EL MODELO DE SIMULACION DE LA ELIMINACION DE AEROSOL APLICADO AL TUBO DE ENSAYOS DEL INS

Paulino J. García-Nieto[(1)], Julio M. Fernández Díaz[(2)] y Blas Arganza García[(2)]

(1) Departamento de Matemáticas, Universidad de Oviedo, Facultad de ciencias, c/Calvo Sotelo s/n, 33007 Oviedo (Spain).

(2) Departamento de Física, Universidad de Oviedo, Facultad de Ciencias, c/Calvo Sotelo s/n, 33007 Oviedo (Spain).

1 Introducción.

Es evidente que toda actividad humana comporta una perturbación del medio material. Una de esas perturbaciones procede de las labores mineras llevadas a cabo para la extracción del carbón, que es uno de los combustibles fósiles de mayor aplicación como fuente energética (combustible primario o previa transformación).

El riesgo de adquisición de neumoconiosis (silicosis) en los talleres mecanizados de la minería española del carbón se acrecienta progresivamente. La escasa potencia de las capas y la irregularidad de nuestros yacimientos son las causas fundamentales de los elevados niveles pulvígenos medidos en un número importante de labores mecanizados. Además la gran profusión de capas estrechas y de gran inclinación en la minería asturiana, así como las intercalaciones de roca, originan una mayor producción de polvo de alta peligrosidad, debido a su elevado contenido en sílice (SiO_2).

En un intento de resolver el problema que supone la gran cantidad de polvo producido en capas estrechas de carbón, HUNOSA y el Instituto Nacional de Silicosis (INS) han efectuado conjuntamente ensayos para la valoración de nuevos principios básicos empleados en la eliminación

del polvo generado durante las labores de arranque mecanizado. Para llevar a cabo este proyecto de investigación, el INS construyó un túnel de ensayos que permitía efectuar medidas con objeto de comprobar la eficacia de las nieblas como agentes captadores de polvo [1].

En el marco de colaboración de la Universidad de Oviedo con la industria asturiana surge el presente trabajo de investigación, en un intento de desarrollar *"un modelo físico-matemático"* que explique los resultados experimentales relativos a los rendimientos de eliminación BMRC recogidos en el túnel de ensayos del INS. El problema que hemos abordado aquí es de enorme complejidad en su modelización física y matemática, debido a la presencia simultánea de dos fases en movimiento: *partículas sólidas* y *fluido soporte* (aire).

2 Las distribuciones experimentales de los aerosoles de polvo de carbón en las minas subterráneas.

Ante la falta de determinación experimental del Espectro Granulométrico (EG) de los aerosoles de carbón por parte del INS en las minas asturianas, el presente trabajo hace uso de los datos aportados por la División de Polvo y el Centro Tecnológico de Seguridad e Higiene de Pittsburgh [1]. Las distribuciones de tamaño de partículas se determinaron por medio de un análisis de contaje Coulter de las muestras de polvo recogidas en 35 minas que trabajaban en 19 capas. En general, estos datos muestran que los aerosoles de polvo de carbón subterráneo pueden caracterizarse por un diámetro geométrico medio de masa y de número de aproximadamente 6 μm y 0,6 μm respectivamente, y una desviación geométrica típica de aproximadamente 2,4 y éstos valores son los que tomaremos en el presente trabajo para el desarrollo del modelo teórico.

3 Muestreo de aerosol respirable.

La deposición en cada región del tracto respiratorio depende de las propiedades aerodinámicas de las partículas, normalmente descritas en términos del diámetro de las mismas, de las dimensiones de la vía aérea y de las características respiratorias tales como el flujo volumétrico, la frecuencia de la respiración y el volumen de la corriente.

