \quad (43)$$

(St_g viene dado por la ecuación (19), excepto que, D_p , debe sustituirse por D_g).

8.2.4. Deposición de partículas sobre una esfera por sedimentación gravitatoria

El mecanismo de sedimentación gravitatoria puede llegar a ser predominante en el caso de partículas grandes fluyendo a baja velocidad a través del lecho granular. Tardos y Pfeffer^[46] dedujeron, teóricamente, la eficacia unitaria de captura por sedimentación gravitatoria

$$Gr_g = \frac{gD_g}{2u^2} \quad (44),$$

donde Gr_g es el número gravitatorio, que representa el efecto relativo de la gravedad en comparación con el arrastre de la partícula por el gas, y que se define como

$$\eta_{gra} = \frac{Gr_g \cdot St_g}{1 + Gr_g \cdot St_g} \quad (45).$$

La ecuación (44) ha sido confirmada, experimentalmente, por Otani *et al.*^[38]. Además, en el intervalo de tamaños de partícula y condiciones de operación en que el mecanismo de sedimentación gravitatoria es predominante, la eficacia unitaria de captura es independiente del número de Rey-

nolds, lo que, también, está de acuerdo con la ecuación (44).

8.2.5. Eficacia unitaria de captura para mecanismos simultáneos

El caso de filtración en lechos granulares, bajo condiciones tales que dos o más mecanismos actúan simultáneamente, ha sido escasamente considerado en la literatura. Una de las pocas excepciones es el trabajo de Tardos y Pfeffer^[46], que consideraron la filtración por el mecanismo combinado de interceptación y sedimentación gravitatoria. Estos autores obtuvieron la siguiente correlación, válida para $D_p / D_g \ll 1$ y número de Stokes inferior a 0,5 (flujo reptante):

$$\eta_{int+gra} = (1 + R_g)^2 \eta_{gra} + \frac{\eta_{int}}{1 + Gr_g St_g} \quad (46),$$

donde η_{gra} viene dado por la ecuación (44) y

$$\eta_{int} = \frac{3}{2} \left(\frac{1,31}{1-\alpha} \right)^3 R_g^2 \quad (47)$$

es la eficacia unitaria de captura por interceptación, en régimen de Stokes. Ha de notarse que esta última expresión difiere de la que resulta de tomar $Re_g \rightarrow 0$ en la ecuación (41a) de Otani *et al.* En efecto, tomando el límite de la ecuación (41a) para flujo reptante se obtiene $\eta_{int} = 16R_g^2$; considerando que Otani *et al.*^[38] trabajaron con densidades de empaquetamiento, α , del orden de 0,6 resulta que las expresiones (41a) y (47) difieren en dos órdenes de magnitud. Este es un ejemplo ilustrativo de las grandes diferencias que existen entre las predicciones de las diversas correlaciones que han ido apareciendo en la literatura, constituye, además, una muestra de la complejidad del tema y, al mismo tiempo, refleja la necesidad de futuras investigaciones adicionales. (Un buen número de correlaciones de eficacias unitarias de captura en lechos granulares para distintos mecanismos aparecen listadas en el artículo de El-Halwagi^[50]).

8.3. Efectos electrostáticos en los filtros de lecho granular

La acción de fuerzas electrostáticas hace aumentar notablemente la eficacia de captura^[51]. Shapiro *et*

al.^[37] analizaron, teóricamente, el caso de filtración de aerosoles cargados eléctricamente en un lecho granular al que se le aplica un campo eléctrico. El mecanismo de captura electrostática lo combinaron con el de difusión, para partículas pequeñas, y con los de interceptación e impacto inercial, para partículas mayores. Además, consideraron dos casos diferentes, según que el campo eléctrico fuera normal o paralelo al flujo del gas. Del análisis, resultaron una serie de ecuaciones para cada una de las posibles combinaciones de mecanismos y dirección del campo que, por ser bastante complejas, no se reproducen aquí. Las conclusiones de los trabajos de Shapiro *et al.*^[37 y 52] se pueden resumir, de forma cualitativa, como sigue:

