

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE C.C. QUÍMICAS
Departamento de Ingeniería Química



**DISEÑO, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA
INTEGRADO DE CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS
DE AEROSOL**

**MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
POR Jesús Javier Rodríguez Maroto**

Bajo la dirección del Doctor:
José Miguel Rodríguez Maroto
Madrid, 2003

ISBN: 84-669-1844-2



**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE QUÍMICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**

TESIS DOCTORAL

***DISEÑO, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DE UN
SISTEMA INTEGRADO DE CARACTERIZACIÓN
DE PARTÍCULAS DE AEROSOL.***

JESÚS JAVIER RODRÍGUEZ MAROTO

MADRID, 2003

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE QUÍMICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

***DISEÑO, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DE UN
SISTEMA INTEGRADO DE CARACTERIZACIÓN
DE PARTÍCULAS DE AEROSOL.***

*Memoria que, para optar al grado de Doctor en Ciencias Químicas,
presenta el Licenciado: D. Jesús Javier Rodríguez Maroto.*

Director:

*Profesor Titular Dr. D. José Miguel Rodríguez Maroto.
Departamento de Ingeniería Química.
Facultad de Ciencias.
Universidad de Málaga.*

Fdo : VºBº

Tutor:

*Catedrático Dr. D. Julio Tijero Miquel
Departamento de Ingeniería Química
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Complutense de Madrid*

Fdo : VºBº

Jesús Javier Rodríguez Maroto.

Fdo :

MADRID, 2003

José Miguel Rodríguez Maroto, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Málaga.

CERTIFICA: Que la presente memoria, titulada “Diseño, Validación y Aplicación de un Sistema Integrado de Caracterización de partículas de Aerosol”, que presenta el licenciado D. Jesús Javier Rodríguez Maroto para aspirar al grado de Doctor en Ciencias Químicas, ha sido realizada bajo mi dirección y cumple, a mi juicio los requisitos necesarios para ello.

Lo que firmo a los efectos oportunos en Málaga, a 24 de Febrero de 2003.

José M. Rodríguez Maroto
Profesor Titular de Ingeniería Química
De la Universidad de Málaga

A mis padres
y
Para Isabel,
Alejandro, y Sara,
con todo mi cariño.

La ciencia es incapaz de resolver los últimos misterios de la naturaleza, porque en el último análisis nosotros mismos somos parte de la naturaleza, o sea parte del misterio que tratamos de resolver.

Max Planck.

Agradecimientos.

Este trabajo ha sido llevado a cabo como parte de los proyectos PIE nº131.09; CICYT AMB96-1211.C01/02 y CAM N°07M/0043/1999. En los que directa o indirectamente han contribuido las siguientes instituciones o empresas: OCIDE (Oficina de Coordinación de la Investigación y Desarrollo Electrotécnico); ENDESA (Empresa Nacional de Electricidad, S.A., ASINEL (Asociación de Investigación Industrial Eléctrica); IA/CSIC (Instituto de Acústica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas); IE/CSIC (Instituto de Electrónica de Comunicaciones del CSIC) y DURO FELGUERA. A todas ellas, así como a las personas que han estado de alguna forma involucradas doy las gracias por haber hecho posible esta investigación.

La experimentación fue realizada en las instalaciones del Departamento de Combustibles Fósiles del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas), bajo la dirección del Dr. Manuel Martín Espigares y Juan Otero Becerra.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los integrantes del Proyecto de Tecnología de Aerosoles en Generación de Energía: Dr. Francisco J. Gómez Moreno, José L. Dorronsoro Arenal, Rafael Muñoz Bueno, David Sanz Rivera, Dra. Nely Carreras Arroyo, Luis M. del Hoyo Sorriquet, Rosa Pérez Pozo, Javier Puras Robles, M^a Carmen Blanco López, Pedro Bermúdez Ugena, Javier Gallego Díaz y Anastasio Fernández Benítez; a los del Proyecto de Combustión especialmente a Alberto Bahillo Ruiz, al Dr. Andrés Cabanillas Cabanillas y a la Dra. Lourdes Armesto López. A Damián Soto Pardo y Rosa Agudo Solís, por su apoyo en Delineación, y a Javier Asúa Orbiso por su ayuda en la búsqueda bibliográfica. Asimismo, he de manifestar mi agradecimiento al Grupo de Materiales Estructurales en Plantas Energéticas y al Laboratorio General de Química Analítica del CIEMAT También he de agradecer la inestimable colaboración del Dr. Enrique Riera Franco de Sarabia (IA/CSIC) y del Dr. Miguel Acha Hurtado (ASINEL).

Por último hago constar mi agradecimiento al Claustro de Profesores de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid y en particular al Departamento de Ingeniería Química. En especial, al Profesor Dr. Julio Tijero Miquel de ese Departamento como tutor de esta tesis doctoral. Finalmente, deseo dar las gracias a mi director de tesis, el Profesor Dr. José M. Rodríguez Maroto del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de Málaga por su dirección, su apoyo técnico, sus innumerables consejos y su ayuda en la elaboración de este estudio.

RESUMEN.

RESUMEN

El presente documento constituye una propuesta de metodología de caracterización completa de partículas de aerosol para emisiones industriales, aunque su versatilidad hace posible su utilización en medidas de inmisiones o del medioambiente.

El sistema de muestreo y medida más sencillo y común está formado básicamente por un conducto de la menor longitud posible, y un portafiltros como instrumento de medida, tal como rezan la mayoría de las normativas actuales de muestreo y medida de partículas.

Con ello, el sistema de muestreo cumple el objetivo de servir de nexo de unión entre el punto de muestreo y el instrumento de medida, y se evitan las perturbaciones de la muestra original, debidas a la deposición, condensación, coagulación etc. con lo que se obtiene una eficacia de transporte máxima.

La información que se obtiene utilizando sistemas tan sencillos es escasa y puede dar lugar a interpretaciones equivocadas de los fenómenos que implican a las partículas. Por ejemplo, un sistema de filtración para emisiones podría presentarse como muy eficaz y, sin embargo, no retener la mayoría de las partículas. Esto ocurriría si la mayor parte de las partículas contenidas en la corriente tratada tiene un tamaño muy pequeño (poca masa) y no son retenidas, y sólo algunas, de tamaño mucho mayor (mucha masa), son separadas; con lo que la eficacia en masa sería muy alta. De igual forma ocurriría, si las partículas no retenidas fuesen las más tóxicas.

El importante efecto de las partículas sobre el medioambiente y sobre la salud, hace necesario que los análisis de emisiones permitan una interpretación adecuada de los fenómenos que impliquen a los aerosoles y para ello se requieren tecnologías de medida más complejas. La instrumentación de medida de partículas ha evolucionado suficientemente en los últimos años para disponer de numerosos equipos. No obstante, ninguno de ellos es capaz, por sí sólo, de medir todas las partículas, y cada uno de ellos limita su funcionamiento a un intervalo de tamaño de partícula. Por consiguiente, la caracterización completa exige la utilización de varios instrumentos, con el fin de cubrir todo el intervalo de existencia.

En este estudio, se propone una metodología de caracterización de aerosoles para realizar medidas de campo, basada en la disposición acoplada en paralelo de varios equipos de medida de partículas, algunos propios de laboratorio. En el sistema propuesto, el punto de partida no es, por tanto, la sencillez, porque se pretende la utilización simultánea de varios instrumentos y se requiere un acondicionamiento previo de la muestra.

La medida simultánea con distintos equipos, permite comparar datos correspondientes a una misma muestra. Para ello, se hace necesario dividir la muestra principal en varias muestras secundarias, dirigidas a cada uno de los instrumentos. Esto se consigue con un divisor de flujo en la línea de muestreo.

Se utilizan un contador óptico para medir el número de partículas micrométricas, un impactador de cascada para medir la distribución de masa, un filtro para la concentración total en masa, un dispositivo de muestreo sobre láminas para posterior análisis por microscopía electrónica y un clasificador por movilidad eléctrica junto a un contador de núcleos de condensación para medir el número de partículas submicrométricas. El funcionamiento de los dos últimos equipos requiere el acondicionamiento de la muestra. Esto supone la separación de partículas indeseables, el submuestreo hacia el clasificador electrostático y el secado de la muestra. Por ello, en el sistema de muestreo se han incorporado los siguientes dispositivos: ciclón, cámara de muestreo, secador por difusión y preimpactador.

Todas estas adaptaciones fueron validadas en el laboratorio con bancos de calibración, diseñados para tal objeto, determinando para cada uno de estos equipos la eficacia de transporte en las condiciones de muestreo. El análisis de resultados permitió la definición de ecuaciones empíricas sencillas, que relacionaban la eficacia de transporte, con el caudal de muestreo. De esta forma se consigue corregir las medidas realizadas, permitiendo aproximar los resultados de las medidas a la muestra real.

El trabajo realizado, que constituyó el diseño, validación y aplicación del sistema de muestreo y medida de partículas, se desarrolló en el marco de varios proyectos más amplios con el objetivo de validar un sistema de filtración basado en la aglomeración acústica y la precipitación electrostática. Por ello, una de las aplicaciones de la metodología presentada en este documento está referida a la validación de un precipitador electrostático o electrofiltro (ESP) y una cámara de aglomeración acústica. Así como a la

caracterización previa de las partículas, objeto de este tratamiento: combustión de carbón y de gasoil. Asimismo, el sistema ha sido utilizado para caracterizar las emisiones de un motor Diesel de 0,5 MW para cogeneración, las de combustión de biomasa en un lecho fluido y las de un motor Diesel de baja velocidad de 14 MW para generación de energía eléctrica.

SUMMARY

The present document constitutes a methodology proposal for a complete characterization of aerosol particles from industrial emissions, although its versatility makes possible its use in inmissions or environment.

The use of a sampling system in order to reach its objective, as link between the sampling point and the measure instrument, is the simplicity, because in this way we avoid the disturbances of the original sample, caused by the deposition, condensation, coagulation

etc and obtain a maximum transport efficiency. That is why, the more ordinary sampling and measure system will be formed by a pipe so short as possible and a filter holder as a measure instrument, such as say the most present sampling and measure particles regulations.

The information obtained using such a simple systems is limited and it can lead wrong interpretations of the phenomenon that involving the particles. For instance, a filtration system could be presented as a very efficient system but it does not retain the majority of the particles. This would happen if most of the particles into a flow had a very small size (little mass) and were not filtered, and only some of them, with a bigger size (a lot of mass) were retained; the efficiency relative to the mass would be very high. In the same way, this would happen if the particles, which are not retained were the most toxic ones.

The significant effect of the particles over the environment or the health makes necessary that the emission analysis allow an adequate interpretation of the phenomenon, which involve the aerosols and therefore a more complex measurement technologies are required. In the past years, the particle measure instrumentation has evolved sufficiently in order to provide numerous measurement equipments. Nevertheless, none of them is able to measure all particles, because each one of them is limited to a certain particle size range. Therefore, the complete characterization requires the use of several equipments, in order to cover all the existing range.

In this study, an aerosol characterization methodology is proposed for field measures, based in the disposition of several particle measurement equipments coupled in parallel some of them typical of laboratory. In the proposed system, the starting point is not the simplicity, because the simultaneous utilization of various instruments is pretended and a previous sample conditioning is required.

The simultaneous measure of different equipments, allow us to compare data corresponding to the same sample. For this purpose, it is necessary to split the main sample in various secondary samples, directed towards each one of the instruments. This is achieved with a flow splitter coupled in the sampling line.

An optical counter is used to measure number of the micrometric particle, a cascade impactor to measure the mass size distribution, a filter for the total mass concentration, a collector device to take a sample and further analysis by electron microscopy and a electrostatic classifier together with a condensation nucleus counter to measure the submicron particles. The performing of these two equipments requires a previous conditioning of the sample. This implies the separation of undesirable particles, the secondary sampling towards the electrostatic classifier and the drying of the sample. Therefore, the following devices are incorporated in the sampling system: cyclone, sampling chamber, diffusion drier and pre-impactor.

All these adaptations were validated in the laboratory with a specific set-up, determining the transport efficiency for each device in the sampling conditions. The analysis of the results allowed defining simple empirical equations, which relate the transport efficiency to the sampling flow rate. In this way, the correction of the measures is achieved approaching them to the real sample.

The performed work, composed by the design, assembly, validation and applications of the particle sampling and measurement system, was developed within the frame of several more extensive projects with the objective of validating a filtration system based on the acoustic agglomeration and electrostatic precipitation. Therefore, one of the applications of the presented methodology refers to the validation of an electrostatic precipitator or electrofilter (ESP) and an acoustic agglomeration chamber. As well as, the previous characterization of the particles, used as test aerosols, which come from coal and gasoil combustion. In the same way, the system has been used to characterize the emission from

a Diesel engine (0,5 MW) used for co-generation, emissions from biomass combustion in an atmospheric fluidised bed and the emission from a 14 MW low speed Diesel engine for electricity generation, in a power plant

ÍNDICE

Pag.

RESUMEN	I
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES	3
1.2 PROPIEDADES DE LOS AEROSOLES	6
1.3 FENÓMENOS Y FUERZAS SOBRE LAS PARTÍCULAS	13
1.4 CARACTERIZACIÓN DE AEROSOLES	15
1.5 LEGISLACIÓN ACTUAL SOBRE EMISIÓN DE PARTÍCULAS	18
1.6 ANTECEDENTES	21
2 OBJETIVOS	27
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	33
3.1 MUESTREO DE AEROSOLES	36
3.1.1 Extracción de la muestra	36
3.1.1.1 Muestreo isoaxial	37
3.1.1.2 Muestreo anisoaxial	46
3.1.2 Transporte de la muestra	54
3.1.2.1 Deposición gravitacional	54
3.1.2.2 Deposición difusional	56
3.1.2.3 Deposición inercial	58
3.1.2.4 Deposición mecánica total en tubos rectos	63
3.1.2.5 Deposición electrostática	66
3.1.2.6 Deposición termoforética	66
3.2 MEDIDA DE AEROSOLES	70
3.2.1 Métodos microscópicos	71
3.2.2 Métodos ópticos	74
3.2.3 Métodos eléctricos	77
3.2.4 Métodos difusionales	80
3.2.5 Métodos inerciales	81

4	MATERIAL Y MÉTODOS	87
4.1	SISTEMA DE MUESTREO.....	92
4.1.1	Sonda de muestreo.....	92
4.1.2	Divisor de flujo.....	94
4.1.3	Líneas de muestreo.....	95
4.1.4	Caja caliente.....	96
4.1.5	Caja fría.....	96
4.1.6	Unidad de control.....	97
4.2	SISTEMA DE MEDIDA.....	98
4.2.1	Instrumentos de medida en tiempo real.....	98
4.2.1.1	Contador óptico. (I).....	99
4.2.1.2	Clasificador electrostático y contador de núcleos de condensación, (II).	101
4.2.2	Instrumentos de medida post-muestreo.....	102
4.2.2.1	Instrumento de muestreo para SEM/AI (III).....	103
4.2.2.2	Impactador de cascada (IV).....	104
4.2.2.3	Filtro, (V).....	105
4.3	ACONDICIONAMIENTO DE LA MUESTRA.....	106
4.3.1	Ciclón.....	107
4.3.2	Cámara de muestreo.....	109
4.3.3	Secador.....	111
4.3.4	Preimpactador.....	116
4.3.5	Neutralizador de carga.....	120
4.3.6	Diluidor.....	122
4.4	DISPOSITIVOS AUXILIARES.....	123
4.5	EQUIPOS PARA LA VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO.....	123
4.5.1	Banco de calibración para partículas submicrométricas.....	124
4.5.2	Banco de calibración para partículas micrométricas.....	128
4.6	MODO OPERATIVO.....	131
4.6.1	Determinaciones previas al muestreo.....	131
4.6.1.1	Puntos de muestreo.....	131
4.6.1.2	Características físico químicas del gas.....	132
4.6.1.3	Elección de la boquilla de muestreo.....	134
4.6.2	Proceso de caracterización de partículas.....	137
4.6.2.1	Concentración másica.....	137
4.6.2.2	Distribución aerodinámica.....	138
4.6.2.3	Morfología y composición elemental.....	140
4.6.2.4	Concentración y distribución numérica de partículas micrométricas, (contador óptico).....	141
4.6.2.5	Concentración y distribución numérica de partículas submicrométricas (SMPS).....	142
4.7	TRATAMIENTO DE DATOS.....	143

5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	147
5.1	VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO.....	150
5.1.1	Divisor de flujo.....	150
5.1.2	Ciclón.....	154
5.1.3	Cámara de muestreo.....	158
5.1.4	Secador.....	165
5.1.5	Preimpactador.....	170
5.1.6	Eficacia total en el sistema de muestreo y medida.....	172
5.2	APLICACIONES.....	176
5.2.1	Caracterización de emisiones.....	176
5.2.1.1	Combustión de carbón pulverizado, (CP). (Central Térmica de Compostilla, Ponferrada).....	176
5.2.1.2	Combustión de carbón en lecho fluido circulante, (LFC). (CIEMAT).....	184
5.2.1.3	Combustión interna de gasoil en un Motor-Generador Diesel. (CIEMAT).....	195
5.2.2	Validación de sistemas de filtración.....	205
5.2.2.1	Precipitador electrostático o electrofiltro, (ESP).....	207
5.2.2.2	Sistema de aglomeración acústica-retención electrostática.....	218
5.2.3	Otras aplicaciones.....	227
6	CONCLUSIONES	229
6.1	PERSPECTIVAS DE FUTURO.....	236
7	REFERENCIAS	239

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	<u>Pag.</u>
Tabla 1-1. Niveles de emisión de partículas sólidas (mg/Nm ³). Decreto 833/1975 / Ley 38/1972.	19
Tabla 1-2. Valores límite de emisión para nuevas instalaciones. Directiva Comunitaria 88/609/CEE y Real Decreto 646/1991.	20
Tabla 1-3. Valores límite de emisión de partículas (Directiva 2001/80/CE del Parlamento Europeo y del Consejo).	21
Tabla 4-1. Estimación de la eficacia de secado en el secador.	114
Tabla 4-2. Numero de toberas por etapa y diámetro de tobera en el impactador MarkIII.	139
Tabla 4-3. Datos de calibración del Impactador MarkIII a 21 1 °C.	140
Tabla 5-1. Nivel de secado en el secador de gel de sílice para diferentes caudales.	165
Tabla 5-2. Eficacia de transporte en el secador de gel de sílice para diferentes caudales.	170
Tabla 5-3. Configuraciones habituales del sistema de acondicionamiento.	174
Tabla 5-4. Análisis químico del carbón de Compostilla (Ponferrada).	177
Tabla 5-5. Composición química elemental aproximada de las cenizas volantes de la Central de Compostilla II, Ponferrada, (León).	183
Tabla 5-6. Condiciones de operación en la Planta de combustión de lecho fluidizado circulante del CIEMAT.	186
Tabla 5-7. Composición elemental aproximada de las cenizas volantes, Planta de combustión de carbón en lecho fluido circulante, del CIEMAT.	193
Tabla 5-8. Características del motor-generator Diesel.	196
Tabla 5-9. Especificaciones para el gasoil de automoción Clase A. (Real Decreto 398/1996 de 1 de Marzo, corregido en la Disposición general 11502 del BOE-22-05-1996).	197
Tabla 5-10. Composición elemental de las partículas de emisión del motor generator diesel (CIEMAT), determinada por SEM/EPXMA, a excepción del carbono.	202

Tabla 5-11. Componentes orgánicos en los gases de emisión del motor generador diesel (CIEMAT).....	203
Tabla 5-12. Principales características del electrofiltro, (ENDESA, 1996).	207
Tabla 5-13. Concentración en masa y número para diferentes potenciales de operación del ESP.....	209
Tabla 5-14. Concentración en masa y número para los potenciales del ESP ($V_2 = 0$ y 30 kV). Combustión Diesel de gasoil.	216
Tabla 5-15. Concentración en masa y número, medidas en PM2, funcionando el FA (4T 400W) y frecuencias de 10 y 20 kHz. Combustión Diesel de gasoil.	224

ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>Pag.</u>
Figura 1-1. Intervalos de tamaño de partícula para aerosoles. (Hinds, 1982).....	8
Figura 1-2. Sistema de caracterización de aerosoles de combustión del grupo de Tecnología de Aerosoles, Centro de Investigación (VTT) de Finlandia.	24
Figura 2-1. Esquema de objetivos.	31
Figura 3-1. Diagrama general de objetivos de un sistema de muestreo, (Fissan y Schwientek, 1987).	36
Figura 3-2. Patrón de superficies de corriente y trayectorias de las partículas para una sonda cilíndrica de pared delgada orientada en la dirección de la corriente: (a) $v_m = v_o$. (b) $v_m < v_o$. (c) $v_m > v_o$	38
Figura 3-3. Eficacia de aspiración de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C y diferentes valores de v_o/v_m	40
Figura 3-4. Eficacia gravitacional de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C y diferentes valores de v_o/v_m . La velocidad de muestreo es de 7,4 m/s, correspondiente a un caudal típico de muestreo de 14 l/min.	42
Figura 3-5. Eficacia inercial de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C y diferentes valores de v_o/v_m . La velocidad de muestreo es de 7,4 m/s, correspondiente a un caudal típico de muestreo de 14 l/min.	44
Figura 3-6. Eficacia total de muestreo para diferentes valores de v_o/v_m , frente a: a) diámetro de partícula, b) número de Stokes. $d_b = 1/4"$, $L_b = 10$ cm, $T^a = 150^\circ\text{C}$, $v_m = 7,4$ m/s.	45
Figura 3-7. Patrón de superficies de corriente y trayectorias de las partículas para una sonda cilíndrica de pared delgada inclinada un ángulo θ respecto a la dirección de la corriente: (a) $v_m = v_o$. (b) $v_m < v_o$. (c) $v_m > v_o$	46
Figura 3-8. Eficacia de aspiración de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C en muestreo isocinético y anixoasial, para ángulos desde 0 a 90°.	48

Figura 3-9. Eficacia de sedimentación gravitacional en una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C en muestreo isocinético y anixoasial, para ángulos desde 0° a 90°.	49
Figura 3-10. Eficacia de deposición inercial de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C en muestreo isocinético y anixoasial, para ángulos desde 0° a 90°.	51
Figura 3-11. Eficacia total de muestreo para diferentes ángulos y orientaciones, en función de: (a) y (b) diámetro de partícula, (c) y (d) número de Stokes. $d_b = 1/4"$, $L_b = 10$ cm, $T^a = 150$ °C, $v = 7,4$ m/s.	53
Figura 3-12. Eficacia de transporte con diferentes ángulos, en regímenes laminar y turbulento: a) Diámetro de 1/4 ", caudal de 14 y 20 l/min; b) Diámetro de 1/2 ", caudal de 14 y 40 l/min.	60
Figura 3-13. Eficacia de transporte en un estrechamiento desde tuberías de diferente diámetro 1", 1/2" y 1/4" hasta otra de 1/4 ", en régimen laminar (caudal de 14 l/min).	63
Figura 3-14. Eficacia de transporte en una tubería circular de 1/4 "y 1 m situada horizontalmente. a) Régimen laminar (caudal de 14 l/min); b) Régimen turbulento (caudal de 20 l/min).	64
Figura 3-15. Eficacia de transporte en una tubería circular de 1/4 " y 1 cm situada verticalmente. a) Régimen laminar (caudal de 14 l/min); b) Régimen turbulento (caudal de 20 l/min).	65
Figura 3-16. Eficacia termofóretica de una tubería circular de 1/4 " y 1 m de longitud cuando la temperatura de la pared difiere de la del gas. Para régimen laminar (14 l/min.) y turbulento (40 l/min).	69
Figura 3-17. Intervalos de tamaño de funcionamiento de la instrumentación más empleada en la caracterización de aerosoles.	70
Figura 3-18. Esquema de funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido (SEM)(Malm, 1996).	72
Figura 3-19. Esquema de funcionamiento de un instrumento por dispersión de luz.	74
Figura 3-20. Esquema de funcionamiento del Contador de Núcleos de Condensación, CNC.	76
Figura 3-21. Esquema de funcionamiento del clasificador de partículas por movilidad eléctrica diferencial, DMA.	78

Figura 3-22. Esquema de funcionamiento de un impactador de cascada y curvas típicas de eficacia de un impactador, en función de $(Stk)^{1/2}$ (Marple y Willeke, 1979).	81
Figura 3-23. Principio de operación de un ciclón y dimensiones características.....	84
Figura 4-1. Esquema del Sistema de muestreo y medida.....	90
Figura 4-2. Estación de muestreo y medida.	91
Figura 4-3. Sondas de muestreo: a) conductos de diámetro $\geq 3"$, b) conductos de diámetro $< 3"$	92
Figura 4-4. Esquema del divisor de flujo.	94
Figura 4-5. Esquema del equipo óptico, PCS-2000.	100
Figura 4-6 Dispositivo de captura de partículas para SEM/AI.	103
Figura 4-7. Portafiltros.....	105
Figura 4-8. Esquema de la disposición de equipos para el tratamiento previo de la muestra que se incorporan al sistema de muestreo.	106
Figura 4-9. Ciclón.....	107
Figura 4-10. Diámetro de corte del ciclón en función del caudal, para diferentes temperaturas.	108
Figura 4-11. Cámara de muestreo.	110
Figura 4-12. Curvas de variación del caudal de submuestreo hacia el SMPS en función de la velocidad en el interior de la cámara para diferentes boquillas de muestreo.....	111
Figura 4-13. Secador.....	112
Figura 4-14. Efecto que produce el secado de una partícula.....	116
Figura 4-15. Preimpactador.	116
Figura 4-16. Variación de d_{p50} en función del caudal aplicado en el preimpactador, para tres toberas de diferente diámetro: 0,0457, 0,0508 y 0,071 cm, (20 °C y 1 atm.).	117
Figura 4-17. Caída de presión en función del caudal aplicado, en el preimpactador, para tres toberas de diferente diámetro: 0,0457, 0,0508 y 0,071 cm. (20 °C y 1 atm.).	119

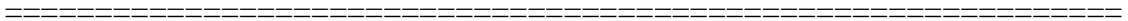
Figura 4-18. Distribución de cargas sobre partículas de aerosol.	121
Figura 4-19. Esquema del banco de calibración para partículas submicrométricas.	125
Figura 4-20. Atomizador de Collison.	125
Figura 4-21. Distribuciones de tamaño de partículas de Ni ₂ Cl, para diferentes caudales de ensayo, producidas en el banco de calibración de partículas submicrométricas.	127
Figura 4-22. Esquema del banco de calibración para partículas micrométricas.	128
Figura 4-23. Principio de operación del dispersador de polvo.	129
Figura 4-24. Distribuciones de tamaño de partículas de ZrO ₂ , para diferentes caudales de ensayo, producidas en el banco de calibración de partículas micrométricas.	130
Figura 4-25. Nomograma para determinar la boquilla de muestreo idónea.	136
Figura 4-26. Esquema del Procedimiento de tratamiento de datos.	143
Figura 5-1. Curvas teóricas de eficacia de transporte del divisor de flujo.	151
Figura 5-2. Datos experimentales de eficacia de transporte del divisor de flujo y curvas de ajuste.	153
Figura 5-3. Curvas teóricas de eficacia de transporte del ciclón.	155
Figura 5-4. Datos experimentales de eficacia de transporte del ciclón y curvas de ajuste.	156
Figura 5-5. Curvas teóricas de eficacia de transporte de la cámara de muestreo.	158
Figura 5-6. Efecto de la coagulación de partículas a diferentes tiempos de residencia sobre la distribución de tamaño.	161
Figura 5-7. Datos experimentales de eficacia de transporte de la cámara de muestreo y curvas de ajuste.	162
Figura 5-8. Efecto de la coagulación de partículas en la eficacia de transporte en la cámara de muestreo, para diferentes tiempos de residencia, previo al submuestreo.	164
Figura 5-9. Curvas teóricas de eficacia de transporte del secador de gel de sílice.	166
Figura 5-10. Datos experimentales de eficacia de transporte del secador, para aerosoles secos, y curvas de ajuste.	167

Figura 5-11. Datos experimentales de eficacia de transporte del secador, para aerosoles húmedos, y curvas de ajuste.....	168
Figura 5-12. Datos experimentales de eficacia de transporte del preimpactador y curvas de ajuste ($d_t = 0,0508$ mm).....	171
Figura 5-13.Efecto de los diferentes equipos considerados sobre la concentración numérica y distribución de tamaño de un aerosol típico.....	172
Figura 5-14. Eficacia total en función del tamaño para distintas configuraciones del sistema de muestreo. Caudal de muestreo 10 l/min y caudal al SMPS 0,3 l/min.....	175
Figura 5-15. Esquema del sistema de muestreo y medida, usado en la Central Térmica de Compostilla II, Ponferrada (León).	178
Figura 5-16. Distribución de tamaño de partícula, de las emisiones de la Central Térmica de Compostilla II, Ponferrada (León).	180
Figura 5-17. Microfotografías de partículas de emisión de combustión de carbón pulverizado, Central Térmica de Compostilla II, Ponferrada (León).	181
Figura 5-18. Morfología (expresada como circularidad relativa) en función del diámetro de partícula. Emisiones de combustión de carbón pulverizado, Central Térmica de Compostilla II, Ponferrada (León).	182
Figura 5-19. Esquema de la planta de validación de sistemas de filtración a media escala (CIEMAT).	184
Figura 5-20. Planta de Lecho Fluidizado Circulante (LFC) del CIEMAT.	185
Figura 5-21. Distribución de tamaño de partícula, de las emisiones de la Planta de combustión de Lecho fluido circulante del CIEMAT.....	188
Figura 5-22. Microfotografías de partículas de emisión de combustión de carbón en lecho fluido circulante, Planta de combustión del CIEMAT. a) Detalle de partícula primaria. b) aglomerado de partículas primarias.....	190
Figura 5-23. Morfología (expresada como circularidad relativa) en función del diámetro de partícula.	191
Figura 5-24. Composición química elemental de una partícula aislada de ceniza volante. Técnica EPXMA.	192
Figura 5-25. Línea de escape del motor-generator Diesel e inserción en línea en la instalación de validación de sistemas de filtración del CIEMAT.....	195

Figura 5-26. Distribución de tamaño de partícula, de las emisiones del motor generador diesel (CIEMAT).	199
Figura 5-27. Microfotografías de partículas de emisión del motor generador diesel (CIEMAT), obtenidas por microscopía electrónica, SEM.	200
Figura 5-28. Morfología (expresada como circularidad relativa) en función del diámetro de partícula.....	201
Figura 5-29. Curvas de eficacia relativa de separación del electrofiltro en función del potencial secundario, V_2 (kV). Combustión de carbón en LFC.	209
Figura 5-30. Distribución del tamaño de partículas referida al diámetro aerodinámico. Combustión de carbón en LFC.	211
Figura 5-31. Distribución de partículas micrométricas y submicrométricas a diferentes potenciales de funcionamiento del Electrofiltro. Combustión de carbón en LFC.	212
Figura 5-32. Eficacia fraccional relativa en función del diámetro de partícula, referida a la concentración másica y numérica de partículas. Combustión de carbón en LFC.....	213
Figura 5-33. Efecto del potencial aplicado sobre la forma de las partículas que atraviesan el electrofiltro. Combustión de carbón en LFC.	214
Figura 5-34. Composición de elementos traza en función del potencial aplicado al ESP. Combustión de carbón en LFC.	215
Figura 5-35. Efecto del precipitador electrostático para emisiones Diesel.....	217
Figura 5-36. Eficacia relativa en función del diámetro de partícula, en emisiones de combustión de carbón en LFC y de gasoil en un motor diesel.....	218
Figura 5-37. Esquema de la cámara de aglomeración acústica o filtro acústico FA.....	219
Figura 5-38. Mejora de la eficacia del ESP, debido a la aglomeración acústica en FA, expresada en concentración másica y numérica (intervalos de tamaño micrométrico y submicrométrico). Combustión de carbón en LFC.....	221
Figura 5-39. Distribución de tamaño de partículas en PM3 (ESP 30 kV) y FA(4Tx400W y 20 kHz). Combustión de carbón en LFC.....	222
Figura 5-40. Mejora de la eficacia fraccional del ESP por efecto de la aglomeración en FA, en diferentes condiciones de potencia, (4T80W) y (4T400W) y frecuencia acústica, 10 kHz y 20 kHz. Combustión de carbón en LFC.	223

Figura 5-41. Eficacia relativa del FA en PM2, en función del tamaño de partícula para las condiciones óptimas de funcionamiento de la cámara acústica (4T400W) y 20 kHz. Combustión diesel de gasoil.....	225
Figura 5-42. Distribución de tamaño de partículas en PM2 (ESP 30 kV) y FA(4Tx400W y 20 kHz). Combustión diesel de gasoil.....	226

1 INTRODUCCIÓN.



1. INTRODUCCIÓN.

1.1 GENERALIDADES.

Un sistema aerodisperso, o aerosol lo forman partículas sólidas ó líquidas suspendidas en un gas. Son, por tanto, sistemas bifásicos, en los que se diferencia una fase continua o medio dispersante (gas) y una fase dispersa (partículas o gotas).

Los aerosoles pueden formarse por procesos de dispersión, tras triturar o atomizar sólidos o líquidos y por condensación de sus componentes en fase de vapor, en condiciones de sobre saturación. Los aerosoles formados por dispersión suelen ser más irregulares, en cuanto a forma y tamaño, que los formados por condensación, porque la nucleación coagulación y crecimiento tiene lugar en pequeñas regiones del fluido y en condiciones similares.

Los aerosoles se manifiestan en una amplia variedad de formas cotidianas, pero es posible su clasificación primaria en tres grupos: niebla, polvo y humo.

- Las nieblas o neblinas están formadas por pequeñas gotas líquidas dispersas en un gas, tanto las formadas por dispersión como las generadas por condensación.
- Los polvos lo forman partículas sólidas en suspensión y se generan por desintegración mecánica de un material y subsiguiente dispersión.
- Los humos son formados por condensación y dan lugar a partículas sólidas o líquidas en suspensión. Los humos mezclados con vapor de agua constituyen lo que se denomina “smog” (de las palabras inglesas smoke y fog).

Los aerosoles representan un importante papel tanto en la naturaleza y medioambiente (evaporación y condensación del agua oceánica, erosión del suelo, polinización, erupción volcánica etc.) como en los procesos industriales (disgregación, corte, abrasión, molienda, mezcla, atomización, pulverización, combustión estacionaria y móvil etc.).

El ciclo del agua involucra procesos de evaporación para formar nubes y la posterior condensación y coagulación para precipitar en forma de lluvia o nieve. La erosión, transporte y deposición de partículas por el viento ha dado lugar a la orografía terrestre. Los combustibles líquidos se introducen en las cámaras de combustión como pequeñas gotas dispersas en el aire, y el carbón se introduce en las calderas en forma pulverizada. Los sistemas de lecho fluido se basan en la sustentación de partículas por una corriente de gas. Todas estas aplicaciones buscan conseguir una gran superficie de reacción (pequeñas gotas o

partículas) en contacto con el gas. Otras veces, el aerosol debe ser evitado, como ocurre en actividades industriales, especialmente relacionadas con la industria farmacéutica o electrónica, en las que se requieren estancias exentas de partículas (salas limpias), y, por tanto, necesitan sistemas de filtración de alta eficacia. En gran número de procesos industriales, el aerosol es generado y no deseado, como ocurre en las explotaciones mineras, siderurgia, cementeras, etc. y especialmente en los procesos de combustión, tanto estacionaria, como móvil. En todos ellos, es preciso disponer de adecuados sistemas de control de partículas (ciclones, filtros de mangas, precipitadores electrostáticos (ESP), lavadores, etc.). Aunque los sistemas convencionales de filtración de partículas tienen una alta eficacia, no son capaces de eliminar totalmente las partículas más finas. Es decir, aquellas que por su tamaño son denominadas micrométricas (1-100 micras) y submicrométricas (<1 micra).

La mayoría de la masa de aerosoles atmosféricos, especialmente la que corresponde a partículas submicrométricas provienen de los procesos de combustión para la generación de energía. Los combustibles fósiles, tienen una aportación del 85% en la producción energética mundial, correspondiendo el 24 % al carbón, el 39% a los derivados del petróleo (automoción y generación en sistemas estacionarios), y el 22% al gas natural con un consumo en continuo crecimiento. Sin embargo, el carbón es el combustible fósil más abundante y seguro, con unas reservas declaradas a nivel mundial de hasta 250 años de utilización, por lo que se prevé un incremento de su consumo hasta el 40% en el año 2015, sobre la situación actual.

Las emisiones de aerosoles producidas por la generación de energía, pueden producir efectos negativos sobre la salud y el Medio Ambiente. Los combustibles fósiles contienen asociados diversos compuestos que hacen que en los procesos de su utilización como combustible se produzcan una serie de subproductos, sólidos y gaseosos que son emitidos al medio ambiente como contaminantes potenciales. Estos subproductos dependen, por una parte, de las características de los combustibles y por otra, de las condiciones de

operación de los sistemas en los que se generan. Las partículas submicrométricas pueden permanecer suspendidas en la atmósfera durante mucho tiempo y transportarse largas distancias desde la fuente original. Además, su pequeño tamaño las hace fácilmente respirables, lo que las lleva a estar implicadas en numerosos efectos perjudiciales en la salud. Recientes estudios epidemiológicos han puesto de manifiesto la relación existente entre la mortalidad y morbilidad humana asociadas con los niveles de contaminación por partículas (Friedlander y Lippmann, 1994) (Regan, 1996).

La necesidad de conseguir una transformación energética limpia y eficaz hace que las actuaciones al respecto estén dirigidas en dos direcciones: hacia el proceso de conversión y hacia el control de las emisiones. En este sentido, la caracterización de las partículas puede aportar una información fundamental en la comprensión de ambos fenómenos, formación y retención de partículas.

1.2 PROPIEDADES DE LOS AEROSOLES.

Las propiedades del aerosol vienen condicionadas por los siguientes parámetros:

- Tamaño de partícula.
- Morfología.
- Densidad de la partícula.
- Concentración de partículas en masa y número.
- Composición química de las partículas.

El tamaño de partícula es la característica más influyente en el comportamiento de los aerosoles; todas las propiedades de los aerosoles dependen del tamaño de partícula, algunas muy intensamente. La mayoría de los aerosoles presenta un intervalo amplio de tamaño, y

no sólo las propiedades de los aerosoles dependen del tamaño de partícula, sino que la naturaleza de las leyes que gobiernan estas propiedades también cambia con él.

La figura 1.1, muestra el intervalo de tamaños para aerosoles y otros fenómenos.

La principal línea divisoria es $1\ \mu\text{m}$, que marca el límite superior del rango submicrométrico (menor que $1\ \mu\text{m}$) y el límite inferior del rango micrométrico (mayor que $1\ \mu\text{m}$). Se cubre un intervalo de tamaños de $10^8\ \mu\text{m}$, desde las moléculas de gas a las pelotas de golf. En general, polvos, pólenes, etc., están en el rango micrométrico ó mayores, y los humos y similares están en el submicrométrico. Las partículas de aerosol más pequeñas se asemejan al tamaño de las grandes moléculas de gas y poseen muchas de sus propiedades. Las de mayor tamaño son visibles y poseen propiedades descritas por la física de Newton.

En función del fin para el cual se estudia el comportamiento de aerosoles, del tipo de instrumento de medida, etc., se han desarrollado múltiples definiciones de diámetro de partícula que incluyen tamaño, morfología y en algún caso densidad. Las principales definiciones son:

Para partículas esféricas:

- Diámetro geométrico, d_g : Es el diámetro que se obtendría si la partícula esférica fuera observada al microscopio.

Para partículas no esféricas.

- Diámetro de área proyectada, d_{ap} : Es el diámetro de un círculo igual al área que proyecta la partícula irregular.

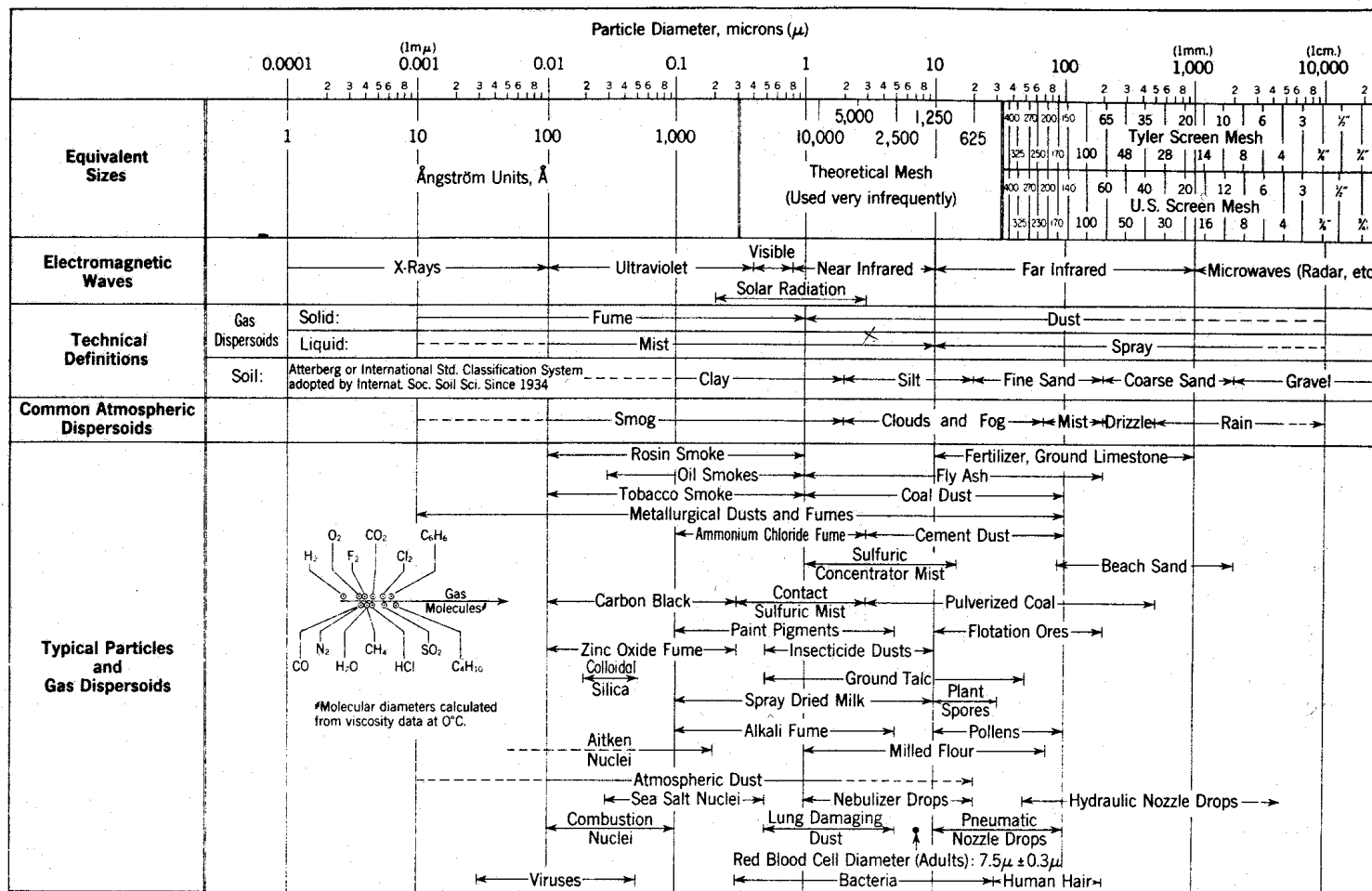


Figura 1-1. Intervalos de tamaño de partícula para aerosoles. (Hinds, 1982)

- Diámetro de volumen equivalente, d_e : Es el diámetro de la esfera que tiene el mismo volumen que la partícula irregular. Se puede entender como el diámetro de la esfera que resultaría si la partícula irregular se transformase en una gota.
- Diámetro de Stokes, d_s : Es el diámetro de la esfera que tenga la misma densidad y velocidad de sedimentación v_s , que la partícula irregular. La velocidad de sedimentación se define como la velocidad que alcanza una partícula al caer cuando se igualan la fuerza de la gravedad, F_g y la de rozamiento con el gas F_r :

$$F_g = F_r \Rightarrow \frac{1}{6} \pi d_e^3 \rho_p g = \frac{3\pi \mu_g v_s d_e \chi}{C(d_e)} \Rightarrow v_s = \frac{\rho_p d_e^2 g C(d_e)}{18 \mu_g \chi} = \frac{\rho_p d_s^2 g C(d_s)}{18 \mu_g} \quad [1-1]$$

donde:

v_s = velocidad de sedimentación, (cm/s).

ρ_p = es la densidad de la partícula, (g/cm^3).

g = aceleración de la gravedad, (980 cm/s^2).

$C(\text{Kn})$ = factor de deslizamiento de Cunningham en función del número de Knudsen, ($\text{Kn} = 2\lambda/d_p$).

$$C(\text{Kn}) = 1 + (\text{Kn} \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/\text{Kn}))).$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T))).$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

μ_g = viscosidad del gas (dinas.s/cm).

χ = factor dinámico de forma que se define como la relación entre la fuerza de rozamiento real de la partícula no esférica y la fuerza de rozamiento de una esfera que tiene el mismo volumen y velocidad.

- Diámetro aerodinámico, d_a : Es el diámetro de la esfera de densidad unidad que tiene la misma velocidad de deposición que la partícula. El diámetro aerodinámico es la propiedad clave de la partícula para caracterizar la filtración, deposición respiratoria y la resolución de muchos instrumentos.

$$v_s = \frac{d_a^2 g C(d_a)}{18\mu} \quad [1-2]$$

- Diámetro de movilidad eléctrica, d_{me} . Es el diámetro de una hipotética esfera que tiene la misma movilidad eléctrica Z_p que la partícula irregular.

$$Z_p = \frac{v}{E} = \frac{neC(d_e)}{3\pi\mu_g d_e \chi} = \frac{neC(d_{me})}{3\pi\mu_g d_{me}} \quad [1-3]$$

siendo:

Z_p = movilidad eléctrica (cm²/voltio.s).

v = velocidad del aerosol (cm/s).

E = campo eléctrico (voltio/cm).

n = nº de cargas elementales en la partícula.

e = carga elemental ($1,6 \times 10^{-12}$ dinas.cm/voltio).

Para partículas esféricas de densidad unidad el diámetro de la partícula d_p es:

$$d_p = d_g = d_{ap} = d_e = d_s = d_a = d_{me}$$

incluso si la densidad es de 1-2 g/cm³ el error al considerarlo como diámetro geométrico es despreciable

El tamaño de un aerosol compuesto por partículas idénticas, aerosol monodisperso, queda completamente definido por el diámetro de partícula. Pero en el caso de aerosoles polidispersos, los más habituales, formados por partículas de tamaños diferentes se hace necesario el análisis de la distribución por medios estadísticos.

La función de frecuencia es la forma habitual de representar la distribución de tamaño de partícula. La fracción del número total con diámetro comprendido entre d_p y d_p+dd_p es

$$df = f(d_p) dd_p \Rightarrow \int_0^{\infty} f(d_p) dd_p = 1 \quad [1-4]$$

La función de distribución normal es raramente utilizada para describir la distribución de tamaño de partícula porque la mayoría de los aerosoles presentan una distribución de frecuencia asimétrica (larga cola para los tamaños mayores). En cambio, se ajustan razonablemente bien a la distribución lognormal,

$$df = \frac{1}{d_p \ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln d_p - \ln M_D)^2}{2(\ln \sigma_g)^2}\right) dd_p \quad [1-5]$$

siendo el diámetro geométrico medio igual al diámetro mediano de la distribución, M_D y σ_g la desviación geométrica estándar.

Como d_p , se pueden utilizar cualquiera de los diámetros descritos anteriormente, aunque los más habituales son el geométrico, de volumen equivalente y el aerodinámico. En cuanto a la fracción acumulada de partículas, puede hacerse con respecto al número, a la masa, al área de superficie de partícula, al volumen de partícula y a la actividad cuando se estudian partículas radiactivas. Los parámetros más utilizados son los dos primeros.

Los valores más utilizados como medidas de centralización son la media, la mediana y la moda y como medidas de dispersión: la desviación estándar, SD “standard deviation” ó σ y la desviación geométrica estándar, GSD “geometric standard deviation” ó σ_g . De las múltiples combinaciones de diámetros, fracciones acumuladas, medidas de centralización y dispersión se obtienen múltiples modos de referirse al tamaño de partícula. De todas estas combinaciones las más utilizadas son:

- Diámetro mediano contado ó numérico CMD “count median diameter”: Es el diámetro geométrico mediano, MGD “median geometric diameter” de una distribución con respecto al número de partículas. Siempre que no se especifica otro, en todo el texto cuando se refiere a diámetro de partícula de forma genérica, d_p se considerará éste.
- Diámetro mediano de masa, MMD “mass median diameter”: Es el diámetro geométrico mediano de una distribución con respecto a la masa.
- Diámetro aerodinámico mediano de masa, MMAD “mass median aerodynamic diameter”: Es el diámetro aerodinámico mediano de una distribución con respecto a la masa.

En las definiciones y procedimientos presentados previamente, se han considerado las partículas como esferas, pero la realidad es que las partículas pueden presentar diferente morfología. Las partículas líquidas son casi siempre esféricas, pero las sólidas suelen tener formas complejas. Para el estudio de los aerosoles se usan factores de corrección.

Otra propiedad física de interés es la densidad de partícula, normalmente expresada en g/cm^3 . Se refiere a la masa por unidad de volumen de la partícula en sí misma. Las partículas líquidas tienen una densidad igual que el material origen. Las partículas sólidas podrían tener densidades aparentes significativamente menores que las predichas a partir de su composición química. Esto es consecuencia de la presencia de espacios vacíos en la estructura de la partícula.

La propiedad del aerosol más comúnmente medida es la concentración y una de las más importantes desde el punto de vista de la salud y efectos medioambientales. La concentración másica, masa de materia particulada por unidad de volumen del aerosol, normalmente se expresa como g/m^3 , mg/m^3 ó $\mu\text{g/m}^3$. La concentración másica es equivalente a la densidad de un aerosol, aunque este termino no se emplea para evitar equivocaciones en cuanto a la densidad de partícula. Otra magnitud medida habitualmente

es la concentración en número, número de partículas por unidad de volumen, normalmente expresada como partículas/cm³.

La composición química de las partículas esta condicionada a su generación. En el proceso de combustión, los gases y vapores liberados están formados principalmente por: dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O₂), además de óxidos de azufre (SO_x) y de nitrógeno (NO_x), y compuestos orgánicos. Y la materia particulada que acompaña a las emisiones la forman minerales, (conteniendo Si, Ca, Fe, K, S, Ti, etc.) e inquemados. Adsorbidos sobre las partículas se han detectado elementos traza potencialmente tóxicos (Be, Cr, Mn, Co, Ni, As, Se, Cd, Sb, Hg, Pb, V, etc.). Los compuestos orgánicos se pueden encontrar en fase gas, habitualmente como compuestos orgánicos volátiles (COVs) o adsorbidos sobre la superficie de las partículas, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) En determinadas condiciones y en presencia de Cl, se pueden generar compuestos aromáticos policíclicos clorados (DIOXINAS), tal como ocurren en la incineración de residuos sólidos urbanos, u otros desechos industriales, o en la combustión de biomasa con aprovechamiento energético.

1.3 FENÓMENOS Y FUERZAS SOBRE LAS PARTÍCULAS.

Existen una serie de fenómenos siempre presentes en el campo de los aerosoles y que proceden de la interrelación de partículas o de ellas con otras superficies. Estos fenómenos van a tener un papel fundamental en la toma de muestras y en su transporte hasta los instrumentos de medida.

La coagulación es un proceso por el que las partículas colisionan entre sí, debido a movimientos relativos entre las mismas, para formar partículas mayores. El resultado neto es una continua disminución en el número de partículas y un aumento del tamaño. Cuando el

movimiento relativo de partículas es debido al movimiento Browniano el proceso es llamado coagulación térmica. Si es debido a fuerzas externas como campos gravitatorios, eléctricos o acústicos o a efectos aerodinámicos, la coagulación es cinemática.

La precipitación está determinada por la capacidad de alcanzar una superficie macroscópica y la probabilidad de quedar depositada sobre ella. Lo que se traduce en una disminución del número de partículas. Si la aproximación de las partículas hacia la superficie es consecuencia de la difusión Browniana la precipitación es térmica o difusional; si es debida al campo gravitatorio, sedimentación gravitacional, y cuando es consecuencia de las fuerzas radiométricas, resultado de la interacción asimétrica de la partícula con las moléculas del gas, se habla de: termoforesis o fotoforesis, si existe un gradiente térmico, difusioforesis si el gradiente es de concentración y electroforesis si lo es de potencial eléctrico. Los cambios de dirección del aerosol hacen que las fuerzas inerciales también puedan actuar sobre las partículas provocando su deposición. Los efectos inerciales son patentes en codos, bifurcaciones y estrechamientos de tuberías y son utilizados para separar, recoger y medir partículas en impactadores inerciales y ciclones.

Las fuerzas adhesivas que condicionan la coagulación y la precipitación son fuerzas de van der Waals, electrostáticas o de tensión superficial de la película de líquido adsorbida. Las fuerzas de van der Waals son fuerzas atractivas de corto alcance. De acuerdo con la teoría de su origen, el movimiento aleatorio de electrones en una partícula dieléctrica, puede crear dipolos instantáneamente e inducir dipolos eléctricos en partículas vecinas, causando la atracción superficial. Las fuerzas eléctricas son consecuencia de la carga neta que poseen la mayoría de las partículas, y que ejerce una fuerza atractiva frente a partículas o superficies de carga opuesta. Esta fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. El mayor o menor grado de adhesión es determinado por el material que forma la partícula, forma, tamaño, rugosidad, humedad, temperatura, duración del contacto y velocidad inicial.

Cuando una fuerza externa actúa sobre una partícula, otra denominada aerodinámica de arrastre o de rozamiento, opuesta a la anterior, se equilibra con ella, haciendo que la partícula se mueva a una velocidad de migración v , constante en el campo de fuerza. El conocimiento de ambas fuerzas permite la determinación de v . La velocidad de la partícula es un parámetro para estimar la colección de partículas en superficies o separar partículas por su tamaño.

1.4 CARACTERIZACIÓN DE AEROSOLES.

La medida de aerosoles ha sido una práctica llevada a cabo desde los años 50. Son múltiples las razones que han conducido a la medida de las partículas de aerosol:

- Determinar las concentraciones de riesgo medioambiental de partículas presumiblemente tóxicas.
- Controlar que en determinados ambientes cerrados, especialmente relacionados con la electrónica, biología, medicina etc., no se sobrepasen unos límites establecidos.
- Comprobar los niveles de emisión de cualquier proceso de generación, tanto de tipo doméstico como industrial.
- Valorar la eficacia de los equipos de control o de medida.
- Investigar las fuentes que contribuyen a la contaminación de un receptor.
- Identificar contaminantes atmosféricos, etc.

De forma general, los avances en medida de aerosoles han sido motivados por la necesidad de conocer los efectos, sobre la salud y medioambiente, de aerosoles indeseables, procedentes de emisiones industriales. Consecuentemente se ha ido incentivando el control de los sistemas de retención de partículas, dirigidos hacia la reducción máxima de contaminantes en el ambiente y promoviendo legislaciones cada

vez más restrictivas. Todo ello, ha impulsado, no solo al desarrollo de instrumentos de medida más sensibles, sino al estudio de los procesos de generación y de los mecanismos de transporte de aerosoles. Indirectamente el conocimiento adquirido ha visto su pronta aplicación en los aerosoles deseables utilizados para producir materiales de alta tecnología como polvos cerámicos, materiales superconductores y fibras ópticas.

Tradicionalmente, la caracterización de partículas se limitaba a la determinación de la concentración másica. La razón para elegir la masa como un parámetro básico de medida hay que buscarla en su relativa independencia respecto al instrumento utilizado y en la facilidad para ser determinada. La EPA (Environmental Protection Agency) especifica una serie de métodos para la determinación de la concentración másica de partículas en emisiones. (U.S. Environmental Protection Agency, 1974, 1977a, 1977b, 1977c, 1978, 1990). Así como otros en inmisiones, referidos a los estándar de calidad del aire PM10 (U.S. Environmental Protection Agency, 1987) y PM2,5 (U.S. Environmental Protection Agency, 1997) que contemplan la masa de partículas de diámetro aerodinámico $<10 \mu\text{m}$ y $< 2,5 \mu\text{m}$ respectivamente suspendidas en el aire. El considerar exclusivamente la concentración másica de partículas como patrón para valorar efectos que implican al aerosol puede inducir a errores de apreciación. Las partículas generadas en la mayoría de los procesos industriales tienen varios tamaños y, por consiguiente, la contribución de las partículas de mayor tamaño a la masa total y a la concentración másica suele ser más importante que la de las partículas de menor tamaño. Hay que considerar que una sola partícula de $1 \mu\text{m}$ tiene una masa equivalente a la de mil partículas de $0,1 \mu\text{m}$ con igual densidad y a un millón, si el tamaño es de $0,01 \mu\text{m}$. Así, si un hipotético aerosol con 1000 partículas de cada uno de los siguientes tamaños: 1, 0,1 y $0,01 \mu\text{m}$ es tratado por un sistema de filtración que elimine exclusivamente las partículas más gruesas, se conseguirá retener el 99,9 % de la masa y en cambio se dejará pasar el 66,6 % de las partículas.

Por estas razones, en el proceso de caracterización se hace necesario determinar la concentración numérica total. La medida de este parámetro, a diferencia de la medida en

masa, hace necesario el empleo de varios instrumentos. La razón hay que buscarla en el diferente comportamiento que las partículas presentan en función de su tamaño. Cada uno de los equipos de medida puede cubrir un intervalo de tamaño de no más de dos órdenes de magnitud.

¿Pero, son suficientes los dos parámetros anteriores, para caracterizar las partículas?. Evidentemente no. Una población real de partículas presenta una distribución de tamaño factible de cambiar con cualquier proceso condicionado al tamaño. Por ejemplo, una población real de partículas, con tamaños comprendidos entre 0,01 y 1 μm que permaneciera durante un cierto tiempo en el mismo recinto, daría lugar a la formación de aglomerados por la difusión térmica, y disminuiría el número de partículas más pequeñas incrementándose el número y tamaño de las mayores, lo que se traduciría en un desplazamiento de la distribución hacia mayores tamaños. De igual forma, si el aerosol en estudio pasara a través de un filtro también variaría la distribución de tamaño, ya que los mecanismos que actúan en la mayoría de los procesos de filtración: difusión, interceptación e impactación, son función del tamaño de partícula.

Igual que ocurre con los contadores de partículas, tampoco existen instrumentos que permitan medir la distribución en todo el intervalo de tamaño, haciéndose imprescindible la utilización de diferentes equipos. Los más utilizados permiten conocer la distribución en función del tamaño geométrico. No obstante, partículas del mismo diámetro geométrico pueden tener comportamientos diferentes debido a su distinta forma o densidad. La distribución de tamaño aerodinámico, permite conocer, además del comportamiento en conductos, la fracción de partículas respirables.

La determinación de las propiedades hasta ahora vistas proporcionaría una caracterización bastante exacta de las partículas de aerosol, pero hasta ahora las partículas han sido consideradas esféricas, y la realidad es que pueden presentar diferente morfología. La forma irregular de las partículas es decisiva en los procesos de filtración, ya que la

irregularidad se relaciona en numerosas ocasiones con la formación de aglomerados, que son mas fácilmente retenidos.

Por último, la determinación de la composición química es fundamental en la validación de los sistemas de filtración, porque indica la mayor o menor presencia de compuestos tóxicos y las condiciones que favorecen su formación o su eliminación.

Es frecuente que la caracterización de aerosoles, no pueda realizarse “in situ”, existiendo una cierta distancia entre el punto de muestreo y el instrumento de medida, lo que implica su transporte hasta el mismo. Adicionalmente, dependiendo de las propiedades del aerosol y del instrumento de medida puede hacerse necesario un acondicionamiento previo del aerosol, como dilución, separación de ciertas partículas y gases, carga de las partículas, etc. Cualquier proceso de transporte y acondicionamiento no debe afectar a la cantidad medida o al menos, el cambio debe ser cuantificado. Es importante tener en cuenta que los errores cometidos en el muestreo y transporte pueden ser mucho mayores que los del equipo de medida y, por consiguiente, determinantes en el proceso de caracterización.

1.5 LEGISLACIÓN ACTUAL SOBRE EMISIÓN DE PARTÍCULAS.

La normativa vigente en España que regula la contaminación del aire por partículas esta comprendida en las siguientes legislaciones:

- Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico.
- Decreto 833/1975, de 6 de febrero, que desarrolla la Ley 38/1972 y establece los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las principales actividades industriales, tabla 1.1.

Tabla 1-1. Niveles de emisión de partículas sólidas (mg/Nm³). Decreto 833/1975 / Ley 38/1972.

Potencia (MW)	Central Térmica de carbón					Central Térmica de fuel-oil		
	Instal. exis.	Instal. nuevas		Previsión 1980		Instal. exis.	Instal. nuevas	Previsión 1980
		(a)	(b)	(a)	(b)			
<50	750	500	400	250	250	250	200	175
>50 y <200	500	350	300	200	200	200	175	150
>200	350	200	200	150	150	175	150	120

(a) Zona higiénicamente aceptable. (b) Zona de atmósfera contaminada.

Adicionalmente la Directiva Comunitaria 88/609/CEE de 24 de diciembre de 1988 sobre limitaciones de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión (DOCE nº L336, de 07.12.88) fue transpuesta en España por el Real Decreto 646/1991, de 22 de abril. Con ello, se establecen las normas de limitación a las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión (BOE nº99 de 25.04.91),Tabla 1-2.

La Directiva 88/609/CEE, se refunde en la Directiva 2001/80/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001, sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinadas agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión (DOCE nºL 309, de 27.11.01).

Tabla 1-2. Valores límite de emisión para nuevas instalaciones. Directiva Comunitaria 88/609/CEE y Real Decreto 646/1991.

Tipo de combustible	Capacidad térmica (MW _t)	Valores límites (mg/Nm ³)
Sólido	≥500	50
	<500	100
Líquido (*)	todas las instalaciones	50
Gaseoso	todas las instalaciones	5 como norma general. 10 para gas de altos hornos. 50 para gases producidos por la industria siderurgia que pueda tener otros usos.

(*) Se podrá aplicar un valor límite de emisión de 100 mg/Nm³ a las instalaciones con una capacidad térmica de menos de 500 MW_t que quemem combustible líquido con un contenido de cenizas de más de 0,06 %.

Según la nueva Directiva los valores límite de emisión de partículas expresados en mg/Nm³ (contenido de O₂ del 6 % para los combustibles sólidos y del 3 % para los combustibles líquidos y gaseosos) presentan las siguientes modificaciones:

- I. Para nuevas instalaciones con petición de autorización para su explotación antes de 27.11.2002, y que entren en funcionamiento a más tardar el 27.11.2003 serán los mismos que los presentados en la tabla 1-2, con la siguiente salvedad:

Se podrá aplicar un valor límite de emisión de 100 mg/Nm³ a las instalaciones con una potencia térmica nominal de 500 MW_{th} que quemem combustible sólido con un contenido calorífico inferior a 5800 kJ/kg, un contenido de humedad superior al 45 % del peso, un contenido combinado de humedad y cenizas superior al 60 % del peso y un contenido de óxido de calcio superior al 10%.

II. Para las nuevas instalaciones que no reúnan el requisito del párrafo anterior, los valores límite de emisión de partículas expresados en mg/Nm^3 que deberán aplicar, a excepción de las turbinas de gas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1-3. Valores límite de emisión de partículas (Directiva 2001/80/CE del Parlamento Europeo y del Consejo).

Tipo de combustible	Capacidad térmica (MW_t)	Valores límites (mg/Nm^3)
Sólido (6% de O_2)	50-100	50
	>100	30
Líquido (*) (3% de O_2)	50-100	50
	>100	30
Gaseoso (3% de O_2)	todas las instalaciones	5 como norma general. 10 para gas de altos hornos. 30 para gases producidos por la industria del acero que pueda tener otros usos.

(*) Por lo que respecta a dos instalaciones con una potencia térmica nominal de 250 MW_t en Creta y Rodas que autorizaran antes del 31 de diciembre de 2007 se aplicará el valor límite de emisión de $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

A diferencia de las normativas europeas, en las que el control de las emisiones se reduce a la concentración de masa total, en Estados Unidos rigen normativas dictadas por United States Environmental Protection Agency, que regulan el control de emisiones de partículas menores que $10\mu\text{m}$, (PM10) desde 1987 y menores que $2,5\mu\text{m}$, (PM2,5) desde 1997.

1.6 ANTECEDENTES.

Los primeros intentos de realizar una caracterización de aerosoles de emisión se reducen, en cuanto a partículas, a la determinación de la concentración másica y culminaron en una normativa de medida de emisiones en chimeneas que establecía un método, basado en el

tren de muestreo EPA, (US EPA Method 5, 1977), que consta básicamente de una sonda introducida en la chimenea, un ciclón y un portafiltras. Todos ellos termostatizados para evitar las condensaciones. Después del filtro, la muestra es enfriada mediante un tren de borboteadores antes de ser conducida a los equipos de succión y control de caudal.

Posteriormente, el desarrollo instrumental de medida de aerosoles, dio lugar al empleo de otros equipos mas sofisticados de manera aislada o bien agrupando varios de ellos en serie o en paralelo. Ello permitía mejorar la resolución de la medida de tamaños, o revelar modos no detectados con un único instrumento o incluso identificar fuentes de emisión cuando hay fuentes múltiples.

Al principio, los impactadores de cascada fueron los equipos mas ampliamente utilizados de forma compartida con otros. El uso integrado de impactadores de cascada en serie con clasificadores de movilidad eléctrica ó baterías de difusión proporcionaba distribuciones de tamaño aerodinámico y de movilidad. (Rao y Whitby, 1978) (Cheng y Yeh, 1979). El aerosol entraba al impactador que operaba sin filtro final de tal forma que las partículas pequeñas atravesaban las etapas de impactación y entraban en el clasificador o la batería de difusión. El método presentaba varios inconvenientes, por una parte, los caudales de funcionamiento de uno y otro no coincidían y, por tanto, el muestreo sólo se podía realizar a un solo caudal. Por otra parte, el rebote o resuspensión de partículas desde cualquier etapa del impactador podía dar lugar a resultados erróneos en el clasificador y en la batería de difusión.

Newton *et al.* en 1980, utilizaron un tren de muestreo y medida con varios impactadores y un filtro en paralelo para medir las partículas de emisión en una planta piloto de combustión de carbón de lecho fluido burbujeante a presión atmosférica, (LFB). La muestra inicial era llevada a una cámara de muestreo que actuaba por una parte como sistema previo de separación de partículas $> 10 \mu\text{m}$ y por otra dividiendo el flujo inicial de muestreo hacia los equipos empleados.

La distribución de tamaño a la salida de seis combustores de carbón pulverizado de diferentes características y de: 25, 113, 360, 360, 520 y 540 MW de potencia fue estudiada por McElroy *et al.* en 1982. Llevando la muestra hasta un impactador de cascada y simultáneamente hasta un clasificador electrostático. El equipo de muestreo BCURA desarrollado por Warren Spring Laboratory en UK, consistía básicamente en un ciclón y un filtro de lana de vidrio en secuencia, ambos dentro del conducto desde donde se tomaba la muestra, lo que evitaba el tener que calentar el sistema de medida. De forma similar, se utilizaron ciclones en cascada para obtener muestras fraccionadas en cantidad suficiente y poder realizar análisis químico sobre ellas, (Sloss y Gardner, 1995).

Desde los años 90, el grupo de Tecnología de Aerosoles del Centro de Investigación VTT (Finlandia), ha venido utilizando una metodología propia de muestreo y medida para la caracterización de partículas en emisiones industriales. Al principio, basada exclusivamente en el empleo de impactadores de baja presión. Así en 1990, Kauppinen y Pakkanen, realizaron medidas de emisión de una planta de carbón pulverizado quemando carbón bituminoso (17,2 kg/s), y determinaron la composición química elemental en función del tamaño de partícula, mediante un impactador de baja presión, (BLPI, Berner Low Pressure Impactor) situado en cabeza (en el interior de la chimenea).

Posteriormente, el grupo finlandés ha venido utilizando el mismo sistema de muestreo y medida, que consiste en la utilización de dos configuraciones diferentes para determinar la distribución de tamaño en masa y en número (Figura 1-2).

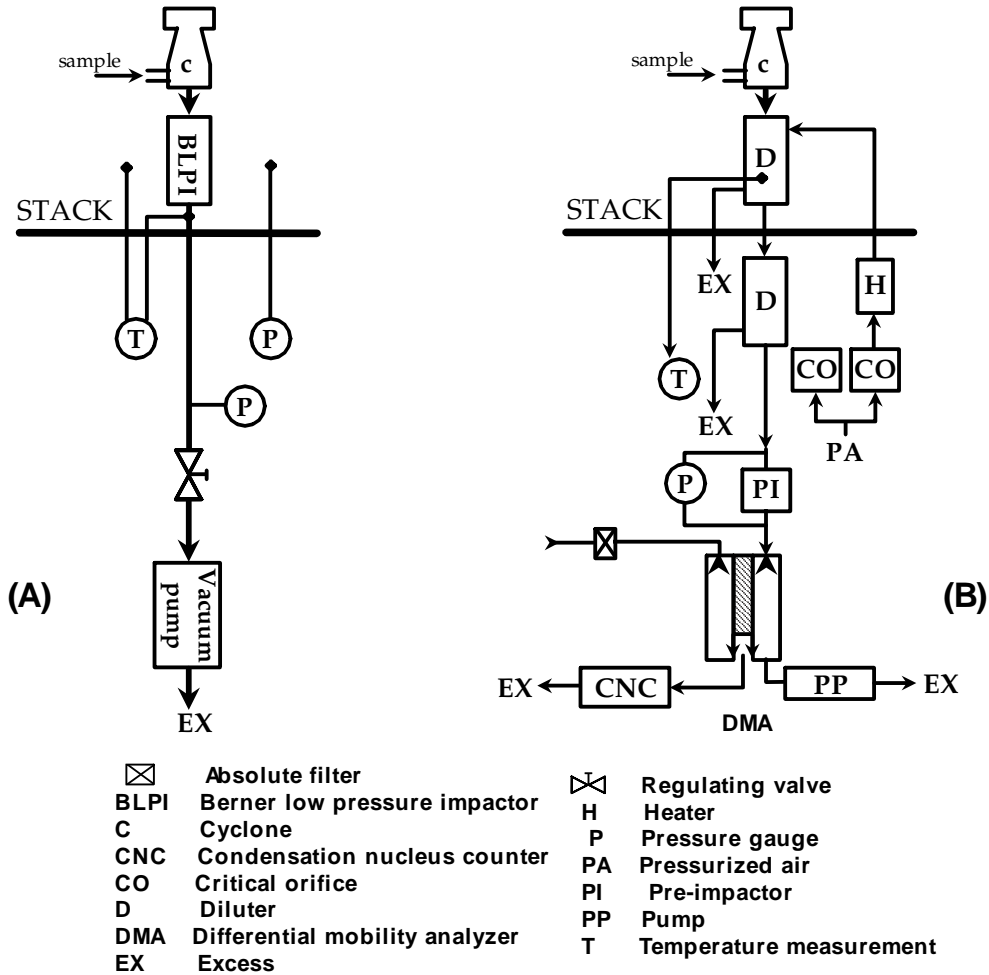


Figura 1-2. Sistema de caracterización de aerosoles de combustión del grupo de Tecnología de Aerosoles, Centro de Investigación (VTT) de Finlandia.

La primera disposición consiste en: un pre-ciclón con boquilla de muestreo incorporada para captar isocineticamente las muestras. El ciclón, elimina las partículas mayores que 2,5 µm, evitando la sobrecarga de los equipos de medida por las partículas más gruesas. A continuación y dentro de la chimenea, hay un impactador de baja presión. Por último, se encuentra el sistema de succión. En la segunda configuración, la muestra es extraída del conducto a través de un pre-ciclón similar al de la configuración primera y después del ciclón y todavía dentro de la chimenea la muestra es diluida con aire limpio, seco y

caliente, para minimizar la condensación del agua, sulfúrico, etc. Fuera de la chimenea, es nuevamente diluida, pero con aire limpio y seco a temperatura ambiente. Después, es conducida hasta un equipo SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). Con esta configuración, Joutsensaari *et al*, 1992, estudiaron la formación de partículas en una planta de carbón pulverizado a escala real, midiendo la distribución de tamaño en masa con el impactador de baja presión y la distribución en número con el SMPS, aunque no de forma simultánea. Mohr *et al*, 1996, utilizando sólo la segunda configuración, realizaron medidas en dos Centrales térmicas de carbón pulverizado, de 615 y 510 MW de potencia, antes y después del precipitador electrostático, y determinaron la eficacia de separación para partículas submicrométricas. Con el esquema completo del sistema de muestreo y medida, Ylatälo y Hautanen, 1998, midieron la penetración en un precipitador electrostático situado en una Planta de carbón pulverizado, de 300 MW, quemando carbón bituminoso.

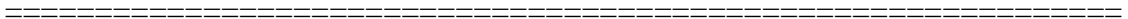
Los daneses Christensen y Livbjerg, 1996, utilizaron un sistema especialmente desarrollado para las medidas de campo, con el fin de estudiar las características fisicoquímicas de las partículas submicrométricas procedentes de la combustión de paja (trigo, cebada, avena y centeno) en una planta de 25 MW. El sistema incorporaba al igual que el desarrollado por VTT, un impactador de baja presión y un SMPS, como equipos de medida. Pero lo más significativo del sistema, era la incorporación de un secador por difusión para evitar la condensación del agua, que en gran cantidad y procedentes del combustible, acompañaba a la muestra.

A diferencia de las medidas de campo, en las que se intenta simplificar el sistema de muestreo y medida, los ensayos de laboratorio permiten utilizar otros diseños más complejos y emplear un mayor número de equipos de medida. Al igual que hicieron Newton *et al*, 1980, en sus estudios de campo, es habitual en laboratorio usar una cámara de muestreo desde la que se toman unas segundas muestras para cada uno de los equipos que se utilizan. Peters *et al*, 1993, con una cámara de este tipo, compararon las medidas

obtenidas con cuatro diferentes equipos, unas referidas a masa y otras a número de partículas, para un aerosol de NaCl de distribución de tamaño polidispersa y monodispersa, generadas con un atomizador. En este caso, la cámara también servía para diluir la muestra y la denominaban cámara de mezcla. Una cámara con el mismo objeto fue utilizada por Sioutas *et al*, 1999, para estudiar la pérdida de carga de filtros “nuclepore”.

Todos estos estudios, junto al que se presenta en este documento señalan algunas directrices en cuanto a posibles procedimientos a utilizar y en ese sentido cualquier contribución al desarrollo de sistemas de muestreo y medida de partículas resultará bienvenida. De forma que, en el futuro, la utilización conjunta de sistemas acoplados vaya alcanzando unos criterios de unificación suficientes para permitir la caracterización de aerosoles de emisión de forma regulada.

2 OBJETIVOS.



2. OBJETIVOS.

Una de las mayores limitaciones en el estudio de las partículas de aerosol es la obtención de muestras representativas y la determinación de una serie de propiedades que van a permitir su caracterización integral, tal como se mencionó en la introducción.

Como ya se ha indicado previamente, la caracterización de partículas se reducía inicialmente a la determinación de su concentración másica. La USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) estableció una metodología aplicable a emisiones en

chimeneas que permitía su adopción en la mayor parte de las normativas (U.S. Environmental Protection Agency, 1974, 1977a, 1977b, 1977c, 1978, 1990). A partir de estos inicios, el desarrollo de nuevas tecnologías de medida de aerosoles ha abierto la posibilidad de un mejor conocimiento de las partículas. Sin embargo, cada técnica de medida se basa en un principio físico que solo es aplicable en un intervalo de tamaño porque los mecanismos que gobiernan el comportamiento de las partículas varían con éste (apartado.3.2). Como las partículas presentan habitualmente una distribución amplia de tamaños, una sola técnica es incapaz de dar la información suficiente para caracterizarlas de forma completa, en cuanto al tamaño. Además, ninguna técnica da información de más de una propiedad. En este punto, se hace necesario establecer una metodología de muestreo y medida de aerosoles que permita utilizar en medidas de campo varias tecnologías. La utilización de manera acoplada de estas técnicas, algunas propias de laboratorio, facilitarán la caracterización total de las partículas y permitirán obtener datos reproducibles y comparables, en diferentes procesos o experiencias.

Con este estudio, se pretende desarrollar una metodología de caracterización integral de partículas de aerosol, fundamentalmente para las emisiones en procesos de generación de energía. No obstante, el método puede ser lo suficientemente versátil para poder ser utilizado con otros tipos de aerosoles.

Lo que se presenta como un objetivo general puede desarrollarse a través de varios objetivos parciales, (Figura 2-1):

- Diseño y construcción de un sistema de muestreo y medida, basado en la disposición acoplada de varios equipos de medida de partículas, que podrán ser utilizados de forma simultánea.. Esto implica:
 - Una división del caudal original de muestreo.
 - Un acondicionamiento previo de la muestra.

- Validación teórica y experimental de los equipos implicados en el sistema de muestreo.
- Aplicaciones de la metodología en emisiones de combustión de carbón y gasoil, contribuyendo a la validación de dos procesos de filtración basados en la precipitación electrostática convencional y en la aglomeración acústica.

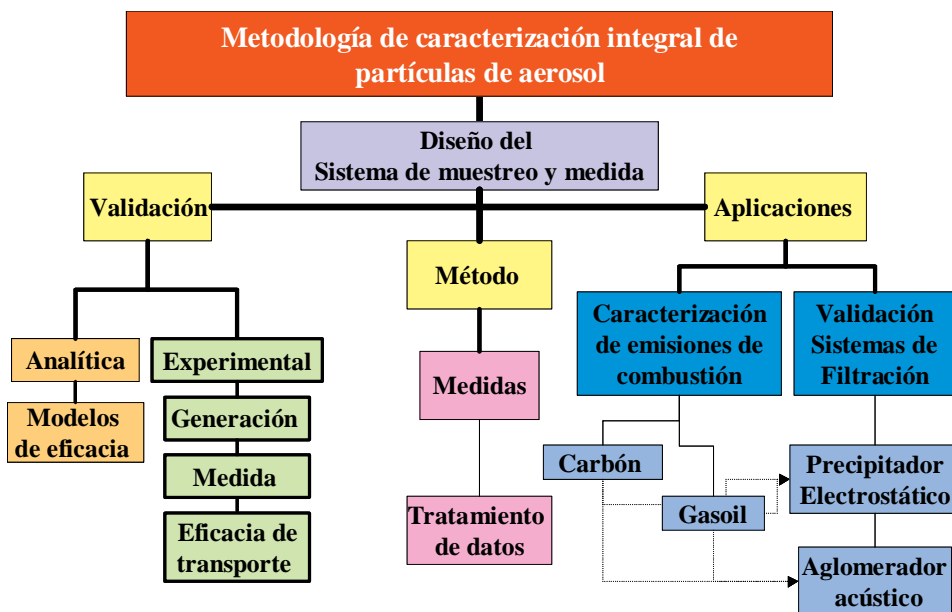


Figura 2-1. Esquema de objetivos.

La etapa de validación del sistema comprende, en primer lugar, una valoración teórica de la eficacia de aspiración en la sonda y el transporte a través de las líneas de muestreo, analizando los diferentes mecanismos de deposición de partículas en conductos de sección circular. Una fase experimental de validación individual de los equipos de división de flujo y acondicionamiento de la muestra, determinando para cada uno de estos la eficacia de transporte en las condiciones de muestreo. Para ello, se utilizan bancos de calibración diseñados para tal efecto, con sistemas de generación y medida de partículas. Los resultados experimentales son contrastados con los teóricos obtenidos a partir de la

aplicación de modelos de deposición por distintos mecanismos. La eficacia de transporte deducida, en función del caudal de muestreo, permite corregir las medidas realizadas, aproximándonos en gran manera a la muestra real.

En la segunda fase, se plantea un método de muestreo y medida así como del tratamiento de los datos obtenidos. Con ello, se facilita la interpretación de los resultados ya que la utilización conjunta de varios equipos que se basan en conceptos diferentes, aparte de generar numerosos datos, complica la comparación entre ellos. Los instrumentos utilizados se clasifican en dos grupos dependiendo de la forma en la que dan respuesta. Unos realizan la medida durante el muestreo mientras que otros se comportan como captadores de la muestra y proporciona una medida post-muestreo.

Finalmente, el método desarrollado se aplicará a la caracterización de partículas de emisión procedentes de diferentes sistemas de generación de energía, así como a la validación de sistemas de filtración. De esta forma, se analizan y se comparan las caracterizaciones de emisiones procedentes de la combustión de carbón en una Central térmica de carbón pulverizado, en una Planta piloto de lecho fluido circulante y las emisiones de escape de un motor generador Diesel. También, el sistema de muestreo y medida diseñado permitirá realizar una validación integral de uno de los sistemas de separación y eliminación de partículas más utilizados en la industria, un prototipo de precipitador electrostático (ESP). Por último, a partir de las medidas realizadas según la metodología presentada se evaluará el proceso de aglomeración acústica, como sistema de acondicionamiento de emisiones previo a la utilización de equipos convencionales de eliminación de partículas.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

En este capítulo, se presentan los fundamentos teóricos que permiten, por una parte, diseñar el sistema de muestreo y utilizarlo en condiciones óptimas para obtener la máxima eficacia de muestreo. Por otra, simular el comportamiento de los diferentes dispositivos de acondicionamiento utilizados en el sistema, a partir de los modelos establecidos para conductos de sección circular.

3.1 MUESTREO DE AEROSOLES.

De manera general, el sistema de muestreo constituye el nexo de unión entre el punto de medida y el instrumento que la realiza. Comprende la extracción de la muestra o, de forma particular muestreo, el transporte y, en ocasiones, el acondicionamiento a los requerimientos del equipo (diluyéndola, enfriándola, secándola, separándola de algunas especies gaseosas o de partículas de un determinado tamaño, etc.), (Figura 3-1).



Figura 3-1. Diagrama general de objetivos de un sistema de muestreo, (Fissan y Schwientek, 1987).

3.1.1 Extracción de la muestra.

La toma de muestras debe reunir una serie de condiciones, de forma que la perturbación producida por el sistema de muestreo no modifique las características propias del aerosol. Una muestra es representativa cuando las características físico-químicas del aerosol no cambian desde el punto de muestreo hasta los equipos de medida. Las partículas deben muestrearse evitando o al menos controlando las pérdidas durante la extracción.

Si la eficacia fraccional de aspiración, $\eta_{asp.} = c_m/c_o$, se define como la razón entre la concentración de la masa de partículas en la muestra para un intervalo de tamaño determinado, c_m y la concentración de la masa de partículas en el conducto, c_o , para ese

mismo intervalo de tamaño, el objetivo es conseguir una eficacia lo más próxima posible a la unidad.

Existen cuatro factores que determinan la eficacia de aspiración:

- Posición de la boquilla de muestreo.
- Tamaño y geometría de la boquilla.
- Relación entre las velocidades, v_o/v_m , del aerosol en el conducto y de muestreo.
- Tamaño de partícula muestreada, expresada como diámetro de partícula, d_p .

Cuando la boquilla de muestreo está situada frente al flujo y alineada con las líneas de corriente, el muestreo es *isoaxial*, si forma cualquier ángulo no nulo con la dirección de flujo entonces es *anisoaxial*.

Cuando la relación v_o/v_m es igual a uno, el muestreo es *isocinético*, sino será *anisocinético*: si $v_o/v_m < 1$ es *superisocinético* y si $v_o/v_m > 1$ es *subisocinético*.

3.1.1.1 Muestreo isoaxial.

En la figura 3-2, se puede observar el patrón de superficies de corriente y trayectorias de las partículas en un muestreo isoaxial, con una sonda de pared delgada, alineada con la corriente de flujo, para diferentes relaciones de velocidades v_o/v_m , (Vincent, 1989).

En la figura (a), $v_m = v_o$. En estas condiciones, la superficie límite de corriente no es ni divergente ni convergente y no hay distorsión de flujo siendo $\eta_{asp.} = 1$.

En la figura (b), $v_m < v_o$, (muestreo subisocinético), la concentración de partículas que entran en la sonda se enriquece por el hecho de que las partículas mayores no se desvían con las líneas de corriente y se introducen por inercia en la sonda, $\eta_{asp.} > 1$.

En la figura (c), $v_m > v_o$, (muestreo superisocinético), la concentración de partículas que entran en la sonda es reducida, porque las partículas de mayor tamaño se salen de las líneas de corriente y no son muestreadas, siendo $\eta_{asp.} < 1$,

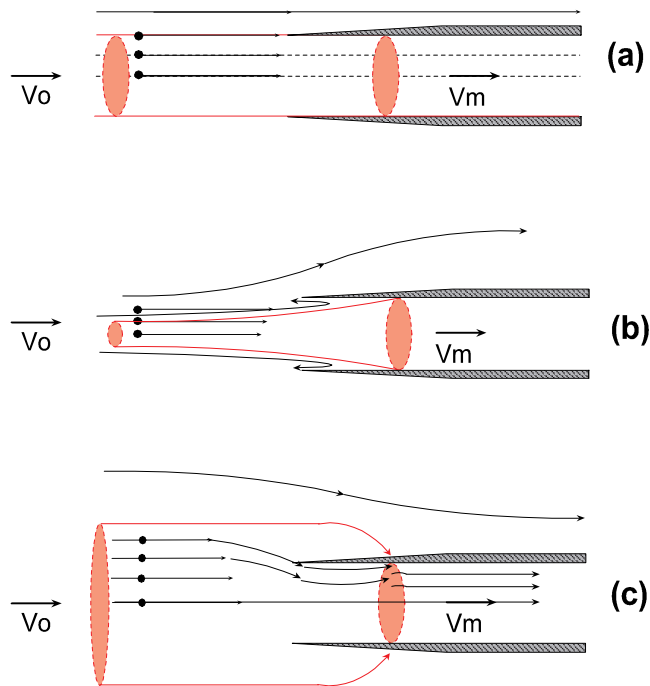


Figura 3-2. Patrón de superficies de corriente y trayectorias de las partículas para una sonda cilíndrica de pared delgada orientada en la dirección de la corriente: (a) $v_m = v_o$. (b) $v_m < v_o$. (c) $v_m > v_o$.

Aunque el análisis precedente supone que el flujo es laminar; puede hacerse extensivo para regímenes turbulentos cuando las fluctuaciones en la velocidad instantánea no excedan de $\pm 10\%$ de la velocidad media, (Hinds, 1982).

Para el muestreo isoaxial, la eficacia de aspiración se calcula habitualmente mediante la correlación deducida por Belyaev y Levin en 1972:

$$\eta_{\text{asp.}} = 1 + [(v_o/v_m) - 1] \left[1 - \left(1 + \left(2 + \frac{0,617}{(v_o/v_m)} \right) \text{Stk} \right)^{-1} \right] \quad [3-1]$$

$$0,18 \leq \text{Stk} \leq 2,03 \quad \text{y} \quad 0,17 < v_o/v_m < 5,6$$

$$\text{Stk} = \frac{\rho_p d_p^2 v_o C(\text{Kn})}{18 \mu_g d_b} \quad [3-2]$$

siendo:

Stk = número de Stokes.

ρ_p = densidad de la partícula (g/cm^3).

d_p = diámetro de partícula (cm).

v_o = velocidad del aerosol en el conducto (cm/s).

$C(\text{Kn})$ = factor de deslizamiento de Cunningham en función del número de Knudsen, ($\text{Kn} = 2\lambda/d_p$).

$$C(\text{Kn}) = 1 + (\text{Kn} \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/\text{Kn})))$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T)))$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

μ_g = viscosidad del gas (dinas.s/cm^2).

d_b = diámetro de la boquilla de aspiración (cm).

En la siguiente figura, se representa la eficacia de aspiración, calculada a partir de la ecuación de Belyaev y Levin, para unas condiciones típicas de muestreo y diferentes valores de la relación v_o/v_m . Se observa que la condición de isocinetismo ($v_o = v_m$) da lugar a eficacias de aspiración de 1, para cualquier diámetro de partícula. Por encima de esta línea, se pueden observar las correspondientes en condiciones subsocinéticas y por debajo, las correspondientes a muestreo superisocinético.

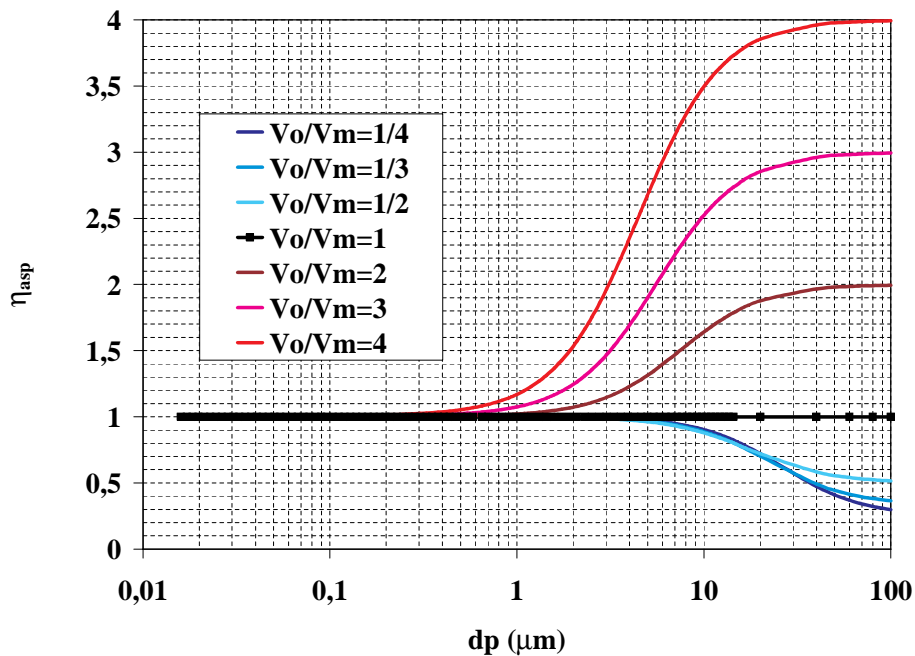


Figura 3-3. Eficacia de aspiración de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C y diferentes valores de v_o/v_m .

Se observa que la eficacia de aspiración para partículas de diámetro inferior a 0,5 μm no es influida por la velocidad de muestreo y para las mayores a ese tamaño, sólo en condiciones de subsocinético. Si el muestreo es superisocinético, el efecto es solo

apreciable para partículas superiores a 5 μm . La eficacia de aspiración se distancia de la unidad cuando aumenta el tamaño de partícula y se puede observar que para partículas de 100 μm la eficacia de aspiración prácticamente coincide con la relación de velocidades, es decir, si $v_o/v_m = 1/3$ entonces la $\eta_{\text{asp.}} \approx 1/3$ y si $v_o/v_m = 4$, la $\eta_{\text{asp}} \approx 4$.

No todas las partículas aspiradas a través de la boquilla son muestreadas, porque las que atraviesan la capa límite formada en la región de entrada de la boquilla son depositadas por gravedad en la pared interna, de forma que se puede hablar de eficacia de sedimentación gravitacional en la boquilla, η_{grav} , obtenida experimentalmente por Okazaki, *et al*, 1987.

$$\eta_{\text{grav.}} = \exp\left(-4,7\left(Z^{1/2} \text{Stk}^{1/2} \text{Re}^{-1/4}\right)^{0,75}\right) \quad [3-3]$$

$$Z = (L_b v_s)/(v_m d_b).$$

L_b = longitud de la región de entrada, (cm).

v_s = velocidad de sedimentación = $\rho_p \cdot (d_p)^2 \cdot 0,00000981 \cdot C(\text{Kn}) / (18 \cdot \mu_g)$, (cm/s).

$C(\text{Kn})$ = factor de Cunningham en función del número de Knudsen, ($\text{Kn} = 2\lambda/d_p$).

$$C(\text{Kn}) = 1 + (\text{Kn} \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/\text{Kn})))$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T)))$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K)

d_b = diámetro de la boquilla, (cm).

Re = módulo de Reynolds = $v_m d_b \rho_g / \mu_g$

ρ_g = densidad, (g/cm^3).