Con el muestreo respirable másico, se hace un intento para separar el aerosol en dos fracciones: *polvo respirable* y *no respirable*. Así el polvo respirable es la distribución de tamaños másica de partículas que se deposita en la región "alveolar". El resto de la masa será polvo no respirable. En 1952 el Consejo Británico de Investigación Médica (BMRC) [4] definió la fracción respirable en términos de la velocidad de caída, por la ecuación:

$$\frac{c}{c_0} = 1 - \frac{v}{v_c} \tag{1}$$

donde c es la concentración de partículas de velocidad terminal v o menor, c_0 la concentración total, y v_c es una constante igual a dos veces la velocidad terminal de caída en aire de una esfera de densidad unidad de 5 μm de diámetro. Basados en estos resultados, en el Congreso Internacional celebrado en Johannesburgo en 1959 [2] se estableció la definición de polvo respirable, cuya definición matemática responde a la fórmula (1) anterior. Esta definición fue considerada insuficiente en los Estados Unidos debido a que estaba ligada con las velocidades terminales de caída. En 1968 la Conferencia Americana para la Higiene Industrial Gubernamental (ACGIH) [4] define polvo respirable de acuerdo con otra curva de retención alveolar. Recientes investigaciones de la deposición total de aerosoles en el tracto respiratorio fueron llevadas a cabo por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos [8] obteniéndose una curva de retención más precisa para tamaños inferiores a 1 μm y con una variación ligeramente diferente para tamaños entre 1 y 10 μm.

En el presente trabajo de investigación se ha tomado el filtro BMRC, dado que los datos relativos a los rendimientos de eliminación suministrados por el INS se tomaron con filtros de retención de polvo con esta curva de retención. No obstante, el programa de ordenador desarrollado (TUBOH) a tal efecto contempla la posibilidad de distinguir entre medidas BMRC, AEC y ACGIH.

4 La modelización teórica de los fenómenos que ocurren en el tubo de ensayos.

El aerosol de polvo de carbón así como las gotas de agua generados en el INS, se eliminan del tubo de ensayos por alguno de los siguientes mecanismos:

(a) *Deposición por sedimentación*: afecta básicamente a las partículas sólidas y gotas, con mayor masa, dentro de los que componen el aerosol de polvo de carbón, y la niebla respectivamente, su eliminación es debida al campo gravitatorio.

(b) *Deposición por centrifugación*: una manera de eliminar partículas (partículas sólidas y gotas de agua) del aire es someterlas a grandes fuerzas centrífugas. Si una partícula de aerosol está obligada a moverse siguiendo una trayectoria circular, tendrá una aceleración radial que puede llegar a ser varias veces la gravedad. Este mecanismo permite eliminar partículas muy pequeñas en las que la influencia de la gravedad no es importante.

(c) *Deposición turbulenta*: es un mecanismo de difusión que tiene su origen en los flujos turbulentos completamente desarrollados que surgen en las tuberías, cuando el flujo sobrepasa el número de Reynolds crítico. Compite con la difusión molecular y su efecto es la eliminación física de partículas (sólidas y gotas) hacia las paredes.

(d) *Efecto Tobera*: su efecto es local debido a la presencia de una tobera en el tubo de ensayos. Es una contracción gradual de la sección lo que origina un cambio en la dirección de las líneas de flujo y, por tanto, la eliminación de aquellas partículas (sólidas y gotas) que, debido a su inercia, no pueden seguir este camino.

(e) *Efecto Difusor*: es un ensanchamiento gradual de la sección del conducto. Su efecto principal es el aumento de la turbulencia del flujo, lo que se modeliza mediante la introducción de un aumento equivalente de la fricción, sumada a la propia del conducto.

(f) *Deposición turbulenta provocada por codos*: un laberinto es un conjunto de tramos rectos unidos por curvas de retorno. Su presencia física en el tubo de ensayos aumenta el tiempo de residencia del flujo dentro del tubo al disminuir su velocidad media. Además introduce turbulencia aguas abajo de cada curva de retorno, lo que se modeliza mediante un incremento del factor de fricción aparente, propio del conducto.