- La eficacia de filtración disminuye al aumentar la porosidad del lecho para partículas relativamente grandes y campo eléctrico de baja intensidad; sin embargo, cuando la intensidad del campo aumenta la tendencia anterior se invierte y la eficacia aumenta con la porosidad.
- En el caso de partículas pequeñas, para las que el mecanismo de deposición por difusión no se puede ignorar, la eficacia aumenta al disminuir la porosidad del lecho, independientemente de la intensidad del campo eléctrico.
- La dirección del campo con respecto a la del flujo de gas influye en la eficacia de filtración; ésta es mayor cuando el campo es perpendicular al flujo de gas.
- La mejora de eficacia debida al campo eléctrico disminuye a medida que el número de Stokes aumenta, y también disminuye al disminuir el número de Peclet.

8.4. Otras consideraciones

Al igual que en el caso de filtros de fibras, el proceso de filtración mediante lechos granulares es no-estacionario, porque la eficacia de filtración varía con el tiempo, a medida que las partículas capturadas van acumulándose en el lecho. Por supuesto, la pérdida de carga a través del filtro también varía con el tiempo. El tratamiento de este problema se lleva a cabo de forma análoga a la descrita en la sección 7.3, esto es, dividiendo el lecho en volúmenes diferenciales en la dirección del flujo de gas y considerando, pues, eficacias locales que varían con el tiempo^[53-55]. En general, cuando el volumen de partículas depositadas por unidad de volumen es σ , la eficacia unitaria se expresa como^[56] $\eta = \eta_0(1+a\sigma^b)$, donde η_0 es la eficacia inicial

(filtro limpio) y a y b son dos constantes. A pesar de la existencia de algunos tímidos intentos y, al igual que en el caso de los filtros de fibras, no es posible la predicción de la variación de la eficacia del lecho con el tiempo, todavía.

9. FILTROS DE MANGAS

El filtro de mangas consiste, básicamente, en una serie de bolsas, sacos o mangas, hechas de un tejido de mallas, sobre las que quedan retenidas las partículas al atravesarlas el gas. Las partículas sólidas depositadas en el tejido son recogidas, periódicamente, por gravedad sobre tolvas situadas debajo de las mangas. La importancia práctica de este tipo de filtros queda demostrada por el hecho de que, en la actualidad, aproximadamente el 50 % de la depuración de gases industriales contaminados con partículas se realiza mediante filtros de mangas. El tamaño de los filtros de mangas industriales abarca, desde los que pueden caber en una habitación de dimensiones normales hasta los que constan de, incluso, 4.000 mangas y ocupan el tamaño de varias naves de tamaño industrial. La longitud de una manga típica oscila entre, aproximadamente, 2 y 7 m y su diámetro suele ser del orden de 20 cm^[57].

Al inicio de la operación, las mangas del filtro están limpias y las partículas quedan retenidas sobre las fibras del tejido por alguno o varios de los mecanismos ya explicados anteriormente, es decir, interceptación, impacto inercial, difusión o atracción electrostática, principalmente. Sin embargo, a medida que las partículas se van acumulando sobre el tejido de la manga formando una torta porosa sobre ella, las fibras del tejido dejan de ser importantes en el proceso de filtración, convirtiéndose en un mero soporte de la torta y es, esta última, la que pasa a constituir el medio filtrante sobre el que quedan retenidas las partículas. De esta forma, con el paso del tiempo de operación, el filtro de mangas se convierte, en cierto modo, en un filtro de lecho granular, con la particularidad de que el medio filtrante está constituido por las propias partículas previamente retenidas.

De lo antedicho se sigue que, en el cálculo de la eficacia de filtración de un filtro de mangas deben considerarse, sucesivamente, los modelos desarrollados para los dos tipos de filtros estudiados anteriormente. Así, al principio de la operación, el filtro de mangas actúa como un filtro de fibras convencional y, por tanto, son válidas todas las ecuaciones de eficacia unitaria reseñadas en la sección 7. En las etapas posteriores del proceso de

filtración, dichas ecuaciones dejan de ser aplicables y han de ser reemplazadas por las correspondientes a las de lechos granulares, resumidas en la sección 8.