μ_g = viscosidad del gas ($\text{dinas.s}/\text{cm}^2$).

En la siguiente figura, se representa la eficacia de sedimentación gravitacional, en función del diámetro de partícula, calculada mediante la ecuación anterior para una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, considerando diferentes relaciones de velocidad. Se suponen condiciones habituales de muestreo, caudal de 14 l/min y temperatura del aerosol de 150°C.

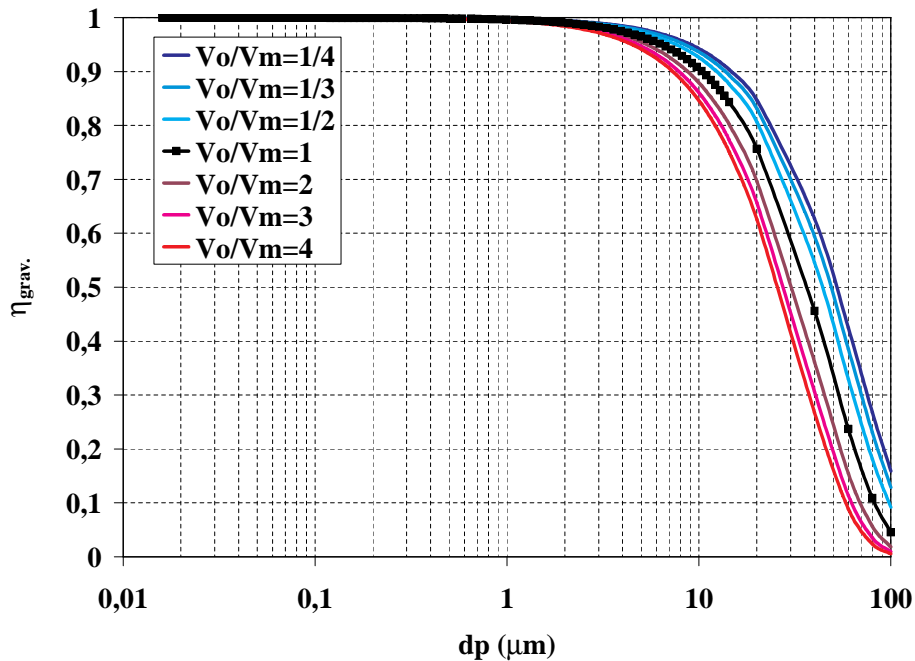


Figura 3-4. Eficacia gravitacional de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C y diferentes valores de v_o/v_m . La velocidad de muestreo es de 7,4 m/s, correspondiente a un caudal típico de muestreo de 14 l/min.

Se puede observar que la deposición gravitacional es solo significativa para partículas de tamaño superior a las 2 μm , perdiéndose casi todas las partículas de 100 micras. El isocinetismo no evitaría la sedimentación gravitacional y tampoco grandes velocidades de muestreo la podrían minimizar de forma significativa y, sin embargo, se incrementaría la pérdida por otros mecanismos.

También la deposición inercial puede provocar pérdidas de partículas. Este fenómeno ha sido estudiado por Liu *et al*, 1989, que establecieron la siguiente ecuación para condiciones subsocinéticas:

$$\eta_{\text{iner.}} = \frac{1 + (v_o/v_m - 1)/(1 + 2,66/\text{Stk}^{2/3})}{1 + (v_o/v_m - 1)/(1 + 0,418/\text{Stk})} \quad [3-4]$$

si $0,01 \leq \text{Stk} \leq 100$ y $1 < v_o/v_m \leq 10$

En condiciones superisocinéticas, la eficacia inercial puede calcularse con la siguiente ecuación determinada por Hangal y Willeke, 1990:

$$\eta_{\text{iner.}} = \exp \left\{ -75 \left[\frac{I_v}{0,09 (\text{Stk} (v_m - v_o)/v_o)^{0,3}} \right]^2 \right\} \quad [3-5]$$

si $0,02 \leq \text{Stk} \leq 4$ y $0,25 \leq v_o/v_m < 1 \Rightarrow 0,067 \leq I_v \leq 1$

siendo I_v el parámetro adimensional que describe las pérdidas inerciales en la vena contracta.

En la siguiente figura, se representa la eficacia inercial en función del tamaño de partícula para la misma boquilla que en los casos anteriores; diámetro 1/4" y 10 cm de longitud, considerando diferentes relaciones de velocidad. Se ha supuesto un aerosol a una temperatura de 150 °C, muestreado a 14 l/min.

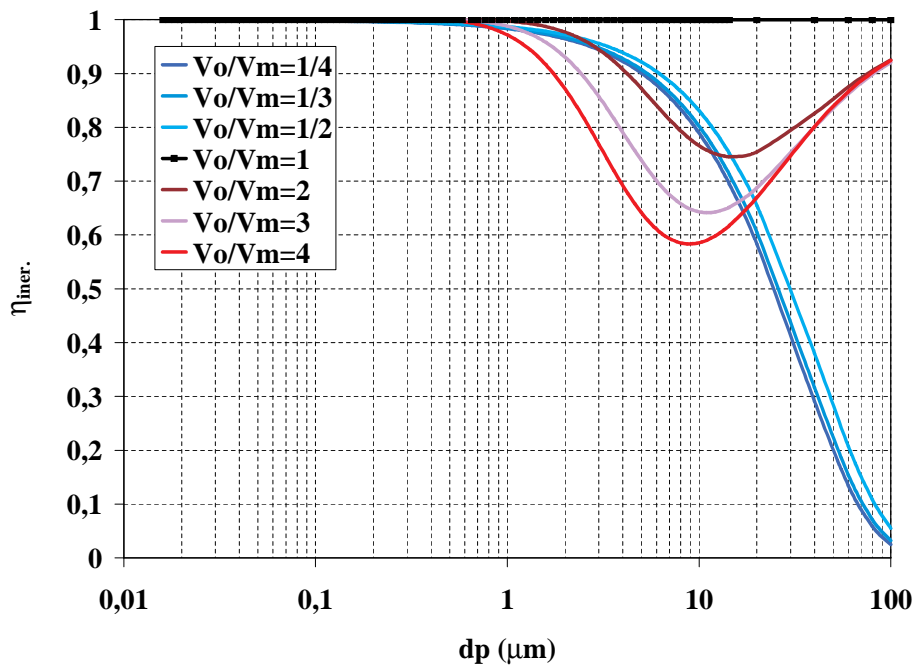


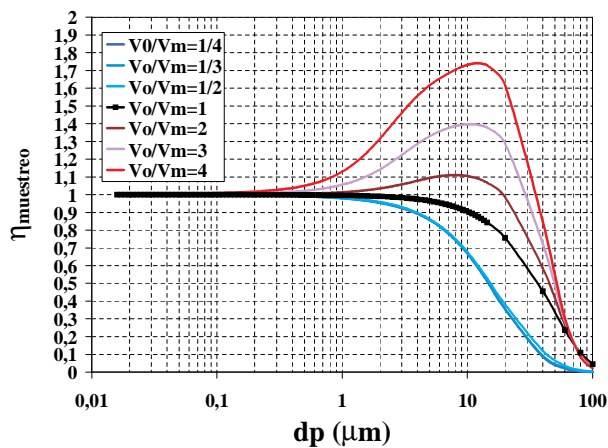
Figura 3-5. Eficacia inercial de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C y diferentes valores de v_o/v_m . La velocidad de muestreo es de 7,4 m/s, correspondiente a un caudal típico de muestreo de 14 l/min.

En estas condiciones el efecto inercial sólo sería apreciable para partículas de tamaño superior a la micra. En condiciones subsocinéticas la eficacia presenta un mínimo para partículas de tamaño próximo a 10 micras. Para condiciones superisocinéticas, la eficacia disminuye con el tamaño de partícula, siendo depositadas la mayor parte de las partículas de tamaño de 100 micras.

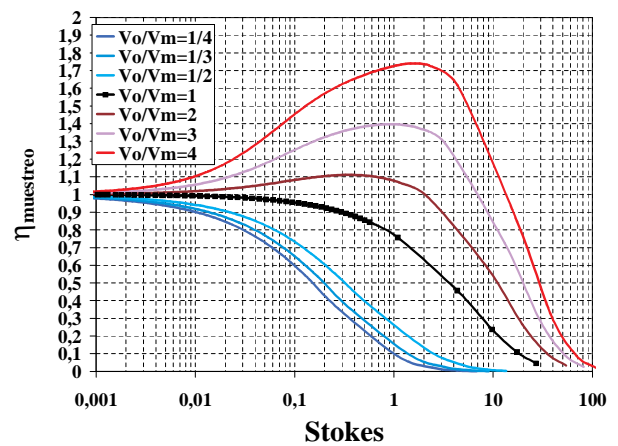
La eficacia total de muestreo, $\eta_{muestreo}$, vendría expresada por el producto de las tres eficacias anteriores:

$$\eta_{muestreo} = \eta_{asp} \cdot \eta_{grav} \cdot \eta_{iner.} \quad [3-6]$$

La Figura 3-6 muestra los resultados de eficacia total de muestreo para la misma boquilla y las mismas condiciones que en los cálculos precedentes. En la figura de la izquierda, la eficacia es presentada frente al diámetro de partícula, mientras que en la de la derecha lo es frente al número de Stokes. La forma de las curvas, en ambos casos, es coincidente. Si bien el análisis frente al diámetro de partícula es más intuitivo, la ventaja de la representación frente al número de Stokes es que la hace general para cualquier condición de muestreo que tenga un número de Stokes que coincida con el de esa representación.



(A)



(B)

Figura 3-6. Eficacia total de muestreo para diferentes valores de v_0/v_m . frente a: a) diámetro de partícula, b) número de Stokes. $d_b = 1/4''$, $L_b = 10$ cm, $T^a = 150^\circ\text{C}$, $v_m = 7,4$ m/s.

Se observa que en el muestreo analizado, las partículas submicrométricas no son prácticamente afectadas cuando éste se desvía del isocinetismo. No ocurre lo mismo para las partículas de tamaño superior a la micra, que siempre resultan afectadas. La influencia es menos significativa en muestreos isocinéticos, y después en superisocinéticos ya que se empieza a detectar en partículas mayores, que para el subsocinetismo. La representación

frente al número de Stokes indica que las condiciones idóneas de muestreo, aparte de las isocinéticas serán las que hagan que el número de Stokes se mantenga por debajo de 0,01.

3.1.1.2 Muestreo anisoaxial.

En la Figura 3-7, se puede observar el patrón de superficies de corriente y trayectorias de las partículas en un muestreo anisoaxial, con una sonda de pared delgada, que forma un cierto ángulo con la corriente de flujo, para diferentes relaciones de velocidades v_o/v_m .

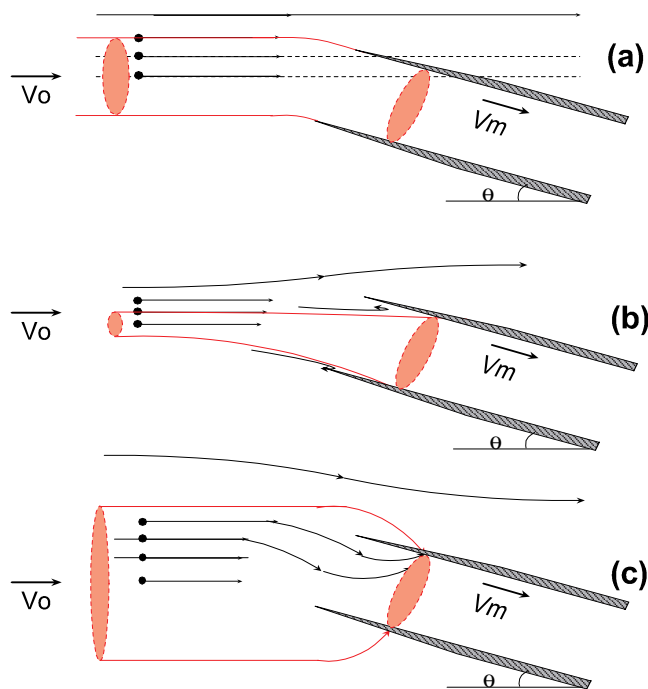


Figura 3-7. Patrón de superficies de corriente y trayectorias de las partículas para una sonda cilíndrica de pared delgada inclinada un ángulo θ respecto a la dirección de la corriente: (a) $v_m = v_o$ (b) $v_m < v_o$. (c) $v_m > v_o$.

Para el muestreo anisoaxial, Hangal y Willeke, 1990, definieron la siguiente correlación para la eficacia de aspiración, si $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$:

$$\eta_{asp.} = 1 + \left[\left(\frac{v_o}{v_m} \right) \cos \theta - 1 \right] \frac{\left[1 - (1 + (2 + 0,617(v_o/v_m)) Stk')^{-1} \right]}{1 - (1 + 2,617 Stk')^{-1}} \left[1 - (1 + 0,55 Stk' \exp(0,25 Stk'))^{-1} \right] \quad [3-7]$$

$$Stk' = Stk \cdot \exp(0,02 \theta) \quad \text{para} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0,02 \leq Stk \leq 4 \\ 0,5 \leq v_o/v_m \leq 2 \end{array} \right\}$$

y para ángulos comprendidos entre 45° y 90° :

$$\eta_{asp.} = 1 + \left[\left(\frac{v_o}{v_m} \right) \cos \theta - 1 \right] \left[3 Stk \left(\frac{v_o}{v_m} \right)^{0,5} \right] \quad [3-8]$$

$$\text{para} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0,02 \leq Stk \leq 0,2 \\ 0,5 \leq v_o/v_m \leq 2,0 \end{array} \right\}$$

En la siguiente figura, se representa la eficacia de aspiración en función del diámetro de partícula, calculada a partir de las ecuaciones anteriores, para unas condiciones típicas de muestreo e isocinetismo ($v_o = v_m$). La boquilla tiene un diámetro de 1/4" y 10 cm de longitud y se sitúa formando ángulos desde 0° a 90° con la corriente de aerosoles que están a 150°C .

Para partículas menores que la micra, un muestreo anisoaxial no parece ser influyente, en cambio, para las mayores de diez micras, cualquier ángulo que forme la boquilla con la dirección de flujo puede ser significativo, tanto más cuanto mayor es el ángulo. Hasta 30° , el muestreo podría ser aceptable y para ángulos superiores se producirían pérdidas muy importantes de las partículas mayores a las diez micras.

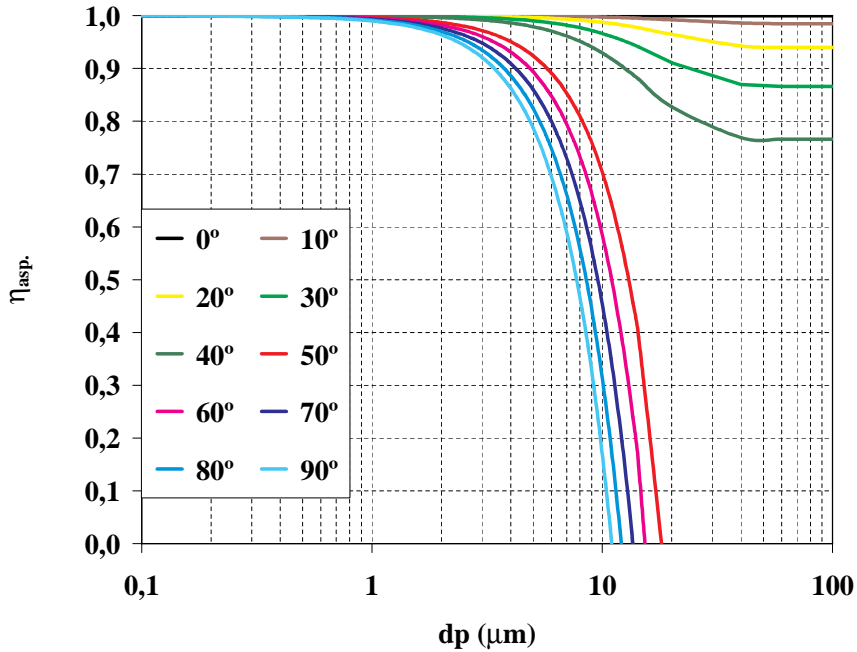


Figura 3-8. Eficacia de aspiración de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C en muestreo isocinético y anixoasial, para ángulos desde 0 a 90°.

Hangal y Willeke, 1990, dedujeron una expresión para la eficacia de sedimentación gravitacional, cuando existía una cierta inclinación de la boquilla con respecto a la dirección de flujo, similar a la utilizada para inclinaciones nulas, a excepción del término que tiene en cuenta el ángulo expresado por su coseno elevado a un exponente:

$$\eta_{\text{grav.}} = \exp\left(-4,7 \left(Z^{1/2} \text{Stk}^{1/2} \text{Re}^{-1/4} (\cos \theta)^{0,5}\right)^{0,75}\right) \quad [3-9]$$

$$Z = (L_b v_s) / (v_m d_b)$$

siendo:

L_b = longitud de la región de entrada, (cm).

v_s = velocidad de sedimentación = $\rho_p \cdot (d_p)^2 \cdot 0,00000981 \cdot C(\text{Kn}) / (18 \cdot \mu_g)$, (cm/s).

d_b = diámetro de la boquilla, (cm).

En la Figura 3-9, se representa la eficacia de sedimentación gravitacional en función del diámetro de partícula, para una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, que forma ángulos de 0° - 90° con la corriente de flujo en el conducto. El muestreo se realiza isocinéticamente y la T^a del aerosol es de 150°C .

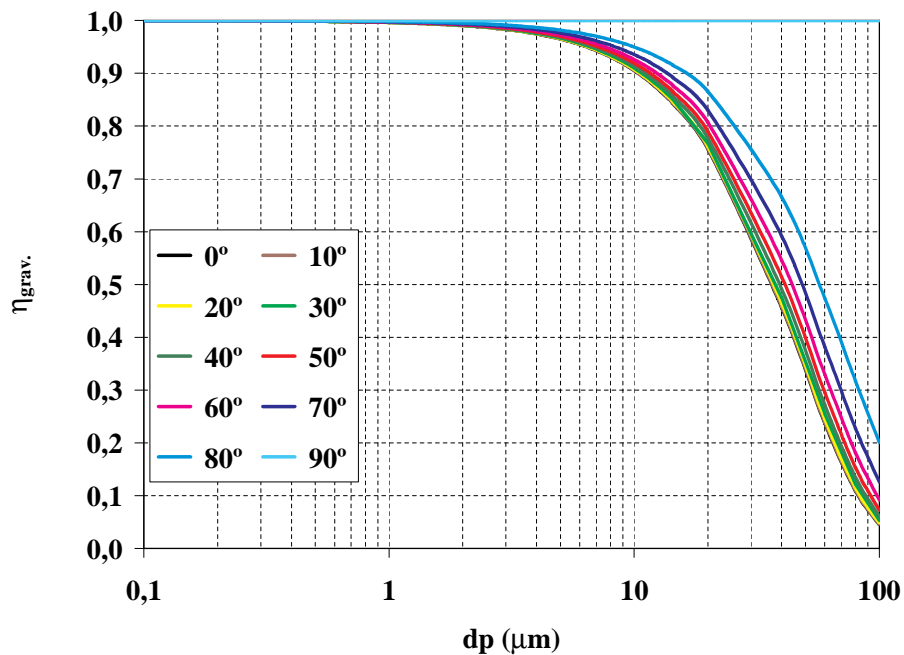


Figura 3-9. Eficacia de sedimentación gravitacional en una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150°C en muestreo isocinético y anisoaxial, para ángulos desde 0° a 90° .

Si la boquilla está horizontal, θ es 0° , la curva de eficacia coincide con la del muestreo isoaxial. Si la boquilla forma un ángulo de 90° con la dirección de flujo, no hay pérdidas gravitacionales. Para partículas menores que la micra, el efecto de un muestreo anisoaxial no es importante en cuanto a la deposición gravitacional, para partículas entre 1 y $10 \mu\text{m}$

el ángulo que forma la boquilla con la dirección de flujo es ligeramente significativo; disminuyendo la eficacia hasta 0,9 para un muestreo totalmente horizontal. Para partículas de 100 μm , la eficacia puede disminuir por debajo de 0,2, tanto más cuanto menor es θ .

Hangal y Willeke, 1990, también dedujeron una expresión para la eficacia cuando se considera la deposición inercial debida a dos fenómenos: pérdidas por contracción de la vena I_v y pérdidas por impactación en la pared I_w :

$$\eta_{\text{iner.}} = \exp \left(- 75 (I_v + I_w)^2 \right) \quad [3-10]$$

$$\text{para } \left\{ \begin{array}{l} 0,02 \leq \text{Stk} \leq 4 \\ 0,25 \leq v_o/v_m \leq 4,0 \end{array} \right\}$$

$$I_v = 0,09 [\text{Stk} \cos \theta (v_m - v_o)/v_o]^{0,3} \quad [3-11]$$

Según esta expresión, sólo en condiciones no isocinéticas tendría un valor no nulo este parámetro.

$$I_w = \text{Stk} (v_o/v_m)^{0,5} \text{sen} (\theta \pm \alpha) \cdot \text{sen}[(\theta \pm \alpha)/2] \quad [3-12]$$

siendo:

$$\alpha = 12 [(1 - \theta/90) - \exp(-\theta)]$$

En la ecuación que define la pérdida inercial por impactación, aparece en dos ocasiones el símbolo \pm , que se refiere a la pérdida cuando la boquilla está situada boca arriba (+) o boca abajo (-) respectivamente.

La eficacia de deposición inercial de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, es representada en la siguiente figura. La temperatura de los aerosoles es 150 °C y el muestreo es isocinético y anixoasial, considerando ángulos desde 0° a 90°.

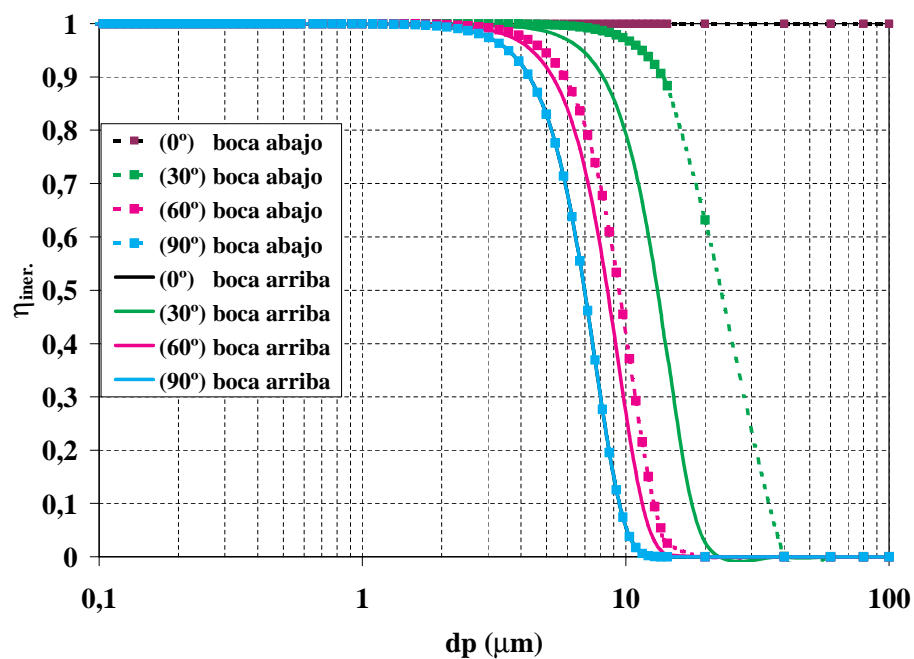


Figura 3-10. Eficacia de deposición inercial de una boquilla de 1/4" y 10 cm de longitud, en función del diámetro de partícula, para aerosoles a 150 °C en muestreo isocinético y anixoasial, para ángulos desde 0° a 90°.

Evidentemente cuando el ángulo es 0° coinciden el valor de la eficacia, considerando cualquier orientación, arriba o abajo (signo + ó - en la ecuación 3-12) ya que la boquilla estará situada en la dirección del flujo. Cuando el ángulo es de 90° también la eficacia es coincidente para las dos orientaciones.

En condiciones típicas de muestreo, sólo las partículas mayores que la micra parecen afectarse, tanto más cuando mayor es el ángulo. Para ángulo de 90° , las partículas superiores a 10 micras pueden llegar a perderse totalmente por este efecto.

Considerando la misma boquilla que en el estudio precedente ($d_b = 1/4"$, $L_b = 10$ cm), se ha calculado la eficacia total de muestreo en función del diámetro de partícula y del número de Stokes. Se han supuesto diferentes ángulos respecto a la corriente de aerosoles y también distintas orientaciones, boca abajo o boca arriba respecto al conducto; una velocidad de muestreo de 7,4 m/s y una temperatura del aerosol de 150°C (Figura 3-11).

Por una parte, se observa que las partículas submicrométricas no son influidas ni por el ángulo que forma la boquilla con la línea de corriente ni por la orientación (boca arriba o boca abajo del conducto). La eficacia disminuye con el tamaño hasta hacerse nula para partículas mayores a $10\ \mu\text{m}$, cuando el ángulo de la boquilla con el conducto es de 90° . La eficacia de muestreo mejora al disminuir el ángulo y cuando este disminuye a 0° (isoaxial), sólo se anula para partículas de tamaño mayor que $100\ \mu\text{m}$.

En este caso, igual que en el muestreo isoaxial en este caso, para cualquier ángulo que formara la boquilla con la corriente y sea cual fuese su orientación, la eficacia de muestreo sería de 1, para las partículas con un número de Stokes inferior a 0,01. La eficacia disminuye cuando se incrementa el número de Stokes. Por ello, es conveniente realizar el muestreo con Stokes lo más bajo posible.

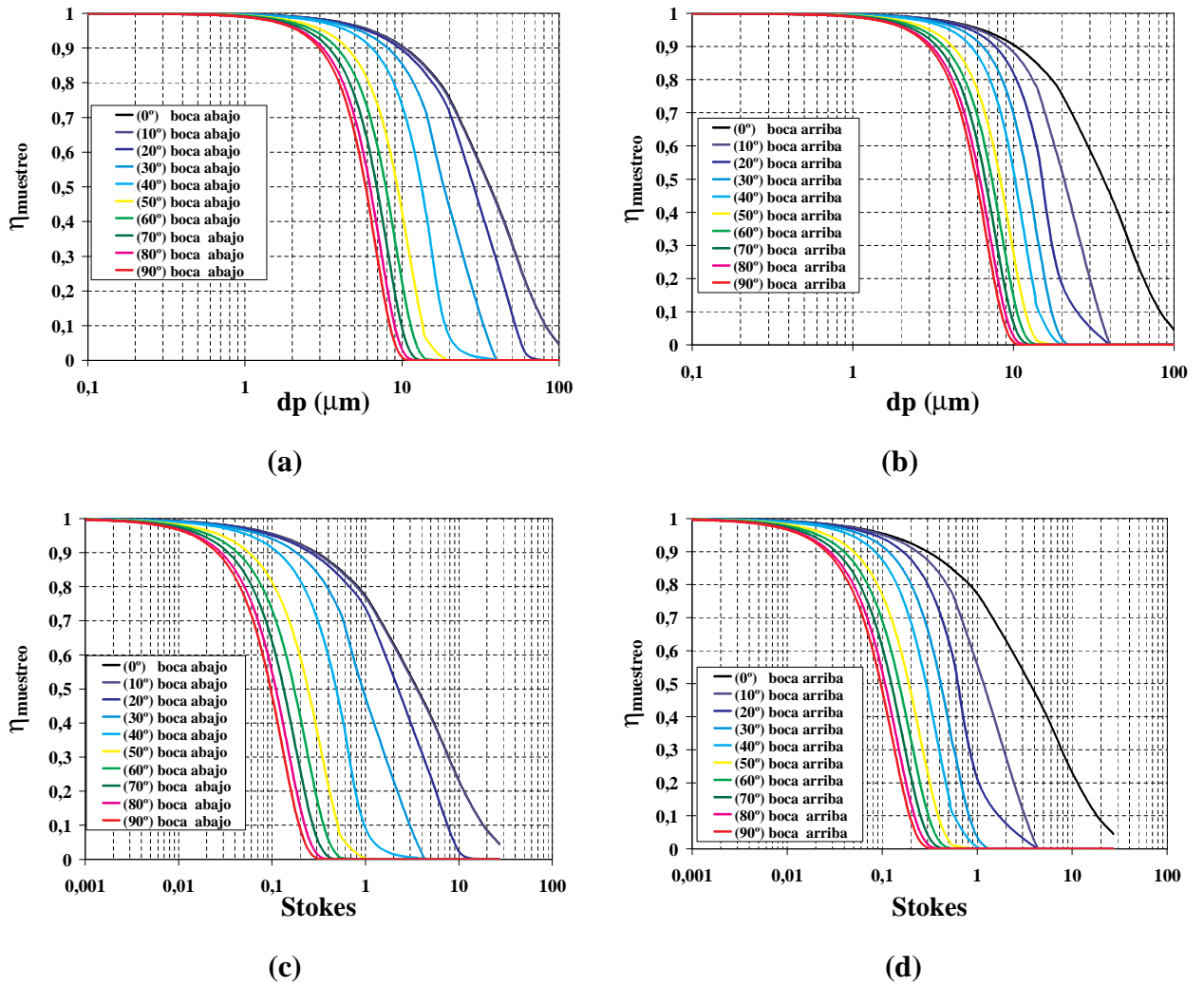


Figura 3-11. Eficacia total de muestreo para diferentes ángulos y orientaciones, en función de: (a) y (b) diámetro de partícula, (c) y (d) número de Stokes. $d_b = 1/4''$, $L_b = 10$ cm, $T^a = 150$ °C, $v = 7,4$ m/s.

3.1.2 Transporte de la muestra.

El sistema de transporte consiste básicamente en una serie de conductos: tramos rectos y curvos, bifurcaciones, estrechamientos y ensanchamientos para conducir la muestra desde la sonda hasta los instrumentos de medida, y cuyo conjunto puede denominarse línea de muestreo. Ésta debe diseñarse de forma que se minimicen las pérdidas de partículas. Como regla general, la distancia y el tiempo de residencia en la línea de muestreo deberán reducirse al mínimo posible.

Durante el transporte, tanto la concentración como la distribución de tamaño de las partículas originalmente muestreadas podrán variar debido a diferentes causas como la deposición en las paredes de los conductos; la coagulación entre partículas de igual o diferente tamaño; los fenómenos de adsorción y condensación de compuestos gaseosos sobre las superficies de las partículas, etc.

Cada uno de estos fenómenos se produce a través de diferentes mecanismos físico-químicos. En el caso de la deposición, se distinguen varios tipos, según el proceso por el que se lleva a cabo, pudiendo ser: gravitacional, difusional, inercial, electrostática y termoforética. Cada efecto puede valorarse a partir de una serie de correlaciones para tubos cilíndricos, tanto en régimen laminar como turbulento.

3.1.2.1 Deposición gravitacional.

Las partículas sedimentan debido a la fuerza gravitacional y se depositan en las paredes de los tubos no verticales, que forman las líneas de muestreo.

La eficacia de transporte, considerando que existe únicamente deposición gravitacional de partículas en un flujo laminar y en una tubo de sección circular fue determinado por Fuch, 1964 y Thomas, 1958, en una tubería horizontal. Posteriormente, Heyder y Gebhart, 1977 establecieron una expresión más general para tubos con diferente inclinación:

ü Régimen laminar,:

$$\eta_{\text{grav.}} = 1 - \frac{2}{\pi} \left[2\kappa \sqrt{1 - \kappa^{2/3}} - \kappa^{1/3} \sqrt{1 - \kappa^{2/3}} + \arcsen(\kappa^{1/3}) \right] \quad [3-13]$$

$$\kappa = \left(\frac{3}{4} \right) (L/d) (v_s/v_m) \cos \theta \quad \text{para} \quad v_s \sin \theta / v_m \lll 1$$

En el caso de que la tubería esté situada verticalmente, $\theta = 90^\circ$ y la eficacia $\eta_{\text{grav}} = 1$

La eficacia de transporte para flujo turbulento en una tubería horizontal fue expresada por Schwendiman *et al*, en 1975, modificándose para tubos inclinados, de la siguiente forma.

ü Régimen turbulento:

$$\eta_{\text{grav.}} = \exp(-dLv_s \cos \theta / Q_m) \quad [3-14]$$

$$v_s \sin \theta / v_m \lll 1$$

Siendo:

$\eta_{\text{grav.}}$ = eficacia de transporte en tubos considerando la sedimentación gravitacional.

L = longitud del tubo (cm).

d = diámetro interno del tubo (cm).

θ = ángulo de inclinación con respecto a la horizontal.

v_s = velocidad de sedimentación (cm/s).

v_m = velocidad de muestreo (cm/s).

Q_m = caudal de muestreo (cm³/s).

En ambos casos, la eficacia de transporte gravitacional aumenta al disminuir la longitud y el diámetro del tubo, también al aumentar el caudal de muestreo y el ángulo de inclinación.

3.1.2.2 Deposición difusional.

Las partículas pequeñas se difunden en el gas cuando existen gradientes de concentración de partículas, debido al movimiento Browniano. La pared interna del tubo presenta una concentración de partículas nula, por lo que las partículas viajan desde otros puntos del fluido hasta ella, que actúa como sumidero. La eficacia de transporte, considerando partículas difusivas es:

$$\eta_{\text{dif.}} = \exp(-\pi d L v_{\text{dif.}} / Q_m) = \exp(-\xi \text{Sh}) \quad [3-15]$$

$$\xi = \frac{\pi D L}{Q_m} \quad \text{y} \quad \text{Sh} = \frac{v_{\text{dif.}} d}{D}$$

$$D = k T B = k T \frac{C(\text{Kn})}{3\pi\mu_g d_p}$$

siendo:

$\eta_{\text{dif.}}$ = eficacia de transporte en tubos considerando la difusión.

$v_{\text{dif.}}$ = velocidad de deposición por difusión (cm/s).

Sh = número de Sherwood.

L = longitud del tubo (cm).

d = diámetro interno del tubo (cm).

Q_m = caudal de muestreo (cm³/s).

v_m = velocidad de muestreo (cm/s).

D = coeficiente de difusión (cm²/s).

k = constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-16}$ (dinas.cm/K).

T = temperatura absoluta (K).

B = movilidad dinámica de la partícula (cm/(s.dina)).

C(Kn) = factor de Cunningham en función del número de Knudsen, ($Kn = 2\lambda/d_p$).

$C(Kn) = 1 + (Kn \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/Kn)))$.

λ = recorrido libre medio (cm).

$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T)))$.

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

μ_g = viscosidad del gas (dinas.s/cm²).

El número de Sherwood es un módulo adimensional de transferencia de masa que contiene la velocidad de deposición por difusión en su definición y está correlacionado con el número de Reynolds ($Re_f = \rho_g v_m d / \mu_g$) y con el número de Schmidt ($Sc = \mu_g / \rho_g D$) de forma diferente para cada régimen:

ü Régimen laminar, (Holman, 1972).

$$Sh = 3,66 + \frac{0,0668 (d/L) Re_f Sc}{1 + 0,04 [(d/L) Re_f Sc]^{2/3}} \quad [3-16]$$

ü Régimen turbulento, (Friedlander, 1977).

$$Sh = 0,0118 Re_f^{7/8} Sc^{1/3} \quad [3-17]$$

Siendo:

ρ_g = densidad del gas (g/cm³).

d_p = diámetro de partícula (cm).

Re_f = número de Reynolds = $\rho_g v_m d / \mu_g$

Sc = número de Schmidt = $\mu_g / \rho_g D$.

La eficacia de transporte en régimen laminar aumenta al disminuir la longitud e incrementar el caudal de muestreo. En régimen turbulento, la eficacia aumenta disminuyendo la longitud del tubo e incrementando el diámetro de tubería.

3.1.2.3 Deposición inercial.

i. En tubos.

En un tubo donde no existen cambios de dirección, se pueden producir deposiciones por inercia debido a las turbulencias. La turbulencia lanza las partículas hasta la capa límite y si la inercia es suficiente, penetran en ella y son depositadas en la pared del tubo. La eficacia de transporte, $\eta_{in.turb}$ en un tubo considerando la velocidad de deposición inercial turbulenta, $v_{in.turb}$, puede determinarse a partir de la siguiente expresión, (Liu y Agarwal, 1974):

$$\eta_{in.turb} = \exp(-\pi d L v_{in.turb.}/Q_m) \quad [3-18]$$

siendo:

$\eta_{in.turb}$ = eficacia de transporte en tubos considerando la deposición inercial turbulenta.

d = diámetro interno del tubo (cm).

L = longitud del tubo (cm).

$v_{in.turb}$ = velocidad de deposición inercial turbulenta (cm/s).

Q_m = caudal de muestreo (cm³/s).

$$v_{in.turb.} = 5,03(v_+/v_m) Re_f^{1/8}$$

$$\begin{cases} v_+ = 0,1 & \text{si } \tau_+ > 12,9 \\ v_+ = (0,0006)(\tau_+) & \text{si } \tau_+ \leq 12,9 \end{cases}$$

$$\tau_+ = 0,0395 Stk Re_f^{3/4}$$

siendo:

v_+ = parámetro de velocidad, adimensional.

τ_+ = tiempo de relajación adimensional.

Re_f = número de Reynolds = $\rho_g v_m d / \mu_g$.

ρ_g = densidad del gas (g/cm³).

v_m = velocidad de muestreo (cm/s).

μ_g = viscosidad del gas (dinas.s/cm²).

Stk = número de Stokes = $C(Kn)\rho_p d_p v_m / 18\mu_g d$.

d_p = diámetro de partícula (cm).

$C(Kn)$ = factor de Cunningham en función del número de Knudsen, ($Kn = 2\lambda/d_p$).

$$C(Kn) = 1 + (Kn \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/Kn)))$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T)))$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

La eficacia de transporte aumenta para tubos de mayor diámetro y menor longitud y cuando disminuye el caudal.

ii. En codos.

Los codos suponen un cambio brusco en la dirección de flujo, por lo que las partículas debido a su inercia se desvían, siendo susceptibles de depositarse en la pared interna del tubo. La eficacia de transporte en codos, $\eta_{in.codos}$ puede estimarse a partir de la correlación empírica de Crane y Evans, 1977, deducida para codos de 90° y validada para otros ángulos cuando el régimen es laminar, que es estable en los codos hasta $Re \approx 5000$.

ü Régimen laminar,

$$\eta_{in.codos} = 1 - Stk \varphi \quad [3-19]$$

Pui *et al*, 1987, encontraron que en flujos turbulentos la eficacia de transporte, $\eta_{in.codos}$, también es independiente del número de Reynolds.

ü Régimen turbulento,

$$\eta_{in.codos} = \exp(-2,23 Stk \varphi) \quad [3-20]$$

siendo:

$\eta_{in.codos.}$ = eficacia de transporte en codos.

Stk = número de Stokes = $C(Kn)\rho_p d_p v_m / 18\mu_g d$.

ρ_g = densidad del gas (g/cm^3).

d_p = diámetro de partícula (cm).

v_m = velocidad de muestreo (cm/s).

μ_g = viscosidad del gas ($dinas.s/cm^2$).

d = diámetro interno del tubo (cm).

$C(Kn)$ = factor de Cunningham en función del número de Knudsen, ($Kn = 2\lambda/d_p$).

$$C(Kn) = 1 + (Kn \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/Kn)))$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T)))$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

ϕ = ángulo del codo (radianes).

En la Figura 3-12, se representa la eficacia de transporte en codos con diferentes ángulos, en función del diámetro de partícula.

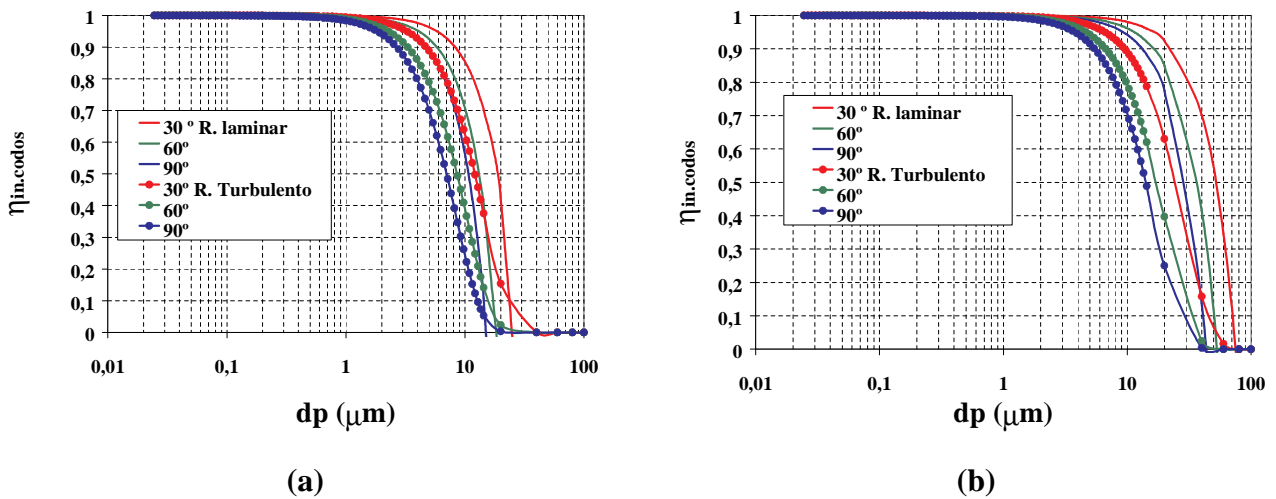


Figura 3-12. Eficacia de transporte con diferentes ángulos, en regímenes laminar y turbulento: a) Diámetro de 1/4 ", caudal de 14 y 20 l/min; b) Diámetro de 1/2 ", caudal de 14 y 40 l/min.

Los cálculos se han realizado en régimen laminar y turbulento, que corresponden a caudales de 14 y 20 l/min, respectivamente, para diámetro de tubo de 1/4 " y caudales de 14 y 40 l/min., para una tubería de 1/2 "

La eficacia de transporte considerando la deposición inercial en codos depende del régimen y del ángulo. La eficacia es 1 para las partículas submicrométricas, pero disminuye al aumentar el tamaño de partícula, tanto más cuanto mayor es el ángulo, y más en régimen turbulento que en laminar.

Si es imprescindible que haya curvas en las líneas de muestreo, el radio de curvatura (radio del codo/radio del tubo) debería ser ≥ 4 y el Stk lo menor posible.

iii. Estrechamientos.

Los estrechamientos en las líneas de muestreo suponen un cambio brusco en la dirección de flujo al cambiar el diámetro del tubo. Deben evitarse ya que producen pérdidas difíciles de caracterizar, y en el caso de que deban existir conviene realizar una valoración experimental de las mismas. Ye y Pui, en 1990, desarrollaron una correlación numérica para la eficacia de transporte inercial, $\eta_{in.est.}$, a través de un estrechamiento, cuando el régimen es laminar.

$$\eta_{in.est.} = \begin{cases} 1 & \text{si } \chi < 0,213 \\ 1 - \left[1 - (d_o/d_i)^2 \right] \cdot \left[1 - \exp\left(1,721 - 8,577\chi + 2,227\chi^2\right) \right] & \text{si } 0,213 \leq \chi \leq 1,95 \\ (d_o/d_i)^2 & \text{si } \chi > 1,95 \end{cases} \quad [3-21]$$

$$\chi = Stk^{0,5} (d_o/d_i)^{0,31}$$

siendo:

$\eta_{in.est.}$ = eficacia de transporte en estrechamientos.

d_o = diámetro del tubo pequeño (cm).

d_i = diámetro del tubo grande (cm).

Stk = número de Stokes = $C(Kn)\rho_p d_p v_m / 18\mu_g d_o$.

ρ_g = densidad del gas (g/cm^3).

d_p = diámetro de partícula (cm).

v_m = velocidad de muestreo (cm/s).

μ_g = viscosidad del gas ($dinas.s/cm^2$).

d = diámetro interno del tubo (cm).

$C(Kn)$ = factor de deslizamiento de Cunningham en función del número de Knudsen,

$(Kn = (2\lambda/d_p))$.

$$C(Kn) = 1 + (Kn \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/Kn))).$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T))).$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

En la siguiente figura, se representa la eficacia de transporte en un estrechamiento desde tuberías de diferente diámetro: 1", 1/2" y 1/4" hasta una de diámetro fijo 1/4", todas ellas con dimensiones habituales de una línea de muestreo. El caudal es de 14 l/min y el régimen es laminar

Se observa que para partículas menores que un tamaño determinado 7 - 20 μm la deposición es nula, para las mayores la eficacia de transporte decrece con el tamaño, siendo mayor cuanto menor es la relación entre los diámetros de tubería que forman el estrechamiento, d_o/d_i . Aunque este efecto se va invirtiendo conforme las partículas son mayores y resulta una eficacia de transporte mayor para estrechamientos menos pronunciados. Finalmente, la eficacia adquiere un valor constante que coincide con la última solución de la ecuación [3.21], es decir $(d_o/d_i)^2$.

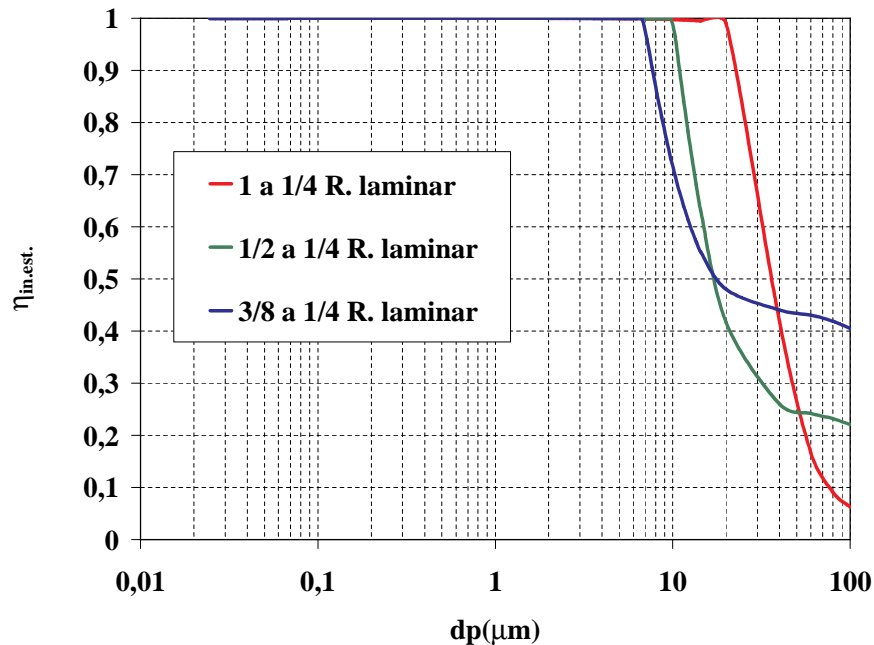


Figura 3-13. Eficacia de transporte en un estrechamiento desde tuberías de diferente diámetro 1", 1/2" y 1/4" hasta otra de 1/4 ", en régimen laminar (caudal de 14 l/min).

Si tienen que existir estrechamientos en las líneas de muestreo, el Stk debe mantenerse por debajo de 0,1, para que la eficacia de transporte no se vea influenciada por el estrechamiento y la relación de radios.

3.1.2.4 Deposición mecánica total en tubos rectos.

De acuerdo con todo lo expuesto anteriormente, la eficacia de transporte en una tubería recta de sección circular, se ve afectada simultáneamente por los tres mecanismos de deposición mecánica: gravitacional, difusional e inercial. (apartados 3.1.2.1; 3.1.2.2 y 3.1.2.3)

En la Figura 3-14, se representa la eficacia de un aerosol polidisperso de tamaño de partícula entre 0,01 y 100 μm , que es conducido a través de una tubería recta horizontal de sección circular de diámetro 1/4" y una longitud de 1 m. Se estudian dos tipos de regímenes, laminar y turbulento resultantes de un caudal de 14 l/min y 20 l/min, respectivamente. Tanto las dimensiones de la tubería, como los caudales se corresponden con valores habituales en el sistema de muestreo.

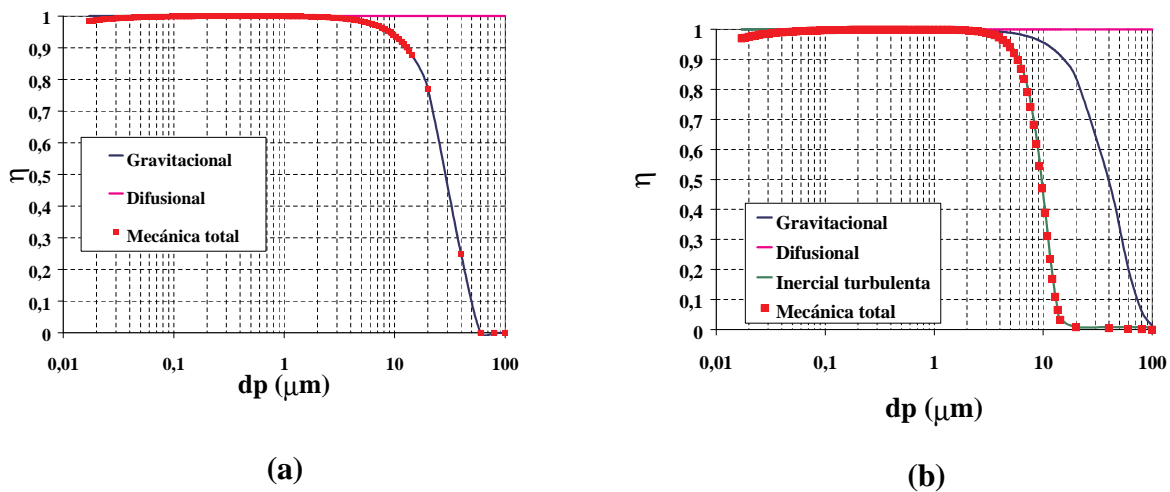


Figura 3-14. Eficacia de transporte en una tubería circular de 1/4 "y 1 m situada horizontalmente. a) Régimen laminar (caudal de 14 l/min); b) Régimen turbulento (caudal de 20 l/min).

Se observa que en régimen laminar, desde el punto de vista cualitativo, la deposición sobre las paredes internas de una tubería de 1/4", situada horizontalmente, es consecuencia exclusivamente del efecto gravitacional sobre las partículas y éste tiene sólo importancia significativa en partículas de tamaño superior a 2 μm de diámetro. La eficacia de transporte, considerando la deposición difusional, es 1 para cualquier diámetro. Cuando el caudal aumenta y el régimen se hace turbulento, se observa que, unido al efecto gravitacional, se produce una deposición importante debido a la

deposición inercial turbulenta, siendo también insignificante el efecto difusional. Este efecto incrementa la deposición de partículas a partir de un tamaño de $2 \mu\text{m}$. La pérdida de partículas por deposición mecánica (gravitacional, difusional e inercial) en la tubería en estudio, es total para partículas mayores a $60 \mu\text{m}$ si el régimen es laminar y para las mayores a $20 \mu\text{m}$ si es turbulento.

En la siguiente figura, se representa la eficacia de transporte que tendría el mismo aerosol del análisis anterior, en las mismas condiciones, cuando la tubería se sitúa verticalmente.

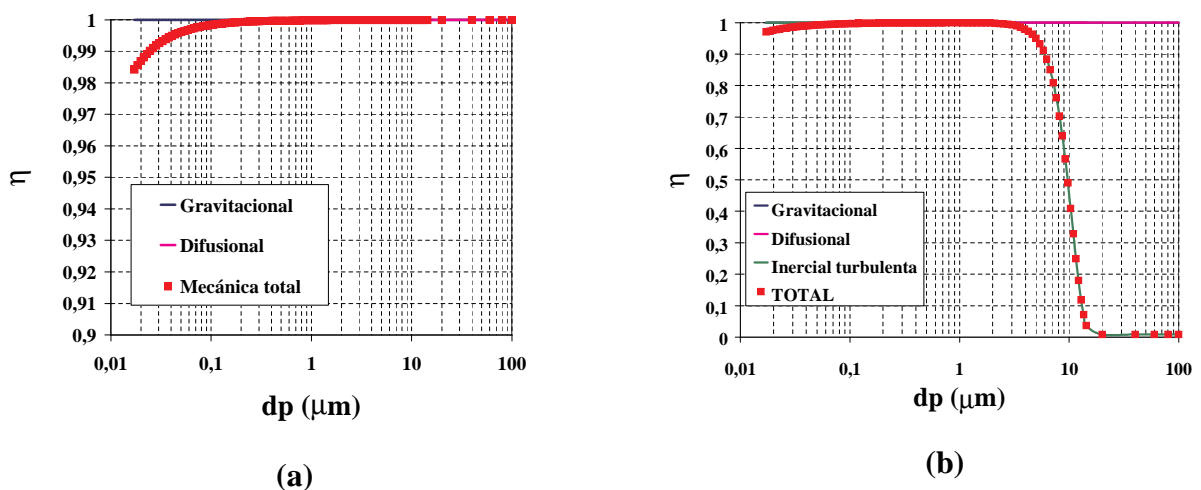


Figura 3-15. Eficacia de transporte en una tubería circular de 1/4 " y 1 cm situada verticalmente. a) Régimen laminar (caudal de 14 l/min); b) Régimen turbulento (caudal de 20 l/min).

La deposición en la tubería vertical es consecuencia del efecto difusional si el régimen es laminar y es sólo apreciable para partículas de tamaño inferior a $0,1 \mu\text{m}$ de diámetro. Si el régimen es turbulento, el efecto determinante es la deposición inercial turbulenta. La pérdida de partículas en líneas de muestreo verticales es muy inferior a la que se produce en tuberías horizontales en especial en régimen laminar; aunque en régimen turbulento produce efectos similares.

3.1.2.5 Deposición electrostática.

La mayoría de las partículas tienen una carga que varía con el proceso de generación y el de envejecimiento. La carga normalmente se produce por la difusión de iones sobre las partículas y los iones están habitualmente presentes en el medio dispersante, porque proceden de reacciones químicas o porque están presentes en el aire, que es común a todos los aerosoles y donde existen iones debido a la radiación cósmica. La carga estática en la línea de muestreo puede dar lugar a un campo eléctrico y consecuentemente a la deposición de partículas en la propia línea de muestreo. Este tipo de deposición, si bien es difícil de determinar porque no es siempre posible conocer la distribución de carga en las partículas, ni la intensidad del campo eléctrico formado en la línea de muestreo, es fácilmente evitable utilizando líneas de muestreo conductoras que eviten los campos eléctricos.

3.1.2.6 Deposición termoforética.

La existencia de un gradiente de temperatura en un aerosol puede hacer que las partículas se muevan hacia la zona más fría. Este fenómeno, conocido como termoforesis, puede hacer que las partículas se depositen en las líneas de muestreo. La velocidad con la que se mueven las partículas hacia una superficie a la temperatura T_p , por la que pasa un fluido más caliente a una temperatura T , se denomina velocidad termoforética, v_{th} . La eficacia de transporte termoforética, η_{th} , en un tubo, cuando existe deposición por termoforesis, se puede expresar como:

$$\eta_{th} = \exp(-\pi d L v_{th} / Q_m) \quad [3-22]$$

$$v_{th} = K_t \frac{v_g}{T} \nabla T \quad [3-23]$$

Siendo:

η_{th} . = eficacia de transporte en tubos considerando la termoforesis.

d = diámetro interno del tubo (cm).

L = longitud del tubo (cm).

v_{th} . = velocidad termoforética (cm/s).

Q_m = caudal de muestreo (cm³/s).

K_t = coeficiente termoforético.

ν_g = viscosidad cinemática del gas = μ_g/ρ_g (cm²/s).

μ_g = viscosidad del gas (dinas.s/cm²).

ρ_g = densidad del gas (g/cm³).

T = temperatura del gas (K).

∇T = gradiente de temperatura en el gas basado en el modelo de capa límite (K/cm).

$$\nabla T = (T - T_p) / \Delta_T$$

T_p = temperatura de la pared (K).

Δ_T = espesor de la capa límite térmica, $\Delta_T = d / Nu$.

Nu = número de Nusselt del fluido depende del régimen en la tubería.

$$\text{Régimen laminar: } Nu = 3,66 + \frac{0,0668(d/L) Re Pr}{1 + 0,04[(d/L) Re Pr]^{2/3}} \quad (\text{Hausen, 1943}).$$

[3-24]

$$\text{Régimen turbulento: } Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (\text{Dittus, y Boelter, 1930})$$

Pr = Número de Prand, $Pr = \nu_g / \alpha_{th}$.

α_{th} = difusividad térmica (cm²/s).

El coeficiente termoforético se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$K_t = \frac{-2C(Kn)C_s \left(k_g/k_p + C_t Kn \right)}{\left(1 + 3C_m Kn \right) \left(1 + 2k_g/k_p + 2C_t Kn \right)} \quad [3-25]$$

siendo:

Kn = número de Knudsen, $Kn = 2\lambda/d_p$.

κ_g = conductividad térmica del gas (cal/cm.s.K).

κ_p = conductividad térmica de la partícula (cal/cm.s.K).

$C(Kn)$ = factor de deslizamiento de Cunningham en función del número de Knudsen, ($Kn = 2\lambda/d_p$).

$$C(Kn) = 1 + (Kn \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/Kn))).$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T))).$$

P = presión (dinas/cm²).

C_s = coeficiente de deslizamiento térmico.

C_t = coeficientes de acomodación de la temperatura.

C_m = coeficientes de cambio de momento.

Los valores de estos coeficientes se obtienen del ajuste a datos experimentales, siendo los más utilizados los propuestos por Talbot *et al*, 1980, $C_s=1,17$; $C_m=1,14$ y $C_t=2,18$.

En la Figura 3-16, se han representado los resultados de los cálculos obtenidos a partir de las ecuaciones anteriores, para una tubería circular de 1/4", cuando la temperatura del aerosol es 150 °C y la de la pared difiere de la anterior en 0, 50, 100 y 130 °C, en régimen laminar (14 l/min) y turbulento (40 l/min). Se ha supuesto $k_p = 0,023$ (cal/cm.s.K).

Se puede observar que la eficacia de transporte es tanto menor cuando mayor es el gradiente de temperatura y mayor es el caudal, por tanto, menor en régimen turbulento que laminar. Para partículas submicrométricas, la eficacia de transporte no depende significativamente del tamaño, se mantiene prácticamente constante y su valor depende especialmente de T , ∇T , Q_m , L y d . Para las de tamaño mayor que 1 μm , la eficacia aumenta con el tamaño hasta hacerse prácticamente uno, para partículas de 100 μm . Evidentemente, si el gradiente de temperatura entre el aerosol y la pared del conducto es cero, la eficacia de transporte es uno.

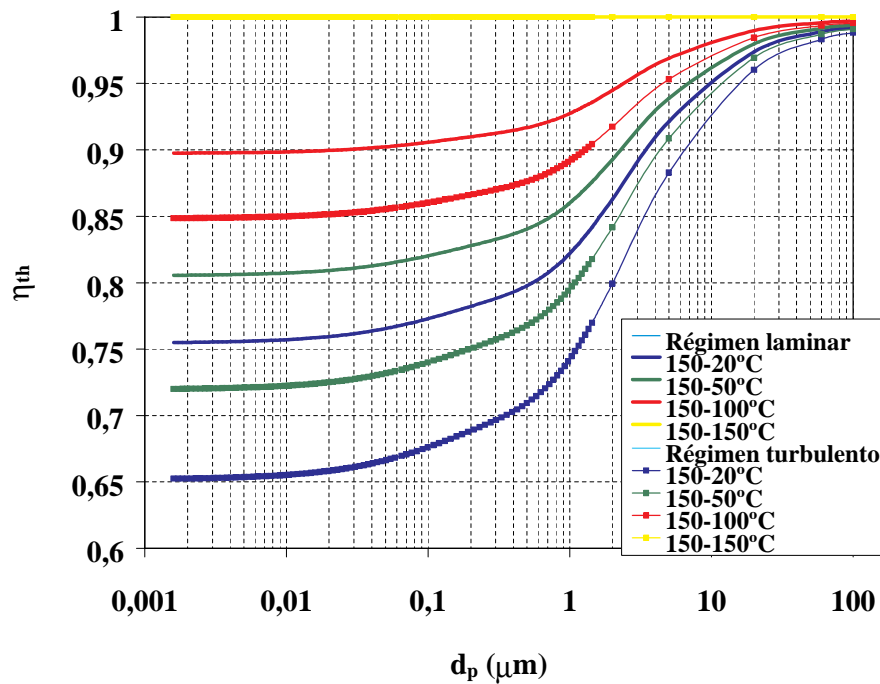


Figura 3-16. Eficacia termoforética de una tubería circular de 1/4 " y 1 m de longitud cuando la temperatura de la pared difiere de la del gas. Para régimen laminar (14 l/min.) y turbulento (40 l/min.).

El efecto termoforético puede resultar muy importante para partículas de reducido tamaño y tener una aplicación interesante en captadores de muestreo o en sistemas de separación de partículas.

Este tipo de deposición se evita en las líneas de muestreo y en los equipos calefactando sus paredes, al menos, a la misma temperatura que el aerosol medido.

3.2 MEDIDA DE AEROSOLES.

Los fenómenos que gobiernan el comportamiento de las partículas son diferentes para cada tamaño, mientras que el movimiento de las partículas submicrométricas está determinado por propiedades eléctricas, térmicas, difusionales, etc., el de las micrométricas es condicionado por fenómenos gravitacionales e inerciales. Por tanto, las técnicas utilizadas para su medida cubren exclusivamente un intervalo específico de tamaño, (Pui y Liu, 1989), que en cada caso es expresado de forma diferente (diámetro geométrico, diámetro aerodinámico, etc.) en función de la característica que evalúa la técnica (Figura 3-17).

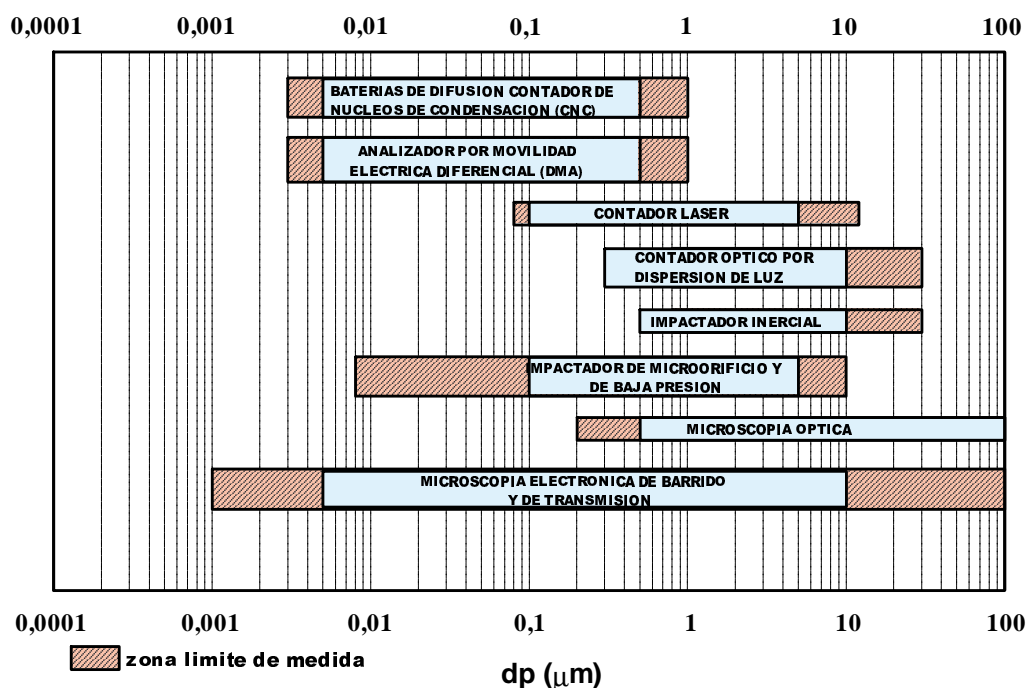


Figura 3-17. Intervalos de tamaño de funcionamiento de la instrumentación más empleada en la caracterización de aerosoles.

Los métodos para la medida y caracterización de partículas pueden agruparse de acuerdo al principio físico en el que se basan en:

- Microscópicos.
- Ópticos.
- Eléctricos.
- Difusionales.
- Inerciales

3.2.1 Métodos microscópicos.

El método microscópico es el único que realiza una medida directa y facilita una imagen gráfica de las partículas, permitiendo estudiar tanto su tamaño como su morfología, siendo exclusivo en este último caso.

Las técnicas microscópicas más utilizadas en la caracterización de partículas son la microscopia óptica y la electrónica. Dentro de esta última, cabe diferenciar la de barrido, SEM (Scanning Electron Microscopy) y la de transmisión, TEM (Transmission Electron Microscopy). La microscopia óptica posee una capacidad de aumentos menor que la electrónica, pudiendo utilizarse para tamaños desde 0,3 a 20 μm , mientras que los microscopios electrónicos son capaces de observar 0,01 μm (SEM) y 0,2 nm (TEM), siendo estos los más utilizados en el campo de los aerosoles.

Un microscopio electrónico de barrido consta básicamente de un cañón de electrones con un filamento que actúa como emisor, un sistema de lentes electromagnéticas para focalizar el haz, un sistema de barrido y sistemas de detección para captar el resultado de la interacción y transformarlo en señal eléctrica.

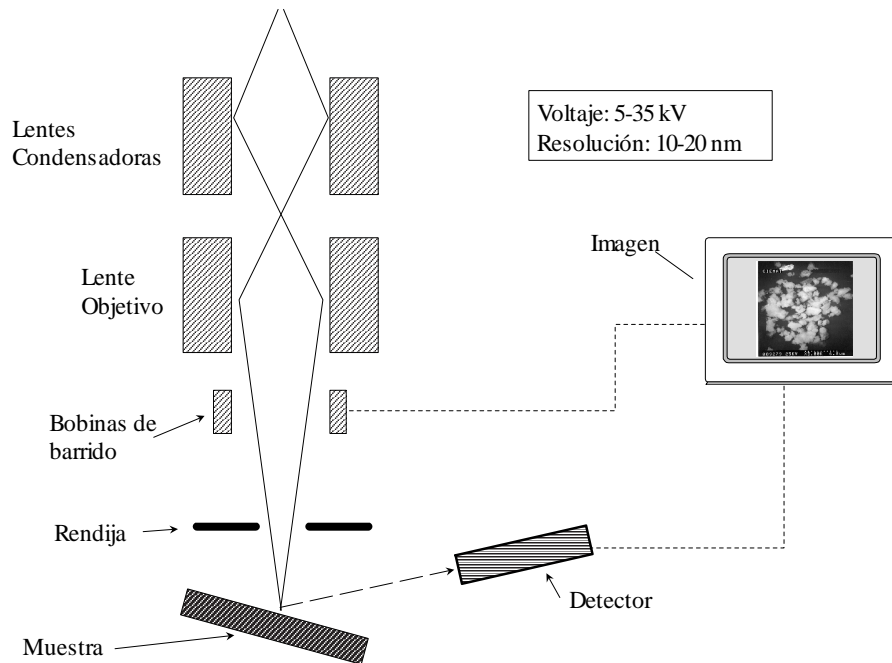


Figura 3-18. Esquema de funcionamiento de un microscopio electrónico de barrido (SEM)(Malm, 1996).

Ambas técnicas de microscopía electrónica SEM y TEM consisten en hacer incidir sobre la muestra un haz de electrones, de suficiente energía, que al interactuar con la materia, provoca la aparición de diferentes señales, que son captadas por los detectores. Una serie de señales son producidas en el plano anterior de la muestra, en el mismo de la radiación incidente: electrones secundarios, electrones retrodispersados, rayos X característicos, Bremsstrahlung, luz visible y electrones Auger, constituyen las señales analizadas por SEM. Otras se producen en el plano posterior de la muestra: electrones dispersados elásticamente y electrones transmitidos y dispersados inelásticamente y son analizadas por la técnica TEM.

Las más utilizadas en el análisis de partículas son las tres primeras. La señal de electrones secundarios (electrones arrancados a la muestra y con energía inferior a 50 eV) proporciona información acerca de la topografía superficial y permite obtener una imagen

de la muestra. Esto se debe a que en el trayecto desde el punto de incidencia al exterior, los electrones secundarios pierden su energía por diferentes interacciones y como la energía de que disponen es baja solo escapan del material los que están próximos a la superficie (varios nm).

La señal de los electrones retrodispersados, (electrones incidentes que rebotan en la muestra y tienen una energía superior a 50 eV) produce una imagen cualitativa de zonas con diferente número atómico medio. Estos electrones proceden de una profundidad mayor que los secundarios y aunque depende de la energía del haz y del número atómico medio (Z) de la zona de interacción es aproximadamente 0,3 veces, la de penetración de los electrones primarios. La señal obtenida tendrá más intensidad cuanto mayor sea el número atómico del material, lo que permite diferenciar zonas de diferente Z o distinta composición química. Las zonas con menor Z se verán más oscuras que las de mayor número atómico.

La señal de Rayos X, característicos del átomo bombardeado, proporciona información química elemental de la muestra. Con esta señal, se obtienen espectros de la composición de elementos químicos. Existen dos tipos de microanálisis de RX: por dispersión de longitudes de onda y por dispersión de energías. El primero se realiza elemento por elemento, mientras que el segundo se realiza de manera simultánea para todos ellos, aunque en éste el límite de detección es más alto. Los rayos X característicos recorren una distancia en la muestra mayor que los electrones, por ello tiene menos resolución que éstos.

En todas estas técnicas, es muy aconsejable utilizar un analizador digital de imágenes, bien directamente sobre la pantalla, bien sobre fotografías, para determinar distribuciones en número de partículas y poder realizar el análisis de su morfología.

3.2.2 Métodos ópticos.

Los métodos ópticos se basan principalmente en dos fenómenos físicos: la dispersión y la difracción de luz. Constan básicamente de: una fuente de luz, un sistema de enfoque óptico y un detector y convertidor a señal eléctrica.

Los métodos de dispersión de luz, se fundamentan en la relación existente entre la intensidad de la luz dispersada y el tamaño de la partícula. El intervalo de medida habitual de estos instrumentos es de 0,3 a 100 ó mas micras, aunque normalmente una sola configuración del sistema sólo puede cubrir una parte de este intervalo de tamaño. La concentración máxima de partículas permitidas, en el mejor de los casos, es de 10^5 partículas/cm³.

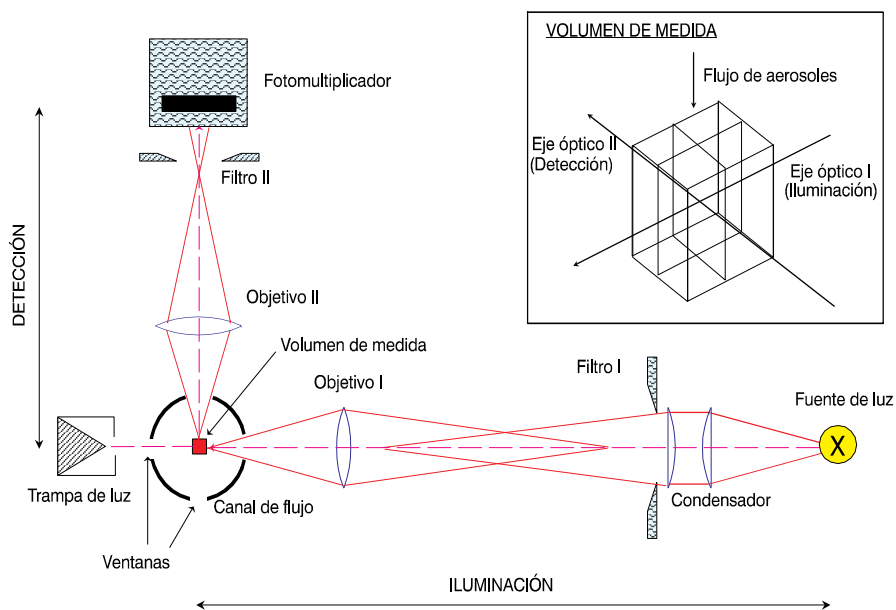


Figura 3-19. Esquema de funcionamiento de un instrumento por dispersión de luz.

Otros sistemas ópticos utilizados son los fotómetros, que sirven para medir concentraciones relativas de aerosol por medio de la luz dispersada por una nube de partículas, en el mismo instante.

Entre los métodos de dispersión, merece un tratamiento aparte, el Doppler láser. Se basa en la formación de figuras de interferencia por luz dispersada y posterior detección para producir una señal Doppler. La frecuencia de ésta es proporcional a la velocidad de la partícula y la diferencia de fase entre las señales de los distintos detectores lo es al tamaño de partícula. Con este método, se pueden estudiar tamaños de partícula de 0,5 μm en adelante, pudiendo llegar a 1 mm. La concentración máxima de partículas admisible depende de la configuración óptica del sistema pudiendo llegar a 10^6 partículas/ cm^3 .

Los métodos de difracción de luz se basan en la teoría de la difracción de Fraunhofer. El ángulo de difracción se relaciona con el tamaño de partícula, de tal forma que las partículas pequeñas difractan la luz a ángulos mayores que las partículas grandes. El intervalo de tamaño que permite estudiar es de 0,1 μm a 2000 μm .

Otros instrumentos combinan determinados fenómenos físicos con los ópticos. De ellos, los más utilizados son: los de tiempo de vuelo y los contadores de núcleos de condensación, CNC (Condensation Nucleus Counter) (Agarwal y Sem, 1980), (Quant *et al*, 1992). En los primeros, las partículas se aceleran a través de una pequeña tobera a velocidades diferentes, dependiendo del tamaño. La medida de la velocidad por dispersión de luz permite obtener el tamaño de la partícula. Es útil para partículas de 0,5 a 30 μm y en una concentración de 10^2 - 10^3 partículas/ cm^3 . El CNC, es un instrumento óptico muy utilizado para contar partículas de tamaño entre 0,002 μm y 1 μm . El gas portador es llevado a condiciones de sobresaturación y por expansión adiabática ó por enfriamiento directo causa condensación de vapor sobre las partículas, que crecen hasta un tamaño donde se pueden detectar ópticamente por dispersión de luz.

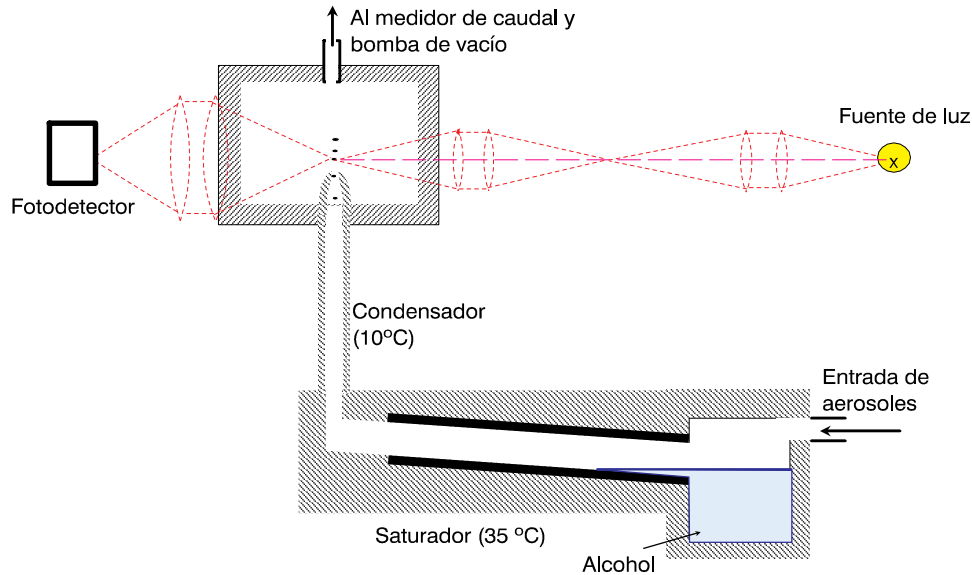


Figura 3-20. Esquema de funcionamiento del Contador de Núcleos de Condensación, CNC.

Para una determinada razón de saturación p/p_s , el tamaño de las gotas cuando las partículas submicrométricas actúan como núcleos de condensación está determinado por el diámetro de Kelvin, d_k (Díaz Peña y Roig Muntaner, 1980):

$$d_k = \frac{4 \sigma M}{\rho RT \ln(p/p_s)} \quad [3-26]$$

siendo:

- σ = tensión superficial del fluido condensante (dinas/cm).
- M = peso molecular " " " (g/mol).
- ρ = densidad " " " (g/cm³).
- R = constante universal de los gases (8,3143.10⁷ ergios/K.mol).
- T = temperatura absoluta (K).
- p/p_s = razón de saturación.

Si se mantiene la razón de saturación controlada por debajo de la crítica (condensación homogénea) la condensación se producirá exclusivamente sobre las partículas. La sensibilidad del instrumento está condicionada a la relación de saturación de operación.

3.2.3 Métodos eléctricos.

La alta movilidad eléctrica de las partículas submicrométricas en un campo eléctrico, hace posible la separación y clasificación eléctrica de las partículas de aerosol por su carga y consecuentemente, por tamaño de partícula.

Uno de los instrumentos más usados es el analizador diferencial de movilidades, DMA (Differential Mobility Analyser), que separa las partículas submicrométricas de acuerdo a su movilidad eléctrica, Z_p .

La movilidad Z_p , está definida como la relación entre la velocidad del aerosol, v , en un campo eléctrico y la intensidad del campo eléctrico, E que causa el movimiento. Al igualar la fuerza de rozamiento de Stokes F_r (Stk) y la fuerza eléctrica F_E , (Kinney *et al*, 1991):

$$F_r \text{ (Stk)} = F_E \Rightarrow \frac{3 \pi \mu_g v d_p}{C \text{ (Kn)}} = n e E \quad [3-27]$$

siendo:

μ_g = viscosidad dinámica del gas (dinas.s/cm²).

v = velocidad de los gases (cm/s).

d_p = diámetro de la partícula (cm).

n = nº de cargas elementales en la partícula.

e = carga elemental (1,6x10⁻¹² dinas.cm/voltio).

$C(Kn)$ = factor de deslizamiento de Cunningham en función del número de Knudsen, ($Kn = 2\lambda/d_p$).

$$C(Kn) = 1 + (Kn \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/Kn)))$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T)))$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

se deduce que Z_p , es igual a, (Sem *et al*, 1972), (Keady *et al*, 1983):

$$Z_p = \frac{v}{E} = \frac{n e C (Kn)}{3 \pi \mu_g d_p} \quad [3-28]$$

El instrumento consiste básicamente en dos electrodos concéntricos, uno central a potencial negativo y otro externo, conectado a tierra. Cuando un flujo de aerosoles polidispersos es conducido por un gas de arrastre entre ambos electrodos, normalmente aire previamente filtrado, las partículas son atraídas hacia el centro y sus trayectorias se curvan de forma diferente de acuerdo a su movilidad eléctrica, coincidiendo una de ellas con una ranura situada en el fondo del electrodo central.

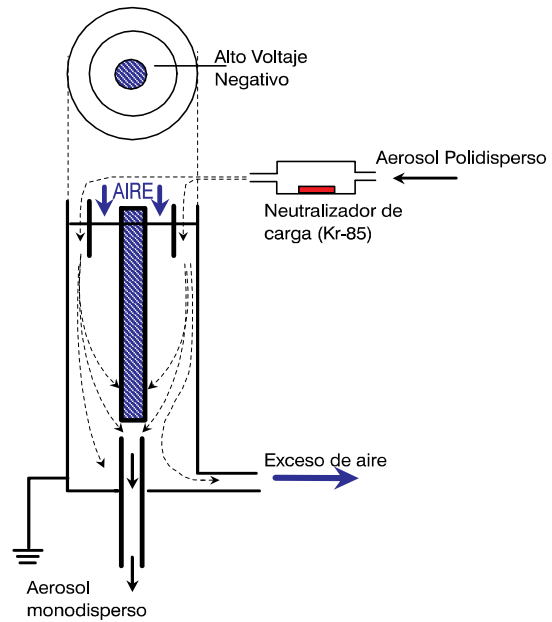


Figura 3-21. Esquema de funcionamiento del clasificador de partículas por movilidad eléctrica diferencial, DMA.

La movilidad de una partícula, de un tamaño determinado, es seleccionada simplemente ajustando la diferencia de potencial entre electrodos y los caudales de salida y entrada del instrumento. Suponiendo que las partículas próximas al cilindro externo presentan la máxima movilidad para ser clasificadas y que las cercanas a la barra central tienen una movilidad mínima, la movilidad media para un determinado tamaño de partícula está determinada por la siguiente expresión, (Knudson y Whitby, 1975a), (Liu y Pui, 1975), (Wang y Flagan, 1990), (Kinney *et al*, 1991):

$$Z_p = \frac{\left(Q_T - \frac{1}{2} (Q_{\text{mono}} + Q_{\text{poli}}) \right) \text{Ln} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2 \pi V L_{\text{DMA}}} \quad [3-29]$$

y la anchura de la banda de movilidades:

$$\Delta Z_P = \frac{(Q_{\text{mono}} + Q_{\text{poli}}) \text{Ln} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2 \pi V L_{\text{DMA}}} \quad [3-30]$$

siendo:

Z_p = movilidad eléctrica (cm²/volt.s).

V = potencial (voltios).

Q_{mono} = caudal de aerosol monodisperso, (cm³/s).

Q_{poli} = caudal de aerosol polidisperso, (cm³/s).

Q_T = caudal del aerosol de entrada más el del gas de arrastre (cm³/s).

r_1 = radio del electrodo central (cm).

r_2 = radio del cilindro externo (cm).

L_{DMA} = distancia entre la entrada del aerosol polidisperso y la salida del aerosol monodisperso (cm).

El aerosol a medir debe pasar previamente por un neutralizador de carga bipolar donde es cargado a una distribución de carga conocida.

La unión de un DMA y un CNC para realizar el conteo de las partículas clasificadas, se conoce como DMPS (Differential Mobility Particle Sizer) si el barrido de voltajes es lineal, y como SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), si es exponencial.

3.2.4 Métodos difusionales.

Estos instrumentos separan partículas de acuerdo a sus coeficientes de difusión, basándose en las pérdidas por difusión desde un flujo laminar a través de una pantalla de red fina.

Las baterías de difusión en pantalla consisten en una serie de celdas de difusión por las que fluye el aerosol (Cheng y Yeh, 1980, 1983). Una fracción del aerosol se deposita en la superficie de cada pantalla, debido principalmente al mecanismo de difusión para partículas submicrométricas. La penetración del aerosol es función del coeficiente de difusión, que varía de forma opuesta al diámetro de la partícula y es determinada con un contador de partículas. Utilizando un CNC el intervalo medido puede ser desde 0,003 a 0,7 μm .

Las baterías de difusión por flujo en paralelo, PFDB (Parallel Flux Diffusion Battery) utilizan un montaje en paralelo en lugar de uno en serie y determinan la masa en lugar del número de partículas (Yeh *et al*, 1982), (Cheng y Yeh, 1984). Cada celda contiene un número diferente de pantallas de acero inoxidable seguidas de un filtro. La determinación gravimétrica de las muestras recogidas en cada filtro de cada celda proporciona la penetración másica directa como una función del número de pantallas. La PFDB proporciona una distribución de masas para un intervalo de 0,001 a 0,7 μm .

3.2.5 Métodos inerciales.

Los métodos inerciales se basan en la inercia de las partículas para separarlas en diferentes grupos, de acuerdo a su tamaño aerodinámico. Es decir, el de una esfera de densidad unidad que tiene la misma velocidad de deposición que la partícula. El tamaño aerodinámico ofrece información respecto al tamaño físico, forma y densidad de la partícula indicando como se comportará la partícula en unas condiciones determinadas. Los equipos más utilizados, basados en esta técnica, son los impactadores y los ciclones.

Un impactador de cascada es un instrumento de impactación multietapa. (Figura 3-22).

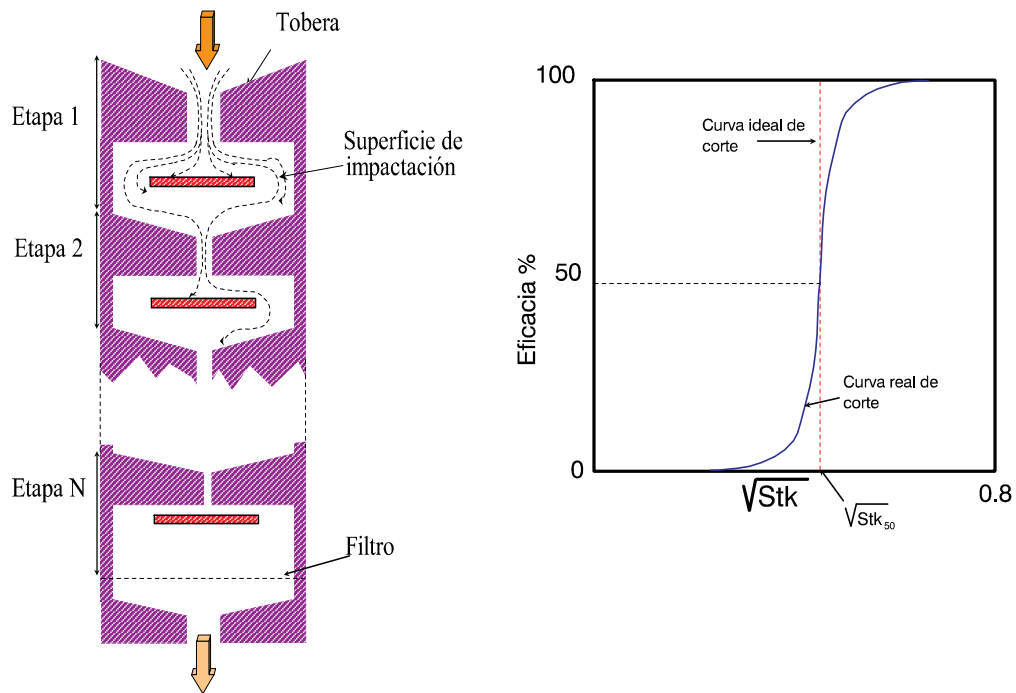


Figura 3-22. Esquema de funcionamiento de un impactador de cascada y curvas típicas de eficacia de un impactador, en función de $(Stk)^{1/2}$ (Marple y Willeke, 1979).

En la práctica, un aerosol se introduce a través de una serie de toberas cada vez mas estrechas, cada una seguida por una superficie de impactación. Cada tobera y su superficie de impactación asociada es una etapa. Cuando las líneas de corriente fluyen alrededor de la superficie de impactación de cualquier etapa, las partículas con inercia suficiente impactarán. Si se admite que las partículas que impactan quedan adheridas a la superficie, las partículas incidentes se dividen en dos grupos: las que son retenidas y las que permanecen suspendidas. Al aumentar la velocidad del flujo en su paso a través de una tobera menor, seguida de una superficie colectora, algunas partículas que pasaron etapas anteriores son incapaces de seguir el flujo más rápido e impactan. De la medida gravimétrica o análisis químico de cada etapa, puede determinarse la fracción de masa total en cada intervalo de tamaño aerodinámico. Permite obtener distribuciones aerodinámicas de tamaño desde 0,3 μm a algunas decenas de micras (Marple, 1970), (Marple y Willeke, 1979).

Las partículas con el mismo número de Stokes, tienen igual probabilidad de impactar en la misma etapa. En una etapa ideal, son retenidas todas las partículas con un número de Stokes mayor que un valor determinado, dejando escapar todas las que lo tienen menor. Sin embargo, en la práctica, las curvas de eficacia tienen forma de S, por lo que se emplea como referencia el Stk_{50} que corresponde al 50% de eficacia en la colección de partículas, pudiéndose deducir el tamaño crítico, como d_{p50} relativo al Stk_{50} :

$$\text{Stk}_{50} = \frac{C(\text{Kn}) \rho_p d_{p50}^2 v}{9 \mu_g d_t} \Rightarrow d_{p50} = \sqrt{\frac{9 \mu_g d_t (\text{Stk}_{50})}{C(\text{Kn}) \rho_p v}} \quad [3-31]$$

siendo:

$C(\text{Kn})$ = factor de deslizamiento de Cunningham en función del número de Knudsen.

$(\text{Kn} = 2\lambda/d_p)$.

$C(\text{Kn}) = 1 + (\text{Kn} \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/\text{Kn})))$.

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1+(110/293,15))/(1+(110/T)))$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

ρ_p = densidad de partícula (g/cm^3).

d_{p50} = diámetro de partícula al que corresponde un 50 % de eficacia (cm).

v = velocidad de los gases en el conducto (cm/s).

μ_g = viscosidad dinámica del gas (dinas.s/cm^2).

d_t = diámetro de la tobera (cm).

Para superar el problema de la baja resolución de los impactadores tradicionales, para partículas submicrométricas, se han desarrollado diseños especiales de impactadores: de baja presión (Hillamo y Kauppinen, 1991), (Berner *et al*, 1979, 1984) y de microorificio. (Marple *et al*, 1991). Los primeros son impactadores ordinarios, que trabajan a una presión reducida de 0,05-0,4 atm. Un impactador trabajando a presión atmosférica con una velocidad de flujo de 100 m/s y una tobera redonda de 0,5 mm, tiene un diámetro de corte de 0,35 μm ; para el mismo impactador operando a 0,066 atmósferas, el diámetro de corte es, aproximadamente, 0,05 μm . Los impactadores de microorificio operan a presión casi atmosférica, usando toberas de 40 a 60 μm . Con una velocidad en el chorro de 100 m/s, el diámetro de corte para una tobera de 40 μm es de aproximadamente 0,1 μm .

En cuanto a los ciclones, en la Figura 3-23 se muestra su principio de operación. Las partículas suspendidas en el gas entran tangencialmente al cuerpo del ciclón formado por una sección cilíndrica y crean un vórtice. Las fuerzas centrífugas hacen que las partículas de mayor tamaño que el diámetro de corte del ciclón emigren radialmente hacia la pared del cuerpo cilíndrico, para caer y ser recogidas en el depósito del ciclón. Como la fuerza centrífuga es superior a la gravitacional, el ciclón puede funcionar en cualquier orientación. La curva de eficacia presenta una forma en S más inclinada que la del impactador, lo que supone menor precisión en la separación. (Rietema y Verver, 1961), (Overcamp y Scarleet, 1993).

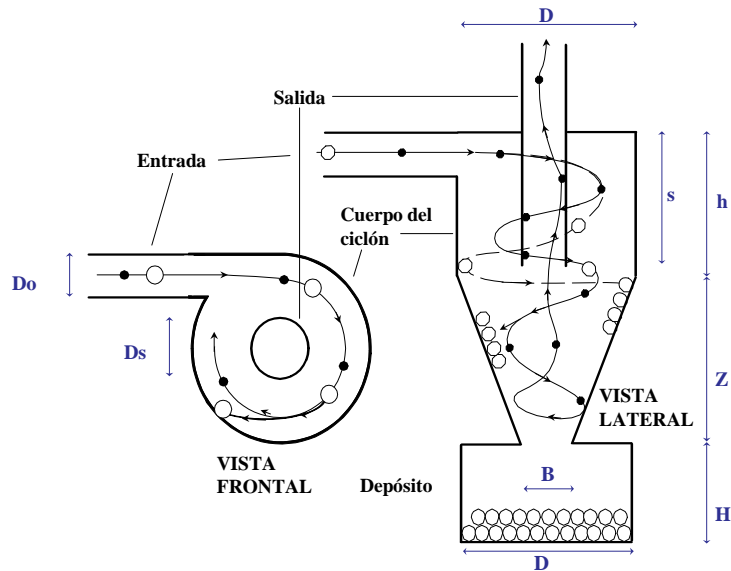


Figura 3-23. Principio de operación de un ciclón y dimensiones características.

Un riguroso análisis de un ciclón es más difícil que el de un impactador por su tridimensionalidad, que hace necesaria la utilización de un programa numérico en tres dimensiones, por lo que no es común aplicar este procedimiento en el diseño de ciclones.

El diámetro de corte, d_{p50} , de un ciclón, que corresponde a un 50% de la eficacia en la colección de partículas, depende del caudal a la entrada del ciclón y de la viscosidad del gas, la cual es a su vez dependiente de la temperatura. La forma general de diferentes correlaciones empíricas, (Smith *et al* 1979): (Smith y Wilson, 1978) es:

$$d_{p50} = (k_1 \mu_g + k_2) Q^N \quad [3-32]$$

siendo:

μ_g = viscosidad del gas (micropoise) = $174 + 0,406T$ ($-10 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}$).