(g) *Deposición por impactación inercial en codos*: la eliminación es debida a la inercia de las partículas (sólidas y gotas), que tienden a continuar a lo largo de sus trayectorias originales, consecuencia de los rápidos cambios de dirección del flujo provocados por la presencia de las curvas de retorno.

(h) *Condensación*: es la formación de nuevas partículas por nucleación de la fase vapor, sobre embriones de moléculas de vapor o sobre un ión o partícula sólida de otra especie distinta. Precisa para ser importante atmósferas sobresaturadas de vapor, lo que se mide a través de la relación de saturación [2-3]. Dado que la relación de saturación es muy pequeña en el tubo de ensayos del INS podemos suponer que su actuación es despreciable. Por lo que, no le dedicamos más espacio en este trabajo de investigación.

(i) *Coagulación de las partículas entre sí*: una población de partículas de aerosol (sólidas y gotas) interaccionan entre sí cuando colisionan y se adhieren, es decir, coagulan. La coagulación no es propiamente un mecanismo de eliminación, sino que tiene un efecto modificador del espectro.

(j) *Coagulación de partículas con gotas de agua*: mediante un eyector se genera una niebla cuyo efecto es la coagulación de las gotas de agua con las partículas que arrastra el flujo. Cuando una partícula interacciona con una gota, es colectada pasando a pertenecer a diferentes zonas del espectro.

(k) *Efecto lluvia*: una gota al describir su movimiento en el seno de un fluido, modifica las líneas de corriente del flujo que la rodea. En consecuencia, puede atrapar partículas en su movimiento, si hay diferencia de velocidades entre la gota y la partícula. Así pues, es posible definir una eficiencia de colisión gota-partícula. Este efecto se produce cuando llueve.

En todas las ecuaciones de la mecánica de fluidos que gobiernan la eliminación de partículas de aerosol de polvo de carbón al ser arrastradas por una corriente de aire soporte, se ha supuesto que el aire es incompresible. Esta aproximación es válida ya que podemos considerar que el fluido está constituido por volúmenes de control macroscópicos que son indeformables y se empujan unos a otros [9].

En el presente trabajo prescindiremos de la parte química de la eliminación y nos centraremos en la dinámica de los procesos de eliminación.

5 El modelo de simulación de eliminación de aerosol aplicado al tubo de ensayos.

En el apartado anterior hemos descrito los fenómenos físicos que implican tanto modificaciones en el espectro granulómetrico, como su eliminación completa de la corriente principal a lo largo del tubo de ensayos. Suponemos que tienen lugar todos los fenómenos de interacción citados (despreciamos la nucleación homogénea y heterogénea, dado que la relación de saturación es menor que 1, resultando su efecto despreciable). Al aplicar el principio de superposición, para la obtención de la "*ecuación general completa*" de la evolución temporal y eliminación de la fase partícula de la corriente de aire soporte que circula por el tubo de ensayos del INS, se obtiene:

$$\frac{dN_v(v)}{dx} = \frac{1}{2\,u(x)} \int_{v_0}^{v} K(v-v', v') N_v(v-v') N_v(v')\, dv' \qquad /1/$$

$$-\frac{1}{u(x)} N_v(v) \int_{v_0}^{v_f} K(v, v') N_v(v') dv' \qquad /1'/$$

$$-N_v(v) \frac{4 v_g(v)}{\pi u(x) D(x)} \qquad /2/$$

$$-N_v(v) \frac{4\,u(x)\,\tau}{\pi\, D(x)\, r} \qquad /3/$$

$$-N_v(v) \frac{4\,k(v)}{u(x)\,D(x)} \qquad /4/$$

$$-N_v(v) \frac{2\,\kappa(v)\,\mathrm{tg}\,\theta}{D(x)} \qquad /5/$$

$$-N_v(v)\,[1-2\varepsilon(v)]\;\delta(x-x^*) \qquad /6/$$

donde los términos /1/ y /1'/ representan la aportación debida al fenómeno de *coagulación*, el término /2/ la debida a *la deposición por gravedad*, el término /3/ a *la deposición por centrifugación*, el término /4/ la debida a *la deposición turbulenta* (tanto la que tiene lugar en tramos rectos de conducto como la provocada por codos) y al *efecto difusor*, el término /5/ se debe al *efecto tobera* y finalmente el término /6/ se debe a *la impactación inercial puntual en codos*, donde x^* es la posición del codo.

