Diseño y Construcción de un Impactador de Cascada para la Determinación de la Distribución de Tamaño de Material Particulado Suspendido en el Aire

Daniel José Beltrán Villegas*; Néstor Y. Rojas**.

Resumen

Se diseñó y construyó un impactador de cascada de bajo volumen para el muestreo de material particulado suspendido en gases y la determinación de su distribución de tamaño. El impactador clasifica las partículas en diversos tamaños por medio de etapas que aceleran el aerosol a través de orificios y luego provocan un cambio de 90° en su dirección de flujo, reteniendo las partículas que, por su inercia, choquen contra un sustrato de impactación.

El impactador está diseñado para separar las partículas del aerosol en ocho etapas, desde 20 mm hasta 0.4 mm, y retenerlas sobre sustratos de fibra de vidrio. El flujo de aerosol es inducido por una bomba de vacío con capacidad de hasta 100 L/min, e ingresa al equipo a través de un tubo o manguera de aspiración. Se usa además un árbol de manómetros para la medición de la presión de vacío a la entrada de la bomba, un rotámetro con capacidad de medir flujos hasta 70 L/min y una válvula de sobrepaso para modular el flujo a través de la sección de prueba.

Las condiciones de diseño fueron 20°C, 560 mmHg y un flujo de 30 L/min. Las etapas de impactación varían en el número y diámetro de orificios de aceleración, entre 2 y 42 orificios, y entre 0.5 y 15 mm.

El equipo ha sido probado para verificar su hermeticidad, y capacidad de flujo con resultados satisfactorios. Se empezarán a realizar pruebas de calibración y primeras mediciones en proyectos siguientes.

Palabras claves: Aerosol, Material particulado, Impactación inercial

Abstract

A low-volume cascade impactor was designed and built, with the aim of sampling suspended particulate matter in aerosols and determining its size distribution. The impactor classifies the aerosol particles according to their sizes, by the use of stages that increase the aerosol velocity through orifices and then change the flow direction by 90°. The particles that, owing to their momentum, hit an impaction substrate, will be retained and separated from the aerosol.

* Ingeniero Químico, Universidad de Los Andes

** Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes

The impactor is designed to classify the aerosol particles in eight stages, from 20 mðm down to 0.4 mðm, and collect them onto fibre glass substrates. The aerosol flow is induced by a vaccum pump with a maximum flow of 100 L/min, and enters the equipment through a sampling inlet or hosepipe. A set of manometers allows pressure measurement at the pump inlet, and a flowmeter (0 - 70 L/min) and a bypass valve are used to control the aerosol flow through the impactor.

The design conditions were 20°C, 560 mmHg and an aerosol flow of 30 L/min. Impaction stages differ in orifice number and diameter, between 2 and 42 orifices, between 0.5 and 15 mm.

The impactor was leak tested to verify it was hermetic and kept its flow capacity. Calibration tests and measurements will start in forthcoming projects.

1. Introducción

El material particulado (MP) es uno de los contaminantes más importantes del aire ambiente y de los ambientes de trabajo. Sus efectos sobre la salud humana han sido comprobados, aunque su mecanismo de acción aún no ha sido completamente explicado [1-6, 11, 12]. Es también el más complejo de los contaminantes atmosféricos, y su caracterización completa implica el conocimiento de su concentración en el aerosol, su composición química y su distribución de tamaño de partícula [7-10]. Ésta última característica ha cobrado cada vez más importancia, dada la evidencia de los efectos de inflamación e irritación de los alvéolos pulmonares causados por las partículas finas, con diámetros menores a 1μm, e incluso menores a 50nm [1, 3].

Diversas técnicas se han desarrollado para la determinación de la distribución de tamaño de partículas en un aerosol, dentro de las cuales la movilidad inercial y la movilidad eléctrica han tenido gran importancia [17]. La movilidad inercial se basa en las propiedades aerodinámicas del aerosol, representadas por el diámetro aerodinámico equivalente, que se define como el diámetro de una esfera de densidad unitaria ($\rho = 1$ g/cm^3) que tiene la misma velocidad de asentamiento que la partícula en cuestión. De los equipos que han utilizado este principio para clasificar partículas de aerosoles se denominan impactadores [18].

Los impactadores son usados para la caracterización de aerosoles en diversos ambientes, entre los cuales se destacan la atmósfera urbana y rural, los ambientes de trabajo, las emisiones de fuentes de combustión, sea móviles [16] o fijas. De esta manera, pueden ser utilizados en estudios sobre efectos de la contaminación o del ambiente de trabajo sobre la salud. Igualmente, son útiles en la optimización de sistemas de combustión y la determinación de fuentes de emisión. Otras aplicaciones incluyen el análisis de medicamentos en forma de aerosol y la producción de materiales a partir de aerosoles [15].