Obviamente, a medida que las partículas se van acumulando en la superficie interna de la manga, la pérdida de carga, a través de la misma, va aumentando. Antes de que la pérdida de carga alcance valores impracticables es necesario proceder a la limpieza, siquiera sea parcial, del tejido. La limpieza puede realizarse de modo continuo, periódico o intermitente. Sin embargo, este último método (limpieza intermitente) se utiliza sólo en muy raras ocasiones porque implica la parada del funcionamiento del equipo. En la limpieza periódica, se dejan fuera de operación algunas de las mangas, durante breves períodos de tiempo, mientras que las restantes siguen funcionando. En el modo continuo, la eliminación parcial de la torta se realiza, continuamente, durante el proceso de filtración. En cualquiera de estos modos, la limpieza se lleva a cabo mediante vibración mecánica o mediante un anillo móvil rascador o haciendo pasar una corriente de aire en sentido inverso, es decir, desde fuera hacia el interior de la manga (este último método solo puede emplearse en los modos intermitente y periódico de limpieza).

El tratamiento teórico de la operación de un filtro de mangas es, pues, muy complicado, porque las continuas variaciones del tamaño de la torta hacen muy difícil, si no imposible, calcular la eficacia de filtración en función del tiempo. No obstante, han aparecido en la literatura algunas ecuaciones para predecir la concentración de partículas a la salida del filtro en función de la velocidad del gas y del espesor de la torta^[58]. En la misma referencia, también aparecen correlaciones empíricas para la predicción de la pérdida de carga en función del espesor de la torta. Sin embargo, dichas expresiones no serán consideradas aquí porque no suelen ser utilizadas en el diseño de filtros de mangas. Dicho diseño se basa, en la práctica y principalmente, en experiencias previas acumuladas y no en consideraciones teóricas o semiteóricas. En resumidas cuentas, a pesar de que los filtros de mangas se utilizan ampliamente en la industria son, precisamente, los que menos han sido estudiados desde un punto de vista fundamental.

En los filtros de mangas se pueden obtener eficacias de captura bastante altas, una vez formada la torta. La eficacia es, incluso, considerablemente alta para partículas submicrónicas ($>0,1 \mu\text{m}$). Estos filtros pueden emplearse para eliminar un am-

plio espectro de tipos de partículas, excepto las muy cohesivas, que dificultarían la limpieza. También, pueden operar en un amplio intervalo de caudales de gas. En contrapartida, presentan tres graves inconvenientes: la limitación de la temperatura de trabajo impuesta por la naturaleza del tejido, la destrucción química del tejido, si el gas contiene contaminantes gaseosos que lo atacan, y el amplio espacio que, generalmente, se necesita para su instalación.

10. CONSIDERACIONES FINALES

La presente revisión bibliográfica se ha dedicado al estudio introductorio de la filtración de partículas suspendidas en un gas. Se han considerado, con cierto detalle, los diferentes mecanismos físicos por los que las partículas pueden ser retenidas por los elementos colectores del filtro. Cada uno de dichos mecanismos suele ser efectivo, sólo, para un determinado intervalo de tamaños de partícula, por lo que en un proceso real de filtración, lo normal es que nos encontremos con varios de estos mecanismos operando simultáneamente. Algunos tamaños de partícula son particularmente problemáticos porque no son capturadas eficazmente por ninguno de dichos mecanismos (partícula más penetrante (Fig. 3)).

Todas las ecuaciones para el cálculo de la eficacia de captura que han ido apareciendo en las secciones precedentes, han de considerarse como, a lo sumo, buenas aproximaciones a la eficacia de filtros reales, porque en éstos, la eficacia varía a lo largo del tiempo debido a la acumulación de partículas retenidas en el medio filtrante. Se ha visto que el problema general en el que las eficacias locales dependen del tiempo no ha sido, aún, resuelto satisfactoriamente. Además, todas las ecuaciones anteriores han de considerarse válidas solamente para partículas esféricas, dentro de las limitaciones expuestas. Salvo las partículas líquidas y algunos aerosoles formados por condensación, en la práctica, la mayoría de las partículas que se encuentran no son esféricas. La incorporación de la forma de las partículas en las ecuaciones se lleva a cabo, normalmente, mediante el llamado "factor dinámico de forma", definido como la razón entre las fuerzas de resistencia al fluido de la partícula real y de la partícula esférica que tiene el mismo volumen y se mueve a la misma velocidad que aquélla. (Un tratamiento introductorio de los efectos de la forma de partícula en los procesos discutidos en este artículo, puede verse, por ejemplo, en algunos de los trabajos referenciados^[1, 3 y 59] en el mismo).