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Q = caudal (pies^3/min).

N, k_1 y k_2 = constantes empíricas que dependen de las dimensiones y características del ciclón.

Varios ciclones unitarios situados sucesivamente de mayor a menor diámetro de corte forman una configuración en cascada, que permite obtener una separación secuencial de partículas. Las partículas menores que el diámetro de corte pasan a través del primer ciclón hasta el segundo, con menor dimensión y consecuentemente con menor diámetro de corte y así sucesivamente. Este dispositivo es utilizado para separar partículas de tamaño entre 0,5 y 15 μm y permite recoger cantidades suficientemente grandes sin que se produzca colmatación, para realizar posteriores análisis.

4 MATERIAL Y MÉTODOS.

4. MATERIAL Y MÉTODOS.

Con el fin de caracterizar las partículas en un intervalo amplio de tamaños, se ha creado un sistema de muestreo y medida, en el que se han acoplado diferentes instrumentos para obtener una caracterización completa del aerosol. El sistema de muestreo se ha diseñado en base a las consideraciones del capítulo anterior, con el fin de optimizar la eficacia de muestreo y transporte. Adicionalmente, los modelos de eficacia de transporte en tuberías circulares, han permitido simular el comportamiento de diferentes equipos diseñados para acondicionar el aerosol antes de su medida.

Se distinguen tres partes fundamentales en el sistema de muestreo y medida: sistema de muestreo, instrumentación para la medida y caracterización de partículas y equipos auxiliares. Los diferentes equipos son acoplados en serie o paralelo dependiendo de las características de su funcionamiento, (Rodríguez-Maroto *et al*, 1995a, 1995b).

Así, un instrumento óptico por dispersión de luz facilita información acerca de la concentración y distribución por tamaño de las partículas mayores que la micra, mientras que otro, basado en la diferente movilidad eléctrica hace lo mismo para aquéllas menores a la micra. La distribución aerodinámica es determinada por impactación en cascada y la concentración másica mediante análisis gravimétrico. Los datos sobre morfología y composición química son obtenidos por microscopía electrónica de barrido y análisis de imagen y mediante análisis químico.

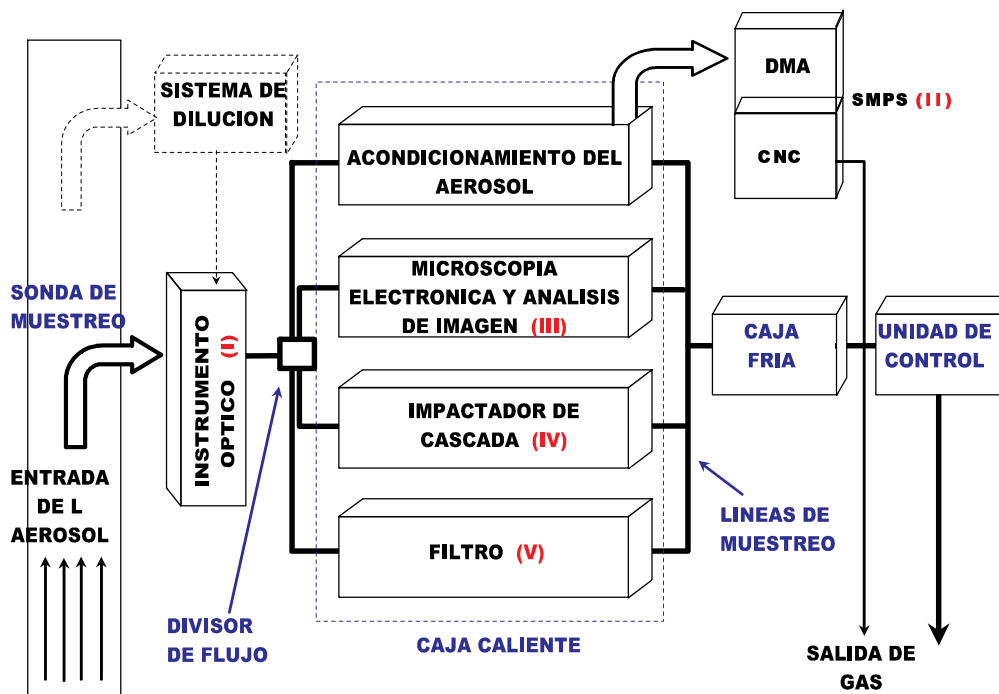


Figura 4-1. Esquema del Sistema de muestreo y medida.



Figura 4-2. Estación de muestreo y medida.

4.1 SISTEMA DE MUESTREO.

Consta de seis componentes fundamentales: sonda de muestreo, líneas de muestreo, divisor de flujo, caja caliente, caja fría y unidad de control.

4.1.1 Sonda de muestreo.

La toma de muestras se realiza a través de una sonda de muestreo que se compone de boquilla, sonda, tubo de Pitot (tipo S), termopar de control de temperatura en el conducto y las conexiones neumática de Pitot y eléctrica del termopar hasta los sistemas de control. En conductos industriales, se ha empleado, acoplada a la sonda, una lanza de muestreo de longitud variable según el diámetro del conducto donde se tomaba la muestra.

Para conductos de pequeño diámetro, se han diseñado y construido dos tipos de sondas diferentes, Figura 4-3, (Rodríguez Maroto *et al.* 2000 y 2001).

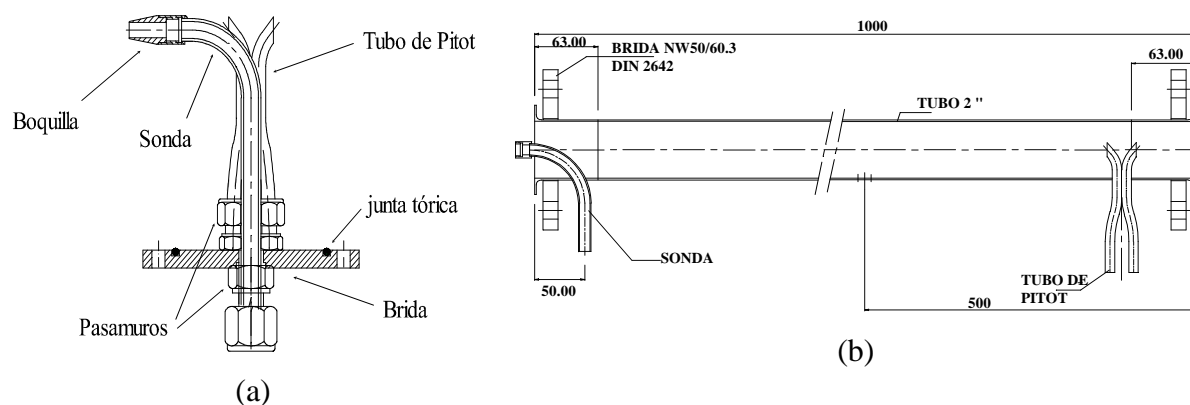


Figura 4-3. Sondas de muestreo: a) conductos de diámetro $\geq 3''$, b) conductos de diámetro $< 3''$.

Ambas han sido fabricadas en acero inoxidable y permiten la utilización de boquillas con diferente diámetro para adecuarse a las condiciones de muestreo isocinético. La primera ha sido empleada en conductos de diámetro $\geq 3"$, y como es fijada mediante una brida, es necesario un tamaño mínimo de tubo para su inserción. El acceso para el intercambio de boquilla se realiza sin influir en el proceso, siempre que el conducto, como es habitual, esté en depresión. La segunda fue diseñada como un tramo de la línea donde se realizaba el muestreo y es fijada mediante dos bridas en los extremos. Se utiliza para conductos de diámetro $<3"$. El intercambio de boquilla solo se puede realizar si se para el proceso de emisión. La estanqueidad de ambos sistemas permite la toma de muestras en condiciones de vacío y sobre-presión.

La medida de la diferencia entre las presiones estática y dinámica realizadas con el tubo de Pitot y la de la temperatura con el termopar, ambos acoplados a la sonda, permiten calcular la velocidad del gas en el punto de muestreo. La aplicación de la ley de Bernoulli corregida para condiciones normalizadas conduce a la siguiente expresión:

$$v = K_p C_p \sqrt{\Delta p} \frac{\sqrt{T_{(c)}}}{\sqrt{p_{(c)} \cdot M_{h(c)}}} \quad [4-1]$$

siendo:

v = velocidad en el conducto (m/s)

C_p = coeficiente del tubo de Pitot.

K_p = factor de conversión de unidades: $34,97 \text{ m/s} [(g/mol) \cdot (mmHg)/(K) \cdot (mmH_2O)]^{1/2}$.

Δp = diferencia de la presión estática y dinámica (mm H₂O).

$T_{(c)}$ = temperatura absoluta en el conducto (K).

$p_{(c)}$ = presión absoluta en el conducto (mm Hg).

$M_{h(c)}$ = peso molecular del gas en el conducto, base húmeda (g/mol)

El coeficiente del tubo de Pitot fue determinado frente al de un tubo de Pitot estándar:

$$C_p = C_{p(n)} \left(\frac{\Delta p_{(n)}}{\Delta p} \right)^{1/2} \quad [4-2]$$

considerando que $C_{p(n)}$ es igual 0,99 se determinó un coeficiente de 0,84 para el tipo S.

Para unos valores típicos medidos previamente:

$\Delta p \sim 7 \text{ mm H}_2\text{O}$,

$T_{(c)} \sim 150 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow 423 \text{ K}$,

$p_{(c)} \sim 700 \text{ mm Hg}$,

$M_{h(c)} \sim 29 \text{ g/mol}$,

la velocidad de los gases en el conducto sería de $\sim 11 \text{ m/s}$.

4.1.2 Divisor de flujo.

Está acoplado entre el contador óptico y la caja caliente. Tiene por finalidad, distribuir el gas muestreado hacia los diferentes equipos de medida, de forma que puedan utilizarse simultáneamente todos o algunos de ellos, o individualmente de manera secuencial sin necesidad de interrumpir prolongadamente el muestreo para preparar los equipos de medida.

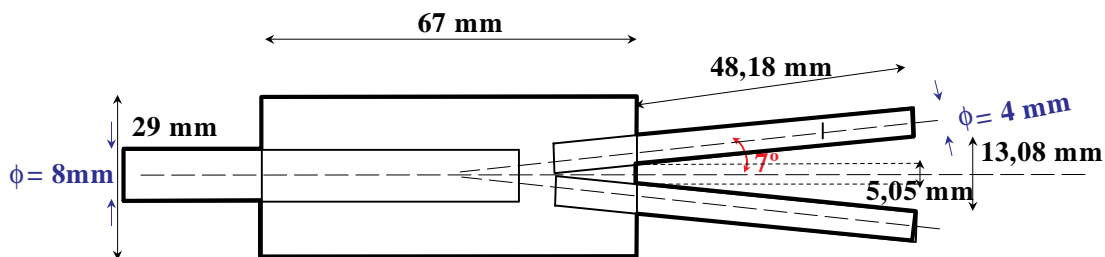


Figura 4-4. Esquema del divisor de flujo.

El divisor de flujo (TSI 3708), permite dividir isocinéticamente un caudal inicial de aerosoles en dos, tres o cuatro flujos secundarios iguales, con menores pérdidas de partículas que cualquier otro tipo de bifurcación.

Está construido de acero inoxidable 316, con una entrada ($\varnothing_{\text{int.}} = 8 \text{ mm}$) y cuatro salidas ($\varnothing_{\text{int.}} = 4 \text{ mm}$), estando todas las paredes electropulidas, para disminuir la deposición de partículas.

4.1.3 Líneas de muestreo.

Las líneas de muestreo las componen distintos tramos de tubería que conectan los diferentes elementos del sistema de muestreo y cabe diferenciar los situados antes de los equipos de medida y los que se sitúan detrás de ellos. Los primeros deben cumplir la norma general de “cuanto más cortos mejor”, además de estar convenientemente termostatizados y conectados a tierra para evitar las pérdidas por termoforesis y electroforesis. El primero de estos tramos conecta la sonda con el primer elemento del sistema de medida que es el contador óptico. Es una tubería de acero inoxidable de 1/2" de diámetro y de longitud variable, definida por la distancia al punto de muestreo. Convenientemente enrollada en todo el tramo, se coloca una cinta calefactora (Selecta) tejida en fibra de vidrio, para temperatura de hasta 300 °C y un regulador de potencia (Afora) de 10 Amp. con carga máxima de 2200 W a 220 V, para controlar la temperatura. La línea calefactada está aislada del exterior por una carcasa de protección. A la salida del contador óptico, se sitúa el divisor de flujo. Las cuatro salidas del divisor de flujo constituyen la segunda serie de tramos a tener en cuenta. Están constituidos por tuberías de acero inoxidable ($\varnothing_{\text{int.}} = 1/4"$), de 20 cm de longitud, convenientemente calefactadas.

La línea de muestreo, después de los equipos de medida, está compuesta por cuatro ramificaciones de tubería flexible procedentes de las salidas de los cuatro instrumentos de medida que se unen en una línea general que actúa como línea de vacío hasta el equipo de succión.

4.1.4 Caja caliente.

La caja caliente es un compartimiento termostatzado para mantener, al menos, la misma temperatura de la muestra, con el fin de prevenir la condensación y evitar la deposición termoforética. Sirve para el alojamiento de algunos equipos de medida y de los de acondicionamiento. Esta formada por una caja de aluminio, con doble pared rellena de lana de roca y dos resistencias de 2000 W montadas con disipadores térmicos de aleta, conectadas a un controlador de temperatura. Tiene cuatro pasamuros de entrada para las cuatro líneas procedentes del divisor de flujo, seis pasamuros de salida correspondientes a los equipos de medida y acondicionamiento y un termopar conectado a un controlador de temperatura.

4.1.5 Caja fría.

La caja fría es un compartimiento termostatzado para condensar los compuestos volátiles y vapor de agua que generalmente acompañan al aerosol, y con ello, evitar posteriores condensaciones en los sistemas de control. Para ello, se utilizan una serie de borboteadores del tipo Greenburg-Smith modificados, y uno estándar, que contienen aire, agua o sílice, inmersos en un baño de hielo. Diferentes termopares, conectados a la unidad de control, facilitan la temperatura de los gases en este punto y la del baño de hielo.

Adicionalmente, este sistema permite determinar la humedad y la concentración de vapores condensables mediante enfriamiento de la muestra de gas.

4.1.6 Unidad de control.

Se utiliza el sistema de control automático (Auto 5, Graseby Andersen) empleado habitualmente en los análisis convencionales de emisión, según el método EPA (Smith *et al.*, 1967), (US.EPA, 1971),

La unidad de control mide y controla automática o manualmente los parámetros termohidráulicos en el sistema, para mantener las condiciones lo más próximas al isocinetismo y registra los datos obtenidos. Está compuesta principalmente por: una bomba de vacío, para producir la succión del gas; un procesador que controla los parámetros de muestreo y una serie de dispositivos de medida: transductores de presión, medidor de gas seco, orificio crítico, termopares y controladores de temperatura de las distintas partes del sistema de muestreo.

La succión creada por la bomba de vacío, ubicada en la unidad de control, conduce la muestra desde la boquilla hasta los diferentes equipos de medida y acondicionamiento. La medida de las presiones estática y dinámica realizadas con el tubo de Pitot y la de la temperatura en el conducto, permiten mantener condiciones isocinéticas. El gas muestreado fluye al interior de la unidad de control, donde unos transductores de presión miden el grado de vacío y lo ajustan variando la potencia de la bomba. El caudal es determinado mediante un medidor de gas seco, midiéndose la temperatura a la entrada y salida de éste. Finalmente, después de pasar a través del orificio crítico, también para controlar el caudal, es ventado a la atmósfera.

El sistema utilizado permite mantener las condiciones isocinéticas garantizando la representatividad de la muestra.

4.2 SISTEMA DE MEDIDA.

Se han seleccionado una serie de instrumentos de medida, de forma que analizando conjuntamente los datos de todos ellos, se pueda realizar una caracterización integral del aerosol en estudio. Se pretende, por una parte, conocer la distribución y concentración en número de partículas. Para ello, se utilizan dos equipos de respuesta en tiempo real, que basándose en distintos principios detectan partículas micrométricas y submicrométricas, respectivamente. Por otra parte, se quiere determinar la morfología, distribución y concentración en masa de partículas, que implica la utilización de instrumentos que requieren un proceso analítico y, por tanto, su respuesta se obtiene tras el muestreo.

4.2.1 Instrumentos de medida en tiempo real.

Para la medida de las partículas micrométricas, se ha utilizado un contador óptico basado en la dispersión de luz visible, por su capacidad para medir en un amplio intervalo de tamaño, $\approx 0,3 - 100 \mu\text{m}$ y de concentración, $\approx 10^1 - 10^5$ partículas/cm³. Con la ventaja adicional de que la medida se puede realizar en la misma línea de muestreo, sin interaccionar con el flujo de aerosoles, lo que hace posible que su acoplamiento en el sistema de muestreo pueda ser realizado antes que cualquier otro instrumento.

Para las partículas submicrométricas, la técnica por excelencia es la clasificación por movilidad eléctrica y posterior medida con un contador de núcleos de condensación, por

su alta sensibilidad, aunque no está concebida para las medidas de campo. Su utilización en un sistema de muestreo y medida como el que se presenta requiere el acondicionamiento previo de los aerosoles.

4.2.1.1 Contador óptico. (I).

El contador óptico de partículas (PALAS- PCS2000) es un instrumento cuyo funcionamiento se basa en el principio de dispersión de luz por partículas individuales en un volumen de medida en forma de cubo, definido por la intersección de las tres direcciones: iluminación, detección y flujo de aerosoles. La luz dispersada es recogida por un fotomultiplicador y transformada en pulsos eléctricos. La altura del pulso es asignada, mediante un proceso de calibración, a un determinado diámetro de partícula y el número de pulsos por unidad de tiempo es proporcional a la concentración en número. La dispersión de luz de cada partícula medida se relaciona con la de las esferas de látex de un tamaño determinado, utilizadas en la calibración, midiendo el diámetro geométrico. (Raasch y Umhauer 1977), (Bernhard, 1981), (Fissan y Helsper, 1983), (Nichols y Mitchell, 1988), (Horton, 1988).

La luz de una lámpara de xenon (100 W) ilumina una abertura rectangular. La imagen de esta abertura es enfocada por un sistema de lentes en el volumen de medida del instrumento. La luz dispersada por las partículas es detectada por dos sistemas fotomultiplicadores de bajo nivel de ruido (EMI tipo 9789 B) bajo un ángulo medio de 90°. El campo visto por los fotomultiplicadores I y II es también limitado por aberturas rectangulares, siendo las aberturas de diferente tamaño, la del fotomultiplicador II mira un volumen de medida mayor. Comparando las dos señales de ambos fotomultiplicadores I y II se distinguen las partículas que atraviesan en su totalidad el volumen de medida de las que sólo lo hacen en parte, eliminando el error de la zona límite (Figura 4-5).

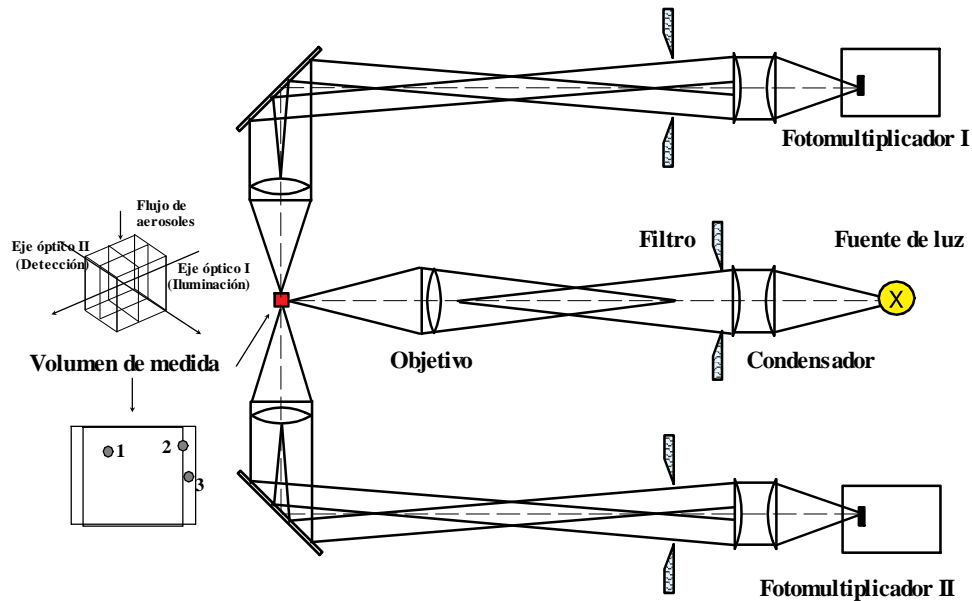


Figura 4-5. Esquema del equipo óptico, PCS-2000.

El instrumento tiene dos componentes fundamentales: la cabeza óptica y el procesador de señales. La cabeza óptica contiene: la fuente de luz blanca, los dos fotomultiplicadores, el sistema óptico de iluminación y los de observación colocados perpendicularmente a la dirección del flujo, y un sistema de refrigeración por agua para evitar el sobrecalentamiento del sistema óptico y de la lámpara. La fuente de luz policromática (blanca), hace que se pueda obtener para cada longitud de onda un patrón de interferencia diferente. La luz dispersada es recogida por el fotomultiplicador que la transmite en forma de señal eléctrica amplificada hasta el procesador (PCS 2000).

El procesador determina la intensidad promedio de los diferentes patrones de interferencia y establece una relación directa entre intensidad y diámetro de partícula. Presentando los resultados como distribución numérica de partículas (acumulativa o diferencial) en cualquiera de los dos intervalos de trabajo, 0,3 - 10 μm ó 10 - 100 μm , dependiendo del

voltaje alto o bajo asignado al fotomultiplicador, 255 V o 50 V respectivamente. El tamaño del volumen de medida y la concentración máxima son inversamente proporcionales, porque aumenta el error de coincidencia, relación entre la probabilidad de que dos o más partículas coincidan en el volumen de medida con la de que haya una sola. Para poder medir una concentración del orden de 10^5 partículas/cm³ se ha utilizado una configuración con un volumen de medida formado por una celda cúbica de 110 µm de lado.

4.2.1.2 Clasificador electrostático y contador de núcleos de condensación, (II).

La utilización de esta técnica hace necesario el empleo de dos instrumentos acoplados en serie: uno, para seleccionar las partículas de un determinado tamaño, DMA (Differential Mobility Analyzer) (3.2.3) y el otro, para contar las que previamente han sido seleccionadas, CNC (Counter Nucleous Condensation) (3.2.2). Con esta disposición, conocida como SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), es posible determinar concentraciones y distribuciones numéricas de partículas submicrométricas con diámetros de hasta 10 nm.

El DMA (TSI 3071A) empleado es un analizador diferencial de movilidad eléctrica que clasifica las partículas de aerosol en el intervalo de tamaño desde 0,005 a 1 µm, hasta una concentración máxima de 10^8 partículas/cm³. Está formado por dos cilindros metálicos concéntricos, de radios, $r_1 = 0,937$ cm y $r_2 = 1,958$ cm y una longitud, $L = 44,44$ cm. El externo conectado a tierra y el interno a un potencial negativo V (voltios), que puede variarse manual o, automáticamente haciendo un barrido exponencial desde 0 - 11 kV. Los caudales de aerosol polidisperso y monodisperso son 0,2 - 2 l/min, y los de aire de arrastre y exceso de 2 a 20 l/min.

El CNC (TSI 3022A) utilizado es un contador óptico que mide la concentración numérica de partículas en el intervalo 10^{-2} - 10^7 partículas/cm³, siendo sensible a partículas de tamaño mayores que 0,01 μm . El instrumento consta esencialmente de: una fuente de luz (diodo-láser), sistemas ópticos de iluminación y observación, fotodetector, depósito de alcohol y sistema de llenado automático, tubo saturador, tubo condensador y un microprocesador. Se basa en el principio de condensación de vapor sobresaturado sobre pequeñas partículas. La muestra, procedente del clasificador electrostático, DMA, pasa a través de un saturador calentado a 35 °C, donde un alcohol (butanol) es evaporado hasta saturación en la corriente de gas. Después la mezcla aerosol-alcohol pasa a través de un tubo condensador enfriado hasta una temperatura de 10 °C, en estas condiciones el vapor del alcohol condensa sobre las partículas, haciéndolas crecer hasta 10 - 12 μm . Finalmente, las gotas producidas son contadas por un detector óptico que utiliza tres modos de recuento de partículas: individualmente y contando el tiempo real, si la concentración es menor que 10^3 partículas/cm³, por ajuste de tiempo real entre pulsos, si la concentración es 10^3 - 10^4 partículas/cm³ y de forma fotométrica, cuando es mayor que 10^4 partículas/cm³.

4.2.2 Instrumentos de medida post-muestreo.

Se caracterizan por la recogida de la muestra y posterior análisis en el laboratorio. Los equipos de toma de muestras son diferentes según la técnica analítica a desarrollar. Se utiliza un equipo de nuevo diseño para muestreo de partículas que se analizan por microscopía electrónica de barrido y análisis de imagen (SEM/AI), para determinar la morfología de las partículas. El impactador de cascada permite clasificar muestras de partículas por su tamaño aerodinámico o relacionar la distribuciones de compuestos o elementos químicos en función del tamaño de partícula. Los medios filtrantes recogen

muestras para determinar la concentración total en masa mediante análisis gravimétrico y la composición química mediante análisis químico.

4.2.2.1 Instrumento de muestreo para SEM/AI (III).

Se ha diseñado un dispositivo en cuyo interior van dispuestas unas láminas de acero o vidrio cubierto con una delgada capa de oro o carbono para hacerla conductora. En su superficie, se recogen las muestras para ser analizadas por microscopia electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy, SEM).

El equipo consiste, esencialmente, en una cámara cilíndrica de acero inoxidable cerrada herméticamente, con dos tapas roscadas en sus extremos y juntas de teflón. Tiene una boca de entrada que se prolonga en su interior con un tubo de 1/4" y otra de salida, ambas desde la tapa superior. En el interior, hay un bastidor para colocar varias láminas de muestreo en diferentes posiciones. Habitualmente, se colocan al menos, dos láminas: una frente al tubo de entrada del aerosol y otra perpendicular a ésta.

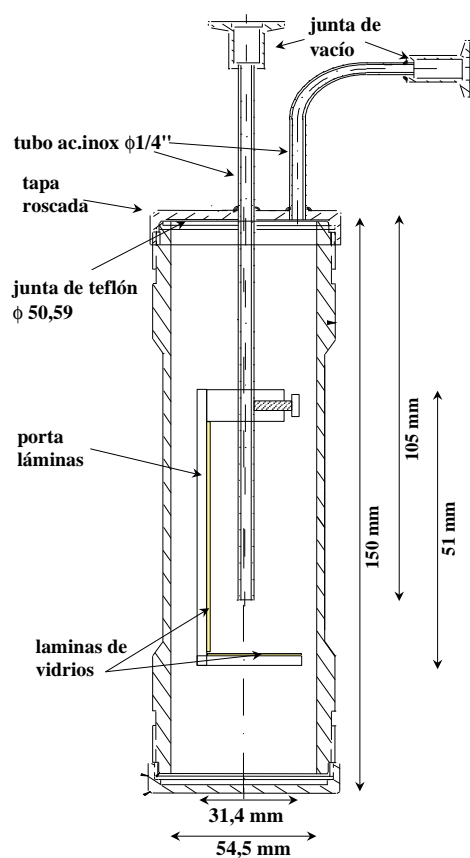


Figura 4-6 Dispositivo de captura de partículas para SEM/AI.

El principal mecanismo por el que se obtienen muestras es por impactación y la distancia desde el tubo de entrada hasta la lámina frontal, que actúa como superficie de impactación puede ser modificada, lo que permite recoger muestras de distintos intervalos de tamaño.

Tras realizar un muestreo, la atmósfera de la cámara que conforma el equipo permanece llena de aerosol, y las partículas sedimentan gravitacionalmente en la lámina inferior y se depositan, por difusión browniana, en ambas láminas. También, el gradiente térmico existente entre el aerosol y las láminas facilita la deposición por termoforesis. Con todo ello, la muestra recogida es una representación mas o menos real de la original, dependiendo del grado en que se producen estos fenómenos, por otra parte, difíciles de controlar. No obstante, la captura de algunas partículas permite obtener una imagen real de su existencia, así como un análisis posterior de su morfología e incluso obtener distribuciones aproximadas de partículas.

4.2.2.2 Impactador de cascada (IV).

El impactador de cascada (Andersen, Mark III) (Vaughan, 1989), utilizado en este estudio, clasifica aerodinámicamente las partículas en ocho diferentes intervalos de tamaño. Opcionalmente, se puede utilizar un preseparador y un filtro final para la recolección de partículas mayores que 10 μm y menores que 0,4 μm respectivamente.

El impactador contiene nueve platos con diferentes patrones de orificios de precisión, sobre los que se colocan los sustratos de fibra de vidrio, previamente secados y tarados, en los que se recogen las distintas fracciones de muestra. Entre cada dos platos sucesivos, existen unos separadores de 2,5 μm . Todos los orificios de cada plato son iguales y dispuestos según círculos concéntricos.

Está fabricado en acero inoxidable con juntas de inconel y la temperatura de utilización se condiciona a los sustratos utilizados. En el caso de que éstos sean de fibra de vidrio, la temperatura límite es algo inferior a 400 °C.

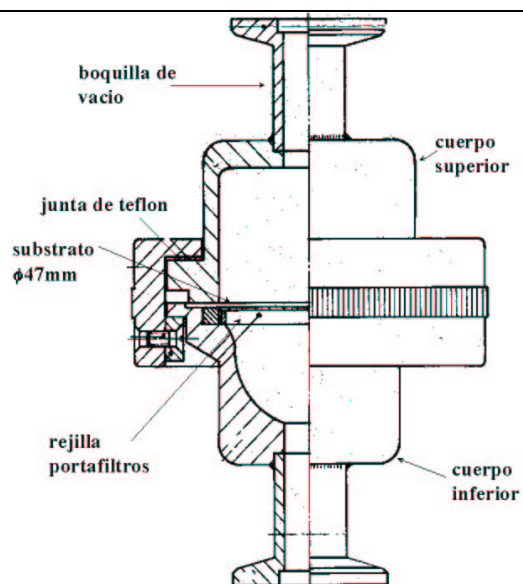
De la medida gravimétrica ó del análisis químico de los diferentes sustratos, puede determinarse la fracción de masa total en cada intervalo de tamaño aerodinámico.

4.2.2.3 Filtro, (V).

Se utilizan portafiltros de vacío, tipo cerrado, para toma de muestra en línea. Los cuerpos de entrada y salida son de acero inoxidable y el anillo de cierre de aluminio anodizado, juntas de teflón y rodetes de cierre de nylon. Las conexiones de entrada y salida son adaptadas con conexiones de vacío.

Se emplean filtros de profundidad de fibra de vidrio, de 47 mm de diámetro. Las partículas son retenidas en su superficie y en su matriz interna, alcanzando una gran capacidad de retención.

Figura 4-7. Portafiltros.



4.3 ACONDICIONAMIENTO DE LA MUESTRA.

Los instrumentos de medida de partículas submicrométricas (SMPS) requieren unas condiciones especiales de trabajo, por lo que se hace necesario el acondicionamiento de la muestra. Para ello, el sistema incorpora una serie de equipos delante de los instrumentos de medida, un ciclón, una cámara de muestreo, un secador, un preimpactador y un neutralizador de carga. Todos ellos, junto al divisor de flujo (apartado 4.1.2.), constituyen los equipos que sin ser de medida van a permitir un tratamiento del aerosol muestreado y, por tanto, van a influir de forma mas o menos significativa en la representatividad de la muestra medida (Figura 4-8).

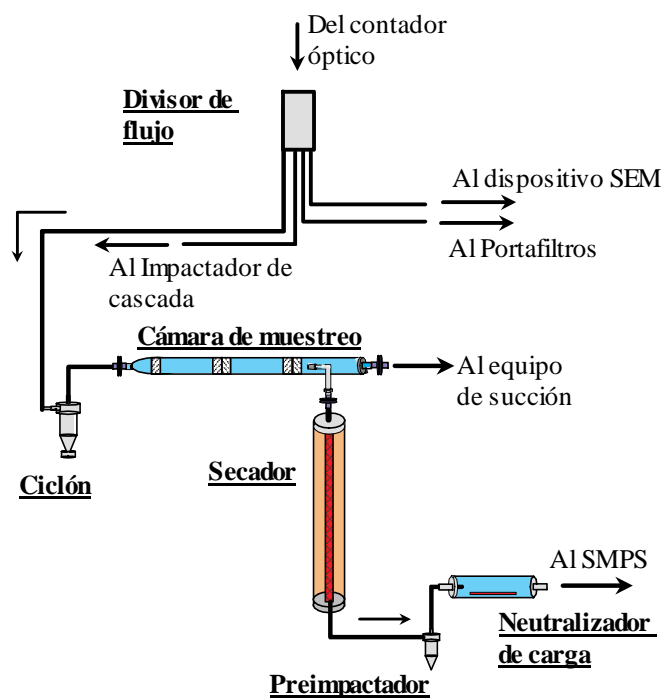


Figura 4-8. Esquema de la disposición de equipos para el tratamiento previo de la muestra que se incorporan al sistema de muestreo.

En este apartado, se presentan las características de los equipos referidos, a excepción del divisor de flujo presentado anteriormente como parte integrante del sistema de muestreo, y, adicionalmente, lo que debería constituir un sistema de dilución para aquellas ocasiones en que sea imprescindible.

4.3.1 Ciclón.

El ciclón se utiliza como preseparador, para retener partículas por encima de la micra, no admisibles en el instrumento DMA. Está construido en acero inoxidable 316, con juntas de vitón, pudiéndose utilizar hasta 300 °C, (Figura 4-9).

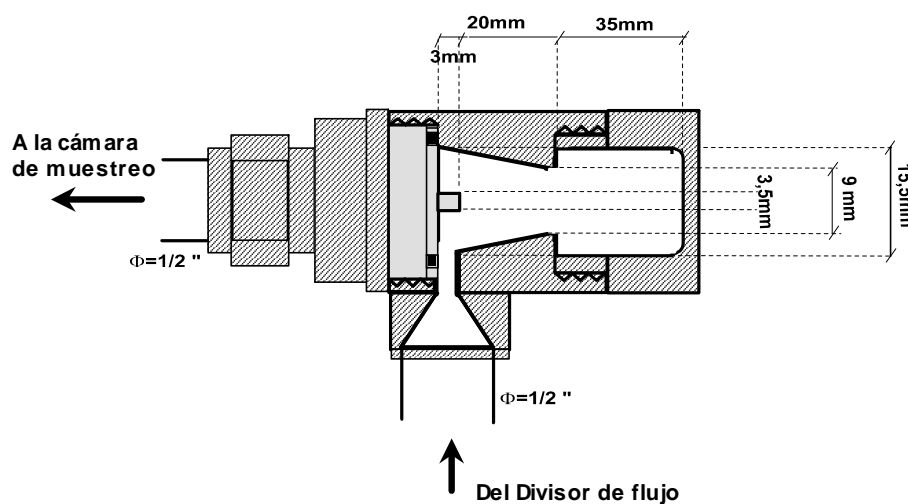


Figura 4-9. Ciclón.

El diámetro de corte, d_{p50} para este sistema ciclónico, está definido por la siguiente ecuación: (Smith *et al*, 1978, 1979), (Parsons y Felix, 1980).

$$d_{p50} = (0,0031\mu_g - 0,152) Q^{-1,09} \quad [4-3]$$

siendo:

μ_g = viscosidad del gas (micropoise)

Q = caudal (pies³/min)

En la Figura 4-10, se presenta la dependencia del diámetro de corte de este ciclón con el caudal a distintas temperaturas (20, 150 y 300 °C).

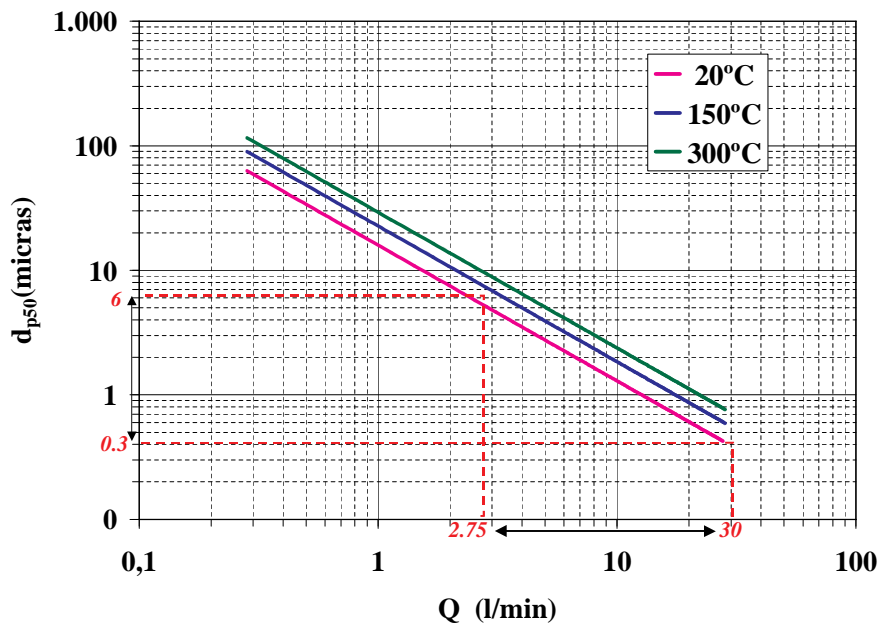


Figura 4-10. Diámetro de corte del ciclón en función del caudal, para diferentes temperaturas.

El ciclón de corte seleccionado se incorpora en una de las cuatro ramas de salida del divisor de flujo por lo que el caudal a través del mismo será 1/1; 1/2, 1/3 o 1/4 del caudal de muestreo inicial (usualmente 11 - 30 l/min) dependiendo si este se divide en: una, dos,

tres o cuatro submuestras, de modo que estará comprendido entre 2,75 y 30 l/min. Si el muestreo se realiza a 20 °C, el diámetro de corte, d_{p50} estará comprendido entre 0,3 y 6 micras. Esto implica que, su utilización a esta temperatura deberá ser restringida a caudales inferiores a 10 l/min para evitar la pérdida excesiva de partículas submicrométricas. Como el diámetro de corte aumenta con la temperatura; a temperaturas típicas de muestreo, en torno a 150 °C, el d_{p50} será superior a 2 μm si el caudal es inferior a 10 l/min.

4.3.2 Cámara de muestreo.

Los caudales de funcionamiento del DMA deben estar comprendidos entre 0,2-2 l/min para un óptimo funcionamiento (Knudson y Whitby, 1975a, 1975b) y éstos son menores que los de un muestreo típico. Pero éstos últimos, no pueden modificarse si se quiere mantener el máximo isocinetismo en la toma de muestras. Por tanto, se debe extraer una submuestra de la muestra original, para ser clasificada por el DMA. La utilización de una bifurcación en la línea de muestreo provoca importantes pérdidas de partículas, por ello, se ha diseñado una cámara de muestreo que permite extraer de la muestra tomada inicialmente una segunda muestra representativa a un caudal fijo, apto para el DMA (Figura 4-11).

La cámara de muestreo consiste en una cámara cilíndrica de acero inoxidable de 38 mm de diámetro interno y una longitud de 379 mm, formada por tres módulos, con entrada y salida en sus extremos. El extremo posterior tiene una reducción hasta 1/2" para facilitar la salida del aerosol de exceso. Tiene una sonda introducida lateralmente, con la boquilla adecuada según las condiciones de muestreo, en dirección coaxial con la cámara y que permite realizar el muestreo hacia el SMPS, pasando previamente por el secador por difusión.

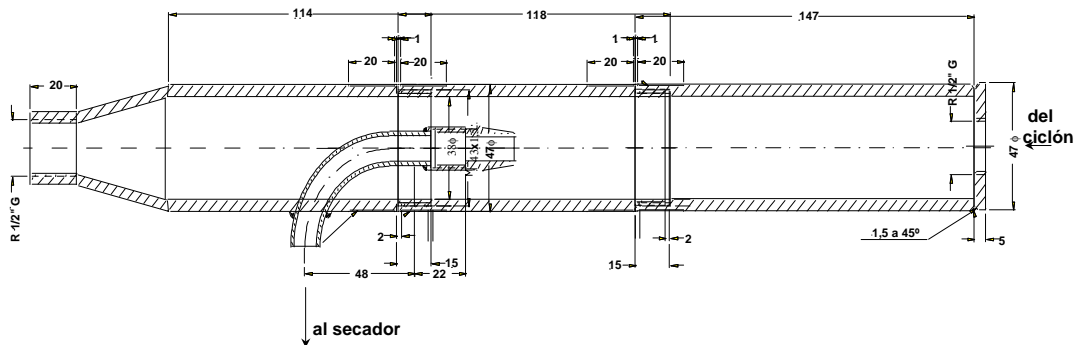


Figura 4-11. Cámara de muestreo.

Por la rama correspondiente a la cámara de muestreo, circulará: $1/4$, $1/3$, $1/2$ ó $1/1$ del caudal principal, de modo que estará comprendido entre 2,75 y 30 l/min. El hecho de que la cámara se sitúe a continuación del ciclón, hace que las partículas que circulan por su interior sean en su mayor parte submicrométricas ($< 1 \mu\text{m}$). Si el aerosol se distribuyera de forma homogénea en la cámara, la velocidad del aerosol en su interior estaría comprendida entre 4 y 44 cm/s; el Reynolds entre 102 y 1117 (régimen laminar) y el tiempo de residencia hasta el submuestreo sería de $\approx 0,5$ a 5 s. Aunque el tiempo de residencia puede variar considerablemente de unas partículas a otras dependiendo de su trayectoria en el interior de la cámara, ya que la difusión térmica puede condicionar el comportamiento de este tipo de partículas.

En la siguiente figura, se representa un nomograma para la elección de boquillas manteniendo las condiciones isocinéticas en el muestreo desde la cámara hacia el SMPS.

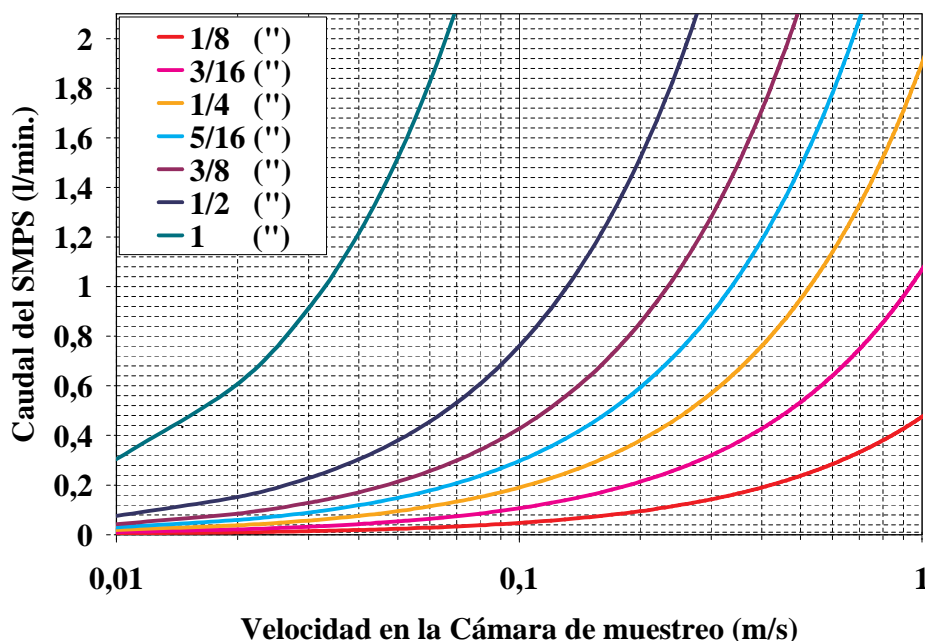


Figura 4-12. Curvas de variación del caudal de submuestreo hacia el SMPS en función de la velocidad en el interior de la cámara para diferentes boquillas de muestreo.

4.3.3 Secador.

Es habitual que los aerosoles tengan un cierto contenido de humedad o vayan acompañados de vapores condensables. Determinados cambios en la presión o temperatura dentro del sistema de muestreo y medida, pueden hacer que las partículas se comporten como núcleos de condensación, distorsionándose la distribución de tamaño original. Pero, además, los condensados provocan un mal funcionamiento de los medidores de caudal del DMA, e incluso pueden afectar al campo eléctrico entre sus electrodos, dando lugar a medidas erróneas. Para evitar éste fenómeno cuando se utiliza el DMA, se ha diseñado un secador de partículas por difusión.

El secador está formado por dos tubos concéntricos de acero inoxidable, de 480 mm de longitud. El tubo exterior ($\varnothing = 50$ mm) actúa de carcasa externa y está cerrado herméticamente, mientras que el interno ($\varnothing = 27$ mm) presenta bocas de entrada y salida y está perforado en toda su extensión. El espacio entre ambos está relleno de un material desecante, que normalmente es gel de sílice, (Figura 4-13).

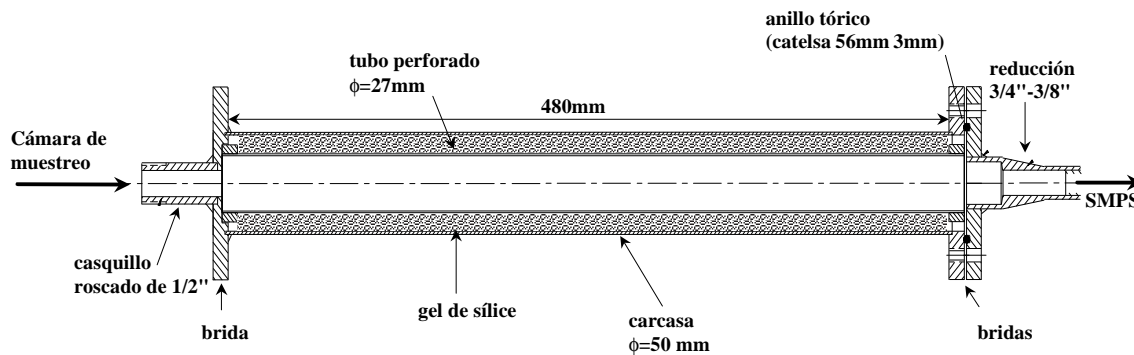


Figura 4-13. Secador.

Los aerosoles procedentes de la cámara de muestreo y que se conducen hacia el SMPS, serán clasificados en el DMA, cuyo caudal de funcionamiento es de 0,2 a 2 l/min, y posteriormente contados en el CNC, cuyo caudal de medida es 0,3 – 1,5 l/min. El montaje de ambos equipos de forma acoplada, permite utilizar un caudal de 0,3 a 2 l/min. Si el aerosol se distribuyera de forma homogénea en el tubo interno, su velocidad sería de 0,9 – 5,8 cm/s; el Reynolds entre 15,8 y 106 (régimen laminar) y el tiempo de residencia hasta el submuestreo estaría comprendido entre 53 y 8 s. Aunque el tiempo de residencia de las partículas, igual que en la cámara de muestreo, puede variar considerablemente.

Cuando los aerosoles húmedos pasan por el secador, el vapor se difunde a través de la rejilla hasta el gel de sílice, resultando un aerosol exento de humedad. Por una parte, se produce el secado del gas y por otra, el de las gotas formadas a partir de las partículas

primarias. El primero se lleva a cabo por la difusión del vapor de agua, debido al gradiente de concentración que produce la existencia del gel de sílice. La disminución de la concentración de vapor de agua a lo largo del secador puede estimarse a partir de las ecuaciones de conservación de materia total, cantidad de movimiento y vapor, en coordenadas cilíndricas (Costa *et al.* 1984 y 1986):

$$2v \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{\partial [\text{H}_2\text{O}]_{(v)}}{\partial z} = -D_{\text{H}_2\text{O},a} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial [\text{H}_2\text{O}]_{(v)}}{\partial r} \right) \right] \quad [4-4]$$

Cuya solución para las condiciones límite adecuadas es lo que tradicionalmente se conoce como problema de Graetz, en este caso aplicado a transferencia de materia permite calcular el grado de secado.

$$\frac{[\text{H}_2\text{O}]_{(v)} - [\text{H}_2\text{O}]_{(v)o}}{0 - [\text{H}_2\text{O}]_{(v)o}} = 1 - 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{G_n}{\lambda_n^2} e^{-\lambda_n^2 z^+} \quad [4-5]$$

siendo:

v = velocidad del aerosol a través del secador (cm/s).

R = radio del secador (cm).

z = dimensión espacial en la dirección longitudinal del secador.

r = dimensión radial.

$[\text{H}_2\text{O}]_{(v)}$ = concentración de vapor de agua a la salida del secador (g/cm^3).

$[\text{H}_2\text{O}]_{(v)o}$ = concentración de vapor de agua a la entrada del secador (g/cm^3).

$D_{\text{H}_2\text{O},a}$ = coeficiente de difusión del H_2O en el aire (cm^2/s): $D_{\text{H}_2\text{O},a} = 1/3(\bar{c} \lambda)$

\bar{c} = velocidad molecular (cm/s).

λ = camino libre medio (cm).

z^+ = longitud adimensional. $z^+ = 2LD_{\text{H}_2\text{O},a}/vD^2$

L = longitud del secador (cm).

D = diámetro del tubo interno del secador (cm).

λ_n^2 = autovalores o valores característicos.
 G_n = coeficientes función de los autovalores.

n	λ_n^2	G_n
0	7,312	0,749
1	44,62	0,544
2	113,8	0,463
n>2	$\lambda_n = 4n + 813$	$G_n = 1,01276 \lambda_n^{-1/3}$

Para gases con una típica humedad absoluta de $0,02 \text{ (kg}_{H_2O(v)})/\text{kg}_{\text{(aire seco)}} = 2 \times 10^{-5} \text{ (g}_{H_2O(v)})/\text{cm}^3_{\text{(aire seco)}}$, suponiendo $D_{H_2O,a} = 0,24 \text{ (cm}^2/\text{s)}$, y el caudal máximo de funcionamiento del SMPS (2 l/min), se estimó, a partir de la ecuación [4.5], que la mínima longitud para que la eficacia de secado fuese superior al 98 %, debería ser $\approx 45 \text{ cm}$. En la siguiente tabla, se presentan la eficacia de secado estimada para una longitud de 48 cm, elegida para el secador.

Tabla 4-1. Estimación de la eficacia de secado en el secador.

Qm(l/min)	V (cm/s)	Eficacia de secado (%)
0,3	0,9	100
1,0	2,9	99,97
2,0	5,8	98,48

El secado de partículas es contrario al de crecimiento por condensación superficial y formación de gotas y, por tanto, lleva consigo una disminución en tamaño. La tasa de disminución es determinada a partir de la ecuación de Davies:

$$\frac{dd_p}{dt} = \underbrace{\frac{4D_{H_2O,a}M}{R\rho_p d_p} \left(\frac{p_\infty}{T_\infty} - \frac{p_s}{T_s} \right)}_{1^{er} \text{ término}} \left[\underbrace{\frac{2 + d_p}{d_p + 5,33 \left(\frac{2}{d_p} \right) + 3,42}}_{2^{do} \text{ término}} \right] \quad [4-6]$$

siendo:

d_p = diámetro de partícula, gota (cm).

ρ_p = densidad de la partícula (g/cm^3).

M = peso molecular (g/mol).

R = constante de los gases perfectos $=8,314 \times 10^7$ (erg/k.mol).

p_∞ = presión parcial de vapor en el ambiente (dinas / cm^2).

p_s = presión de vapor en la superficie de la partícula (dinas/ cm^2).

T_∞ = temperatura en el ambiente(K).

T_s = temperatura en la superficie de la gota (K).

Esta ecuación contempla, por una parte, la tasa a la que difunde el vapor desde la gota (primer término), si la presión ambiental de vapor es menor que la de la superficie de la gota el primer término es negativo, se produce evaporación y la gota disminuye. Por otra parte, se presenta una corrección al efecto Kelvin y al efecto Fuch (segundo término). Para gotas menores a $0,1 \mu\text{m}$, la presión parcial de vapor en su superficie es mayor que la presión de vapor de saturación definida para superficies planas y el primer miembro de la ecuación predice una tasa de evaporación que excede el máximo teórico de transferencia de masa en el vacío. El efecto Fuch, por su parte, se fundamenta en que la difusión de las moléculas desde la superficie de la gota hacia a una esfera imaginaria concéntrica de diámetro $d_p + 4/3\lambda$ es controlada por la teoría cinética de gases.

El tiempo necesario para que una gota disminuya su tamaño puede calcularse integrando la ecuación anterior y se puede estimar que el tiempo de vida medio de una gota de agua de $d_p < 1 \mu\text{m}$ a 20°C y 50 % de humedad relativa es inferior a 0,002 s, por lo que con el tiempo de residencia estimado se produciría totalmente el secado.

En la siguiente figura, se puede observar el efecto de disminución de tamaño de una gota por secado.

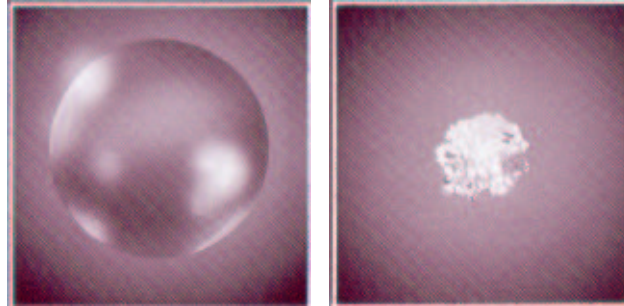


Figura 4-14. Efecto que produce el secado de una partícula.

4.3.4 Preimpactador.

El preimpactador consiste básicamente en una etapa simple de impactación, fabricada en acero inoxidable, con una única tobera intercambiable frente a la superficie o plato de impactación.

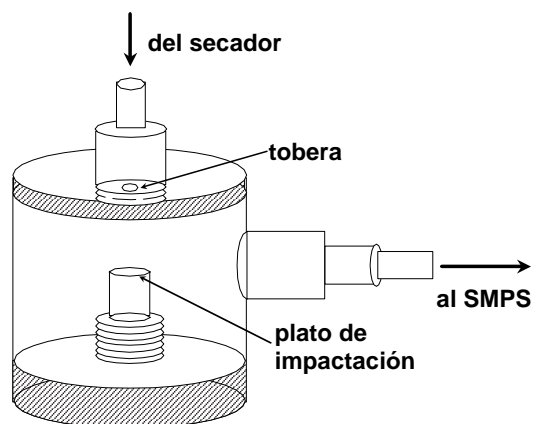


Figura 4-15. Preimpactador.

El diámetro de corte, d_{p50} es diferente para distintos tamaños de tobera y varía con el caudal y la temperatura.

La función primaria del preimpactador es eliminar, con garantía, las partículas mayores de una micra que no han sido previamente eliminadas por el ciclón, antes de ser introducidas en el DMA. Las partículas que se separan en el preimpactador suponen, en masa, muy poca cantidad ya que corresponden a las de tamaño cercano a la micra. La siguiente figura muestra la variación del diámetro de corte de un preimpactador en función del caudal aplicado, para tres toberas de diferente diámetro: 0,0457, 0,0508 y 0,071 cm.

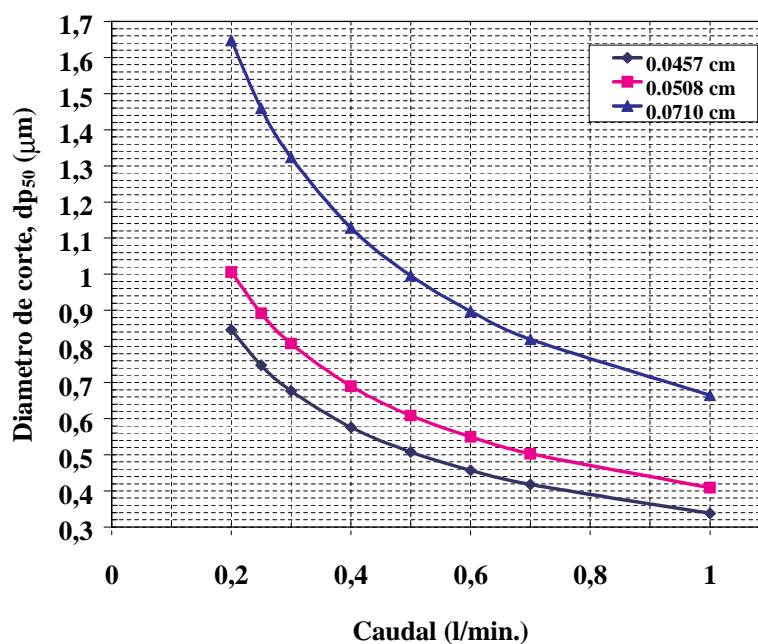


Figura 4-16. Variación de d_{p50} en función del caudal aplicado en el preimpactador, para tres toberas de diferente diámetro: 0,0457, 0,0508 y 0,071 cm, (20 °C y 1 atm.).

Se observan tres curvas, casi paralelas, que decrecen exponencialmente con el caudal, ya que si se mantienen constantes la presión y la temperatura, el diámetro de corte d_{p50} (50% de eficacia en la colección de partículas) solo depende del caudal, Q y del diámetro de tobera, d_t . A partir de la expresión del número de Stokes, se puede deducir la dependencia de d_{p50} con el caudal, Q y d_t :

$$d_{p50} = \sqrt{9 \mu_g d_t (\text{Stk}_{50}) / C(\text{Kn}) \rho_p v} \quad \begin{array}{l} \text{P y T constante} \\ \hat{=} \\ \text{Cte}' \cdot d_t^{3/2} Q^{-1/2} \end{array} \quad [4-7]$$

siendo:

μ_g = viscosidad dinámica del gas (dinas.s/cm²).

d_t = diámetro de la tobera (cm).

Stk_{50} = número de Stokes crítico que se corresponde con d_{p50} .

$C(\text{Kn})$ = factor de deslizamiento de Cunningham en función del número de Knudsen, ($\text{Kn} = 2\lambda/d_p$).

$$C(\text{Kn}) = 1 + (\text{Kn} \cdot (1,142 + 0,558 \cdot \exp(-0,999/\text{Kn})))$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665 \cdot (101,3/P) \cdot (T/293,15) \cdot ((1 + (110/293,15)) / (1 + (110/T)))$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

ρ_p = densidad de partícula (g/cm³).

v = velocidad de los gases en el conducto (cm/s).

Q = caudal de gases (cm³/s).

Se observa que, para el caudal óptimo de funcionamiento del SMPS, 0,3 l/min (que coincide con el óptimo del CNC, porque es el caudal de su sensor) el diámetro de corte es para cada una de las toberas empleadas 0,7, 0,8 y 1,3 μm , ello implica que suponiendo una eficacia ideal con una curva escalonada en d_{p50} , su utilización podría sesgar por su extremo superior el intervalo de medida del SMPS.

El preimpactador también es utilizado como medidor de caudal. La raíz cuadrada de la caída de presión a través del mismo es proporcional al caudal. Por lo que midiendo la

caída de presión en el preimpactador, con un manómetro de presión diferencial, se puede controlar el caudal de aerosoles polidispersos que entran en el DMA.

En la siguiente figura, se representa la caída de presión a través del preimpactador en función del caudal aplicado, para tres toberas de diámetro diferente: 0,0457, 0,0508 y 0,0710 cm. La caída de presión cambia significativamente con el caudal, para las toberas de 0,0457 cm y 0,0508 cm, lo que las hace muy adecuadas para el control del mismo, ya que una pequeña variación del caudal supone un cambio significativo en la caída de presión. Sin embargo, para la tobera de mayor tamaño (0,071 cm) es mucho más difícil apreciar los cambios en el caudal a partir de la caída de presión.

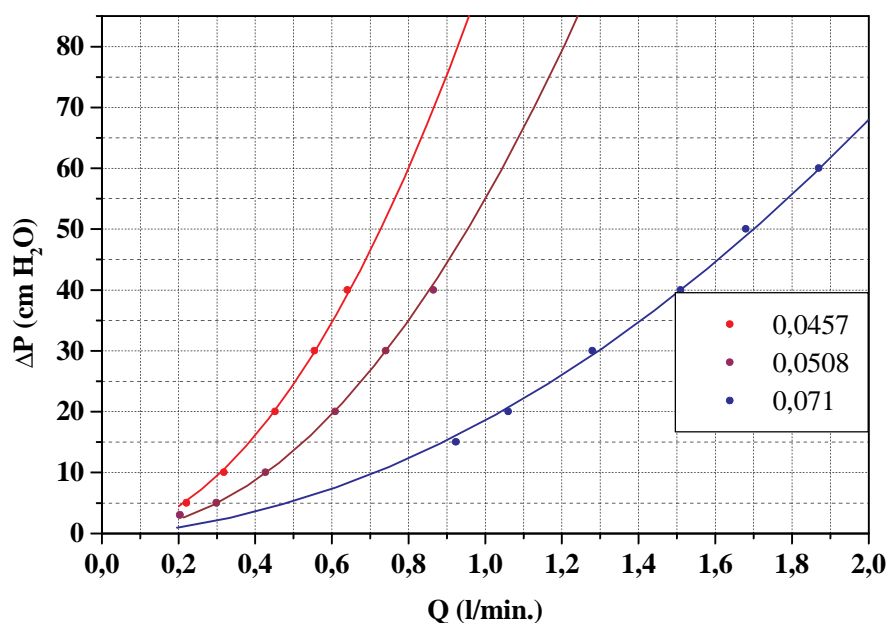


Figura 4-17. Caída de presión en función del caudal aplicado, en el preimpactador, para tres toberas de diferente diámetro: 0,0457, 0,0508 y 0,071 cm. (20 °C y 1 atm.).

Por tanto, la elección de la tobera del preimpactador está condicionada a la medida. Para un caudal determinado, cuanto mayor es la tobera mayor es el intervalo de medida de

partículas submicrométricas que se puede medir sin ser sesgado, pero también es menor la precisión con la que se controla el caudal de entrada al DMA de aerosol polidisperso.

4.3.5 Neutralizador de carga.

El cargador bipolar, modelo 3077 TSI, consiste en un tubo de acero inoxidable, de 3,8 cm de diámetro y 15,2 cm de longitud, que contiene una fuente radioactiva de Kr-85, con un periodo de semidesintegración de 10,4 años y una actividad de 2 mCi.

Cuando el aerosol atraviesa el dispositivo, las moléculas del gas se ionizan por acción de la fuente radioactiva. La carga de las partículas es neutralizada por los iones positivos y negativos que son atraídos por partículas de carga opuesta. Si el tiempo de residencia en el dispositivo es suficientemente alto, el nivel de carga de las partículas de aerosol se reduce al nivel de carga de equilibrio (Figura 4-18).

La distribución de carga producida por una ionización bipolar simétrica del gas está dada en primera aproximación por la fórmula de Boltzmann. La fracción de partículas con n cargas elementales (n es un entero positivo o negativo menor que dos) es:

$$f(n) = \frac{1}{\sum_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[\frac{(ne)^2}{d_p k T}\right]} \exp\left[\frac{(ne)^2}{d_p k T}\right] \quad [4-8]$$

Para dos o más cargas puede calcularse a partir de la siguiente expresión (Wiedensohler, 1988):

$$f(n) = \frac{e}{\sqrt{(4\pi^2 \epsilon_0 d_p k T)}} \exp \left[\frac{n - \frac{2\pi \epsilon_0 d_p k T}{e^2} \operatorname{Ln} \left(\frac{c_{NI+} Z_{I+}}{c_{NI-} Z_{I-}} \right)}{2 \frac{2\pi \epsilon_0 d_p k T}{e^2}} \right]^2 \quad [4-9]$$

siendo:

n = nº de cargas elementales.

e = carga del electrón = $1,6 \times 10^{-12}$ (dinas.cm/voltio).

d_p = diámetro de partícula, (cm).

k = constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-16}$ (dinas.cm/K).

T = temperatura (K).

ϵ_0 = constante dieléctrica = $8,85 \times 10^4$ (voltios²/dinas).

$C_{I\pm}$ = concentración de iones.

$Z_{I\pm}$ = movilidad de los iones.

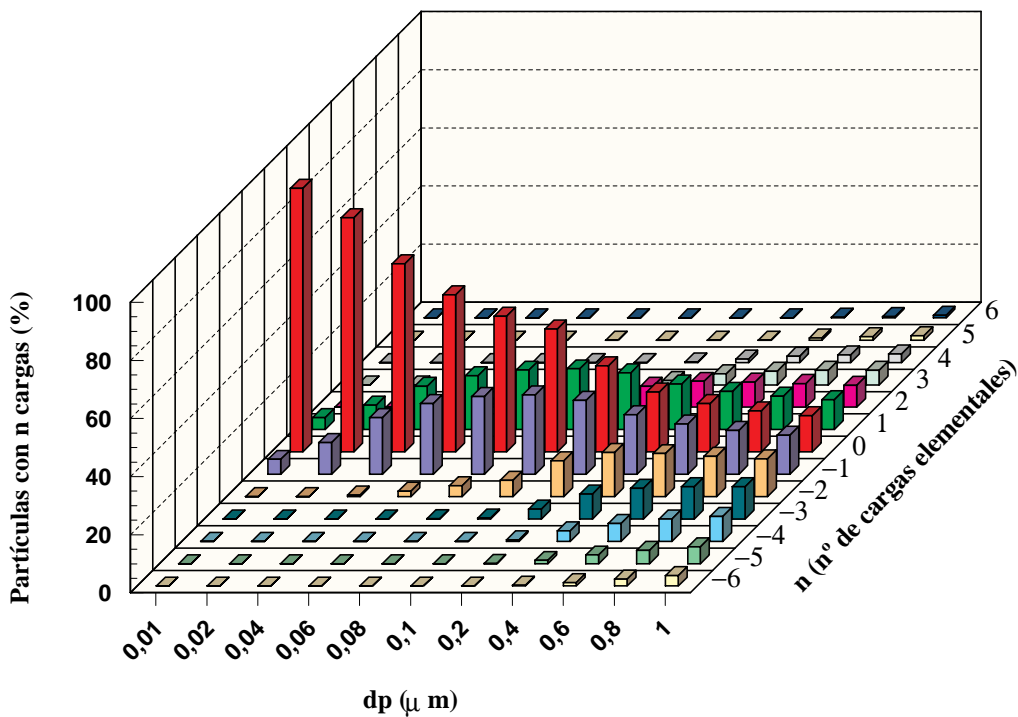


Figura 4-18. Distribución de cargas sobre partículas de aerosol.

4.3.6 Diluidor.

La dilución de los gases de muestreo se realiza dependiendo de las condiciones de los aerosoles muestreados y no siempre se lleva a cabo, ya que introduce un cierto error en el muestreo. Tiene por finalidad, diluir y enfriar al mismo tiempo los gases cuando lo requieran las condiciones de operación, evitando que se produzca condensación. El sistema de dilución consta fundamentalmente de: línea de aire comprimido, sistema de limpieza de aire, desecador, diluidor y dispositivos de control.

El sistema de limpieza de aire consta de un filtro (Zander G3XAD) constituido por dos unidades conectadas en serie, una de ellas (cartucho filtrante 1050X), para la retención de partículas en suspensión y condensados de aceite y la otra (cartucho filtrante 1050A), para la eliminación del vapor de aceite procedente del compresor y un manómetro diferencial (Zander ZD 60). Adicionalmente, el aire pasa través de un filtro absoluto de partículas (HEPA), para retener las partículas más pequeñas.

El desecador está constituido por un depósito de gel de sílice, por el que circula el aire de dilución.

El diluidor (Palas, VKL-10-E) consiste básicamente de una cámara de mezcla, cilíndrica fabricada en acero inoxidable, con dos entradas, para aire limpio y aerosoles y dos salidas, para el aerosol diluido y el aire en exceso. Tiene por objetivo, disminuir la concentración de un aerosol dado sin modificar la distribución de tamaño de partículas. Para ello, se mezcla homogéneamente un caudal (en volumen) de aire limpio, Q_{aire} , (l/min) con otro de aerosol, Q_{aerosol} (l/min), estando definido el factor de dilución, F_d por:

$$F_d = \frac{Q_{\text{aire}} + Q_{\text{aerosol}}}{Q_{\text{aerosol}}} \quad [4-10]$$

4.4 DISPOSITIVOS AUXILIARES.

Antes de la unidad de control, existen una serie de dispositivos auxiliares que permiten adicionalmente medir el caudal, temperatura y presión en la línea de muestreo, además de cuatro válvulas, para controlar los caudales secundarios de las cuatro ramas de salida de los instrumentos de medida.

Aunque el caudal total de muestreo es controlado y medido por la unidad de control, también se mide a la salida de la caja fría. Para ello, se utiliza un medidor de flujo másico (Sierra, Top-Track 824), de 0 - 40 l/min.

La temperatura final de la línea de muestreo es determinada por un termómetro (Nuova Fima), escala 0 - 200 °C.

La presión es controlada por un manovacuómetro (Nuova Fima), escala -1 a 1,5 kg/cm².

Un portafiltros con filtro de fibra de vidrio de 47 mm similar al de la Figura 4-7 es situado como salvaguardia antes de la caja fría.

4.5 EQUIPOS PARA LA VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO.

La eficacia de transporte en el sistema de muestreo va a estar condicionada en gran medida por la de los equipos utilizados en el tratamiento previo de la muestra, es decir, el divisor de flujo, ciclón de corte, cámara de muestreo, secador y preimpactador (Figura 4-8). La eficacia de transporte en el neutralizador de carga puede ser estimada igual que la de las líneas de muestreo a partir de los modelos de deposición (Capítulo 3 - Fundamentos teóricos).

Se utilizaron dos bancos de calibración para la validación de estos dispositivos, con aerosoles de partículas submicrométricas y micrométricas, respectivamente.

La eficacia de transporte se expresaba como eficacia fraccional, η que se determinaba a partir de:

$$\eta = \frac{c_{nf}(\Delta d_p)}{c_{no}(\Delta d_p)} \quad [4-11]$$

siendo:

c_{no} = concentración numérica inicial de partículas en el aerosol de ensayo, en un intervalo de tamaño, Δd_p (partículas/cm³).

c_{nf} = concentración numérica final de partículas en el aerosol de ensayo, después del elemento a validar en el intervalo de tamaño, Δd_p (partículas/cm³).

4.5.1 Banco de calibración para partículas submicrométricas.

El banco de calibración está formado básicamente por un sistema de generación y otro de medida, (Figura 4-18).

El sistema de generación lo forman: un atomizador de Collison (May, 1973), un secador de gel de sílice (4.3.3), un medidor de caudal, aire comprimido limpio y seco, y un filtro de alta eficacia. La medida se realiza con un equipo SMPS (4.2.1.2) extrayendo una submuestra de la línea principal mediante una cámara de muestreo (4.3.2). Los aerosoles son llevados a través del equipo a validar mediante una bomba de vacío. La mayor o menor apertura de varias válvulas permite controlar el caudal de ensayo. El aerosol de exceso es filtrado por un filtro de alta eficacia.

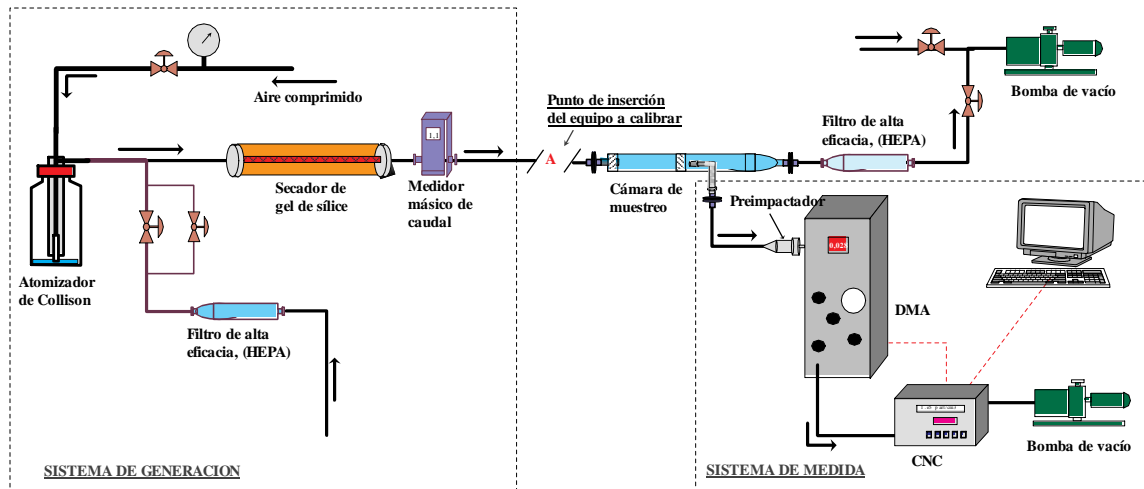


Figura 4-19. Esquema del banco de calibración para partículas submicrométricas.

Los aerosoles son generados como gotas, por nebulización de aire comprimido, en el atomizador de Collison, que consta de: cabeza de atomización y depósito del líquido a atomizar. La cabeza de atomización es un cuerpo sólido cilíndrico de acero inoxidable, con la entrada de aire en su parte superior y tres orificios de salida laterales. Otros tres orificios transcurren desde su extremo inferior hasta cada uno de los tres de salida de aire. El aire comprimido se introduce en la cabeza de atomización y sale por los tres orificios laterales, creando una depresión en las correspondientes regiones de salida.

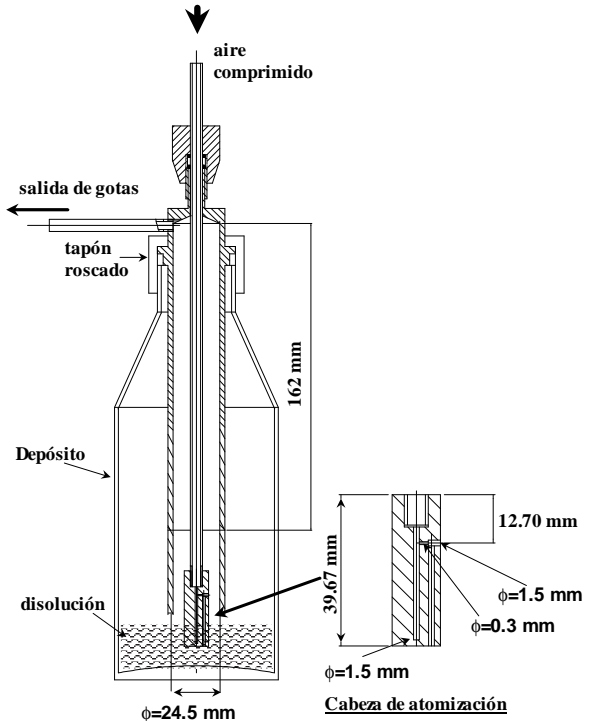


Figura 4-20. Atomizador de Collison.

El líquido del depósito asciende, por efecto Bernoulli, por cada uno de los tres orificios de la cabeza de atomización, sumergida en parte en el líquido. El líquido sale como delgados filamentos que se estiran al ser acelerados hasta romperse en pequeñas gotas. Las gotas mayores se eliminan por impactación contra un tubo concéntrico a la cabeza de atomización y de mayor diámetro que ésta. Este tubo conduce las gotas más pequeñas hasta la salida fuera del depósito.

Se empleó, como líquido de atomización, una disolución de Ni_2Cl con una concentración de 0,1 % en masa. Las gotas producidas pasaban a través del secador de gel de sílice para convertirse en partículas sólidas Ni_2Cl de tamaño submicrométrico, y constituir el aerosol de ensayo.

Con este aerosol, se validaron los siguientes equipos: divisor de flujo, ciclón, cámara de muestreo, secador de gel de sílice y preimpactador. En cada caso, se procedía seleccionando un caudal de funcionamiento y realizando varias medidas con el equipo SMPS, para conocer la distribución de partículas submicrométricas obtenida a ese caudal. Después, se insertaba el elemento a validar, en el punto A señalado en el esquema, y se procedía a realizar nuevamente varias medidas con el SMPS, determinando la eficacia fraccional a partir de la ecuación [4.11].

Hay que hacer notar, que el aerosol de ensayo para un mismo caudal variaba con el tiempo porque cambiaba la concentración de Ni_2Cl en el depósito del atomizador, lo que obligaba a que el proceso anterior se tuviera que repetir varias veces de forma que las comparaciones se efectuasen entre medidas consecutivas. Por otra parte, la presión del aire comprimido en el atomizador se mantenía fija en 2 kg/cm^2 para que el proceso de formación de las gotas fuese constante, con ello se obtenía un caudal de 2 l/min. Para las pruebas a caudales mayores a éste, la corriente se diluía con aire limpio y seco y para las de caudales menores se utilizaba sólo una parte del mismo. En la figura 4-21, se

representan las distribuciones de tamaño de partículas correspondientes al aerosol de ensayo, obtenidas para diferentes caudales: 2, 3, 4 y 5 l/min.

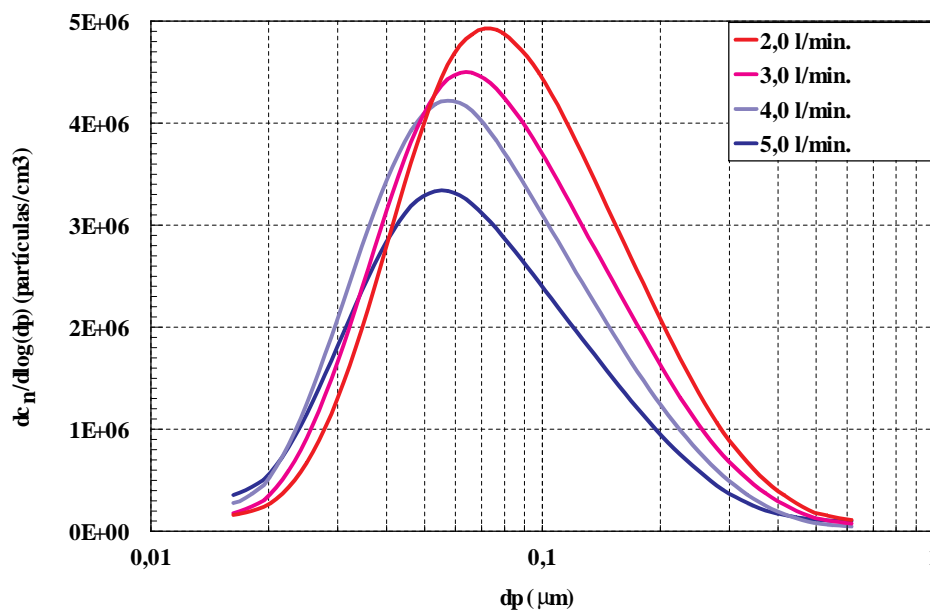


Figura 4-21. Distribuciones de tamaño de partículas de Ni_2Cl , para diferentes caudales de ensayo, producidas en el banco de calibración de partículas submicrométricas.

Se podía observar que el incremento de caudal hacía disminuir la concentración neta de partículas y la distribución se desplazaba hacia tamaños menores. El primer efecto es consecuencia directa del fenómeno de la dilución. La obtención de partículas de menor tamaño a mayores caudales se debía a que la aglomeración que se pudiera producir en el secador disminuía con el caudal, ya que el tiempo de residencia en el secador era menor y la probabilidad de que las partículas se aglomerasen, también.

También se observó que la concentración no disminuía de la forma que había que esperar según la dilución dada. Así, la concentración obtenida al diluir al doble la corriente suponía una concentración mayor que la mitad. Esto se debía a que el incremento de

caudal de dilución facilitaba el arrastre de las partículas desde el depósito del atomizador, incrementando la concentración respecto a la esperada.

4.5.2 Banco de calibración para partículas micrométricas.

El banco de calibración para partículas micrométricas lo forman fundamentalmente: un dispersador de polvo, como equipo para generar partículas y un contador óptico como instrumento de medida, (Figura 4-22).

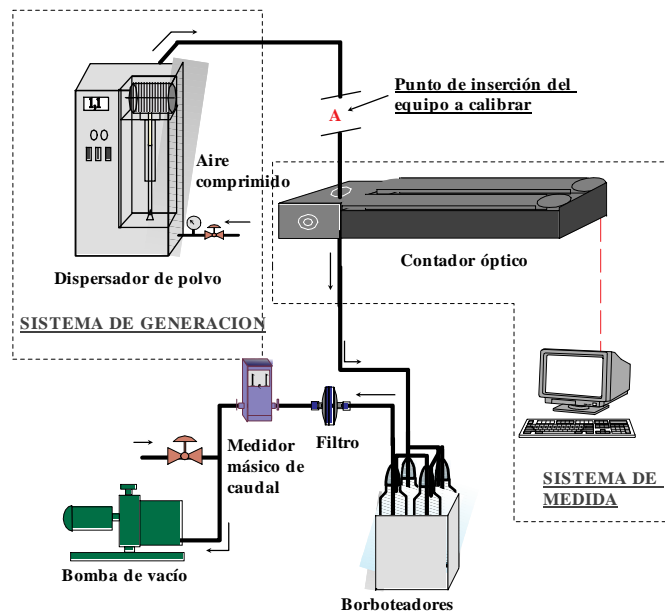


Figura 4-22. Esquema del banco de calibración para partículas micrométricas.

Los aerosoles generados son conducidos a través del equipo a validar mediante aire comprimido limpio y seco utilizado en la generación, además de por una bomba de vacío. Finalmente, son filtrados por cuatro borbotadores, Greenburg-Smith modificados y uno

estándar que contienen agua, y un filtro de fibra de vidrio. El caudal es medido con un medidor másico y controlado mediante una válvula de aguja.

El dispersador de partículas sólidas PALAS/RBG-1000 (PALAS GMBH, 1994) (Helsper y Molter, 1987) permite dosificar cantidades exactas de polvo en fase seca, dispersando las partículas dentro de una corriente de aire. El principio básico de funcionamiento se describe a partir del esquema presentado en la siguiente figura.

Un cepillo cilíndrico situado en un bloque de acero inoxidable, (cabeza de dispersión) gira a una velocidad determinada (1000 - 1200 rpm). Simultáneamente, un pistón empuja, a una velocidad dada (1 - 2 mm/h), el material a ser dispersado, previamente compactado en un depósito cilíndrico situado por debajo del cepillo.

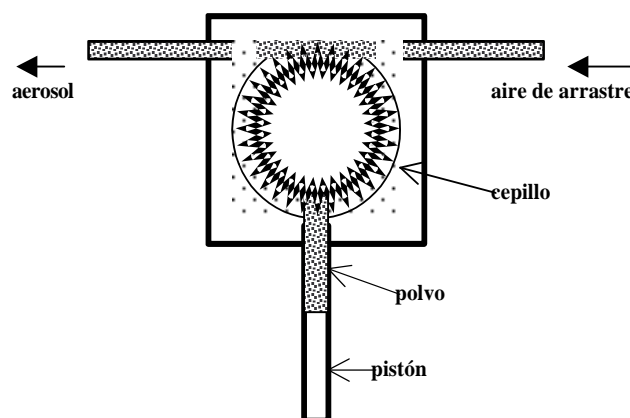


Figura 4-23. Principio de operación del dispersador de polvo.

El cepillo, al girar, barre el material hasta la parte superior de la cabeza de dispersión desde donde es arrastrado por una corriente de aire comprimido hasta la salida. La velocidad del aire es un importante factor, porque la dispersión de partículas pequeñas requiere alta energía.

Se empleó como material de dispersión, polvo de ZrO_2 con un MGD de $2 \mu m$ cuya dispersión en aire constituía el aerosol de ensayo.

Con este aerosol, se validaron diferentes equipos del sistema de muestreo: divisor de flujo, ciclón y cámara de muestreo. En cada caso, se seleccionaba un caudal y se

realizaban varias medidas con el contador óptico, para conocer la distribución de tamaño y concentración de partículas micrométricas a ese caudal. Después, se insertaba el elemento a validar, en el punto A señalado en el esquema y se procedía a realizar nuevamente varias medidas para determinar la eficacia fraccional según [4-11].

El aerosol de ensayo, para un mismo caudal, variaba ligeramente de unas medidas a otras por la diferente compactación del material en el depósito del dispersador. Las distribuciones de tamaño para caudales distintos, obtenidos variando la presión de aire comprimido desde 0,5 - 4 kg/cm² y el caudal de succión de la bomba de vacío, también eran diferentes.

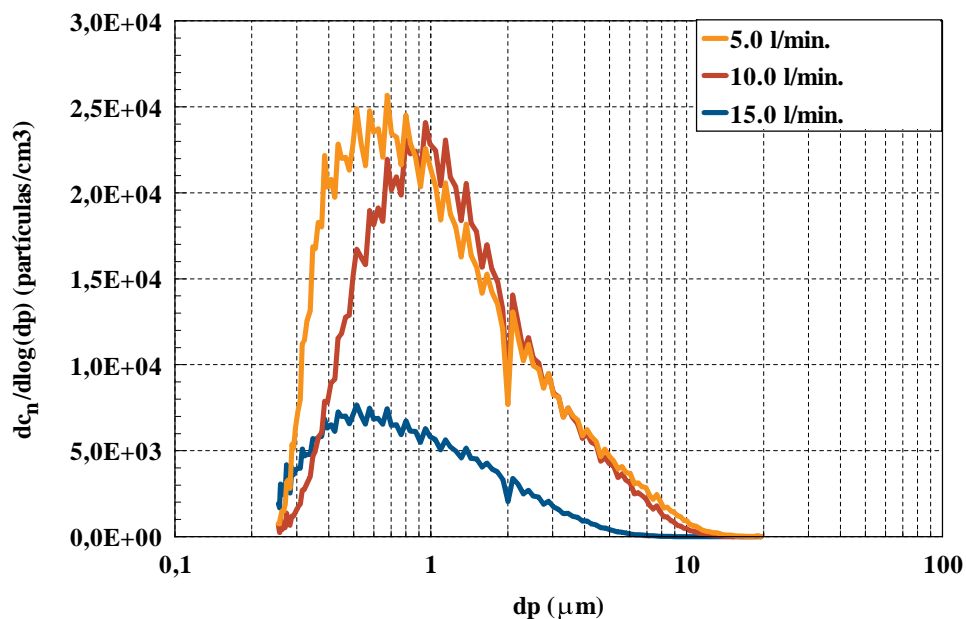


Figura 4-24. Distribuciones de tamaño de partículas de ZrO₂, para diferentes caudales de ensayo, producidas en el banco de calibración de partículas micrométricas.

4.6 MODO OPERATIVO.

Este apartado se refiere a la forma de actuación para llevar a cabo la caracterización de un aerosol cualquiera en un conducto, con el sistema de muestreo y medida presentado (figuras 4-1 y 4-2).

4.6.1 Determinaciones previas al muestreo.

Antes de proceder al muestreo, es necesario realizar un estudio para determinar las condiciones óptimas para llevarlo a cabo. Se elegirán de manera adecuada los puntos de muestreo, y se valorarán algunas de las características físico-químicas de los gases de ensayo: composición química, humedad, temperatura, presión, punto de rocío, régimen en tubería, etc. El conocimiento de estos parámetros permitirá de forma particular, elegir la boquilla de toma de muestras, y de forma general, influirá en el procedimiento a seguir e incluso en el rediseño del sistema de muestreo y medida. Por ejemplo, la ausencia de humedad evitará el uso del secador de gel o la alta temperatura aconsejará la dilución de la muestra.

4.6.1.1 Puntos de muestreo.

La selección del punto de muestreo es el primer paso a realizar en cualquier proceso de medida de partículas y debe elegirse de forma que se minimicen los factores de interferencia. En particular, los cambios de dirección o sección o elementos introducidos en el conducto (equipos de medida o control, etc.) producen perturbaciones en las líneas de flujo y afectan a la distribución de partículas.

En general, el punto debe localizarse al menos a cinco y tres diámetros hidráulicos, D_h aguas arriba y abajo respectivamente de la perturbación de flujo más próxima.

$$D_h = \frac{4 \cdot \text{sección}}{\text{perímetro}} \quad [4-12]$$

$D_h = l$, para una tubería de sección cuadrada de lado l y $D_h = d_c$ para un conducto de sección circular de diámetro d_c (American Public Health Association, 1977).

4.6.1.2 Características físico químicas del gas.

La temperatura de los gases será medida previamente con el termopar de la sonda de muestreo. Si ésta es superior a 200 °C, es conveniente diluir la muestra. También la velocidad de los gases es calculada en el punto elegido [4-1], lo que permitirá determinar el régimen de los gases en el conducto, a partir del módulo de Reynolds,

$$Re = \frac{v \rho_g D_h}{\mu_g} \quad [4-13]$$

v = velocidad de los gases en el conducto (m/s).

ρ_g = densidad de los gases (kg/m^3).

D_h = diámetro hidráulico de la tubería (m).

μ_g = viscosidad de los gases (N.s/m^2).

La viscosidad se podrá calcular en primera aproximación, considerando la del aire a la temperatura del conducto, en °C, según:

$$\mu_g = \mu_{\text{aire}} = (174,4 + 0,406 T) \cdot 10^{-7} \quad [4-14]$$

La composición de los gases se determinará con un analizador portátil para gases, de células electroquímicas, con sensores de: CO (0 - 2000 ppm), SO₂ (0 - 2000 ppm), O₂ (0 - 25%), NO (0 - 2000 ppm), H_yC_x (máximo teórico correspondiente al combustible utilizado 0 - 5000 ppm). El H₂O será determinada a partir del condensado después de un muestreo previo utilizando un filtro exclusivamente.

El peso molecular del gas seco M_s (g/mol) se calculará a partir del porcentaje en volumen de los compuestos mayoritarios: N₂, CO₂, O₂, SO₂, H₂O (vapor) y del CO.

$$M_s = 0,44(\%CO_2) + 0,32(\%O_2) + 0,28(\%N_2 + \%CO) + 0,96(\%SO_2) \quad [4-15]$$

El peso molecular del gas húmedo, M_h (g/mol), será calculado a partir del peso molecular del gas seco, M_s y el del agua, 18,02 g/mol, considerando la fracción de cada uno de ellos en la mezcla:

$$M_h = M_s (1 - x_{H_2O(gas)}) + 18,02 x_{H_2O(gas)} \quad [4-16]$$

$x_{H_2O(gas)}$ = valor medio de la fracción molar de vapor de agua en el gas de emisión húmedo.

Como:

$$x_{H_2O(gas)} = \frac{V_{H_2O(gas)}}{V_{H_2O(gas)} + V_{gas\ seco}} \Rightarrow \frac{V_{H_2O(gas)}}{V_{gas\ seco}} = \frac{x_{H_2O(gas)}}{1 - x_{H_2O(gas)}} \quad [4-17]$$

y considerando las densidades del agua y del gas, se calculará la humedad absoluta de los gases de emisión H_{gas} (kg_{agua}/kg_{gas seco}) y el porcentaje de saturación mediante:

$$\%HR_{\text{gas}} = H_{\text{gas}} \frac{(p - p_S)}{p_S} \frac{M_s}{M_{H_2O}} 100 \quad [4-18]$$

siendo:

p = presión total en el conducto (bares).

p_S = presión de saturación del vapor de agua a la temperatura considerada (bares).

M_{H_2O} y M_s = pesos moleculares del agua y del gas seco (g/mol).

Aplicando la ecuación [4.18] en condiciones de saturación, %HR=100, y considerando la humedad absoluta de los gases y conocida la presión p , se calculará el valor de la presión de saturación correspondiente. Aplicando la ecuación de Clapeyron sobre su límite superior:

$$\ln p_S = 25,2581 - \frac{5121,9}{T_S} \quad [4-19]$$

siendo:

T_S = temperatura de saturación (K).

p_S = presión de saturación (N/m²).

se obtendrá la temperatura, correspondiente al punto de rocío, por encima de la cual no se producirá la condensación.

4.6.1.3 Elección de la boquilla de muestreo.

La elección de la boquilla de muestreo idónea se hará en función de la velocidad de los gases en el conducto, la capacidad del sistema de succión y el caudal necesario para obtener datos adecuados con los equipos de medida.