El impactador diseñado en este trabajo utiliza las diferencias en movilidad inercial de las partículas, es decir, su capacidad de continuar un movimiento rectilíneo cuando el flujo de aerosol cambia de dirección, para clasificar las partículas en ocho intervalos de tamaño. Cada intervalo requiere de una etapa de impactación, que consta de: a) una sección de aceleración del aerosol, a través de los orificios de una placa perforada; y b) una sección de impactación, que es una placa perpendicular a la dirección del flujo acelerado [15]. Las partículas que en una etapa determinada logren continuar una trayectoria rectilínea en tanto que el aerosol cambia de dirección en 90° son atrapadas por un sustrato fibroso (filtro), poroso (espuma de poliuretano) o adherente (grasa de silicona). Las partículas que no son atrapadas en las etapas de impactación son separadas del gas de arrastre en por filtración en la última etapa.

2. Principios de diseño del impactador

El equipo clasifica las partículas según su tamaño basándose en que las partículas con más inercia son menos capaces de seguir con el flujo de gas al cambiar éste súbitamente de dirección. En la primera etapa, luego de acelerar el aerosol por medio de los agujeros, las partículas superiores al diámetro de corte (d_{50}) de la etapa impactan contra el sustrato de fibra de vidrio, donde permanecerán, dejando el flujo de gas con las partículas más pequeñas. En las siguientes etapas se realiza el mismo proceso, con diámetros de corte menores, hasta que luego de la última etapa el aerosol sólo contiene las partículas más pequeñas de aquellas originalmente admitidas al impactador. La separación de estas partículas de la fase gaseosa se logra a través de un filtro de microfibra de vidrio. Con base en la diferencia de peso de los sustratos de impactación y el filtro final, antes y después del muestreo por un tiempo determinado, se determina una distribución de tamaño del aerosol basada en masa.

El diseño del impactador se basa en la ley de Stokes, la cual establece una relación para la fuerza de arrastre de un fluido sobre las partículas. De esta relación, se obtiene el valor del tiempo de relajación para una partícula, definido como el tiempo que se demora la partícula en variar su velocidad cuando el fluido que la contiene cambia súbitamente de velocidad o dirección:

$$\tau = \frac{1}{18}\frac{d^2(\rho_p - \rho_g)}{\mu} \text{ [18]} \qquad (1)$$

Se considera que la partícula alcanza la misma velocidad y dirección del fluido que la acarrea después de un tiempo de 3τ.

Si durante el tiempo de relajación, la partícula mantiene una velocidad constante u a la cual el aerosol ha sido acelerado, ésta recorre una distancia:

$$\delta = \tau u \text{ [18]}, \qquad (2)$$

denominada distancia de parada de la partícula. En una etapa de impactación, esta sería la distancia de entre la sección de aceleración y la de impactación.

La relación entre la distancia de parada y la mitad del diámetro del orificio se conoce como número de Stokes, y representa la eficiencia de captación de la partícula en la sección de impactación.

$$Stk = \frac{2\tau u}{W} \text{ [18]} \qquad (3)$$

Para cada diámetro de partícula existe un número de Stokes asociado, el cual, a su vez, está ligado a una eficiencia de captación. Experimentos realizados por varios autores [18] han mostrado que el número de Stokes se mantiene constante para ciertas condiciones. Para orificios circulares en la sección de aceleración, dichas condiciones son:

- Número de Reynolds del aerosol fluyendo en el orificio entre 500 y 3000.
- Relación entre el espesor de la placa perforada y el diámetro de cada orificio superior a 0,5.
- Relación entre la distancia entre placas y el diámetro del orificio superior a 1.

El valor que toma la raíz del número de Stokes para una eficiencia de recolección del 50% a dichas condiciones es de 0,46.

En el caso de las partículas ultrafinas, las cuales tienen un tamaño comparable a la trayectoria media libre del gas en el que están suspendidas, debe contarse el efecto de "deslizamiento" producido por los choques de las partículas contra las moléculas del gas en el planteamiento de la ley de Stokes. Esto se logra incluyendo el factor de corrección de Cunningham (Cc)., que tomar un valor de 1 para partículas grandes, y dependen de la siguiente relación para partículas de diámetro aerodinámico menor a 1μm:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d}\left[A + q\exp\left(-\frac{bd}{2\lambda}\right)\right], \text{ [18]} \qquad (4)$$

donde los valores A, b y q son constantes, d es

el diámetro de la partícula y λ es la trayectoria media libre del gas.