En definitiva, se puede señalar que, aunque la ciencia y tecnología de la filtración de aerosoles descansa sobre sólidos pilares teóricos, se está, aún, bastante lejos de poder utilizar esta teoría para predecir, con total fiabilidad, la operación real de un filtro.

Nomenclatura

| | |
|----------------|--|
| C_c | factor de corrección de Cunningham [-] |
| D | coeficiente de difusión de las partículas [m^2s^{-1}] |
| D_f | diámetro de fibra [m] |
| D_g | diámetro de los gránulos del lecho [m] |
| D_p | diámetro de partícula [m] |
| E | intensidad del campo eléctrico [Vm^{-1}] |
| $e(D_p)$ | eficacia de filtración para partículas de diámetro D_p [-] |
| e_{total} | eficacia total de filtración [-] |
| F | fuerza de atracción entre fibra y dipolo [kg m s^{-2}] |
| Gr_g | número gravitatorio [-] |
| Kn | número de Knudsen [-] |
| L | espesor del lecho [-] |
| L_f | longitud de fibra por unidad de volumen del lecho [m^{-2}] |
| N | concentración numérica de partículas [m^{-3}] |
| N_C | número adimensional definido por la ecuación (35) [-] |
| N_{Oq} | número adimensional definido por la ecuación (30) [-] |
| N_{Qq} | número adimensional definido por la ecuación (25) [-] |
| N_{Q0} | número adimensional definido por la ecuación (27) [-] |
| N_{ent} | concentración numérica total de partículas a la entrada del filtro [m^{-3}] |
| N_{sal} | concentración numérica total de partículas a la salida del filtro [m^{-3}] |
| $n_{ent}(D_p)$ | concentración numérica de partículas de diámetro D_p a la entrada del filtro [m^{-3}] |
| $n_{sal}(D_p)$ | concentración numérica de partículas de diámetro D_p a la salida del filtro [m^{-3}] |
| P | fracción de partículas que penetran el filtro sin ser capturadas [-] |
| Pe | número de Peclet [-] |
| Q | carga eléctrica de la fibra [C] |
| q | carga eléctrica de la partícula [C] |
| QF | factor de calidad del filtro [m^2kg^{-1}] |
| r | distancia a la fibra [m] |
| R_f | $= D_p/D_f$ [-] |
| R_g | $= D_p/D_g$ [-] |
| Re | número de Reynolds [-] |

| | |
|--------------|--|
| S | parámetro de malla [-] |
| St | número de Stokes [-] |
| u | velocidad del gas [ms^{-1}] |
| Z_p | movilidad eléctrica de la partícula [$\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$] |
| Δp | pérdida de carga a través del filtro [kg m^{-2}] |
| ϕ | densidad de flujo de partículas [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] |
| α | fracción volumétrica sólida del lecho de fibras [-] |
| ϵ_0 | constante dieléctrica del gas [F m^{-1}] |
| ϵ_f | constante dieléctrica de la fibra [F m^{-1}] |
| ϵ_p | constante dieléctrica de la partícula [F m^{-1}] |
| η | eficacia unitaria de captura [-] |
| λ | recorrido libre medio de las moléculas de gas [m] |
| μ_g | viscosidad del gas [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$] |
| ρ_g | densidad del gas [kg m^{-3}] |
| ρ_p | densidad de la partícula [kg m^{-3}] |
| ξ | parámetro definido por la ecuación (17) [-] |

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con financiación de la Comunidad Autónoma de Madrid, referencia 07M/0097/2000.