Para determinar el caudal de muestreo más apropiado, es conveniente hacer pruebas previas. En principio, se ensayará con la boquilla de menor tamaño de que se disponga y un filtro, muestreando a un caudal bajo, 2 - 5 l/min, y un tiempo pequeño de 5 min (estas pruebas servirán también para determinar la humedad de los gases, ver apartado anterior). La cantidad de material recogido va a indicar la pauta a seguir en las pruebas sucesivas. Si ésta es suficiente para que la pesada en mg, realizada en una balanza pesafiltros con una precisión de 0,001 mg, tenga al menos dos cifras significativas, entonces se realizarán varias medidas con el mismo caudal y a tiempos cada vez mayores 10, 15, 20, 25 minutos, etc., hasta que se llegue a colmatar el filtro, lo que se comprueba por la caída brusca de presión en la línea de muestreo, observada con un manovacómetro. Con estos datos, se conocerá el volumen aproximado mínimo y máximo de muestreo. Todo ello permitirá elegir el tiempo de muestreo, de acuerdo a las necesidades de los equipos a utilizar, y seleccionar un caudal de muestreo. Si la cantidad recogida en la primera medida no fuera suficiente para considerar la pesada, se probará como se ha indicado anteriormente con mayor volumen de muestreo (mayor boquilla, aumento de caudal o más tiempo) y así sucesivamente. Por el contrario, la colmatación del filtro con bajos caudales y tiempos pequeños, indica una alta concentración de partículas. En este caso, se procederá, en primer lugar, a separar las partículas de mayor tamaño, que son las que probablemente determinen la alta concentración másica. Para ello, se utilizará un ciclón con un diámetro de corte de 10 μm , previamente validado, a continuación de la sonda y se procederá como antes. Si a pesar de utilizar el ciclón, el filtro se continúa colmatando en breve y a bajos caudales, se probará con ciclones de diámetro de corte menor, y si tampoco es posible realizar un muestreo sin que el filtro se colmate, se deberá diluir la muestra, hasta que se pueda operar como en el primer caso.

Elegido el caudal de muestreo Q_m (l/min), después de las pruebas, y conocida la velocidad de los gases en el conducto, v (m/s), suponiendo condiciones isocinéticas, $v = v_m$ se calculará el diámetro de boquilla idónea d_b (mm), a partir de:

$$Q_m = \pi \frac{d_b^2}{4} v_m \Rightarrow d_b = K \left(\frac{4Q_m}{v_m \pi} \right)^{1/2} \quad [4-20]$$

K = factor de conversión de unidades = 4,0825 (mm)(m/s)^{1/2}/(l/min)^{-1/2}).

El caudal de muestreo elegido debe ser inferior al máximo nominal de la bomba de succión, pero al mismo tiempo, suficiente para poder realizar medidas simultáneas con los diferentes equipos sin prolongar excesivamente los periodos de muestreo, esto se consigue sacrificando el isocinetismo.

De una colección de boquillas típica: 1", 1/2", 3/8", 1/4", 3/16", 1/8", etc. se puede relacionar el caudal de muestreo y la velocidad del conducto, en condiciones isocinéticas en el siguiente nomograma.

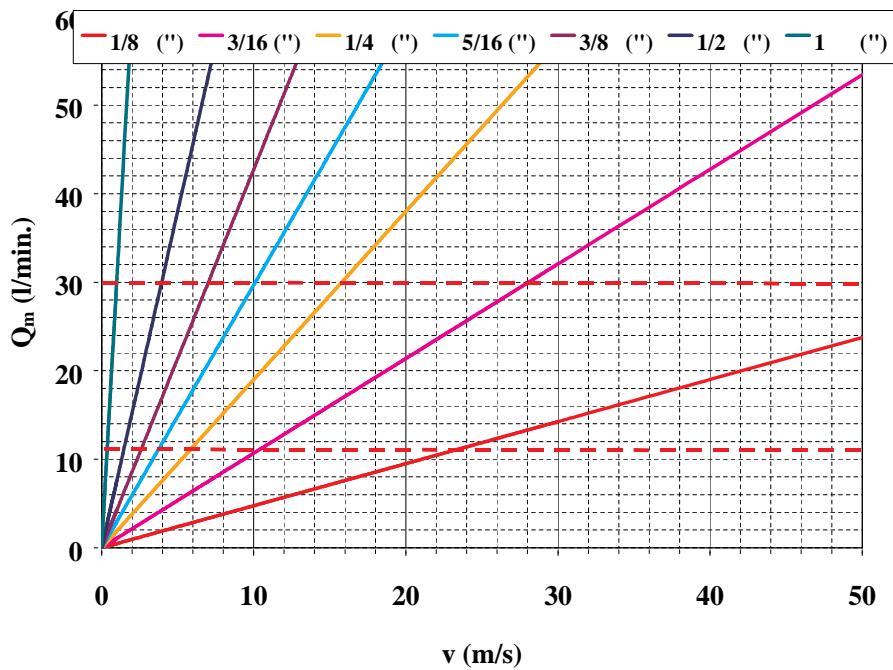


Figura 4-25. Nomograma para determinar la boquilla de muestreo idónea.

Para el equipo utilizado, el caudal deberá estar comprendido entre 11 y 30 l/min, si se supone una velocidad habitual de los gases en el conducto de 10 m/s, la boquilla idónea calculada de [4-20] tendría un diámetro de 5 – 8 mm, por lo que de las boquillas habituales se podría utilizar la de 1/4" como más adecuada.

4.6.2 Proceso de caracterización de partículas.

4.6.2.1 Concentración másica.

Antes del ensayo, los filtros son desecados en estufa de vacío, durante 24 h a 120 °C, tarados y dispuestos individualmente en placas de Petri numeradas en ambas tapas. Para pesarlos se utiliza una microbalanza electrónica para filtros, Sartorius M5P con una sensibilidad de 0,001 mg.

Una vez recogida la muestra en diferentes filtros y después de ser éstos extraídos de los portafiltros, los filtros son clasificados en las distintas placas de Petri, para su posterior análisis. Posteriormente, son secados en estufa a la temperatura de 120 °C, durante 24 h, y pesados, para determinar el peso de la masa depositada.

La concentración másica se calcula a partir de la masa obtenida por diferencia de peso antes y después de la prueba. Los datos de pesada son referidos al volumen de gas, en condiciones estándar de presión y temperatura, que ha pasado a través del filtro.

4.6.2.2 Distribución aerodinámica.

Las muestras se distribuyen en ocho sustratos correspondientes a las etapas del impactador y en un filtro final. El tratamiento de los sustratos se realiza de forma similar a lo descrito en el apartado anterior, obteniéndose la distribución aerodinámica a partir de la masa depositada en cada uno de ellos y adicionalmente la concentración másica total considerando la masa total depositada y la resultante del lavado del impactador.

Para obtener los datos de la distribución aerodinámica, es necesario determinar los diámetros de corte que corresponden a cada una de las etapas del impactador. El impactador es calibrado en fábrica con esferas de látex a unas determinadas temperaturas y caudales. Ya que las condiciones en las que se lleva a cabo el muestreo no tienen que coincidir con las de calibración del instrumento, es necesario extrapolar a condiciones distintas. Para ello, se ha desarrollado un programa de cálculo, realizado en Fortran 77, que permite obtener los diámetros de corte.

El programa calcula el diámetro de corte de cada etapa, aplicando la ecuación 3.31 de la siguiente forma:

$$d_{p50} = \frac{3}{2} \sqrt{\underbrace{\frac{(\text{Stk}_{50}) n d_t^3 \pi}{\rho_p}}_{\text{Cte.}}} \sqrt{\frac{\mu_g}{C(\text{Kn}) Q}} \quad [4-21]$$

siendo:

Stk_{50} = número de Stokes, correspondiente a una colección del 50%.

d_t = diámetro de la tobera (cm).

ρ_p = densidad de las partículas (g/cm^3).

μ_g = viscosidad (dinas.s/cm^2).

$C(\text{Kn})$ = factor de deslizamiento de Cunningham en función del número de Knudsen, ($\text{Kn} = 2\lambda/d_p$).

$$C(Kn)=1+(Kn.(1,142+0,558.\exp(-0,999/Kn))).$$

λ = recorrido libre medio (cm).

$$\lambda = 0,0665.(101,3/P).(T/293,15).((1+(110/293,15))/(1+(110/T))).$$

P = presión (kPa).

T = temperatura (K).

Q = caudal que llega al impactador (cm³/s).

n = número de toberas en cada etapa.

En la siguiente tabla, se muestran el número de toberas y su diámetro en cada una de las etapas del impactador:

Tabla 4-2. Numero de toberas por etapa y diámetro de tobera en el impactador MarkIII.

n° de etapa	d _t (cm)	n
0	0,0636	264
1	0,0465	264
2	0,0360	264
3	0,0280	264
4	0,0210	264
5	0,0135	264
6	0,0100	264
7	0,0100	156

Si en la ecuación anterior, ρ_p se hace igual a la unidad, el diámetro de corte es referido al diámetro aerodinámico y la primera raíz cuadrada de la ecuación anterior adquiere un valor constante para cada etapa, que es determinado a partir de los datos de la calibración original para varios caudales y temperaturas (Tabla 4-3).

Como el factor de deslizamiento de Cunningham es función de d_p , el programa realiza un proceso de cálculo iterativo mediante aproximaciones sucesivas, partiendo de unos valores iniciales próximos a los reales hasta que la diferencia entre dos valores sucesivos calculados es menor que un valor prefijado en el programa.

Tabla 4-3. Datos de calibración del Impactador MarkIII a 21 1 °C.

Caudal (cm ³ /s)	Diámetro de corte correspondiente a cada n° de Etapa de impactación (µm)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
47,2	29,9	18,7	12,7	8,7	5,6	2,9	1,8	1,2
94,4	21,3	13,3	9,0	6,2	4,0	2,0	1,3	0,87
141,6	17,4	10,8	7,4	5,0	3,2	1,6	1,0	0,69
188,8	15,0	9,4	6,4	4,3	2,8	1,4	0,87	0,59
236,0	13,4	8,4	5,7	3,9	2,5	1,2	0,77	0,52
283,2	12,3	7,6	5,2	3,5	2,3	1,1	0,70	0,47
330,4	11,4	7,1	4,8	3,3	2,1	1,0	0,64	0,43
354,0	10,9	6,8	4,6	3,2	2,0	1,0	0,61	0,41

4.6.2.3 Morfología y composición elemental.

Previo al ensayo, se preparan (cortan y limpian) laminas de vidrio, que son sometidas a un "sputtering" de oro o carbono y posteriormente dispuestas en los dispositivos que contienen los soportes para análisis por microscopía electrónica de barrido, SEM. Los dispositivos que han sido utilizados en cada muestreo son introducidos en una estufa de desecación durante 24 h. Las láminas son extraídas y analizadas en un microscopio electrónico, HITACHI modelo S-2500 que adicionalmente incorpora la técnica de análisis por rayos X, EPXMA (Electron Probe X-Ray Micro Análisis), por la que se permite obtener espectros de la composición elemental de las partículas aisladas.

Se toman suficientes microfotografías para disponer de recuento sobre un número de partículas representativo y realizar un adecuado estudio de su distribución; aunque ésta es sólo porcentual respecto a la submuestra considerada, ya que no se puede analizar el número total de partículas depositadas en las láminas. También se obtienen primeros planos de partículas individuales o grupos aislados para estudiar su forma. El análisis de imagen (AI),

realizado con el programa OPTIMAS-6.2, permite determinar la distribución granulométrica referida a la muestra depositada en las láminas y la morfología de las partículas.

La morfología se analiza en base a la circularidad relativa a un círculo que tuviese igual área proyectada que la partícula real:

$$c_r = \frac{c}{4\pi} = \frac{1}{4\pi} \frac{(\text{perímetro})^2}{\text{área}} \Rightarrow c_r \approx \frac{(\text{perímetro de la partícula})^2}{(\pi d_{ap})^2} \quad [4-22]$$

siendo:

c = circularidad = $(\text{perímetro})^2/\text{área} \Rightarrow c_{(\text{círculo})} = 1/4 \pi$

c_r = circularidad relativa.

d_{ap} = es el diámetro equivalente de área proyectada.

4.6.2.4 Concentración y distribución numérica de partículas micrométricas, (contador óptico)

El contador óptico (4.4.2.1.1) va contando las partículas, asignándoles un tamaño según pasan por el volumen de medida, que es una celda cúbica de 110 μm de lado. Para determinar la concentración en número de partículas, hay que determinar el volumen de aerosol medido por el contador óptico, $V_{(co)}$ a partir de:

$$V_{(co)} = S_c \cdot v_{(co)} \cdot t_{m(co)} \quad [4-23]$$

siendo:

S_c = superficie de la celda de medida = $(110 \times 10^{-4}) \text{ cm}^2$.

$v_{(co)}$ = velocidad de los gases a su paso por el contador (cm/s), se determina con el equipo.

$t_{m(co)}$ = tiempo de duración de la medida (s).

Interesa realizar medidas en tiempos largos porque de esta forma la muestra obtenida para cada intervalo es más representativa, siempre que no se produzcan variaciones importantes en la distribución original. Transcurrido el período de tiempo asignado a la medida, se obtienen datos de las partículas que han sido contadas.

Los valores obtenidos se transfieren desde el sistema de control del contador óptico hasta un ordenador personal que incorpora el "software" necesario, tanto para controlar el funcionamiento del equipo, como para disponer los resultados en forma de tablas y gráficos. Éstos son simplemente resultados provisionales que deben corregirse a los valores de los parámetros reales en el momento de muestreo. Ello se realiza teniendo en cuenta los datos que permanentemente se han registrado mediante la unidad de control de la sonda isocinética. De esta forma, se determinan la concentración y distribución en número de la muestra correspondiente, en el intervalo de tamaño de operación del instrumento, en este caso 0,3 - 10 μm ó 10 - 100 μm .

4.6.2.5 Concentración y distribución numérica de partículas submicrométricas (SMPS).

El equipo SMPS realiza un barrido continuo de valores de potencial para ir seleccionando y midiendo en cada uno de ellos un número de partículas que corresponden a un intervalo de tamaño. Si la medida se realiza durante un largo período, se pueden cometer grandes errores cuando se producen cambios en la población de partículas. Para evitar esto, se realizan varias series de medidas y en cada una de ellas, se lleva a cabo el barrido de potencial. Finalmente, se considera la media de las series de medidas para cada tamaño. El instrumento de medida está conectado a un ordenador personal, con el "software" adecuado para visualizar en pantalla los resultados a medida que se obtienen, y almacenar los datos.

4.7 TRATAMIENTO DE DATOS.

Se seguirá el procedimiento que se presenta, de forma esquemática, en la Figura 4-26. En un estudio de campo, los datos procederán de tres fuentes diferentes: Planta y línea de proceso donde se realiza el estudio de emisiones, estación de muestreo y medida y laboratorio. Los datos más significativos para realizar el análisis serán presentados en forma de tabla, utilizando una hoja de cálculo.

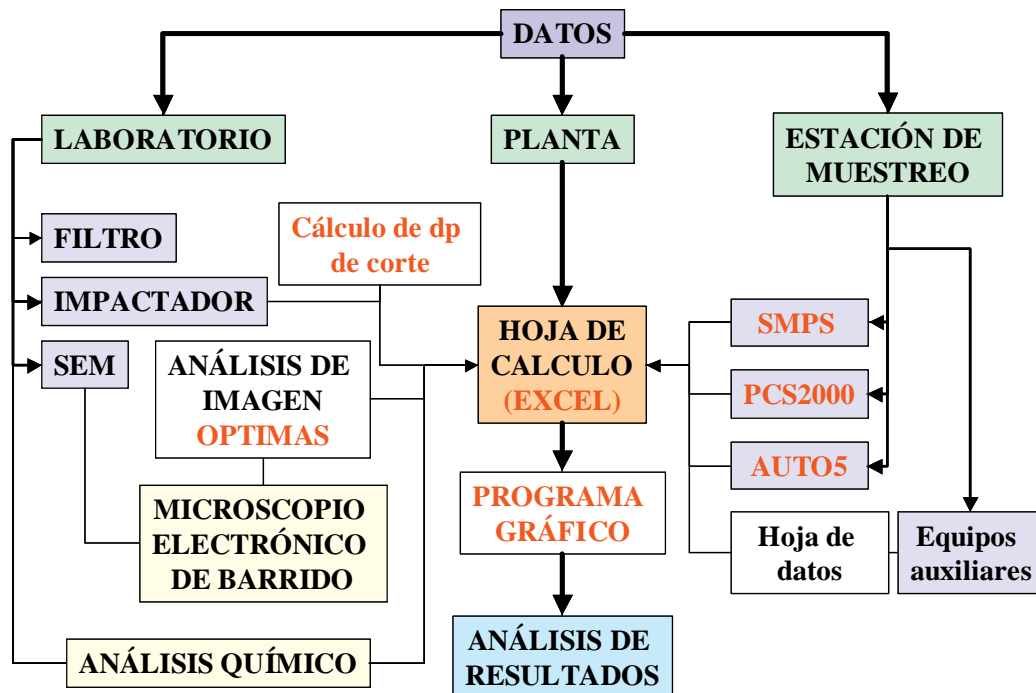


Figura 4-26. Esquema del Procedimiento de tratamiento de datos.

Para cada ensayo de caracterización, se realizará una tabla (hoja de calculo), con el fin de facilitar la posterior interpretación de resultados. La tabla constará de 20 columnas y, cada una contendrá la siguiente información:

1. (C1) Fecha y punto de muestreo.
2. (C2) Numero de muestreo.
3. (C3) Condiciones del ensayo: Nombre y tipo de ensayo.
4. (C4) Hora de la medida SMPS y del Medidor óptico, PCS.
5. (C5-7) Datos correspondientes a los gases en el conducto donde se realiza la medida, determinados con la sonda y registrados mediante el software AUTO5:
 - 5.1. (C5) Caudal en el conducto en condiciones normales, Q (Nm^3/h).
 - 5.2. (C6) Velocidad de los gases, v (m/s).
 - 5.3. (C7) Temperatura, T ($^{\circ}\text{C}$).
6. (C8-12) Datos correspondientes al muestreo, determinados con la sonda isocinética y registrados mediante el software AUTO5:
 - 6.1. (C8) Caudal de muestreo, Q_m (l/min).
 - 6.2. (C9) Caudal de muestreo en condiciones normales, Q_m (NI/min).
 - 6.3. (C10) Velocidad de muestreo, v_m (m/s);
 - 6.4. (C11) Temperatura de muestreo, T_m ($^{\circ}\text{C}$).
 - 6.5. (C12) Tiempo de muestreo, t_m (min).
7. (C13-14) Datos del Sistema de medida.
 - 7.1. (C13) Equipo utilizado: Filtro (F1, F2, etc.), SEM (Sem1, Sem 2, etc.), Impactador, (Impac0, Impac1, etc.).
 - 7.2. (C14) Concentración másica, (mg/NI).
8. (C15-17) Datos determinados con el equipo PALAS y registrados mediante el software PCS2000:
 - 8.1. (C15) Número de la medida realizada con el equipo.
 - 8.2. (C16) Concentración en número, ($\text{partículas}/\text{cm}^3$).
 - 8.3. (C17) Diámetro geométrico medio, MGD (micras).
9. (C18-20) Datos determinados con el equipo SMPS y registrados mediante el software SMPS:
 - 9.1. (C18) Número de la medida realizada con el equipo.
 - 9.2. (C19) Concentración en número, ($\text{partículas}/\text{cm}^3$).

9.3. (C20) Diámetro geométrico medio, MGD (nm).

Los resultados de las medidas obtenidas en la unidad de control son recogidos en un disquete en tandas de seis muestras. El software no permite utilizar el mismo disquete para las siguientes muestras. Los datos son únicamente leídos y tratados por el software AUTO5, correspondiente al equipo. Por tanto, deben imprimirse para poder copiar, de forma manual, los datos que interesen (Q_m , v_m , T_m , t_m) en la de hoja de cálculo. Estos datos se utilizan en el cálculo de la concentración y distribución de partículas y en general para expresar cualquier variable en condiciones normales.

Los datos de salida del contador óptico mediante el software del equipo, PCS2000, son almacenados como ficheros que pueden ser abiertos en una hoja de cálculo Excel, donde se ha creado una plantilla para realizar la representación $dc_n/d\log(d_p)$ en función del d_p , en escala logarítmica. Es necesario llevar los datos correspondientes al número de partículas contadas por canal en cada uno de los dos fotomultiplicadores, la velocidad de paso medida en el equipo y el tiempo de muestreo. En las columnas (C15-17) de la hoja de cálculo general, se presentan los datos de este equipo que corresponden a: n° de medida, concentración numérica y MGD (diámetro geométrico medio), obtenidos del tratamiento estadístico que proporciona el software del equipo.

Los datos de salida del equipo SMPS, obtenido mediante un software propio, pueden ser abiertos en una hoja de cálculo tipo excel, en el que se ha hecho una plantilla, para realizar la representación $dc_n/d\log(d_p)$ en función del d_p , en escala logarítmica. En las columnas (C17-20) de la hoja de cálculo general, se presentan los datos de este equipo, que corresponden a: n° de medida, concentración numérica y MGD (diámetro geométrico medio), obtenidos del tratamiento estadístico que proporciona el software del equipo.

Para el tratamiento de datos del impactador MARKIII, se ha desarrollado un software, en lenguaje fortran (MARKIII.FOR) que opera con la siguiente entrada de datos:

- Fichero de masas: datos resultantes de la pesada de sustratos correspondientes a cada etapa, dispuestos en columna.
- 1^{er} fichero de constantes del impactador. En este fichero se introduce la presión caudal y temperatura de la medida.
- 2^{do} fichero de constantes del impactador.

La salida de datos la forman cuatro ficheros con la siguiente información:

- viscosidad, recorrido libre medio y diámetro de corte para cada etapa, d_p .
- diámetro de corte, % acumulado, % masa, masa y $dc_m/d\log(d_p)$, para cada etapa.
- d_p y $dc_m/d\log(d_p)$ para histograma
- d_p y $dc_m/d\log(d_p)$.

Los datos de salida son abiertos en Excel y representados

El análisis de las láminas en el microscopio electrónico, proporciona dos fuentes de información:

- Fotografías de partículas: individuales o en grupo.
- Análisis de composición elemental, en forma impresa.

Cada una de las fotografías es digitalizada mediante un “scanner” y es tratada mediante un analizador de imágenes, con el software OPTIMAS 6.2. Ello permite obtener una serie de parámetros relacionados con la morfología y tamaño de cada partícula detectada. Estos datos individuales son transformados a distribuciones de frecuencia en la hoja de cálculo EXCEL y posteriormente representados

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

=====

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se presentan, por una parte, los resultados obtenidos en la validación de los dispositivos que configuran el sistema de muestreo y por otra, algunas de las aplicaciones del sistema en situaciones reales que sirven como ejemplo de su utilización, tanto en la caracterización de emisiones como en la validación de equipos de filtración de partículas.

5.1 VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MUESTREO.

El proceso de validación tiene dos partes, una teórica y otra experimental, para cada uno de los siguientes equipos implicados en el sistema de muestreo: divisor de flujo, ciclón, cámara de muestreo, secador y preimpactador. Desde el punto de vista teórico, se ha simulado su comportamiento en cuanto a deposición de partículas, a partir de las ecuaciones de eficacia de transporte enunciadas en el capítulo 3, para conductos de sección circular. El estudio experimental se ha llevado a cabo en los bancos de calibración, descritos anteriormente, para partículas de tamaño submicrométrico (4.5.1) y micrométrico (4.5.2).

5.1.1 Divisor de flujo.

El divisor de flujo (4.1.2) tiene la misión de dividir la muestra inicial en dos, tres o cuatro flujos secundarios hacia los diferentes equipos de medida. Todo el aerosol de muestreo pasará por él, y el caudal estará comprendido entre 11 y 30 l/min, por ser los caudales mínimo y máximo que permite el equipo de succión en el sistema de control automático empleado, siendo el más habitual de 14 l/min, lo que implica que, por cada una de las cuatro ramas del divisor circulará un caudal de: $1/4$, $1/3$, $1/2$ ó $1/1$ del caudal principal, según se utilicen simultáneamente 4, 3, 2 o 1 equipos de medida, de modo que estará comprendido entre 2,75 y 30 l/min.

Teniendo en cuenta las dimensiones del divisor de flujo, se realizaron unos cálculos previos de la eficacia de transporte basándose en las ecuaciones enunciadas en el capítulo de fundamentos teóricos. La eficacia en cada una de las cuatro ramas simétricas del divisor se determinó a partir de las eficacias parciales en las siguientes zonas: tubo de $3/8$ " de 5 cm (entrada del divisor), estrechamiento de $3/8$ " a $1/4$ " de 1 cm de longitud (paso del tubo de entrada a las cuatro ramas), codo de $1/4$ " con un radio de curvatura de

1,75 cm y una longitud de 0,92 cm y tubo de 1/4" de 10 cm. Suponiendo una orientación vertical del divisor.

La siguiente figura presenta los resultados obtenidos de los cálculos para diferentes caudales entre 2,75 y 30 l/min.

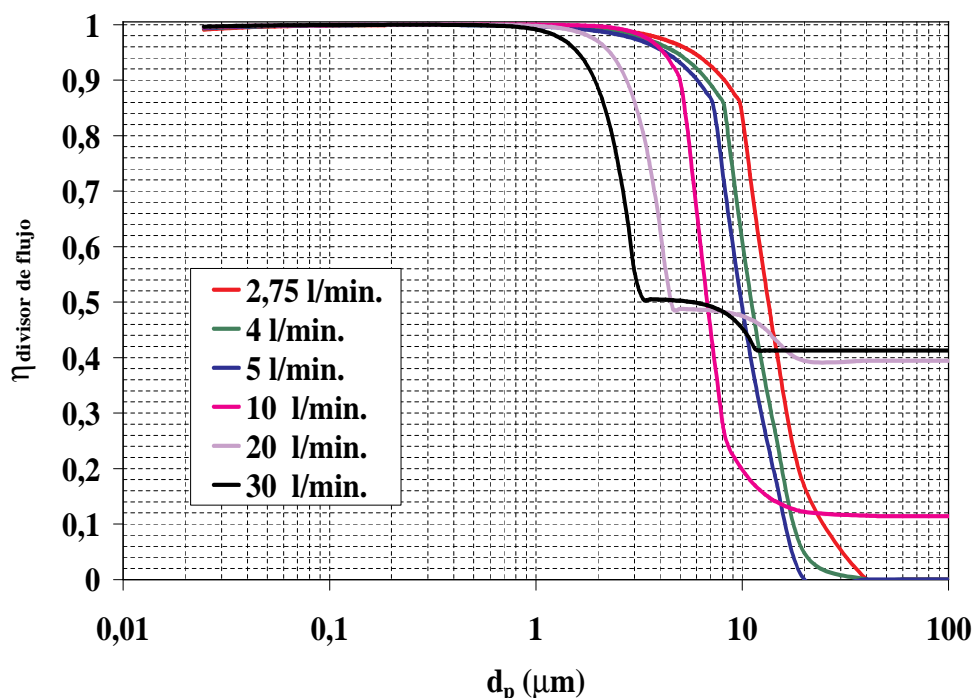


Figura 5-1. Curvas teóricas de eficacia de transporte del divisor de flujo.

Se observan dos comportamientos diferentes, dependiendo del régimen del fluido: laminar o turbulento (Figura 5-1). Para los tres caudales más bajos (régimen laminar), las curvas de eficacia siguen la misma tendencia siendo la eficacia prácticamente 1 para todas las partículas de tamaño inferior a $1 \mu m$, y a partir de este tamaño la eficacia desciende uniformemente con el diámetro de partícula hasta 0, para partículas mayores que $20 \mu m$. La eficacia para partículas submicrométricas aumenta ligeramente con el caudal y

disminuye para las micrométricas. Se observa a partir de los datos numéricos (ANEXO en CD) una menor eficacia para las partículas inferiores a $0,1 \mu\text{m}$, tanto menor cuando menor es el caudal, debido a la deposición por difusión.

Para regímenes turbulentos (10, 20 y 30 l/min), también la eficacia es prácticamente 1 para todas las partículas de tamaño inferior a $\approx 1 \mu\text{m}$. Para tamaños mayores a ese, la eficacia disminuye con el aumento de caudal pero sólo hasta un tamaño entre 3 y $20 \mu\text{m}$, porque a partir de entonces se invierte el efecto y la eficacia se hace mayor a mayores caudales.

El cálculo de la eficacia de transporte, analizando la contribución a la misma de los diferentes tramos considerados, permitió determinar que la caída de la eficacia con el tamaño era consecuencia del tramo acodado en el divisor y del estrechamiento que supone el que todo el caudal de entrada salga por una sola rama. Cuando el caudal de entrada sale simultáneamente por las cuatro ramas este último efecto se elimina, aunque no evita la pérdida de las partículas mayores.

El dispositivo se validó experimentalmente según las configuraciones de los apartados (4.5.1) y (4.5.2), con diferentes caudales: 2, 5, y 15 l/min para el sistema de generación y medida de partículas submicrométricas y 5, 10 y 15 l/min para el de partículas micrométricas. Una vez fijado un caudal, el procedimiento seguido consistió en realizar una serie de medidas, exclusivamente del aerosol generado y otra serie, cuando el aerosol pasaba a través del divisor de flujo, de forma que se podía obtener la eficacia de transporte [4-11] en el divisor, comparando los resultados obtenidos para un diámetro de partículas determinado.

En la Figura 5-2, se presentan los resultados obtenidos en ambos bancos de calibración, pudiéndose distinguir los datos medidos en cada uno de ellos, que corresponden a cada equipo de medida utilizado SMPS y contador óptico.

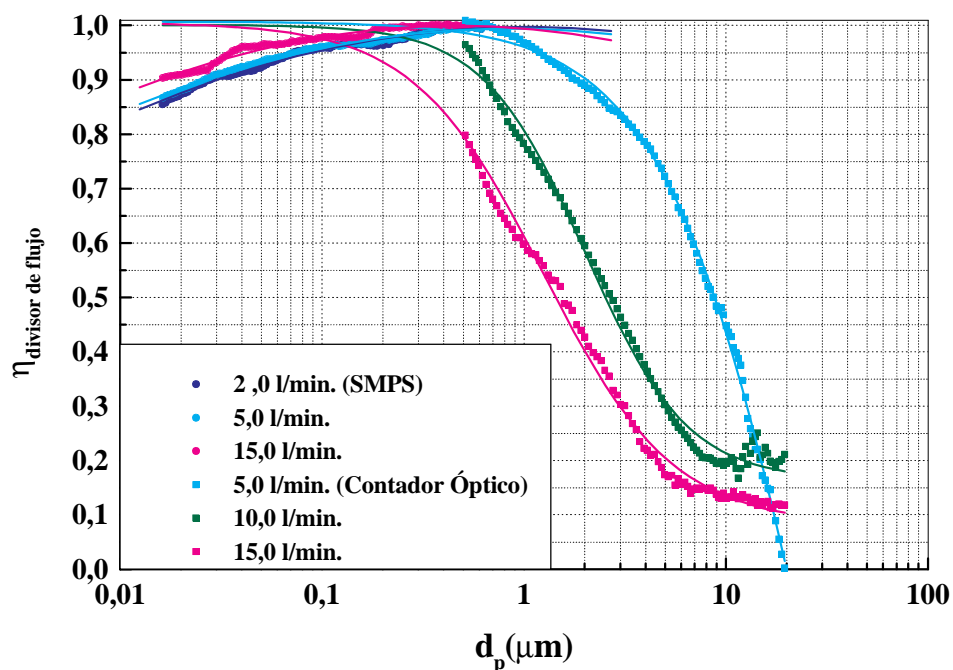


Figura 5-2. Datos experimentales de eficacia de transporte del divisor de flujo y curvas de ajuste.

La tendencia observada en las curvas experimentales es parecida a la obtenida a partir de los cálculos teóricos, aunque cuantitativamente los resultados no sean coincidentes. Existen dos diferencias fundamentales, por una parte las partículas inferiores a $0,5 \mu\text{m}$ no atraviesan el dispositivo en su totalidad y en general para cualquier diámetro la eficacia experimental es menor que la teórica. Hay que hacer una consideración, que la validación experimental se realizó exclusivamente midiendo el efecto del divisor cuando el flujo salía por una sola rama, ya que únicamente se disponía de un sistema de medida.

Los resultados obtenidos para cada caudal, Q , (ANEXO en CD) se ajustaron a una función: parabólica para partículas de diámetro menor a $0,5 \mu\text{m}$ y a una sigmoide para las de tamaño mayor:

$$\eta_{\text{divisordeflujo}} = \begin{cases} a_0 + a_1 \cdot \log(d_p) + a_2 \cdot (\log(d_p))^2 & \text{si } 0,016 < d_p (\mu\text{m}) < 0,5 \\ \left(\begin{array}{l} a_0 = 0,99643 - 1,4 \times 10^{-4} Q \\ a_1 = 0,00807 - 0,00259 Q \\ a_2 = -0,03958 - 4,25605 \times 10^{-4} Q \end{array} \right) & \\ \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{d_p}{d_{p0}} \right)^p} + A_2 & \text{si } 0,5 < d_p (\mu\text{m}) < 10,0 \\ \left(\begin{array}{l} A_1 = 1,00657 - 2,1 \times 10^{-4} Q \\ A_2 = -1,97203 + 0,15609 Q \\ d_{p0} = 36,5744 - 2,6305 Q \\ p = 1,26523 + 0,01556 Q \end{array} \right) & \end{cases} \quad [5-1]$$

5.1.2 Ciclón.

El ciclón se utiliza para evitar que las partículas superiores a la micra lleguen hasta el clasificador de movilidad eléctrica, DMA. En el ciclón, además del mecanismo inercial actúan otros de deposición y resuspensión que hacen que la curva de eficacia se separe de la idealidad (curva escalonada) y se convierta en una senoide con mas o menos inclinación dependiendo de que el diseño del ciclón, facilite o no estos mecanismos, y con el punto de inflexión coincidente con d_{p50} . En el caso ideal, las partículas con $d_p > d_{p50}$ (diámetro de corte) serían totalmente retenidas pero en los casos reales no lo son todas y sin embargo algunas partículas con $d_p < d_{p50}$ (diámetro de corte) podrán ser retenidas.

Aunque la teoría de los ciclones no está bien definida, se realizó una estimación teórica de la eficacia fraccional de retención η , basándose en la ecuación de Leith y Licht's, 1971.

$$\eta = 1 - \exp\left(-2(N_c \text{Stk}(n+1))^{(2n+2)}\right) \quad [5-2]$$

siendo:

Stk = número de Stokes = $C(Kn)\rho_p d_p v_m / 18\mu_g d$.

N_c = parámetro que es función de la geometría del ciclón y que se relaciona con el Stokes crítico según la siguiente ecuación:

$$N_c = \frac{1}{(n+1)Stk_{50}} \left(\frac{0,693}{2} \right)^{(2n+2)} \quad [5-3]$$

Stk_{50} = Stokes crítico, correspondiente al diámetro de corte $d_{p(50)}$. Se determinó a partir de los datos de calibración en los que se relaciona el diámetro de corte del ciclón con el caudal (Figura 4-10).

n = exponente de la ley de potencia para la distribución de velocidad tangencial del ciclón y se supone para el cálculo un valor de 0,54 (Overcamp y Scarleet. 1993).

En la siguiente figura, se representan las curvas de eficacia fraccional de transporte deducidas a partir del cálculo de la eficacias de retención según el modelo anterior.

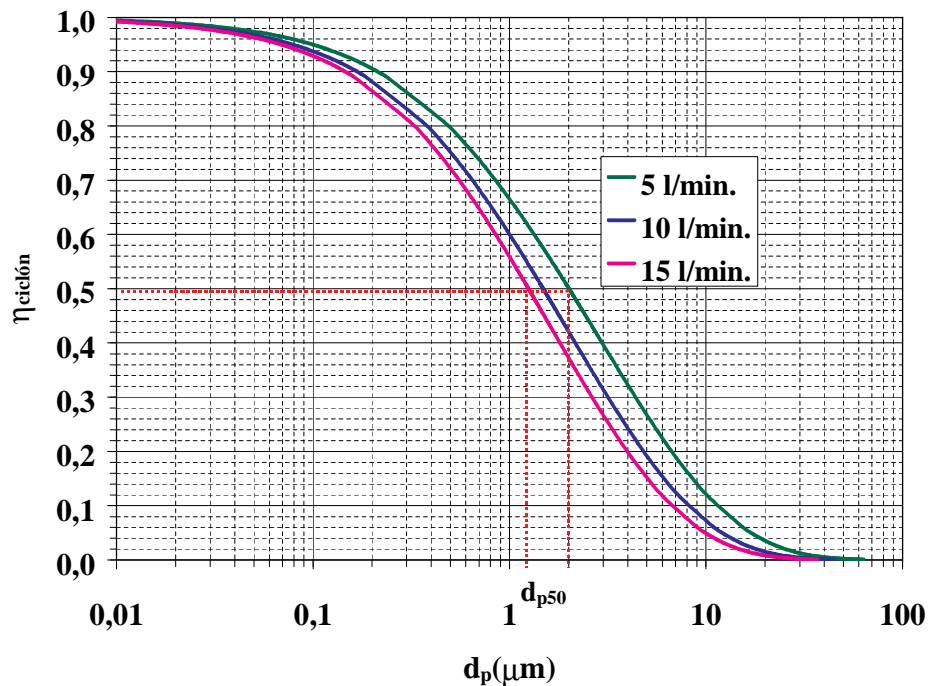


Figura 5-3. Curvas teóricas de eficacia de transporte del ciclón.

Se observa que, si bien el d_{p50} es superior a $1 \mu\text{m}$, se podrá producir una retención considerable de partículas submicrométricas, tanto mas cuando mayor sea el caudal.

El proceso de validación experimental del ciclón se llevó a cabo para partículas submicrométricas y micrométricas. Los caudales ensayados, dentro del intervalo de caudales de utilización del equipo (2,75 y 30 l/min), estuvieron limitados a los de funcionamiento de los dos bancos de calibración. Para las partículas submicrométricas 2, 8, 5 y 10 l/min y para las micrométricas 5, 10 y 15 l/min.

En la Figura 5-4, se representan las curvas de eficacia de transporte del ciclón frente al diámetro de partícula, para diferentes caudales.

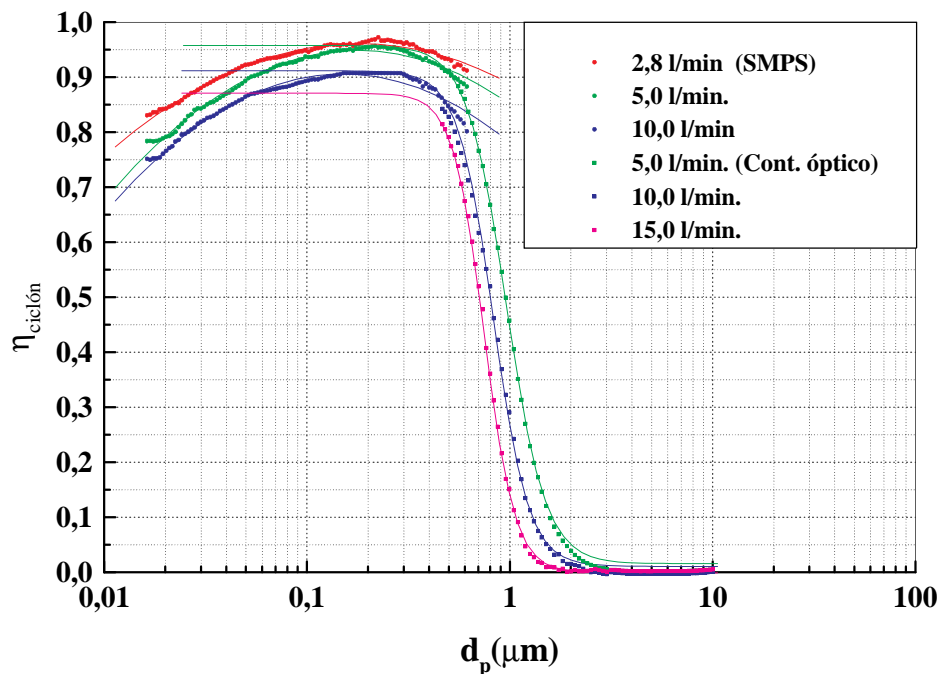


Figura 5-4. Datos experimentales de eficacia de transporte del ciclón y curvas de ajuste.

Las curvas son similares a las obtenidas con la ecuación de Leith y Licht's; aunque las experimentales presentan una mayor inclinación, es decir, se aproximan más a la de un modelo ideal.

Se diferencian dos series de puntos correspondientes a los resultados obtenidos con el SMPS ($0,01 \leq d_p(\mu\text{m}) \leq 0,6$) y con el Contador Óptico ($0,3 \leq d_p(\mu\text{m}) \leq 10$), respectivamente. Para la primera serie, la eficacia aumenta al disminuir el caudal y este incremento es similar para cualquier diámetro de partícula, dibujando curvas casi paralelas. Para un caudal determinado, el aumento de tamaño incrementa la eficacia hasta un máximo aproximadamente en $0,2 \mu\text{m}$. La eficacia obtenida desde los datos del contador óptico también disminuye con el aumento del caudal, con una curva semejante para cualquiera de ellos. Para todos los caudales, la eficacia disminuye con el incremento del tamaño de partícula hasta hacerse prácticamente nula para partículas de tamaño superior a las $2 \mu\text{m}$.

Los datos obtenidos para cada caudal (ANEXO en CD) se ajustan a la siguiente función:

$$\eta_{\text{ciclón}} = \begin{cases} a_0 + a_1 \cdot \log(d_p) + a_2 \cdot (\log(d_p))^2 & \text{si } 0,016 < d_p(\mu\text{m}) < 0,2 \\ \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{d_p}{d_{p0}}\right)^p} + A_2 & \text{si } 0,2 < d_p(\mu\text{m}) < 10,0 \end{cases} \quad [5-4]$$

$$\begin{cases} a_0 = 0,92691 - 0,01468 Q \\ a_1 = -0,17087 - 0,01383 Q \\ a_2 = -0,12464 - 0,00643 Q \\ A_1 = 1,00003 - 0,00868 Q \\ A_2 = 0,02492 - 0,00166 Q \\ d_{p0} = 1,05966 - 0,02134 Q \\ p = 3,8238 - 0,1194 Q \end{cases}$$

5.1.3 Cámara de muestreo.

La cámara de muestreo es un dispositivo utilizado para tomar una submuestra representativa de la muestra principal que circula por una de las líneas de muestreo. Se trata de extraer un caudal determinado hasta el SMPS, ya que su caudal de funcionamiento es habitualmente inferior a los de muestreo y minimizar las pérdidas en la extracción.

Se determinó la eficacia de transporte para diferentes caudales, a partir de las ecuaciones de deposición, (capítulo.3), considerando el tramo de cámara previo al submuestreo. Por tanto, se suponía una tubería de sección circular de 250 mm de longitud, que es la distancia desde la entrada de la cámara a la boquilla donde se produce el submuestreo, con un diámetro interior de 38 mm. Los resultados se representan en la siguiente figura:

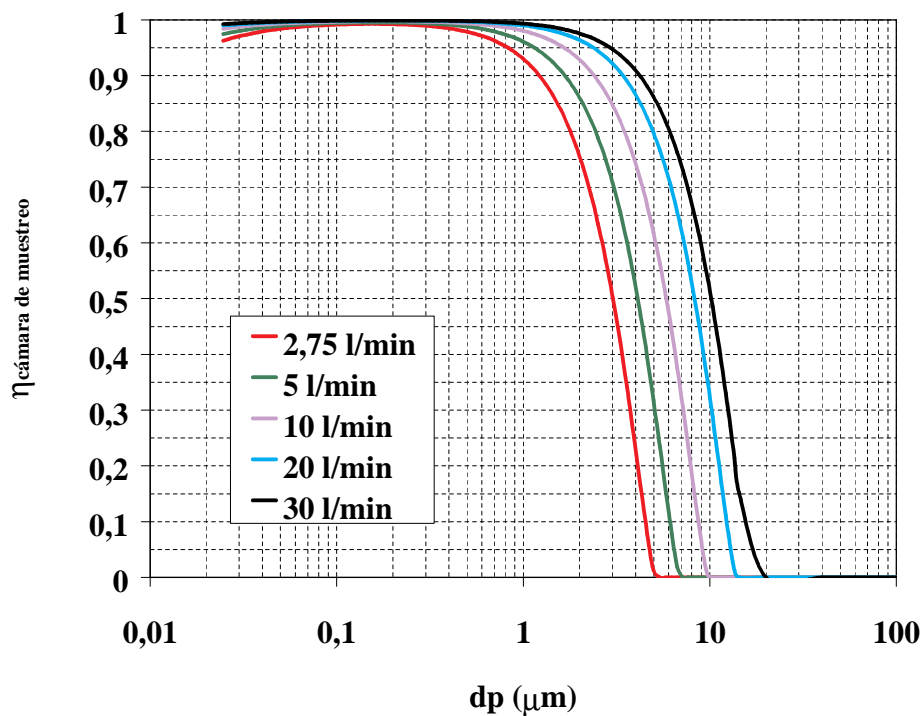


Figura 5-5. Curvas teóricas de eficacia de transporte de la cámara de muestreo.

Se aprecia que las curvas presentan un máximo de eficacia que coincide con 0,15 μm para todos los caudales. La menor eficacia correspondiente a las partículas más pequeñas que este diámetro es debida a la deposición por difusión y la de las mayores a la sedimentación gravitacional.

Debido a que el tiempo de residencia de las partículas en la cámara antes del submuestreo puede ser de varios segundos, dependiendo de la trayectoria de las partículas en su interior, la coagulación térmica (por difusión Browniana) puede afectar a la eficacia de transporte al cambiar la distribución en tamaño de las mismas.

La tasa de coagulación térmica, referida a una concentración en número de partículas, N , obedece a una cinética de segundo orden (proporcional a N^2), si se supone que en cada colisión las partículas permanecen adheridas, (Hinds, 1982):

$$-\frac{dN}{dt} = KN^2 \quad [5-5]$$

K es el coeficiente de coagulación.

Después de un tiempo de residencia t , en un recinto determinado, el efecto neto de la coagulación para partículas polidispersas estaría determinado por:

$$\int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N^2} = \int_0^t -K dt \Rightarrow N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 K t} \quad [5-6]$$

$$K = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k K_{ij} f_i f_j \quad \text{y} \quad K_{i,j} = \pi (d_{pi} + d_{pj}) (D_i + D_j)$$

siendo K_{ij} el coeficiente de coagulación entre dos partículas de diferente tamaño d_{pi} y d_{pj} ; f_i y f_j las fracciones numéricas correspondientes respecto al número total de partículas y D_i y D_j los coeficientes de difusión de las partículas de tamaño d_{pi} y d_{pj} .

La coagulación supone una reducción del número de partículas y un aumento de su tamaño medio. Suponiendo que no existen pérdidas y que se conserva la masa, la concentración másica también se conserva, c_m , se deduce la siguiente relación entre el tamaño inicial d_{p0} y el tamaño después de un tiempo t , $d_p(t)$:

$$c_m = N_o \frac{\pi}{6} \rho_p d_{p0}^3 = N(t) \frac{\pi}{6} \rho_p (d(t))^3 \Rightarrow \frac{d_p(t)}{d_{p0}} = \left[\frac{N_o}{N(t)} \right]^{1/3} \quad [5-7]$$

A partir de este modelo, se ha calculado el efecto de coagulación para diferentes tiempos de residencia a 20 °C y 1 atm, considerando una distribución inicial de aerosoles característica de los dos sistemas de generación empleados (Figura 5-6).

La distribución inicial de partículas es de tipo bimodal con modas centradas en 0,1 μm y 0,9 μm respectivamente. Después de 10 s de residencia, la concentración de partículas submicrométricas se reduciría en casi la mitad, mientras que la de partículas micrométricas no cambiaría más del 1 %. A los 60 s, las partículas submicrométricas disminuirían por debajo del 20 % de la concentración inicial y las micrométricas, un 5 %, desplazándose la moda de la distribución hasta 1 μm . En la cámara de muestreo, se espera que la mayoría de las partículas, permanezcan en su interior de 0,5 a 5 s para los caudales de funcionamiento. Por tanto, la coagulación tendrá un efecto insignificante sobre la eficacia de transporte para las partículas mayores a 0,3 μm , pero puede ser importante para las menores a este tamaño, especialmente si se producen distorsiones del flujo de corriente en el submuestreo, porque podrían formarse turbulencias que retendrían las partículas en la cámara.

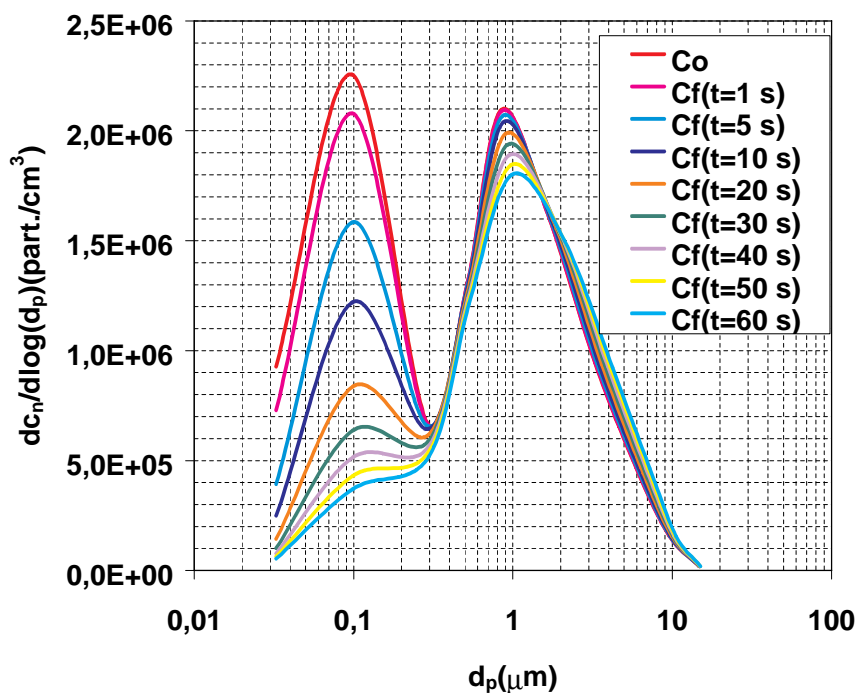


Figura 5-6. Efecto de la coagulación de partículas a diferentes tiempos de residencia sobre la distribución de tamaño.

La cámara de muestreo se validó experimentalmente según la configuración del apartado (4.5.1) variando el caudal desde 2,75 l/min hasta 5 l/min ya que por encima de éste no se detectaban cambios apreciables. El procedimiento seguido consistía en realizar una serie de medidas mediante el SMPS, del aerosol de ensayo y otra, utilizando la cámara de muestreo, ambas a un mismo caudal. Aunque la utilización de la cámara en el sistema de muestreo y medida se limita a partículas submicrométricas; también se validó con partículas micrométricas generadas según la configuración definida en el apartado (4.5.2), para dos caudales 5 y 10 l/min. Los resultados de ambas mediciones se representan en la Figura 5-7.

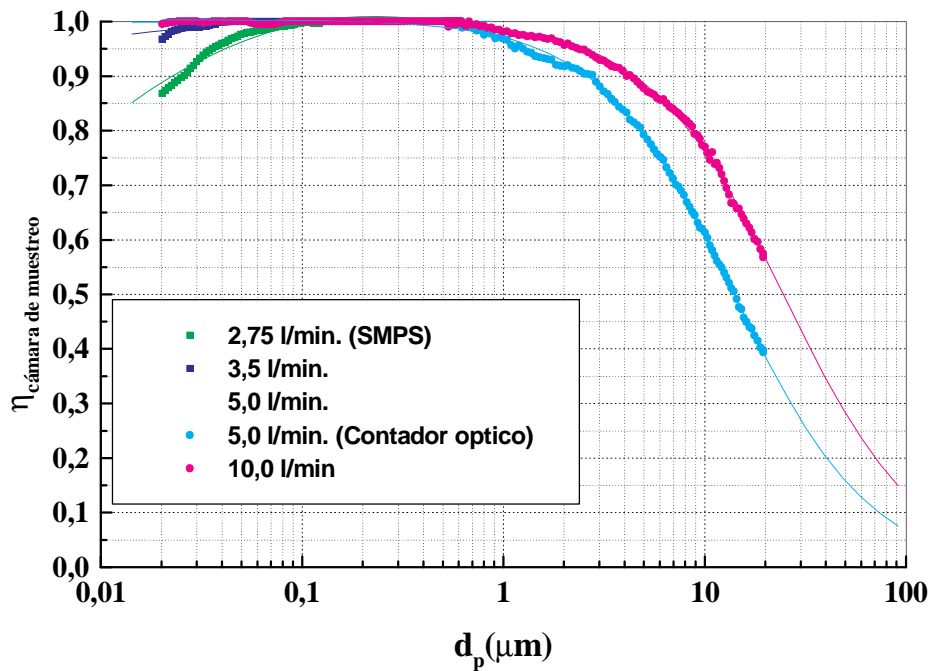


Figura 5-7. Datos experimentales de eficacia de transporte de la cámara de muestreo y curvas de ajuste.

La tendencia observada en las curvas experimentales es similar a la de las curvas teóricas de deposición. Los resultados indican una pérdida de eficacia mayor que la calculada (Figura 5-5) para las partículas de tamaño inferior a $0,15 \mu\text{m}$, tanto mayor cuando menor es el caudal y, sin embargo, una mayor eficacia que la calculada, para las partículas mayores que $0,15 \mu\text{m}$. Aparte de la pérdida de partículas de menor tamaño, debida a la deposición difusional, hay una pérdida debida a la coagulación de partículas para formar otras de mayor tamaño. Lo que se traduce en una aparente mayor eficacia para las partículas mayores.

De la misma forma que en casos anteriores, los datos (ANEXO en CD) se ajustan a dos funciones, parabólica para las partículas menores y sigmoideal para las mayores.

$$\eta_{\text{cámara de muestreo}} = \begin{cases} a_0 + a_1 \cdot \log(d_p) + a_2 \cdot (\log(d_p))^2 & \text{si } 0,016 < d_p (\mu\text{m}) < 0,2 \\ \left(\begin{array}{l} a_0 = 0,92794 + 0,01525Q \\ a_1 = -0,27588 + 0,05836Q \\ a_2 = -0,20927 + 0,04421Q \\ (a_0 = 1; a_1 = 0; a_2 = 0) \end{array} \right) & \begin{array}{l} \text{para } 2,75 < Q (\text{l/min}) \leq 5 \\ \text{para } Q (\text{l/min}) > 5 \end{array} \\ \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{d_p}{d_{p0}} \right)^p} + A_2 & \text{si } 0,2 < d_p (\mu\text{m}) < 10,0 \end{cases} \quad [5-8]$$

$$\left(\begin{array}{l} A_1 = 1,0057 - 4,8 \times 10^4 Q \\ A_2 = -0,0034 - 5,2258 \times 10^4 Q \\ d_{p0} = 3,285 + 2,1656Q \\ p = 1,2859 - 2 \times 10^{-5} Q \end{array} \right)$$

Como el ciclón de corte, previo a la cámara de muestreo, tiene un mejor comportamiento cuando mayor es el caudal, se deberá valorar en cada caso que es lo que interesa, aunque de forma general y para evitar las mayores pérdidas será conveniente que en esta rama de muestreo los caudales estén comprendidos entre 2,75 y 10 l/min y la velocidad de los gases en el interior de la cámara esté comprendida entre 4,0 y 14,7 cm/s. En estas condiciones, el tiempo de residencia en la cámara, antes del submuestreo, será para casi todas las partículas < 5 s (si se evita la distorsión de la corriente realizando un muestreo isocinético). En la Figura 5-8, se representa la eficacia de transporte considerando el efecto de la aglomeración en la cámara determinado a partir de las ecuaciones [5-6] y [5-7], para los tiempos de residencia esperados.

El comportamiento deducido teóricamente, considerando la aglomeración es similar al observado experimentalmente, aunque la eficacia deducida es apreciablemente menor que la experimental, posiblemente porque en el modelo teórico utilizado se sobrestima el proceso de aglomeración al considerar todas las colisiones efectivas.

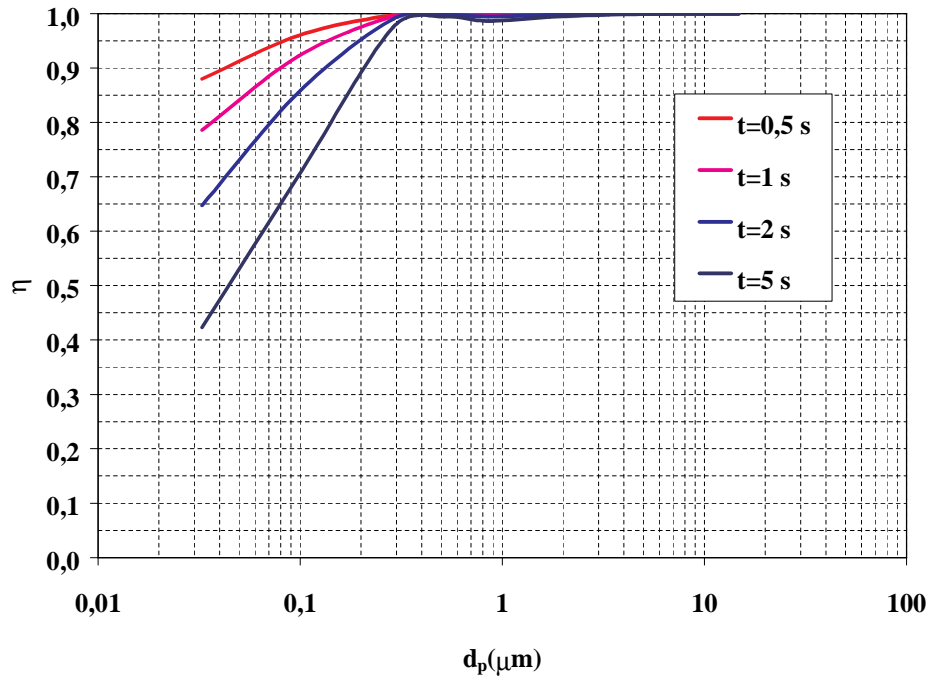


Figura 5-8. Efecto de la coagulación de partículas en la eficacia de transporte en la cámara de muestreo, para diferentes tiempos de residencia, previo al submuestreo.

Como el caudal de funcionamiento del SMPS está comprendido entre 0,3 y 2 l/min, y la velocidad en el interior de la cámara debe ser 4,0 – 14,7 cm/s, el tamaño idóneo de boquilla para el muestreo hacia el SMPS deberá tener un diámetro entre 5/16" y 1" (Figura 4-12). La boquilla con más amplio margen de utilización es la de 1/2", ya que el caudal óptimo de funcionamiento del SMPS es de 0,3 l/min y con esta boquilla se obtendría un total isocinetismo, si el caudal en la cámara es de 2,75 l/min (0,04 cm/s) y si el caudal en la cámara aumenta hasta 5 l/min (0,07 cm/s), el isocinetismo se mantendrá si el caudal de submuestreo aumenta hasta 0,56 l/min ó si es 10 l/min (0,14 m/s), también se mantendría incrementando el caudal de entrada al SMPS hasta 1,2 l/min.

5.1.4 Secador.

Este dispositivo es utilizado para eliminar la humedad de la submuestra que se conduce hacia el SMPS, de forma que se eviten las fluctuaciones que produciría el vapor de agua en los medidores de caudal del DMA, además de evitar las condensaciones en todo el sistema. El caudal a tratar será el predeterminado por el clasificador electrostático, DMA y el contador de núcleos de condensación, CNC y estará comprendido entre 0,3 y 2 l/min, siendo la velocidad en el secador de 0,9 a 5,9 m/s que corresponde a un Reynolds de 15,8 a 105,6, y régimen laminar. El caudal óptimo determinado por el equipo de conteo CNC es de 0,3 l/min.

Para determinar el efecto cuantitativo del secado, se validó experimentalmente a partir de los aerosoles generados según la configuración del apartado (4.5.1), sin utilizar el secador del sistema de generación, con lo que se obtenían aerosoles húmedos, y midiendo antes y después del secador mediante filtros previamente secados y tarados. Por cada uno de los filtros, se hacía pasar el aerosol durante 3-4 h y se pesaban inmediatamente después de ser retirados, después se secaban en la estufa durante 24 h a 100 °C y se volvían a pesar. Se realizaron pruebas para dos disoluciones de NiCl₂ de concentración 0,1 y 0,5%, dentro del atomizador de Collison y tres caudales que corresponden al mínimo (0,3 l/min) y máximo (2 l/min) utilizados en el SMPS y un tercer caudal intermedio (1,0 l/min). En la siguiente tabla, se presenta el nivel de secado para los casos ensayados.

Tabla 5-1. Nivel de secado en el secador de gel de sílice para diferentes caudales.

% de H ₂ O eliminada	Caudal (l/min)		
	0,3	1,0	2,0
(disolución en el Collison del 0,1 %)	99,17	99,11	99,03
(disolución en el Collison del 0,5 %)	99,77	99,39	99,20

El porcentaje de agua eliminada en el secador de gel de sílice era ligeramente superior al previsto teóricamente (Tabla 4-1) y siempre mayor al 99 % para cualquiera de los caudales de utilización.

Se realizaron unos cálculos previos de la eficacia de transporte, para caudales entre 0,3 y 2 l/min aplicando las ecuaciones de deposición, enunciadas en el apartado de fundamentos teóricos. Los resultados se representan en la siguiente figura.

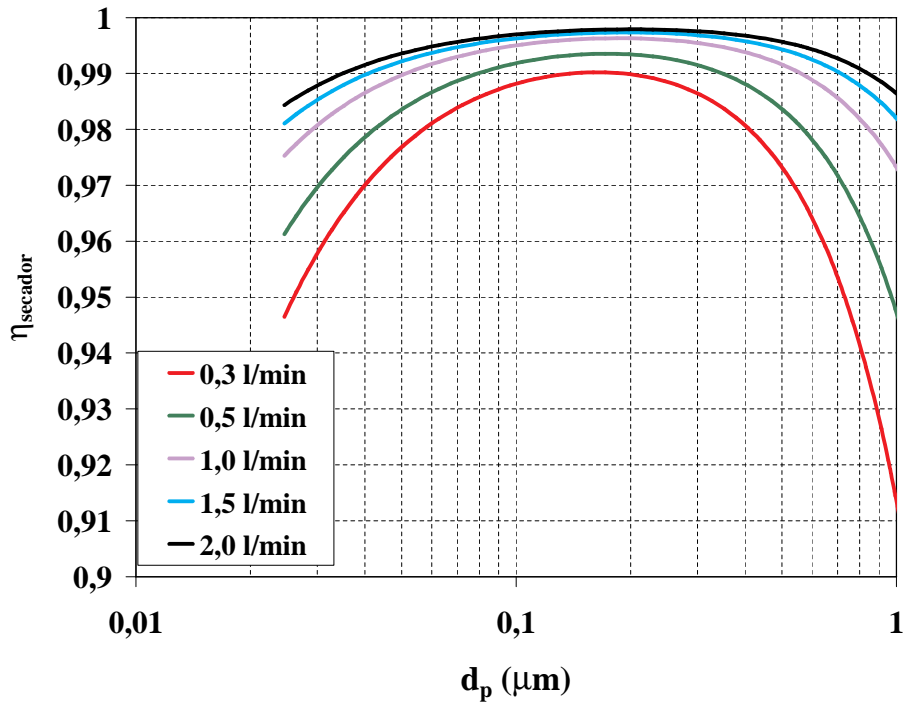


Figura 5-9. Curvas teóricas de eficacia de transporte del secador de gel de sílice.

Se observa que la eficacia de transporte aumenta con el caudal y las curvas presentan un máximo de eficacia que coincide con $0,15 \mu\text{m}$ para todos los caudales. La menor eficacia de las partículas más pequeñas se debe a la deposición por difusión y la de las mayores a la deposición gravitacional.

Se validó experimentalmente, según la configuración del apartado (4.5.1). Con diferentes caudales: 0,3, 1,5 y 2 l/min. El procedimiento seguido consistía en realizar una serie de medidas con el secador y otra, sin secador, a un mismo caudal, con aerosoles secados previamente. De esta forma, se podía obtener la eficacia fraccional de transporte en el secador, $\eta = C_f(\text{aerosol seco}) / C_o(\text{aerosol seco})$, eliminando el efecto de secado. En la siguiente figura, se representan los resultados obtenidos para distintos caudales.

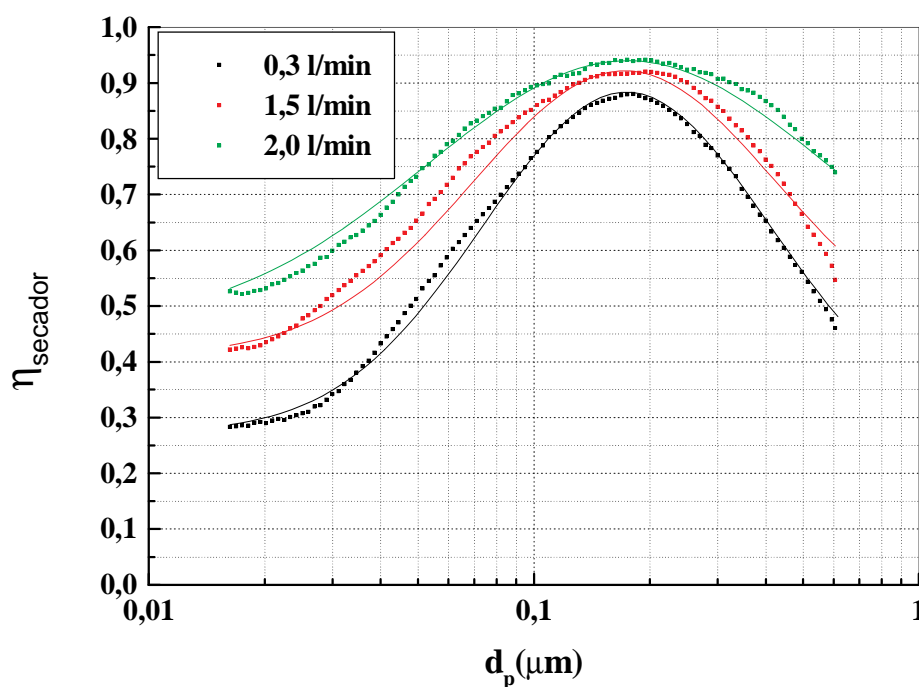


Figura 5-10. Datos experimentales de eficacia de transporte del secador, para aerosoles secos, y curvas de ajuste.

Las curvas experimentales coinciden con las curvas teóricas en la existencia de un máximo de eficacia en el intervalo de tamaño 0,1-0,2 μm , pero las eficacias de transporte son mucho menores que las calculadas ya que el efecto de coagulación de partículas probablemente resulte más determinante que la deposición.

Con el fin de comprobar el efecto de la humedad en la eficacia de transporte, se validó nuevamente el funcionamiento del secador con aerosoles húmedos, según la configuración (4.5.1).

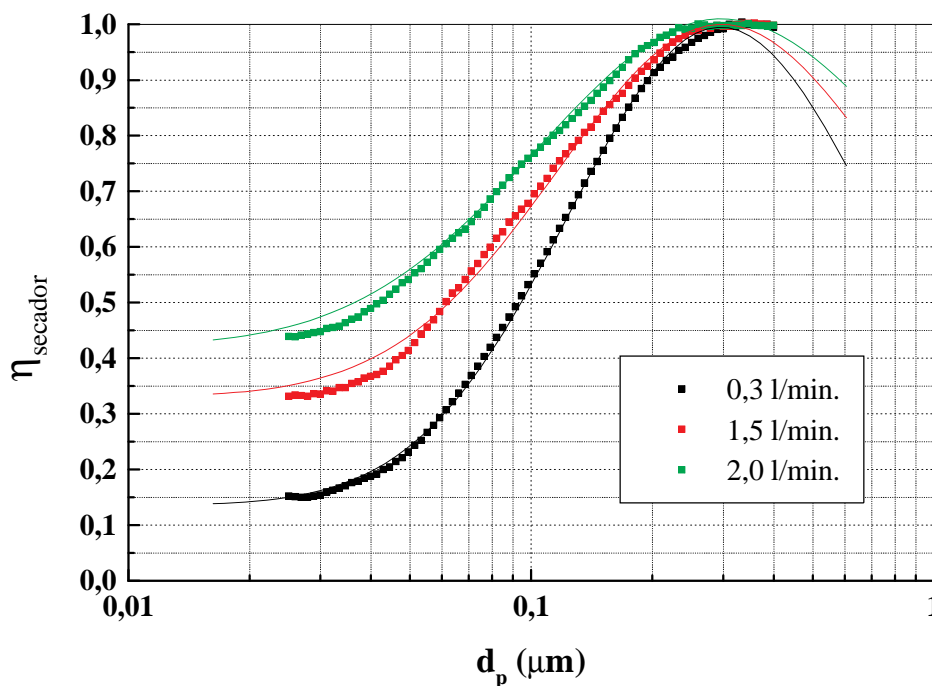


Figura 5-11. Datos experimentales de eficacia de transporte del secador, para aerosoles húmedos, y curvas de ajuste.

Los resultados obtenidos respecto a la eficacia fraccional de transporte expresada ahora como: $\eta = c_{f(\text{aerosol seco})} / c_{o(\text{aerosol húmedo})}$, mostraron el mismo efecto cualitativo que con aerosoles iniciales secos (figura 5-10), pero el máximo de eficacia era mayor cuando el aerosol inicial era húmedo y también se correspondía a un tamaño mayor de partícula (0,3 μm). Esto podría explicarse porque la humedad favorece el fenómeno de aglomeración, aumentando el tamaño de aerosoles a la salida del secador y consecuentemente

disminuyendo la concentración de las partículas menores en beneficio de las de mayor tamaño.

Los datos de las figuras 5-10 y 5-11 (ANEXO en CD) se ajustan a curvas lognormal.

$$\eta_{\text{secador}} = \eta_{\text{secador}(o)} + A e^{-\frac{\text{Ln}^2\left(\frac{d_p}{d_{pc}}\right)}{2 w^2}} \quad [5-9]$$

(figura 5-10). aerosoles secos

$$\left(\begin{array}{l} \eta_{\text{secador}(o)} = 0,24027 + 0,1131 Q \\ d_{pc} = 0,17345 - 1,74672 \times 10^{-4} Q \\ w = 0,77345 + 0,17096 Q \\ A = 0,63317 - 0,08013 Q \end{array} \right)$$

(figura 5-11). aerosoles húmedos

$$\left(\begin{array}{l} \eta_{\text{secador}(o)} = 0,08384 + 0,1667 Q \\ d_{pc} = 0,29473 + 0,00127 Q \\ w = 0,83026 + 0,09716 Q \\ A = 0,90773 - 0,15873 Q \end{array} \right)$$

La deposición de partículas en cuanto a masa se cuantificó siguiendo el mismo procedimiento que el utilizado para determinar el porcentaje de secado en masa, pero con aerosoles secados previamente, tal como se realizó cuando se efectuaron medidas con el SMPS. De esta forma, se tenía la certeza de que la eficacia de transporte era disminuida exclusivamente por las pérdidas por difusión: se ensayó exclusivamente con la disolución de 0,5 % de NiCl₂, porque de esta forma era mayor el peso retenido en los filtros y se disminuía el error de pesada.

En la siguiente tabla, se presenta la eficacia de transporte en función de la masa y en función del número de partículas, determinadas con el SMPS.

Tabla 5-2. Eficacia de transporte en el secador de gel de sílice para diferentes caudales.

	Caudal (l/min)		
(Collison: NiCl ₂ al 0,5 %)	0,3	1,0	2,0
Eficacia en función de la masa	0,86	0,90	0,98
Eficacia en función del número	0,61	0,77	0,80

El secador tiene altos rendimientos de secado de las partículas en el intervalo de tamaño estudiado, superiores al 99 % pero también tiene elevadas pérdidas por deposición y principalmente por aglomeración. Esto implica que su uso debe restringirse a situaciones en las que la humedad del aerosol impida o dificulte la medida, debiéndose valorarse las pérdidas en cada caso concreto.

5.1.5 Preimpactador.

El preimpactador tiene una misión similar al ciclón de corte, evitar que las partículas superiores a la micra lleguen hasta el clasificador de movilidad eléctrica. Aunque el ciclón elimina casi todas las partículas superiores a la micra todavía existirán partículas micrométricas después de que el aerosol atravesase el ciclón, tanto mas cuanto menor sea el caudal (Figura 5-4).

Por ello, se ha validado experimentalmente con la configuración (4.5.1) el preimpactador con una de las toberas utilizadas ($d_t = 0,0508 \mu\text{m}$) dentro de ese intervalo de caudales (Figura 5-12).

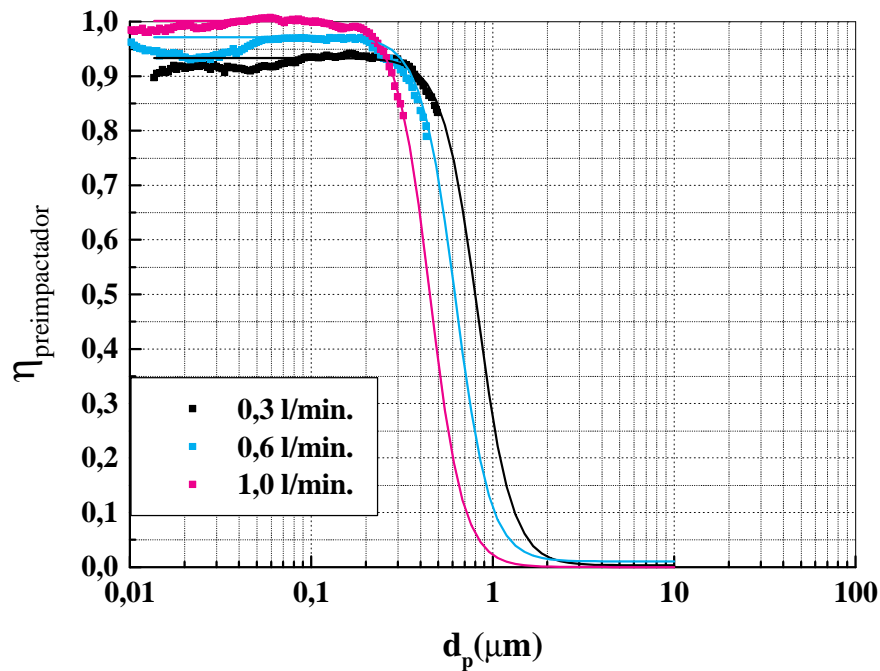


Figura 5-12. Datos experimentales de eficacia de transporte del preimpactador y curvas de ajuste ($d_t = 0,0508$ mm).

Se puede observar que para caudales más altos la eficacia de las partículas más pequeñas aumenta ya que disminuyen las pérdidas por difusión y la de las mayores disminuye ya que se incrementa la separación por impactación.

Los datos (ANEXO en CD) se ajustan a sigmoides.

$$\eta_{\text{secador}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{A_1}{1 + \left(\frac{d_p}{d_{p0}} \right)^p} \\ \left(\begin{array}{l} A_1 = 0,90416 + 0,10009Q \\ d_{p0} = 0,96757 - 0,52899Q \\ p = 4,45536 - 0,25343Q \end{array} \right) \end{array} \right. \quad [5-10]$$

5.1.6 Eficacia total en el sistema de muestreo y medida.

A partir de las funciones obtenidas experimentalmente para cada uno de los dispositivos analizados: divisor de flujo, ciclón, cámara de muestreo, secador y preimpactador, se ha determinado el efecto secuencial sobre un aerosol típico con una distribución de tamaño bimodal. En la siguiente figura, se representa la concentración en número a la salida de los diferentes dispositivos cuando el aerosol de entrada proviene del equipo que le precede. Se considera un caudal de muestreo de 10 l/min y un caudal de submuestreo hacia el SMPS de 0,3 l/min.

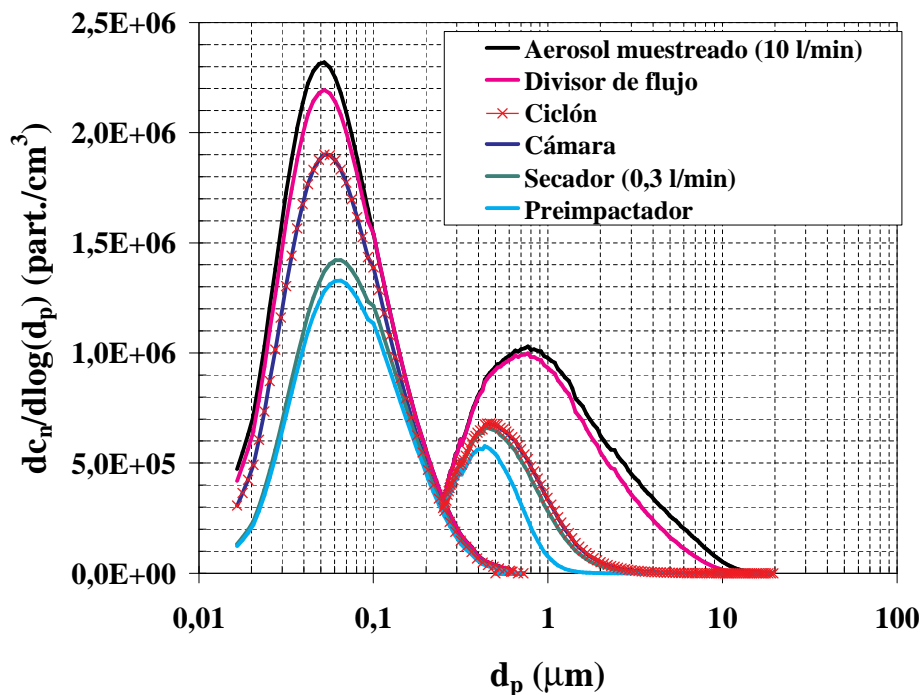


Figura 5-13.Efecto de los diferentes equipos considerados sobre la concentración numérica y distribución de tamaño de un aerosol típico.

Se observa que la pérdida de partículas debida al divisor de flujo no es muy significativa; aunque es necesario considerarla. El ciclón en cambio, no sólo cumple el objetivo para el

que se utiliza, el de eliminar todas las partículas mayores a 1 micra, sino que, además, actúa de forma no deseada separando partículas submicrométricas. Hay que señalar que, si bien el efecto es más importante para la moda correspondiente a tamaños mayores, desde el punto de vista del muestreo no es de considerar porque las partículas de esta moda han sido previamente medidas, con el resto de los equipos (contador óptico, impactador, filtro y dispositivo SEM). La cámara de muestreo no produce variación apreciable, ni en la concentración ni en el tamaño de partícula y de hecho, la distribución de partículas después de ella, aparentemente coincide con la de después del ciclón. El secador produce la pérdida más importante en cuanto a partículas submicrométricas, que es el tamaño para el cual se utiliza, por lo que habrá que valorarla siempre que sea utilizado. El preimpactador, a pesar de tener un efecto importante en la moda micrométrica, eliminando totalmente las partículas mayores que la micra, también separa una parte de las partículas entre 0,4 y 1 μm e incluso algunas partículas menores que 0,4 μm .

Aunque la utilización de todos los dispositivos analizados implicaría variaciones importantes en el aerosol original, éstas no lo son tanto si se tiene en cuenta la disposición de los instrumentos de medida en el sistema. Las partículas que mide el contador óptico corresponden a la muestra original ya que está situado antes que cualquiera de los dispositivos enunciados y, por tanto, la eficacia de transporte hasta el mismo será prácticamente 1. Las medidas realizadas con el impactador, el filtro y el dispositivo SEM se realizan después de que el aerosol atraviese exclusivamente el divisor de flujo, con lo que la eficacia de transporte hasta estos instrumentos es la del mismo, $\eta_{\text{divisor de flujo}}$. Sólo para las medidas con el SMPS puede resultar necesario utilizar todos los equipos anteriores. Según el sistema de acondicionamiento que se utilice, que será dependiente fundamentalmente de la humedad del aerosol y de la mayor o menor presencia de partículas mayores a 1 μm en la muestra inicial, expresada en concentración másica de partículas c_m , así será la eficacia de muestreo. Aunque la facilidad de formar

aglomerados, puede hacer cambiar la disposición inicial, las combinaciones más habituales son:

Tabla 5-3. Configuraciones habituales del sistema de acondicionamiento.

Propiedades del aerosol					
$c_m (d_p > 1 \mu\text{m})$ (g/Nm ³)	Humedad relativa HR(%)	Ciclón	Cámara de muestreo	secador	preimpactador
					X
			X		X
> 0,02		X	X		X
	> 60		X	X	X
> 0,02	> 60	X	X	X	X

En la figura 5-14, se ha representado la variación de la eficacia de transporte en función del tamaño de partícula, para diferentes configuraciones del sistema de muestreo, considerando un caudal de muestreo de 10 l/min y otro de submuestreo hacia el SMPS de 0,3 l/min.

La eficacia de transporte es superior al 95% para el impactador, filtro y dispositivo SEM para partículas submicrométricas, pero la eficacia disminuye con el tamaño para las mayores a 1 μm , hasta una eficacia del 30% para las de 10 μm y prácticamente nula para las mayores a 20 μm . Si la masa del aerosol depende de las partículas submicrométricas, la medida con estos equipos es muy real. Si depende de las partículas micrométricas es necesario corregir las medidas. Para ello, se corrige la distribución obtenida con el impactador, con la curva de eficacia correspondiente a las condiciones de operación. Posteriormente, se considera la masa total del impactador y la corregida y se aplica esa corrección a la masa real medida. Para las partículas submicrométricas, la corrección se hará dependiendo de la configuración utilizada. En el caso de menos pérdidas, las

partículas $< 0,2 \mu\text{m}$ son medidas con mas del 90% de eficacia aunque desciende hasta el 40% para el límite superior del SMPS.

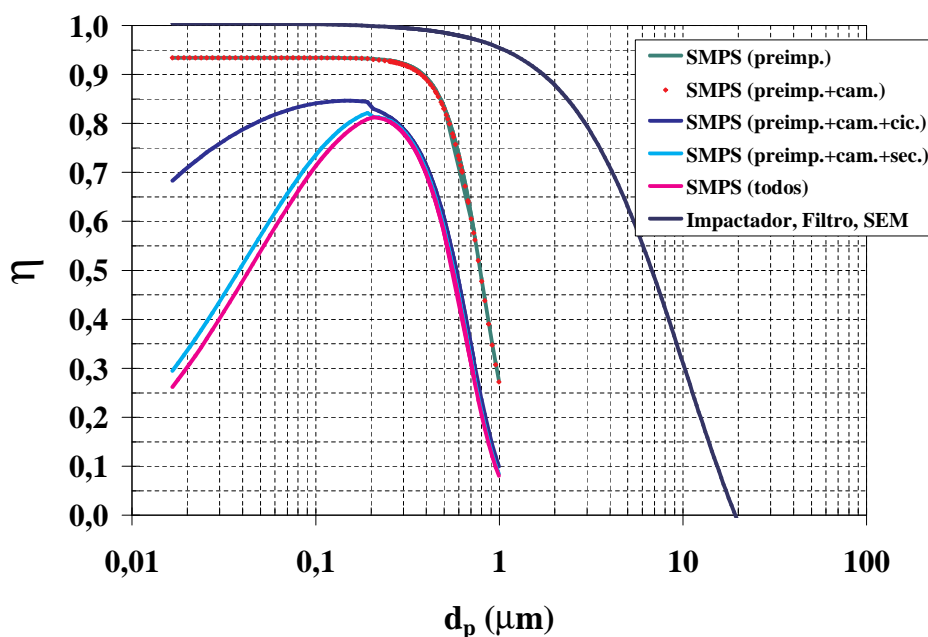


Figura 5-14. Eficacia total en función del tamaño para distintas configuraciones del sistema de muestreo. Caudal de muestreo 10 l/min y caudal al SMPS 0,3 l/min.

Hay que hacer notar, que si bien las correcciones a realizar sobre las medidas son imprescindibles cuando se pretenden resultados absolutos, fundamentales para cumplir posibles futuras normativas, no lo son tanto cuando se realizan medidas relativas en las que se comparan comportamientos de un sistema frente a un mismo aerosol, caso de la validación de sistemas de control de partículas.

5.2 APLICACIONES.

En este apartado, se muestran dos tipos de aplicaciones del sistema de muestreo y medida desarrollado: la caracterización de partículas de emisión y la validación de sistemas o equipos de separación y filtración de partículas.

Por una parte, se caracterizaron las emisiones procedentes de dos Plantas de combustión de carbón, que utilizan tecnología diferente, combustor de carbón pulverizado, CP y combustor de lecho fluido circulante, LFC. Por otra parte, las de combustión interna de gasoil en un motor–generador Diesel.

La validación de sistemas de control partículas es una de las actividades más importantes de la caracterización de aerosoles, ya que estos sistemas constituyen la última barrera a la liberación de partículas al medioambiente. En este sentido, la metodología presentada, ha sido utilizada para validar un prototipo de un precipitador electrostático o electrofiltro (ESP), como el más representativo de los sistemas convencionales de control de partículas, y un filtro acústico (FA), como un sistema innovador para el acondicionamiento previo a la separación convencional.

5.2.1 Caracterización de emisiones.

5.2.1.1 Combustión de carbón pulverizado, (CP). (Central Térmica de Compostilla, Ponferrada).

En la primera fase del proyecto PIE nº 131.095. "Desarrollo de filtros acústicos para la aglomeración de micropartículas en gases de combustión", se pretendía validar un sistema de separación de partículas formado por un aglomerador acústico, FA y un precipitador electrostático, ESP, a partir de las emisiones de la Planta piloto de combustión del

CIEMAT, utilizando carbón de una Central Térmica española. Para comprobar el grado de aproximación en el que se iba desarrollar el proyecto frente a los datos reales y obtener datos adicionales, se llevó a cabo una campaña de caracterización de partículas de emisión en la Central Térmica de Compostilla II, en Ponferrada.(León).

La Central Térmica consta de 5 grupos generadores de 141, 141, 330, 350 y 350 MW de potencia instalada. Utiliza alrededor de 4.000.000 Tm/año de carbón para una producción de energía eléctrica superior a 7.500.000 MW.h. El carbón procede del Bierzo, y está constituido por una mezcla de antracita y hulla pobres, que contiene 2 % en azufre y 32 % en cenizas. En la siguiente tabla, se presenta el análisis químico del carbón, (Armesto *et al*, 1995).

Tabla 5-4. Análisis químico del carbón de Compostilla (Ponferrada).

ANÁLISIS INMEDIATO	ANÁLISIS REFERIDO A CENIZAS
Humedad (%)1,7	SiO ₂ (%)..... 44,70
Materia volátil.....7,77	Al ₂ O ₃ (%)..... 28,80
Cenizas (%).....32,5.	Fe ₂ O ₃ (%)..... 10,11
Carbono fijo (%).....59,73	K ₂ O (%)..... 4,60
ANÁLISIS ELEMENTAL	CaO (%)..... 3,68
Carbono (%).....61,19	MgO (%)..... 2,67
Azufre (%).....2,01	Na ₂ O (%)..... 2,11
Nitrógeno (%).....0,79	TiO ₂ (%)..... 1,10
Hidrógeno (%).....1,98	Cr (ppm)..... 276
Oxígeno (%).....1,53	Cu (ppm)..... 156
C org. (%).....61,04	Ba (ppm)..... 77
S pirítico (%).....1,11	Co (ppm)..... 55
S sulf. (%).....0,1	Be (ppm)..... <10
S org. (%).....0,81	Ce (ppm)..... <10

Del análisis de los elementos mayoritarios y minoritarios en cenizas, se desprende que los compuestos más importantes cuantitativamente son óxidos de Si, Al, Fe, K, Ca, Mg, Na y Ti. El SiO₂, está presente en mas del 40 % y el Al₂O₃ en casi el 30 %.

El punto de muestreo seleccionado se situó en una de las dos chimeneas (grupos 1, 2 y 3), a una cota de 90 m desde el suelo, después de los sistemas de separación de partículas de la Central, formados por precipitadores electrostáticos, ESPs.

El sistema de muestreo y medida, utilizado en esta aplicación, era una variante disminuida de la que se ha especificado en el capítulo 4, (Figura 5-15).

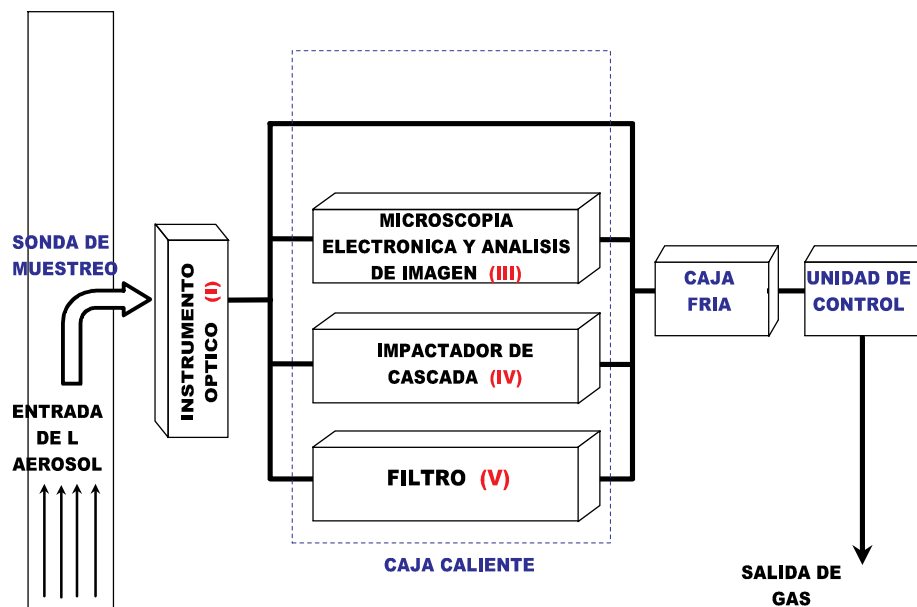


Figura 5-15. Esquema del sistema de muestreo y medida, usado en la Central Térmica de Compostilla II, Ponferrada (León).

Se optó por una posición conservadora, dejando de utilizar el SMPS (DMA+CNC). El uso de este instrumento requería unas garantías de seguridad y control de instalación radiactiva de tercer orden (por incorporar una fuente radiactiva de Kr-85, como neutralizador de carga) y el punto de muestreo no las satisfacía. Así, el equipo empleado estaba formado por: el sistema de muestreo, la instrumentación para la medida y

caracterización de partículas y los equipos auxiliares. El sistema de muestreo constaba, a su vez, de tres partes fundamentales: sonda de muestreo con lanza de muestreo, líneas de muestreo, caja caliente, caja fría y unidad de control. (Rodríguez Maroto, 1995c).

Se utilizó un instrumento óptico (I) (4.2.1.1) para la medida en tiempo real, durante el muestreo y simultáneamente un dispositivo SEM (III) (4.2.2.1), un impactador de cascada (IV) (4.2.2.2), y un portafiltros con fibra de vidrio (V) (4.2.2.3) para el análisis post-muestreo.

Se tomaron ocho muestras de depósitos en filtros, que eran analizados según la metodología descrita en (4.6.2.1). La concentración másica medida estaba comprendida en el intervalo $0.1 - 0.16 \text{ g/Nm}^3$. Simultáneamente a los muestreos, se llevaron a cabo 18 medidas con el contador óptico proporcionando un valor medio de la concentración numérica total de $4 \times 10^3 - 9,8 \times 10^4$ (partículas/ Ncm^3) (Rodríguez Maroto y Acha Hurtado, 1996a.).

Las distribución numérica (concentración en número normalizada frente al diámetro de partícula) obtenida a partir de los datos medidos con el instrumento óptico presentaba dos modas, una en el intervalo de tamaño micrométrico centrada en $\sim 1,3 \mu\text{m}$ y otra en el submicrométrico, aunque solo se observaba parcialmente por estar por debajo del límite inferior ($0,3 \mu\text{m}$) de detección del equipo óptico de medida (Figura 5-16).

Los datos obtenidos con el impactador de cascada, permitieron observar la moda superior de la distribución con un máximo correspondiente a un diámetro aerodinámico en torno a $1 \mu\text{m}$. Se pudo observar la coincidencia con los resultados de la concentración en número, referidos en el párrafo anterior.