Con los elementos anteriormente descritos, es posible definir diversos diseños de las etapas de impactación (número y diámetro de orificios, distancia entre secciones de aceleración e impactación) para lograr una separación de partículas en varios intervalos de tamaño. Las condiciones de diseño son 20°C, 560 mmHg, y un flujo de aerosol a través del impactador de 30 L/min.

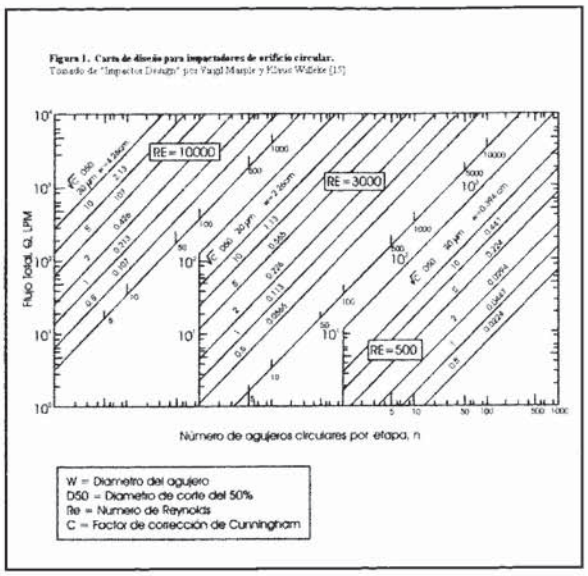
La caída de presión más importante a través del impactador se encuentra en los orificios de las placas agujereadas y en el filtro de recolección final [Weingartner]. Su adición, debe ser menor que la presión de operación (560 mmHg en Bogotá).

3. Metodología de diseño

El primer paso del diseño de las etapas es el establecimiento de los diámetros de corte deseados, es decir, los diámetros para los cuales hay una eficiencia de captación del 50%. A partir de ellos, y por medio de la Figura 1, es posible obtener valores aproximados para el diámetro de orificio y el número de orificios para cada etapa, fijando un número de Reynolds entre 500 y 3000. El diámetro de corte calculado a partir de la configuración de orificios en una etapa es:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9Stk_{50}\mu\pi NW^3}{4C_c\rho_p Q}} \quad [18] \qquad (5)$$

Por medio de una hoja de cálculo, es posible obtener el diámetro de corte correspondiente a una configuración de orificios (tamaño y número de ellos), siguiendo lo asumido anteriormente para el número de Stokes. A partir de los valores iniciales se puede hacer variar la configuración para ajustarla a los tamaños de corte deseados, a los tamaños de orificio que puedan construirse con brocas comerciales, a números enteros de orificios, etc.



4. Resultados del diseño

Para las condiciones de diseño de 30 L/min de aerosol a través del impactador a 20°C y 560 mmHg, se obtuvieron los tamaños de orificio, número de orificios, diámetros de corte y caída de presión mostrados en la Tabla 1. El esquema de una etapa típica se muestra en la Figura 2. La Figura 3 muestra una foto de las piezas del equipo ya terminado y el equipo ensamblado.

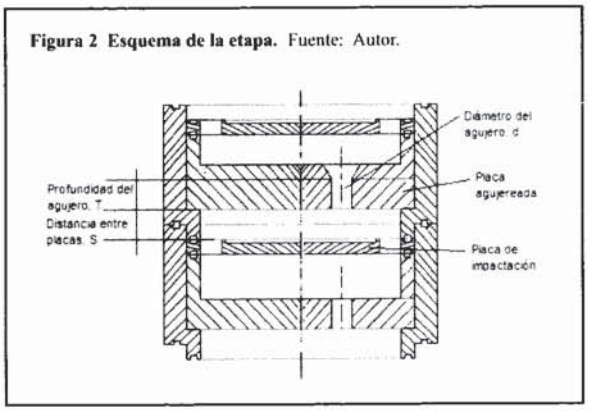
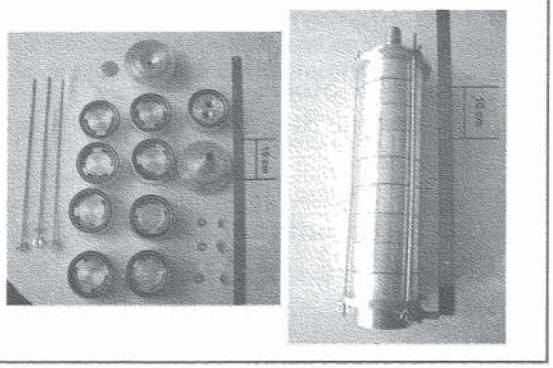


Figura 2 Esquema de la etapa. Fuente: Autor.