REFERENCIAS

- [1] W.C. HINDS, *Aerosol Technology*, Wiley, New York, 1999.
- [2] R.C. FLAGAN y J.H. SEINFELD, *Fundamentals of Air Pollution Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1988.
- [3] R.C. BROWN, *Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters*, Pergamon Press, Oxford, 1993.
- [4] K.R. SPURNY (Ed.), *Advances in Aerosol Filtration*, Lewis, Boca Raton, 1998.
- [5] C.N. DAVIES, *Air Filtration*, Academic Press, Londres, 1973, pp.1-171.
- [6] R.L. DAVISON, D.F.S. NATUSCH, J.R. WALLACE y C.A. EVANS, *Environ. Sci. Technol.* 8 (1974) 1.107-1.113.
- [7] E.I. KAUPPINEN y T.A. PAKKANEN, *Environ. Sci. Technol.* 24 (1990) 1.811-1.818.
- [8] J.H.A. LO y W.M.G. LEE, *Aerosol Sci. Technol.* 26 (1997) 301-312.
- [9] G.M. HIDY, *Aerosols: An Industrial and Environmental Science*, Academic Press, Orlando, 1984, pp. 580-644.
- [10] K.H. CHENG, Y.S. CHENG, H.C. YEH, R.A. GUILMETTE, S.Q. SIMPSON, Y.H. YANG y D.L. SWIFT, *J. Aerosol Sci.* 27 (1996) 785-801.
- [11] S.K. FRIEDLANDER, *Smoke, Dust and Haze*, John Wiley & Sons, Nueva York, 1977, pp. 50-87.
- [12] S. KUWABARA, *J. Phys. Soc. Jpn.* 14 (1959) 527-532.