6 Transformación de las ecuaciones al espacio *J*.

Suck y Brock [5] estudiaron la evolución del espectro de tamaños de partícula para un aerosol atmosférico, suponiendo que el único mecanismo de interacción actuante era la coagulación. De esta forma la ecuación a integrar para ellos, se reducía a la ecuación general de evolución del apartado anterior sólo con los dos primeros sumandos, /1/ y /1'/.

Para obtener una solución numérica aplicable a un amplio rango de tamaños de partícula, Suck y Brock [5] encontraron que la siguiente transformación volumétrica era muy usada en la resolución de ecuaciones integro-diferenciales similares a la obtenida:

$$v(J) = v(J_0) \cdot 10^{\alpha(J - J_0)}, \tag{2}$$

donde el exponencial 10 puede ser sustituido por otro número. En concreto, Suck y Brock [5] usaron *e* en vez de 10.

Aquí se define J como un número positivo mayor o igual que J_0, $v(J_0)$ es el volumen de partícula para el valor inicial $J = J_0$ y α es un parámetro ajustable, cuyo valor más frecuente es $\alpha = \log\ 2$.

Obsérvese que la transformación al espacio J, es una transformación de un espacio continuo como el de los volúmenes a un espacio J que también es continuo, pero ante la imposibilidad de resolver el caso continuo, la mejor aproximación es suponer que J sólo toma valores enteros y además igualmente espaciados.

Estamos en disposición de poder escribir la ecuación integro-diferencial de evolución del sistema teniendo en cuenta sólo la coagulación en el nuevo espacio J. En efecto:

$$\frac{d\Psi(J)}{dt} = \int_{J_0}^{J_h} K(\tilde{J}, J') \frac{v(J)}{v(\tilde{J})} \Psi(\tilde{J}) \Psi(J') dJ' - \int_{J_0}^{J_f} K(J, J') \Psi(J') dJ', \tag{3}$$

donde:

$$v(\tilde{J}) = v(J) - v(J') \tag{4}$$

$$\tilde{J} = J + \frac{1}{\alpha} \log\ [1 - 10^{\alpha(J - J')}] \tag{5}$$

con J_0 y J_f los límites inferior y superior de J, correspondiendo al tamaño más pequeño y al mayor de partícula de la distribución, respectivamente. El límite superior J_h en la primera integral está dado por:

$$J_h = J - \frac{\log\ 2}{\alpha}, \qquad \text{con} \qquad J \geq 2 \tag{6}$$

El resultado final es una ecuación completa de evolución integro-diferencial y dado que el problema no es estacionario, es un problema de *valor inicial*. Para inicializar el problema se toma en la sección inicial del tubo la distribución de partículas del aerosol de carbón transformada al espacio *J*, es decir:

$$\Psi(J, t=0) = \frac{\alpha}{3\,\rho_p\, v(J)} \cdot \left(\frac{dM_p(v)}{d(\log D_p)} \right)_{t=0} \tag{7}$$