Se observó que, aunque la concentración másica de las partículas por debajo de 0,5 μm no era significativa, según los resultados del impactador de cascada, la concentración numérica de éstas si era apreciablemente importante, según los datos del contador óptico.

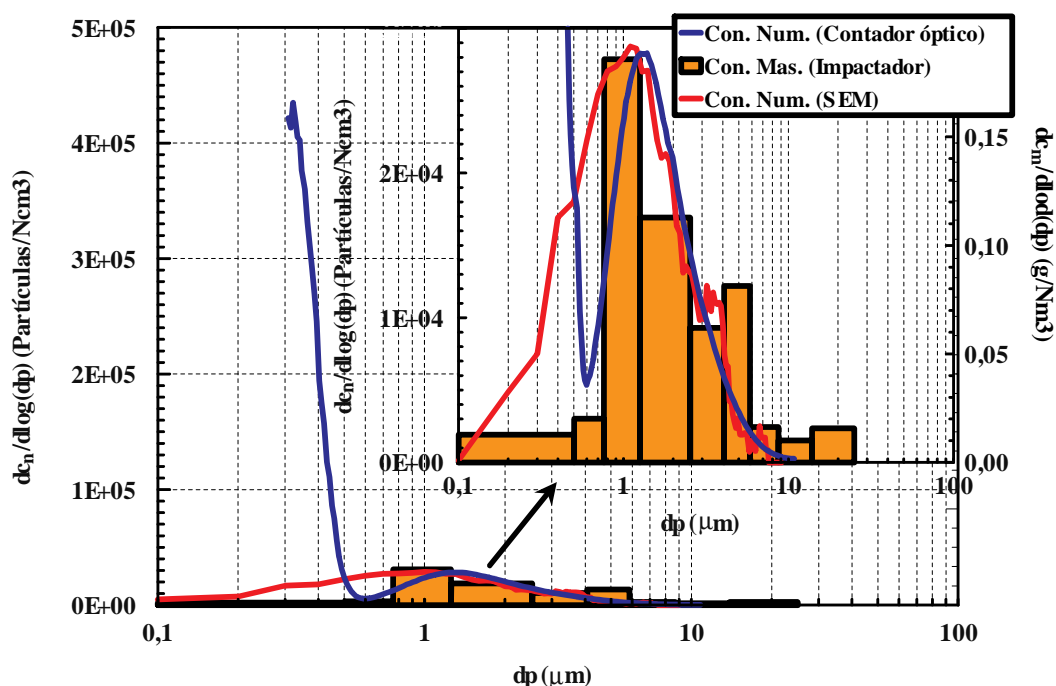


Figura 5-16. Distribución de tamaño de partícula, de las emisiones de la Central Térmica de Compostilla II, Ponferrada (León).

La microscopía electrónica (SEM) permitió, por una parte, la visualización de las partículas detectadas con los otros equipos, figura 5-17, pudiéndose apreciar partículas con forma esférica, consecuencia del proceso de formación a partir de la vaporización y condensación de compuestos inorgánicos. Por otra parte, obtener una distribución aproximada del tamaño de partícula a partir del análisis de imagen), (Figura 5-16).

La concordancia de los resultados obtenidos a partir de las medidas con diferentes instrumentos permitió la confirmación de los mismos.

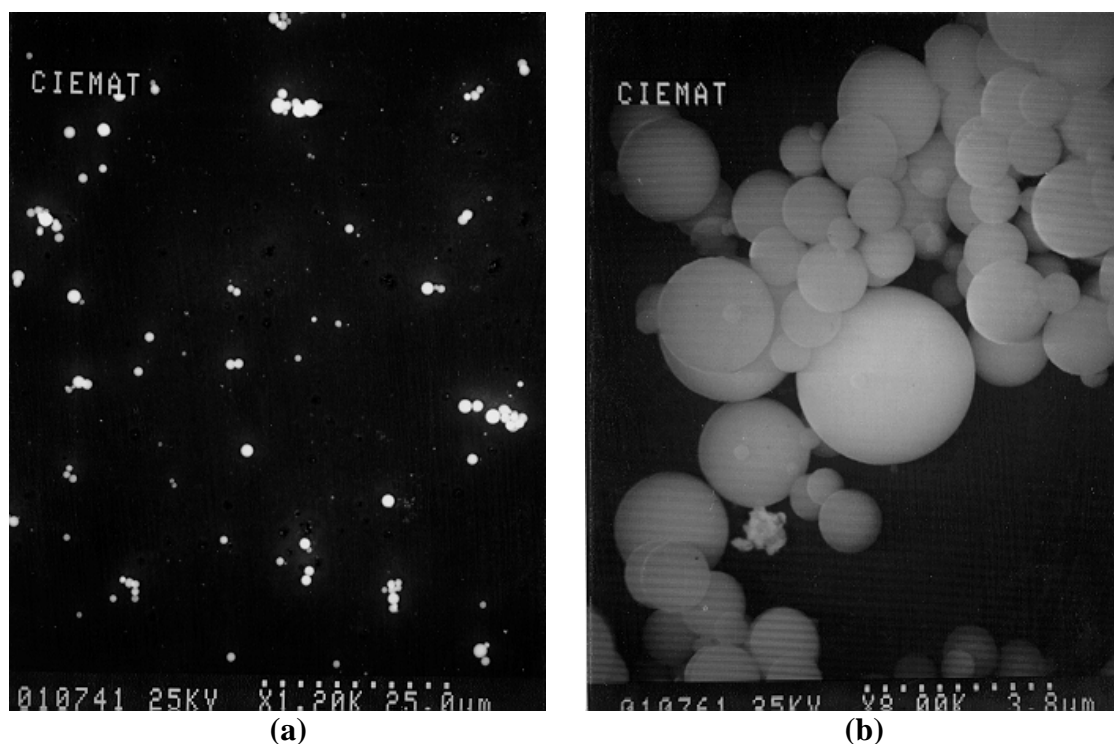


Figura 5-17. Microfotografías de partículas de emisión de combustión de carbón pulverizado, Central Térmica de Compostilla II, Ponferrada (León). a) Distribución de partículas. b) Detalle de la morfología.

La relación existente entre la distribución de tamaño en función de la masa y en función del número de partículas permite hacer una evaluación aproximada de la densidad de la partícula para un tamaño determinado. La densidad calculada a partir de los datos correspondientes a la Figura 5-16 resultó ser considerablemente inferior al valor típico para cenizas, obtenido del análisis del polvo recogido en los depósitos de los sistemas de filtración en otras centrales de carbón pulverizado, lo que hace pensar en partículas huecas (tipo cenosfera) o bien que forman aglomerados. Con el fin de conocer el grado de aglomeración, se realizó un estudio de la morfología de las partículas en función de la circularidad relativa ($c_r = (\text{Perímetro de la partícula})^2 / (\pi d_{ap})^2$) frente al tamaño (Figura 5-18).

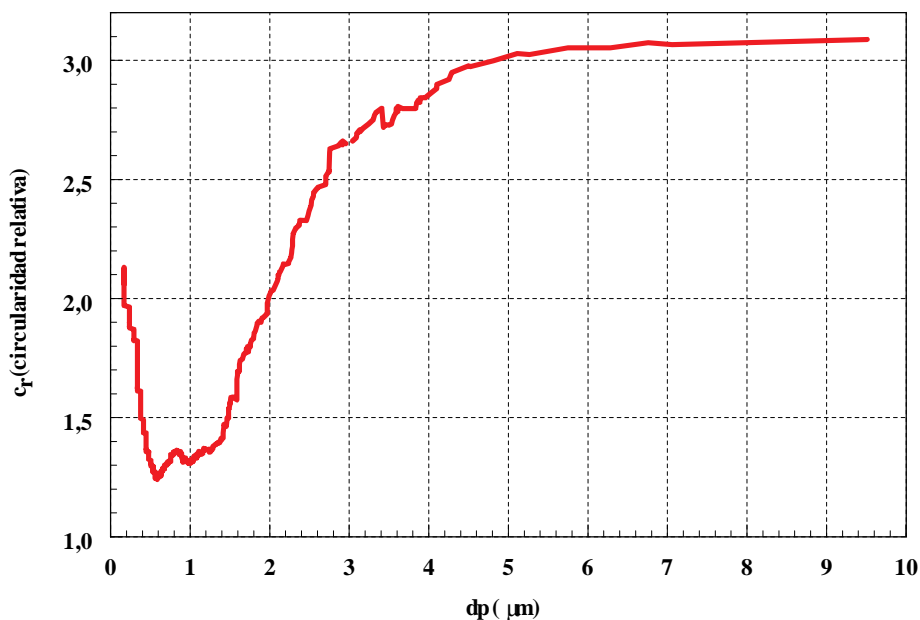


Figura 5-18. Morfología (expresada como circularidad relativa) en función del diámetro de partícula. Emisiones de combustión de carbón pulverizado, Central Térmica de Compostilla II, Ponferrada (León).

Las partículas submicrométricas tenían una circularidad cercana a la unidad. El incremento de tamaño estaba asociado al aumento de la irregularidad de las partículas, aunque estas disminuían en número, hasta alcanzar un valor prácticamente constante en torno a 3, lo que suponía partículas muy irregulares, correspondientes a aglomerados formados a partir de las partículas primarias, tal como se observa en la figura 5-17a.

El análisis elemental de las partículas aisladas o de sus aglomerados, a partir de los rayos X característicos, EPXMA (Electron Probe X-Ray Micro Analysis), detectados por microscopía electrónica de barrido, permitió diferenciar elementos con número atómico mayor que 6, y que se encontraban en más de un 0,1 % en la composición de la partícula. Las cenizas volantes estaban compuestas fundamentalmente de Si, Mg, Al, Ca, K, Fe y Ti siendo mayoritarios los tres primeros.

Tabla 5-5. Composición química elemental aproximada de las cenizas volantes de la Central de Compostilla II, Ponferrada, (León).

Elemento	Punto de Fusión (°C)	Punto de Ebullición (°C)	% (en peso)
Si \Rightarrow (SiO ₂)	1420	2600	50-70
Mg \Rightarrow (MgO)	651	1100	<20
Al \Rightarrow (Al ₂ O ₃)	660	1800	<20
Ca \Rightarrow (CaO)	810	1170	<10
K \Rightarrow (K ₂ O)	62	760	<10
Fe \Rightarrow (Fe ₂ O ₃)	1533	3000	<10
Ti \Rightarrow (TiO ₂)	1820	3000	<2

En resumen, este estudio permitió:

- Ensayar la metodología de análisis desarrollada, propia de laboratorio, pudiéndose comprobar su aplicación en planta real.
- Caracterizar íntegramente las emisiones de una Central Térmica de combustión de carbón pulverizado que utiliza un carbón típico de España, pudiéndose comprobar:
 - La importancia de la concentración numérica de partículas frente a la concentración másica, que es la que regula las normativas actuales de emisión.
 - La distribución bimodal de tamaño en este tipo de emisiones, coincidente con los estudios de Kauppinen, 1991.
 - La forma esférica de las partículas y la composición elemental mayoritaria en Si y Al.

5.2.1.2 Combustión de carbón en lecho fluido circulante, (LFC). (CIEMAT).

Los proyectos PIE n° 131.095, FASE I y CICYT AMB96-1211.C01/02, "Desarrollo y validación de nuevas tecnologías macrosónicas para la reducción de la emisión de partículas en efluentes gaseosos y líquidos de origen industrial" planteaban un objetivo similar, que era la validación a escala semi-industrial de un sistema de aglomeración acústica acoplado a un electrofiltro, utilizando emisiones de combustión reales y un caudal aproximado a los 1000 m³/h. Para ello, se diseñó y montó una instalación experimental en el CIEMAT, en la que las emisiones procedían de una planta piloto de combustión de lecho fluido circulante, quemando carbón de Compostilla, Figura 5-19 (Gallego *et al*, 1995a, 1995b), (Martín Espigares *et al*, 1996).

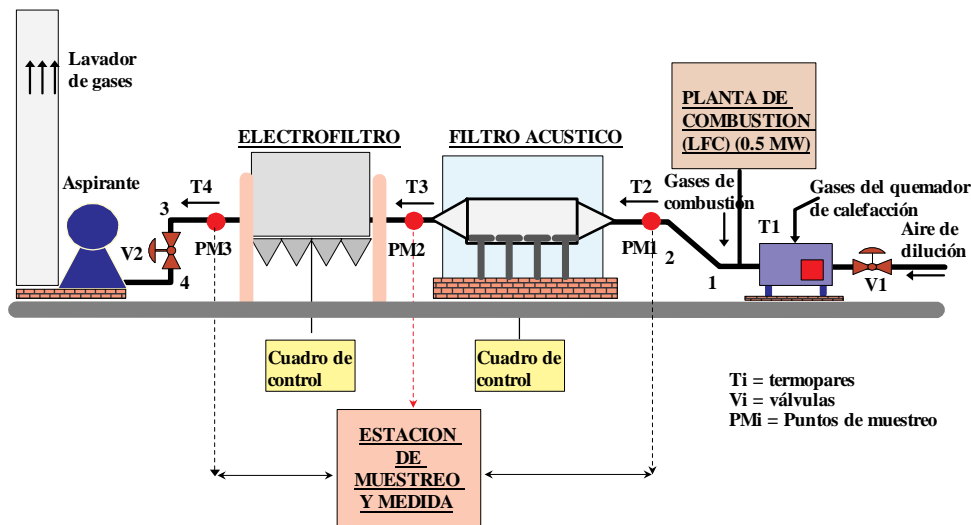


Figura 5-19. Esquema de la planta de validación de sistemas de filtración a media escala (CIEMAT).

La Planta de validación de los sistemas de filtración constaba fundamentalmente de, una planta de combustión de carbón, LFC, que actuaba como sistema de generación de aerosoles, un sistema de aglomeración acústica o filtro acústico, FA y un electrofiltro o

precipitador electrostático, ESP. Ambos, acoplados en una línea de proceso, con capacidad para acondicionar y controlar los aerosoles de ensayo. Y finalmente, el sistema de muestreo y medida (capítulo 4) incorporado en una estación móvil para medir en varios puntos de la línea de proceso.

La Planta piloto de lecho fluidizado circulante del CIEMAT (Cabanillas *et al*, 1996), (Figura 5-20) tiene una potencia máxima de 0,5 MW_t; en centrales térmicas de lecho fluido circulante la máxima potencia eléctrica alcanzada es de 250 MW_e.

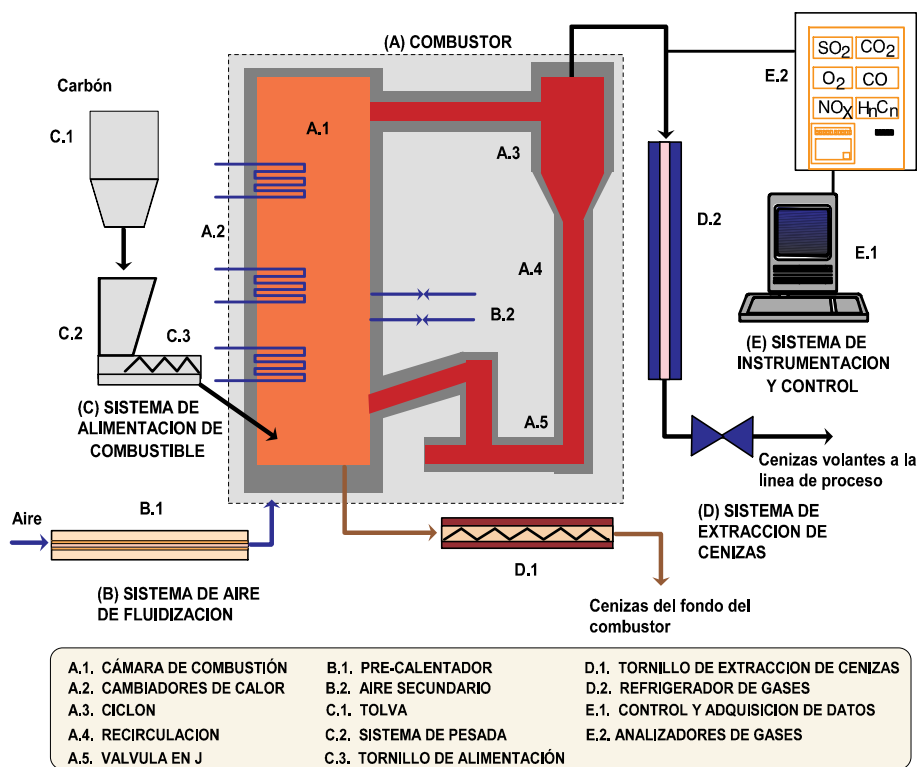


Figura 5-20. Planta de Lecho Fluidizado Circulante (LFC) del CIEMAT.

La planta de LFC (CIEMAT) consta esencialmente de los siguientes componentes: combustor (A), sistema de aire de fluidización (B), sistema de alimentación de

combustible (C) sistema de extracción de cenizas (D) y sistema de instrumentación y control (E). En el combustor se pueden distinguir los siguientes elementos: cámara de combustión (A.1), sistema de extracción de calor (A.2), ciclón (A.3), rama de recirculación (A.4), válvula en J o de sólidos (A.5). Las cenizas mayores que el tamaño de corte del ciclón ($d_p(\text{corte}) \approx 50\mu\text{m}$) quedan teóricamente retenidas en el lecho, y son extraídas a través de un tornillo sinfín, con refrigeración interna y externa, para enfriarlas hasta una temperatura máxima de 80 °C (D.1). Las de $d_p < 50\mu\text{m}$, son arrastradas por los gases de emisión, que son enfriados hasta la temperatura de 200 °C mediante un refrigerador (D.2). En la siguiente tabla se muestran las condiciones de operación.

Tabla 5-6. Condiciones de operación en la Planta de combustión de lecho fluidizado circulante del CIEMAT.

Combustor	
Temperatura (°C).....	850
Velocidad de fluidización (m/s)	5,5
Caudal de aire primario (Nm ³ /h).....	151
Caudal de aire secundario (Nm ³ /h).....	9,6-10,5
O ₂ (%).....	4-6
Combustible	
Carbón de Compostilla (Ponferrada) (Tabla 5-4)	
Granulometría (mm).....	<5
Consumo (kg/h).....	17-19
Emisiones	
Caudal de humo seco (kg/h)	149-150
Caudal de humos total (kg/h).....	153-155
Composición química del humo:	
CO ₂	13,5 %
O ₂	6,5 %
SO ₂	1450 ppm
NO _x	110 ppm
CO.....	375 ppm

La caracterización de partículas se realizó siguiendo la metodología descrita anteriormente y con el sistema completo, tal como se presenta esquematizado en la Figura 4-1. Por tanto, formado por: el sistema de muestreo, la instrumentación para la medida y

caracterización de partículas y los equipos auxiliares. El proceso de caracterización consistió en la determinación de:

- Concentración en masa y número.
- Distribución de tamaño de partículas en masa y número.
- Morfología de partículas.
- Composición química elemental.

Todas obtenidas antes de los dispositivos de filtración, punto PM1 (Figura 5-19), una vez fijada una concentración másica de partículas mediante la dilución de los gases de emisión de la planta de LFC.

Las distribuciones de tamaño de partículas en función de los diámetros aerodinámico (impactador de cascada), geométrico (instrumento óptico y SMPS), y de área proyectada (microscopía electrónica de barrido y análisis de imagen), se determinaron para una concentración en masa de partículas de $\sim 4 \text{ g/Nm}^3$, (Figura 5-21), (Rodríguez Maroto *et al*, 1995).

Atendiendo a la distribución de tamaño aerodinámico, se observó una presumible distribución bimodal. La masa de materia particulada parecía estar distribuida entre dos grupos de partículas: uno, de partículas finas, de tamaño próximo a la micra, y otro, probablemente en torno a las 20 μm . Mas del 70% de la masa total de la materia particulada correspondía a partículas mayores a 1 μm y menos del 30%, a las partículas submicrométricas.

Como los datos obtenidos con el impactador no abarcaban el intervalo completo de existencia de las dos modas; sólo se ajustó la de menor tamaño, de moda 0,9 μm , a una distribución monomodal de tipo log-normal, obteniéndose sus parámetros estadísticos. El

diámetro aerodinámico medio (AMD) era $0,8 \mu\text{m}$ y el diámetro mediano (CMD), $3,5 \mu\text{m}$. La desviación geométrica standard (GSD) era 2,6. En ausencia de otros dispositivos de medida, se podría deducir que la distribución de tamaño de este aerosol era bimodal con dos modas de tamaño micrométrico en el intervalo de tamaño $0,1 - 20 \mu\text{m}$., sin embargo, las medidas con otros instrumentos demostraron que eso no era así.

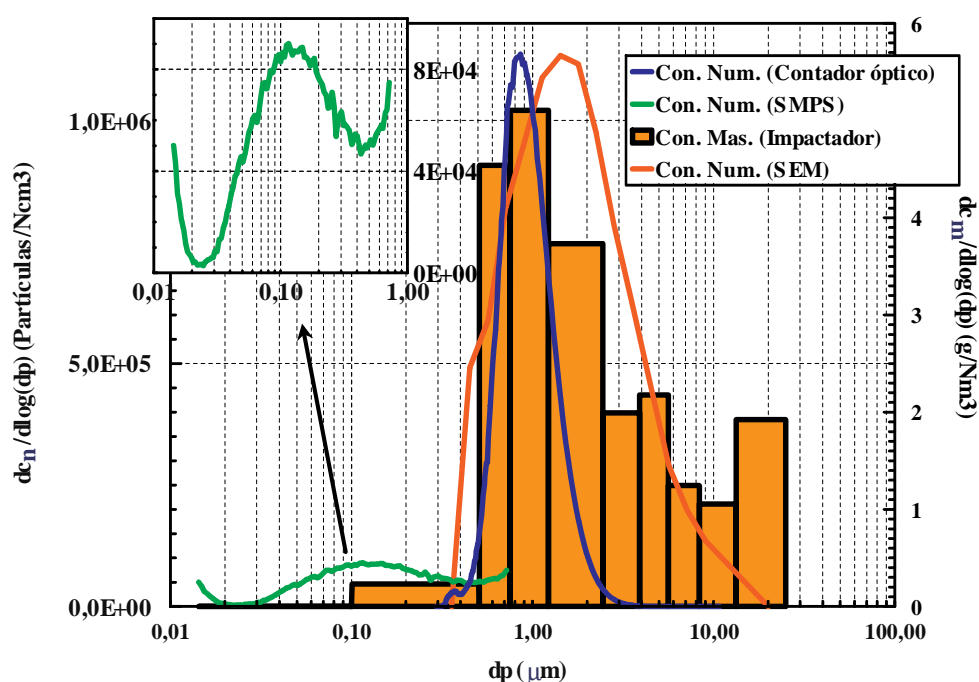


Figura 5-21. Distribución de tamaño de partícula, de las emisiones de la Planta de combustión de Lecho fluido circulante del CIEMAT.

Los datos obtenidos con el contador óptico y con el clasificador electrostático junto al contador de núcleos de condensación (SMPS), mostraron una distribución bimodal, como en el caso anterior, pero en diferente intervalo de tamaño $0,01-10 \mu\text{m}$. Con el SMPS, se detectó una nueva moda en $\sim 0,1 \mu\text{m}$, mientras que con el contador óptico se corroboró la moda detectada con el impactador de cascada en aproximadamente $1 \mu\text{m}$. El MGD, para cada una de ellas, era $0,2$ y $0,9 \mu\text{m}$ y correspondían a concentraciones de $6,1 \times 10^4$ partículas/ Ncm^3 y $3,5 \times 10^5$ partículas/ Ncm^3 , respectivamente. Al comparar estos

resultados con los anteriores, obtenidos con el impactador de cascada, se observa que la moda correspondiente al tamaño mayor (20 μm) no se detectó con el instrumento óptico. Esto era debido a que el número de partículas de este tamaño no era suficientemente alto para ser contadas, aunque sí se detectase su masa. Por tanto, la utilización conjunta de varios equipos evita caracterizaciones erróneas ya que permite combinar la información derivada de los resultados obtenidos por cada instrumento con los de otros que presentan un intervalo de tamaño de medida común.

Las partículas de tamaño, entre 0,3 y 10 μm presentaban la aportación más significativa tanto en masa (> 88%) como en número, (~ 88%). Las partículas por debajo de 0,3 μm estaban en una concentración numérica de aproximadamente un orden de magnitud menor, suponiendo $\approx 12\%$ del número total de partículas y una masa inferior al 1 % de la total. Por último, las partículas más gruesas, mayores que 10 μm , eran despreciables en cuanto a número, sólo $\sim 10^1$ partículas/ Ncm^3 , pero con una aportación másica superior al 10 % del total.

El análisis de imagen de las microfotografías, obtenidas por microscopía electrónica de barrido, permitió corroborar la existencia de partículas micrométricas distribuidas por tamaño de forma similar a la predicha a partir de los resultados del impactador de cascada y del contador óptico. Aunque hay que significar que la distribución que se obtiene mediante el análisis de imagen resulta únicamente aproximada, ya que se desconoce la fracción de muestra recogida en las láminas y, además, la técnica no permite analizar el número total de partículas depositadas, por tanto, la distribución es porcentual respecto a la submuestra considerada. Al ajustar los datos a una distribución log-normal, se observó una moda en 1,59 μm y un diámetro geométrico medio (GMD) de 1,8 μm , valores que están ligeramente desplazados hacia mayores tamaños respecto a los obtenidos con las técnicas anteriores. Ello es probablemente debido al método de muestreo sobre las láminas, que hace de la impactación el fenómeno determinante en la colección de

partículas y consecuentemente, que una porción significativa de las de menor tamaño no pueda ser analizada.

El análisis por microscopía electrónica de barrido, permitió observar varios tipos de morfologías de partículas (Figura 5-22).

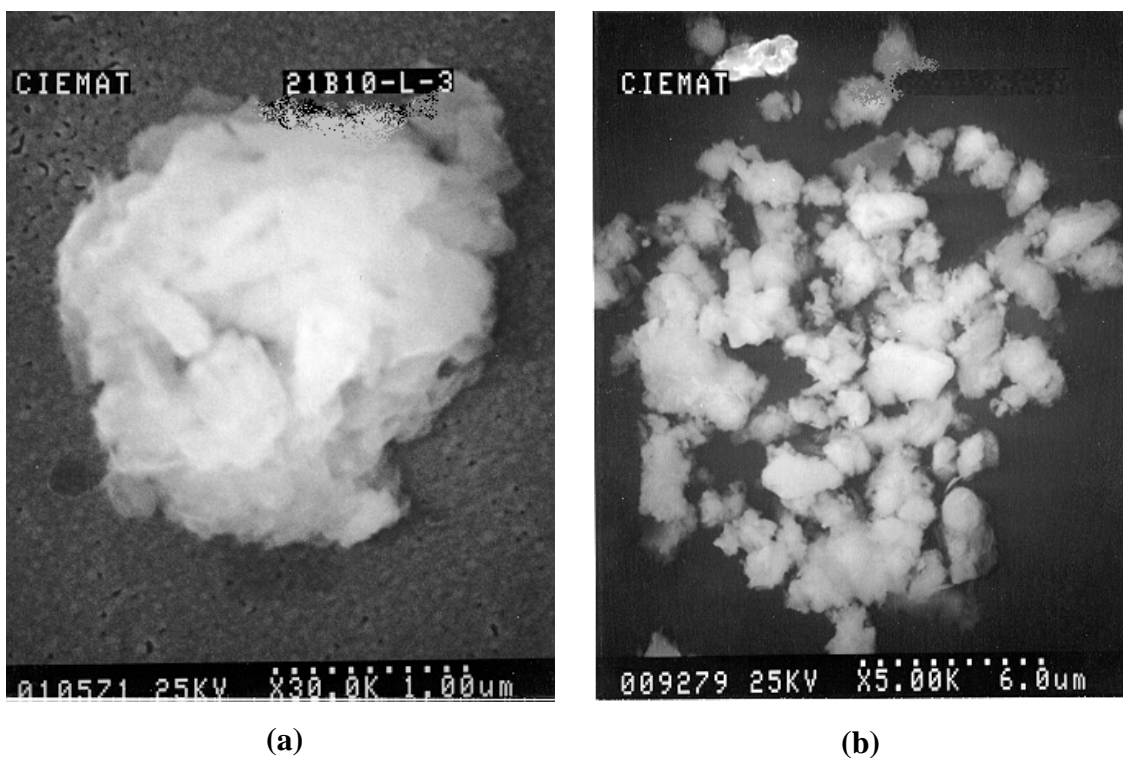


Figura 5-22. Microfotografías de partículas de emisión de combustión de carbón en lecho fluido circulante, Planta de combustión del CIEMAT. a) Detalle de partícula primaria. b) aglomerado de partículas primarias.

Se podían observar, partículas primarias de forma laminar e irregular en su mayoría, Figura 5-22(a); aunque en ocasiones se apreciaban partículas cristalinas casi regulares, y aglomerados de estas partículas primarias, Figura 5-22(b). Las primeras, formadas mayoritariamente por liberación de las inclusiones minerales del carbón, eran tanto más

regulares cuanto más cristalinas fuesen en su estado original, ya que la temperatura de combustión no era, en este caso, suficientemente alta para producir la fusión de los minerales.

La forma de las partículas cambia con su tamaño y esta variación fue analizada a partir de la circularidad relativa (ecuación 4-22) en función del diámetro de área proyectada (Figura 5-23). La circularidad relativa presentaba un mínimo en torno a un diámetro de partícula de una micra, que se relacionaba con las partículas primarias, más regulares. El incremento de la circularidad con el tamaño era consecuencia de la formación de aglomerados.

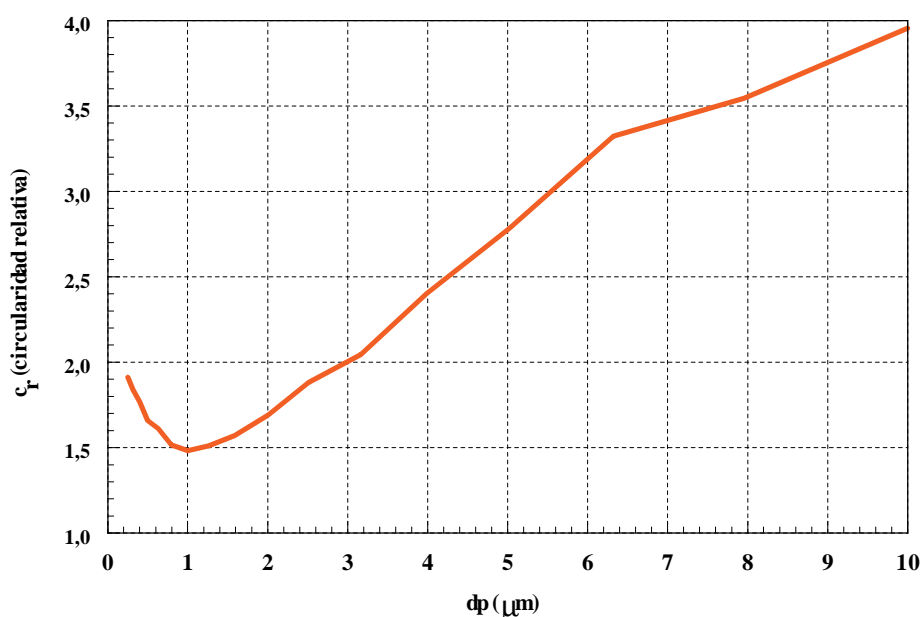
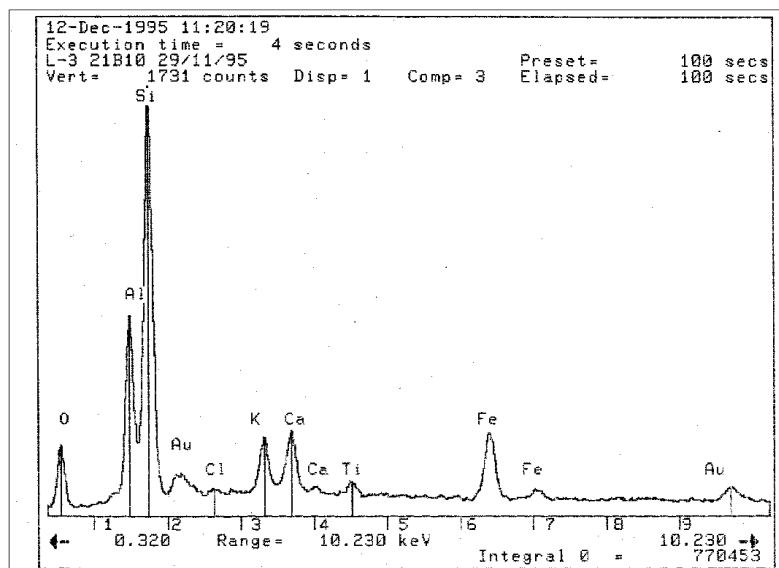


Figura 5-23. Morfología (expresada como circularidad relativa) en función del diámetro de partícula.

Contrastando con la distribución en número de partículas (Figura 5-21), se observó que la circularidad relativa media $\sim 1,8$ estaba próxima a la del mínimo, que se situaba en 1,5, y

correspondía a un tamaño de $\sim 1,2 \mu\text{m}$, debido a que las partículas de tamaño cercano a la micra eran las más numerosas. Estas partículas con circularidad relativa próxima a 1, presentaban un área proyectada en la que una de las dimensiones es dos o tres veces mayor que la otra, pudiéndose morfológicamente asemejar a elipsoides. Las partículas por encima de 10 micras; aunque presentaban una gran irregularidad, eran en número poco significativas.

La composición química de partículas aisladas se obtuvo a partir de la técnica EPXMA incorporada al análisis de microscopía electrónica. En la siguiente figura, se presenta un espectro típico de análisis elemental en la que se pueden observar los picos característicos de cada uno de estos elementos.



Nota : el Au corresponde a la preparación de las láminas

Figura 5-24. Composición química elemental de una partícula aislada de ceniza volante. Técnica EPXMA.

Se pudo detectar la presencia de una serie de elementos químicos, en concentración superior al 0,1 %, en peso: Si, Al, Ca, Fe, K y Ti y que principalmente se encontrarían en forma de óxidos: SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, K₂O y TiO₂.

Para realizar el análisis cuantitativo, se analizaron un número considerable de partículas individuales, integrando cada uno de los picos de su espectro, de forma que era posible establecer un porcentaje en peso promediado de los elementos mayoritarios (Tabla 5-7).

Tabla 5-7. Composición elemental aproximada de las cenizas volantes, Planta de combustión de carbón en lecho fluido circulante, del CIEMAT.

Elemento	Punto de Fusión (°C)	Punto de Ebullición (°C)	% (en peso)
Si ⇒ (SiO ₂)	1420	2600	70-84
Al ⇒ (Al ₂ O ₃)	660	1800	2-14
Ca ⇒ (CaO)	810	1170	5-9
Fe ⇒ (Fe ₂ O ₃)	1533	3000	1-7
K ⇒ (K ₂ O)	62	760	2-6
Ti ⇒ (TiO ₂)	1820	3000	~1

Se observa que las cenizas procedentes de la planta de combustión en lecho fluido tenían una cantidad de silicio, apreciablemente mayor que en el carbón (Tabla 5-4), consecuencia del proceso de formación y arrastre de partículas en el combustor de LFC.

La utilización de varias técnicas acopladas en el sistema de muestreo y medida utilizado, permitió extender el estudio de la distribución por tamaño de partícula a un amplio intervalo, desde 0,01 a 25 µm, impuesto por la sensibilidad de los equipos de medida utilizados, obteniendo información relativa a la masa y al número de partículas. Se pudo comprobar la existencia de dos modas, en cuanto a número de partículas, en aproximadamente 0,1 - 1 µm y otras dos, en cuanto a masa, en 1 y 20 µm, evitando

caracterizaciones erróneas que podrían surgir de la consideración de resultados procedentes de un solo instrumento.

La utilización del mismo sistema de muestreo y medida en las dos emisiones estudiadas, procedentes de tecnologías de combustión de carbón diferentes: carbón pulverizado (CP) y lecho fluido circulante (LFC) permite contrastar los resultados obtenidos.

- En ambos procesos, la distribución de tamaño de partículas presenta una moda submicrométrica (0,1 μm) y otra micrométrica (1 μm). La primera es más significativa en las emisiones de CP, ocurriendo lo contrario en las de LFC. Esto es atribuible a la temperatura de combustión. En los combustores de lecho fluidizado la temperatura no es suficientemente elevada (800 -900 $^{\circ}\text{C}$), para que se generen de forma mayoritaria partículas de tamaño inferior a la micra. En los combustores de carbón pulverizado, donde la temperatura es de 1200 -1600 $^{\circ}\text{C}$, la producción de partículas submicrométricas puede ser hasta dos ordenes de magnitud mayor que la de las partículas micrométricas, (Joutsensaari *et al*, 1992). La concentración de las partículas menores se incrementa con la temperatura de combustión, porque los procesos de vaporización y condensación, principal mecanismo de formación de este tipo de partículas, son más importantes (Roy *et al*, 1981).
- Si bien las partículas primarias procedentes de la combustión de CP son casi esferas, las correspondientes a LFC tienen en general forma irregular, (estructuras laminares). Estas diferencias son, también, consecuencia de la mayor temperatura de combustión en las plantas de CP, lo que favorece el proceso de evaporación y condensación de minerales. En cambio, en las plantas de LFC, predomina la formación de partículas a partir de la liberación de inclusiones minerales generándose formas más irregulares.

5.2.1.3 Combustión interna de gasoil en un Motor-Generador Diesel. (CIEMAT).

Uno de los objetivos del proyecto CICYT AMB96-1211.C01/02, era caracterizar las emisiones de escape de un motor generador diesel, para posteriormente validar los sistemas acoplados de aglomeración acústica y separación electrostática, con este tipo de emisiones.

Para este estudio, se utilizó la instalación de validación de sistemas de filtración a media escala (CIEMAT), (Figura 5-19), adaptando un nuevo sistema de generación de aerosoles, formado por un motor-generador Diesel. Las emisiones del motor se incorporaban a la línea de proceso, en lugar de las procedentes de la Planta de combustión de carbón, y en el mismo punto en el que éstas lo hacían.

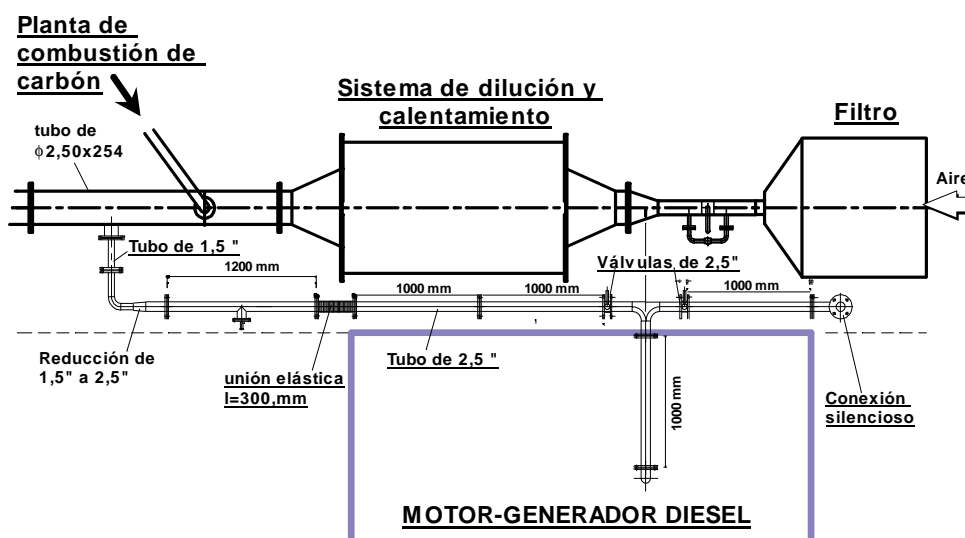


Figura 5-25. Línea de escape del motor-generador Diesel e inserción en línea en la instalación de validación de sistemas de filtración del CIEMAT.

La línea de escape estaba constituida por una tubería de acero inoxidable que se bifurcaba en dos ramas, a derecha e izquierda de la cabina de insonorización que contenía al motor-generator, transcurriendo en sentidos opuestos y paralelas a la línea de proceso. Cada una de ellas, con una válvula de apertura y cierre para conducir los humos, al exterior a través del silencioso durante el periodo de calentamiento del motor, o a la línea de proceso.

En la siguiente tabla, figuran las características del motor-generator diesel fabricado por la Empresa Nacional de Autocamiones, S.A. Pegaso.

Tabla 5-8. Características del motor-generator Diesel.

DATOS DEL MOTOR	
Tipo	9100/14/25/21
Motor	20.1268.634
Ciclo	Diesel, a 4 tiempos
Cilindros	6, en línea
Calibre	118 m/m
Carrera	155 m/m
Cilindrada total	10170 cm ³
Relación de compresión	16:1
Potencia máxima	170 C.V. a 2000 r.p.m.
Par máximo	65,5 mKg a 1300 r.p.m.
Régimen de Revoluciones.	600 – 1500 r.p.m.
Potencia fiscal	41 C.V.
Consumo específico	165-175 gr/C.V. hora
Peso	725 kg
Dimensiones	2m x 1m x 1,2m

El motor-generator estaba ubicado dentro de una cabina de insonorización sobre una plataforma soportada por calzos antivibración.

Como combustible, se utilizó un gasoil de automoción Clase A, cuyas especificaciones son reguladas por ley, (Tabla 5-9).

Tabla 5-9. Especificaciones para el gasoil de automoción Clase A. (Real Decreto 398/1996 de 1 de Marzo, corregido en la Disposición general 11502 del BOE-22-05-1996).

a) Densidad a 15° máxima /mínima	860/820 kg/m ³
b) Color	2
c) Azufre, máximo	0,05% m/m
d) Índice de cetano (número de cetano aditivado)	46 (49)
e) Destilación	
65 por ciento del recogido mínimo	250 °C
80 por ciento del recogido mínimo	-----
85 por ciento del recogido mínimo	350 °C
95 por ciento del recogido mínimo	370 °C
f) Viscosidad cinemática a 40 °C mínima / máxima	2 / 4,5 mm ² /s
g) Punto de Inflamación	>55 °C
h) Punto de obstrucción filtro frío Invierno (1 octubre -31 marzo), mínimo Verano (1 abril -30 septiembre), máximo	-10 °C 0 °C
i) Punto de enturbiamiento Invierno (1 octubre-31 marzo), mínimo Verano (1 abril-30 septiembre), máximo	-----
j) Residuo carbonoso (sobre 10% V/V final destilación), máximo	0,30 % m/m
k) Agua y sedimentos, máximo	-----
l) Agua, máximo	200 mg/kg
m) Partículas sólidas, máximo	24 mg/kg
n) Contenido de cenizas, máximo	0,01 % m/m
o) Corrosión a la lámina de cobre (3 h a 50 °C), máximo	Clase 1 (escala)
p) Transparencia y brillo	Cumple
q) Estabilidad a la oxidación, máximo	25 g/m ³
r) Aditivos y agentes trazadores: Autorizados en tipo y cantidad, por los Ministerios de Economía Hacienda e Industria y Energía	

El punto de muestreo seleccionado se situaba en la línea de proceso (Figura 5-19), después de que los humos de escape (173 Nm³/h) fuesen diluidos con aire, previamente

filtrado, hasta 800 Nm³/h, ya que se pretendía validar los sistemas de filtración a este caudal. Adicionalmente, se facilitaba la medida al diluir el aerosol inicial.

La caracterización de partículas se realizó igual que en la aplicación anterior, con la utilización de los mismos equipos e instrumentos de medida y consistió en la determinación de:

- Concentración en masa y número.
- Distribución de tamaño de partículas en masa y número.
- Morfología de partículas.
- Composición química elemental.

Igual que para las emisiones de combustión de carbón, todas las características fueron determinadas antes de los dispositivos de filtración, punto PM1, (Figura 5-19) una vez fijada una concentración másica de partículas obtenida partir de la dilución de los gases de escape del motor-generator.

La concentración en masa determinada a partir de la medida con diferentes filtros fue de 0,01 g/Nm³, y la concentración en número, medida con el SMPS de 7,7x10⁶ (Partículas/Ncm³), para el intervalo de tamaño 0,02 - 1 µm y de 6,5x10³ (Part./Ncm³), medida con el instrumento óptico, en el intervalo de tamaño 0,3 - 20 µm.

La distribución de tamaño de partículas se determinó en función de los diámetros aerodinámico (impactador de cascada), geométrico (instrumento óptico y SMPS), y de área proyectada (microscopia electrónica de barrido y análisis de imagen) (Figura 5-26).

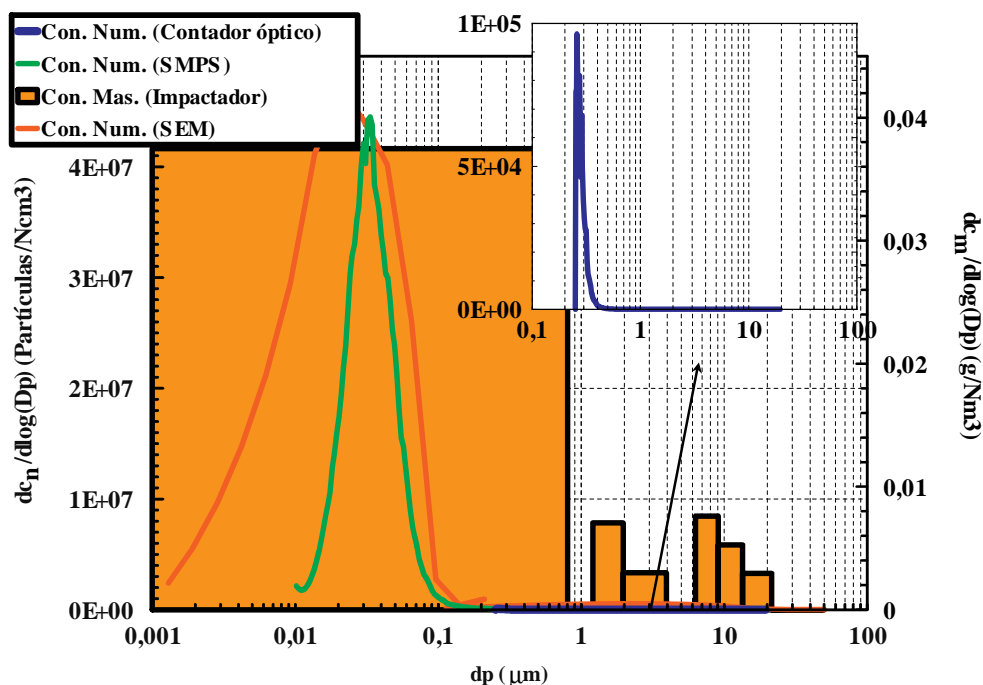


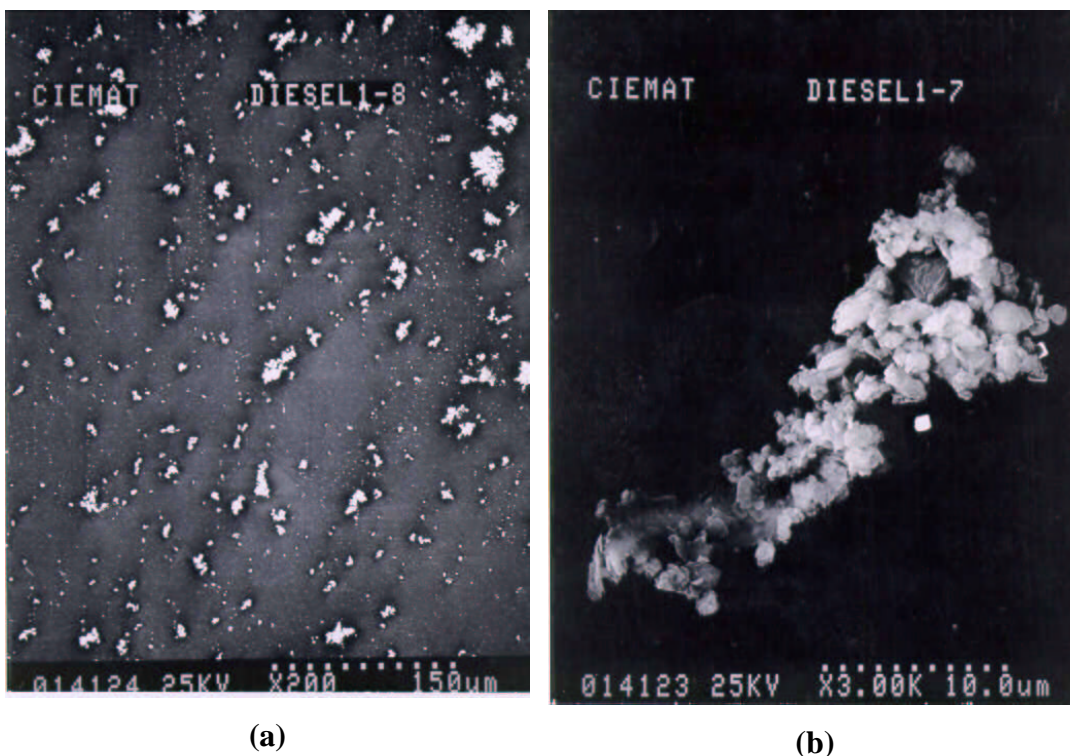
Figura 5-26. Distribución de tamaño de partícula, de las emisiones del motor generador diesel (CIEMAT).

La distribución referida a la masa de partículas era bimodal, con una moda, definida dentro del intervalo de medida del impactador en $\approx 10 \mu\text{m}$ y una presumible moda de partículas submicrométricas indefinida, por el límite inferior de medida del impactador. El 91% de la masa correspondía a partículas menores a $0,8 \mu\text{m}$. Resultados coincidentes de forma cualitativa con los obtenidos por Dolan *et al*, en 1983 y Kittelson y Dolan en 1998.

La distribución de tamaño en número de partículas, medidas con el SMPS, era monomodal, poco polidispersa, con una moda centrada en $0,04 \mu\text{m}$ y una $\text{GSD} = 1,5$. La distribución de tamaño, de las partículas detectadas con el instrumento óptico, se correspondía a la cola de la distribución de partículas de menor tamaño.

Del tratamiento estadístico de las poblaciones de partículas obtenidas por SEM y subsiguiente análisis de imagen, se obtenía una distribución monomodal prácticamente coincidente con la detectada por el SMPS, pero más polidispersa, presentando partículas de tamaño de hasta $0,001 \mu\text{m}$, que probablemente pudieran constituir una moda nanométrica, aunque el sistema de captación empleado no permitía recoger la totalidad de estas partículas.

Respecto a la morfología, en las microfotografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido, se podían observar formas irregulares en las que se diferenciaban los aglomerados de las partículas más pequeñas (Figura 5-27).



**Figura 5-27. Microfotografías de partículas de emisión del motor generador diesel (CIEMAT), obtenidas por microscopía electrónica, SEM.
a) Distribución de partículas. b) Detalle de la morfología.**

Las partículas consistían principalmente en núcleos casi esféricos que formaban la moda de tamaño submicrométrico y crecían por coagulación formando cadenas de agregados, de forma racimosa, que daban lugar a la moda de mayor tamaño. Kittelson y Dolan, en 1998, afirmaron que las partículas de emisión en la combustión Diesel consistían principalmente en núcleos carbonosos y agregados de éstos e hidrocarburos adsorbidos sobre las partículas o formando gotas, dependiendo de las condiciones.

A partir del análisis de imagen de las microfotografías obtenidas por SEM, se determinó la variación de circularidad relativa con el tamaño de partícula (Figura 5-28).

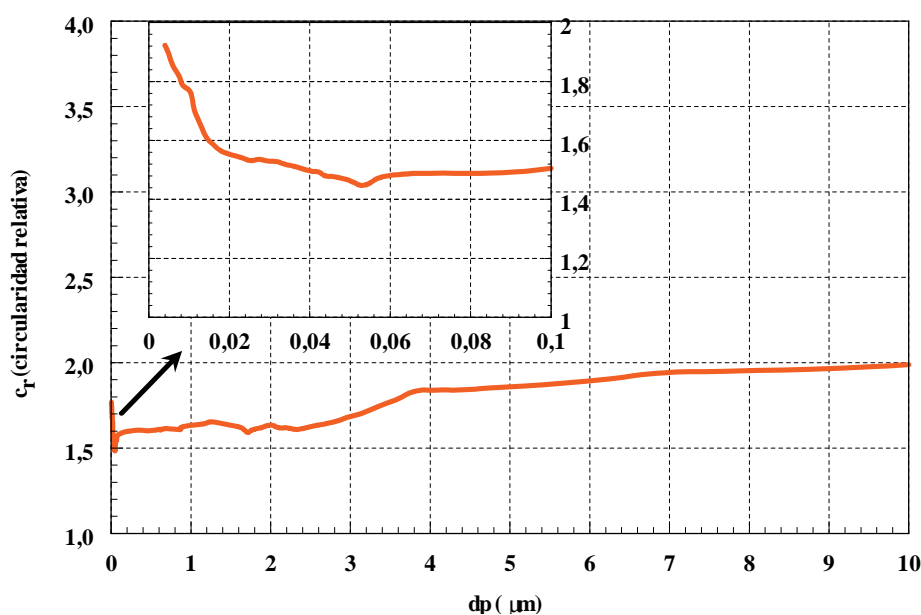


Figura 5-28. Morfología (expresada como circularidad relativa) en función del diámetro de partícula.

Se observa un mínimo de la c_r , para las partículas de tamaño en torno a $0,05 \mu\text{m}$., que corresponde a los núcleos primarios. El incremento de la irregularidad aumenta con el tamaño, por la formación de aglomerados pero de forma menos pronunciada que en las partículas de combustión de carbón, probablemente por la forma de aglomerarse de

racimo, en la que las partículas primarias van ocupando huecos en vez de formar aglomerados ramificados.

La composición química elemental fue determinada por microscopia electrónica de barrido, SEM/EPXMA para diferentes partículas aisladas obteniendo una composición media que figura en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10. Composición elemental de las partículas de emisión del motor generador diesel (CIEMAT), determinada por SEM/EPXMA, a excepción del carbono.

Elemento	% (en peso)
Si	82,6
Ca	9,9
Na	7,2
K	0,2
Mg	1,0
Ti	~1

Si bien la técnica SEM /EPXMA resulta útil para elementos de número atómico, $Z > 7$, impide la determinación de los de número atómico menor, así el carbono, a pesar de ser el elemento mayoritario, no figura como tal en la tabla anterior.

Una de las modificaciones del sistema de caracterización de aerosoles para este caso concreto, fue la incorporación de cartuchos adsorbentes en una de las cuatro ramas de muestreo, después del portafiltros, con el fin de realizar una toma de muestras de los gases de escape. Los gases retenidos eran posteriormente desorbidos y analizados por cromatografía de gases. En la siguiente tabla, figuran los resultados de los análisis.

Tabla 5-11. Componentes orgánicos en los gases de emisión del motor generador diesel (CIEMAT).

Elemento	Punto de Fusión (°C)	Punto de Ebullición (°C)	Composición (µg/Nl)
Tetradecano (C ₁₄ H ₃₀)	5,86	254,0	7,3
Tridecano (C ₁₃ H ₂₈)	-5,5	235,5	6,5
Dodecano (C ₁₂ H ₂₆)	-9,6	216,3	2,2
Undecano (C ₁₁ H ₂₄)	-25,6	196,0	1,5
Decano (C ₁₀ H ₂₂)	-29,7	174,1	1,2
Trimetilbenceno (CH ₃) ₃ (C ₆ H ₃)	-45 a -25	164,7 a 176,1	1,2
Benceno (C ₆ H ₆)	5,5	80,1	0,8
Nonano (C ₉ H ₂₀)	-51	151,0	0,7
Tolueno (CH ₃)(C ₆ H ₅)	-95	110,6	0,3
Propilbenceno (C ₂ H ₇)(C ₆ H ₅)	-99,5	159,2	0,3
Isopropilbenceno	-96	152,4	0,2
O-xileno 1,2 (CH ₃) ₂ (C ₆ H ₄)	-25	144,4	0,2
Etilbenceno (C ₂ H ₅)(C ₆ H ₅)	-94	136,2	0,1

Además de los compuestos cuantificados, se identificaron otros hidrocarburos alifáticos ramificados y otros compuestos aromáticos minoritarios.

Los hidrocarburos detectados tienen puntos de ebullición entre 80 y 254 °C, y son susceptibles de modificar su estado físico según las condiciones en el conducto de escape. La gran superficie de los aglomerados puede favorecer la adsorción y las reacciones químicas superficiales de vapores y compuestos gaseosos, y cualquier cambio en la composición química y física de la fase gaseosa puede producir variaciones importantes en las partículas.

Con el fin de comprobar la sensibilidad de las partículas diesel a determinados cambios, el sistema de caracterización fue utilizado en condiciones extremas de humedad. Para ello, se estudio el efecto de la inyección de agua en el aire de dilución antes del punto de medida, (Figura 5-19) observándose unas disminuciones en la concentración del número

de partículas de hasta el 20 % y del MGD desde 0,100 a 0,08 μm (Rodríguez Maroto *et al*, 2001a). El agua inyectada producía el enfriamiento del aerosol y, por tanto, la condensación de determinados hidrocarburos y un incremento de las fuerzas de adhesión entre partículas. Ambos fenómenos favorecen la coagulación y consecuentemente la disminución de la concentración y el aumento de tamaño; aunque el agua alojada en los intersticios de los aglomerados podría hacer que estos se compactaran, y disminuyese el tamaño previsto (Po-Fu Huang *et al*, 1994).

La utilización de la misma metodología de caracterización de aerosoles permitió comparar los resultados obtenidos en las dos últimas aplicaciones, emisiones procedentes de tecnologías de combustión y combustibles distintos: lecho fluido circulante (LFC) y emisiones de escape de combustión de gasoil en un motor-generador Diesel.

- A diferencia de las partículas procedentes de la combustión de carbón, las de emisión Diesel presentan un carácter bastante monodisperso en cuanto a la distribución en número de partículas (0,01 - 0,1 μm). No obstante, los resultados obtenidos con el impactador de cascada señalan la presencia, al igual que los datos del contador óptico, de partículas superiores a la micra que, en determinadas condiciones, podrían constituir una segunda moda, alrededor de un diámetro de 10 μm . Del análisis por SEM resulta la presencia de partículas de hasta 0,001 μm , que igualmente y considerando la capacidad de cambio de estas partículas, en diferentes condiciones podrían constituir otra moda.

- Los aglomerados de partículas en las emisiones de combustión Diesel de gasoil son más regulares que los de combustión de carbón probablemente por la forma de aglomerarse de racimo en la que las partículas primarias, de tamaño mucho menor que en las de carbón van ocupando huecos en vez de formar aglomerados ramificados.

- La caracterización completa de aerosoles de combustión Diesel, puso de manifiesto la necesidad de definir perfectamente las condiciones en las que ésta se realiza, porque a diferencia de otros tipos de aerosoles como las emisiones de combustión de carbón en los que sus características no varían significativamente, en este caso, la compleja composición química, formada por hidrocarburos y sus derivados en fase gas o adsorbidos o condensados sobre las partículas primarias de carbón elemental, hacen que el aerosol sea altamente dinámico y sujeto a cambios físicos y químicos. Esto implica que las emisiones Diesel, además de ser dependientes del diseño del motor, de las características del combustible y de las condiciones de operación, estarán determinadas por las condiciones en las que se encuentran en el momento de muestreo y la medida.

5.2.2 Validación de sistemas de filtración.

La posibilidad de disponer de un sistema de muestreo y medida que permita determinar la eficacia de separación de un dispositivo de control de partículas en función de las diferentes características del aerosol tratado y de las condiciones de operación, hace que su uso en la validación adquiera un papel fundamental no solo en la optimización de los dispositivos de separación y filtración de partículas, sino, además, en el desarrollo de nuevas tecnologías.

En este apartado, se presenta la aplicación del sistema desarrollado en la validación de dos sistemas de control: un precipitador electrostático o electrofiltro (ESP) y un aglomerador acústico o filtro acústico, FA (proyectos PIE 131.095 y CICYT AMB96-1211.C01/02). El plan experimental fue llevado a cabo en la planta piloto de validación de sistemas de filtración a media escala (CIEMAT), (Figura 5-19).

El procedimiento de validación de ambos sistemas, de filtración y de aglomeración, consistía en caracterizar los aerosoles “aguas arriba” y “abajo” del mismo, según la metodología descrita (capítulo 4). Para ello, se planteó utilizar, una caseta móvil que incorporaba el sistema de muestreo y medida (Figura 5-19), pero el cambio de punto de muestreo exigía un tiempo muerto en el ensayo que podía implicar variaciones en las condiciones de planta, no garantizándose el proceso de validación del sistema, por lo que se optó por la determinación de una eficacia relativa $E_{(r)}$ a partir de un único punto de muestreo y teniendo en cuenta que cualquiera de los equipos podía conectarse, “ON” o no, “OFF”, dependiendo de los requerimientos del proceso de caracterización. La posibilidad de realizar una caracterización integral hace que el concepto de eficacia se pueda extender a cualquier propiedad cuantificable de las partículas (concentración másica y numérica, composición química, circularidad, etc) y por tanto la eficacia relativa se podía definir por:

$$E_{(r)}(\%) = 100 - \frac{\left(\text{Propiedad característica en PMi}_{(\text{sistema "ON"})} \right)}{\left(\text{Propiedad característica en PMi}_{(\text{sistema "OFF"})} \right)} \cdot 100 \quad [5-11]$$

PMi = PM2 (después del FA y antes del ESP) o PM3(después del ESP)

De igual forma, se podía definir la eficacia fraccional relativa $\eta_{(r)}$, por intervalo de tamaño de partícula Δd_p :

$$\eta_{(r)}(\%) = 100 - \frac{\left(\text{Propiedad característica en PMi}_{(\text{sistema "ON"})} \right)_{(\Delta d_p)}}{\left(\text{Propiedad característica en PMi}_{(\text{sistema "OFF"})} \right)_{(\Delta d_p)}} \cdot 100 \quad [5-12]$$

5.2.2.1 Precipitador electrostático o electrofiltro, (ESP).

El precipitador electrostático utilizado fue fabricado a escala piloto por DURO-FELGUERA, con licencia de la empresa suiza ELEX AG, con los mismos materiales y criterios que los empleados a escala industrial.

En la siguiente tabla se presentan las características fundamentales del electrofiltro.

Tabla 5-12. Principales características del electrofiltro, (ENDESA, 1996).

Caudal de diseño.....	2000 m ³ /h
Configuración tipo paralelo de una etapa simple	
Dos campos mecánicos en serie (L x H).....	1,5 m x 1,4 m
Superficie total de precipitación.....	33,6 m ²
<i>5 placas colectoras (1 mm espesor, ASTM A-240 tipo 304). ...4 calles (ancho = 200 mm).</i>	
Longitud total efectiva de emisión.....	67,2
<i>electrodos (tipo rígido) (ASTM A-240 tipo 304) de 8 mm de espesor (12 x calle)</i>	
Sistema de colección: <i>4 tolvas de acero al carbono de 5 mm de espesor.</i>	
Sistema de limpieza por golpeo: <i>2 martillos por placa colectora. 2 por electrodo emisor.</i>	
Condiciones de operación del Transformador – rectificador: <i>tensión de entrada, $V_1 = 20 - 380$ V ; tensión de salida $V_2 = 10 - 35$ kV. corriente de entrada $I_1 = <1 - 4$ A; corriente de salida $I_2 = <1 - 25$ mA. frecuencia 50 +Hz.</i>	
Sistema de control: <i>Microprocesador de Castlet (MCS).</i>	
Potencia total instalada:	
<i>Equipo de alta tensión.....</i>	<i>1,5kVA</i>
<i>Golpeo de placas y electrodos.....</i>	<i>2x0,25kW</i>

El electrofiltro formaba parte de la línea de proceso definida en el apartado 5.2.1.2, (Figura 5-19). La estación de muestreo y medida se situó en el punto (PM3) después del ESP.

En primer lugar, la validación se realizó a partir de las medidas de emisión procedentes de la planta de combustión de lecho fluido circulante del CIEMAT, quemando carbón de Compostilla, (Tabla 5-4). Siendo el caudal de ensayo $\approx 1100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ y la temperatura de entrada al ESP de 120-150 °C.

El proceso de validación consistió en la valoración del efecto que el precipitador electrostático tenía sobre las siguientes propiedades características del aerosol, de ensayo:

- Concentración en masa y en número.
- Distribución en masa y número.
- Morfología de partículas.
- Composición química elemental.

La concentración másica y numérica de partículas fue determinada, para diferentes potenciales de funcionamiento del electrofiltro, a partir del análisis gravimétrico de los filtros y de las medidas efectuadas con el contador óptico (intervalo de tamaño micrométrico) y con el SMPS (intervalo de tamaño submicrométrico).

En la Tabla 5-13, se presentan los resultados obtenidos, con cada uno de los equipos de medida, para los siguientes potenciales del secundario del ESP, V_2 : 0, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 kV.

Tabla 5-13. Concentración en masa y número para diferentes potenciales de operación del ESP.

	V_2 (kV)						
	0	10	15	20	25	30	35
Conc. (g/Nm³)	5,56	3,34	0,93	0,34	0,24	0,07	0,04
Conc. (part./Ncm³) (*)	$8,1 \times 10^5$	$4,9 \times 10^5$	$1,4 \times 10^5$	$4,8 \times 10^4$	$3,3 \times 10^4$	$9,9 \times 10^3$	$5,9 \times 10^3$
Conc. (part./Ncm³) (**)	$7,4 \times 10^4$	$4,0 \times 10^4$	$4,1 \times 10^3$	$1,5 \times 10^3$	$1,3 \times 10^3$	$5,9 \times 10^2$	$4,8 \times 10^2$
Conc. (part./Ncm³) (***)	$8,9 \times 10^5$	$5,3 \times 10^5$	$1,4 \times 10^5$	$5,0 \times 10^4$	$3,4 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$	$6,4 \times 10^3$

(*) medida con el contador óptico;

(**) medida con el SMPS

(***) concentración total

A partir de estos datos se determinó la eficacia relativa de separación del ESP, $E_{(r)}$ para diferentes V_2 (Figura 5-29), considerando que el potencial $V_2 = 0$ kV era el de no funcionamiento del equipo es decir sistema en “OFF”.

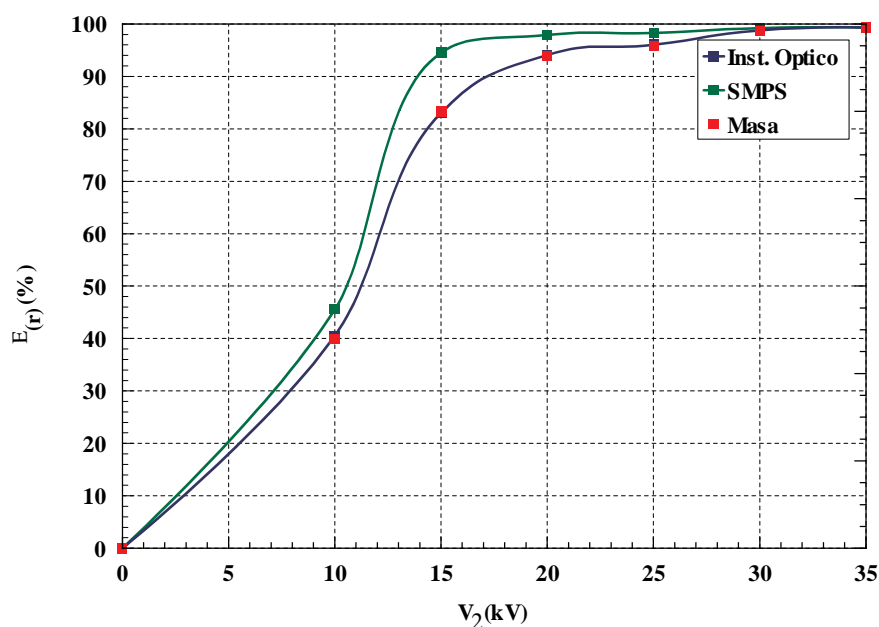


Figura 5-29. Curvas de eficacia relativa de separación del electrofiltro en función del potencial secundario, V_2 (kV). Combustión de carbón en LFC.

Las curvas son de tipo sigmoïdal, tanto para la eficacia en masa como en número. La eficacia aumenta bruscamente con el potencial hasta 20 kV, por encima del cual la eficacia de retención es superior al 90 %. A partir de éste potencial, la mejora es poco significativa, y solo se alcanza un 99 % cuando se aplica el máximo potencial 35 kV, casi el doble que el anterior.

La metodología de medida aplicada condujo a una ecuación empírica que relaciona la eficacia con el potencial, para las concentraciones medidas (Rodríguez Maroto *et al*, 1996).

$$E_{(r)} = a + \frac{b}{1 + e^{-\left(\frac{V_2 - c}{d}\right)}} \quad [5-13]$$

siendo:

$E_{(r)}$ = eficacia relativa (%).

V_2 =potencial aplicado al secundario.

a, b, c y d= valores promediados dependiendo de la magnitud a la que esté referida la eficacia:

<u>Parámetro</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>c</u>	<u>d</u>
Conc. másica (filtros)(g/Nm ³)	-1.21	98.88	10.81	2.44
Conc. numérica (Inst. óptico) (Part/Ncm ³)	-1.37	99.24	19.77	2.50
Conc. numérica (SMPS) (Part/Ncm ³)	98.74	-98.87	10.24	-1.54

La validación referida a la distribución en masa, resultó de la comparación de las medidas realizadas con el impactador de cascada. Para ello, fue necesario muestrear en condiciones similares, de forma que los diámetros de corte calculados para cada etapa del impactador fuesen iguales en ambos casos. En la siguiente figura, se presentan los resultados obtenidos con este equipo, para el potencial de diseño del ESP, ($V_2=30$ kV), (Rodríguez Maroto, 1997a).

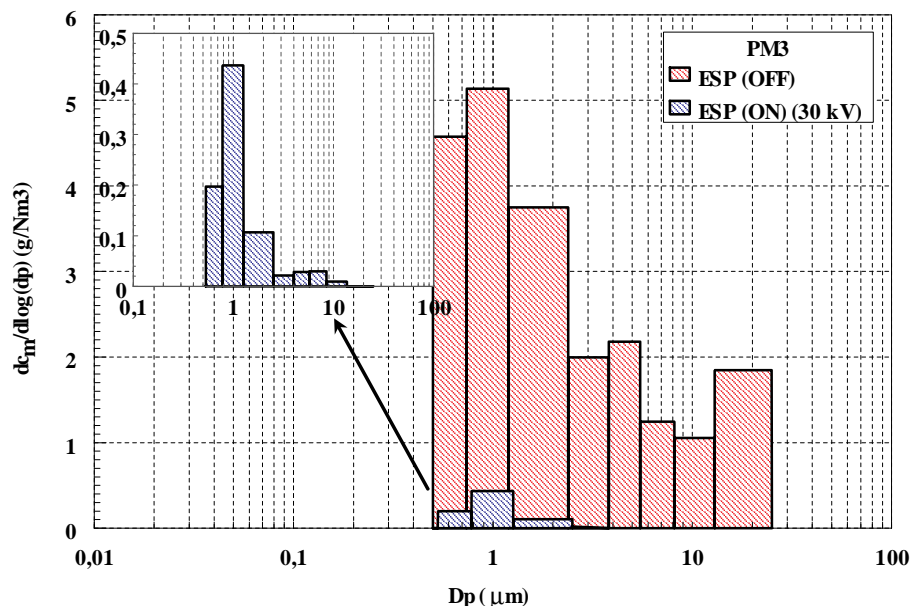


Figura 5-30. Distribución del tamaño de partículas referida al diámetro aerodinámico. Combustión de carbón en LFC.

Se pudo observar, por una parte, que el ESP retenía todas las partículas con un diámetro aerodinámico superior a 14 µm. Por otra, que cuando el ESP actuaba se producía un desplazamiento de la distribución hacia tamaños más pequeños, consecuencia, en principio de un proceso selectivo de la masa en virtud del tamaño de la partícula.

La distribución de tamaño en número de partículas fue determinada a partir de las medidas realizadas simultáneamente con el SMPS y con el instrumento óptico, para diferentes potenciales del secundario del electrofiltro, lo que permitió comparar las distribuciones de tamaño micrométrico y submicrométrico. En la Figura 5-31 se pueden comparar las distribuciones de tamaño correspondientes a los siguientes potenciales: V_2 (kV) = 10, 15, 20, 25, 30 y 35 (Rodríguez Maroto *et al*, 1996b).

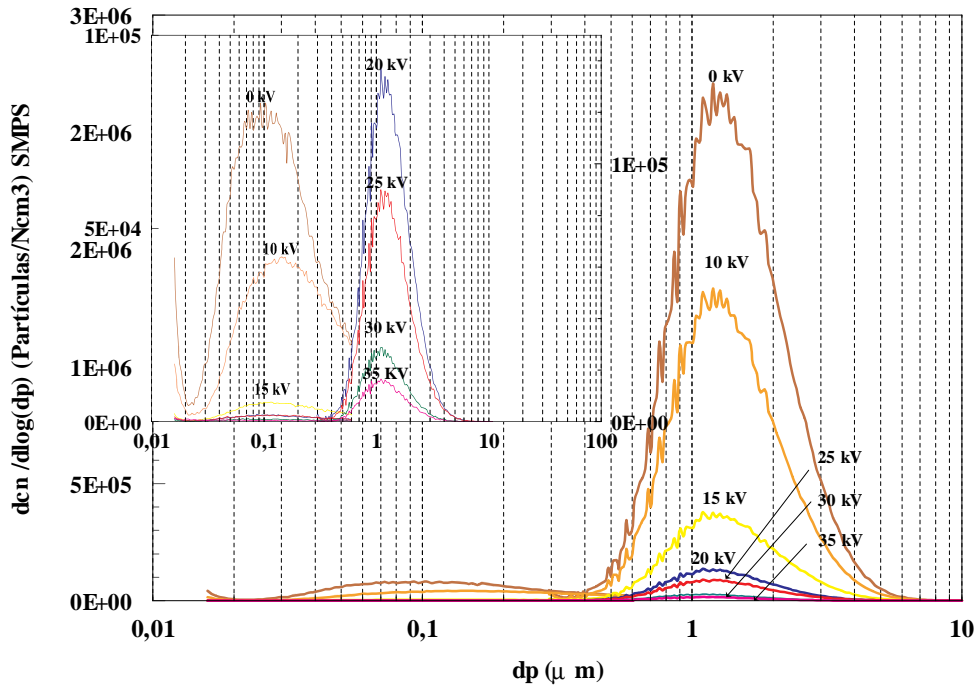


Figura 5-31. Distribución de partículas micrométricas y submicrométricas a diferentes potenciales de funcionamiento del Electrofiltro. Combustión de carbón en LFC.

Por una parte, se comprobó el efecto de retención a lo largo de todo el intervalo de tamaños, tanto mayor cuanto mayor era el potencial aplicado y por otra, se detectó un ligero cambio en la forma de las distribución cuando funcionaba el ESP, posiblemente atribuible a los procesos de aglomeración de carácter electrostático.

A partir de los datos correspondientes a las figuras 5-30 y 5-31, se calculó la eficacia fraccional relativa, referida a la concentración en masa y número de partículas, para el potencial de diseño del ESP, ($V_2=30$ kV), Figura 5-32.

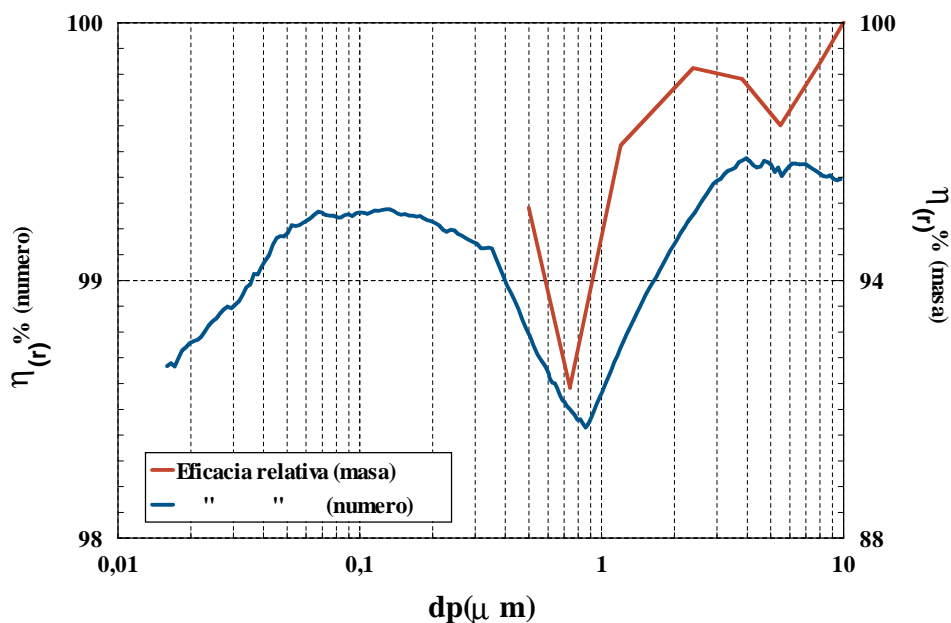


Figura 5-32. Eficacia fraccional relativa en función del diámetro de partícula, referida a la concentración másica y numérica de partículas. Combustión de carbón en LFC.

Para la masa, alcanzó valores superiores al 98 % para partículas mayores que 2 μm , y presentaba un mínimo por debajo del 92% para partículas de diámetro en torno a 0,7 μm .

En cuanto a la eficacia referida al número de partículas, se observaron dos mínimos de eficacia en la retención de partículas; para tamaños $< 0,02 \mu\text{m}$ y $\approx 0,7 \mu\text{m}$. El segundo se correspondía cualitativamente con el mínimo de la masa retenida; aunque la falta de coincidencia cuantitativa indica un diferente comportamiento del electrofiltro frente a la densidad o la morfología, características relacionadas con el tamaño aerodinámico de partícula.

Mediante el análisis de imagen de las microfotografías obtenidas por SEM, se pudo comprobar que la morfología de las partículas emitidas, expresada en función de la

circularidad relativa, después del ESP era función del potencial aplicado. (Rodríguez Maroto *et al*, 1997b) (Figura 5-33).

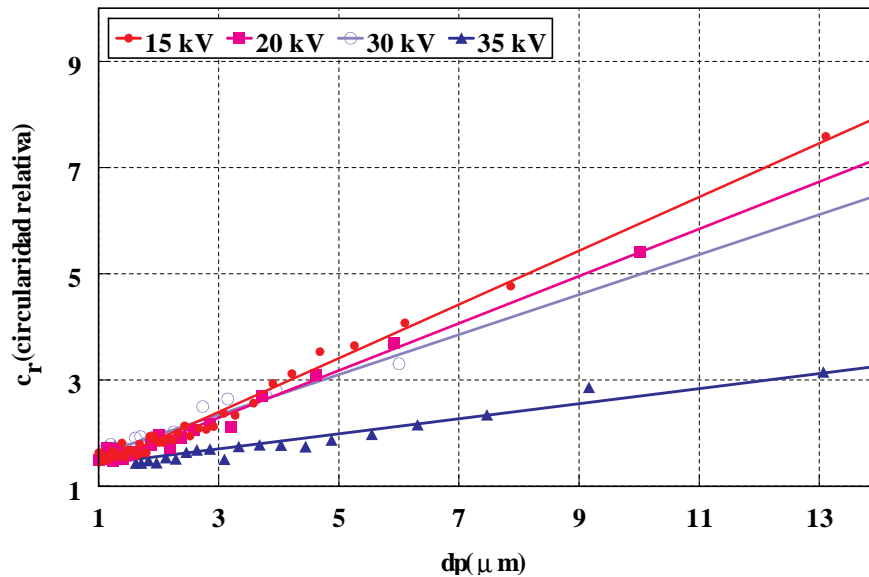


Figura 5-33. Efecto del potencial aplicado sobre la forma de las partículas que atraviesan el electrofiltro. Combustión de carbón en LFC.

Las partículas presentaban una mayor esfericidad cuanto mayor era el potencial aplicado, efecto tanto más apreciable cuanto mayor es el tamaño de partícula. El aumento del potencial supone la disminución de las partículas más irregulares a la salida del ESP; y ello es consecuencia de favorecerse la eliminación de las partículas de mayor tamaño, que a su vez son las más irregulares. Además, la mayor intensidad de campo entre placas favorece el movimiento relativo entre partículas de diferente tamaño y éste, a su vez, incrementa los fenómenos de coagulación electrostática, que hacen que las partículas de menor tamaño se aglomeren con las mayores, con formas más irregulares, favoreciéndose la retención de éstas.

En referencia a la composición química de las partículas, se analizaron los depósitos recogidos en los filtros, utilizando varias técnicas analíticas AAS (Atomic Absorption Spectrometry), ICP-AES (Inductive Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry), e ICP-MS. (Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometry). Con ello, se determinó el efecto del potencial de funcionamiento del ESP sobre la retención de algunos elementos traza como Al, Co, Fe, Mg, Ni, Sr y Ti. (Figura 5-34).

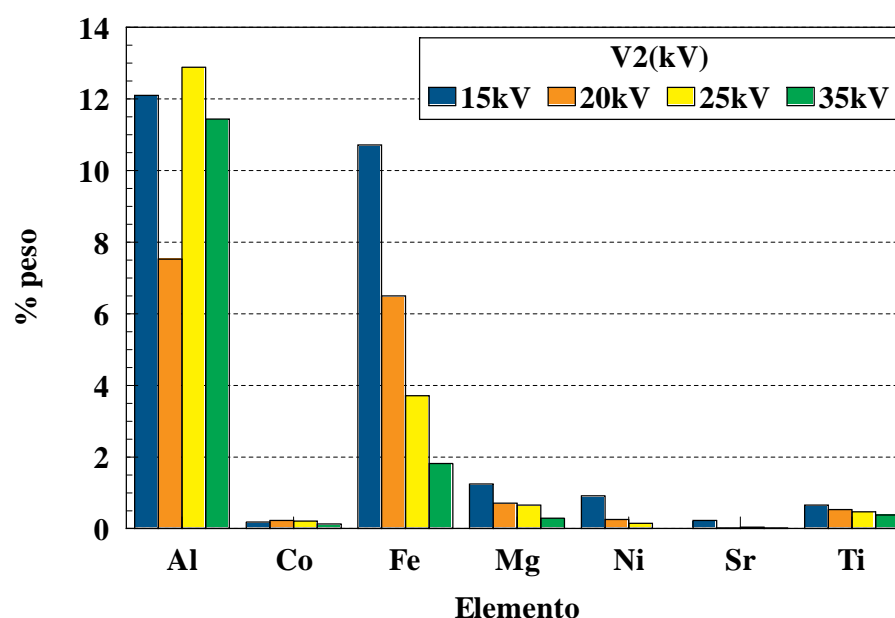


Figura 5-34. Composición de elementos traza en función del potencial aplicado al ESP. Combustión de carbón en LFC.

Casi todos los elementos analizados presentaban una disminución de su porcentaje en peso conforme se incrementaba el potencial, especialmente era significativo el caso del hierro.

Siguiendo la misma metodología, el sistema de caracterización diseñado se aplicó para la validación del electrofiltro frente a las emisiones del motor-generator diesel cuyas características y disposición se definieron en el apartado (5.2.1.3).

La concentración másica fue determinada a partir de los depósitos en filtros y la numérica exclusivamente con el SMPS, ya que el instrumento óptico sólo medía la cola de la distribución detectada con el equipo anterior y los resultados, para varias medidas, eran contradictorios. En la siguiente tabla, se presentan los resultados obtenidos, correspondientes a cada uno de los equipos de medida, sin funcionar el ESP y para el potencial de diseño del secundario del ESP, ($V_2=30$ kV).

Tabla 5-14. Concentración en masa y número para los potenciales del ESP ($V_2 = 0$ y 30 kV). Combustión Diesel de gasoil.

	$V_2(\text{kV})$	
	0	30
Conc. (g/Nm^3)	0,034	0,015
Conc. ($\text{part.}/\text{Ncm}^3$) (*)	$4,1 \times 10^6$	$3,2 \times 10^6$
Conc. ($\text{part.}/\text{Ncm}^3$) (**)	$4,1 \times 10^6$	$3,2 \times 10^6$

(*) medida con el SMPS

(**) concentración total

Estos datos permitieron calcular la eficacia relativa, tanto para la masa retenida $E_{(r)}$ (masa) = 56 %, como para el número de partículas $E_{(r)}$ (número) = 22 %.

Los resultados de la validación referida a la distribución de tamaño en masa, obtenidos con el impactador de cascada no aportaron información significativa ya que el 90 % de la masa emitida como partículas correspondía a tamaños inferiores a $0,8 \mu\text{m}$ (5.2.1.3).

La distribución numérica de tamaño, obtenida con el SMPS, presentaba un ligero desplazamiento hacia tamaños mayores cuando actuaba el precipitador electrostático, Figura 5-35. Los datos del instrumento óptico no eran significativos porque, tal como se aprecia en la figura, su intervalo de medida coincide con la cola de la distribución principal medida con el SMPS y la concentración en número de partículas en ese intervalo es insignificante frente a la medida con el SMPS.

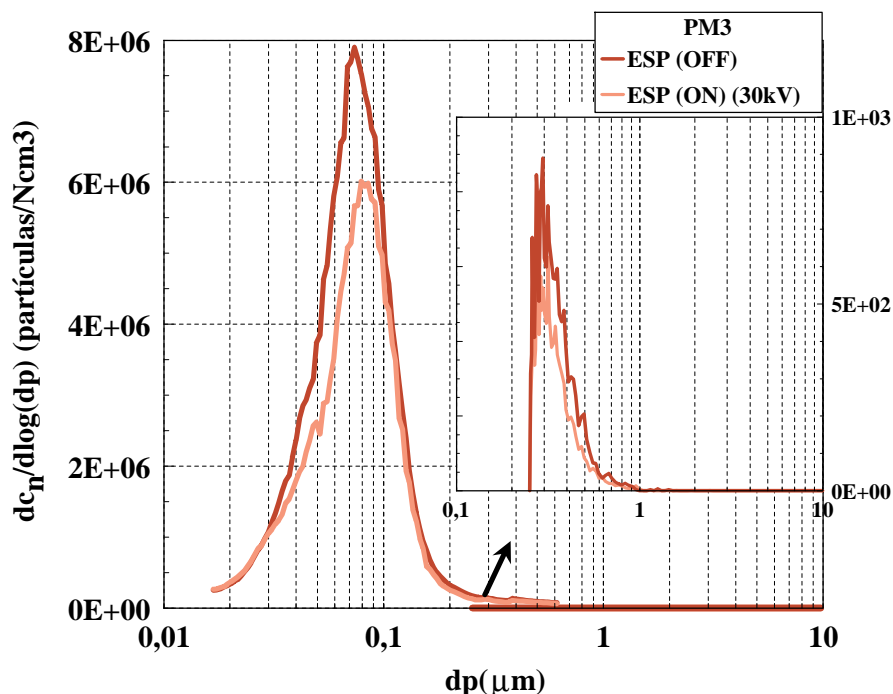


Figura 5-35. Efecto del precipitador electrostático para emisiones Diesel.

La utilización del mismo sistema de caracterización en condiciones similares, usando la misma metodología y la misma instalación, pero diferentes aerosoles permitió comparar la eficacia de funcionamiento del sistema de separación validado. En la Figura 5-36, se presenta la eficacia fraccional relativa calculada para los dos aerosoles estudiados, procedentes de la combustión de carbón en LFC y de la combustión de gasoil en un motor generador diesel, respectivamente.

El precipitador electrostático analizado presentaba una gran eficacia de separación $> 98 \%$ para cualquier tamaño de partícula procedentes de la combustión de carbón en LFC, en contraste a las partículas de combustión de gasoil que son separadas con eficacias inferiores al 40 %, probablemente debido a la menor resistividad eléctrica. En la combustión de carbón las partículas de emisión tienen resistividades de $\approx 10^{14} \Omega\text{cm}$, por estar formadas principalmente de sílice y alúmina que tienen propiedades aislantes. Las partículas de

gasoil la forman principalmente núcleos de carbono grafitico e hidrocarburos adsorbidos o condensados en su superficie, que hacen que su resistividad sea menor.

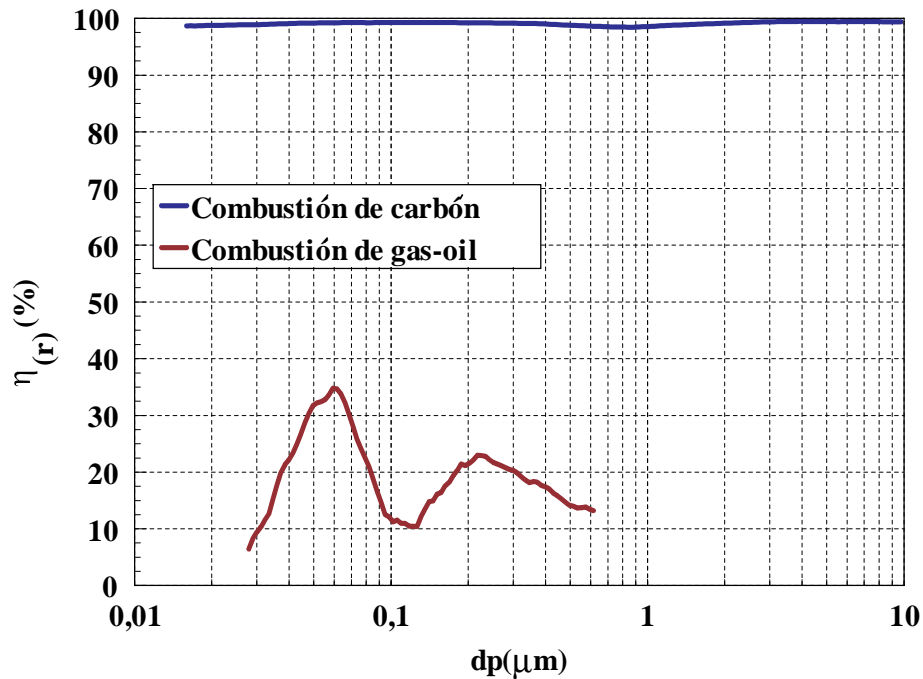


Figura 5-36. Eficacia relativa en función del diámetro de partícula, en emisiones de combustión de carbón en LFC y de gasoil en un motor diesel.

5.2.2.2 Sistema de aglomeración acústica-retención electrostática.

El sistema de caracterización de partículas fue empleado asimismo para validar el funcionamiento de un aglomerador acústico o filtro acústico.

El filtro acústico, FA (Instituto de Acústica del CSIC, Patente 9300707) consiste en una cámara de sección rectangular (3,6 m x 0,5 m x 0,7 m), con cuatro transductores macrosónicos, aislada térmica y acústicamente, Figura 5-37.

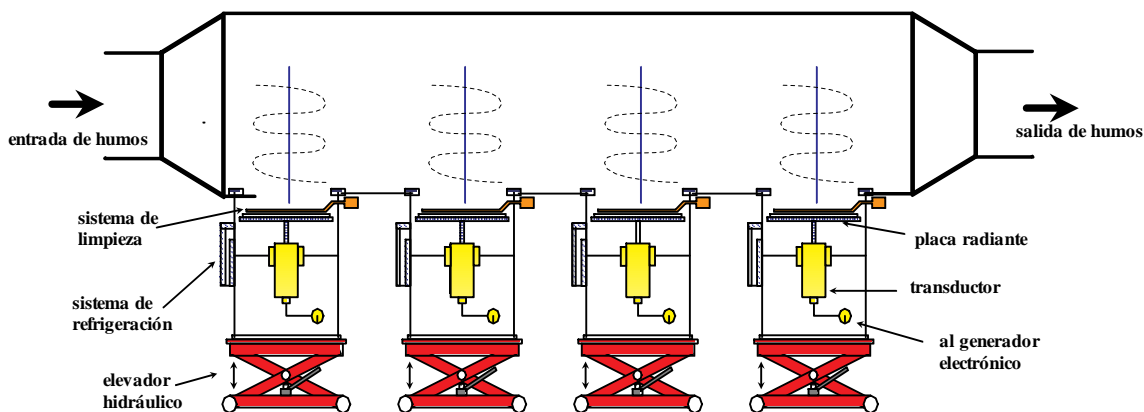


Figura 5-37. Esquema de la cámara de aglomeración acústica o filtro acústico FA.