- [13] Y.S. CHENG y H.C. YEH, *J. Aerosol Sci.* 11 (1980) 313-320.
- [14] H.G. SCHEIBEL y J. PORSTENDORFER, *J. Aerosol Sci.* 15 (1984) 673-687.
- [15] Y.S. CHENG, H.C. YEH y Y. YAMADA, *Aerosol Sci. Technol.* 12 (1990) 286-299.
- [16] M. RAMAMURTHI, R. STRYDOM y P.K. HOPKE, *J. Aerosol Sci.* 21 (1990) 203-211.
- [17] M. ALONSO, Y. KOUSAKA, T. HASHIMOTO y N. HASHIMOTO, *Aerosol Sci. Technol.* 27 (1997) 471-480.
- [18] H.C. WANG y G. KASPER, *J. Aerosol Sci.* 22 (1991) 31-41.
- [19] M. ALONSO, F.J. ALGUACIL y T. NOMURA, *J. Aerosol Sci.* 32 (2001) 1.359-1.367.
- [20] L.A. SPIELMAN, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 9 (1977), 297-319.
- [21] J.I.T. STENHOUSE, *Physical and Chemical Properties of Aerosols*, I. Colbeck (Ed.), Blackie Academic & Professional, Londres, Inglaterra, 1998, pp. 249-279.
- [22] J. PICH, *Aerosol Science* C.N. Davies (Ed.), Academic Press, Londres, 1996, pp. 223-306.
- [23] I.B. STECHKINA, A.A. KIRSCH y N.A. FUCHS, *Ann. Occup. Hyg.* 12 (1969) 1-8.
- [24] X. NGUYEN y J.J. BEEKMANS, *J. Aerosol Sci.* 6 (1975) 205-212.
- [25] R. LATHRACHE y H. FISSAN, *Staub Reinhalt. Luft.* 49 (1989) 309-314.
- [26] D.A. LUNDGREN y K.T. WHITBY, *I & EC Process Design and Development* 4 (1965) 345-349.
- [27] N. YOSHIOKA, H. EMI, M. HATTORI y I. TAMORI, *Kagaku Kogaku* 32 (1968) 815-820.
- [28] M. ALONSO y F.J. ALGUACIL, *J. Colloid Interface Sci.* 216 (1999) 71-76.
- [29] T. MYOJO, C. KANAOKA y H. EMI, *J. Aerosol Sci.* 15 (1984) 483-489.
- [30] J.A. JAPUNTICH, J.I.T. STENHOUSE y B.Y.H. LIU, *J. Aerosol Sci.* 23 (1992) S761-S764.
- [31] E. SCHMIDT, *Filtr. Sep.* 32 (1995) 789-793.
- [32] O. FILIPPOVA y D. HANEL, *J. Aerosol Sci.* 27 (1996) S627-S628.
- [33] J.A. JAPUNTICH, J.I.T. STENHOUSE y B.Y.H. LIU, *J. Aerosol Sci.* 28 (1997) 147-158.
- [34] D.C. WALSH y J.I.T. STENHOUSE, *J. Aerosol Sci.* 28 (1997) 307-321.
- [35] R.C. BROWN, D. WAKE, D.B. GRAY, D.B. BLACKFORD y G.J. BOSTOCK, *Ann. Occup. Hyg.* 32 (1988) 271-294.
- [36] H. BAUMGARTNER y F. LOEFFLER, *Filtr. Sep.* 24 (1987) 346-351.
- [37] M. SHAPIRO, G. LAUFER y C. GUTFINGER, *Aerosol Sci. Technol.* 5 (1986) 39-54.
- [38] Y. OTANI, C. KANAOKA y H. EMI, *Aerosol Sci. Technol.* 10 (1989) 463-474.
- [39] D.H. MICHAEL y P.W. NOREY, *J. Fluid Mech.* 37 (1969) 565-575.
- [40] L. PARETSKY, L. THEODORE, R. PFEFFER y A.M. SQUIRES, *J. Air Pollut. Control Assoc.* 21 (1971) 204-209.
- [41] K.A. NIELSEN y J.C. HILL, *Ind. Eng. Chem. Fund.* 15 (1976) 149-156.
- [42] K.A. NIELSEN y J.C. HILL, *Ind. Eng. Chem. Fund.* 15 (1976) 157-163.
- [43] R. RAJAGOPALAN y C. TIEN, *AIChE J.* 22 (1976) 523-533.
- [44] G.I. TARDOS, C. GUTFINGER y N. ABUAF, *AIChE J.* 22 (1976) 1.147-1.150.
- [45] G.I. TARDOS, N. ABUAF y C. GUTFINGER, *J. Air Pollut. Control Assoc.* 18 (1978) 354-363.
- [46] G.I. TARDOS y R. PFEFFER, *AIChE J.* 26 (1980) 698-701.
- [47] C. KANAOKA, E. EMI y T. MYOJO, *J. Aerosol Sci.* 11 (1980) 377-386.
- [48] Y. JUNG y C. TIEN, *Aerosol Sci. Technol.* 18 (1993) 418-440.
- [49] E. GAL, G.I. TARDOS y R. PFEFFER, *AIChE J.* 31 (1985) 1.093-1.099.
- [50] M.M. EL-HALWAGI, *Aerosol Sci. Technol.* 13 (1990) 102-115.
- [51] J.R. MELCHER, K.S. SACHAR y E.P. WARREN, *Proc. IEEE* 65 (1977) 1.659-1.668.
- [52] M. SHAPIRO, G. LAUFER y C. GUTFINGER, *Aerosol Sci. Technol.* 5 (1986) 435-445.
- [53] S.A. WALATA, T. TAKAHASHI y C. TIEN, *Aerosol Sci. Technol.* 5 (1986) 23-37.
- [54] T. TAKAHASHI, S.A. WALATA y C. TIEN, *AIChE J.* 32 (1986) 684-690.
- [55] Y. JUNG y C. TIEN, *J. Aerosol Sci.* 22 (1991) 187-200.
- [56] C. TIEN, *Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols*, Butterworths, Boston, 1989.
- [57] K. WARK y C.F. WARNER, *Air Pollution: Its Origin and Control*, Dun-Dunnelle, New York, 1976.
- [58] J.H. TURNER y J.D. MCKENNA, *Handbook Air Pollution Technology*, (S. Calvert y H.M. Englund, Eds.), Wiley, New York, 1984.
- [59] N.A. FUCHS, *The Mechanics of Aerosols*, Dover, New York, 1989. *inertial impact*.