El equipo fue construido en aluminio, debido a su baja densidad y a su facilidad de maquinado. Las uniones de tubería para la succión y la descarga son de 1 plg y 3/8 plg, respectivamente. Se seleccionaron filtros de microfibra de vidrio de 55 mm de diámetro con 1.6 μm de tamaño de poro como sustratos

de recolección de las partículas en cada etapa, así como para la etapa final, de filtración. El sello entre las etapas se logró por medio de "O" Rings de caucho y tres tornillos de atiesamiento. En el resto del sistema, el sello fue logrado por medio de cinta de teflón ó por abrazaderas a los acoples de las mangueras.

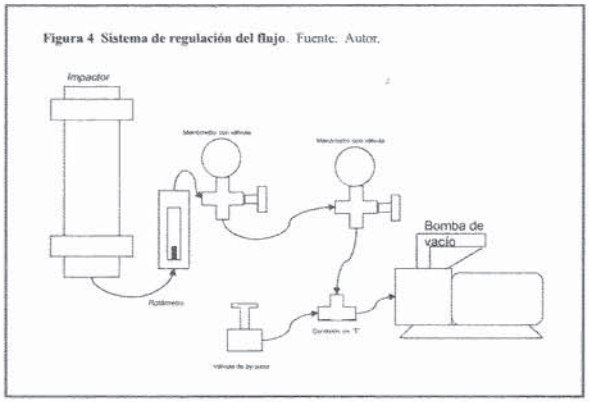
Figura 3 Piezas del equipo y equipo ensamblado. Fuente: Autor



El sistema de regulación de flujo consta de un rotámetro de aire, con capacidad máxima de 100 pies cúbicos por hora, y una válvula de aguja de acero inoxidable, ambos en una configuración de by-pass para evitar forzar la bomba de vacío.

La Figura 4 muestra un esquema del sistema de regulación del flujo, donde se ven la bomba de vacío, los manómetros, y el equipo en la configuración adoptada.

Figura 4 Sistema de regulación del flujo. Fuente: Autor.



5. Prueba de fugas y sello

La predicción de tamaño de partícula captada por cada etapa del equipo depende en cierto grado de la presión en la etapa, por lo que una entrada adicional de gas cambiaría el diámetro de corte, además de añadir partículas nuevas al sistema.

Se hizo una prueba de fugas con presión positiva al impactador, por medio de un compresor de hasta 100 psi conectado a la descarga del impactador y agua jabonosa como indicador de posibles fugas. La prueba permitió mejorar el sello del impactador hasta lograr una configuración libre de entradas o salidas indeseables de aerosol.

6. Conclusiones

La construcción del impactador requiere de una manufactura de alta precisión, principalmente en las etapas de impactación de partículas muy finas. En ellas, el reducido diámetro de diseño de los orificios requiere de una fresa en buen estado y una broca extremadamente fina. En la última etapa, los orificios son tan pequeños, que es fácil taladrar un orificio nuevo en un lugar indeseado, por lo cual se sugiere refabricar la etapa por medio de técnica distinta, como puede ser el ataque químico.

Es necesario llevar a cabo una calibración del impactador, a pesar de que diversos estudios han mostrado que en la construcción de equipos similares, los diámetros de corte de las etapas medidos corresponden con alta precisión a los diseñados [15].

La calibración del equipo requiere de un generador de aerosoles, por medio del cual puede determinarse la eficiencia de recolección de partículas para cada etapa y para cada tamaño de partícula [13, 14, 15].

Adicionalmente, se recomienda medir las pérdidas de material particulado en las paredes del equipo, por medio de un método fluorimétrico [16].

Agradecimientos

El equipo se construyó con apoyo del CIFI, Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, a través del Fondo de Investigación.

Anexo

Variables y Símbolos utilizados
δ, Distancia de parada de una partícula.
λ, trayectoria media libre del gas.
μ, viscosidad dinámica del gas.
ρ_g, densidad del gas.
ρ_p, densidad de la partícula.
τ, tiempo de relajación de una partícula.
A, constante usada para calcular Cc.
b, constante usada para calcular Cc.
Cc ó C, Factor de corrección de Cunningham.
d, diámetro de partícula.
D_{50} ó d_{50}, diámetro de corte de partícula al 50% de eficiencia de recolección.
N ó n, número de orificios en una placa.
Q, Flujo volumétrico de gas.
q, constante usada para calcular Cc.
Re, número de Reynolds basado en el tamaño del orificio.
Stk, número de Stokes
Stk_{50}, número de Stokes de 50% de eficiencia de recolección.
u, velocidad del gas.
W, diámetro del orificio.