7 Discusión y comparación de resultados.

El sistema de ecuaciones que resulta es *un sistema de ecuaciones integro-diferenciales ordinarias* (SEIDO). Una característica importante del SEIDO obtenido es que puede ser *stiff* (rígido) [7]. Esto quiere decir que los coeficientes del jacobiano del SEIDO:

$$C = J\left(\frac{y'}{y}\right) = \left[\frac{\partial y'_i}{\partial y_j}\right] = [c_{ij}] \tag{8}$$

llamados a veces "constantes de tiempo", se diferencian en varios órdenes de magnitud [6]. Esto implica variaciones lentas en algunas variables dependientes y rápidas en otras al modificarse la variable independiente. Las variables con modificaciones rápidas gobiernan la estabilidad numérica en la integración [7], aunque el error de truncamiento en el cálculo está gobernado por las de variación lenta. Utilizando métodos explícitos de integración del SEIDO [6-7] los pasos de tiempo han de ser pequeños para constantes de tiempo grandes, ya que hay que utilizar pasos de integración Δt tales que:

$$\Delta t \ll \frac{1}{\underset{i,j}{máx} \mid c_{ij} \mid} \tag{9}$$

Esto implica en general tiempos de cálculo elevadísimos. La integración del SEIDO que especifican la evolución espacial y temporal del aerosol de polvo de carbón a lo largo del tubo de ensayos del INS, se llevó a cabo a través de un programa de ordenador desarrollado en lenguaje C (TUBOH) e implementado en un ordenador con sistema operativo UNIX. Para esta integración, se

hizo uso de la subrutina ODEINT que implementa el método de Runge-Kutta Cash-Karp [6] a través de la subrutina RKCK por medio de un control de tamaño de paso adaptativo, previa interpolación con SPLINES cúbicos adaptados de Gerald y Wheatley [10].

Los resultados obtenidos son puntuales en cada sección del tubo. Entre ellos tenemos una salida de rendimientos de eliminación totales (sin filtro) y rendimientos de eliminación BMRC y ACGIH (con filtro) en cada una de las secciones del conducto, incluyendo las tomas isocinéticas.

Una salida puntual principal es el rendimiento de eliminación al final del tubo de ensayos del INS, así como al final de la toma isocinética de salida, que como sabemos es la sección donde nos interesa comparar los resultados del modelo desarrollado con las medidas experimentales obtenidas por el INS, pues es en esta sección donde se midieron los rendimientos de eliminación analizados. También es salida puntual la especificación de la composición del aerosol de polvo de carbón, es decir, el espectro granulométrico de masa a la salida del tubo de ensayos o al final de la segunda toma isocinética. Esta salida nos permite obtener el espectro final del aerosol de polvo de carbón para poder compararlo con el espectro a la entrada del tubo.

La salida continua consistiría en la práctica en mostrar la evolución del espectro granulométrico del aerosol de polvo de carbón a lo largo del conducto en intervalos cortos de la variable espacial x (longitud medida desde la entrada del tubo a lo largo de su eje longitudinal).

8 Conclusiones.

(1) Como resultado del desarrollo del presente trabajo de investigación ha sido posible evaluar la eficacia de determinados sistemas experimentales de aspiración y eliminación de polvo (tubo de ensayos del INS) desde un punto de vista teórico. Los resultados de la modelización podrán aplicarse al estudio de principios de viabilidad de aplicación práctica en los talleres mecanizados.

(2) Al margen de las conclusiones que más adelante se expresan, concernientes a los resultados obtenidos, el trabajo realizado ha propiciado la adquisición de valiosas

experiencias para abordar otras geometrías y otros problemas de mayor entidad y dificultad física desde el punto de vista de la construcción de un modelo matemático. Así el modelo presentado es fácilmente *transportable* a otros dispositivos experimentales.

(3) La construcción del modelo no ha sido lineal, de manera que se han ido incorporando mejoras progresivamente. Esto ha permitido verificar la presencia de fenómenos físicos creados por la propia geometría del tubo de ensayos (efecto tobera, efecto difusor, etc.), mientras otros se deben a las características intrínsecas del flujo.