Se emplearon dos tipos de transductores macrosónicos para generar frecuencias acústicas de 10 y 20 kHz, respectivamente. Básicamente, constan de un vibrador tipo sándwich (cerámicas piezoeléctricas, PZT4), un amplificador mecánico y una placa radiante circular de titanio ($\phi = 67$ cm ($f = 10$ kHz) y $\phi = 48$ cm ($f = 20$ kHz)). Tienen una capacidad de potencia de 1 kW ($f = 10$ kHz) y 0,5 kW ($f = 20$ kHz).

El filtro acústico, FA estaba integrado en la línea de proceso definida en el apartado 5.2.1.2, (Figura 5-19), delante del ESP.

La validación se realizó, en primer lugar, a partir de las medidas de emisión procedentes de la planta de combustión de lecho fluido circulante del CIEMAT, quemando carbón de Compostilla, (Tabla 5-4), funcionando el ESP en las condiciones de diseño ($V_2 = 30$ kV) y situando la estación de muestreo y medida en el punto (PM3), lo que implicaba que el efecto del campo acústico era de esperar que produjera una mejora de la eficacia de retención del ESP.

El fenómeno de aglomeración de partículas se manifiesta básicamente por la disminución de la concentración en número y el crecimiento del tamaño medio. Si, además, existe deposición, se producirá adicionalmente una disminución de la concentración másica. Por tanto, el sistema de muestreo y medida de partículas para validar un fenómeno de este tipo debe proporcionar, al menos, la siguiente información:

- Concentración total en masa y en número de partículas.
- Distribución de tamaño de partícula referida al número.

La concentración másica y numérica cuando el FA estaba en situación “ON” o “OFF”, se determinó para diferentes concentraciones iniciales, lo que permitió determinar una concentración umbral $0,4 \text{ g/Nm}^3$, y $\approx 2 \times 10^4 \text{ partículas/Ncm}^3$, por debajo de la cual no se apreciaba efecto alguno del campo acústico. Hay que considerar que el número de partículas es determinante en el proceso de aglomeración, ya que condiciona el número de colisiones.

En la Figura 5-38, se representa la mejora de la eficacia de retención del ESP, relativa a la masa y al número de partículas, para una concentración de entrada a la cámara acústica de $\approx 5 \text{ g/Nm}^3$ ($\approx 9 \times 10^5 \text{ partículas/Ncm}^3$), y distintas condiciones de operación del FA .

Se ensayaron dos frecuencias acústicas (10 y 20 kHz) y tres potencias: 4 transductores de 80W (4Tx80W); 2 de 400W (2Tx400) y 4 de 400 W (4Tx400W). Se observó, en general, un incremento en la eficacia de retención del ESP al aumentar la potencia y la frecuencia acústica aplicada. Para la mayor frecuencia y potencia, se obtenía una mejora de la eficacia de retención en el ESP superior al 30% referida a la concentración másica y de $\approx 40 \%$ referida a la numérica, (Rodríguez Maroto *et al*, 1996), (ENDESA, 1996), (Gallego-Juárez *et al*, 1999).

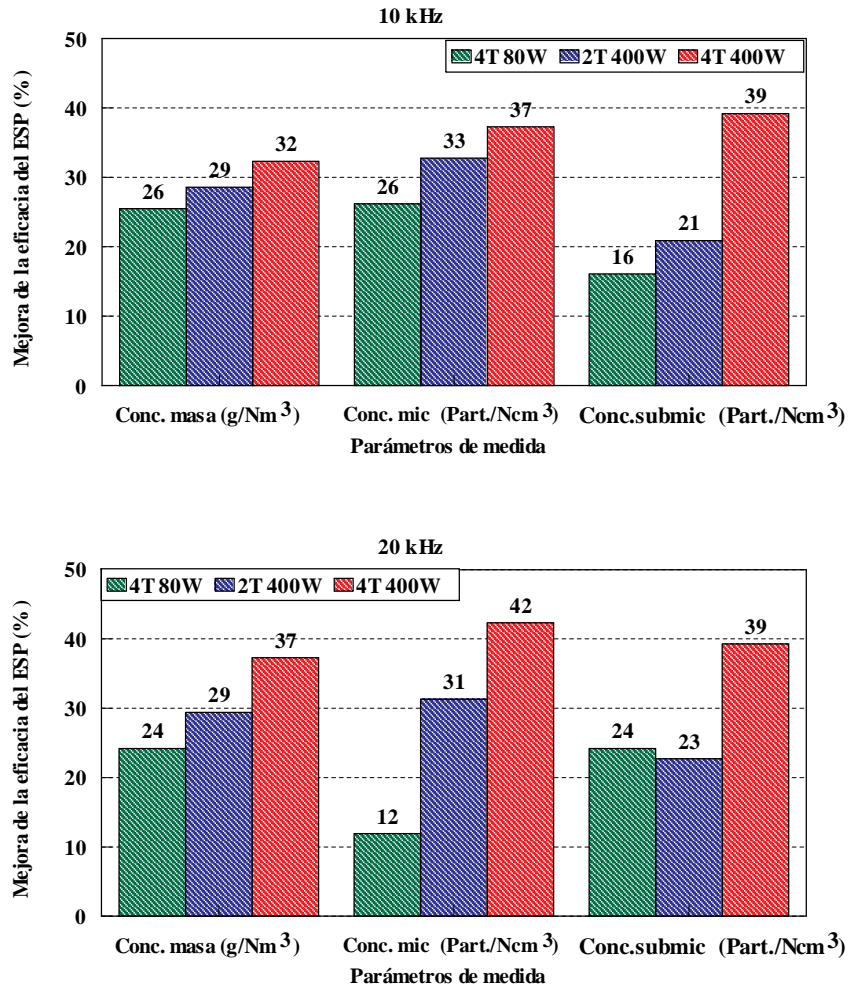


Figura 5-38. Mejora de la eficacia del ESP, debido a la aglomeración acústica en FA, expresada en concentración másica y numérica (intervalos de tamaño micrométrico y submicrométrico). Combustión de carbón en LFC.

La distribución numérica determinada con el instrumento óptico y con el SMPS no señalaba ningún desplazamiento hacia tamaños mayores, característico de los procesos de aglomeración (Figura 5-39).

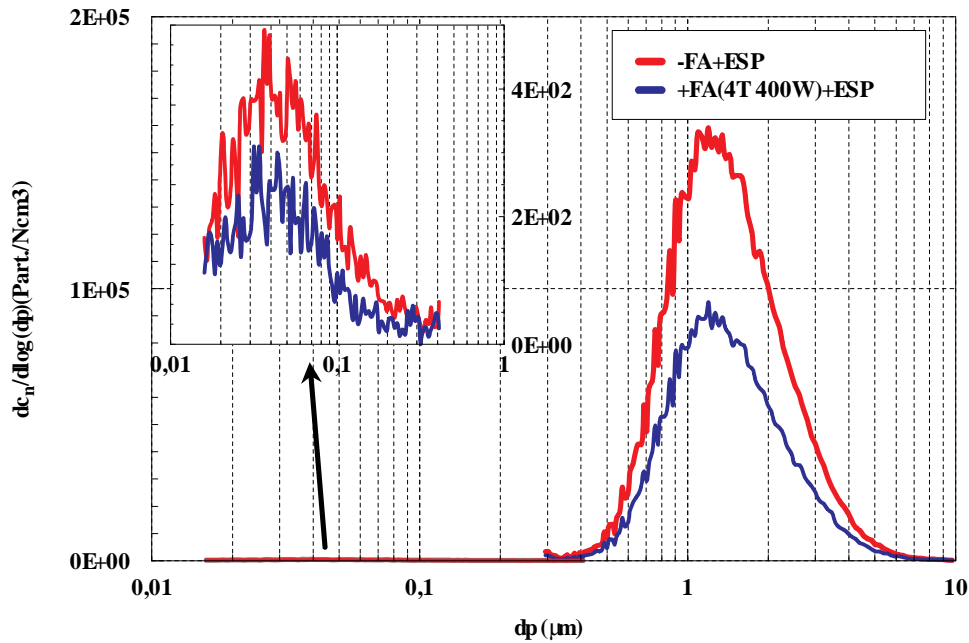


Figura 5-39. Distribución de tamaño de partículas en PM3 (ESP 30 kV) y FA(4Tx400W y 20 kHz). Combustión de carbón en LFC.

Como la disminución de la concentración de partículas está ligada al funcionamiento del campo acústico (Figura 5-38), probablemente la aglomeración acústica se solapase con el fenómeno de sedimentación gravitacional en la cámara y con el de precipitación electrostática en el ESP, lo que hacía que las partículas de mayor tamaño, formadas por aglomerados se eliminasen en cualquiera de los dos dispositivos.

A partir de la distribución de tamaño de partículas obtenida para diferentes condiciones de funcionamiento del sistema de aglomeración acústica, se estimó el efecto de aglomeración como mejora de la eficacia fraccional del ESP para todo el intervalo de medida. (Figura 5-40).

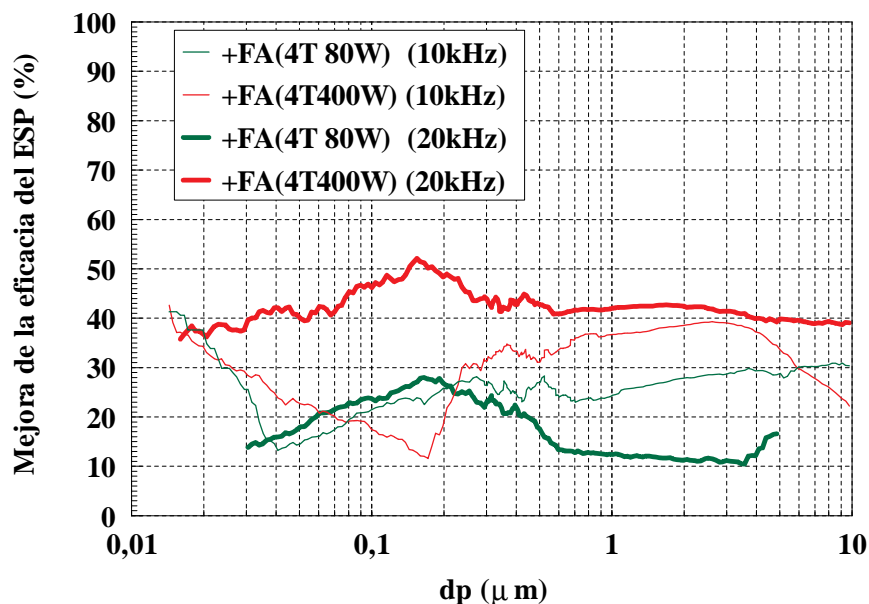


Figura 5-40. Mejora de la eficacia fraccional del ESP por efecto de la aglomeración en FA, en diferentes condiciones de potencia, (4T80W) y (4T400W) y frecuencia acústica, 10 kHz y 20 kHz. Combustión de carbón en LFC.

Mientras que para la frecuencia de 20 kHz, las curvas que representan la mejora de eficacia del ESP seguían una tendencia similar para distinta potencia, las correspondientes a 10 kHz producían resultados anómalos.

Siguiendo la misma metodología, el filtro acústico fue validado frente a las emisiones del motor-generador diesel (5.2.1.3). Pero para eliminar el efecto de precipitación electrostática, la estación de muestreo se situó en PM₂ después de FA y antes del ESP. El estudio se redujo a las condiciones de máxima potencia, 4 transductores a 400 W y, siendo el caudal de aerosol tratado de 1000 - 1100 Nm³/h.

La concentración máscica y numérica de partículas fue determinada para los dos tipos de transductores de 10 kHz y 20 kHz (Tabla 5-15).

Tabla 5-15. Concentración en masa y número, medidas en PM2, funcionando el FA (4T 400W) y frecuencias de 10 y 20 kHz. Combustión Diesel de gasoil.

	10 kHz		20 kHz	
	“OFF”	“ON”	“OFF”	“ON”
Conc. (g/Nm³)	0,006	0,006	0,003	0,002
Conc. (part./Ncm³) (*)	7,3x10 ⁶	7,3x10 ⁶	5,2x10 ⁶	3,9x10 ⁶

(*) medida con el SMPS

A partir de estos datos se podía valorar exclusivamente el efecto de la aglomeración y deposición en la cámara acústica. Si la frecuencia era 10 kHz, tanto para la concentración másica como numérica, el efecto acústico era nulo. Cuando la frecuencia era de 20 kHz se apreciaba una deposición en la cámara de la masa de partículas del 33 % y una disminución del número en 25 %.

La distribución de tamaño de partículas no presentaba cambios significativos al aplicar diferente frecuencia.

Una de las aplicaciones a destacar del sistema de muestreo y medida fue la validación del FA con vapor de agua adicional en la línea de proceso. La humedad de los gases es un factor muy importante en el proceso de aglomeración porque favorece la adhesión de las partículas que colisionan, (Hinds, 1982).

El agua se inyectaba mediante un dispersador introducido en la línea de proceso, después del calentador de aire de dilución y antes del punto PM1, hasta conseguir una humedad del 6% (V/V).

Se comprobó, por una parte, que la humedad incrementaba de forma significativa, en más del 50 %, la retención de aerosoles de tamaño cercano a la micra. Por otra parte, mejoraba significativamente el proceso de aglomeración y retención de las partículas

submicrométricas, incluso en las condiciones menos favorables ensayadas con los transductores de baja frecuencia (10 kHz) (Rodríguez Maroto *et al* 2000).

En la siguiente figura, se representa el efecto acústico unido al de la humedad expresandose como eficacia relativa de deposición del FA medido en PM2, en función del diámetro de partícula.

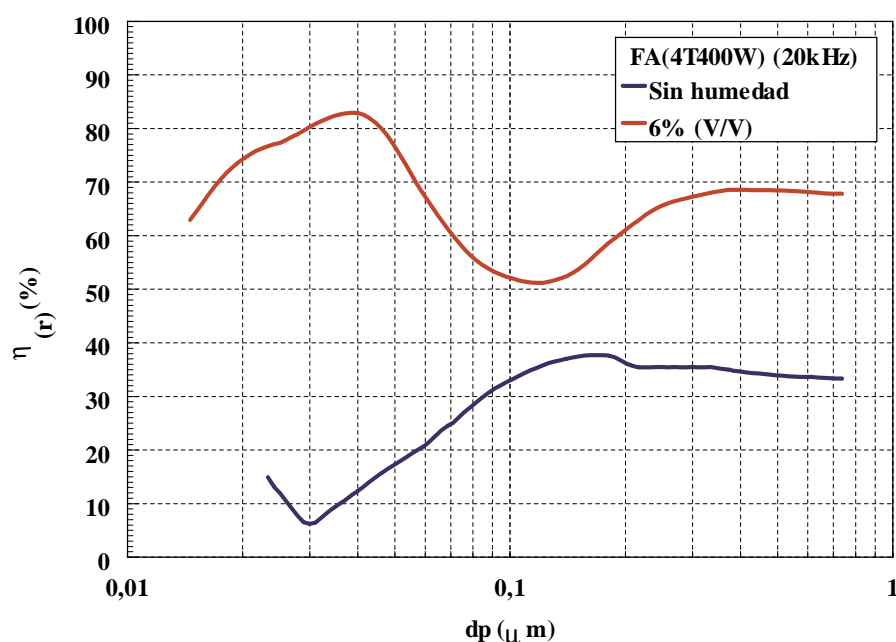


Figura 5-41. Eficacia relativa del FA en PM2, en función del tamaño de partícula para las condiciones óptimas de funcionamiento de la cámara acústica (4T400W) y 20 kHz. Combustión diesel de gasoil.

Se observó que la cámara acústica para este tipo de partículas mostraba menores eficacias que para las de combustión de carbón, cuando sólo existía la humedad propia de los gases de combustión; aunque también presentaba un máximo de eficacia en torno a 0,2 μm. La inyección de agua suponía una mejora global del fenómeno de aglomeración,

incrementando la eficacia hasta valores del 80%, especialmente para las partículas más pequeñas, pero las de mayor tamaño también presentaban eficacias superiores al 50 %.

En la siguiente figura, se representa el efecto de aglomeración acústica en la distribución de tamaño de partículas, expresada como concentración numérica medida en PM2, para las óptimas condiciones de funcionamiento de la cámara de aglomeración, es decir máxima potencia, (4T400W), máxima frecuencia 20 kHz y presencia de humedad (6% V/V).

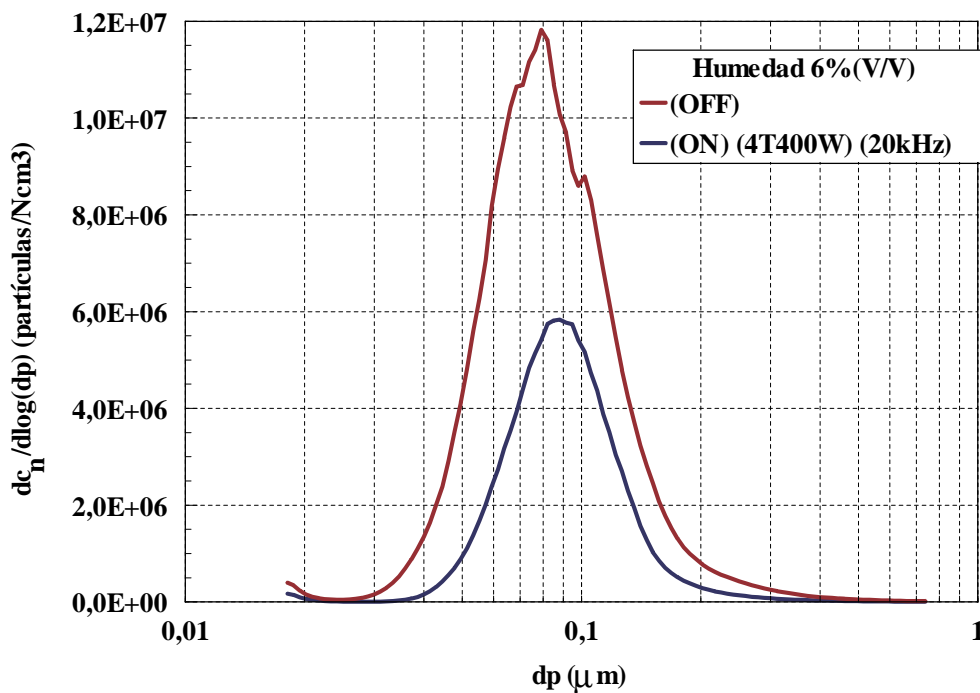


Figura 5-42. Distribución de tamaño de partículas en PM2 (ESP 30 kV) y FA(4Tx400W y 20 kHz). Combustión diesel de gasoil.

El incremento de la aglomeración acústica debido a la humedad se pone de manifiesto no sólo en la disminución de la concentración de partículas medidas en PM2, sino además, en el apreciable desplazamiento de la distribución hacia mayores tamaños de partícula.

La aplicación del sistema muestreo y medida, a la validación del precipitador electrostático y la cámara de aglomeración acústica, ha permitido demostrar su capacidad de proporcionar una información suficiente para analizar el funcionamiento de un sistema de control de partículas, ya que permite:

- Cuantificar globalmente el efecto de separación o filtración, determinando la eficacia de retención total en cuanto a masa y número de partículas.
- Extender el proceso de validación al intervalo de tamaño de partícula desde 0,01 a 20 μm , determinando la eficacia fraccional, tanto en masa como en número y los intervalos de tamaño de partícula para los que existe menos probabilidad de ser retenidas, que es lo que se conoce como “ventana” de un sistema de filtración.
- Estudiar el funcionamiento del equipo en base a cualquier parámetro determinante en el proceso de separación o filtración, ya sea propio de las partículas dispersas, del medio dispersante o de la tecnología de filtración.
- Comparar la eficacia de funcionamiento del sistema de separación validado con aerosoles de diferentes características.

5.2.3 Otras aplicaciones.

Además de las aplicaciones analizadas anteriormente, el mismo sistema de muestreo y medida ha sido utilizado en diferentes estudios que se mencionan a continuación:

1. Caracterización de partículas y gases en las emisiones de la Central Diesel de Generación de electricidad de GESA, Mahón (Menorca) (Rodríguez-Maroto *et al*, 2001).
2. Estudio de las emisiones (compuestos orgánicos volátiles, COVs, hidrocarburos aromáticos policíclicos, HAPs y partículas) generadas en los procesos de

combustión de biomasa. (CEDER, Centro de Estudios de Energías Renovables, Soria). (Sáez *et al*, 2000).

3. Estudio experimental sobre emisiones contaminantes en un motor diesel de 0.5 MW, trabajando en condiciones de generación y cogeneración (Cerámicas de Mira, Cuenca). (Rodríguez-Maroto *et al*, 2002.).
4. Caracterización de partículas de emisión de la combustión de residuos de piel y mezcla de orujillo/carbón en una planta de combustión de lecho fluido burbujeante (CIEMAT).

6. CONCLUSIONES.

- I. Se ha realizado el diseño, montaje, validación y aplicación de un sistema de muestreo y medida que permite la caracterización integral de partículas de aerosol, en emisiones a escala semindustrial e industrial.

- II. El sistema ha sido diseñado para realizar medidas secuenciales o simultaneas con todos los equipos que lo configuran: a) un instrumento óptico de dispersión de luz blanca para la medida del número de partículas micrométricas, b) un clasificador

por movilidad eléctrica diferencial junto a un contador de núcleos de condensación para clasificación y conteo de partículas submicrométricas, c) un filtro para determinación gravimétrica y análisis químico, d) un impactador de cascada para obtener la distribución de tamaño aerodinámico y e) un dispositivo de captura para el análisis por microscopía electrónica de barrido y composición química elemental. f) De forma adicional, un cartucho adsorbente para el análisis químico de hidrocarburos en la fase gas

- III. La caracterización completa de los aerosoles, que se consigue con este sistema, se basa en la obtención de información relevante para los diferentes intervalos de tamaño de partícula, de forma que su análisis de manera conjunta permita establecer una imagen real de las partículas en estudio en todo su intervalo de existencia.
- IV. La eficacia de transporte de las partículas de aerosol hasta cada uno de los equipos de medida es específica para cada configuración. En el sistema de muestreo y medida presentado, la representatividad de las partículas está determinada por la deposición y coagulación en los siguientes equipos: divisor de flujo, ciclón de corte, cámara de muestreo, secador por difusión y preimpactador. Por ello, se ha validado teórica y experimentalmente, determinando la eficacia de transporte individual de cada equipo y la total. Del proceso de validación individual de los equipos, puede resaltarse que:
- IV-i. En el divisor de flujo, se divide el caudal con una eficacia de transporte, en cuanto a partículas, superior al 85 % para partículas menores a $0,1 \mu\text{m}$, y por debajo del 20 % para las mayores que $10 \mu\text{m}$.
- IV-ii. El ciclón de corte elimina todas las partículas mayores que $2 \mu\text{m}$, pero también elimina parte de las partículas submicrométricas.

-
- IV-iii. La cámara de muestreo tiene una eficacia de transporte superior al 95 % para las partículas submicrométricas, cuya pérdida es consecuencia de la deposición por difusión y de la aglomeración.
- IV-iv. El secador de difusión presenta un nivel de secado superior al 99 % pero puede tener elevadas pérdidas por aglomeración y deposición (hasta 86 % en masa y 61 % en número de partículas). La eficacia fraccional presenta un máximo (> 85 %) para partículas entre 0,1 – 0,3 μm , pero puede disminuir hasta el 20 % para partículas de tamaño menores a 0,04 μm y para las mayores a 1 μm .
- IV-v. El preimpactador tiene un diámetro de corte que aumenta con el tamaño de la tobera y para una tobera determinada, disminuye con el caudal. Las partículas submicrométricas, menores a un determinado tamaño, son más retenidas cuanto menor es el caudal. Para una tobera de 0,0508 cm, el diámetro de corte es 0,8 μm , para el caudal de 0,3 l/min. y tiene una eficacia de transporte de \approx 0,9 para las partículas de tamaño < 0,1 μm .
- IV-vi. A partir de las funciones de eficacia individuales, obtenidas para cada uno de los dispositivos analizados, se puede determinar el efecto secuencial sobre el aerosol que se pretenda caracterizar, dependiendo de la configuración utilizada en el sistema de muestreo y medida.
- V. El sistema desarrollado permite la comparación de emisiones procedentes de tecnologías de combustión diferentes.

Su aplicación en la caracterización de las emisiones de combustión de carbón pulverizado, CP y Lecho Fluido Circulante LFC conduce a una serie de observaciones fundamentales:

- V-i. Ambas emisiones presentaban una distribución de partículas de tipo bimodal, en el intervalo de tamaño de medida del SMPS y el contador óptico, (0,1 - 20

μm), pero la moda submicrométrica era más significativa que la micrométrica en las emisiones de CP, ocurriendo lo contrario en las de LFC.

- V-ii. Las microfotografías de SEM permitieron determinar la morfología de las partículas y su variación con el tamaño, observándose que las partículas de emisión en combustores tipo CP tenían formas casi esféricas, mientras que las de LFC eran más irregulares, (estructuras laminares).

La aplicación en las emisiones de combustión de gasoil de un motor Diesel da lugar a las siguientes consideraciones:

- V-iii. Se detectaron tres modas en la distribución de tamaño de estas emisiones. Cada una por un instrumento diferente: $0,01-0,1 \mu\text{m}$ (SMPS), $\approx 10 \mu\text{m}$ (impactador de cascada) y $0,001-0,01 \mu\text{m}$ (SEM/AI). Aunque la preponderancia de la moda intermedia respecto a las otras dos, le daba un carácter básicamente monomodal a la distribución.
- V-iv. Los aglomerados en las emisiones Diesel eran menos irregulares que los de igual tamaño en emisiones de combustión de carbón, según SEM/AI.
- V-v. Se puso de manifiesto la necesidad de definir perfectamente las condiciones en las que se realiza la caracterización porque, a diferencia de otros tipos de aerosoles, como los de emisiones de combustión del carbón, son altamente dinámicos y sujetos a cambios físicos y químicos.
- VI. El sistema desarrollado permite la validación y comparación de sistemas de separación y filtración diferentes, en base a cualquiera de las propiedades características del aerosol y de la tecnología de filtración.

La aplicación del sistema de muestreo a la validación de un electrofiltro en función del potencial secundario, permitió determinar:

-
- VI-i. La eficacia global de separación en relación a la concentración másica y numérica de partículas. Para obtener eficacias superiores al 90 % (masa y número), era suficiente un potencial de 20 kV. Sin embargo, el 99 % de retención sólo se consiguió al aplicar un potencial adicional de casi el doble.
 - VI-ii. La eficacia fraccional, en relación a la concentración másica y numérica de partículas. Ésta presentaba dos mínimos: uno para las partículas de tamaño entre 0,3 y 0,6 μm y el otro para las de aproximadamente 0,02 μm . En ambos casos la eficacia decae por debajo del 98 %.
 - VI-iii. La morfología de las partículas emitidas después del ESP es función del potencial aplicado. El aumento de potencial favorece la retención de las partículas más irregulares.
- VII. La aplicación del sistema de muestreo a la validación del aglomerador de partículas permitió:
- VII-i. Cuantificar la mejora de la eficacia global y fraccional de un sistema de filtración convencional, en este caso un ESP cuando previamente se sometía al aerosol a un proceso de aglomeración forzado por campos acústicos.
 - VII-ii. Optimizar el proceso de aglomeración acústica. Se obtuvo una mejora de la eficacia del electrofiltro en un 40 % a frecuencia de 20 kHz y 1600 W de potencia, y en presencia de humedad hasta de un 50 %.

6.1 PERSPECTIVAS DE FUTURO.

El diseño y aplicación del sistema de caracterización presentado abrió, una línea de investigación con el fin genérico, de optimizar su funcionamiento. El cumplimiento de este objetivo implica a todas las partes del sistema, sirviendo como ejemplo las siguientes tareas que en principio se pretende realizar, algunas de ellas comenzadas ya:

- a. Muestreo.
 - Estudio de sondas de muestreo diseñadas para tubos de pequeño diámetro.
- b. Instrumentación de Medida.
 - Validación y optimización de un captador termoforético diseñado para muestras de análisis por SEM.
 - Acoplamiento de otros instrumentos de medida como un impactador de baja presión o dispositivos de muestreo de gases.
- c. Acondicionamiento.
 - Si bien la validación de los equipos se realizó en función del caudal, no se hizo en función de la temperatura, por tanto es necesario comprobar el efecto de ésta en el proceso de transporte.
 - Optimización y validación del sistema de dilución.
- d. Sistema integrado de muestreo y medida.
 - Automatización del sistema de división de flujo simultaneo y en general del sistema de muestreo.
- e. Tratamiento de datos.
 - Mejora del software del tratamiento de datos.

El sistema de muestreo y medida presentado ha servido de prototipo para el diseño y construcción de un sistema secuencial automático. Que consta de cuatro módulos, el primero permite la medida secuencial de tres filtros, de 47 mm (4.2.2.3) y otro de 90 mm; el segundo, de dos impactadores de cascada (4.2.2.2), el tercero de un dispositivo SEM (4.2.2.1), el cuarto incorpora el instrumento óptico (4.2.1.1) y el SMPS (4.2.1.2) y los

equipos de acondicionamiento. La selección del instrumento de medida y las condiciones de muestreo se realizan de forma automática a través de un programa de ordenador (Kasper *et al*, 2001).

Agarwal, J.K. y Sem, G.J. 1980. "Continuous Flow Single Particle Counting Condensation Nuclei Counter". *Journal of Aerosol Science*, 11, nº 4, pp343-357.

American Public Health Association. 1977. "Methods of Air Sampling and Analysis". Morris K. Editor Washington.

Armesto, L.; Merino, J.L. y Cabanillas, A. 1995. "Characterization of AFBC and PFBC residues". 8th International Conference on Coal Science". Proceeding (ISBN: 0-444-82227-5). Oviedo.

Belyaev y Levin. 1972. "Investigation of aerosol aspiration by photographing particle tracks under flash illumination". *Journal of Aerosol Science*, 3, pp127-140.

Berner, A.; Lürzer, C.; Pohl, F.; Preining, O. y Wagner, P. 1979. "The size distribution of the urban aerosol in Vienna". *Sci. Tot. Envir*, 13, pp245-261.

Berner, A.; Reischl, G. y Puxbaum, H. 1984. "Size distribution of traffic-derived aerosols". *Sci. Tot. Envir*, 36, pp299-303.

Bernhard, R. 1981. "Rapid Measurement of Particle Size Distributions by use of Light Scattering Methods". PARTEC, Nuremberg.

Cabanillas, A; Armesto, L y Otero, J. 1996. "Combustión de residuos en lecho fluidizado". *Tecnoambiente*, 66.

Cheng, Y.S. y Yeh, H.C. 1979. "Particle bounce in cascade impactor". *Environment. Science & Technology*, 13, pp1392-1395.

Cheng, Y.S. y Yeh, H.C. 1980. "Theory of a screen type diffusion battery". *Journal of Aerosol Science* 11, pp313-320.

Cheng, Y.S. y Yeh, H.C. 1983. "Performance of a screen type diffusion battery. Aerosol in the Mining and Industrial Work Environments". (ed. By Marple y Liu) pp1077-1094. Ann Arbor Sci.

Cheng, Y.S. y Yeh, H.C. 1984. "Analysis of Screen diffusion battery data". *American Industrial Hygienist Association Journal*, 45, pp556-561.

Christensen, K.A. y Livbjerg, H. 1996. "A Field Study of Submicron Particles from the Combustion of Straw". *Aerosol Science & Technology*, 25, pp185-199.

Costa Novella, E.; Calleja Pardo, G.; Ovejero Escudero G., de Lucas Martínez, A; Aguado Alonso, J.; Uguina Zamorano, M.A. 1984. "Ingeniería Química 2. Fenómenos de Transporte". Ed. Alhambra (Madrid).

Costa Novella, E.; Calleja Pardo, G.; Ovejero Escudero G., de Lucas Martínez, A; Aguado Alonso, J.; Uguina Zamorano, M.A. 1986. "Ingeniería Química 4. Transmisión del calor". Ed. Alhambra (Madrid).

Crane, R.I. y Evans, R.L. 1977. "Inertial deposition of particles in bends of circular pipe". Journal of Aerosol Science, 8, pp161-170.

Díaz Peña, M.; Roig Muntaner, A. 1980. "Química Física". Volumen II. ISBN 84-205-0575-7. Alhambra.

Dolan, D.F.; Fissan, H.J.; Kittelson, D.B. and Scherrer, H.C. 1983. "Model Calculation for an Infrared Light Extinction Diesel Exhaust Smoke Meter". Aerosol- Volume 3- Instrumentation. Marple and Liu. Aerosol In the Mining and Industrial Work Environments. Ann Arbor Science.

Dittus, F.W. y Boelter, L.M.K. 1930. Univ California Publs Eng., vol.2 p 443 1930. a través de: Yamano, N y Brockmann, J.E. 1989. "Aerosol sampling and transport Efficiency Calculation (ASTEC) and Application to Surtsey/DCH Aerosol sampling System NUREG/CR.

E. I. Kauppinen. 1991. "Aerosol Formation in Coal Combustion Processes". Journal of Aerosol Science, 22, ppS451.

ENDESA, ASINEL, IA/CSIC, CIEMAT, y DURO FELGUERA. 1996. "Desarrollo de filtros acústicos para la aglomeración y separación de micropartículas en gases de combustión de carbón". Informe Final 1ª Fase. ENDESA/Proyecto PIE nº 131.095. Madrid, Marzo de 1996.

Fissan, H. y Schwientek, G. 1987. "Sampling y Transport of Aerosols". TSI Journal of Particle Instrumentation, 2, pp2.

Fissan, H.J. y Helsper, C. 1983 "Aerosol in the Mining and Industrial Work Environments". Virgil A. Marple y Benjamin, Y.H. Liu. Volume 3. Instrumentation. Ann Arbor Science. Michigan.

Friedlander, S.K. 1977. "Smoke, Dust, y Haze". Willey. New York.

Friedlander, S.K. and Morton Lippmann. 1994. "Revising the Particulate Ambient Air Quality Standard". Environment Science and Technology. 28, 3.

Fuch, N.A. 1964. "The Mechanics of Aerosol". Oxford: Pergamon Press.

Gallego, J.A.; Riera, E.; Elvira, L.; Rodríguez, G.; Vázquez, F.; Hoffmann, T.L. and Montoya, F. 1995a "Acoustic Preconditioning of Coal Combustion Fumes for Enhancement of Electrostatic Precipitator Performance: I The Acoustic Preconditioning System". Coal Science, Elsevier Science pp 1903-1905. 8th International Conference on Coal Science. Oviedo (Asturias), 10-15 September 1995.

Gallego, J.A.; Riera, E.; Rodríguez, G.; Galvez, J.C.; Hoffmann, T.L.; Vazquez, F.; Rodríguez Maroto, J.J.; Gómez Moreno, F.J.; Martín Espigares, M.; Acha, M. and Montoya, F. 1995b "A pilot scale acoustic system for fine particle removal from coal combustion fumes". World Congress on Ultrasonic, Proceeding, Berlin 1995.

Gallego-Juárez, J.A.; Riera-Franco de Sarabia, E.; Rodríguez-Corral, G.; Hoffmann, T.L.; Gálvez-Moraleda, J. C.; Rodríguez-Maroto, J. J.; Gómez-Moreno, F. J.; Bahillo, A; Martín-Espigares, M. y Acha, M. 1999. "Application of the acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions in coal combustion plants". Environmental Science & Technology, 33 (21), pp3843-3849.

Hangal y Willeke. 1990. "Overall efficiency of tubular inlets sampling at 0-90 degrees from horizontal aerosol flows". Atmospheric Environment, 24A(9), pp2379-86.

Hausen, H. 1943. "VDI-Z Beich, Verfahrenstech", vol. 4 p.91 a través de: Yamano, N y Brockmann, J.E. 1989. "Aerosol samplig and transport Efficiency Calculation (ASTEC) and Application to Surtsey/DCH Aerosol sampling System NUREG/CR-5252. Sand88-144.

Helsper, C. y Molter, W. 1987. "Determination and neutralization of the Charge Produced by Dispersion of Powder". 15th annual conference of the GaeF, Sept. 9-11, 1987 Hannover, FRG:

Heyder, J. y Gebhart, J. 1977. "Gravitational deposition of particles from laminar aerosol flow through inclined circular tubes". Journal of Aerosol Science, 8, pp289-295.

Hillamo, R.E. y Kauppinen, E. 1991. "On the performance of the Berner low pressure impactor". Aerosol Science & Technology, 14, pp33-47.

Hinds, W.C. 1982. "Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles". John Wiley & Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapur.

Holman, J.P. 1972. "Heat Transfer". McGraw-Hill. New York.

Horton, K.D. 1988. "A Software Package to Operate Polytec Optical Aerosol Analysers Equipped with the PSE-1500 Controller- Technical Background". AEEW-R2396. Part 1.

Huang, Po-Fu; Turpin, B.J.; Piphó, M.J.; Kittelson, D.B. y McMurry, P.H. 1994. "Effect of water Condensation and Evaporation on Diesel Chain-Agglomerate Morphology". *Journal of Aerosol Science*, 25, no.3, pp447-459.

Joutsensaari, J.; Kauppinen, E.I.; Ahonen, P.; Lind, T.M.; Ylätaalo, S.I.; Jokiniemi, J.K.; Hautanen, J. y Kilpeläinen, M. 1992. "Aerosol Formation in Real Scale Pulverized Coal Combustion". *Journal of Aerosol Science*, 23, Suppl. 1, ppS241-244.

Kasper, G.; Hemmer, G.; Schaub, G.; Wang, J.; Baur, E.; Heidenreich, S.; Depelsenaire, G.; Bauer, T.; Thijssen, M.; De Santi, G.; Papameletiou, D.; Cancelinha, J.; Martín Espigares, M. y Gómez, F. 2001. "Combined Dry Removal of Particles and Gaseous Compounds from Biomass Combustion Off-Gases in a Filtration-Type particle Separator (CONFIL). Final Report Contract JOR3-CT98-0250.

Kauppinen, E.I. y Pakkanen, T.A. 1990. "Coal Combustion Aerosol: A field Study". *Environmental Science & Technology*, 24, nº12, pp1811-1818.

Keady, P.B.; Quant, F.R. y Sem, G.J. 1983. "Differential Mobility Particle Sizer. A new Instrument for High- Resolution Aerosol Size Distribution Measurement Below 1 μ m". *TSI Journal of Particle Instrumentation*, 9, 2.

Kinney, P.D.; Pui, D.Y.H.; Mulhally, G.W. y Bryer, N.P. 1991. "Use of the Electrostatic Classification Method to Size 0,1 μ m SRM Particles- A Feasibility Study". *Journal Research of the National Institute of Standards and Technology*, 96, pp147.

Kinney, P.D.; Pui, D.Y.H.; Mulhally, G.W. y Bryner, N.P. 1991. "Use of the Electrostatic Classification Method to Size 0,1 μ m SRM Particles- A. Feasibility Study". *Journal Research of the National Institute of Standards and Technology*, 96, pp147.

Kittelson, D.D. and Dolan, D.F. 1998. "Generation of aerosol and facilities for exposure". *Journal of Aerosol Science*, 29, no 5/6, pp575-588.

Knudson, E.O. y Whitby, K.T. 1975. "Aerosol Classification by Electric Mobility: Apparatus, Theory, y Applications". *Journal of Aerosol Science*, 6, pp443.

Leith, D. y Licht, W. 1972. *AIChE Symp. Serv*, 68, pp196-206.

Liu, B.Y.H. y Agarwal, J.K. 1974 "Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow". *Journal of Aerosol Science*, 5, pp145-155.

Liu, B.Y.H. y Pui, D.Y.H. 1975. "On the Performance of the Electrical Aerosol Analyser". *Journal of Aerosol Science*, 6, pp249.

Liu, Zhang y Kuehn. 1989. "A numerical study of inertial errors in anisokinetic sampling". *Journal of Aerosol Science*, 20(3), pp367-380.

Malm, J.O. 1996. "Chemical and structural characterization of nanoparticles using electron microscopy". The National Centre for HREM, Lund University, Sweden. Short course Nanoparticles in the gas phase. European Aerosol Conference, Delft, Netherlys.

Marple, V.A. 1970. "A fundamental study of inertial impactors". Tesis doctoral, Universidad de Minnesota.

Marple, V.A. y Willeke, K. 1979. "Inertial impactors". En *Aerosol measurement*, 90-107 (editado por Lundgren, D.A., Harris, Jr, F.S., Marlow, W.H., Lippman, M., Clark, W.W. y Durhann, M.D.), Universidad de Florida (Aerosol measurement workshop, mantenido en la Universidad de Florida, 1976).

Martín Espigares, M.; Rodríguez Maroto, J.J.; Gómez Moreno, F.J. 1996. "La aglomeración acústica de partículas en gases de combustión de carbón : alternativa ecológica para mejorar la retención de emisiones". *Tecnoambiente*, 61, pp 46-47.

McElroy, M.W.; Carr, R.C.; Ensor, D.S. y Markowski, G.R. 1982. "Size Distribution of Fine Particles from Coal Combustion ". *Science*, 215, nº 4528.

Mohr, M.; Ylätaalo, S; Klippel, N.; Kauppinen, E.I.; Riccius, O. y Burtscher, H. 1996. "Submicron Fly Ash Penetration Through Electrostatic Precipitators at Two Coal Power Plants". *Aerosol Science & Technology*, 24, pp191-204.

Newton, G.J.; Carpenter, R.L.; Yeh, H-Ch. y Peele, E.R. 1980. "Respirable Aerosols from Fluidized Bed Coal Combustion. 1. Sampling Methodology for an 18-Inch Experimental Fluidized Bed Coal Combustor". *Environmental Science & Technology*, 14, nº7, pp849-853.

Nichols, A.L. y Mitchell, J.P. 1988. "Measurement of the Physical Properties of Nuclear Aerosol". *Nuclear Technology*, 81.

Okazaki, K.R.; Wienwe, W. y Willeke, K. 1987. "The combined effect of aspiration y transmission on aerosol accuracy for horizontal isoaxial sampling". *Atmospheric Environment*, 21(5), pp1181-1185.

Overcamp, T.J. y Scarleat, S.E. 1993. "Effect of Reynolds Number on the Stokes Number of Cyclones". *Aerosol Science & Technology*, 19, pp362-370.

PALAS GMBH. 1994. "Operating Manual. Solid Particle disperser RBG-1000.

Parsons, C.T. y Felix, C.G. 1980. "Operator's Manual For The Five-Stage Series Cyclone". Southern Research Institute, Birmingham, Alabama, Report nº SORI-ESA-80-845.

Peters, T.M.; Chein, H; Lundgren, D.A. y Keady, P.B. 1993. "Comparison and Combination of Aerosol Size Distribution Measured with a Low pressure Impactor, Differential Mobility Particle Sizer, Electrical Aerosol Analyzer and Aerodynamic Particle Sizer". *Aerosol Science & Technology*, 19, pp396-405.

Pui, D.Y.H. y Liu, B.Y.H. 1989. "Advances in Instrumentation for Atmospheric Aerosol Measurement". *TSI Journal of Particle Instrumentation*, 4, 2.

Pui, D.Y.H.; Romay-Novas, F. y Liu, B.Y.H. 1987. "Experimental study of particle deposition in bends of circular cross section". *Aerosol Science & Technology*, 7, pp301-15.

Quant, F.R.; Caldow, R.; Sem, G.J. y Addison, T.J. 1992. "Performance of Condensation Particle Counters with Three Continuous-Flow Designs". *Journal of Aerosol Science*, 23, Suppl(1), pp405-408.

Raasch, J. y Umhauer. H. 1977. "Grundsätzliche Überlegungen zur Messung der Verteilungen von Partikelgröße und Partikelgeschwindigkeit Disperser Phasen in Strömungen".

Rao, A.K. y Whitby, K.T. 1978. "Non-ideal collection characteristic of inertial impactor: II Cascade impactors". *Journal of Aerosol Science*, 9, pp87-100.

Regan, M. B. 1996. "The Dustup over dust". *Business week*. December 2. (1996).

Rietema, K. y Verver, V.G. 1961. "Cyclones in Industry". Elsevier Publishing Company.

Rodríguez-Maroto, J.J.; Gómez-Moreno, F.J.; Martín Espigares, M; Gallego, J.A; Riera, E; Elvira; Rodríguez, G.; Vázquez, F; Hoffmann, T.L. y Montoya. F, 1995a. "Acoustic Preconditioning of Coal Combustion Fumes for Enhancement of Electrostatic Precipitator Performance: II Performance Evaluation". 8th International Conference on Coal Science, Oviedo (Spain). *Coal Science* edited by Pajares y Tascón, pp1903-1905.

Rodríguez-Maroto, J.J.; Gómez-Moreno, F.J.; Martín Espigares, M.; Bahillo, A.; Acha, M. 1995b "Design and testing of a sampling station for measurement of particulate emission from combustion sources". *Journal of Aerosol Science*, 26, Suppl 1, pps685. ISSN 0021-8502.

Rodríguez Maroto J.J. 1995c. "Ensayo para la implementación de un método de medida de partículas en Planta Térmica.. Desarrollo de filtros acústicos para la aglomeración y separación de micropartículas en gases de combustión de carbón". CIEMAT, ITN/TCG-25/SP-95.

Rodríguez Maroto, J.J.; Acha Hurtado, M. y Martín Espigares, M.1996a. "Validación Sistemas de Aglomeracion-Retención de partículas Metodología y Muestreo de Partícula ITEC/TCG-01/IF-96.

Rodríguez Maroto, J.J., Gómez Moreno, F.J., Martín Espigares, M., Bahillo, Ruiz, L.A, M.Acha, J.A. Gallego, E. Riera, T.L. Hoffmann and G. Rodríguez. 1996b. "Study of electrostatic precipitator efficiency as function of electrical field intensity and particle properties in a pilot coal combustion plant". 1996. Journal of Aerosol Science, 27, Suppl 11996, ppS643.

Rodríguez Maroto, J.J. 1997a. "Validación de un Precipitador Electrostático con aerosoles de emisión de una Planta de combustión de carbón de lecho fluido circulante". Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Químicas. Universidad Complutense. (Memoria para optar al grado de Licenciado en Ciencias Químicas). Madrid, 1997.

Rodríguez Maroto, J.J., Gómez Moreno, F.J., Martín Espigares, Bahillo, A., Sanz Rivera, D., Acha, M. 1997b. "On the electrostatic precipitator resolution in function of main influence factors studied in a pilot fluidized bed coal combustion plant". Proceeding pp1767-1770. 9th International Conference on Coal. Science. Essen, (Germany), 7-12 September 1997.

Rodríguez Maroto, J.J.; Dorronsoro, J.L.; Sanz Rivera, D.; Gómez Moreno, F.J. y Martín Espigares, M. 2000 "Desarrollo y validación de nuevas tecnologías macrosónicas para la reducción de la emisión de partículas en efluentes gaseosos y líquidos de origen industrial". Informe Final del Proyecto CICYT, AMB96-1211.C01/02. CIEMAT DCF/TA-01/SP-99, Madrid.

Rodríguez Maroto, J.J.; Muñoz Bueno, R.; Dorronsoro, J.L.; Martín-Espigares, M.; Riera-Franco de Sarabia, E y Elvira-Segura. 2001a. "Effect of Water Injection on Diesel Particles Agglomeration". Journal of Aerosol Science, 32, Suppl. 1, ppS503. ISSN 0021-8502.

Rodríguez-Maroto, J.J.; Sanz-Rivera, D.; Dorronsoro, J.L.; Gómez-Moreno, F.J.; Muñoz-Bueno, R. y M. Martín-Espigares. 2001b. "Characterization of Particles Emitted by a 14 MW Low-Speed Diesel Engine". Journal of Aerosol Science, 32, Suppl 1, pps77. ISSN 0021-8502.

Rodríguez-Maroto, J.J.; Dorronsoro, J.L.; García Alonso, S. y Gómez Esteban, A. 2002. "Influence of Diesel Engine Load on Organic Compounds Compositions in Exhaust Particle". Abstracts of the Sixth International Aerosol Conference, Taipei (Taiwan), 2, pp 823, September 2002. ISBN 986-80544-2-7.

Roy, W.R.; Thiery, R.G.; Schuller, R.M. y Suloway, J.J. 1981 "Coal fly ash: a review of the literature and proposed classification system with emphasis on environmental impacts". Illinois State Geological Survey/Environmental Geology Notes 96.

Sáez; F.; Cabañas, A.; González, A.; Escalada, R.; Martínez, J.M.; Rodríguez, J.J.; Dorronsoro, J.L.; Gómez, F. y Saenz, D. 2000. "Polycyclic aromatic hydrocarbons associated to particle size emitted from biomass fluidised bed combustion". Developments in Thermochemical Biomass Conversion Congress. Seefeld, (Tyrol-Austria).

Schwendiman, L.C.; Stegen, G.E. y Glismeyer, J.A. 1975. ReportBNWL-SA-5138, Batelle Pacific Northwest Laboratory, Richly, WA.

Sem, G.J.; Borgos, J.A.; Whitby, K.T. y Liu, B.Y.H. 1972. "State of the Art : 1971. Instrumentation for Measurement of Particulate Emissions from Combustion Sources. Volume III. Particle Size. PB-233393 ; APTD-1524. Office of Research y Development USEPA.

Sioutas, C.; Koutrakis, P; Wang P-Y.; Babich, P. y Wolfson, M.J. 1999. "Experimental Investigation of Pressure Drop with Particle Loading in Nuclepore Filter". Aerosol Science & Technology, 30, pp71-83.

Sloss, L.L. y Gardner, C.A. 1995. "Sampling and analysis of trace emissions from coal-fired power stations". IEACR/77. February 1995. IEA Coal Research, London. UK. ISBN 92-9029-250-4.

Smith, W.B. y Wilson, R.R. 1978 "Development y Laboratory Evaluation of a Five-Stage Cyclone System". US EPA Report EPA 600/7-78-008 (NTIS PB 279084), Southern Research Institute, Birmingham, Alabama.

Smith, W.B.; Wilson, R.R. y Harris, D.B. 1979. "A five -Stage Cyclone System for In Situ Sampling". Environmental Science & Technology, 13, nº11, pp1387-1392.

Smith, W.S. *et al.* 1967. "Stack Gas sampling Improved and Simplified with New Equipment". Paper nº 67-119. 60th Annual Meeting of APCA, Cleveland OH.

Talbot, L.; Cheng, R.K.; Schefer, R.W. y Willis, D.R. 1980. "Thermophoresis of particles in a heated boundary layer". Journal of Fluid Mechanical, 101, part 4, pp737-758.

- Thomas, J.W. 1958. Journal of Air Pollution Control Assoc, 8, 32.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1974. Administrative y technical aspects of source sampling for particulates. EPA-450/3-74-047.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1977a. EPA. Method 1: Sample y velocity traverses for stationary sources. Federal Register 42 (160)41755.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1977b. EPA. Method 2: Determination of stack gas y volumetric flow rate. Federal Register 42 (160)41758.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1977c. EPA. Method 5: Determination of particulate emissions from stationary sources. Federal Register 42 (160)41776.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1978. EPA. Method 17: Determination of particulate emissions from stationary sources (in stack filtration method). Federal Register 43 (37).
- U.S. Environmental Protection Agency. 1987. EPA. Federal Register 52:24634.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1990. EPA. Code of Federal Register CFR 42.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1997. EPA. Code of Federal Register CFR 40.
- US.EPA. 1971. Fed. Register 36. (247). (Dec 23, 1971).
- Vaughan, N.P. 1989. "The Andersen Impactor: Calibration, wall losses and numerical simulation". Journal of Aerosol Science, 20, pp67-90.
- Vincent, J.H. 1989. "Aerosol sampling. Science y Practice". John Wiley & Sons. Chichester - New York - Brisbane - Toronto - Singapore.
- Wang, S.C. y Flagan, R.C. 1990. "Scanning Electrical Mobility Spectrometer". Aerosol Science & Technology, 13, pp230.
- Wiedensohler, A. 1988. "Approximation of the Bipolar Charge Distribution for Particles in the Submicron Size Range". Journal of Aerosol Science, 19, 3.
- Ye, Y. y Pui, D.Y.H. 1990 "Particle deposition in a tube with an abrupt contraction". Journal of Aerosol Science, 21(1), pp29-40.

Yeh, H.C.; Cheng, Y.S. y Kanapilly, G.M. 1982. "A parallel flow screen type diffusion battery, in Inhalation Toxicology". Research Institute Annual report, 1981-1982, LMF, pp pp84-87, NTIS Springfield.

Ylätaalo, S.I. y Hautanen, J. 1998. "Electrostatic Precipitator Penetration. Function for Pulverised Coal Combustion" Aerosol Science & Technology, 29, pp17-30.

Figura 3.3

dp (micras)	h_{asp}						
	V/Vm=1/4	V/Vm=1/3	V/Vm=1/2	V/Vm=1	V/Vm=2	V/Vm=3	V/Vm=4
0,01596339	0,999993661	0,999992308	0,999990943	1	1,000101497	1,000362554	1,000841201
0,01715438	0,999993177	0,999991721	0,999990252	1	1,000109242	1,000390217	1,000905377
0,01843423	0,999992656	0,999991088	0,999989506	1	1,000117592	1,000420043	1,000974571
0,01980957	0,999992093	0,999990405	0,999988703	1	1,000126599	1,000452221	1,001049195
0,02128752	0,999991486	0,999989669	0,999987836	1	1,000136314	1,000486912	1,001129697
0,02287573	0,999990831	0,999988874	0,9999869	1	1,0001468	1,00052436	1,001216569
0,02458244	0,999990124	0,999988016	0,99998589	1	1,000158119	1,000564786	1,001310347
0,02641648	0,999989361	0,999987089	0,999984799	1	1,000170342	1,000608442	1,001411616
0,02838736	0,999988536	0,999986088	0,99998362	1	1,000183548	1,000655606	1,001521019
0,03050528	0,999987644	0,999985006	0,999982346	1	1,000197822	1,000706581	1,001639261
0,03278121	0,99998668	0,999983836	0,999980968	1	1,000213257	1,000761703	1,001767114
0,03522695	0,999985636	0,99998257	0,999979478	1	1,000229956	1,000821337	1,001905432
0,03785515	0,999984507	0,9999812	0,999977864	1	1,000248033	1,00088589	1,002055153
0,04067944	0,999983284	0,999979715	0,999976116	1	1,000267613	1,000955808	1,002217313
0,04371445	0,999981958	0,999978106	0,999974222	1	1,000288835	1,001031588	1,002393058
0,04697589	0,999980519	0,999976361	0,999972167	1	1,000311853	1,001113777	1,002583661
0,05048066	0,999978958	0,999974467	0,999969936	1	1,000336837	1,001202985	1,002790531
0,05424691	0,999977262	0,999972409	0,999967513	1	1,000363979	1,001299889	1,003015239
0,05829415	0,999975418	0,999970171	0,999964879	1	1,000393489	1,001405248	1,003259535
0,06264335	0,999973411	0,999967735	0,999962011	1	1,000425605	1,001519904	1,003525376
0,06731704	0,999971224	0,999965082	0,999958887	1	1,000460593	1,001644806	1,003814952
0,07233942	0,999968839	0,999962188	0,999955479	1	1,000498751	1,001781016	1,004130722
0,0777365	0,999966235	0,999959028	0,999951759	1	1,000540413	1,001929729	1,004475451
0,08353626	0,999963388	0,999955573	0,999947691	1	1,00058596	1,002092293	1,004852255
0,08976871	0,999960271	0,99995179	0,999943238	1	1,000635817	1,00227023	1,005264654
0,09646616	0,999956853	0,999947644	0,999938356	1	1,000690469	1,002465263	1,005716633
0,10366329	0,999953102	0,999943092	0,999932996	1	1,000750466	1,00267935	1,006212708
0,11139739	0,999948976	0,999938086	0,999927103	1	1,000816431	1,002914711	1,006758014
0,1197085	0,999944433	0,999932572	0,999920612	1	1,000889076	1,003173878	1,007358394
0,12863969	0,99993942	0,999926489	0,99991345	1	1,000969213	1,003459737	1,008020511
0,13823722	0,999933879	0,999919767	0,999905536	1	1,001057769	1,003775587	1,008751972
0,1485508	0,999927744	0,999912323	0,999896772	1	1,001155805	1,004125199	1,009561474
0,15963385	0,999920939	0,999904065	0,999887051	1	1,001264538	1,004512895	1,010458977
0,17154379	0,999913375	0,999894887	0,999876246	1	1,001385364	1,00494363	1,01145589
0,1843423	0,999904952	0,999884667	0,999864215	1	1,001519885	1,00542309	1,012565299
0,19809568	0,999895553	0,999873263	0,99985079	1	1,001669942	1,005957805	1,013802218
0,21287517	0,999885046	0,999860515	0,999835783	1	1,001837652	1,006555278	1,015183884
0,22875732	0,999873277	0,999846234	0,999818972	1	1,002025452	1,007224131	1,016730084
0,24582441	0,999860068	0,999830208	0,999800107	1	1,002236142	1,007974276	1,018463534
0,26416483	0,999845215	0,999812187	0,999778895	1	1,002472946	1,008817102	1,020410309
0,2838736	0,999828485	0,999791889	0,999755003	1	1,002739573	1,009765696	1,022600316
0,30505279	0,999809606	0,999768983	0,999728043	1	1,003040286	1,010835085	1,025067844
0,32781212	0,999788266	0,999743093	0,999697572	1	1,003379986	1,012042515	1,027852161
0,35226947	0,999764108	0,999713784	0,999663078	1	1,003764306	1,013407764	1,030998199

0,37855153	0,999736718	0,999680555	0,999623972	1	1,00419971	1,014953488	1,034557295
0,40679443	0,999705621	0,99964283	0,999579578	1	1,004693614	1,016705618	1,038588027
0,43714448	0,999670271	0,999599947	0,999529118	1	1,00525452	1,018693792	1,043157118
0,46975888	0,99963004	0,999551145	0,999471698	1	1,005892162	1,020951847	1,048340441
0,50480657	0,999584208	0,99949555	0,999406291	1	1,006617681	1,023518356	1,054224089
0,54246909	0,999531945	0,999432158	0,999331719	1	1,00744381	1,026437227	1,060905551
0,58294154	0,999472301	0,999359816	0,999246628	1	1,008385091	1,029758359	1,068494944
0,65	0,999365529	0,999230325	0,999094342	1	1,010066027	1,035677095	1,081986489
0,702	0,999275914	0,999121651	0,998966564	1	1,01147284	1,040618702	1,093217615
0,767	0,99915553	0,99897568	0,998794969	1	1,013356919	1,04721982	1,108173669
0,832	0,999025871	0,998818481	0,998610224	1	1,015378813	1,054282299	1,124116105
0,913	0,998851351	0,998606925	0,998361675	1	1,018088313	1,063711872	1,145307523
0,994	0,998662512	0,998378052	0,998092881	1	1,02100478	1,07381757	1,167899489
1,094	0,998409697	0,998071704	0,997733264	1	1,024884584	1,087190823	1,197608797
1,193	0,998138064	0,997742638	0,997347188	1	1,029021931	1,101363914	1,228864185
1,316	0,99777111	0,997298234	0,996826137	1	1,034560421	1,120196324	1,270031658
1,438	0,997375005	0,996818706	0,996264345	1	1,0404744	1,140130024	1,313161625
1,587	0,996848015	0,996181014	0,995517967	1	1,048240624	1,16603567	1,368540772
1,735	0,996277728	0,995491296	0,99471161	1	1,056516567	1,193308223	1,426036685
1,914	0,995525957	0,994582671	0,993650771	1	1,067227515	1,228104659	1,498222326
2,092	0,994711442	0,993598962	0,992504116	1	1,078584793	1,264397933	1,572148111
2,304	0,993654875	0,992324077	0,991020906	1	1,092946992	1,3094289	1,661990891
2,516	0,992505073	0,990938178	0,98941218	1	1,108120508	1,355985498	1,752757361
2,765	0,991036729	0,989170575	0,98736586	1	1,12683957	1,412029195	1,8592645
3,014	0,989442523	0,987254306	0,985154344	1	1,146372074	1,46893116	1,964442185
3,303	0,987436607	0,984847352	0,982386676	1	1,169852328	1,535293094	2,083498728
3,591	0,985273969	0,982257573	0,979421314	1	1,193893355	1,6010372	2,197787152
3,92	0,982607344	0,97907171	0,975791118	1	1,221862889	1,674861415	2,321986688
4,248	0,979745145	0,975661305	0,97192653	1	1,25000565	1,746404251	2,438374315
4,617	0,976288297	0,971554886	0,967302428	1	1,281656492	1,82376848	2,560049369
4,986	0,972587889	0,967174254	0,962404358	1	1,312999065	1,897334381	2,671915911
5,394	0,968222402	0,962026273	0,956693715	1	1,346989426	1,973895526	2,784562567
5,802	0,963580067	0,956575412	0,950699914	1	1,380020843	2,045278242	2,886285372
6,246	0,958227258	0,950320312	0,943887796	1	1,414643406	2,117098269	2,985561149
6,69	0,952576112	0,943751168	0,936808504	1	1,44771459	2,182999723	3,074063467
7,168	0,946177231	0,936355349	0,928928582	1	1,481461251	2,247684625	3,158618963
7,646	0,939471857	0,928653318	0,920822232	1	1,51322222	2,306329457	3,233373918
8,156	0,932003248	0,920131911	0,911969935	1	1,544914648	2,362804029	3,303711379
8,665	0,924250791	0,911349863	0,902972324	1	1,57433117	2,413488072	3,365502714
9,208	0,915680653	0,901715649	0,893244989	1	1,603368374	2,461959129	3,42345135
9,75	0,906847878	0,891866672	0,88345243	1	1,630066031	2,505218948	3,474250701
10,33	0,897122311	0,881115501	0,872933734	1	1,656271877	2,546516841	3,521958072
10,91	0,887149833	0,870191601	0,862424304	1	1,680218214	2,583284491	3,563799309
11,54	0,876079525	0,858182302	0,851072679	1	1,70388796	2,618751636	3,603607919
12,17	0,86480426	0,846075517	0,839837407	1	1,725346343	2,650178749	3,63843732
12,87	0,852087211	0,832569412	0,827543626	1	1,746860784	2,681017259	3,672215705
13,57	0,839224292	0,819066173	0,815498244	1	1,76619012	2,708168447	3,701633784
14,375	0,824318215	0,80361296	0,802005598	1	1,786038446	2,735517897	3,730967165
20	0,721874721	0,702753456	0,720924587	1	1,876216246	2,853411644	3,854079832

40	0,474303633	0,49208265	0,583015226	1	1,965691187	2,960995099	3,961916479
60	0,369754149	0,414787228	0,540718843	1	1,984424956	2,982440102	3,982920107
80	0,322485814	0,381783234	0,523773046	1	1,991170238	2,990074661	3,990359026
100	0,298090038	0,365192419	0,515488662	1	1,994327568	2,993632629	3,993818951

Figura 3.4

dp(micras)	h _{grav.}						
	V/Vm=1/4	V/Vm=1/3	V/Vm=1/2	V/Vm=1	V/Vm=2	V/Vm=3	V/Vm=4
0,01596339	0,99996138	0,99995698	0,99994992	0,99993505	0,99991577	0,99990194	0,99989077
0,01715438	0,99995919	0,99995454	0,99994708	0,99993137	0,999911	0,99989638	0,99988458
0,01843423	0,99995687	0,99995196	0,99994407	0,99992747	0,99990594	0,99989049	0,99987802
0,01980957	0,99995442	0,99994923	0,99994089	0,99992334	0,99990059	0,99988426	0,99987108
0,02128752	0,99995182	0,99994633	0,99993752	0,99991897	0,99989492	0,99987766	0,99986373
0,02287573	0,99994906	0,99994326	0,99993395	0,99991434	0,99988891	0,99987067	0,99985594
0,02458244	0,99994615	0,99994001	0,99993016	0,99990943	0,99988255	0,99986326	0,99984768
0,02641648	0,99994305	0,99993657	0,99992615	0,99990423	0,9998758	0,99985541	0,99983894
0,02838736	0,99993977	0,99993291	0,99992189	0,99989871	0,99986865	0,99984708	0,99982966
0,03050528	0,99993629	0,99992903	0,99991738	0,99989286	0,99986106	0,99983824	0,99981981
0,03278121	0,9999326	0,99992492	0,99991259	0,99988665	0,999853	0,99982886	0,99980937
0,03522695	0,99992868	0,99992055	0,99990751	0,99988005	0,99984445	0,99981891	0,99979828
0,03785515	0,99992451	0,99991591	0,9999021	0,99987304	0,99983536	0,99980833	0,9997865
0,04067944	0,99992008	0,99991098	0,99989636	0,9998656	0,99982571	0,99979709	0,99977398
0,04371445	0,99991537	0,99990573	0,99989025	0,99985768	0,99981544	0,99978513	0,99976066
0,04697589	0,99991036	0,99990015	0,99988376	0,99984925	0,99980451	0,99977241	0,99974649
0,05048066	0,99990503	0,99989421	0,99987684	0,99984028	0,99979288	0,99975887	0,9997314
0,05424691	0,99989934	0,99988788	0,99986947	0,99983072	0,99978048	0,99974443	0,99971532
0,05829415	0,99989328	0,99988112	0,9998616	0,99982053	0,99976726	0,99972904	0,99969818
0,06264335	0,99988681	0,99987392	0,99985321	0,99980964	0,99975315	0,99971261	0,99967988
0,06731704	0,9998799	0,99986622	0,99984425	0,99979802	0,99973807	0,99969507	0,99966033
0,07233942	0,99987251	0,99985798	0,99983466	0,99978559	0,99972195	0,9996763	0,99963943
0,0777365	0,9998646	0,99984917	0,99982441	0,99977229	0,9997047	0,99965622	0,99961707
0,08353626	0,99985612	0,99983973	0,99981341	0,99975803	0,99968622	0,9996347	0,9995931
0,08976871	0,99984703	0,9998296	0,99980162	0,99974274	0,99966639	0,99961162	0,99956739
0,09646616	0,99983726	0,99981872	0,99978896	0,99972632	0,9996451	0,99958683	0,99953977
0,10366329	0,99982676	0,99980703	0,99977534	0,99970866	0,9996222	0,99956017	0,99951008
0,11139739	0,99981545	0,99979443	0,99976068	0,99968965	0,99959754	0,99953147	0,99947811
0,1197085	0,99980326	0,99978085	0,99974487	0,99966915	0,99957096	0,99950052	0,99944363
0,12863969	0,99979009	0,99976618	0,99972779	0,99964701	0,99954225	0,9994671	0,99940641
0,13823722	0,99977585	0,99975032	0,99970933	0,99962306	0,9995112	0,99943095	0,99936615
0,1485508	0,99976043	0,99973314	0,99968933	0,99959713	0,99947757	0,9993918	0,99932255
0,15963385	0,9997437	0,99971451	0,99966763	0,999569	0,99944109	0,99934934	0,99927525
0,17154379	0,99972552	0,99969426	0,99964406	0,99953843	0,99940146	0,9993032	0,99922385
0,1843423	0,99970574	0,99967222	0,99961841	0,99950516	0,99935833	0,99925299	0,99916793
0,19809568	0,99968418	0,99964821	0,99959045	0,99946891	0,99931131	0,99919826	0,99910698
0,21287517	0,99966064	0,99962199	0,99955992	0,99942933	0,99925999	0,99913852	0,99904043

0,22875732	0,9996349	0,99959332	0,99952655	0,99938605	0,99920388	0,9990732	0,99896768
0,24582441	0,99960671	0,99956192	0,99949	0,99933866	0,99914243	0,99900168	0,99888801
0,26416483	0,9995758	0,99952749	0,99944992	0,99928669	0,99907505	0,99892324	0,99880066
0,2838736	0,99954186	0,99948968	0,99940591	0,99922962	0,99900106	0,99883711	0,99870473
0,30505279	0,99950454	0,99944811	0,99935751	0,99916687	0,9989197	0,99874241	0,99859925
0,32781212	0,99946344	0,99940234	0,99930423	0,99909779	0,99883014	0,99863815	0,99848314
0,35226947	0,99941815	0,99935189	0,9992455	0,99902165	0,99873142	0,99852325	0,99835517
0,37855153	0,99936818	0,99929624	0,99918071	0,99893765	0,99862252	0,99839649	0,99821399
0,40679443	0,999313	0,99923477	0,99910916	0,99884488	0,99850225	0,99825651	0,99805809
0,43714448	0,99925201	0,99916684	0,99903009	0,99874236	0,99836934	0,99810182	0,99788581
0,46975888	0,99918455	0,9990917	0,99894262	0,99862897	0,99822235	0,99793073	0,99769529
0,50480657	0,9991099	0,99900855	0,99884583	0,99850348	0,99805969	0,99774142	0,99748445
0,54246909	0,99902723	0,99891648	0,99873865	0,99836454	0,99787959	0,99753181	0,99725103
0,58294154	0,99893565	0,99881448	0,99861993	0,99821063	0,9976801	0,99729964	0,99699249
0,65	0,99877788	0,99863875	0,99841539	0,9979455	0,99733645	0,99689973	0,99654717
0,702	0,99865054	0,99849693	0,99825031	0,99773153	0,99705915	0,99657703	0,99618785
0,767	0,99848549	0,99831311	0,99803636	0,99745422	0,99669978	0,99615887	0,99572224
0,832	0,99831416	0,9981223	0,99781428	0,9971664	0,99632682	0,99572491	0,99523907
0,913	0,99809225	0,99787516	0,99752665	0,99679364	0,99584385	0,99516299	0,99461347
0,994	0,9978614	0,99761807	0,99722745	0,99640593	0,99534156	0,99457864	0,99396293
1,094	0,99756461	0,99728756	0,99684283	0,99590758	0,99469601	0,9938277	0,993127
1,193	0,99725853	0,99694671	0,9964462	0,99539372	0,99403049	0,9930536	0,99226537
1,316	0,99686202	0,99650518	0,99593244	0,99472821	0,9931687	0,99205134	0,99114989
1,438	0,99645176	0,99604836	0,99540092	0,99403981	0,99227744	0,99101497	0,98999658
1,587	0,99592881	0,9954661	0,99472352	0,99316262	0,99114202	0,9896949	0,98852776
1,735	0,99538662	0,99486244	0,99402128	0,99225345	0,98996554	0,98832736	0,98700635
1,914	0,99470193	0,99410019	0,99313466	0,99110585	0,98848097	0,98660206	0,98508727
2,092	0,99399108	0,99330887	0,99221436	0,98991496	0,98694094	0,98481277	0,98309742
2,304	0,99310724	0,99232507	0,99107036	0,98843507	0,98502795	0,98259079	0,98062695
2,516	0,99218478	0,9912984	0,9898767	0,98689147	0,98303352	0,98027497	0,97805283
2,765	0,99105433	0,99004038	0,98841434	0,98500116	0,98059237	0,97744149	0,97490424
3,014	0,98987543	0,98872862	0,98688984	0,98303141	0,9780501	0,97449188	0,97162772
3,303	0,98844929	0,98714198	0,98504633	0,98065068	0,97497942	0,97093087	0,96767354
3,591	0,98696909	0,98549549	0,98313378	0,97818219	0,9717979	0,96724325	0,96358051
3,92	0,98520953	0,98353862	0,98086139	0,97525112	0,96802325	0,96287073	0,9587296
4,248	0,98338585	0,98151085	0,97850746	0,97221698	0,96411943	0,95835152	0,95371857
4,617	0,98125522	0,97914233	0,97575896	0,96867702	0,95956937	0,95308799	0,94788562
4,986	0,97904485	0,97668578	0,97290947	0,96501009	0,95486132	0,94764601	0,94185877
5,394	0,97651242	0,97387208	0,96964715	0,96081583	0,94948271	0,94143434	0,93498433
5,802	0,97389145	0,97096088	0,96627341	0,95648272	0,94393336	0,93503153	0,92790376
6,246	0,97094335	0,9676874	0,96248182	0,95161829	0,93771245	0,92786123	0,91998101
6,69	0,96790001	0,96430935	0,95857131	0,94660725	0,93131391	0,92049433	0,91184829
7,168	0,96452218	0,96056144	0,95423527	0,94105803	0,92423989	0,91235939	0,9028763
7,646	0,96104409	0,95670384	0,94977524	0,93535792	0,9169864	0,90402869	0,89369785
8,156	0,95722785	0,95247303	0,94488711	0,92911979	0,90906332	0,89494131	0,8836967
8,665	0,95331582	0,94813801	0,93988227	0,92274265	0,90097997	0,88568351	0,87351989
9,208	0,94903419	0,94339576	0,93441158	0,91578345	0,89217773	0,87561787	0,86246879
9,75	0,94465433	0,93854724	0,92882297	0,90868671	0,88322196	0,86539339	0,8512581
10,33	0,93985578	0,93323816	0,92270892	0,90093726	0,87346619	0,85427493	0,83908434
10,91	0,93494757	0,92781094	0,91646474	0,89303858	0,86354815	0,84299244	0,8267494

11,54	0,92949843	0,9217894	0,90954378	0,88430245	0,85260886	0,83057286	0,81319305
12,17	0,92393311	0,91564362	0,90248768	0,87541602	0,84151423	0,81800362	0,79949683
12,87	0,91762079	0,90867803	0,89449974	0,86538091	0,82902563	0,80388767	0,78414378
13,57	0,91118093	0,90157733	0,8863672	0,85519143	0,81638883	0,78963972	0,76867829
14,375	0,90362738	0,89325595	0,87684997	0,84330225	0,80170052	0,77312418	0,75079121
20	0,84727441	0,8314286	0,80660107	0,75674826	0,69665768	0,65650862	0,62577958
40	0,62708251	0,59461648	0,54596228	0,45618617	0,36137825	0,30575356	0,26714537
60	0,4248302	0,38535728	0,32949968	0,23699288	0,15457242	0,11375567	0,08880436
80	0,2679332	0,2306058	0,18123505	0,1091589	0,05656099	0,03529053	0,02411097
100	0,15885482	0,12881974	0,09200803	0,04531565	0,01808712	0,00935834	0,00549652

Figura 3.5

dp(micras)	h _{iner.}						
	V/Vm=1/4	V/Vm=1/3	V/Vm=1/2	V/Vm=1	V/Vm=2	V/Vm=3	V/Vm=4
0,01596339	0,99933031	0,99937599	0,99947489	1	1	1	1
0,01715438	0,99930011	0,99934785	0,99945121	1	1	1	1
0,01843423	0,99926849	0,99931838	0,99942641	1	1	1	1
0,01980957	0,99923538	0,99928753	0,99940045	1	1	1	1
0,02128752	0,9992007	0,99925522	0,99937325	1	1	1	1
0,02287573	0,99916437	0,99922137	0,99934476	1	1	1	1
0,02458244	0,9991263	0,99918589	0,99931491	1	1	1	1
0,02641648	0,99908639	0,9991487	0,99928361	1	1	1	1
0,02838736	0,99904454	0,9991097	0,99925079	1	1	1	1
0,03050528	0,99900064	0,9990688	0,99921637	1	1	1	1
0,03278121	0,99895458	0,99902587	0,99918024	1	1	1	1
0,03522695	0,99890622	0,99898081	0,99914232	1	1	1	1
0,03785515	0,99885543	0,99893348	0,99910249	1	1	1	1
0,04067944	0,99880206	0,99888375	0,99906063	1	1	1	1
0,04371445	0,99874595	0,99883147	0,99901663	1	1	1	1
0,04697589	0,99868693	0,99877647	0,99897034	1	1	1	1
0,05048066	0,99862481	0,99871858	0,99892162	1	1	1	1
0,05424691	0,99855938	0,99865761	0,9988703	1	1	1	1
0,05829415	0,99849042	0,99859335	0,99881622	1	1	1	1
0,06264335	0,99841769	0,99852557	0,99875917	1	1	1	1
0,06731704	0,99834091	0,99845402	0,99869895	1	1	1	1
0,07233942	0,99825979	0,99837842	0,99863532	1	1	1	1
0,0777365	0,998174	0,99829848	0,99856804	1	1	1	1
0,08353626	0,9980832	0,99821386	0,99849681	1	1	1	1
0,08976871	0,99798698	0,9981242	0,99842134	1	1	1	1
0,09646616	0,99788491	0,99802909	0,99834128	1	1	1	1
0,10366329	0,99777653	0,99792808	0,99825626	1	1	1	1
0,11139739	0,99766129	0,99782068	0,99816586	1	1	1	1
0,1197085	0,99753861	0,99770636	0,99806962	1	1	1	1
0,12863969	0,99740784	0,99758449	0,99796704	1	1	1	1
0,13823722	0,99726827	0,99745442	0,99785755	1	1	1	1

0,1485508	0,99711911	0,99731541	0,99774053	1	1	1	1
0,15963385	0,99695947	0,99716664	0,99761528	1	1	1	1
0,17154379	0,99678839	0,99700719	0,99748106	1	1	1	1
0,1843423	0,9966048	0,99683609	0,99733701	1	1	1	1
0,19809568	0,99640751	0,99665221	0,9971822	1	1	1	1
0,21287517	0,99619521	0,99645435	0,99701562	1	1	1	1
0,22875732	0,99596647	0,99624116	0,99683612	1	1	1	1
0,24582441	0,99571971	0,99601118	0,99664248	1	1	1	1
0,26416483	0,9954532	0,99576277	0,99643332	1	1	1	1
0,2838736	0,99516503	0,99549418	0,99620715	1	1	1	1
0,30505279	0,99485313	0,99520346	0,99596234	1	1	1	1
0,32781212	0,99451523	0,9948885	0,9956971	1	1	1	1
0,35226947	0,99414885	0,99454699	0,99540949	1	1	1	1
0,37855153	0,99375131	0,99417642	0,99509739	1	1	1	1
0,40679443	0,99331969	0,99377407	0,9947585	1	1	1	1
0,43714448	0,99285081	0,99333698	0,99439032	1	1	1	1
0,46975888	0,99234126	0,99286195	0,99399016	1	1	1	1
0,50480657	0,99178731	0,99234552	0,99355509	1	1	1	0,99944343
0,54246909	0,99118497	0,99178394	0,99308195	1	1	1	0,99817967
0,58294154	0,99052988	0,99117317	0,99256731	1	1	0,99993582	0,9966543
0,65	0,98942778	0,99014556	0,99170132	1	1	0,99864023	0,99375241
0,702	0,98855978	0,98933618	0,99101914	1	1	0,99746603	0,99118891
0,767	0,9874596	0,98831022	0,99015429	1	0,99975739	0,99579288	0,98761378
0,832	0,98634377	0,98726959	0,98927692	1	0,99921406	0,99389579	0,98364438
0,913	0,9849331	0,98595387	0,98816742	1	0,99842565	0,99122679	0,97817779
0,994	0,98350182	0,98461879	0,98704136	1	0,99751474	0,98823125	0,97217485
1,094	0,98170876	0,98294608	0,98563017	1	0,99622363	0,98410387	0,96409237
1,193	0,97990763	0,98126562	0,98421206	1	0,99476777	0,97957772	0,95544187
1,316	0,97763693	0,97914675	0,98242345	1	0,99271967	0,97339082	0,94392662
1,438	0,97535169	0,97701397	0,98062247	1	0,99043563	0,96669438	0,93181624
1,587	0,97252006	0,97437079	0,97838963	1	0,98732112	0,95785052	0,91631986
1,735	0,96966707	0,97170713	0,97613852	1	0,98389438	0,94844766	0,90040103
1,914	0,9661677	0,96843926	0,97337544	1	0,97933986	0,93640984	0,88077556
2,092	0,96263981	0,96514395	0,97058765	1	0,97440645	0,92389143	0,8611826
2,304	0,95838168	0,96116542	0,96721988	1	0,96806646	0,90850754	0,83814158
2,516	0,95406836	0,95713412	0,96380516	1	0,96129388	0,89285511	0,81577359
2,765	0,94893934	0,95233881	0,95974034	1	0,95288885	0,87443375	0,79072475
3,014	0,94374982	0,94748515	0,95562273	1	0,94410964	0,85626099	0,76726582
3,303	0,93765978	0,94178691	0,95078437	1	0,93359807	0,83579543	0,74223365
3,591	0,93152811	0,93604718	0,94590607	1	0,92292958	0,81632892	0,71970848
3,92	0,92445718	0,92942502	0,94027189	1	0,91068507	0,79545585	0,69688485
4,248	0,91734718	0,92276279	0,93459719	1	0,89858591	0,77624041	0,67705714
4,617	0,90928736	0,91520629	0,92815291	1	0,88528232	0,75659955	0,65795794
4,986	0,90117368	0,90759467	0,92165309	1	0,8724577	0,73903802	0,64190528
5,394	0,89215162	0,89912539	0,91441071	1	0,85897466	0,72194282	0,62726676
5,802	0,88308754	0,89061078	0,90711866	1	0,84632435	0,70712548	0,61545275
6,246	0,87318805	0,88130459	0,89913603	1	0,83357343	0,6933612	0,60532734
6,69	0,86326291	0,87196705	0,89111307	1	0,82190989	0,6818029	0,59760347
7,168	0,85256107	0,86189057	0,88243991	1	0,81056152	0,67153416	0,59152767
7,646	0,84185328	0,85179986	0,87373836	1	0,80042676	0,66323278	0,58737914

8,156	0,830433730	0,841028750	0,86443204	1	0,790881980	0,656246180	0,58470153
8,665	0,819052730	0,830283940	0,85512959	1	0,782572980	0,650922370	0,58350512
9,208	0,806940480	0,818837560	0,84519872	1	0,774939260	0,646784490	0,58355111
9,75	0,794890870	0,807438730	0,83528721	1	0,768468910	0,643994840	0,58470012
10,33	0,782051890	0,795280190	0,82469064	1	0,76268525	0,6422524	0,58690924
10,91	0,769280450	0,783172080	0,81411246	1	0,757949820	0,641581560	0,58992583
11,54	0,755495390	0,770087580	0,80265207	1	0,753850770	0,641855490	0,59392099
12,17	0,741811580	0,757083090	0,79123112	1	0,7507015	0,642986230	0,59849629
12,87	0,726737510	0,742738360	0,77859699	1	0,74816354	0,6450555	0,60409339
13,57	0,71181137	0,7285144	0,76603096	1	0,746491990	0,64780987	0,6100871
14,375	0,694841990	0,71231854	0,7516754	1	0,745472840	0,651639480	0,61731912
20	0,582968590	0,604832760	0,65501833	1	0,754444470	0,68755919	0,6699211
40	0,2907408	0,316308770	0,37962991	1	0,8259241	0,800411180	0,80132947
60	0,134375310	0,154097180	0,20727959	1	0,8750299	0,862339280	0,86615853
80	0,058838370	0,071385060	0,10847987	1	0,905392480	0,897962040	0,90200906
100	0,0246866	0,031779310	0,05490412	1	0,925223540	0,920378940	0,92410424

Figura 3.6

dp(micras)	h _{muestreo}							
	V/Vm=1/4	Stokes(1/4)	V/Vm=1/3	Stokes(1/3)	V/Vm=1/2	Stokes(1/2)	V/Vm=1	Stokes(1)
0,01596339	0,999285382	3,92344E-06	0,99932531	5,23125E-06	0,999415781	7,84688E-06	0,999935051	1,56938E-05
0,01715438	0,99925251	4,22286E-06	0,999294145	5,63047E-06	0,99938857	8,44571E-06	0,999931368	1,68914E-05
0,01843423	0,999218055	4,54569E-06	0,999261471	6,06093E-06	0,999360028	9,09139E-06	0,999927469	1,81828E-05
0,01980957	0,999181933	4,89388E-06	0,999227207	6,52518E-06	0,999330082	9,78777E-06	0,999923341	1,95755E-05
0,02128752	0,999144053	5,26952E-06	0,999191266	7,02603E-06	0,999298655	1,0539E-05	0,99991897	2,10781E-05
0,02287573	0,999104319	5,67491E-06	0,999153555	7,56654E-06	0,999265663	1,13498E-05	0,999914338	2,26996E-05
0,02458244	0,999062626	6,11254E-06	0,999113976	8,15005E-06	0,999231017	1,22251E-05	0,99990943	2,44502E-05
0,02641648	0,999018866	6,58516E-06	0,999072421	8,78022E-06	0,999194623	1,31703E-05	0,999904227	2,63407E-05
0,02838736	0,998972918	7,09579E-06	0,999028776	9,46105E-06	0,999156379	1,41916E-05	0,99989871	2,83831E-05
0,03050528	0,998924655	7,6477E-06	0,99898292	1,01969E-05	0,999116174	1,52954E-05	0,999892857	3,05908E-05
0,03278121	0,998873941	8,24453E-06	0,998934719	1,09927E-05	0,99907389	1,64891E-05	0,999886646	3,29781E-05
0,03522695	0,998820626	8,89027E-06	0,998884032	1,18537E-05	0,999029398	1,77805E-05	0,999880051	3,55611E-05
0,03785515	0,998764551	9,58931E-06	0,998830704	1,27857E-05	0,998982562	1,91786E-05	0,999873045	3,83572E-05
0,04067944	0,998705543	1,03465E-05	0,998774569	1,37953E-05	0,99893323	2,0693E-05	0,999865599	4,1386E-05
0,04371445	0,998643415	1,11672E-05	0,998715445	1,48896E-05	0,99888124	2,23345E-05	0,99985768	4,46689E-05
0,04697589	0,998577961	1,20574E-05	0,998653137	1,60766E-05	0,998826416	2,41149E-05	0,999849254	4,82298E-05
0,05048066	0,998508959	1,30238E-05	0,998587429	1,7365E-05	0,998768563	2,60475E-05	0,999840282	5,20951E-05
0,05424691	0,998436168	1,40736E-05	0,998518087	1,87647E-05	0,998707472	2,81471E-05	0,999830721	5,62942E-05
0,05829415	0,998359322	1,5215E-05	0,998444858	2,02867E-05	0,998642912	3,04301E-05	0,999820525	6,08602E-05
0,06264335	0,998278132	1,64574E-05	0,998367459	2,19432E-05	0,99857463	3,29148E-05	0,999809644	6,58297E-05
0,06731704	0,998192278	1,7811E-05	0,998285583	2,37479E-05	0,998502348	3,56219E-05	0,99979802	7,12438E-05
0,07233942	0,99810141	1,92872E-05	0,998198893	2,57163E-05	0,99842576	3,85745E-05	0,999785591	7,71489E-05
0,0777365	0,998005144	2,08993E-05	0,998107015	2,78657E-05	0,998344531	4,17985E-05	0,999772288	8,3597E-05
0,08353626	0,997903054	2,26617E-05	0,998009539	3,02156E-05	0,998258287	4,53234E-05	0,999758034	9,06468E-05

0,08976871	0,997794669	2,45911E-05	0,99790601	3,27882E-05	0,998166616	4,91822E-05	0,999742744	9,83645E-05
0,09646616	0,997679472	2,67063E-05	0,997795925	3,56084E-05	0,998069064	5,34127E-05	0,999726323	0,000106825
0,10366329	0,997556887	2,90287E-05	0,997678726	3,87049E-05	0,997965123	5,80573E-05	0,999708664	0,000116115
0,11139739	0,997426275	3,15823E-05	0,997553797	4,21098E-05	0,997854233	6,31647E-05	0,999689649	0,000126329
0,1197085	0,99728693	3,4395E-05	0,99742045	4,586E-05	0,997735769	6,879E-05	0,999669146	0,00013758
0,12863969	0,997138067	3,74982E-05	0,997277924	4,99976E-05	0,997609037	7,49964E-05	0,999647005	0,000149993
0,13823722	0,996978813	4,0928E-05	0,997125372	5,45706E-05	0,997473266	8,1856E-05	0,999623062	0,000163712
0,1485508	0,9968082	4,47257E-05	0,996961852	5,96342E-05	0,997327594	8,94513E-05	0,999597128	0,000178903
0,15963385	0,996625152	4,89386E-05	0,996786317	6,52515E-05	0,997171067	9,78772E-05	0,999568995	0,000195754
0,17154379	0,996428474	5,36211E-05	0,996597604	7,14949E-05	0,997002616	0,000107242	0,999538429	0,000214485
0,1843423	0,99621684	5,88357E-05	0,99639442	7,84477E-05	0,996821059	0,000117671	0,999505165	0,000235343
0,19809568	0,995988779	6,46543E-05	0,996175329	8,62057E-05	0,996625074	0,000129309	0,999468908	0,000258617
0,21287517	0,995742659	7,11594E-05	0,995938738	9,48792E-05	0,996413196	0,000142319	0,999429327	0,000284638
0,22875732	0,995476676	7,84463E-05	0,995682882	0,000104595	0,996183796	0,000156893	0,99938605	0,000313785
0,24582441	0,99518883	8,66247E-05	0,995405803	0,0001155	0,995935067	0,000173249	0,99933866	0,000346499
0,26416483	0,994876917	9,58208E-05	0,995105338	0,000127761	0,995665003	0,000191642	0,999286692	0,000383283
0,2838736	0,9945385	0,00010618	0,994779096	0,000141574	0,995371384	0,000212361	0,999229624	0,000424721
0,30505279	0,994170897	0,000117871	0,994424438	0,000157161	0,995051756	0,000235742	0,999166873	0,000471484
0,32781212	0,993771157	0,000131086	0,994038455	0,000174781	0,994703404	0,000262171	0,99909779	0,000524343
0,35226947	0,993336035	0,000146047	0,993617947	0,000194729	0,994323332	0,000292094	0,99902165	0,000584188
0,37855153	0,992861973	0,000163011	0,993159393	0,000217348	0,993908238	0,000326022	0,998937646	0,000652044
0,40679443	0,992345067	0,000182272	0,992658929	0,00024303	0,993454483	0,000364545	0,998844881	0,000729089
0,43714448	0,991781045	0,00020417	0,992112312	0,000272226	0,992958063	0,000408339	0,998742358	0,000816678
0,46975888	0,991165231	0,000229093	0,99151489	0,000305457	0,99241457	0,000458185	0,998628968	0,000916371
0,50480657	0,990492511	0,000257489	0,990861567	0,000343319	0,99181916	0,000514979	0,998503484	0,001029958
0,54246909	0,989757294	0,000289875	0,990146755	0,000386499	0,991166507	0,000579749	0,998364542	0,001159498
0,58294154	0,988953468	0,00032684	0,989364334	0,000435786	0,990450752	0,000653679	0,998210633	0,001307359
0,65	0,987591579	0,000393027	0,988036674	0,000524035	0,989233138	0,000786053	0,997945496	0,001572106
0,702	0,986510922	0,000448593	0,986981459	0,000598124	0,988262801	0,000897186	0,997731529	0,001794371
0,767	0,985131466	0,000523258	0,985632408	0,000697678	0,987019159	0,001046517	0,99745422	0,002093034
0,832	0,983721748	0,000603703	0,984251501	0,000804938	0,985742776	0,001207407	0,997166398	0,002414814
0,913	0,981924907	0,000712026	0,982488281	0,000949367	0,984108403	0,001424051	0,996793645	0,002848102
0,994	0,980085885	0,000829292	0,980680298	0,001105723	0,982427552	0,001658584	0,996405933	0,003317169
1,094	0,977760504	0,00098638	0,978389622	0,001315174	0,980291259	0,00197276	0,99590758	0,003945521
1,193	0,975401717	0,001155279	0,97606122	0,001540372	0,97811272	0,002310558	0,995393722	0,004621116
1,316	0,972396915	0,001383643	0,973088628	0,001844857	0,975321986	0,002767285	0,994728214	0,00553457
1,438	0,969339691	0,001630399	0,970057273	0,002173865	0,972466091	0,003260798	0,994039811	0,006521595
1,587	0,96550786	0,001959096	0,966248847	0,002612128	0,968865136	0,003918192	0,993162616	0,007836385
1,735	0,961600907	0,002315323	0,96235629	0,003087097	0,965171122	0,004630645	0,992253453	0,00926129
1,914	0,956749103	0,002785745	0,957510251	0,003714326	0,960555136	0,00557149	0,991105848	0,011142979
2,092	0,951795002	0,0032965	0,952549456	0,004395334	0,955812235	0,006593001	0,989914957	0,013186002
2,304	0,945736646	0,003960707	0,946467342	0,005280942	0,949975742	0,007921413	0,988435067	0,015842826
2,516	0,939517324	0,004685672	0,94020761	0,006247563	0,94394698	0,009371344	0,986891473	0,018742689
2,765	0,932020933	0,005614754	0,932643312	0,007486338	0,936636097	0,011229507	0,985001161	0,022459015
3,014	0,924332025	0,006627651	0,924865441	0,008836868	0,929093508	0,013255301	0,983031408	0,026510603
3,303	0,91518502	0,007908355	0,915590325	0,010544473	0,920070596	0,01581671	0,980650676	0,031633419
3,591	0,905850493	0,009296948	0,906103413	0,012395931	0,910815021	0,018593897	0,978182192	0,037187794
3,92	0,894943075	0,01102043	0,894994322	0,014693906	0,899949116	0,02204086	0,975251117	0,044081719
4,248	0,88383421	0,01288433	0,883658097	0,017179106	0,888836841	0,025768659	0,97221698	0,051537319