Corte supuesto	Etapa	diámetro de corte (micras)	Número de agujeros	Diámetro del agujero (mm)	Reynolds
19	1	18,95	2	15	1364,67
9	2	8,96	3	8	1705,63
8	3	8,22	6	6	1136,31
4	4	4,04	12	3	1135,69
2,5	5	2,49	16	2	1274,89
2	6	2,00	25	1,5	1081,2
0,65	7	0,65	33	0,7	1741,18
0,4	8	0,41	42	0,5	1725,62
	Filtro	0			

Bibliografía

[1] A. Seaton, W. MacNee, K. Donaldson and D. Godden. Particulate air pollution and acute health effects, The Lancet, Vol. 345, 1985, pp.176-178.

[2] Health Effects Institute (HEI), Diesel Exhaust: A Critical Analysis of Emissions, Exposure and Health Effects. Cambridge, MA, 1995.

[3] Harrison, Roy. Yin Jianxin. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?. The Science of the Total Environment, 249, 2000. pp. 85-101.

[4] Solarte, Iván; Caicedo, Mónica; Restrepo, Sonia. Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Santafé de Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 1999.

[5] Aristizábal, Gustavo; Suescún, Jorge; Patiño, Rosa Isabel. Contaminación del Aire y Enfermedad Respiratoria en Población Infantil de Puente Aranda, Santafé de Bogotá, 1997). Universidad el Bosque. Bogotá, 1997.

[6] Chen, L., Thurston, G., "World trade center cough", The Lancet supplement, vol 360, Diciembre 2002, pp s37,s38.

[7] Didyk, Borys M.; Simoneit, Bernd R.T.; Pezoa, L. Alvaro; Riveros, M. Luis; Flores, A. Anselmo. Urban aerosol particles of Santiago, Chile: organic content and molecular characterization. Atmospheric Environment, 34, 2000. pp 1167-1179.

[8] Tsapakisa, Manolis; Lagoudakia, Evaggelia; Stephanou, Euripides G.; Kavouras, Ilias G.; Koutrakis, Petros; Oyolac, Pedro; von Baer, Dietrich. The composition and sources of PM2.5 organic aerosol in two urban areas of Chile. Atmospheric Environment, 36, 2002. pp 3851–3863.

[9] Maura, Regina; Andrade, Maria de Fátima; Worobiecb, Anna; Van Grieken, René. Characterisation of aerosol particles in the Yin Sao Paulo Metropolitan Area. Atmospheric Environment, 36, 2002. pp 345–352.

[10] A.G. Clarke; U, G.A. Azadi-Boogar; G.E. Andrews. Particle size and chemical composition of urban aerosols. The Science of the Total Environment, 235, 1999 pp. 15-24.

[11] Liu, L., "Health effects of Particulate Matter & Urban Air Pollution", Health Canada, Junio 2000. Tomado de www.windsorworkshop.ca/downloads/Liu.pdf, consultada el 27 de Enero del 2004.

[12] Office of air quality and standards, "PM – How the particulate matter affects the way we live and breathe", Noviembre 2000, http://www.epa.gov/air/urbanair/pm/index.html, consultada el 23 de Enero del 2004.

[13] Kwon, S., Lim, K., Jung, J., Bae, G., Lee, K., "Design and calibration of a 5-stage cascade impactor (K-JIST cascade impactor)", Journal of Aerosol Science, vol 34, 2003, pp 289-300.

[14] Philip Demokritou, SeungJoo Lee, Stephen T. Ferguson, Petros Koutrakis. A compact multistage (cascade) impactor for the characterization of atmospheric' aerosols. Journal of Aerosol Science, 35, 2004. pp 281–299.

[15] Marple, V., Willeke, K., "Impactor design", Atmospheric Environment, vol 10, 1976, pp 891-896.

[16] Mohr, M., Forss, A., Steffen, D., "Particulate emissions of gasoline vehicles and influence of the sampling procedure", SAE 2000 world congress, Detroit, Michigan, Marzo 2000, pp 1-10.

[17] De Nevers, N., "Ingeniería de control de la contaminación del aire", McGraw Hill, 1998.

[18] Reist, P., "Aerosol Science and Technology", 2ed, McGraw Hill, 1993.

[19] Weingartner, E., Haller, P., Burtscher, H., Baltensperger, U., "Pressure drop across fiber filters", Journal of Aerosol Science, vol 27 supl 1, 1996, p s639,s640.