(4) Para el fichero base (M_{en} = 100 mg/m^3, D_{pg} = 6 μm y σ_{pg} = 2,4) y en los ensayos en seco y directo, el modelo aporta un rendimiento teórico de eliminación global BMRC del 20%, próximo al 25,8% suministrado por las experiencias del INS. En los ensayos en seco y con laberinto de madera, el rendimiento teórico global BMRC es el 32% frente al 33,3% obtenido experimentalmente. Por tanto, el modelo desarrollado se ajusta bien a los resultados experimentales con una concordancia muy aceptable. La presencia del laberinto de madera aumenta el rendimiento de eliminación global BMRC en un 8% aproximadamente respecto a los ensayos en seco y directos, aunque también aumenta la pérdida de carga, con el consiguiente gasto adicional de energía. Su presencia es una solución de compromiso entre un mayor consumo de energía frente a un aumento de la eliminación.

(5) En los ensayos en húmedo y directo, el rendimiento teórico global BMRC es del 68,8% frente al 64,8% obtenido experimentalmente. La concordancia entre la teoría y la experimentación es realmente buena. La ganancia de rendimiento en comparación con los ensayos en seco y directos se sitúa en torno al 43%, es decir, el rendimiento de

eliminación global BMRC se multiplica por 2,7. Así pues, mediante la utilización de nieblas es posible obtener rendimientos muy importantes en la eliminación del polvo respirable en suspensión en una corriente de aire a gran velocidad (hasta el 68%).

(6) La aplicación del modelo a los ensayos en húmedo con laberinto de madera ha permitido obtener un rendimiento de eliminación global BMRC del 95% frente al 96,5% proporcionado por la experimentación (INS). Si intercambiamos el laberinto de madera por uno de PVC, el rendimiento global suministrado por el modelo es del 92% frente al 94,2% de los experimentos. La concordancia entre los rendimientos teóricos suministrados por modelo y los experimentos también es buena aquí. Esto nos indica que los más altos niveles de eficacia se han obtenido haciendo circular el aire aspirado por un laberinto en vía húmeda. No obstante, ello implica una pérdida importante en la capacidad de aspiración del sistema para iguales consumos de agua y aire comprimido.

(7) La eficacia en la eliminación del polvo mediante niebla se consigue con bajos consumos de agua (2 a 3 litros/min), lo que permitirá ensayar equipos de gran capacidad de aspiración con caudales de agua limitados y, por tanto, sin los graves problemas de la pulverización actual.

(8) Los parámetros de entrada importantes en la caracterización del espectro granulométrico del aerosol de polvo de carbón son la concentración másica de partículas, el diámetro geométrico medio y la desviación típica geométrica. Sin embargo, los dos últimos no fueron medidos experimentalmente en el INS. De ahí la incertidumbre existente sobre los parámetros que caracterizan los aerosoles de polvo de carbón generados artificialmente por ellos.

(9) En todos los ensayos abordados teóricamente con el modelo desarrollado, los rendimientos de eliminación BMRC son mayores al crecer el diámetro geométrico medio del espectro (para una desviación típica fija). Además, la representación gráfica de las masas BMRC de entrada frente a las masas BMRC de salida son aproximadamente rectas, de mayor pendiente a medida que se incrementa el diámetro geométrico medio de la distribución. Una consecuencia importante es que la tasa de eliminación es "lineal" respecto a la concentración.

(10) Los rendimientos globales de eliminación frente a la variación del diámetro medio del espectro granulométrico, presentan un comportamiento asintótico, y a partir de un cierto diámetro (entorno a 10 μm), el rendimiento global de eliminación BMRC es constante y aproximadamente independiente del diámetro geométrico medio. Esta consecuencia se observó en todos los ensayos a los que se aplicó el modelo.

(11) El efecto lluvia ha sido despreciado como mecanismo de eliminación de partículas de aerosol de la corriente principal, ya que depende de la diferencia de velocidades entre las partículas y las gotas colectoras. Como ya se indicó previamente, en un tiempo muy pequeño, esta diferencia es nula ya que se alcanza la velocidad de régimen, lo que implica que no hay eliminación debido a este mecanismo.