4,617	0,871086374	0,015155058	0,870627064	0,020206744	0,876040847	0,030310115	0,968677016	0,060620231
4,986	0,858104031	0,017609852	0,857336925	0,023479803	0,862973567	0,035219704	0,965010094	0,070439409
5,394	0,843512587	0,020538372	0,842382067	0,027384497	0,848257978	0,041076745	0,960815833	0,08215349
5,802	0,828709117	0,023691924	0,827196892	0,031589232	0,833311902	0,047383847	0,95648272	0,094767695
6,246	0,812400531	0,02737942	0,810459148	0,036505894	0,816842463	0,05475884	0,951618293	0,109517681
6,69	0,795927048	0,031333411	0,79354937	0,041777881	0,800217533	0,062666822	0,946607254	0,125333644
7,168	0,77805484	0,035888071	0,775207515	0,047850762	0,78220922	0,071776143	0,941058025	0,143552286
7,646	0,76008733	0,040751604	0,756778345	0,054335471	0,764148992	0,081503207	0,935357915	0,163006414
8,156	0,740862708	0,046281308	0,7370783	0,06170841	0,744888553	0,092562616	0,929119792	0,185125231
8,665	0,721669735	0,052150747	0,717436274	0,069534329	0,725737948	0,104301494	0,922742653	0,208602988
9,208	0,701241161	0,058798358	0,696564416	0,078397811	0,705452268	0,117596716	0,91578345	0,235193433
9,75	0,680949443	0,065831212	0,675873858	0,08777495	0,685412388	0,131662424	0,90868671	0,263324849
10,33	0,659399245	0,073797003	0,653951426	0,098396004	0,664258409	0,147594006	0,90093726	0,295188012
10,91	0,63807089	0,08221755	0,632312221	0,1096234	0,643459401	0,164435099	0,893038578	0,328870199
11,54	0,615210883	0,091879256	0,609188065	0,122505674	0,621323226	0,183758511	0,88430245	0,367517022
12,17	0,592723248	0,102077503	0,58651503	0,136103337	0,599708015	0,204155006	0,875416021	0,408310011
12,87	0,568230929	0,114038166	0,561909452	0,152050887	0,576346731	0,228076331	0,865380909	0,456152662
13,57	0,5443116	0,126661225	0,537972546	0,168881634	0,55371084	0,25332245	0,855191432	0,506644901
14,375	0,517571478	0,141996632	0,511325085	0,189328842	0,528607145	0,283993264	0,843302252	0,567986527
20	0,356558734	0,273600981	0,353397323	0,364801307	0,380892206	0,547201961	0,756748261	1,094403922
40	0,086474312	1,087934045	0,092552091	1,450578727	0,120837842	2,175868091	0,456186169	4,351736182
60	0,021108041	2,442999194	0,02463109	3,257332259	0,036930319	4,885998389	0,236992879	9,771996778
80	0,00508391	4,338796428	0,006284843	5,785061904	0,010297563	8,677592855	0,109158895	17,35518571
100	0,001168985	6,775325745	0,001495025	9,03376766	0,002604053	13,55065149	0,04531565	27,10130298

dp(micras)	$h_{muestreo}$					
	V/Vm=2	Stokes(2)	V/Vm=3	Stokes(3)	V/Vm=4	Stokes(4)
0,01596339	1,000316092	3,13875E-05	1,001019114	4,70813E-05	1,002062138	6,2775E-05
0,01715438	1,000332112	3,37828E-05	1,001073243	5,06743E-05	1,002175192	6,75657E-05
0,01843423	1,000348986	3,63656E-05	1,001130426	5,45483E-05	1,002294869	7,27311E-05
0,01980957	1,000366767	3,91511E-05	1,001190856	5,87266E-05	1,002421602	7,83021E-05
0,02128752	1,000385509	4,21562E-05	1,00125474	6,32343E-05	1,002555858	8,43124E-05
0,02287573	1,000405269	4,53992E-05	1,001322301	6,80989E-05	1,002698141	9,07985E-05
0,02458244	1,000426112	4,89003E-05	1,001393777	7,33505E-05	1,002848994	9,78006E-05
0,02641648	1,000448105	5,26813E-05	1,00146943	7,9022E-05	1,003009007	0,000105363
0,02838736	1,000471321	5,67663E-05	1,001549538	8,51494E-05	1,003178817	0,000113533
0,03050528	1,000495838	6,11816E-05	1,001634407	9,17724E-05	1,003359119	0,000122363
0,03278121	1,000521742	6,59563E-05	1,001724365	9,89344E-05	1,003550663	0,000131913
0,03522695	1,000549127	7,11222E-05	1,00181977	0,000106683	1,003754273	0,000142244
0,03785515	1,000578091	7,67145E-05	1,001921015	0,000115072	1,003970842	0,000153429
0,04067944	1,000608745	8,2772E-05	1,002028523	0,000124158	1,004201349	0,000165544
0,04371445	1,000641208	8,93378E-05	1,002142761	0,000134007	1,004446868	0,000178676
0,04697589	1,000675609	9,64596E-05	1,00226424	0,000144689	1,004708575	0,000192919
0,05048066	1,000712093	0,00010419	1,002393519	0,000156285	1,004987765	0,00020838
0,05424691	1,000750814	0,000112588	1,002531214	0,000168883	1,005285863	0,000225177
0,05829415	1,000791945	0,00012172	1,002678005	0,000182581	1,005604447	0,000243441
0,06264335	1,000835675	0,000131659	1,002834642	0,000197489	1,00594526	0,000263319

0,06731704	1,000882214	0,000142488	1,003001956	0,000213732	1,006310235	0,000284975
0,07233942	1,000931791	0,000154298	1,003180867	0,000231447	1,006701523	0,000308596
0,0777365	1,000984665	0,000167194	1,0033724	0,000250791	1,007121516	0,000334388
0,08353626	1,001041117	0,000181294	1,003577696	0,00027194	1,007572886	0,000362587
0,08976871	1,001101466	0,000196729	1,003798026	0,000295093	1,008058617	0,000393458
0,09646616	1,001166062	0,000213651	1,004034814	0,000320476	1,008582055	0,000427301
0,10366329	1,001235299	0,000232229	1,00428965	0,000348344	1,00914695	0,000464458
0,11139739	1,001309617	0,000252659	1,004564322	0,000378988	1,009757516	0,000505317
0,1197085	1,001389505	0,00027516	1,004860833	0,00041274	1,010418497	0,00055032
0,12863969	1,001475514	0,000299986	1,005181437	0,000449978	1,011135237	0,000599971
0,13823722	1,001568261	0,000327424	1,005528672	0,000491136	1,01191376	0,000654848
0,1485508	1,001668437	0,000357805	1,005905395	0,000536708	1,012760872	0,000715611
0,15963385	1,001776818	0,000391509	1,006314827	0,000587263	1,013684258	0,000783018
0,17154379	1,001894277	0,000428969	1,006760601	0,000643454	1,014692606	0,000857938
0,1843423	1,002021791	0,000470686	1,007246817	0,000706029	1,015795735	0,000941372
0,19809568	1,002160462	0,000517234	1,007778099	0,000775851	1,017004751	0,001034468
0,21287517	1,002311522	0,000569275	1,008359665	0,000853913	1,018332206	0,00113855
0,22875732	1,002476358	0,00062757	1,008997402	0,000941355	1,019792283	0,001255141
0,24582441	1,002656526	0,000692997	1,009697945	0,001039496	1,021400995	0,001385995
0,26416483	1,002853768	0,000766567	1,01046877	0,00114985	1,02317641	0,001533133
0,2838736	1,003070038	0,000849443	1,011318294	0,001274164	1,025138882	0,001698886
0,30505279	1,003307525	0,000942968	1,012255983	0,001414451	1,027311314	0,001885935
0,32781212	1,003568674	0,001048686	1,01329247	0,001573029	1,029719426	0,002097371
0,35226947	1,003856221	0,001168377	1,014439681	0,001752565	1,032392046	0,002336753
0,37855153	1,004173218	0,001304088	1,015710978	0,001956133	1,035361408	0,002608177
0,40679443	1,00452307	0,001458178	1,017121299	0,002187267	1,038663451	0,002916356
0,43714448	1,004909567	0,001633357	1,018687317	0,002450035	1,042338122	0,003266713
0,46975888	1,00533693	0,001832741	1,020427602	0,002749112	1,046429663	0,003665483
0,50480657	1,005809849	0,002059915	1,022362788	0,003089873	1,050986863	0,004119831
0,54246909	1,006333529	0,002318997	1,024515742	0,003478495	1,05606327	0,004637994
0,58294154	1,006913742	0,002614717	1,026911735	0,003922076	1,061717327	0,005229434
0,65	1,007913661	0,003144212	1,0310623	0,004716318	1,071514103	0,006288424
0,702	1,008720954	0,003588743	1,034428826	0,005383114	1,079454385	0,007177485
0,767	1,00976758	0,004186067	1,038808454	0,006279101	1,0897658	0,008372134
0,832	1,010854052	0,004829627	1,043367101	0,007244441	1,100466184	0,009659255
0,913	1,012260819	0,005696205	1,049279662	0,008544307	1,114279771	0,01139241
0,994	1,013722851	0,006634337	1,05542704	0,009951506	1,128548008	0,013268675
1,094	1,015598795	0,007891042	1,063304896	0,011836563	1,146669906	0,015782084
1,193	1,017527232	0,009242232	1,071377279	0,013863348	1,165026994	0,018484464
1,316	1,020012539	0,011069141	1,081721687	0,016603711	1,188207037	0,022138282
1,438	1,022564642	0,01304319	1,092254372	0,019564786	1,211384887	0,026086381
1,587	1,025782543	0,015672769	1,105378233	0,023509154	1,239634659	0,031345538
1,735	1,029069893	0,01852258	1,11857941	0,02778387	1,267320978	0,03704516
1,914	1,033139006	0,022285958	1,134601536	0,033428937	1,299918808	0,044571917
2,092	1,037255165	0,026372003	1,150425209	0,039558005	1,331022086	0,052744006
2,304	1,042204224	0,031685653	1,168915583	0,047528479	1,365997329	0,063371305
2,516	1,047156274	0,037485377	1,186817522	0,056228066	1,398471928	0,074970754
2,765	1,052913859	0,04491803	1,206872406	0,067377045	1,433271516	0,089836059
3,014	1,058544528	0,053021205	1,225704633	0,079531808	1,464485233	0,106042411

3,303	1,064845104	0,063266839	1,245889699	0,094900258	1,496451833	0,126533677
3,591	1,070804175	0,074375587	1,264160788	0,111563381	1,524158946	0,148751175
3,92	1,077150733	0,088163439	1,2828118	0,132245158	1,551375337	0,176326877
4,248	1,082935069	0,103074637	1,299169651	0,154611956	1,574511873	0,206149275
4,617	1,088754106	0,121240461	1,315130287	0,181860692	1,596623098	0,242480922
4,986	1,093828146	0,140878817	1,328791368	0,211318226	1,615397917	0,281757635
5,394	1,098579779	0,164306979	1,341581308	0,246460469	1,633103044	0,328613959
5,802	1,102462483	0,18953539	1,35230652	0,284303085	1,648302497	0,37907078
6,246	1,105759113	0,219035361	1,362020314	0,328553042	1,662628127	0,438070722
6,69	1,108161985	0,250667288	1,370041247	0,376000932	1,675130047	0,501334575
7,168	1,109841566	0,287104572	1,377112534	0,430656858	1,686943574	0,574209143
7,646	1,110675538	0,326012828	1,382832395	0,489019243	1,697325604	0,652025657
8,156	1,110734609	0,370250463	1,387679094	0,555375694	1,707023758	0,740500925
8,665	1,110033488	0,417205977	1,391402915	0,625808965	1,71540792	0,834411954
9,208	1,108542522	0,470386865	1,39429623	0,705580298	1,723004662	0,94077373
9,75	1,106372461	0,526649698	1,396180757	0,789974546	1,729241293	1,053299395
10,33	1,103374834	0,590376025	1,397172263	0,885564037	1,734445858	1,18075205
10,91	1,099746783	0,657740397	1,39716529	0,986610596	1,738139131	1,315480795
11,54	1,09515668	0,735034044	1,396076793	1,102551066	1,740443231	1,470068089
12,17	1,08994614	0,816620022	1,393901429	1,224930034	1,740977286	1,633240045
12,87	1,083484726	0,912305325	1,390247302	1,368457987	1,739514179	1,82461065
13,57	1,076365224	1,013289802	1,385326743	1,519934703	1,735920804	2,026579604
14,375	1,067418664	1,135973055	1,378149089	1,703959582	1,729220327	2,271946109
20	0,986119622	2,188807845	1,287997298	3,283211767	1,615718685	4,37761569
40	0,586701826	8,703472363	0,724640089	13,05520854	0,848133237	17,40694473
60	0,268404363	19,54399356	0,292565403	29,31599033	0,306360865	39,08798711
80	0,101967626	34,71037142	0,094754137	52,06555713	0,086783592	69,42074284
100	0,033374341	54,20260596	0,025784803	81,30390894	0,020286037	108,4052119

Figura 3.8

dp (micras)	h _{asp.}									
	(0°)	(10°)	(20°)	(30°)	(40°)	(50°)	(60°)	(70°)	(80°)	(90°)
0,01596339	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99998	0,99998	0,99997	0,99996	0,99995
0,01715438	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99997	0,99997	0,99996	0,99995
0,01843423	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99997	0,99996	0,99995	0,99995
0,01980957	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99997	0,99996	0,99995	0,99994
0,02128752	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99997	0,99996	0,99995	0,99994
0,02287573	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99997	0,99996	0,99994	0,99993
0,02458244	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99996	0,99995	0,99994	0,99993
0,02641648	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99996	0,99995	0,99993	0,99992
0,02838736	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99996	0,99994	0,99993	0,99991
0,03050528	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99995	0,99994	0,99992	0,99991
0,03278121	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99996	0,99995	0,99993	0,99992	0,99990
0,03522695	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99999	0,99996	0,99995	0,99993	0,99991	0,99989

0,03785515	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99999	0,99996	0,99994	0,99992	0,99990	0,99988
0,04067944	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99999	0,99996	0,99994	0,99992	0,99990	0,99988
0,04371445	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99999	0,99995	0,99993	0,99991	0,99989	0,99987
0,04697589	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99999	0,99995	0,99993	0,99990	0,99988	0,99986
0,05048066	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99994	0,99992	0,99990	0,99987	0,99984
0,05424691	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99994	0,99992	0,99989	0,99986	0,99983
0,05829415	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99993	0,99991	0,99988	0,99985	0,99982
0,06264335	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99993	0,99990	0,99987	0,99984	0,99980
0,06731704	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99992	0,99989	0,99986	0,99982	0,99979
0,07233942	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99992	0,99988	0,99985	0,99981	0,99977
0,0777365	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99991	0,99987	0,99983	0,99979	0,99975
0,08353626	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99990	0,99986	0,99982	0,99978	0,99973
0,08976871	1,00000	1,00000	0,99999	0,99999	0,99997	0,99989	0,99985	0,99981	0,99976	0,99970
0,09646616	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99997	0,99989	0,99984	0,99979	0,99974	0,99968
0,10366329	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99996	0,99988	0,99983	0,99977	0,99971	0,99965
0,11139739	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99996	0,99986	0,99981	0,99975	0,99969	0,99962
0,1197085	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99996	0,99985	0,99979	0,99973	0,99966	0,99959
0,12863969	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99995	0,99984	0,99978	0,99970	0,99963	0,99955
0,13823722	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	0,99995	0,99982	0,99975	0,99968	0,99959	0,99951
0,1485508	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99994	0,99981	0,99973	0,99965	0,99956	0,99946
0,15963385	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99994	0,99979	0,99971	0,99961	0,99951	0,99941
0,17154379	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99993	0,99977	0,99968	0,99958	0,99947	0,99936
0,1843423	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	0,99993	0,99975	0,99965	0,99954	0,99942	0,99929
0,19809568	1,00000	1,00000	0,99999	0,99996	0,99992	0,99972	0,99961	0,99949	0,99936	0,99922
0,21287517	1,00000	1,00000	0,99999	0,99996	0,99991	0,99969	0,99957	0,99944	0,99929	0,99915
0,22875732	1,00000	1,00000	0,99998	0,99996	0,99990	0,99966	0,99953	0,99938	0,99922	0,99906
0,24582441	1,00000	1,00000	0,99998	0,99995	0,99989	0,99963	0,99948	0,99932	0,99914	0,99896
0,26416483	1,00000	1,00000	0,99998	0,99995	0,99988	0,99959	0,99943	0,99924	0,99905	0,99885
0,2838736	1,00000	1,00000	0,99998	0,99994	0,99987	0,99954	0,99936	0,99916	0,99895	0,99873
0,30505279	1,00000	1,00000	0,99998	0,99993	0,99985	0,99949	0,99929	0,99907	0,99883	0,99859
0,32781212	1,00000	0,99999	0,99997	0,99993	0,99984	0,99944	0,99921	0,99896	0,99870	0,99843
0,35226947	1,00000	0,99999	0,99997	0,99992	0,99982	0,99937	0,99912	0,99885	0,99855	0,99825
0,37855153	1,00000	0,99999	0,99997	0,99991	0,99980	0,99930	0,99902	0,99871	0,99838	0,99804
0,40679443	1,00000	0,99999	0,99996	0,99990	0,99977	0,99922	0,99891	0,99856	0,99819	0,99781
0,43714448	1,00000	0,99999	0,99996	0,99988	0,99975	0,99912	0,99877	0,99839	0,99798	0,99755
0,46975888	1,00000	0,99999	0,99995	0,99987	0,99972	0,99902	0,99863	0,99819	0,99773	0,99725
0,50480657	1,00000	0,99999	0,99995	0,99985	0,99968	0,99890	0,99846	0,99797	0,99745	0,99691
0,54246909	1,00000	0,99999	0,99994	0,99983	0,99964	0,99876	0,99826	0,99771	0,99713	0,99652
0,58294154	1,00000	0,99999	0,99993	0,99981	0,99959	0,99860	0,99804	0,99742	0,99676	0,99608
0,65	1,00000	0,99998	0,99992	0,99978	0,99951	0,99832	0,99764	0,99690	0,99610	0,99528
0,702	1,00000	0,99998	0,99991	0,99974	0,99944	0,99808	0,99731	0,99646	0,99555	0,99462
0,767	1,00000	0,99998	0,99989	0,99970	0,99935	0,99776	0,99686	0,99587	0,99481	0,99372
0,832	1,00000	0,99997	0,99988	0,99966	0,99925	0,99741	0,99638	0,99523	0,99401	0,99276
0,913	1,00000	0,99997	0,99985	0,99959	0,99912	0,99695	0,99573	0,99438	0,99294	0,99146
0,994	1,00000	0,99997	0,99983	0,99953	0,99897	0,99645	0,99502	0,99345	0,99178	0,99005
1,094	1,00000	0,99996	0,99980	0,99944	0,99878	0,99577	0,99408	0,99221	0,99022	0,98816
1,193	1,00000	0,99995	0,99976	0,99934	0,99857	0,99505	0,99307	0,99088	0,98854	0,98614
1,316	1,00000	0,99994	0,99972	0,99921	0,99829	0,99407	0,99170	0,98908	0,98628	0,98340
1,438	1,00000	0,99993	0,99967	0,99907	0,99799	0,99301	0,99022	0,98713	0,98383	0,98044

1,587	1,00000	0,99992	0,99960	0,99889	0,99758	0,99160	0,98825	0,98453	0,98057	0,97649
1,735	1,00000	0,99990	0,99953	0,99869	0,99715	0,99008	0,98611	0,98172	0,97704	0,97222
1,914	1,00000	0,99988	0,99943	0,99842	0,99657	0,98806	0,98329	0,97800	0,97238	0,96657
2,092	1,00000	0,99986	0,99933	0,99813	0,99595	0,98587	0,98022	0,97397	0,96731	0,96044
2,304	1,00000	0,99984	0,99919	0,99776	0,99514	0,98302	0,97624	0,96873	0,96072	0,95247
2,516	1,00000	0,99981	0,99904	0,99736	0,99426	0,97991	0,97189	0,96300	0,95354	0,94377
2,765	1,00000	0,99977	0,99886	0,99684	0,99314	0,97593	0,96631	0,95567	0,94432	0,93262
3,014	1,00000	0,99973	0,99865	0,99628	0,99193	0,97159	0,96023	0,94767	0,93428	0,92047
3,303	1,00000	0,99967	0,99839	0,99557	0,99041	0,96610	0,95255	0,93756	0,92158	0,90510
3,591	1,00000	0,99962	0,99812	0,99481	0,98877	0,96015	0,94422	0,92659	0,90781	0,88844
3,92	1,00000	0,99955	0,99778	0,99387	0,98675	0,95276	0,93388	0,91299	0,89072	0,86775
4,248	1,00000	0,99947	0,99741	0,99287	0,98459	0,94477	0,92269	0,89827	0,87224	0,84539
4,617	1,00000	0,99938	0,99696	0,99165	0,98200	0,93504	0,90907	0,88034	0,84972	0,81814
4,986	1,00000	0,99929	0,99649	0,99036	0,97922	0,92451	0,89434	0,86096	0,82538	0,78868
5,394	1,00000	0,99917	0,99593	0,98883	0,97597	0,91196	0,87677	0,83783	0,79634	0,75354
5,802	1,00000	0,99905	0,99533	0,98721	0,97253	0,89844	0,85785	0,81293	0,76507	0,71570
6,246	1,00000	0,99891	0,99464	0,98534	0,96858	0,88264	0,83572	0,78382	0,72850	0,67145
6,69	1,00000	0,99875	0,99391	0,98337	0,96444	0,86569	0,81200	0,75260	0,68929	0,62400
7,168	1,00000	0,99858	0,99308	0,98115	0,95979	0,84616	0,78467	0,71664	0,64413	0,56934
7,646	1,00000	0,99840	0,99221	0,97883	0,95495	0,82532	0,75549	0,67824	0,59590	0,51098
8,156	1,00000	0,99820	0,99124	0,97625	0,94962	0,80161	0,72231	0,63457	0,54106	0,44462
8,665	1,00000	0,99799	0,99024	0,97359	0,94414	0,77645	0,68710	0,58823	0,48286	0,37419
9,208	1,00000	0,99775	0,98912	0,97066	0,93815	0,74796	0,64721	0,53574	0,41694	0,29442
9,75	1,00000	0,99751	0,98797	0,96765	0,93206	0,71781	0,60501	0,48021	0,34720	0,21003
10,33	1,00000	0,99724	0,98671	0,96437	0,92545	0,68367	0,55722	0,41732	0,26821	0,11444
10,91	1,00000	0,99696	0,98541	0,96102	0,91879	0,64757	0,50669	0,35083	0,18471	0,01339
11,54	1,00000	0,99665	0,98397	0,95734	0,91152	0,60616	0,44872	0,27454	0,08890	0,00000
12,17	1,00000	0,99634	0,98251	0,95363	0,90428	0,56244	0,38753	0,19402	0,00000	0,00000
12,87	1,00000	0,99598	0,98086	0,94949	0,89629	0,51117	0,31577	0,09958	0,00000	0,00000
13,57	1,00000	0,99561	0,97919	0,94535	0,88842	0,45706	0,24003	0,00000	0,00000	0,00000
14,375	1,00000	0,99518	0,97727	0,94064	0,87958	0,39132	0,14802	0,00000	0,00000	0,00000
20	1,00000	0,99220	0,96452	0,91102	0,82750	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
40	1,00000	0,98602	0,94255	0,86946	0,76895	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
60	1,00000	0,98492	0,93985	0,86614	0,76609	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
80	1,00000	0,98481	0,93970	0,86603	0,76604	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
100	1,00000	0,98481	0,93969	0,86603	0,76604	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Figura 3.9

dp (micras)	h _{grav.}									
	(0°)	(10°)	(20°)	(30°)	(40°)	(50°)	(60°)	(70°)	(80°)	(90°)
0,01596	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99996	0,99997	1,00000
0,01715	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99996	1,00000
0,01843	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99995	0,99996	1,00000
0,01981	0,99992	0,99992	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99995	0,99996	1,00000

0,02129	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99993	0,99993	0,99994	0,99995	0,99996	1,00000
0,02288	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99993	0,99993	0,99994	0,99996	1,00000
0,02458	0,99991	0,99991	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99993	0,99994	0,99995	1,00000
0,02642	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99991	0,99992	0,99993	0,99994	0,99995	1,00000
0,02839	0,99990	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99992	0,99993	0,99995	1,00000
0,03051	0,99989	0,99989	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99992	0,99993	0,99994	1,00000
0,03278	0,99989	0,99989	0,99989	0,99989	0,99990	0,99990	0,99991	0,99992	0,99994	1,00000
0,03523	0,99988	0,99988	0,99988	0,99989	0,99989	0,99990	0,99991	0,99992	0,99994	1,00000
0,03786	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988	0,99989	0,99989	0,99990	0,99992	0,99993	1,00000
0,04068	0,99987	0,99987	0,99987	0,99987	0,99988	0,99989	0,99990	0,99991	0,99993	1,00000
0,04371	0,99986	0,99986	0,99986	0,99987	0,99987	0,99988	0,99989	0,99990	0,99993	1,00000
0,04698	0,99985	0,99985	0,99985	0,99986	0,99986	0,99987	0,99988	0,99990	0,99992	1,00000
0,05048	0,99984	0,99984	0,99984	0,99985	0,99986	0,99986	0,99988	0,99989	0,99992	1,00000
0,05425	0,99983	0,99983	0,99983	0,99984	0,99985	0,99986	0,99987	0,99989	0,99991	1,00000
0,05829	0,99982	0,99982	0,99982	0,99983	0,99984	0,99985	0,99986	0,99988	0,99991	1,00000
0,06264	0,99981	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99984	0,99985	0,99987	0,99990	1,00000
0,06732	0,99980	0,99980	0,99980	0,99981	0,99982	0,99983	0,99984	0,99986	0,99990	1,00000
0,07234	0,99979	0,99979	0,99979	0,99980	0,99981	0,99982	0,99983	0,99986	0,99989	1,00000
0,07774	0,99977	0,99977	0,99978	0,99978	0,99979	0,99981	0,99982	0,99985	0,99988	1,00000
0,08354	0,99976	0,99976	0,99976	0,99977	0,99978	0,99979	0,99981	0,99984	0,99987	1,00000
0,08977	0,99974	0,99974	0,99975	0,99976	0,99977	0,99978	0,99980	0,99983	0,99987	1,00000
0,09647	0,99973	0,99973	0,99973	0,99974	0,99975	0,99977	0,99979	0,99982	0,99986	1,00000
0,10366	0,99971	0,99971	0,99972	0,99972	0,99974	0,99975	0,99978	0,99981	0,99985	1,00000
0,11140	0,99969	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99974	0,99976	0,99979	0,99984	1,00000
0,11971	0,99967	0,99967	0,99968	0,99969	0,99970	0,99972	0,99974	0,99978	0,99983	1,00000
0,12864	0,99965	0,99965	0,99966	0,99967	0,99968	0,99970	0,99973	0,99976	0,99982	1,00000
0,13824	0,99962	0,99963	0,99963	0,99964	0,99966	0,99968	0,99971	0,99975	0,99980	1,00000
0,14855	0,99960	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99966	0,99969	0,99973	0,99979	1,00000
0,15963	0,99957	0,99957	0,99958	0,99959	0,99961	0,99963	0,99967	0,99971	0,99978	1,00000
0,17154	0,99954	0,99954	0,99955	0,99956	0,99958	0,99961	0,99964	0,99969	0,99976	1,00000
0,18434	0,99951	0,99951	0,99952	0,99953	0,99955	0,99958	0,99962	0,99967	0,99974	1,00000
0,19810	0,99947	0,99947	0,99948	0,99950	0,99952	0,99955	0,99959	0,99964	0,99972	1,00000
0,21288	0,99943	0,99943	0,99944	0,99946	0,99948	0,99952	0,99956	0,99962	0,99970	1,00000
0,22876	0,99939	0,99939	0,99940	0,99942	0,99944	0,99948	0,99953	0,99959	0,99968	1,00000
0,24582	0,99934	0,99934	0,99935	0,99937	0,99940	0,99944	0,99949	0,99956	0,99966	1,00000
0,26416	0,99929	0,99929	0,99930	0,99932	0,99935	0,99940	0,99945	0,99952	0,99963	1,00000
0,28387	0,99923	0,99923	0,99925	0,99927	0,99930	0,99935	0,99941	0,99948	0,99960	1,00000
0,30505	0,99917	0,99917	0,99919	0,99921	0,99925	0,99929	0,99936	0,99944	0,99957	1,00000
0,32781	0,99910	0,99910	0,99912	0,99915	0,99918	0,99924	0,99930	0,99940	0,99953	1,00000
0,35227	0,99902	0,99903	0,99904	0,99907	0,99911	0,99917	0,99925	0,99935	0,99949	1,00000
0,37855	0,99894	0,99894	0,99896	0,99899	0,99904	0,99910	0,99918	0,99929	0,99945	1,00000
0,40679	0,99884	0,99885	0,99887	0,99891	0,99895	0,99902	0,99911	0,99923	0,99940	1,00000
0,43714	0,99874	0,99875	0,99877	0,99881	0,99886	0,99893	0,99903	0,99916	0,99935	1,00000
0,46976	0,99863	0,99864	0,99866	0,99870	0,99876	0,99884	0,99894	0,99908	0,99929	1,00000
0,50481	0,99850	0,99851	0,99854	0,99858	0,99865	0,99873	0,99885	0,99900	0,99922	1,00000
0,54247	0,99836	0,99837	0,99840	0,99845	0,99852	0,99861	0,99874	0,99891	0,99915	1,00000
0,58294	0,99821	0,99822	0,99825	0,99830	0,99838	0,99848	0,99862	0,99880	0,99907	1,00000
0,65000	0,99795	0,99796	0,99799	0,99805	0,99814	0,99826	0,99842	0,99863	0,99893	1,00000
0,70200	0,99773	0,99774	0,99778	0,99785	0,99795	0,99808	0,99825	0,99848	0,99882	1,00000

0,76700	0,997450	0,997470	0,997510	0,997590	0,997700	0,997840	0,998040	0,998300	0,998680	1,000000
0,83200	0,997170	0,997180	0,997230	0,997310	0,997440	0,997600	0,997810	0,998100	0,998530	1,000000
0,91300	0,996790	0,996810	0,996870	0,996960	0,997100	0,997280	0,997530	0,997850	0,998340	1,000000
0,99400	0,996410	0,996430	0,996490	0,996590	0,996750	0,996950	0,997230	0,997600	0,998130	1,000000
1,09400	0,995910	0,995930	0,996000	0,996120	0,996300	0,996530	0,996840	0,997260	0,997880	1,000000
1,19300	0,995390	0,995420	0,995500	0,995640	0,995830	0,996100	0,996450	0,996920	0,997610	1,000000
1,31600	0,994730	0,994760	0,994850	0,995000	0,995230	0,995530	0,995930	0,996470	0,997260	1,000000
1,43800	0,994040	0,994070	0,994180	0,994350	0,994610	0,994950	0,995400	0,996010	0,996900	1,000000
1,58700	0,993160	0,993200	0,993320	0,993520	0,993810	0,994200	0,994720	0,995420	0,996450	1,000000
1,73500	0,992250	0,992300	0,992430	0,992660	0,992990	0,993430	0,994020	0,994810	0,995970	1,000000
1,91400	0,991110	0,991160	0,991310	0,991570	0,991950	0,992460	0,993130	0,994040	0,995380	1,000000
2,09200	0,989910	0,989970	0,990150	0,990440	0,990870	0,991450	0,992210	0,993240	0,994760	1,000000
2,30400	0,988440	0,988500	0,988700	0,989040	0,989530	0,990190	0,991070	0,992250	0,993990	1,000000
2,51600	0,986890	0,986970	0,987190	0,987580	0,988130	0,988880	0,989880	0,991210	0,993180	1,000000
2,76500	0,985000	0,985090	0,985340	0,985780	0,986420	0,987280	0,988410	0,989940	0,992190	1,000000
3,01400	0,983030	0,983130	0,983420	0,983920	0,984630	0,985600	0,986890	0,988620	0,991160	1,000000
3,30300	0,980650	0,980760	0,981090	0,981660	0,982470	0,983580	0,985050	0,987020	0,989920	1,000000
3,59100	0,978180	0,978310	0,978680	0,979320	0,980240	0,981480	0,983130	0,985360	0,988620	1,000000
3,92000	0,975250	0,975390	0,975810	0,976540	0,977580	0,978990	0,980860	0,983380	0,987090	1,000000
4,24800	0,972220	0,972370	0,972850	0,973660	0,974830	0,976410	0,978510	0,981330	0,985490	1,000000
4,61700	0,968680	0,968850	0,969390	0,970300	0,971610	0,973400	0,975760	0,978940	0,983630	1,000000
4,98600	0,965010	0,965210	0,965800	0,966820	0,968280	0,970270	0,972910	0,976460	0,981700	1,000000
5,39400	0,960820	0,961040	0,961700	0,962830	0,964480	0,966700	0,969650	0,973620	0,979480	1,000000
5,80200	0,956480	0,956730	0,957460	0,958720	0,960540	0,963000	0,966270	0,970680	0,977190	1,000000
6,24600	0,951620	0,951890	0,952710	0,954100	0,956120	0,958850	0,962480	0,967380	0,974610	1,000000
6,69000	0,946610	0,946900	0,947810	0,949340	0,951560	0,954570	0,958570	0,963970	0,971940	1,000000
7,16800	0,941060	0,941390	0,942380	0,944060	0,946510	0,949830	0,954240	0,960190	0,968980	1,000000
7,64600	0,935360	0,935720	0,936800	0,938650	0,941320	0,944950	0,949780	0,956290	0,965930	1,000000
8,15600	0,929120	0,929510	0,930700	0,932710	0,935640	0,939610	0,944890	0,952020	0,962590	1,000000
8,66500	0,922740	0,923170	0,924450	0,926650	0,929830	0,934140	0,939880	0,947650	0,959160	1,000000
9,20800	0,915780	0,916240	0,917640	0,920020	0,923480	0,928170	0,934410	0,942860	0,955400	1,000000
9,75000	0,908690	0,909180	0,910700	0,913270	0,917000	0,922070	0,928820	0,937970	0,951550	1,000000
10,33000	0,900940	0,901480	0,903110	0,905890	0,909920	0,915410	0,922710	0,932610	0,947330	1,000000
10,91000	0,893040	0,893620	0,895370	0,898360	0,902700	0,908600	0,916460	0,927140	0,943020	1,000000
11,54000	0,884300	0,884930	0,886810	0,890030	0,894700	0,901070	0,909540	0,921060	0,938220	1,000000
12,17000	0,875420	0,876080	0,878110	0,881550	0,886560	0,893390	0,902490	0,914860	0,933320	1,000000
12,87000	0,865380	0,866100	0,868270	0,871980	0,877360	0,884700	0,894500	0,907830	0,927750	1,000000
13,57000	0,855190	0,855960	0,858280	0,862250	0,868010	0,875870	0,886370	0,900670	0,922070	1,000000
14,37500	0,843300	0,844130	0,846620	0,850880	0,857080	0,865540	0,876850	0,892280	0,915400	1,000000
20,00000	0,756750	0,757960	0,761630	0,767910	0,777080	0,789660	0,806600	0,829940	0,865400	1,000000
40,00000	0,456190	0,458240	0,464520	0,475380	0,491540	0,514280	0,545960	0,591630	0,665600	1,000000
60,00000	0,236990	0,238950	0,244990	0,255600	0,271770	0,295280	0,329500	0,381810	0,473920	1,000000
80,00000	0,109160	0,110550	0,114880	0,122620	0,134760	0,153100	0,181240	0,227350	0,317020	1,000000
100,00000	0,045320	0,046130	0,048670	0,053310	0,060820	0,072690	0,092010	0,126290	0,200940	1,000000

Figura 3.10

dp (micras)	$h_{iner.}$							
	Boca abajo				Boca arriba			
	(0°)	(30°)	(60°)	(90°)	(0°)	(30°)	(60°)	(90°)
0,01596	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,01715	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,01843	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,01981	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,02129	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,02288	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,02458	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,02642	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,02839	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,03051	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,03278	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,03523	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,03786	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04068	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04371	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,04698	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,05048	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,05425	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,05829	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,06264	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,06732	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,07234	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,07774	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,08354	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,08977	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,09647	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,10366	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,11140	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,11971	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,12864	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,13824	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,14855	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,15963	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,17154	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,18434	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,19810	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,21288	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,22876	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,24582	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,26416	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999
0,28387	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999
0,30505	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999
0,32781	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999

0,35227	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	1,00000	1,00000	0,99999	0,99999
0,37855	1,00000	1,00000	1,00000	0,99998	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998
0,40679	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998	1,00000	1,00000	0,99999	0,99998
0,43714	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997
0,46976	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997	1,00000	1,00000	0,99999	0,99997
0,50481	1,00000	1,00000	0,99999	0,99996	1,00000	1,00000	0,99998	0,99996
0,54247	1,00000	1,00000	0,99998	0,99995	1,00000	1,00000	0,99998	0,99995
0,58294	1,00000	1,00000	0,99998	0,99994	1,00000	0,99999	0,99997	0,99994
0,65000	1,00000	1,00000	0,99997	0,99991	1,00000	0,99999	0,99996	0,99991
0,70200	1,00000	1,00000	0,99996	0,99988	1,00000	0,99999	0,99995	0,99988
0,76700	1,00000	1,00000	0,99995	0,99984	1,00000	0,99999	0,99993	0,99984
0,83200	1,00000	1,00000	0,99993	0,99978	1,00000	0,99998	0,99990	0,99978
0,91300	1,00000	1,00000	0,99991	0,99970	1,00000	0,99998	0,99986	0,99970
0,99400	1,00000	1,00000	0,99987	0,99959	1,00000	0,99997	0,99981	0,99959
1,09400	1,00000	0,99999	0,99982	0,99942	1,00000	0,99995	0,99974	0,99942
1,19300	1,00000	0,99999	0,99976	0,99920	1,00000	0,99994	0,99964	0,99920
1,31600	1,00000	0,99999	0,99965	0,99885	1,00000	0,99991	0,99948	0,99885
1,43800	1,00000	0,99998	0,99952	0,99841	1,00000	0,99987	0,99928	0,99841
1,58700	1,00000	0,99998	0,99930	0,99770	1,00000	0,99981	0,99896	0,99770
1,73500	1,00000	0,99997	0,99903	0,99679	1,00000	0,99974	0,99854	0,99679
1,91400	1,00000	0,99995	0,99859	0,99535	1,00000	0,99963	0,99789	0,99535
2,09200	1,00000	0,99993	0,99803	0,99350	1,00000	0,99948	0,99705	0,99350
2,30400	1,00000	0,99990	0,99715	0,99063	1,00000	0,99924	0,99574	0,99063
2,51600	1,00000	0,99987	0,99602	0,98691	1,00000	0,99894	0,99404	0,98691
2,76500	1,00000	0,99981	0,99429	0,98126	1,00000	0,99848	0,99145	0,98126
3,01400	1,00000	0,99973	0,99205	0,97399	1,00000	0,99788	0,98811	0,97399
3,30300	1,00000	0,99962	0,98870	0,96317	1,00000	0,99699	0,98312	0,96317
3,59100	1,00000	0,99947	0,98441	0,94946	1,00000	0,99584	0,97675	0,94946
3,92000	1,00000	0,99926	0,97816	0,92972	1,00000	0,99416	0,96748	0,92972
4,24800	1,00000	0,99898	0,97027	0,90520	1,00000	0,99203	0,95582	0,90520
4,61700	1,00000	0,99859	0,95911	0,87127	1,00000	0,98899	0,93939	0,87127
4,98600	1,00000	0,99810	0,94519	0,83022	1,00000	0,98516	0,91905	0,83022
5,39400	1,00000	0,99742	0,92619	0,77639	1,00000	0,97987	0,89152	0,77639
5,80200	1,00000	0,99656	0,90300	0,71406	1,00000	0,97330	0,85830	0,71406
6,24600	1,00000	0,99541	0,87261	0,63777	1,00000	0,96450	0,81541	0,63777
6,69000	1,00000	0,99400	0,83655	0,55484	1,00000	0,95377	0,76547	0,55484
7,16800	1,00000	0,99213	0,79126	0,46173	1,00000	0,93979	0,70426	0,46173
7,64600	1,00000	0,98987	0,73943	0,36920	1,00000	0,92306	0,63631	0,36920
8,15600	1,00000	0,98695	0,67749	0,27660	1,00000	0,90189	0,55817	0,27660
8,66500	1,00000	0,98346	0,60994	0,19557	1,00000	0,87711	0,47694	0,19557
9,20800	1,00000	0,97903	0,53341	0,12564	1,00000	0,84647	0,39019	0,12564
9,75000	1,00000	0,97378	0,45485	0,07426	1,00000	0,81145	0,30736	0,07426
10,33000	1,00000	0,96716	0,37158	0,03810	1,00000	0,76908	0,22707	0,03810
10,91000	1,00000	0,95940	0,29265	0,01732	1,00000	0,72188	0,15880	0,01732
11,54000	1,00000	0,94956	0,21555	0,00631	1,00000	0,66565	0,10046	0,00631
12,17000	1,00000	0,93811	0,15045	0,00193	1,00000	0,60511	0,05863	0,00193
12,87000	1,00000	0,92336	0,09404	0,00041	1,00000	0,53421	0,02901	0,00041
13,57000	1,00000	0,90632	0,05413	0,00007	1,00000	0,46142	0,01269	0,00007
14,37500	1,00000	0,88372	0,02560	0,00001	1,00000	0,37829	0,00413	0,00001

20,00000	1,00000	0,63195	0,00000	0,00000	1,00000	0,02708	0,00000	0,00000
40,00000	1,00000	0,00071	0,00000	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000
60,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000
80,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000
100,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Figura 3.11 a y c

dp (micras)	Stokes	$h_{muestreo}$									
		Boca abajo									
		(0°)	(10°)	(20°)	(30°)	(40°)	(50°)	(60°)	(70°)	(80°)	(90°)
0,01596	0,00002	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99995
0,01715	0,00002	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99995
0,01843	0,00002	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99995
0,01981	0,00002	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99991	0,99991	0,99991	0,99991	0,99994
0,02129	0,00002	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99991	0,99991	0,99990	0,99991	0,99994
0,02288	0,00002	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99990	0,99990	0,99990	0,99990	0,99993
0,02458	0,00002	0,99991	0,99991	0,99991	0,99991	0,99991	0,99990	0,99989	0,99989	0,99989	0,99993
0,02642	0,00003	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99991	0,99989	0,99989	0,99988	0,99989	0,99992
0,02839	0,00003	0,99990	0,99990	0,99990	0,99990	0,99990	0,99988	0,99988	0,99988	0,99988	0,99991
0,03051	0,00003	0,99989	0,99989	0,99989	0,99989	0,99989	0,99988	0,99987	0,99987	0,99987	0,99991
0,03278	0,00003	0,99989	0,99989	0,99989	0,99989	0,99989	0,99987	0,99986	0,99986	0,99986	0,99990
0,03523	0,00004	0,99988	0,99988	0,99988	0,99988	0,99988	0,99986	0,99985	0,99985	0,99985	0,99989
0,03786	0,00004	0,99987	0,99987	0,99987	0,99987	0,99987	0,99985	0,99984	0,99984	0,99984	0,99988
0,04068	0,00004	0,99987	0,99987	0,99987	0,99987	0,99987	0,99984	0,99983	0,99983	0,99983	0,99988
0,04371	0,00004	0,99986	0,99986	0,99986	0,99986	0,99986	0,99983	0,99982	0,99982	0,99982	0,99987
0,04698	0,00005	0,99985	0,99985	0,99985	0,99985	0,99985	0,99982	0,99981	0,99980	0,99980	0,99986
0,05048	0,00005	0,99984	0,99984	0,99984	0,99984	0,99984	0,99981	0,99980	0,99979	0,99979	0,99984
0,05425	0,00006	0,99983	0,99983	0,99983	0,99983	0,99983	0,99980	0,99978	0,99978	0,99977	0,99983
0,05829	0,00006	0,99982	0,99982	0,99982	0,99982	0,99982	0,99978	0,99977	0,99976	0,99976	0,99982
0,06264	0,00007	0,99981	0,99981	0,99981	0,99981	0,99981	0,99977	0,99975	0,99974	0,99974	0,99980
0,06732	0,00007	0,99980	0,99980	0,99980	0,99980	0,99980	0,99975	0,99974	0,99972	0,99972	0,99979
0,07234	0,00008	0,99979	0,99979	0,99979	0,99979	0,99978	0,99974	0,99972	0,99970	0,99970	0,99977
0,07774	0,00008	0,99977	0,99977	0,99977	0,99977	0,99977	0,99972	0,99970	0,99968	0,99967	0,99975
0,08354	0,00009	0,99976	0,99976	0,99976	0,99976	0,99975	0,99970	0,99968	0,99966	0,99965	0,99973
0,08977	0,00010	0,99974	0,99974	0,99974	0,99974	0,99974	0,99968	0,99965	0,99963	0,99962	0,99970
0,09647	0,00011	0,99973	0,99973	0,99973	0,99973	0,99972	0,99965	0,99963	0,99961	0,99959	0,99968
0,10366	0,00012	0,99971	0,99971	0,99971	0,99971	0,99970	0,99963	0,99960	0,99958	0,99956	0,99965
0,11140	0,00013	0,99969	0,99969	0,99969	0,99969	0,99968	0,99960	0,99957	0,99954	0,99953	0,99962
0,11971	0,00014	0,99967	0,99967	0,99967	0,99967	0,99966	0,99957	0,99954	0,99951	0,99949	0,99959
0,12864	0,00015	0,99965	0,99965	0,99965	0,99964	0,99963	0,99954	0,99950	0,99947	0,99944	0,99955
0,13824	0,00016	0,99962	0,99962	0,99962	0,99962	0,99961	0,99951	0,99946	0,99942	0,99940	0,99951
0,14855	0,00018	0,99960	0,99960	0,99960	0,99959	0,99958	0,99947	0,99942	0,99938	0,99935	0,99946
0,15963	0,00020	0,99957	0,99957	0,99957	0,99956	0,99955	0,99942	0,99937	0,99932	0,99929	0,99941
0,17154	0,00021	0,99954	0,99954	0,99954	0,99953	0,99952	0,99938	0,99932	0,99927	0,99923	0,99935

0,18434	0,00024	0,99951	0,99951	0,99950	0,99950	0,99948	0,99933	0,99926	0,99920	0,99916	0,99929
0,19810	0,00026	0,99947	0,99947	0,99947	0,99946	0,99944	0,99927	0,99920	0,99913	0,99908	0,99922
0,21288	0,00028	0,99943	0,99943	0,99943	0,99942	0,99940	0,99921	0,99913	0,99906	0,99900	0,99914
0,22876	0,00031	0,99939	0,99939	0,99938	0,99937	0,99935	0,99914	0,99905	0,99897	0,99890	0,99905
0,24582	0,00035	0,99934	0,99934	0,99934	0,99932	0,99929	0,99907	0,99897	0,99887	0,99879	0,99896
0,26416	0,00038	0,99929	0,99929	0,99928	0,99927	0,99924	0,99898	0,99887	0,99876	0,99868	0,99884
0,28387	0,00042	0,99923	0,99923	0,99923	0,99921	0,99917	0,99889	0,99877	0,99864	0,99854	0,99872
0,30505	0,00047	0,99917	0,99917	0,99916	0,99914	0,99910	0,99879	0,99865	0,99851	0,99839	0,99858
0,32781	0,00052	0,99910	0,99910	0,99909	0,99907	0,99902	0,99867	0,99852	0,99836	0,99822	0,99842
0,35227	0,00058	0,99902	0,99902	0,99901	0,99899	0,99893	0,99854	0,99837	0,99819	0,99804	0,99823
0,37855	0,00065	0,99894	0,99894	0,99893	0,99890	0,99884	0,99840	0,99820	0,99799	0,99782	0,99803
0,40679	0,00073	0,99884	0,99884	0,99883	0,99880	0,99873	0,99824	0,99801	0,99778	0,99758	0,99779
0,43714	0,00082	0,99874	0,99874	0,99873	0,99869	0,99861	0,99806	0,99780	0,99753	0,99730	0,99753
0,46976	0,00092	0,99863	0,99863	0,99861	0,99857	0,99847	0,99785	0,99756	0,99726	0,99699	0,99722
0,50481	0,00103	0,99850	0,99850	0,99848	0,99844	0,99832	0,99762	0,99729	0,99695	0,99664	0,99687
0,54247	0,00116	0,99836	0,99836	0,99834	0,99828	0,99816	0,99737	0,99699	0,99659	0,99624	0,99647
0,58294	0,00131	0,99821	0,99821	0,99818	0,99812	0,99797	0,99708	0,99664	0,99619	0,99578	0,99601
0,65000	0,00157	0,99795	0,99794	0,99791	0,99783	0,99765	0,99656	0,99603	0,99548	0,99497	0,99519
0,70200	0,00179	0,99773	0,99773	0,99769	0,99759	0,99739	0,99614	0,99553	0,99488	0,99429	0,99450
0,76700	0,00209	0,99745	0,99745	0,99741	0,99729	0,99704	0,99558	0,99485	0,99409	0,99337	0,99356
0,83200	0,00241	0,99717	0,99716	0,99711	0,99697	0,99668	0,99499	0,99413	0,99323	0,99238	0,99254
0,91300	0,00285	0,99679	0,99678	0,99672	0,99655	0,99620	0,99420	0,99317	0,99209	0,99105	0,99115
0,99400	0,00332	0,99641	0,99639	0,99632	0,99612	0,99570	0,99335	0,99214	0,99085	0,98961	0,98964
1,09400	0,00395	0,99591	0,99589	0,99580	0,99556	0,99505	0,99224	0,99077	0,98919	0,98767	0,98759
1,19300	0,00462	0,99539	0,99537	0,99526	0,99497	0,99437	0,99105	0,98930	0,98741	0,98557	0,98535
1,31600	0,00553	0,99473	0,99470	0,99457	0,99421	0,99347	0,98946	0,98732	0,98499	0,98271	0,98227
1,43800	0,00652	0,99404	0,99401	0,99384	0,99341	0,99252	0,98777	0,98519	0,98237	0,97958	0,97887
1,58700	0,00784	0,99316	0,99312	0,99292	0,99239	0,99130	0,98553	0,98235	0,97884	0,97535	0,97424
1,73500	0,00926	0,99225	0,99220	0,99196	0,99132	0,99000	0,98312	0,97926	0,97498	0,97069	0,96909
1,91400	0,01114	0,99111	0,99104	0,99074	0,98996	0,98832	0,97996	0,97516	0,96981	0,96441	0,96208
2,09200	0,01319	0,98991	0,98984	0,98947	0,98853	0,98654	0,97653	0,97067	0,96410	0,95741	0,95420
2,30400	0,01584	0,98844	0,98834	0,98789	0,98673	0,98426	0,97207	0,96476	0,95650	0,94803	0,94355
2,51600	0,01874	0,98689	0,98677	0,98624	0,98483	0,98182	0,96720	0,95822	0,94798	0,93744	0,93142
2,76500	0,02246	0,98500	0,98486	0,98421	0,98248	0,97874	0,96092	0,94966	0,93674	0,92336	0,91515
3,01400	0,02651	0,98303	0,98286	0,98208	0,97999	0,97541	0,95401	0,94011	0,92405	0,90736	0,89653
3,30300	0,03163	0,98065	0,98044	0,97950	0,97694	0,97124	0,94516	0,92770	0,90739	0,88622	0,87176
3,59100	0,03719	0,97818	0,97793	0,97681	0,97372	0,96673	0,93542	0,91382	0,88858	0,86224	0,84354
3,92000	0,04408	0,97525	0,97495	0,97360	0,96983	0,96114	0,92309	0,89600	0,86422	0,83109	0,80677
4,24800	0,05154	0,97222	0,97186	0,97027	0,96573	0,95507	0,90946	0,87602	0,83673	0,79593	0,76524
4,61700	0,06062	0,96868	0,96826	0,96637	0,96085	0,94761	0,89244	0,85076	0,80184	0,75141	0,71282
4,98600	0,07044	0,96501	0,96452	0,96231	0,95568	0,93944	0,87353	0,82242	0,76269	0,70180	0,65478
5,39400	0,08215	0,96082	0,96024	0,95764	0,94962	0,92954	0,85032	0,78740	0,71453	0,64149	0,58504
5,80200	0,09477	0,95648	0,95582	0,95280	0,94320	0,91865	0,82460	0,74851	0,66159	0,57636	0,51105
6,24600	0,10952	0,95162	0,95085	0,94735	0,93580	0,90561	0,79370	0,70190	0,59921	0,50161	0,42823
6,69000	0,12533	0,94661	0,94573	0,94170	0,92795	0,89126	0,75973	0,65114	0,53301	0,42504	0,34622
7,16800	0,14355	0,94106	0,94005	0,93543	0,91898	0,87424	0,71979	0,59247	0,45921	0,34359	0,26288
7,64600	0,16301	0,93536	0,93422	0,92896	0,90947	0,85551	0,67651	0,53057	0,38503	0,26659	0,18865
8,15600	0,18513	0,92912	0,92784	0,92184	0,89868	0,83355	0,62698	0,46239	0,30834	0,19300	0,12298
8,66500	0,20860	0,92274	0,92131	0,91454	0,88725	0,80953	0,57463	0,39389	0,23730	0,13130	0,07318

9,20800	0,23519	0,91578	0,91419	0,90655	0,87430	0,78153	0,51634	0,32259	0,17058	0,08024	0,03699
9,75000	0,26332	0,90869	0,90692	0,89836	0,86056	0,75113	0,45668	0,25560	0,11551	0,04433	0,01560
10,33000	0,29519	0,90094	0,89899	0,88938	0,84492	0,71592	0,39258	0,19105	0,07038	0,02036	0,00436
10,91000	0,32887	0,89304	0,89090	0,88019	0,82829	0,67804	0,32982	0,13590	0,03894	0,00759	0,00023
11,54000	0,36752	0,88430	0,88196	0,86999	0,80908	0,63412	0,26510	0,08797	0,01785	0,00167	0,00000
12,17000	0,40831	0,87542	0,87287	0,85956	0,78865	0,58767	0,20588	0,05262	0,00673	0,00000	0,00000
12,87000	0,45615	0,86538	0,86261	0,84773	0,76448	0,53369	0,14850	0,02656	0,00152	0,00000	0,00000
13,57000	0,50664	0,85519	0,85220	0,83565	0,73877	0,47805	0,10134	0,01152	0,00000	0,00000	0,00000
14,37500	0,56799	0,84330	0,84006	0,82148	0,70731	0,41333	0,06026	0,00332	0,00000	0,00000	0,00000
20,00000	1,09440	0,75675	0,75205	0,71533	0,44210	0,06906	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
40,00000	4,35174	0,45619	0,45183	0,28756	0,00029	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
60,00000	9,77200	0,23699	0,23534	0,02764	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
80,00000	17,35519	0,10916	0,10886	0,00013	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
100,00000	27,10130	0,04532	0,04541	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Figura 3.11 b y d

dp (micras)	Stokes	$h_{muestreo}$									
		Boca arriba									
		(0°)	(10°)	(20°)	(30°)	(40°)	(50°)	(60°)	(70°)	(80°)	(90°)
0,01596	0,00002	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99995
0,01715	0,00002	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99995
0,01843	0,00002	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99993	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99995
0,01981	0,00002	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99991	0,99991	0,99991	0,99991	0,99994
0,02129	0,00002	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	0,99991	0,99991	0,99990	0,99991	0,99994
0,02288	0,00002	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99990	0,99990	0,99990	0,99990	0,99993
0,02458	0,00002	0,99991	0,99991	0,99991	0,99991	0,99991	0,99990	0,99989	0,99989	0,99989	0,99993
0,02642	0,00003	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99991	0,99989	0,99989	0,99988	0,99989	0,99992
0,02839	0,00003	0,99990	0,99990	0,99990	0,99990	0,99990	0,99988	0,99988	0,99988	0,99988	0,99991
0,03051	0,00003	0,99989	0,99989	0,99989	0,99989	0,99989	0,99988	0,99987	0,99987	0,99987	0,99991
0,03278	0,00003	0,99989	0,99989	0,99989	0,99989	0,99989	0,99987	0,99986	0,99986	0,99986	0,99990
0,03523	0,00004	0,99988	0,99988	0,99988	0,99988	0,99988	0,99986	0,99985	0,99985	0,99985	0,99989
0,03786	0,00004	0,99987	0,99987	0,99987	0,99987	0,99987	0,99985	0,99984	0,99984	0,99984	0,99988
0,04068	0,00004	0,99987	0,99987	0,99987	0,99987	0,99987	0,99984	0,99983	0,99983	0,99983	0,99988
0,04371	0,00004	0,99986	0,99986	0,99986	0,99986	0,99986	0,99983	0,99982	0,99982	0,99982	0,99987
0,04698	0,00005	0,99985	0,99985	0,99985	0,99985	0,99985	0,99982	0,99981	0,99980	0,99980	0,99986
0,05048	0,00005	0,99984	0,99984	0,99984	0,99984	0,99984	0,99981	0,99980	0,99979	0,99979	0,99984
0,05425	0,00006	0,99983	0,99983	0,99983	0,99983	0,99983	0,99980	0,99978	0,99978	0,99977	0,99983
0,05829	0,00006	0,99982	0,99982	0,99982	0,99982	0,99982	0,99978	0,99977	0,99976	0,99976	0,99982
0,06264	0,00007	0,99981	0,99981	0,99981	0,99981	0,99981	0,99977	0,99975	0,99974	0,99974	0,99980
0,06732	0,00007	0,99980	0,99980	0,99980	0,99980	0,99980	0,99975	0,99974	0,99972	0,99972	0,99979
0,07234	0,00008	0,99979	0,99979	0,99979	0,99979	0,99978	0,99974	0,99972	0,99970	0,99970	0,99977
0,07774	0,00008	0,99977	0,99977	0,99977	0,99977	0,99977	0,99972	0,99970	0,99968	0,99967	0,99975
0,08354	0,00009	0,99976	0,99976	0,99976	0,99976	0,99975	0,99970	0,99968	0,99966	0,99965	0,99973
0,08977	0,00010	0,99974	0,99974	0,99974	0,99974	0,99974	0,99968	0,99965	0,99963	0,99962	0,99970

0,09647	0,00011	0,99973	0,99973	0,99973	0,99973	0,99972	0,99965	0,99963	0,99961	0,99959	0,99968
0,10366	0,00012	0,99971	0,99971	0,99971	0,99971	0,99970	0,99963	0,99960	0,99958	0,99956	0,99965
0,11140	0,00013	0,99969	0,99969	0,99969	0,99969	0,99968	0,99960	0,99957	0,99954	0,99953	0,99962
0,11971	0,00014	0,99967	0,99967	0,99967	0,99967	0,99966	0,99957	0,99954	0,99951	0,99949	0,99959
0,12864	0,00015	0,99965	0,99965	0,99965	0,99964	0,99963	0,99954	0,99950	0,99947	0,99944	0,99955
0,13824	0,00016	0,99962	0,99962	0,99962	0,99962	0,99961	0,99950	0,99946	0,99942	0,99940	0,99951
0,14855	0,00018	0,99960	0,99960	0,99960	0,99959	0,99958	0,99947	0,99942	0,99938	0,99935	0,99946
0,15963	0,00020	0,99957	0,99957	0,99957	0,99956	0,99955	0,99942	0,99937	0,99932	0,99929	0,99941
0,17154	0,00021	0,99954	0,99954	0,99954	0,99953	0,99952	0,99938	0,99932	0,99927	0,99923	0,99935
0,18434	0,00024	0,99951	0,99951	0,99950	0,99950	0,99948	0,99933	0,99926	0,99920	0,99916	0,99929
0,19810	0,00026	0,99947	0,99947	0,99947	0,99946	0,99944	0,99927	0,99920	0,99913	0,99908	0,99922
0,21288	0,00028	0,99943	0,99943	0,99943	0,99942	0,99939	0,99921	0,99913	0,99905	0,99900	0,99914
0,22876	0,00031	0,99939	0,99939	0,99938	0,99937	0,99935	0,99914	0,99905	0,99897	0,99890	0,99905
0,24582	0,00035	0,99934	0,99934	0,99934	0,99932	0,99929	0,99907	0,99897	0,99887	0,99879	0,99896
0,26416	0,00038	0,99929	0,99929	0,99928	0,99927	0,99923	0,99898	0,99887	0,99876	0,99868	0,99884
0,28387	0,00042	0,99923	0,99923	0,99923	0,99921	0,99917	0,99889	0,99877	0,99864	0,99854	0,99872
0,30505	0,00047	0,99917	0,99917	0,99916	0,99914	0,99910	0,99879	0,99865	0,99851	0,99839	0,99858
0,32781	0,00052	0,99910	0,99910	0,99909	0,99907	0,99902	0,99867	0,99851	0,99836	0,99822	0,99842
0,35227	0,00058	0,99902	0,99902	0,99901	0,99899	0,99893	0,99854	0,99836	0,99819	0,99803	0,99823
0,37855	0,00065	0,99894	0,99894	0,99893	0,99890	0,99883	0,99840	0,99820	0,99799	0,99782	0,99803
0,40679	0,00073	0,99884	0,99884	0,99883	0,99880	0,99873	0,99823	0,99801	0,99778	0,99758	0,99779
0,43714	0,00082	0,99874	0,99874	0,99873	0,99869	0,99860	0,99805	0,99779	0,99753	0,99730	0,99753
0,46976	0,00092	0,99863	0,99863	0,99861	0,99857	0,99847	0,99785	0,99756	0,99726	0,99699	0,99722
0,50481	0,00103	0,99850	0,99850	0,99848	0,99843	0,99832	0,99762	0,99728	0,99694	0,99664	0,99687
0,54247	0,00116	0,99836	0,99836	0,99834	0,99828	0,99815	0,99736	0,99698	0,99659	0,99624	0,99647
0,58294	0,00131	0,99821	0,99821	0,99818	0,99811	0,99797	0,99707	0,99663	0,99618	0,99578	0,99601
0,65000	0,00157	0,99795	0,99794	0,99791	0,99782	0,99764	0,99655	0,99602	0,99547	0,99496	0,99519
0,70200	0,00179	0,99773	0,99772	0,99769	0,99759	0,99737	0,99612	0,99551	0,99487	0,99428	0,99450
0,76700	0,00209	0,99745	0,99745	0,99740	0,99728	0,99702	0,99556	0,99483	0,99407	0,99336	0,99356
0,83200	0,00241	0,99717	0,99716	0,99710	0,99695	0,99665	0,99495	0,99410	0,99321	0,99237	0,99254
0,91300	0,00285	0,99679	0,99678	0,99671	0,99653	0,99617	0,99415	0,99313	0,99205	0,99104	0,99115
0,99400	0,00332	0,99641	0,99639	0,99631	0,99609	0,99566	0,99329	0,99208	0,99080	0,98959	0,98964
1,09400	0,00395	0,99591	0,99589	0,99578	0,99552	0,99498	0,99215	0,99068	0,98912	0,98764	0,98759
1,19300	0,00462	0,99539	0,99537	0,99524	0,99492	0,99428	0,99093	0,98918	0,98732	0,98552	0,98535
1,31600	0,00553	0,99473	0,99469	0,99453	0,99413	0,99334	0,98930	0,98715	0,98486	0,98264	0,98227
1,43800	0,00652	0,99404	0,99399	0,99380	0,99330	0,99234	0,98753	0,98495	0,98219	0,97949	0,97887
1,58700	0,00784	0,99316	0,99310	0,99285	0,99223	0,99103	0,98519	0,98200	0,97858	0,97522	0,97424
1,73500	0,00926	0,99225	0,99218	0,99186	0,99110	0,98963	0,98265	0,97878	0,97462	0,97051	0,96909
1,91400	0,01114	0,99111	0,99101	0,99060	0,98964	0,98778	0,97928	0,97447	0,96929	0,96415	0,96208
2,09200	0,01319	0,98991	0,98979	0,98928	0,98808	0,98579	0,97558	0,96972	0,96336	0,95705	0,95420
2,30400	0,01584	0,98844	0,98826	0,98761	0,98608	0,98318	0,97071	0,96340	0,95545	0,94751	0,94355
2,51600	0,01874	0,98689	0,98667	0,98585	0,98392	0,98032	0,96530	0,95631	0,94653	0,93673	0,93142
2,76500	0,02246	0,98500	0,98471	0,98364	0,98118	0,97658	0,95821	0,94695	0,93468	0,92235	0,91515
3,01400	0,02651	0,98303	0,98265	0,98130	0,97818	0,97242	0,95027	0,93638	0,92122	0,90598	0,89653
3,30300	0,03163	0,98065	0,98015	0,97839	0,97437	0,96701	0,93989	0,92247	0,90344	0,88431	0,87176
3,59100	0,03719	0,97818	0,97753	0,97528	0,97018	0,96092	0,92822	0,90671	0,88323	0,85967	0,84354
3,92000	0,04408	0,97525	0,97438	0,97146	0,96489	0,95303	0,91313	0,88622	0,85692	0,82761	0,80677
4,24800	0,05154	0,97222	0,97109	0,96736	0,95901	0,94407	0,89607	0,86297	0,82708	0,79138	0,76524
4,61700	0,06062	0,96868	0,96719	0,96236	0,95160	0,93254	0,87430	0,83327	0,78908	0,74547	0,71282

4,98600	0,07044	0,96501	0,96308	0,95692	0,94329	0,91933	0,84964	0,79967	0,74635	0,69432	0,65478
5,39400	0,08215	0,96082	0,95829	0,95035	0,93291	0,90257	0,81885	0,75793	0,69379	0,63221	0,58504
5,80200	0,09477	0,95648	0,95324	0,94317	0,92119	0,88336	0,78425	0,71146	0,63615	0,56529	0,51105
6,24600	0,10952	0,95162	0,94742	0,93457	0,90674	0,85945	0,74226	0,65589	0,56865	0,48879	0,42823
6,69000	0,12533	0,94661	0,94127	0,92511	0,89039	0,83223	0,69590	0,59581	0,49769	0,41086	0,34622
7,16800	0,14355	0,94106	0,93425	0,91386	0,87050	0,79908	0,64151	0,52732	0,41971	0,32864	0,26288
7,64600	0,16301	0,93536	0,92679	0,90144	0,84808	0,76188	0,58318	0,45658	0,34287	0,25173	0,18865
8,15600	0,18513	0,92912	0,91833	0,88678	0,82122	0,71780	0,51773	0,38096	0,26549	0,17923	0,12298
8,66500	0,20860	0,92274	0,90934	0,87060	0,79131	0,66957	0,45062	0,30800	0,19625	0,11953	0,07318
9,20800	0,23519	0,91578	0,89911	0,85154	0,75592	0,61398	0,37908	0,23597	0,13399	0,07120	0,03699
9,75000	0,26332	0,90869	0,88822	0,83056	0,71710	0,55508	0,31001	0,17272	0,08534	0,03817	0,01560
10,33000	0,29519	0,90094	0,87575	0,80586	0,67187	0,48954	0,24128	0,11675	0,04812	0,01687	0,00436
10,91000	0,32887	0,89304	0,86241	0,77879	0,62323	0,42302	0,18025	0,07374	0,02429	0,00601	0,00023
11,54000	0,36752	0,88430	0,84688	0,74667	0,56718	0,35180	0,12465	0,04100	0,00990	0,00125	0,00000
12,17000	0,40831	0,87542	0,83021	0,71176	0,50870	0,28398	0,08112	0,02051	0,00325	0,00000	0,00000
12,87000	0,45615	0,86538	0,81032	0,66987	0,44228	0,21533	0,04644	0,00819	0,00061	0,00000	0,00000
13,57000	0,50664	0,85519	0,78893	0,62498	0,37611	0,15602	0,02416	0,00270	0,00000	0,00000	0,00000
14,37500	0,56799	0,84330	0,76243	0,57021	0,30278	0,10119	0,00994	0,00054	0,00000	0,00000	0,00000
20,00000	1,09440	0,75675	0,52470	0,18443	0,01894	0,00037	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
40,00000	4,35174	0,45619	0,00152	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
60,00000	9,77200	0,23699	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
80,00000	17,35519	0,10916	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
100,00000	27,10130	0,04532	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Figura 3.12a

dp (micras)	h _{codos}					
	R. laminar			R. turbulento		
	(30°)	(60°)	(90°)	(30°)	(60°)	(90°)
0,01596	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,01715	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,01843	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,01981	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,02129	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,02288	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,02458	0,99957	0,99930	0,99908	0,99979	0,99957	0,99936
0,02642	0,99960	0,99936	0,99916	0,99980	0,99960	0,99939
0,02839	0,99964	0,99942	0,99923	0,99981	0,99962	0,99943
0,03051	0,99967	0,99946	0,99929	0,99982	0,99964	0,99945
0,03278	0,99969	0,99951	0,99935	0,99983	0,99965	0,99948
0,03523	0,99972	0,99955	0,99940	0,99983	0,99966	0,99950
0,03786	0,99974	0,99958	0,99944	0,99984	0,99967	0,99951
0,04068	0,99976	0,99961	0,99948	0,99984	0,99968	0,99952
0,04371	0,99978	0,99964	0,99952	0,99984	0,99969	0,99953
0,04698	0,99979	0,99966	0,99955	0,99984	0,99969	0,99953

0,05048	0,99981	0,99968	0,99957	0,99984	0,99969	0,99953
0,05425	0,99982	0,99970	0,99960	0,99984	0,99969	0,99953
0,05829	0,99983	0,99972	0,99962	0,99984	0,99968	0,99952
0,06264	0,99984	0,99973	0,99964	0,99984	0,99968	0,99951
0,06732	0,99985	0,99974	0,99965	0,99983	0,99967	0,99950
0,07234	0,99986	0,99975	0,99966	0,99983	0,99966	0,99948
0,07774	0,99986	0,99976	0,99967	0,99982	0,99964	0,99946
0,08354	0,99987	0,99977	0,99968	0,99981	0,99963	0,99944
0,08977	0,99987	0,99977	0,99968	0,99980	0,99961	0,99941
0,09647	0,99987	0,99977	0,99968	0,99979	0,99958	0,99937
0,10366	0,99987	0,99977	0,99968	0,99978	0,99956	0,99934
0,11140	0,99987	0,99977	0,99967	0,99976	0,99953	0,99929
0,11971	0,99987	0,99977	0,99967	0,99975	0,99949	0,99924
0,12864	0,99987	0,99976	0,99966	0,99973	0,99946	0,99919
0,13824	0,99987	0,99975	0,99964	0,99971	0,99941	0,99912
0,14855	0,99986	0,99974	0,99963	0,99968	0,99937	0,99905
0,15963	0,99986	0,99973	0,99961	0,99966	0,99931	0,99897
0,17154	0,99985	0,99972	0,99959	0,99963	0,99925	0,99888
0,18434	0,99984	0,99970	0,99956	0,99959	0,99919	0,99878
0,19810	0,99983	0,99968	0,99953	0,99956	0,99911	0,99867
0,21288	0,99982	0,99966	0,99949	0,99951	0,99903	0,99854
0,22876	0,99981	0,99963	0,99945	0,99947	0,99893	0,99840
0,24582	0,99979	0,99960	0,99940	0,99941	0,99882	0,99824
0,26416	0,99978	0,99956	0,99935	0,99935	0,99870	0,99805
0,28387	0,99976	0,99952	0,99929	0,99928	0,99857	0,99785
0,30505	0,99973	0,99947	0,99922	0,99921	0,99841	0,99762
0,32781	0,99971	0,99942	0,99914	0,99912	0,99824	0,99735
0,35227	0,99968	0,99936	0,99904	0,99902	0,99804	0,99706
0,37855	0,99964	0,99929	0,99894	0,99891	0,99781	0,99672
0,40679	0,99960	0,99921	0,99882	0,99878	0,99756	0,99634
0,43714	0,99956	0,99912	0,99868	0,99863	0,99727	0,99590
0,46976	0,99951	0,99902	0,99853	0,99847	0,99693	0,99541
0,50481	0,99945	0,99890	0,99835	0,99828	0,99656	0,99484
0,54247	0,99938	0,99876	0,99815	0,99806	0,99613	0,99420
0,58294	0,99930	0,99861	0,99792	0,99782	0,99564	0,99346
0,65000	0,99916	0,99833	0,99750	0,99737	0,99476	0,99214
0,70200	0,99905	0,99810	0,99715	0,99700	0,99402	0,99104
0,76700	0,99889	0,99779	0,99668	0,99651	0,99303	0,98956
0,83200	0,99872	0,99745	0,99618	0,99597	0,99196	0,98797
0,91300	0,99850	0,99699	0,99549	0,99525	0,99053	0,98583
0,99400	0,99825	0,99650	0,99475	0,99447	0,98898	0,98351
1,09400	0,99792	0,99584	0,99377	0,99343	0,98690	0,98042
1,19300	0,99756	0,99513	0,99270	0,99231	0,98468	0,97711
1,31600	0,99709	0,99417	0,99126	0,99080	0,98168	0,97265
1,43800	0,99657	0,99314	0,98971	0,98917	0,97845	0,96785
1,58700	0,99588	0,99175	0,98763	0,98700	0,97416	0,96149
1,73500	0,99513	0,99026	0,98539	0,98465	0,96953	0,95465
1,91400	0,99414	0,98828	0,98242	0,98156	0,96345	0,94568
2,09200	0,99306	0,98613	0,97920	0,97821	0,95689	0,93604

2,30400	0,99167	0,98334	0,97501	0,97387	0,94843	0,92365
2,51600	0,99014	0,98029	0,97044	0,96916	0,93927	0,91031
2,76500	0,98819	0,97638	0,96458	0,96315	0,92766	0,89348
3,01400	0,98606	0,97213	0,95819	0,95664	0,91516	0,87548
3,30300	0,98337	0,96674	0,95012	0,94847	0,89959	0,85323
3,59100	0,98045	0,96090	0,94136	0,93968	0,88300	0,82974
3,92000	0,97683	0,95366	0,93049	0,92888	0,86281	0,80145
4,24800	0,97291	0,94582	0,91874	0,91733	0,84149	0,77192
4,61700	0,96813	0,93628	0,90443	0,90343	0,81619	0,73738
4,98600	0,96297	0,92596	0,88896	0,88864	0,78968	0,70174
5,39400	0,95682	0,91365	0,87050	0,87128	0,75913	0,66142
5,80200	0,95019	0,90040	0,85063	0,85294	0,72752	0,62053
6,24600	0,94244	0,88490	0,82740	0,83196	0,69216	0,57585
6,69000	0,93413	0,86829	0,80249	0,81000	0,65610	0,53144
7,16800	0,92456	0,84916	0,77381	0,78537	0,61681	0,48442
7,64600	0,91434	0,82873	0,74318	0,75985	0,57736	0,43871
8,15600	0,90272	0,80551	0,70838	0,73177	0,53548	0,39185
8,66500	0,89038	0,78087	0,67144	0,70303	0,49425	0,34747
9,20800	0,87642	0,75296	0,62962	0,67175	0,45125	0,30313
9,75000	0,86165	0,72345	0,58540	0,64009	0,40971	0,26225
10,33000	0,84491	0,69002	0,53532	0,60591	0,36713	0,22245
10,91000	0,82723	0,65470	0,48241	0,57165	0,32678	0,18681
11,54000	0,80694	0,61419	0,42173	0,53458	0,28577	0,15277
12,17000	0,78553	0,57144	0,35771	0,49790	0,24790	0,12343
12,87000	0,76043	0,52132	0,28267	0,45789	0,20966	0,09600
13,57000	0,73394	0,46845	0,20352	0,41895	0,17552	0,07353
14,37500	0,70176	0,40424	0,10743	0,37583	0,14125	0,05309
20,00000	0,42599	0,00000	0,00000	0,15403	0,02372	0,00365
40,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00067	0,00000	0,00000
60,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
80,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
100,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Figura 3.12b

dp (micras)	h_{codos}					
	R. laminar			R. turbulento		
	(30°)	(60°)	(90°)	(30°)	(60°)	(90°)
0,01596	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	0,000000
0,01715	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	0,000000
0,01843	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	0,000000
0,01981	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	0,000000
0,02129	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	0,000000
0,02288	0,000000	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	0,000000
0,02458	0,999580	0,999330	0,999120	0,999990	0,999810	0,999710

0,02642	0,99962	0,99939	0,99919	0,99991	0,99982	0,99973
0,02839	0,99965	0,99944	0,99927	0,99992	0,99983	0,99975
0,03051	0,99968	0,99949	0,99933	0,99992	0,99984	0,99976
0,03278	0,99971	0,99954	0,99939	0,99993	0,99985	0,99978
0,03523	0,99974	0,99958	0,99944	0,99993	0,99986	0,99979
0,03786	0,99976	0,99961	0,99949	0,99993	0,99987	0,99980
0,04068	0,99978	0,99965	0,99954	0,99994	0,99988	0,99981
0,04371	0,99980	0,99968	0,99958	0,99994	0,99988	0,99982
0,04698	0,99982	0,99971	0,99961	0,99994	0,99988	0,99983
0,05048	0,99983	0,99973	0,99965	0,99994	0,99989	0,99983
0,05425	0,99985	0,99975	0,99968	0,99995	0,99989	0,99984
0,05829	0,99986	0,99977	0,99970	0,99995	0,99989	0,99984
0,06264	0,99987	0,99979	0,99973	0,99995	0,99989	0,99984
0,06732	0,99988	0,99981	0,99975	0,99995	0,99989	0,99984
0,07234	0,99989	0,99982	0,99977	0,99995	0,99989	0,99984
0,07774	0,99990	0,99984	0,99978	0,99995	0,99989	0,99984
0,08354	0,99991	0,99985	0,99980	0,99994	0,99989	0,99983
0,08977	0,99991	0,99986	0,99981	0,99994	0,99988	0,99983
0,09647	0,99992	0,99987	0,99983	0,99994	0,99988	0,99982
0,10366	0,99993	0,99988	0,99984	0,99994	0,99988	0,99981
0,11140	0,99993	0,99989	0,99985	0,99993	0,99987	0,99980
0,11971	0,99993	0,99989	0,99986	0,99993	0,99986	0,99979
0,12864	0,99994	0,99990	0,99986	0,99993	0,99985	0,99978
0,13824	0,99994	0,99990	0,99987	0,99992	0,99984	0,99977
0,14855	0,99994	0,99991	0,99987	0,99992	0,99983	0,99975
0,15963	0,99995	0,99991	0,99988	0,99991	0,99982	0,99973
0,17154	0,99995	0,99991	0,99988	0,99990	0,99981	0,99971
0,18434	0,99995	0,99991	0,99988	0,99989	0,99979	0,99968
0,19810	0,99995	0,99991	0,99988	0,99989	0,99977	0,99966
0,21288	0,99995	0,99992	0,99988	0,99987	0,99975	0,99962
0,22876	0,99995	0,99991	0,99988	0,99986	0,99973	0,99959
0,24582	0,99995	0,99991	0,99988	0,99985	0,99970	0,99955
0,26416	0,99995	0,99991	0,99987	0,99983	0,99967	0,99950
0,28387	0,99995	0,99991	0,99987	0,99982	0,99964	0,99945
0,30505	0,99995	0,99990	0,99986	0,99980	0,99960	0,99940
0,32781	0,99995	0,99990	0,99985	0,99978	0,99955	0,99933
0,35227	0,99994	0,99989	0,99984	0,99975	0,99950	0,99926
0,37855	0,99994	0,99988	0,99983	0,99972	0,99945	0,99917
0,40679	0,99993	0,99988	0,99982	0,99969	0,99938	0,99908
0,43714	0,99993	0,99986	0,99980	0,99966	0,99931	0,99897
0,46976	0,99992	0,99985	0,99978	0,99961	0,99923	0,99884
0,50481	0,99992	0,99984	0,99976	0,99957	0,99913	0,99870
0,54247	0,99991	0,99982	0,99973	0,99951	0,99903	0,99854
0,58294	0,99990	0,99980	0,99970	0,99945	0,99890	0,99835
0,65000	0,99988	0,99977	0,99965	0,99934	0,99868	0,99802
0,70200	0,99987	0,99974	0,99961	0,99925	0,99850	0,99774
0,76700	0,99985	0,99970	0,99955	0,99912	0,99825	0,99737
0,83200	0,99982	0,99965	0,99948	0,99899	0,99798	0,99697
0,91300	0,99979	0,99959	0,99939	0,99881	0,99762	0,99643

0,99400	0,99976	0,99953	0,99929	0,99861	0,99722	0,99584
1,09400	0,99972	0,99944	0,99916	0,99835	0,99670	0,99506
1,19300	0,99967	0,99935	0,99902	0,99807	0,99614	0,99421
1,31600	0,99961	0,99922	0,99883	0,99769	0,99538	0,99307
1,43800	0,99954	0,99908	0,99863	0,99727	0,99455	0,99184
1,58700	0,99945	0,99890	0,99835	0,99672	0,99346	0,99021
1,73500	0,99935	0,99870	0,99806	0,99613	0,99228	0,98844
1,91400	0,99922	0,99844	0,99766	0,99535	0,99071	0,98610
2,09200	0,99908	0,99816	0,99724	0,99450	0,98902	0,98358
2,30400	0,99889	0,99779	0,99668	0,99339	0,98682	0,98030
2,51600	0,99869	0,99738	0,99608	0,99219	0,98443	0,97674
2,76500	0,99843	0,99687	0,99530	0,99064	0,98137	0,97219
3,01400	0,99815	0,99630	0,99446	0,98896	0,97805	0,96726
3,30300	0,99779	0,99559	0,99339	0,98685	0,97386	0,96105
3,59100	0,99741	0,99482	0,99223	0,98455	0,96935	0,95437
3,92000	0,99693	0,99386	0,99079	0,98172	0,96377	0,94614
4,24800	0,99641	0,99282	0,98923	0,97866	0,95777	0,93732
4,61700	0,99578	0,99156	0,98734	0,97494	0,95051	0,92669
4,98600	0,99509	0,99019	0,98529	0,97094	0,94272	0,91532
5,39400	0,99428	0,98856	0,98285	0,96619	0,93351	0,90195
5,80200	0,99340	0,98681	0,98022	0,96109	0,92370	0,88776
6,24600	0,99237	0,98475	0,97714	0,95517	0,91235	0,87145
6,69000	0,99127	0,98256	0,97385	0,94886	0,90033	0,85429
7,16800	0,99000	0,98002	0,97005	0,94164	0,88668	0,83493
7,64600	0,98865	0,97732	0,96600	0,93399	0,87233	0,81474
8,15600	0,98711	0,97425	0,96140	0,92536	0,85629	0,79238
8,66500	0,98548	0,97099	0,95652	0,91629	0,83958	0,76930
9,20800	0,98363	0,96730	0,95100	0,90612	0,82105	0,74397
9,75000	0,98168	0,96339	0,94515	0,89548	0,80188	0,71806
10,33000	0,97946	0,95898	0,93854	0,88357	0,78069	0,68979
10,91000	0,97712	0,95431	0,93156	0,87115	0,75890	0,66111
11,54000	0,97444	0,94896	0,92355	0,85710	0,73463	0,62965
12,17000	0,97161	0,94331	0,91511	0,84252	0,70984	0,59805
12,87000	0,96829	0,93669	0,90522	0,82572	0,68181	0,56298
13,57000	0,96478	0,92972	0,89480	0,80834	0,65341	0,52817
14,37500	0,96053	0,92125	0,88215	0,78770	0,62047	0,48874
20,00000	0,92412	0,84892	0,77439	0,63033	0,39732	0,25044
40,00000	0,70226	0,41495	0,13778	0,15836	0,02508	0,00397
60,00000	0,34597	0,00000	0,00000	0,01639	0,00027	0,00000
80,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00069	0,00000	0,00000
100,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00000	0,00000

Figura 3.13

dp (micras)	$h_{in.est}$		
	R. laminar		
	(1" a 1/4")	(1/2" a 1/4")	(3/8" a 1/4")
0,01596	0,06256	0,22055	0,40477
0,01715	0,06256	0,22055	0,40477
0,01843	0,06256	0,22055	0,40477
0,01981	0,06256	0,22055	0,40477
0,02129	0,06256	0,22055	0,40477
0,02288	0,06256	0,22055	0,40477
0,02458	0,99955	0,99955	0,99955
0,02642	0,99959	0,99959	0,99959
0,02839	0,99963	0,99963	0,99963
0,03051	0,99966	0,99966	0,99966
0,03278	0,99969	0,99969	0,99969
0,03523	0,99972	0,99972	0,99972
0,03786	0,99975	0,99975	0,99975
0,04068	0,99977	0,99977	0,99977
0,04371	0,99979	0,99979	0,99979
0,04698	0,99981	0,99981	0,99981
0,05048	0,99983	0,99983	0,99983
0,05425	0,99984	0,99984	0,99984
0,05829	0,99985	0,99986	0,99986
0,06264	0,99987	0,99987	0,99987
0,06732	0,99988	0,99988	0,99988
0,07234	0,99989	0,99989	0,99989
0,07774	0,99990	0,99990	0,99990
0,08354	0,99991	0,99991	0,99991
0,08977	0,99992	0,99992	0,99992
0,09647	0,99992	0,99992	0,99992
0,10366	0,99993	0,99993	0,99993
0,11140	0,99993	0,99994	0,99994
0,11971	0,99994	0,99994	0,99994
0,12864	0,99994	0,99995	0,99995
0,13824	0,99995	0,99995	0,99995
0,14855	0,99995	0,99995	0,99995
0,15963	0,99996	0,99996	0,99996
0,17154	0,99996	0,99996	0,99996
0,18434	0,99996	0,99996	0,99996
0,19810	0,99996	0,99997	0,99997
0,21288	0,99997	0,99997	0,99997
0,22876	0,99997	0,99997	0,99997
0,24582	0,99997	0,99997	0,99997
0,26416	0,99997	0,99997	0,99997
0,28387	0,99997	0,99998	0,99998
0,30505	0,99998	0,99998	0,99998
0,32781	0,99998	0,99998	0,99998

0,35227	0,99998	0,99998	0,99998
0,37855	0,99998	0,99998	0,99998
0,40679	0,99998	0,99998	0,99998
0,43714	0,99998	0,99998	0,99998
0,46976	0,99998	0,99998	0,99998
0,50481	0,99998	0,99998	0,99998
0,54247	0,99998	0,99998	0,99998
0,58294	0,99998	0,99998	0,99998
0,65000	0,99998	0,99998	0,99998
0,70200	0,99997	0,99998	0,99998
0,76700	0,99997	0,99998	0,99998
0,83200	0,99997	0,99998	0,99998
0,91300	0,99997	0,99998	0,99998
0,99400	0,99996	0,99998	0,99998
1,09400	0,99996	0,99998	0,99998
1,19300	0,99995	0,99997	0,99998
1,31600	0,99994	0,99997	0,99998
1,43800	0,99993	0,99996	0,99997
1,58700	0,99992	0,99996	0,99997
1,73500	0,99991	0,99995	0,99996
1,91400	0,99989	0,99994	0,99996
2,09200	0,99987	0,99994	0,99995
2,30400	0,99985	0,99992	0,99994
2,51600	0,99982	0,99991	0,99993
2,76500	0,99979	0,99989	0,99992
3,01400	0,99975	0,99988	0,99991
3,30300	0,99971	0,99985	0,99989
3,59100	0,99966	0,99983	0,99987
3,92000	0,99959	0,99979	0,99985
4,24800	0,99952	0,99976	0,99982
4,61700	0,99944	0,99972	0,99979
4,98600	0,99935	0,99967	0,99976
5,39400	0,99924	0,99962	0,99971
5,80200	0,99913	0,99956	0,99967
6,24600	0,99899	0,99950	0,99962
6,69000	0,99885	0,99942	0,99957
7,16800	0,99868	0,99934	0,95959
7,64600	0,99850	0,99925	0,90581
8,15600	0,99830	0,99915	0,85502
8,66500	0,99809	0,99904	0,81029
9,20800	0,99784	0,99892	0,76830
9,75000	0,99759	0,99879	0,73153
10,33000	0,99730	0,96415	0,69711
10,91000	0,99699	0,90129	0,66711
11,54000	0,99664	0,83968	0,63883
12,17000	0,99626	0,78429	0,61440
12,87000	0,99583	0,72925	0,59109
13,57000	0,99537	0,68027	0,57120
14,37500	0,99481	0,63051	0,55186

20,00000	0,99004	0,41643	0,47999
40,00000	0,41685	0,25993	0,44028
60,00000	0,16696	0,24192	0,43062
80,00000	0,09075	0,23204	0,41872
100,00000	0,06256	0,22055	0,40477

Figura 3.14

dp (micras)	R. laminar			R. turbulento			
	h _{grav.}	h _{dif.}	h _{mecanica}	h _{grav.}	h _{dif.}	h _{in. turb.}	h _{mecanica}
0,01596	1,00000	0,98419	0,98418	1,00000	0,96996	1,00000	0,96995
0,01715	1,00000	0,98561	0,98560	1,00000	0,97264	1,00000	0,97263
0,01843	1,00000	0,98690	0,98690	1,00000	0,97508	1,00000	0,97507
0,01981	1,00000	0,98809	0,98808	1,00000	0,97730	1,00000	0,97730
0,02129	0,99999	0,98916	0,98916	1,00000	0,97933	1,00000	0,97932
0,02288	0,99999	0,99014	0,99013	1,00000	0,98117	1,00000	0,98117
0,02458	0,99999	0,99103	0,99102	1,00000	0,98285	1,00000	0,98285
0,02642	0,99999	0,99184	0,99183	1,00000	0,98438	1,00000	0,98437
0,02839	0,99999	0,99257	0,99257	1,00000	0,98577	1,00000	0,98577
0,03051	0,99999	0,99324	0,99324	0,99999	0,98704	1,00000	0,98703
0,03278	0,99999	0,99385	0,99384	0,99999	0,98819	1,00000	0,98818
0,03523	0,99999	0,99440	0,99440	0,99999	0,98924	1,00000	0,98923
0,03786	0,99999	0,99491	0,99490	0,99999	0,99019	1,00000	0,99018
0,04068	0,99999	0,99536	0,99535	0,99999	0,99106	1,00000	0,99105
0,04371	0,99999	0,99578	0,99577	0,99999	0,99185	1,00000	0,99184
0,04698	0,99999	0,99615	0,99614	0,99999	0,99256	1,00000	0,99256
0,05048	0,99999	0,99650	0,99648	0,99999	0,99322	1,00000	0,99321
0,05425	0,99999	0,99681	0,99679	0,99999	0,99381	1,00000	0,99380
0,05829	0,99998	0,99709	0,99707	0,99999	0,99435	1,00000	0,99434
0,06264	0,99998	0,99735	0,99733	0,99999	0,99484	1,00000	0,99483
0,06732	0,99998	0,99758	0,99756	0,99999	0,99529	1,00000	0,99528
0,07234	0,99998	0,99779	0,99777	0,99999	0,99570	1,00000	0,99568
0,07774	0,99998	0,99798	0,99796	0,99999	0,99606	1,00000	0,99605
0,08354	0,99998	0,99816	0,99813	0,99998	0,99640	1,00000	0,99639
0,08977	0,99998	0,99831	0,99829	0,99998	0,99671	1,00000	0,99669
0,09647	0,99997	0,99846	0,99843	0,99998	0,99698	1,00000	0,99697
0,10366	0,99997	0,99859	0,99856	0,99998	0,99724	1,00000	0,99722
0,11140	0,99997	0,99871	0,99868	0,99998	0,99747	1,00000	0,99745
0,11971	0,99997	0,99882	0,99878	0,99998	0,99768	1,00000	0,99765
0,12864	0,99996	0,99891	0,99888	0,99997	0,99787	1,00000	0,99784
0,13824	0,99996	0,99900	0,99896	0,99997	0,99804	1,00000	0,99801
0,14855	0,99996	0,99908	0,99904	0,99997	0,99820	1,00000	0,99817
0,15963	0,99995	0,99916	0,99911	0,99997	0,99834	1,00000	0,99831
0,17154	0,99995	0,99922	0,99917	0,99996	0,99847	1,00000	0,99843
0,18434	0,99994	0,99928	0,99923	0,99996	0,99859	1,00000	0,99855
0,19810	0,99993	0,99934	0,99927	0,99995	0,99870	1,00000	0,99865