(12) El modelo físico-matemático desarrollado en el presente trabajo de investigación no estará completo sin incluir otros fenómenos como por ejemplo la triboelectrificación. La presencia de partículas de aerosol cargadas modifica el coeficiente de coagulación debido a la actuación de las fuerzas de Coulomb y las fuerzas de van der Waals [2]. Este mecanismo será estudiado en detalle e incorporado al modelo en posteriores mejoras del mismo.

(13) Los problemas reales de la ingeniería casi siempre desbordan los intentos de una modelización teórica completa de los fenómenos físicos imbricados en la dinámica del problema. Esto hace necesaria una simplificación de los problemas multivariables, restringiéndose el estudio a aquellas variables que el investigador considera fundamentales en el control del proceso. Los criterios de selección de estas variables dependen de la comparación de los resultados del modelo desarrollado con las medidas experimentales.

(14) Los resultados obtenidos permiten abordar las líneas de investigación futura aplicando los principios estudiados a diferentes prototipos adaptados a las rozadoras.

(15) En resumen, en el presente trabajo se caracterizaron físicamente y matemáticamente los mecanismos responsables de la eliminación y modificación del espectro granulométrico del aerosol de polvo de carbón a lo largo del tubo de ensayos del INS, así como los rendimientos de eliminación globales BMRC para los diferentes tipos de ensayos experimentales considerados.

9 Nomenclatura.

$N_v(v)$ Distribución de tamaños de partícula de aerosol por unidad de volumen.

$u(x)$ Velocidad del flujo soporte (aire) a la distancia x de la sección de entrada medida a lo largo del eje longitudinal del tubo.

$K(v, v')$ Coeficiente de coagulación entre partículas de volumen v y partículas de volumen v'.

$v_g(v)$ Velocidad terminal de sedimentación de una partícula de volumen v.

$D(x)$ Diámetro del conducto en la sección x.

r Radio de curvatura de las líneas de flujo en la deposición por centrifugación.

τ	Tiempo de relajación característico de la partícula.
k	Coeficiente de transferencia de masa o tasa de eliminación turbulenta por unidad de superficie de pared: velocidad de deposición turbulenta.
κ	Número de Davies para el efecto tobera.
θ	Semiángulo del cono de la tobera.
$\varepsilon(v)$	Rendimiento global de eliminación debido a la impactación inercial en codos.

10 Referencias.

[1] Tomb, T.F., Treaftis, H.N. and Gero, A.J.: Characteristics of Underground Coal Mine Dust Aerosols, Dust Division, Pittsburgh Health Technology Center (1982).

[2] Seinfeld, J.H.: Atmospheric Chemistry and Physics of Air Polution. John Wiley & Sons, New York (1986).

[3] Friedlander, S.K.: Smoke, Dust and Haze. Fundamentals of Aerosol Behavior. John Wiley & Sons, New York (1977).

[4] Reist, P.C.: Introduction to Aerosol Science.Macmillan Publishing Company, New York (1984).

[5] Suck, S.H. and Brock, J.R.: Evolution of Atmospheric Aerosol Particle Size Distributions via Brownian Coagulation: Numerical Simulation. J. Aerosol Sci., Vol 10. pp. 581-590. Pergamon Press Ltd., London (1979).

[6] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P.: Numerical Recipes in C. Cambridge University Press, London (1992).

[7] Marshall, G.: Solución Numérica de Ecuaciones Diferenciales. Tomo 1: Ecuaciones Diferenciales Ordinarias. Reverté S.A., Barcelona (1985).

[8] U.S. Environmental Protection Agency: Air Quality Criteria for Particulate Matter and Sulfur Oxides, Report No. EPA-600/8-82-029.

[9] White, F.: Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill de México (1983).

[10] Gerald, C.F. and Wheatley, P.O.: Applied Numerical Analysis. Addison-Wesley, New York (1989).