0,21288	0,99993	0,99939	0,99932	0,99995	0,99880	1,00000	0,99875
0,22876	0,99992	0,99944	0,99936	0,99994	0,99889	1,00000	0,99883
0,24582	0,99991	0,99948	0,99939	0,99994	0,99897	1,00000	0,99891
0,26416	0,99990	0,99952	0,99942	0,99993	0,99904	1,00000	0,99897
0,28387	0,99989	0,99955	0,99944	0,99992	0,99911	1,00000	0,99903
0,30505	0,99988	0,99958	0,99946	0,99992	0,99918	1,00000	0,99909
0,32781	0,99987	0,99961	0,99948	0,99991	0,99923	1,00000	0,99913
0,35227	0,99985	0,99964	0,99949	0,99990	0,99928	1,00000	0,99918
0,37855	0,99983	0,99966	0,99950	0,99988	0,99933	0,99999	0,99921
0,40679	0,99981	0,99969	0,99950	0,99987	0,99938	0,99999	0,99924
0,43714	0,99979	0,99971	0,99950	0,99985	0,99942	0,99999	0,99926
0,46976	0,99976	0,99973	0,99949	0,99983	0,99945	0,99999	0,99928
0,50481	0,99973	0,99974	0,99948	0,99981	0,99949	0,99999	0,99929
0,54247	0,99970	0,99976	0,99946	0,99979	0,99952	0,99998	0,99929
0,58294	0,99964	0,99978	0,99942	0,99975	0,99956	0,99997	0,99929
0,65000	0,99959	0,99979	0,99938	0,99971	0,99959	0,99997	0,99927
0,70200	0,99952	0,99981	0,99933	0,99966	0,99962	0,99996	0,99924
0,76700	0,99945	0,99982	0,99927	0,99961	0,99965	0,99994	0,99920
0,83200	0,99935	0,99983	0,99918	0,99954	0,99967	0,99992	0,99913
0,91300	0,99924	0,99985	0,99908	0,99947	0,99969	0,99989	0,99905
0,99400	0,99909	0,99986	0,99895	0,99937	0,99972	0,99984	0,99892
1,09400	0,99894	0,99987	0,99881	0,99926	0,99973	0,99978	0,99877
1,19300	0,99873	0,99988	0,99861	0,99911	0,99975	0,99969	0,99855
1,31600	0,99851	0,99988	0,99839	0,99895	0,99977	0,99956	0,99829
1,43800	0,99820	0,99989	0,99810	0,99874	0,99979	0,99937	0,99790
1,58700	0,99788	0,99990	0,99778	0,99851	0,99980	0,99912	0,99743
1,73500	0,99745	0,99991	0,99736	0,99821	0,99981	0,99873	0,99675
1,91400	0,99698	0,99991	0,99690	0,99788	0,99983	0,99822	0,99593
2,09200	0,99638	0,99992	0,99630	0,99745	0,99984	0,99743	0,99472
2,30400	0,99572	0,99992	0,99564	0,99699	0,99985	0,99640	0,99325
2,51600	0,99487	0,99993	0,99480	0,99639	0,99986	0,99483	0,99110
2,76500	0,99395	0,99993	0,99388	0,99574	0,99987	0,99281	0,98845
3,01400	0,99279	0,99994	0,99272	0,99492	0,99987	0,98977	0,98463
3,30300	0,99153	0,99994	0,99147	0,99403	0,99988	0,98590	0,97990
3,59100	0,98997	0,99994	0,98991	0,99293	0,99989	0,98024	0,97320
3,92000	0,98828	0,99995	0,98823	0,99174	0,99990	0,97309	0,96495
4,24800	0,98624	0,99995	0,98619	0,99029	0,99990	0,96296	0,95352
4,61700	0,98403	0,99995	0,98398	0,98873	0,99991	0,95031	0,93952
4,98600	0,98140	0,99996	0,98136	0,98687	0,99991	0,93303	0,92069
5,39400	0,97858	0,99996	0,97854	0,98487	0,99992	0,91188	0,89801
5,80200	0,97529	0,99996	0,97525	0,98253	0,99992	0,88409	0,86858
6,24600	0,97177	0,99996	0,97173	0,98004	0,99992	0,85100	0,83395
6,69000	0,96773	0,99996	0,96769	0,97717	0,99993	0,80924	0,79070
7,16800	0,96343	0,99997	0,96340	0,97411	0,99993	0,76116	0,74140
7,64600	0,95856	0,99997	0,95853	0,97065	0,99993	0,70327	0,68259
8,15600	0,95341	0,99997	0,95338	0,96699	0,99994	0,63957	0,61842
8,66500	0,94760	0,99997	0,94757	0,96286	0,99994	0,56657	0,54549
9,20800	0,94148	0,99997	0,94145	0,95852	0,99994	0,49056	0,47018
9,75000	0,93458	0,99997	0,93455	0,95361	0,99994	0,40861	0,38964

10,33000	0,92732	0,99997	0,92730	0,94846	0,99995	0,32927	0,31228
10,91000	0,91904	0,99997	0,91902	0,94258	0,99995	0,24974	0,23539
11,54000	0,91035	0,99997	0,91032	0,93641	0,99995	0,18043	0,16895
12,17000	0,90021	0,99998	0,90019	0,92923	0,99995	0,11799	0,10963
12,87000	0,88959	0,99998	0,88957	0,92172	0,99995	0,07161	0,06600
13,57000	0,87677	0,99998	0,87675	0,91266	0,99995	0,03639	0,03321
14,37500	0,77077	0,99998	0,77075	0,83854	0,99996	0,00866	0,00727
20,00000	0,24902	0,99999	0,24902	0,49649	0,99998	0,00866	0,00430
40,00000	0,00000	0,99999	0,00000	0,20757	0,99998	0,00866	0,00180
60,00000	0,00000	0,99999	0,00000	0,06127	0,99999	0,00866	0,00053
80,00000	0,00000	0,99999	0,00000	0,01277	0,99999	0,00866	0,00011
100,00000	1,00000	0,98419	0,98418	1,00000	0,96996	1,00000	0,96995

Figura 3.15

dp (micras)	Régimen laminar			Régimen turbulento			
	$h_{grav.}$	$h_{dif.}$	$h_{mecanica}$	$h_{grav.}$	$h_{dif.}$	$h_{in. turb.}$	$h_{mecanica}$
0,01596	1,00000	0,98419	0,98419	1,00000	0,96996	1,00000	0,96996
0,01715	1,00000	0,98561	0,98561	1,00000	0,97264	1,00000	0,97264
0,01843	1,00000	0,98690	0,98690	1,00000	0,97508	1,00000	0,97508
0,01981	1,00000	0,98809	0,98809	1,00000	0,97730	1,00000	0,97730
0,02129	1,00000	0,98916	0,98916	1,00000	0,97933	1,00000	0,97933
0,02288	1,00000	0,99014	0,99014	1,00000	0,98117	1,00000	0,98117
0,02458	1,00000	0,99103	0,99103	1,00000	0,98285	1,00000	0,98285
0,02642	1,00000	0,99184	0,99184	1,00000	0,98438	1,00000	0,98438
0,02839	1,00000	0,99257	0,99257	1,00000	0,98577	1,00000	0,98577
0,03051	1,00000	0,99324	0,99324	1,00000	0,98704	1,00000	0,98704
0,03278	1,00000	0,99385	0,99385	1,00000	0,98819	1,00000	0,98819
0,03523	1,00000	0,99440	0,99440	1,00000	0,98924	1,00000	0,98924
0,03786	1,00000	0,99491	0,99491	1,00000	0,99019	1,00000	0,99019
0,04068	1,00000	0,99536	0,99536	1,00000	0,99106	1,00000	0,99106
0,04371	1,00000	0,99578	0,99578	1,00000	0,99185	1,00000	0,99185
0,04698	1,00000	0,99615	0,99615	1,00000	0,99256	1,00000	0,99256
0,05048	1,00000	0,99650	0,99650	1,00000	0,99322	1,00000	0,99322
0,05425	1,00000	0,99681	0,99681	1,00000	0,99381	1,00000	0,99381
0,05829	1,00000	0,99709	0,99709	1,00000	0,99435	1,00000	0,99435
0,06264	1,00000	0,99735	0,99735	1,00000	0,99484	1,00000	0,99484
0,06732	1,00000	0,99758	0,99758	1,00000	0,99529	1,00000	0,99529
0,07234	1,00000	0,99779	0,99779	1,00000	0,99570	1,00000	0,99570
0,07774	1,00000	0,99798	0,99798	1,00000	0,99606	1,00000	0,99606
0,08354	1,00000	0,99816	0,99816	1,00000	0,99640	1,00000	0,99640
0,08977	1,00000	0,99831	0,99831	1,00000	0,99671	1,00000	0,99671
0,09647	1,00000	0,99846	0,99846	1,00000	0,99698	1,00000	0,99698
0,10366	1,00000	0,99859	0,99859	1,00000	0,99724	1,00000	0,99724
0,11140	1,00000	0,99871	0,99871	1,00000	0,99747	1,00000	0,99747

0,11971	1,00000	0,99882	0,99882	1,00000	0,99768	1,00000	0,99768
0,12864	1,00000	0,99891	0,99891	1,00000	0,99787	1,00000	0,99787
0,13824	1,00000	0,99900	0,99900	1,00000	0,99804	1,00000	0,99804
0,14855	1,00000	0,99908	0,99908	1,00000	0,99820	1,00000	0,99820
0,15963	1,00000	0,99916	0,99916	1,00000	0,99834	1,00000	0,99834
0,17154	1,00000	0,99922	0,99922	1,00000	0,99847	1,00000	0,99847
0,18434	1,00000	0,99928	0,99928	1,00000	0,99859	1,00000	0,99859
0,19810	1,00000	0,99934	0,99934	1,00000	0,99870	1,00000	0,99870
0,21288	1,00000	0,99939	0,99939	1,00000	0,99880	1,00000	0,99880
0,22876	1,00000	0,99944	0,99944	1,00000	0,99889	1,00000	0,99889
0,24582	1,00000	0,99948	0,99948	1,00000	0,99897	1,00000	0,99897
0,26416	1,00000	0,99952	0,99952	1,00000	0,99904	1,00000	0,99904
0,28387	1,00000	0,99955	0,99955	1,00000	0,99911	1,00000	0,99911
0,30505	1,00000	0,99958	0,99958	1,00000	0,99918	1,00000	0,99917
0,32781	1,00000	0,99961	0,99961	1,00000	0,99923	1,00000	0,99923
0,35227	1,00000	0,99964	0,99964	1,00000	0,99928	1,00000	0,99928
0,37855	1,00000	0,99966	0,99966	1,00000	0,99933	0,99999	0,99933
0,40679	1,00000	0,99969	0,99969	1,00000	0,99938	0,99999	0,99937
0,43714	1,00000	0,99971	0,99971	1,00000	0,99942	0,99999	0,99941
0,46976	1,00000	0,99973	0,99973	1,00000	0,99945	0,99999	0,99944
0,50481	1,00000	0,99974	0,99974	1,00000	0,99949	0,99999	0,99947
0,54247	1,00000	0,99976	0,99976	1,00000	0,99952	0,99998	0,99950
0,58294	1,00000	0,99978	0,99978	1,00000	0,99956	0,99997	0,99954
0,65000	1,00000	0,99979	0,99979	1,00000	0,99959	0,99997	0,99956
0,70200	1,00000	0,99981	0,99981	1,00000	0,99962	0,99996	0,99958
0,76700	1,00000	0,99982	0,99982	1,00000	0,99965	0,99994	0,99959
0,83200	1,00000	0,99983	0,99983	1,00000	0,99967	0,99992	0,99959
0,91300	1,00000	0,99985	0,99985	1,00000	0,99969	0,99989	0,99958
0,99400	1,00000	0,99986	0,99986	1,00000	0,99972	0,99984	0,99956
1,09400	1,00000	0,99987	0,99987	1,00000	0,99973	0,99978	0,99951
1,19300	1,00000	0,99988	0,99988	1,00000	0,99975	0,99969	0,99944
1,31600	1,00000	0,99988	0,99988	1,00000	0,99977	0,99956	0,99933
1,43800	1,00000	0,99989	0,99989	1,00000	0,99979	0,99937	0,99916
1,58700	1,00000	0,99990	0,99990	1,00000	0,99980	0,99912	0,99892
1,73500	1,00000	0,99991	0,99991	1,00000	0,99981	0,99873	0,99854
1,91400	1,00000	0,99991	0,99991	1,00000	0,99983	0,99822	0,99804
2,09200	1,00000	0,99992	0,99992	1,00000	0,99984	0,99743	0,99726
2,30400	1,00000	0,99992	0,99992	1,00000	0,99985	0,99640	0,99625
2,51600	1,00000	0,99993	0,99993	1,00000	0,99986	0,99483	0,99469
2,76500	1,00000	0,99993	0,99993	1,00000	0,99987	0,99281	0,99267
3,01400	1,00000	0,99994	0,99994	1,00000	0,99987	0,98977	0,98965
3,30300	1,00000	0,99994	0,99994	1,00000	0,99988	0,98590	0,98578
3,59100	1,00000	0,99994	0,99994	1,00000	0,99989	0,98024	0,98013
3,92000	1,00000	0,99995	0,99995	1,00000	0,99990	0,97309	0,97299
4,24800	1,00000	0,99995	0,99995	1,00000	0,99990	0,96296	0,96286
4,61700	1,00000	0,99995	0,99995	1,00000	0,99991	0,95031	0,95023
4,98600	1,00000	0,99996	0,99996	1,00000	0,99991	0,93303	0,93294
5,39400	1,00000	0,99996	0,99996	1,00000	0,99992	0,91188	0,91181
5,80200	1,00000	0,99996	0,99996	1,00000	0,99992	0,88409	0,88402

6,24600	1,00000	0,99996	0,99996	1,00000	0,99992	0,85100	0,85093
6,69000	1,00000	0,99996	0,99996	1,00000	0,99993	0,80924	0,80918
7,16800	1,00000	0,99997	0,99997	1,00000	0,99993	0,76116	0,76110
7,64600	1,00000	0,99997	0,99997	1,00000	0,99993	0,70327	0,70323
8,15600	1,00000	0,99997	0,99997	1,00000	0,99994	0,63957	0,63953
8,66500	1,00000	0,99997	0,99997	1,00000	0,99994	0,56657	0,56653
9,20800	1,00000	0,99997	0,99997	1,00000	0,99994	0,49056	0,49053
9,75000	1,00000	0,99997	0,99997	1,00000	0,99994	0,40861	0,40859
10,33000	1,00000	0,99997	0,99997	1,00000	0,99995	0,32927	0,32925
10,91000	1,00000	0,99997	0,99997	1,00000	0,99995	0,24974	0,24973
11,54000	1,00000	0,99997	0,99997	1,00000	0,99995	0,18043	0,18043
12,17000	1,00000	0,99998	0,99998	1,00000	0,99995	0,11799	0,11798
12,87000	1,00000	0,99998	0,99998	1,00000	0,99995	0,07161	0,07161
13,57000	1,00000	0,99998	0,99998	1,00000	0,99995	0,03639	0,03638
14,37500	1,00000	0,99998	0,99998	1,00000	0,99996	0,00866	0,00866
20,00000	1,00000	0,99999	0,99999	1,00000	0,99998	0,00866	0,00866
40,00000	1,00000	0,99999	0,99999	1,00000	0,99998	0,00866	0,00866
60,00000	1,00000	0,99999	0,99999	1,00000	0,99999	0,00866	0,00866
80,00000	1,00000	0,99999	0,99999	1,00000	0,99999	0,00866	0,00866
100,00000	1,00000	0,98419	0,98419	1,00000	0,96996	1,00000	0,96996

Figura 3.16

dp (micras)	h_{th}							
	Régimen laminar				Régimen turbulento			
	(150° C -20° C)	(150° C -50° C)	(150° C- 100° C)	(150° C- 150° C)	(150° C- 20° C)	(150° C- 50° C)	(150° C- 100° C)	(150° C- 150° C)
0,01596	0,75495	0,80555	0,89752	1,00000	0,65243	0,72000	0,84853	1,00000
0,01715	0,75498	0,80557	0,89754	1,00000	0,65247	0,72004	0,84855	1,00000
0,01843	0,75502	0,80560	0,89755	1,00000	0,65252	0,72008	0,84857	1,00000
0,01981	0,75505	0,80563	0,89757	1,00000	0,65257	0,72012	0,84860	1,00000
0,02129	0,75509	0,80566	0,89759	1,00000	0,65262	0,72016	0,84862	1,00000
0,02288	0,75513	0,80570	0,89761	1,00000	0,65267	0,72021	0,84865	1,00000
0,02458	0,75518	0,80573	0,89763	1,00000	0,65273	0,72026	0,84868	1,00000
0,02642	0,75522	0,80577	0,89765	1,00000	0,65279	0,72031	0,84871	1,00000
0,02839	0,75528	0,80581	0,89767	1,00000	0,65286	0,72037	0,84874	1,00000
0,03051	0,75533	0,80586	0,89770	1,00000	0,65293	0,72043	0,84878	1,00000
0,03278	0,75539	0,80591	0,89772	1,00000	0,65301	0,72049	0,84882	1,00000
0,03523	0,75545	0,80596	0,89775	1,00000	0,65309	0,72056	0,84886	1,00000
0,03786	0,75552	0,80602	0,89778	1,00000	0,65318	0,72064	0,84890	1,00000
0,04068	0,75559	0,80607	0,89782	1,00000	0,65327	0,72072	0,84895	1,00000
0,04371	0,75567	0,80614	0,89785	1,00000	0,65338	0,72081	0,84900	1,00000
0,04698	0,75575	0,80621	0,89789	1,00000	0,65349	0,72090	0,84906	1,00000
0,05048	0,75584	0,80628	0,89793	1,00000	0,65360	0,72100	0,84912	1,00000
0,05425	0,75594	0,80636	0,89797	1,00000	0,65373	0,72110	0,84918	1,00000

0,05829	0,75604	0,80644	0,89802	1,00000	0,65386	0,72122	0,84925	1,00000
0,06264	0,75615	0,80653	0,89807	1,00000	0,65401	0,72134	0,84932	1,00000
0,06732	0,75627	0,80663	0,89813	1,00000	0,65416	0,72147	0,84940	1,00000
0,07234	0,75639	0,80673	0,89818	1,00000	0,65433	0,72161	0,84948	1,00000
0,07774	0,75653	0,80684	0,89824	1,00000	0,65450	0,72176	0,84957	1,00000
0,08354	0,75667	0,80696	0,89831	1,00000	0,65469	0,72192	0,84966	1,00000
0,08977	0,75683	0,80709	0,89838	1,00000	0,65490	0,72210	0,84976	1,00000
0,09647	0,75699	0,80722	0,89846	1,00000	0,65511	0,72228	0,84987	1,00000
0,10366	0,75717	0,80737	0,89854	1,00000	0,65534	0,72247	0,84999	1,00000
0,11140	0,75736	0,80752	0,89862	1,00000	0,65559	0,72268	0,85011	1,00000
0,11971	0,75756	0,80769	0,89871	1,00000	0,65586	0,72291	0,85024	1,00000
0,12864	0,75777	0,80786	0,89881	1,00000	0,65614	0,72315	0,85038	1,00000
0,13824	0,75800	0,80805	0,89892	1,00000	0,65644	0,72340	0,85053	1,00000
0,14855	0,75824	0,80825	0,89903	1,00000	0,65676	0,72367	0,85069	1,00000
0,15963	0,75850	0,80846	0,89914	1,00000	0,65710	0,72396	0,85086	1,00000
0,17154	0,75878	0,80869	0,89927	1,00000	0,65746	0,72427	0,85104	1,00000
0,18434	0,75907	0,80893	0,89940	1,00000	0,65785	0,72460	0,85123	1,00000
0,19810	0,75938	0,80918	0,89955	1,00000	0,65826	0,72495	0,85144	1,00000
0,21288	0,75972	0,80946	0,89970	1,00000	0,65870	0,72532	0,85166	1,00000
0,22876	0,76007	0,80975	0,89986	1,00000	0,65916	0,72571	0,85189	1,00000
0,24582	0,76044	0,81005	0,90003	1,00000	0,65965	0,72613	0,85213	1,00000
0,26416	0,76084	0,81038	0,90021	1,00000	0,66018	0,72657	0,85239	1,00000
0,28387	0,76126	0,81072	0,90040	1,00000	0,66073	0,72704	0,85266	1,00000
0,30505	0,76170	0,81108	0,90060	1,00000	0,66131	0,72753	0,85295	1,00000
0,32781	0,76217	0,81147	0,90081	1,00000	0,66193	0,72805	0,85326	1,00000
0,35227	0,76266	0,81187	0,90104	1,00000	0,66258	0,72861	0,85358	1,00000
0,37855	0,76318	0,81230	0,90127	1,00000	0,66327	0,72919	0,85392	1,00000
0,40679	0,76373	0,81274	0,90152	1,00000	0,66399	0,72980	0,85428	1,00000
0,43714	0,76430	0,81321	0,90178	1,00000	0,66475	0,73044	0,85466	1,00000
0,46976	0,76491	0,81371	0,90206	1,00000	0,66555	0,73111	0,85505	1,00000
0,50481	0,76554	0,81422	0,90234	1,00000	0,66638	0,73182	0,85546	1,00000
0,54247	0,76620	0,81476	0,90264	1,00000	0,66725	0,73255	0,85589	1,00000
0,58294	0,76689	0,81533	0,90295	1,00000	0,66816	0,73332	0,85634	1,00000
0,65000	0,76798	0,81622	0,90345	1,00000	0,66961	0,73455	0,85706	1,00000
0,70200	0,76879	0,81689	0,90382	1,00000	0,67069	0,73545	0,85759	1,00000
0,76700	0,76977	0,81768	0,90426	1,00000	0,67198	0,73654	0,85822	1,00000
0,83200	0,77069	0,81844	0,90468	1,00000	0,67321	0,73758	0,85882	1,00000
0,91300	0,77179	0,81933	0,90517	1,00000	0,67467	0,73881	0,85954	1,00000
0,99400	0,77283	0,82018	0,90564	1,00000	0,67604	0,73997	0,86021	1,00000
1,09400	0,77403	0,82116	0,90618	1,00000	0,67764	0,74131	0,86099	1,00000
1,19300	0,77514	0,82207	0,90668	1,00000	0,67913	0,74256	0,86172	1,00000
1,31600	0,77644	0,82312	0,90726	1,00000	0,68085	0,74400	0,86256	1,00000
1,43800	0,77762	0,82409	0,90780	1,00000	0,68243	0,74533	0,86333	1,00000
1,58700	0,77896	0,82518	0,90840	1,00000	0,68421	0,74683	0,86420	1,00000
1,73500	0,78019	0,82618	0,90895	1,00000	0,68585	0,74821	0,86499	1,00000
1,91400	0,78155	0,82730	0,90956	1,00000	0,68768	0,74974	0,86588	1,00000
2,09200	0,78281	0,82831	0,91012	1,00000	0,68935	0,75114	0,86669	1,00000
2,30400	0,78418	0,82944	0,91073	1,00000	0,69119	0,75269	0,86758	1,00000
2,51600	0,78546	0,83048	0,91130	1,00000	0,69291	0,75412	0,86840	1,00000

2,76500	0,78687	0,83162	0,91193	1,00000	0,69479	0,75570	0,86931	1,00000
3,01400	0,78819	0,83270	0,91252	1,00000	0,69657	0,75719	0,87016	1,00000
3,30300	0,78966	0,83389	0,91318	1,00000	0,69854	0,75884	0,87111	1,00000
3,59100	0,79107	0,83504	0,91380	1,00000	0,70044	0,76042	0,87202	1,00000
3,92000	0,79265	0,83631	0,91450	1,00000	0,70256	0,76219	0,87304	1,00000
4,24800	0,79420	0,83757	0,91519	1,00000	0,70465	0,76393	0,87403	1,00000
4,61700	0,79593	0,83898	0,91596	1,00000	0,70699	0,76588	0,87515	1,00000
4,98600	0,79767	0,84038	0,91673	1,00000	0,70933	0,76783	0,87626	1,00000
5,39400	0,79960	0,84195	0,91758	1,00000	0,71194	0,77001	0,87750	1,00000
5,80200	0,80155	0,84353	0,91844	1,00000	0,71458	0,77220	0,87875	1,00000
6,24600	0,80368	0,84526	0,91938	1,00000	0,71747	0,77461	0,88012	1,00000
6,69000	0,80584	0,84700	0,92033	1,00000	0,72040	0,77703	0,88150	1,00000
7,16800	0,80817	0,84889	0,92135	1,00000	0,72357	0,77967	0,88299	1,00000
7,64600	0,81052	0,85078	0,92238	1,00000	0,72677	0,78231	0,88449	1,00000
8,15600	0,81303	0,85281	0,92348	1,00000	0,73019	0,78514	0,88608	1,00000
8,66500	0,81553	0,85482	0,92457	1,00000	0,73360	0,78797	0,88767	1,00000
9,20800	0,81818	0,85696	0,92572	1,00000	0,73723	0,79096	0,88936	1,00000
9,75000	0,82082	0,85908	0,92687	1,00000	0,74084	0,79394	0,89103	1,00000
10,33000	0,82360	0,86133	0,92808	1,00000	0,74466	0,79709	0,89280	1,00000
10,91000	0,82636	0,86354	0,92927	1,00000	0,74845	0,80021	0,89454	1,00000
11,54000	0,82930	0,86591	0,93054	1,00000	0,75250	0,80354	0,89640	1,00000
12,17000	0,83219	0,86822	0,93179	1,00000	0,75649	0,80681	0,89822	1,00000
12,87000	0,83533	0,87074	0,93314	1,00000	0,76083	0,81037	0,90020	1,00000
13,57000	0,83839	0,87320	0,93445	1,00000	0,76507	0,81384	0,90213	1,00000
14,37500	0,84182	0,87594	0,93592	1,00000	0,76983	0,81773	0,90428	1,00000
20,00000	0,86286	0,89273	0,94485	1,00000	0,79924	0,84166	0,91742	1,00000
40,00000	0,92126	0,93886	0,96895	1,00000	0,88285	0,90860	0,95321	1,00000
60,00000	0,97372	0,97972	0,98981	1,00000	0,96035	0,96936	0,98456	1,00000
80,00000	0,98899	0,99152	0,99575	1,00000	0,98332	0,98714	0,99355	1,00000
100,00000	0,99224	0,99403	0,99701	1,00000	0,98824	0,99094	0,99546	1,00000

Figura 4.10

Q(l/min.)	d _{p(50)} (micras)		
	(20 °C)	(150 °C)	(300 °C)
0,28317	62,97550	89,77451	115,76539
0,56634	29,58346	42,17260	54,38211
0,84951	19,01557	27,10759	34,95558
1,13267	13,89717	19,81106	25,54661
1,41584	10,89668	15,53373	20,03094
1,69901	8,93278	12,73410	16,42078
1,98218	7,55118	10,76456	13,88104
2,26535	6,52835	9,30647	12,00081
2,54852	5,74179	8,18519	10,55491
2,83169	5,11884	7,29715	9,40976

3,11485	4,61375	6,57711	8,48127
3,39802	4,19628	5,98199	7,71385
3,68119	3,84568	5,48220	7,06937
3,96436	3,54725	5,05677	6,52077
4,24753	3,29027	4,69044	6,04838
4,53070	3,06677	4,37182	5,63752
4,81386	2,87066	4,09226	5,27703
5,09703	2,69727	3,84509	4,95829
5,38020	2,54291	3,62503	4,67452
5,66337	2,40463	3,42792	4,42034
5,94654	2,28009	3,25038	4,19141
6,22971	2,16736	3,08967	3,98417
6,51288	2,06485	2,94354	3,79573
6,79604	1,97125	2,81011	3,62367
7,07921	1,88546	2,68781	3,46596
7,36238	1,80655	2,57533	3,32092
7,64555	1,73374	2,47153	3,18707
7,92872	1,66636	2,37548	3,06321
8,21189	1,60383	2,28633	2,94825
8,49506	1,54564	2,20339	2,84130
8,77822	1,49138	2,12603	2,74154
9,06139	1,44065	2,05371	2,64829
9,34456	1,39313	1,98597	2,56093
9,62773	1,34853	1,92239	2,47894
9,91090	1,30658	1,86260	2,40184
10,19407	1,26707	1,80627	2,32921
10,47723	1,22979	1,75313	2,26068
10,76040	1,19456	1,70290	2,19591
11,04357	1,16121	1,65536	2,13461
11,32674	1,12960	1,61030	2,07651
11,60991	1,09961	1,56754	2,02136
11,89308	1,07110	1,52690	1,96896
12,17625	1,04398	1,48824	1,91910
12,45941	1,01814	1,45141	1,87161
12,74258	0,99350	1,41629	1,82632
13,02575	0,96999	1,38276	1,78309
13,30892	0,94751	1,35072	1,74178
13,59209	0,92602	1,32008	1,70226
13,87526	0,90544	1,29074	1,66443
14,15843	0,88572	1,26263	1,62818
14,44159	0,86680	1,23567	1,59341
14,72476	0,84865	1,20979	1,56004
15,00793	0,83121	1,18493	1,52798
15,29110	0,81445	1,16103	1,49716
15,57427	0,79832	1,13804	1,46752
15,85744	0,78279	1,11591	1,43898
16,14060	0,76784	1,09458	1,41148
16,42377	0,75342	1,07403	1,38498
16,70694	0,73951	1,05420	1,35941

16,99011	0,72608	1,03507	1,33473
17,27328	0,71312	1,01658	1,31090
17,55645	0,70059	0,99873	1,28787
17,83962	0,68848	0,98146	1,26560
18,12278	0,67676	0,96475	1,24406
18,40595	0,66542	0,94859	1,22322
18,68912	0,65444	0,93293	1,20303
18,97229	0,64380	0,91777	1,18347
19,25546	0,63349	0,90306	1,16451
19,53863	0,62349	0,88881	1,14613
19,82180	0,61378	0,87498	1,12829
20,10496	0,60437	0,86155	1,11098
20,38813	0,59522	0,84852	1,09417
20,67130	0,58634	0,83586	1,07785
20,95447	0,57771	0,82355	1,06198
21,23764	0,56932	0,81159	1,04655
21,52081	0,56116	0,79996	1,03155
21,80397	0,55322	0,78864	1,01696
22,08714	0,54549	0,77762	1,00276
22,37031	0,53797	0,76690	0,98893
22,65348	0,53064	0,75646	0,97546
22,93665	0,52351	0,74628	0,96234
23,21982	0,51655	0,73637	0,94956
23,50299	0,50977	0,72670	0,93709
23,78615	0,50316	0,71728	0,92494
24,06932	0,49671	0,70809	0,91309
24,35249	0,49042	0,69912	0,90152
24,63566	0,48428	0,69036	0,89023
24,91883	0,47828	0,68182	0,87921
25,20200	0,47243	0,67347	0,86845
25,48517	0,46671	0,66532	0,85794
25,76833	0,46112	0,65735	0,84766
26,05150	0,45566	0,64957	0,83763
26,33467	0,45032	0,64196	0,82781
26,61784	0,44510	0,63452	0,81822
26,90101	0,44000	0,62724	0,80884
27,18418	0,43501	0,62012	0,79966
27,46734	0,43012	0,61316	0,79067
27,75051	0,42534	0,60634	0,78188
28,03368	0,42066	0,59967	0,77328
28,31685	0,59313	0,59313	0,76485

Figura 4.12

v en lacámara de muestreo (m/s)	Q del SMPS(l/min.)						
	1/8 (")	3/16 (")	1/4 (")	5/16 (")	3/8 (")	1/2 (")	1 (")
0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,08	0,30
0,02	0,01	0,02	0,04	0,06	0,09	0,15	0,61
0,03	0,01	0,03	0,06	0,09	0,13	0,23	0,91
0,04	0,02	0,04	0,08	0,12	0,17	0,30	1,22
0,05	0,02	0,05	0,10	0,15	0,21	0,38	1,52
0,06	0,03	0,06	0,11	0,18	0,26	0,46	1,82
0,07	0,03	0,07	0,13	0,21	0,30	0,53	2,13
0,08	0,04	0,09	0,15	0,24	0,34	0,61	2,43
0,09	0,04	0,10	0,17	0,27	0,38	0,68	2,74
0,10	0,05	0,11	0,19	0,30	0,43	0,76	3,04
0,11	0,05	0,12	0,21	0,33	0,47	0,84	3,34
0,12	0,06	0,13	0,23	0,36	0,51	0,91	3,65
0,13	0,06	0,14	0,25	0,39	0,56	0,99	3,95
0,14	0,07	0,15	0,27	0,42	0,60	1,06	4,26
0,15	0,07	0,16	0,29	0,45	0,64	1,14	4,56
0,16	0,08	0,17	0,30	0,48	0,68	1,22	4,86
0,17	0,08	0,18	0,32	0,50	0,73	1,29	5,17
0,18	0,09	0,19	0,34	0,53	0,77	1,37	5,47
0,19	0,09	0,20	0,36	0,56	0,81	1,44	5,78
0,20	0,10	0,21	0,38	0,59	0,86	1,52	6,08
0,21	0,10	0,22	0,40	0,62	0,90	1,60	6,38
0,22	0,10	0,24	0,42	0,65	0,94	1,67	6,69
0,23	0,11	0,25	0,44	0,68	0,98	1,75	6,99
0,24	0,11	0,26	0,46	0,71	1,03	1,82	7,30
0,25	0,12	0,27	0,48	0,74	1,07	1,90	7,60
0,26	0,12	0,28	0,49	0,77	1,11	1,98	7,90
0,27	0,13	0,29	0,51	0,80	1,15	2,05	8,21
0,28	0,13	0,30	0,53	0,83	1,20	2,13	8,51
0,29	0,14	0,31	0,55	0,86	1,24	2,20	8,82
0,30	0,14	0,32	0,57	0,89	1,28	2,28	9,12
0,31	0,15	0,33	0,59	0,92	1,33	2,36	9,42
0,32	0,15	0,34	0,61	0,95	1,37	2,43	9,73
0,33	0,16	0,35	0,63	0,98	1,41	2,51	10,03
0,34	0,16	0,36	0,65	1,01	1,45	2,58	10,34
0,35	0,17	0,37	0,67	1,04	1,50	2,66	10,64
0,36	0,17	0,38	0,68	1,07	1,54	2,74	10,94
0,37	0,18	0,40	0,70	1,10	1,58	2,81	11,25
0,38	0,18	0,41	0,72	1,13	1,62	2,89	11,55
0,39	0,19	0,42	0,74	1,16	1,67	2,96	11,86
0,40	0,19	0,43	0,76	1,19	1,71	3,04	12,16
0,41	0,19	0,44	0,78	1,22	1,75	3,12	12,47
0,42	0,20	0,45	0,80	1,25	1,80	3,19	12,77
0,43	0,20	0,46	0,82	1,28	1,84	3,27	13,07
0,44	0,21	0,47	0,84	1,31	1,88	3,34	13,38
0,45	0,21	0,48	0,86	1,34	1,92	3,42	13,68

0,46	0,22	0,49	0,87	1,37	1,97	3,50	13,99
0,47	0,22	0,50	0,89	1,40	2,01	3,57	14,29
0,48	0,23	0,51	0,91	1,43	2,05	3,65	14,59
0,49	0,23	0,52	0,93	1,45	2,09	3,72	14,90
0,50	0,24	0,53	0,95	1,48	2,14	3,80	15,20
0,51	0,24	0,55	0,97	1,51	2,18	3,88	15,51
0,52	0,25	0,56	0,99	1,54	2,22	3,95	15,81
0,53	0,25	0,57	1,01	1,57	2,27	4,03	16,11
0,54	0,26	0,58	1,03	1,60	2,31	4,10	16,42
0,55	0,26	0,59	1,05	1,63	2,35	4,18	16,72
0,56	0,27	0,60	1,06	1,66	2,39	4,26	17,03
0,57	0,27	0,61	1,08	1,69	2,44	4,33	17,33
0,58	0,28	0,62	1,10	1,72	2,48	4,41	17,63
0,59	0,28	0,63	1,12	1,75	2,52	4,48	17,94
0,60	0,29	0,64	1,14	1,78	2,57	4,56	18,24
0,61	0,29	0,65	1,16	1,81	2,61	4,64	18,55
0,62	0,29	0,66	1,18	1,84	2,65	4,71	18,85
0,63	0,30	0,67	1,20	1,87	2,69	4,79	19,15
0,64	0,30	0,68	1,22	1,90	2,74	4,86	19,46
0,65	0,31	0,69	1,24	1,93	2,78	4,94	19,76
0,66	0,31	0,71	1,25	1,96	2,82	5,02	20,07
0,67	0,32	0,72	1,27	1,99	2,86	5,09	20,37
0,68	0,32	0,73	1,29	2,02	2,91	5,17	20,67
0,69	0,33	0,74	1,31	2,05	2,95	5,24	20,98
0,70	0,33	0,75	1,33	2,08	2,99	5,32	21,28
0,71	0,34	0,76	1,35	2,11	3,04	5,40	21,59
0,72	0,34	0,77	1,37	2,14	3,08	5,47	21,89
0,73	0,35	0,78	1,39	2,17	3,12	5,55	22,19
0,74	0,35	0,79	1,41	2,20	3,16	5,62	22,50
0,75	0,36	0,80	1,43	2,23	3,21	5,70	22,80
0,76	0,36	0,81	1,44	2,26	3,25	5,78	23,11
0,77	0,37	0,82	1,46	2,29	3,29	5,85	23,41
0,78	0,37	0,83	1,48	2,32	3,33	5,93	23,71
0,79	0,38	0,84	1,50	2,35	3,38	6,00	24,02
0,80	0,38	0,86	1,52	2,38	3,42	6,08	24,32
0,81	0,38	0,87	1,54	2,40	3,46	6,16	24,63
0,82	0,39	0,88	1,56	2,43	3,51	6,23	24,93
0,83	0,39	0,89	1,58	2,46	3,55	6,31	25,23
0,84	0,40	0,90	1,60	2,49	3,59	6,38	25,54
0,85	0,40	0,91	1,62	2,52	3,63	6,46	25,84
0,86	0,41	0,92	1,63	2,55	3,68	6,54	26,15
0,87	0,41	0,93	1,65	2,58	3,72	6,61	26,45
0,88	0,42	0,94	1,67	2,61	3,76	6,69	26,75
0,89	0,42	0,95	1,69	2,64	3,81	6,76	27,06
0,90	0,43	0,96	1,71	2,67	3,85	6,84	27,36
0,91	0,43	0,97	1,73	2,70	3,89	6,92	27,67
0,92	0,44	0,98	1,75	2,73	3,93	6,99	27,97
0,93	0,44	0,99	1,77	2,76	3,98	7,07	28,27
0,94	0,45	1,00	1,79	2,79	4,02	7,14	28,58
0,95	0,45	1,02	1,81	2,82	4,06	7,22	28,88

0,96	0,46	1,03	1,82	2,85	4,10	7,30	29,19
0,97	0,46	1,04	1,84	2,88	4,15	7,37	29,49
0,98	0,47	1,05	1,86	2,91	4,19	7,45	29,79
0,99	0,47	1,06	1,88	2,94	4,23	7,52	30,10
1,00	0,48	1,07	1,90	2,97	4,28	7,60	30,40

Figura 4.16

Q(l/min.)	d _{p(50)} (micras)		
	0,0457 (cm)	0,0508 (cm)	0,0710 (cm)
0,20000	0,846	1,006	1,648
0,25000	0,748	0,892	1,460
0,30000	0,677	0,808	1,324
0,40000	0,576	0,690	1,128
0,50000	0,508	0,609	0,996
0,6	0,457	0,550	0,897
0,7	0,418	0,503	0,820
1	0,338	0,409	0,665

Figura 4.17

Datos experimentales				Datos de ajuste			
Q(l/min.)	Dp(cm H ₂ O)			Q(l/min.)	Dp(cm H ₂ O)		
	0,0457 (cm)	0,0508 (cm)	0,0710 (cm)		0,0457 (cm)	0,0508 (cm)	0,0710 (cm)
0,221	5	--	--	0,2009	4,44411		
0,319	10	--	--	0,2597	7,16455		
0,452	20	--	--	0,3185	10,48077		
0,555	30	--	--	0,3773	14,39278		
0,641	40	--	--	0,4361	18,90058		
0,798	60	--	--	0,4949	24,00417		
0,931	80	--	--	0,5537	29,70354		
0,204	--	3	--	0,6125	35,99871		
0,299	--	5	--	0,6713	42,88966		
0,427	--	10	--	0,7301	50,37639		
0,609	--	20	--	0,7889	58,45892		
0,741	--	30	--	0,8477	67,13723		
0,865	--	40	--	0,9065	76,41134		
1,04	--	60	--	0,9653	86,28123		
0,924			15	1,0241	96,7469		
1,06			20	0,19595		0,96395	
1,28			30	0,33426		2,58302	

1,51			40	0,47258		4,78637	
1,68			50	0,61089		7,57399	
1,87			60	0,74921		10,94589	
2,03			70	0,88753		14,90206	
2,19			80	1,02584		19,44251	
				1,16416		24,56724	
				1,30247		30,27624	
				1,44079		36,56952	
				1,57911		43,44707	
				1,71742		50,9089	
				1,85574		58,95501	
				1,99405		67,58539	
				2,13237		76,80005	
				2,27068		86,59899	
				2,409		96,9822	
				0,21379			2,59466
				0,29655			4,80909
				0,37931			7,79722
				0,46207			11,55904
				0,54483			16,09455
				0,62759			21,40376
				0,71034			27,48667
				0,7931			34,34327
				0,87586			41,97357
				0,95862			50,37756
				1,04138			59,55525
				1,12414			69,50663
				1,2069			80,23171
				1,28966			91,73049
				1,37241			104,00296
				1,45517			117,04912

Figura 4.18

d_p (mm)	Partículas con n cargas (%)												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
0,01	0	0	0	0	0	5,14	90,75	4,11	0	0	0	0	0
0,02	0	0	0	0	0,02	10,96	80,57	8,4	0,01	0	0	0	0
0,04	0	0	0	0	0,54	19,5	64,79	14,86	0,31	0	0	0	0
0,06	0	0	0	0,02	1,92	24,32	54,13	18,51	1,09	0,01	0	0	0
0,08	0	0	0	0,11	3,73	26,81	46,75	20,46	2,1	0,05	0	0	0
0,1	0	0	0	0,37	5,63	27,31	42,28	20,91	3,3	0,17	0	0	0
0,2	0	0,05	0,53	3,4	12,38	25,49	29,66	19,51	7,26	1,53	0,18	0,01	0
0,4	0,27	1,14	3,6	8,54	15,24	20,46	20,65	15,66	8,93	3,83	1,24	0,03	0,05

0,6	1,21	3	6,19	10,53	14,82	17,25	16,6	13,2	8,69	4,73	2,13	0,79	0,24
0,8	2,42	4,64	7,71	11,12	13,9	15,06	14,15	11,53	8,15	4,99	2,65	1,22	0,49
1	3,56	5,84	8,53	11,13	12,96	13,45	12,46	10,3	7,59	5	2,93	1,54	0,92

Figura 4.21

d_p (mm)	$dc_n/dlog(d_p)$ (partículas/cm ³)			
	2,0 l/min.	3,0 l/min.	4,0 l/min.	5,0 l/min.
0,01626	1,61E+05	1,77E+05	2,79E+05	3,55E+05
0,01685	1,71E+05	1,97E+05	2,93E+05	3,78E+05
0,01747	1,85E+05	2,18E+05	3,28E+05	4,04E+05
0,01811	2,01E+05	2,44E+05	3,67E+05	4,36E+05
0,01877	2,19E+05	2,71E+05	4,08E+05	4,69E+05
0,01946	2,39E+05	3,04E+05	4,53E+05	5,07E+05
0,02017	2,72E+05	3,62E+05	5,34E+05	5,71E+05
0,02091	3,15E+05	4,28E+05	6,28E+05	6,44E+05
0,02168	3,69E+05	5,06E+05	7,35E+05	7,29E+05
0,02247	4,30E+05	5,93E+05	8,49E+05	8,24E+05
0,02329	5,02E+05	6,89E+05	9,74E+05	9,27E+05
0,02415	5,82E+05	7,95E+05	1,11E+06	1,03E+06
0,02503	6,74E+05	9,13E+05	1,25E+06	1,15E+06
0,02595	7,76E+05	1,04E+06	1,40E+06	1,27E+06
0,02690	8,90E+05	1,18E+06	1,57E+06	1,40E+06
0,02789	1,02E+06	1,33E+06	1,73E+06	1,54E+06
0,02891	1,15E+06	1,49E+06	1,90E+06	1,67E+06
0,02997	1,30E+06	1,66E+06	2,08E+06	1,81E+06
0,03106	1,46E+06	1,83E+06	2,26E+06	1,95E+06
0,03220	1,62E+06	2,00E+06	2,43E+06	2,08E+06
0,03338	1,80E+06	2,19E+06	2,61E+06	2,22E+06
0,03460	1,98E+06	2,38E+06	2,79E+06	2,36E+06
0,03587	2,18E+06	2,57E+06	2,97E+06	2,49E+06
0,03719	2,38E+06	2,77E+06	3,13E+06	2,61E+06
0,03855	2,59E+06	2,95E+06	3,29E+06	2,73E+06
0,03996	2,79E+06	3,14E+06	3,43E+06	2,84E+06
0,04142	3,00E+06	3,32E+06	3,57E+06	2,93E+06
0,04294	3,21E+06	3,49E+06	3,70E+06	3,03E+06
0,04452	3,41E+06	3,65E+06	3,82E+06	3,11E+06
0,04615	3,61E+06	3,81E+06	3,92E+06	3,19E+06
0,04784	3,80E+06	3,95E+06	4,01E+06	3,24E+06
0,04959	3,97E+06	4,08E+06	4,08E+06	3,28E+06
0,05141	4,15E+06	4,19E+06	4,14E+06	3,31E+06
0,05329	4,30E+06	4,29E+06	4,19E+06	3,33E+06

0,05524	4,44E+06	4,37E+06	4,21E+06	3,34E+06
0,05726	4,57E+06	4,43E+06	4,22E+06	3,34E+06
0,05936	4,67E+06	4,47E+06	4,22E+06	3,32E+06
0,06154	4,76E+06	4,49E+06	4,20E+06	3,29E+06
0,06379	4,82E+06	4,50E+06	4,17E+06	3,25E+06
0,06613	4,87E+06	4,49E+06	4,12E+06	3,21E+06
0,06855	4,91E+06	4,47E+06	4,06E+06	3,15E+06
0,07106	4,93E+06	4,44E+06	3,99E+06	3,09E+06
0,07366	4,93E+06	4,39E+06	3,91E+06	3,03E+06
0,07636	4,92E+06	4,34E+06	3,83E+06	2,97E+06
0,07916	4,88E+06	4,27E+06	3,74E+06	2,89E+06
0,08206	4,84E+06	4,19E+06	3,64E+06	2,82E+06
0,08507	4,78E+06	4,11E+06	3,55E+06	2,74E+06
0,08818	4,72E+06	4,03E+06	3,45E+06	2,67E+06
0,09141	4,65E+06	3,94E+06	3,35E+06	2,59E+06
0,09476	4,57E+06	3,85E+06	3,25E+06	2,51E+06
0,09823	4,49E+06	3,75E+06	3,15E+06	2,44E+06
0,10183	4,39E+06	3,65E+06	3,05E+06	2,36E+06
0,10556	4,28E+06	3,54E+06	2,95E+06	2,28E+06
0,10943	4,18E+06	3,43E+06	2,85E+06	2,20E+06
0,11344	4,06E+06	3,32E+06	2,75E+06	2,12E+06
0,11759	3,94E+06	3,22E+06	2,64E+06	2,04E+06
0,12190	3,82E+06	3,11E+06	2,54E+06	1,96E+06
0,12637	3,70E+06	3,00E+06	2,44E+06	1,89E+06
0,13100	3,58E+06	2,88E+06	2,34E+06	1,81E+06
0,13579	3,44E+06	2,78E+06	2,24E+06	1,73E+06
0,14077	3,31E+06	2,67E+06	2,14E+06	1,65E+06
0,14593	3,18E+06	2,56E+06	2,04E+06	1,58E+06
0,15127	3,06E+06	2,45E+06	1,94E+06	1,50E+06
0,15681	2,93E+06	2,34E+06	1,85E+06	1,42E+06
0,16256	2,81E+06	2,24E+06	1,75E+06	1,35E+06
0,16851	2,68E+06	2,13E+06	1,66E+06	1,28E+06
0,17469	2,55E+06	2,02E+06	1,57E+06	1,21E+06
0,18109	2,43E+06	1,92E+06	1,48E+06	1,14E+06
0,18772	2,30E+06	1,81E+06	1,39E+06	1,07E+06
0,19460	2,17E+06	1,71E+06	1,30E+06	9,99E+05
0,20172	2,05E+06	1,61E+06	1,22E+06	9,32E+05
0,20911	1,93E+06	1,51E+06	1,14E+06	8,70E+05
0,21677	1,81E+06	1,41E+06	1,07E+06	8,11E+05
0,22472	1,69E+06	1,31E+06	9,92E+05	7,53E+05
0,23295	1,58E+06	1,22E+06	9,19E+05	6,98E+05
0,24148	1,47E+06	1,13E+06	8,49E+05	6,46E+05
0,25033	1,36E+06	1,05E+06	7,83E+05	5,94E+05
0,25950	1,26E+06	9,64E+05	7,19E+05	5,43E+05
0,26900	1,16E+06	8,87E+05	6,59E+05	4,94E+05
0,27886	1,06E+06	8,14E+05	6,01E+05	4,48E+05

0,28907	9,74E+05	7,45E+05	5,46E+05	4,05E+05
0,29966	8,92E+05	6,83E+05	4,95E+05	3,70E+05
0,31064	8,18E+05	6,23E+05	4,46E+05	3,37E+05
0,32202	7,45E+05	5,66E+05	4,00E+05	3,06E+05
0,33382	6,76E+05	5,12E+05	3,57E+05	2,76E+05
0,34605	6,10E+05	4,61E+05	3,18E+05	2,49E+05
0,35872	5,48E+05	4,14E+05	2,83E+05	2,25E+05
0,37186	4,93E+05	3,71E+05	2,51E+05	2,04E+05
0,38549	4,42E+05	3,31E+05	2,20E+05	1,87E+05
0,39961	3,95E+05	2,94E+05	1,92E+05	1,72E+05
0,41425	3,53E+05	2,61E+05	1,69E+05	1,60E+05
0,42942	3,14E+05	2,31E+05	1,47E+05	1,49E+05
0,44515	2,75E+05	2,00E+05	1,27E+05	1,36E+05
0,46146	2,40E+05	1,74E+05	1,10E+05	1,28E+05
0,47836	2,09E+05	1,51E+05	9,41E+04	1,20E+05
0,49589	1,82E+05	1,30E+05	8,07E+04	1,14E+05
0,51405	1,68E+05	1,19E+05	7,33E+04	1,11E+05
0,53288	1,55E+05	1,09E+05	6,68E+04	1,08E+05
0,55241	1,42E+05	9,91E+04	6,05E+04	1,05E+05
0,57264	1,31E+05	9,09E+04	5,54E+04	1,02E+05
0,59362	1,20E+05	8,34E+04	5,07E+04	1,01E+05
0,61536	1,11E+05	7,61E+04	4,64E+04	1,01E+05

Figura 4.24

d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (partículas/cm ³)		
	5,0 l/min.	10,0 l/min.	15,0 l/min.
0,25400	7,53E+02	7,20E+02	1,91E+03
0,25700	7,52E+02	2,38E+02	1,67E+03
0,25900	1,15E+03	1,04E+03	3,06E+03
0,26200	1,49E+03	4,06E+02	2,79E+03
0,26600	1,48E+03	5,05E+02	2,44E+03
0,27000	1,86E+03	5,38E+02	2,71E+03
0,27300	3,14E+03	1,37E+03	4,18E+03
0,27700	3,29E+03	8,05E+02	3,10E+03
0,28200	2,82E+03	6,61E+02	2,54E+03
0,28700	5,37E+03	1,20E+03	4,02E+03
0,29100	5,14E+03	1,20E+03	3,61E+03
0,29600	6,35E+03	1,42E+03	3,86E+03
0,30200	7,23E+03	1,68E+03	3,97E+03
0,30900	7,98E+03	1,88E+03	3,98E+03
0,31500	1,12E+04	2,70E+03	5,10E+03

0,32100	1,14E+04	2,75E+03	4,70E+03
0,32900	1,26E+04	3,12E+03	4,79E+03
0,33800	1,31E+04	3,48E+03	4,79E+03
0,34600	1,69E+04	4,66E+03	5,71E+03
0,35400	1,67E+04	4,97E+03	5,64E+03
0,36400	1,83E+04	5,80E+03	5,78E+03
0,37500	1,80E+04	6,05E+03	5,84E+03
0,38500	2,22E+04	7,88E+03	6,85E+03
0,39500	2,03E+04	7,82E+03	6,32E+03
0,40800	2,08E+04	8,95E+03	6,51E+03
0,42200	1,97E+04	9,14E+03	6,13E+03
0,43500	2,28E+04	1,16E+04	7,26E+03
0,44800	2,20E+04	1,18E+04	6,99E+03
0,46500	2,21E+04	1,28E+04	7,01E+03
0,48100	2,13E+04	1,29E+04	6,57E+03
0,49800	2,29E+04	1,52E+04	7,13E+03
0,51400	2,49E+04	1,67E+04	7,66E+03
0,53500	2,29E+04	1,63E+04	7,03E+03
0,55600	2,16E+04	1,58E+04	6,55E+03
0,57700	2,48E+04	1,90E+04	7,48E+03
0,59800	2,35E+04	1,81E+04	6,85E+03
0,62400	2,37E+04	1,91E+04	6,88E+03
0,65000	2,21E+04	1,83E+04	6,54E+03
0,67600	2,57E+04	2,19E+04	7,45E+03
0,70200	2,35E+04	2,02E+04	6,48E+03
0,73500	2,33E+04	2,09E+04	6,51E+03
0,76700	2,16E+04	1,99E+04	5,93E+03
0,80000	2,45E+04	2,31E+04	6,73E+03
0,83200	2,29E+04	2,23E+04	6,15E+03
0,87300	2,21E+04	2,24E+04	6,11E+03
0,91300	2,03E+04	2,11E+04	5,49E+03
0,95400	2,26E+04	2,41E+04	6,29E+03
0,99400	2,15E+04	2,28E+04	5,82E+03
1,04400	2,04E+04	2,25E+04	5,64E+03
1,09400	1,84E+04	2,04E+04	5,05E+03
1,14300	2,06E+04	2,31E+04	5,63E+03
1,19300	1,88E+04	2,09E+04	5,24E+03
1,25400	1,80E+04	2,03E+04	4,97E+03
1,31600	1,63E+04	1,84E+04	4,58E+03
1,37700	1,82E+04	2,05E+04	5,15E+03
1,43800	1,64E+04	1,83E+04	4,55E+03
1,51200	1,57E+04	1,77E+04	4,53E+03
1,58700	1,42E+04	1,57E+04	4,05E+03
1,66100	1,53E+04	1,70E+04	4,28E+03
1,73500	1,42E+04	1,56E+04	3,93E+03
1,82400	1,35E+04	1,49E+04	3,76E+03

1,91400	1,20E+04	1,32E+04	3,33E+03
2,00300	7,69E+03	8,46E+03	2,05E+03
2,09200	1,31E+04	1,41E+04	3,39E+03
2,19800	1,15E+04	1,25E+04	3,03E+03
2,30400	1,02E+04	1,07E+04	2,49E+03
2,41000	1,12E+04	1,16E+04	2,70E+03
2,51600	9,95E+03	1,04E+04	2,36E+03
2,64100	9,76E+03	1,01E+04	2,31E+03
2,76500	8,64E+03	8,79E+03	1,88E+03
2,89000	9,49E+03	9,47E+03	2,06E+03
3,01400	8,26E+03	8,36E+03	1,73E+03
3,15800	8,13E+03	8,14E+03	1,59E+03
3,30300	6,96E+03	6,96E+03	1,34E+03
3,44700	7,47E+03	7,49E+03	1,35E+03
3,59100	7,04E+03	6,92E+03	1,19E+03
3,75500	6,78E+03	6,56E+03	1,12E+03
3,92000	5,87E+03	5,72E+03	9,08E+02
4,08400	6,24E+03	5,99E+03	9,16E+02
4,24800	5,81E+03	5,49E+03	7,38E+02
4,43300	5,53E+03	5,34E+03	6,85E+02
4,61700	4,66E+03	4,39E+03	5,24E+02
4,80200	5,09E+03	4,61E+03	5,09E+02
4,98600	4,71E+03	4,25E+03	4,28E+02
5,19000	4,41E+03	4,13E+03	3,46E+02
5,39400	3,94E+03	3,44E+03	2,80E+02
5,59800	4,08E+03	3,66E+03	2,61E+02
5,80200	3,72E+03	3,29E+03	2,06E+02
6,02400	3,69E+03	3,12E+03	1,68E+02
6,24600	3,07E+03	2,49E+03	1,17E+02
6,46800	3,13E+03	2,57E+03	1,11E+02
6,69000	2,90E+03	2,39E+03	8,59E+01
6,92900	2,86E+03	2,21E+03	6,99E+01
7,16800	2,38E+03	1,81E+03	5,85E+01
7,40700	2,17E+03	1,60E+03	4,65E+01
7,64600	2,45E+03	1,80E+03	3,25E+01
7,90100	2,07E+03	1,44E+03	2,09E+01
8,15600	1,67E+03	1,16E+03	1,72E+01
8,41000	1,72E+03	1,15E+03	1,42E+01
8,66500	1,50E+03	9,38E+02	1,59E+01
8,93600	1,42E+03	8,53E+02	7,77E+00
9,20800	1,22E+03	6,57E+02	4,73E+00
9,47900	1,16E+03	6,19E+02	4,12E+00
9,75000	9,45E+02	4,98E+02	5,22E+00
10,04000	9,27E+02	4,49E+02	3,71E+00
10,33000	7,05E+02	3,38E+02	3,44E+00
10,62000	6,39E+02	3,26E+02	1,18E+00

10,91000	6,13E+02	2,63E+02	1,16E+00
11,22500	4,92E+02	1,91E+02	2,67E+00
11,54000	3,92E+02	1,43E+02	7,85E-01
11,85500	3,32E+02	1,19E+02	1,21E+00
12,17000	2,92E+02	1,05E+02	7,85E-01
12,52000	2,60E+02	7,73E+01	3,83E-01
12,87000	2,15E+02	5,54E+01	0,00E+00
13,22000	2,16E+02	4,68E+01	1,21E+00
13,57000	1,51E+02	4,17E+01	3,87E-01
13,97300	1,20E+02	2,32E+01	3,72E-01
14,37500	9,87E+01	1,26E+01	0,00E+00
14,77800	8,72E+01	1,20E+01	0,00E+00
15,18000	6,52E+01	6,68E+00	0,00E+00
15,66300	3,52E+01	1,06E+01	6,96E-01
16,14500	3,56E+01	3,66E+00	3,59E-01
16,62800	3,36E+01	5,02E+00	7,39E-01
17,11000	1,93E+01	1,91E+00	0,00E+00
17,72000	1,33E+01	3,53E+00	3,11E-01
18,33000	1,88E+01	1,10E+00	3,22E-01
18,94000	5,80E+01	1,81E+01	0,00E+00
19,55000	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Figura 4.25

v (m/s)	Q _m (l/min.)						
	1/8 (")	3/16 (")	1/4 (")	5/16 (")	3/8 (")	1/2 (")	1 (")
0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,08	0,30
0,02	0,01	0,02	0,04	0,06	0,09	0,15	0,61
0,03	0,01	0,03	0,06	0,09	0,13	0,23	0,91
0,04	0,02	0,04	0,08	0,12	0,17	0,30	1,22
0,05	0,02	0,05	0,10	0,15	0,21	0,38	1,52
0,06	0,03	0,06	0,11	0,18	0,26	0,46	1,82
0,07	0,03	0,07	0,13	0,21	0,30	0,53	2,13
0,08	0,04	0,09	0,15	0,24	0,34	0,61	2,43
0,09	0,04	0,10	0,17	0,27	0,38	0,68	2,74
0,10	0,05	0,11	0,19	0,30	0,43	0,76	3,04
0,11	0,05	0,12	0,21	0,33	0,47	0,84	3,34
0,12	0,06	0,13	0,23	0,36	0,51	0,91	3,65
0,13	0,06	0,14	0,25	0,39	0,56	0,99	3,95
0,14	0,07	0,15	0,27	0,42	0,60	1,06	4,26
0,15	0,07	0,16	0,29	0,45	0,64	1,14	4,56
0,16	0,08	0,17	0,30	0,48	0,68	1,22	4,86
0,17	0,08	0,18	0,32	0,50	0,73	1,29	5,17
0,18	0,09	0,19	0,34	0,53	0,77	1,37	5,47

0,19	0,09	0,20	0,36	0,56	0,81	1,44	5,78
0,20	0,10	0,21	0,38	0,59	0,86	1,52	6,08
0,21	0,10	0,22	0,40	0,62	0,90	1,60	6,38
0,22	0,10	0,24	0,42	0,65	0,94	1,67	6,69
0,23	0,11	0,25	0,44	0,68	0,98	1,75	6,99
0,24	0,11	0,26	0,46	0,71	1,03	1,82	7,30
0,25	0,12	0,27	0,48	0,74	1,07	1,90	7,60
0,26	0,12	0,28	0,49	0,77	1,11	1,98	7,90
0,27	0,13	0,29	0,51	0,80	1,15	2,05	8,21
0,28	0,13	0,30	0,53	0,83	1,20	2,13	8,51
0,29	0,14	0,31	0,55	0,86	1,24	2,20	8,82
0,30	0,14	0,32	0,57	0,89	1,28	2,28	9,12
0,31	0,15	0,33	0,59	0,92	1,33	2,36	9,42
0,32	0,15	0,34	0,61	0,95	1,37	2,43	9,73
0,33	0,16	0,35	0,63	0,98	1,41	2,51	10,03
0,34	0,16	0,36	0,65	1,01	1,45	2,58	10,34
0,35	0,17	0,37	0,67	1,04	1,50	2,66	10,64
0,36	0,17	0,38	0,68	1,07	1,54	2,74	10,94
0,37	0,18	0,40	0,70	1,10	1,58	2,81	11,25
0,38	0,18	0,41	0,72	1,13	1,62	2,89	11,55
0,39	0,19	0,42	0,74	1,16	1,67	2,96	11,86
0,40	0,19	0,43	0,76	1,19	1,71	3,04	12,16
0,41	0,19	0,44	0,78	1,22	1,75	3,12	12,47
0,42	0,20	0,45	0,80	1,25	1,80	3,19	12,77
0,43	0,20	0,46	0,82	1,28	1,84	3,27	13,07
0,44	0,21	0,47	0,84	1,31	1,88	3,34	13,38
0,45	0,21	0,48	0,86	1,34	1,92	3,42	13,68
0,46	0,22	0,49	0,87	1,37	1,97	3,50	13,99
0,47	0,22	0,50	0,89	1,40	2,01	3,57	14,29
0,48	0,23	0,51	0,91	1,43	2,05	3,65	14,59
0,49	0,23	0,52	0,93	1,45	2,09	3,72	14,90
0,50	0,24	0,53	0,95	1,48	2,14	3,80	15,20
0,51	0,24	0,55	0,97	1,51	2,18	3,88	15,51
0,52	0,25	0,56	0,99	1,54	2,22	3,95	15,81
0,53	0,25	0,57	1,01	1,57	2,27	4,03	16,11
0,54	0,26	0,58	1,03	1,60	2,31	4,10	16,42
0,55	0,26	0,59	1,05	1,63	2,35	4,18	16,72
0,56	0,27	0,60	1,06	1,66	2,39	4,26	17,03
0,57	0,27	0,61	1,08	1,69	2,44	4,33	17,33
0,58	0,28	0,62	1,10	1,72	2,48	4,41	17,63
0,59	0,28	0,63	1,12	1,75	2,52	4,48	17,94
0,60	0,29	0,64	1,14	1,78	2,57	4,56	18,24
0,61	0,29	0,65	1,16	1,81	2,61	4,64	18,55
0,62	0,29	0,66	1,18	1,84	2,65	4,71	18,85
0,63	0,30	0,67	1,20	1,87	2,69	4,79	19,15
0,64	0,30	0,68	1,22	1,90	2,74	4,86	19,46
0,65	0,31	0,69	1,24	1,93	2,78	4,94	19,76
0,66	0,31	0,71	1,25	1,96	2,82	5,02	20,07
0,67	0,32	0,72	1,27	1,99	2,86	5,09	20,37
0,68	0,32	0,73	1,29	2,02	2,91	5,17	20,67

0,69	0,33	0,74	1,31	2,05	2,95	5,24	20,98
0,70	0,33	0,75	1,33	2,08	2,99	5,32	21,28
0,71	0,34	0,76	1,35	2,11	3,04	5,40	21,59
0,72	0,34	0,77	1,37	2,14	3,08	5,47	21,89
0,73	0,35	0,78	1,39	2,17	3,12	5,55	22,19
0,74	0,35	0,79	1,41	2,20	3,16	5,62	22,50
0,75	0,36	0,80	1,43	2,23	3,21	5,70	22,80
0,76	0,36	0,81	1,44	2,26	3,25	5,78	23,11
0,77	0,37	0,82	1,46	2,29	3,29	5,85	23,41
0,78	0,37	0,83	1,48	2,32	3,33	5,93	23,71
0,79	0,38	0,84	1,50	2,35	3,38	6,00	24,02
0,80	0,38	0,86	1,52	2,38	3,42	6,08	24,32
0,81	0,38	0,87	1,54	2,40	3,46	6,16	24,63
0,82	0,39	0,88	1,56	2,43	3,51	6,23	24,93
0,83	0,39	0,89	1,58	2,46	3,55	6,31	25,23
0,84	0,40	0,90	1,60	2,49	3,59	6,38	25,54
0,85	0,40	0,91	1,62	2,52	3,63	6,46	25,84
0,86	0,41	0,92	1,63	2,55	3,68	6,54	26,15
0,87	0,41	0,93	1,65	2,58	3,72	6,61	26,45
0,88	0,42	0,94	1,67	2,61	3,76	6,69	26,75
0,89	0,42	0,95	1,69	2,64	3,81	6,76	27,06
0,90	0,43	0,96	1,71	2,67	3,85	6,84	27,36
0,91	0,43	0,97	1,73	2,70	3,89	6,92	27,67
0,92	0,44	0,98	1,75	2,73	3,93	6,99	27,97
0,93	0,44	0,99	1,77	2,76	3,98	7,07	28,27
0,94	0,45	1,00	1,79	2,79	4,02	7,14	28,58
0,95	0,45	1,02	1,81	2,82	4,06	7,22	28,88
0,96	0,46	1,03	1,82	2,85	4,10	7,30	29,19
0,97	0,46	1,04	1,84	2,88	4,15	7,37	29,49
0,98	0,47	1,05	1,86	2,91	4,19	7,45	29,79
0,99	0,47	1,06	1,88	2,94	4,23	7,52	30,10
1,00	0,48	1,07	1,90	2,97	4,28	7,60	30,40
1,10	0,52	1,18	2,09	3,27	4,70	8,36	33,44
1,20	0,57	1,28	2,28	3,56	5,13	9,12	36,48
1,30	0,62	1,39	2,47	3,86	5,56	9,88	39,52
1,40	0,67	1,50	2,66	4,16	5,99	10,64	42,56
1,50	0,71	1,60	2,85	4,45	6,41	11,40	45,60
1,60	0,76	1,71	3,04	4,75	6,84	12,16	48,64
1,70	0,81	1,82	3,23	5,05	7,27	12,92	51,68
1,80	0,86	1,92	3,42	5,34	7,70	13,68	54,72
1,90	0,90	2,03	3,61	5,64	8,12	14,44	57,76
2,00	0,95	2,14	3,80	5,94	8,55	15,20	60,80
2,10	1,00	2,24	3,99	6,23	8,98	15,96	63,85
2,20	1,05	2,35	4,18	6,53	9,41	16,72	66,89
2,30	1,09	2,46	4,37	6,83	9,83	17,48	69,93
2,40	1,14	2,57	4,56	7,13	10,26	18,24	72,97
2,50	1,19	2,67	4,75	7,42	10,69	19,00	76,01
2,60	1,24	2,78	4,94	7,72	11,12	19,76	79,05
2,70	1,28	2,89	5,13	8,02	11,54	20,52	82,09
2,80	1,33	2,99	5,32	8,31	11,97	21,28	85,13

2,90	1,38	3,10	5,51	8,61	12,40	22,04	88,17
3,00	1,43	3,21	5,70	8,91	12,83	22,80	91,21
3,10	1,47	3,31	5,89	9,20	13,25	23,56	94,25
3,20	1,52	3,42	6,08	9,50	13,68	24,32	97,29
3,30	1,57	3,53	6,27	9,80	14,11	25,08	100,33
3,40	1,62	3,63	6,46	10,09	14,54	25,84	103,37
3,50	1,66	3,74	6,65	10,39	14,96	26,60	106,41
3,60	1,71	3,85	6,84	10,69	15,39	27,36	109,45
3,70	1,76	3,95	7,03	10,99	15,82	28,12	112,49
3,80	1,81	4,06	7,22	11,28	16,25	28,88	115,53
3,90	1,85	4,17	7,41	11,58	16,67	29,64	118,57
4,00	1,90	4,28	7,60	11,88	17,10	30,40	121,61
4,10	1,95	4,38	7,79	12,17	17,53	31,16	124,65
4,20	2,00	4,49	7,98	12,47	17,96	31,92	127,69
4,30	2,04	4,60	8,17	12,77	18,38	32,68	130,73
4,40	2,09	4,70	8,36	13,06	18,81	33,44	133,77
4,50	2,14	4,81	8,55	13,36	19,24	34,20	136,81
4,60	2,19	4,92	8,74	13,66	19,67	34,96	139,85
4,70	2,23	5,02	8,93	13,95	20,09	35,72	142,89
4,80	2,28	5,13	9,12	14,25	20,52	36,48	145,93
4,90	2,33	5,24	9,31	14,55	20,95	37,24	148,97
5,00	2,38	5,34	9,50	14,84	21,38	38,00	152,01
5,10	2,42	5,45	9,69	15,14	21,80	38,76	155,05
5,20	2,47	5,56	9,88	15,44	22,23	39,52	158,09
5,30	2,52	5,66	10,07	15,74	22,66	40,28	161,13
5,40	2,57	5,77	10,26	16,03	23,09	41,04	164,17
5,50	2,61	5,88	10,45	16,33	23,51	41,80	167,21
5,60	2,66	5,99	10,64	16,63	23,94	42,56	170,25
5,70	2,71	6,09	10,83	16,92	24,37	43,32	173,29
5,80	2,76	6,20	11,02	17,22	24,80	44,08	176,33
5,90	2,80	6,31	11,21	17,52	25,22	44,84	179,37
6,00	2,85	6,41	11,40	17,81	25,65	45,60	182,41
6,10	2,90	6,52	11,59	18,11	26,08	46,36	185,45
6,20	2,95	6,63	11,78	18,41	26,51	47,12	188,50
6,30	2,99	6,73	11,97	18,70	26,93	47,88	191,54
6,40	3,04	6,84	12,16	19,00	27,36	48,64	194,58
6,50	3,09	6,95	12,35	19,30	27,79	49,40	197,62
6,60	3,14	7,05	12,54	19,60	28,22	50,16	200,66
6,70	3,18	7,16	12,73	19,89	28,64	50,92	203,70
6,80	3,23	7,27	12,92	20,19	29,07	51,68	206,74
6,90	3,28	7,37	13,11	20,49	29,50	52,44	209,78
7,00	3,33	7,48	13,30	20,78	29,93	53,20	212,82
7,10	3,37	7,59	13,49	21,08	30,35	53,96	215,86
7,20	3,42	7,70	13,68	21,38	30,78	54,72	218,90
7,30	3,47	7,80	13,87	21,67	31,21	55,48	221,94
7,40	3,52	7,91	14,06	21,97	31,64	56,24	224,98
7,50	3,56	8,02	14,25	22,27	32,07	57,00	228,02
7,60	3,61	8,12	14,44	22,56	32,49	57,76	231,06
7,70	3,66	8,23	14,63	22,86	32,92	58,52	234,10
7,80	3,71	8,34	14,82	23,16	33,35	59,28	237,14

7,90	3,75	8,44	15,01	23,46	33,78	60,04	240,18
8,00	3,80	8,55	15,20	23,75	34,20	60,80	243,22
8,10	3,85	8,66	15,39	24,05	34,63	61,56	246,26
8,20	3,90	8,76	15,58	24,35	35,06	62,33	249,30
8,30	3,94	8,87	15,77	24,64	35,49	63,09	252,34
8,40	3,99	8,98	15,96	24,94	35,91	63,85	255,38
8,50	4,04	9,09	16,15	25,24	36,34	64,61	258,42
8,60	4,09	9,19	16,34	25,53	36,77	65,37	261,46
8,70	4,13	9,30	16,53	25,83	37,20	66,13	264,50
8,80	4,18	9,41	16,72	26,13	37,62	66,89	267,54
8,90	4,23	9,51	16,91	26,42	38,05	67,65	270,58
9,00	4,28	9,62	17,10	26,72	38,48	68,41	273,62
9,10	4,32	9,73	17,29	27,02	38,91	69,17	276,66
9,20	4,37	9,83	17,48	27,31	39,33	69,93	279,70
9,30	4,42	9,94	17,67	27,61	39,76	70,69	282,74
9,40	4,47	10,05	17,86	27,91	40,19	71,45	285,78
9,50	4,51	10,15	18,05	28,21	40,62	72,21	288,82
9,60	4,56	10,26	18,24	28,50	41,04	72,97	291,86
9,70	4,61	10,37	18,43	28,80	41,47	73,73	294,90
9,80	4,66	10,47	18,62	29,10	41,90	74,49	297,94
9,90	4,70	10,58	18,81	29,39	42,33	75,25	300,98
10,00	4,75	10,69	19,00	29,69	42,75	76,01	304,02
10,10	4,80	10,80	19,19	29,99	43,18	76,77	307,06
10,20	4,85	10,90	19,38	30,28	43,61	77,53	310,10
10,30	4,89	11,01	19,57	30,58	44,04	78,29	313,15
10,40	4,94	11,12	19,76	30,88	44,46	79,05	316,19
10,50	4,99	11,22	19,95	31,17	44,89	79,81	319,23
10,60	5,04	11,33	20,14	31,47	45,32	80,57	322,27
10,70	5,08	11,44	20,33	31,77	45,75	81,33	325,31
10,80	5,13	11,54	20,52	32,07	46,17	82,09	328,35
10,90	5,18	11,65	20,71	32,36	46,60	82,85	331,39
11,00	5,23	11,76	20,90	32,66	47,03	83,61	334,43
11,10	5,27	11,86	21,09	32,96	47,46	84,37	337,47
11,20	5,32	11,97	21,28	33,25	47,88	85,13	340,51
11,30	5,37	12,08	21,47	33,55	48,31	85,89	343,55
11,40	5,42	12,18	21,66	33,85	48,74	86,65	346,59
11,50	5,46	12,29	21,85	34,14	49,17	87,41	349,63
11,60	5,51	12,40	22,04	34,44	49,59	88,17	352,67
11,70	5,56	12,51	22,23	34,74	50,02	88,93	355,71
11,80	5,61	12,61	22,42	35,03	50,45	89,69	358,75
11,90	5,65	12,72	22,61	35,33	50,88	90,45	361,79
12,00	5,70	12,83	22,80	35,63	51,30	91,21	364,83
12,10	5,75	12,93	22,99	35,92	51,73	91,97	367,87
12,20	5,80	13,04	23,18	36,22	52,16	92,73	370,91
12,30	5,84	13,15	23,37	36,52	52,59	93,49	373,95
12,40	5,89	13,25	23,56	36,82	53,01	94,25	376,99
12,50	5,94	13,36	23,75	37,11	53,44	95,01	380,03
12,60	5,99	13,47	23,94	37,41	53,87	95,77	383,07
12,70	6,03	13,57	24,13	37,71	54,30	96,53	386,11
12,80	6,08	13,68	24,32	38,00	54,72	97,29	389,15

12,90	6,13	13,79	24,51	38,30	55,15	98,05	392,19
13,00	6,18	13,89	24,70	38,60	55,58	98,81	395,23
13,10	6,22	14,00	24,89	38,89	56,01	99,57	398,27
13,20	6,27	14,11	25,08	39,19	56,43	100,33	401,31
13,30	6,32	14,22	25,27	39,49	56,86	101,09	404,35
13,40	6,37	14,32	25,46	39,78	57,29	101,85	407,39
13,50	6,41	14,43	25,65	40,08	57,72	102,61	410,43
13,60	6,46	14,54	25,84	40,38	58,14	103,37	413,47
13,70	6,51	14,64	26,03	40,68	58,57	104,13	416,51
13,80	6,56	14,75	26,22	40,97	59,00	104,89	419,55
13,90	6,60	14,86	26,41	41,27	59,43	105,65	422,59
14,00	6,65	14,96	26,60	41,57	59,85	106,41	425,63
14,10	6,70	15,07	26,79	41,86	60,28	107,17	428,67
14,20	6,75	15,18	26,98	42,16	60,71	107,93	431,71
14,30	6,79	15,28	27,17	42,46	61,14	108,69	434,76
14,40	6,84	15,39	27,36	42,75	61,56	109,45	437,80
14,50	6,89	15,50	27,55	43,05	61,99	110,21	440,84
14,60	6,94	15,61	27,74	43,35	62,42	110,97	443,88
14,70	6,98	15,71	27,93	43,64	62,85	111,73	446,92
14,80	7,03	15,82	28,12	43,94	63,28	112,49	449,96
14,90	7,08	15,93	28,31	44,24	63,70	113,25	453,00
15,00	7,13	16,03	28,50	44,53	64,13	114,01	456,04
15,10	7,17	16,14	28,69	44,83	64,56	114,77	459,08
15,20	7,22	16,25	28,88	45,13	64,99	115,53	462,12
15,30	7,27	16,35	29,07	45,43	65,41	116,29	465,16
15,40	7,32	16,46	29,26	45,72	65,84	117,05	468,20
15,50	7,36	16,57	29,45	46,02	66,27	117,81	471,24
15,60	7,41	16,67	29,64	46,32	66,70	118,57	474,28
15,70	7,46	16,78	29,83	46,61	67,12	119,33	477,32
15,80	7,51	16,89	30,02	46,91	67,55	120,09	480,36
15,90	7,55	16,99	30,21	47,21	67,98	120,85	483,40
16,00	7,60	17,10	30,40	47,50	68,41	121,61	486,44
16,10	7,65	17,21	30,59	47,80	68,83	122,37	489,48
16,20	7,70	17,32	30,78	48,10	69,26	123,13	492,52
16,30	7,74	17,42	30,97	48,39	69,69	123,89	495,56
16,40	7,79	17,53	31,16	48,69	70,12	124,65	498,60
16,50	7,84	17,64	31,35	48,99	70,54	125,41	501,64
16,60	7,89	17,74	31,54	49,29	70,97	126,17	504,68
16,70	7,93	17,85	31,73	49,58	71,40	126,93	507,72
16,80	7,98	17,96	31,92	49,88	71,83	127,69	510,76
16,90	8,03	18,06	32,11	50,18	72,25	128,45	513,80
17,00	8,08	18,17	32,30	50,47	72,68	129,21	516,84
17,10	8,12	18,28	32,49	50,77	73,11	129,97	519,88
17,20	8,17	18,38	32,68	51,07	73,54	130,73	522,92
17,30	8,22	18,49	32,87	51,36	73,96	131,49	525,96
17,40	8,27	18,60	33,06	51,66	74,39	132,25	529,00
17,50	8,31	18,70	33,25	51,96	74,82	133,01	532,04
17,60	8,36	18,81	33,44	52,25	75,25	133,77	535,08
17,70	8,41	18,92	33,63	52,55	75,67	134,53	538,12
17,80	8,46	19,03	33,82	52,85	76,10	135,29	541,16

17,90	8,50	19,13	34,01	53,14	76,53	136,05	544,20
18,00	8,55	19,24	34,20	53,44	76,96	136,81	547,24
18,10	8,60	19,35	34,39	53,74	77,38	137,57	550,28
18,20	8,65	19,45	34,58	54,04	77,81	138,33	553,32
18,30	8,69	19,56	34,77	54,33	78,24	139,09	556,36
18,40	8,74	19,67	34,96	54,63	78,67	139,85	559,41
18,50	8,79	19,77	35,15	54,93	79,09	140,61	562,45
18,60	8,84	19,88	35,34	55,22	79,52	141,37	565,49
18,70	8,88	19,99	35,53	55,52	79,95	142,13	568,53
18,80	8,93	20,09	35,72	55,82	80,38	142,89	571,57
18,90	8,98	20,20	35,91	56,11	80,80	143,65	574,61
19,00	9,03	20,31	36,10	56,41	81,23	144,41	577,65
19,10	9,07	20,41	36,29	56,71	81,66	145,17	580,69
19,20	9,12	20,52	36,48	57,00	82,09	145,93	583,73
19,30	9,17	20,63	36,67	57,30	82,51	146,69	586,77
19,40	9,22	20,74	36,86	57,60	82,94	147,45	589,81
19,50	9,26	20,84	37,05	57,90	83,37	148,21	592,85
19,60	9,31	20,95	37,24	58,19	83,80	148,97	595,89
19,70	9,36	21,06	37,43	58,49	84,22	149,73	598,93
19,80	9,41	21,16	37,62	58,79	84,65	150,49	601,97
19,90	9,45	21,27	37,81	59,08	85,08	151,25	605,01
20,00	9,50	21,38	38,00	59,38	85,51	152,01	608,05
20,10	9,55	21,48	38,19	59,68	85,93	152,77	611,09
20,20	9,60	21,59	38,38	59,97	86,36	153,53	614,13
20,30	9,64	21,70	38,57	60,27	86,79	154,29	617,17
20,40	9,69	21,80	38,76	60,57	87,22	155,05	620,21
20,50	9,74	21,91	38,95	60,86	87,64	155,81	623,25
20,60	9,79	22,02	39,14	61,16	88,07	156,57	626,29
20,70	9,83	22,12	39,33	61,46	88,50	157,33	629,33
20,80	9,88	22,23	39,52	61,75	88,93	158,09	632,37
20,90	9,93	22,34	39,71	62,05	89,35	158,85	635,41
21,00	9,98	22,45	39,90	62,35	89,78	159,61	638,45
21,10	10,02	22,55	40,09	62,65	90,21	160,37	641,49
21,20	10,07	22,66	40,28	62,94	90,64	161,13	644,53
21,30	10,12	22,77	40,47	63,24	91,06	161,89	647,57
21,40	10,17	22,87	40,66	63,54	91,49	162,65	650,61
21,50	10,21	22,98	40,85	63,83	91,92	163,41	653,65
21,60	10,26	23,09	41,04	64,13	92,35	164,17	656,69
21,70	10,31	23,19	41,23	64,43	92,77	164,93	659,73
21,80	10,36	23,30	41,42	64,72	93,20	165,69	662,77
21,90	10,40	23,41	41,61	65,02	93,63	166,45	665,81
22,00	10,45	23,51	41,80	65,32	94,06	167,21	668,85
22,10	10,50	23,62	41,99	65,61	94,49	167,97	671,89
22,20	10,55	23,73	42,18	65,91	94,91	168,73	674,93
22,30	10,59	23,84	42,37	66,21	95,34	169,49	677,97
22,40	10,64	23,94	42,56	66,51	95,77	170,25	681,01
22,50	10,69	24,05	42,75	66,80	96,20	171,01	684,06
22,60	10,74	24,16	42,94	67,10	96,62	171,77	687,10
22,70	10,78	24,26	43,13	67,40	97,05	172,53	690,14
22,80	10,83	24,37	43,32	67,69	97,48	173,29	693,18

22,90	10,88	24,48	43,51	67,99	97,91	174,05	696,22
23,00	10,93	24,58	43,70	68,29	98,33	174,81	699,26
23,10	10,97	24,69	43,89	68,58	98,76	175,57	702,30
23,20	11,02	24,80	44,08	68,88	99,19	176,33	705,34
23,30	11,07	24,90	44,27	69,18	99,62	177,09	708,38
23,40	11,12	25,01	44,46	69,47	100,04	177,85	711,42
23,50	11,16	25,12	44,65	69,77	100,47	178,61	714,46
23,60	11,21	25,22	44,84	70,07	100,90	179,37	717,50
23,70	11,26	25,33	45,03	70,37	101,33	180,13	720,54
23,80	11,31	25,44	45,22	70,66	101,75	180,89	723,58
23,90	11,35	25,55	45,41	70,96	102,18	181,65	726,62
24,00	11,40	25,65	45,60	71,26	102,61	182,41	729,66
24,10	11,45	25,76	45,79	71,55	103,04	183,17	732,70
24,20	11,50	25,87	45,98	71,85	103,46	183,93	735,74
24,30	11,54	25,97	46,17	72,15	103,89	184,69	738,78
24,40	11,59	26,08	46,36	72,44	104,32	185,45	741,82
24,50	11,64	26,19	46,55	72,74	104,75	186,21	744,86
24,60	11,69	26,29	46,74	73,04	105,17	186,98	747,90
24,70	11,73	26,40	46,93	73,33	105,60	187,74	750,94
24,80	11,78	26,51	47,12	73,63	106,03	188,50	753,98
24,90	11,83	26,61	47,31	73,93	106,46	189,26	757,02
25,00	11,88	26,72	47,50	74,22	106,88	190,02	760,06
25,10	11,92	26,83	47,69	74,52	107,31	190,78	763,10
25,20	11,97	26,93	47,88	74,82	107,74	191,54	766,14
25,30	12,02	27,04	48,07	75,12	108,17	192,30	769,18
25,40	12,07	27,15	48,26	75,41	108,59	193,06	772,22
25,50	12,11	27,26	48,45	75,71	109,02	193,82	775,26
25,60	12,16	27,36	48,64	76,01	109,45	194,58	778,30
25,70	12,21	27,47	48,83	76,30	109,88	195,34	781,34
25,80	12,26	27,58	49,02	76,60	110,30	196,10	784,38
25,90	12,30	27,68	49,21	76,90	110,73	196,86	787,42
26,00	12,35	27,79	49,40	77,19	111,16	197,62	790,46
26,10	12,40	27,90	49,59	77,49	111,59	198,38	793,50
26,20	12,45	28,00	49,78	77,79	112,01	199,14	796,54
26,30	12,49	28,11	49,97	78,08	112,44	199,90	799,58
26,40	12,54	28,22	50,16	78,38	112,87	200,66	802,62
26,50	12,59	28,32	50,35	78,68	113,30	201,42	805,66
26,60	12,64	28,43	50,54	78,98	113,72	202,18	808,71
26,70	12,68	28,54	50,73	79,27	114,15	202,94	811,75
26,80	12,73	28,64	50,92	79,57	114,58	203,70	814,79
26,90	12,78	28,75	51,11	79,87	115,01	204,46	817,83
27,00	12,83	28,86	51,30	80,16	115,43	205,22	820,87
27,10	12,87	28,97	51,49	80,46	115,86	205,98	823,91
27,20	12,92	29,07	51,68	80,76	116,29	206,74	826,95
27,30	12,97	29,18	51,87	81,05	116,72	207,50	829,99
27,40	13,02	29,29	52,06	81,35	117,14	208,26	833,03
27,50	13,06	29,39	52,25	81,65	117,57	209,02	836,07
27,60	13,11	29,50	52,44	81,94	118,00	209,78	839,11
27,70	13,16	29,61	52,63	82,24	118,43	210,54	842,15
27,80	13,21	29,71	52,82	82,54	118,85	211,30	845,19

27,90	13,25	29,82	53,01	82,83	119,28	212,06	848,23
28,00	13,30	29,93	53,20	83,13	119,71	212,82	851,27
28,10	13,35	30,03	53,39	83,43	120,14	213,58	854,31
28,20	13,40	30,14	53,58	83,73	120,56	214,34	857,35
28,30	13,44	30,25	53,77	84,02	120,99	215,10	860,39
28,40	13,49	30,35	53,96	84,32	121,42	215,86	863,43
28,50	13,54	30,46	54,15	84,62	121,85	216,62	866,47
28,60	13,59	30,57	54,34	84,91	122,27	217,38	869,51
28,70	13,63	30,68	54,53	85,21	122,70	218,14	872,55
28,80	13,68	30,78	54,72	85,51	123,13	218,90	875,59
28,90	13,73	30,89	54,91	85,80	123,56	219,66	878,63
29,00	13,78	31,00	55,10	86,10	123,98	220,42	881,67
29,10	13,82	31,10	55,29	86,40	124,41	221,18	884,71
29,20	13,87	31,21	55,48	86,69	124,84	221,94	887,75
29,30	13,92	31,32	55,67	86,99	125,27	222,70	890,79
29,40	13,97	31,42	55,86	87,29	125,70	223,46	893,83
29,50	14,01	31,53	56,05	87,59	126,12	224,22	896,87
29,60	14,06	31,64	56,24	87,88	126,55	224,98	899,91
29,70	14,11	31,74	56,43	88,18	126,98	225,74	902,95
29,80	14,16	31,85	56,62	88,48	127,41	226,50	905,99
29,90	14,20	31,96	56,81	88,77	127,83	227,26	909,03
30,00	14,25	32,07	57,00	89,07	128,26	228,02	912,07
40,00	19,00	42,75	76,01	118,76	171,01	304,02	1216,10
50,00	23,75	53,44	95,01	148,45	213,77	380,03	1520,12

Figura 5.1

d_p (mm)	$h_{\text{divisor de flujo}}$					
	2,75 l/min.	4,0 l/min.	5,0 l/min.	10,0 l/min.	20,0 l/min.	30,0 l/min.
0,02458	0,99103	0,99302	0,99399	0,99507	0,99597	0,99617
0,02642	0,99183	0,99364	0,99452	0,99551	0,99633	0,99651
0,02839	0,99256	0,99421	0,99501	0,99591	0,99665	0,99682
0,03051	0,99322	0,99472	0,99545	0,99627	0,99695	0,99710
0,03278	0,99382	0,99519	0,99585	0,99660	0,99722	0,99736
0,03523	0,99437	0,99561	0,99622	0,99690	0,99746	0,99759
0,03786	0,99486	0,99600	0,99655	0,99717	0,99769	0,99780
0,04068	0,99531	0,99635	0,99685	0,99742	0,99789	0,99799
0,04371	0,99572	0,99666	0,99712	0,99764	0,99807	0,99817
0,04698	0,99609	0,99695	0,99737	0,99785	0,99824	0,99832
0,05048	0,99643	0,99721	0,99759	0,99804	0,99839	0,99847
0,05425	0,99674	0,99745	0,99779	0,99820	0,99853	0,99860
0,05829	0,99701	0,99766	0,99798	0,99836	0,99865	0,99872
0,06264	0,99726	0,99786	0,99814	0,99850	0,99877	0,99883
0,06732	0,99749	0,99803	0,99829	0,99862	0,99887	0,99893
0,07234	0,99770	0,99819	0,99843	0,99874	0,99897	0,99902

0,07774	0,99789	0,99834	0,99855	0,99884	0,99905	0,99910
0,08354	0,99806	0,99847	0,99866	0,99894	0,99913	0,99917
0,08977	0,99821	0,99858	0,99876	0,99903	0,99920	0,99924
0,09647	0,99835	0,99869	0,99885	0,99911	0,99926	0,99930
0,10366	0,99848	0,99879	0,99893	0,99918	0,99932	0,99935
0,11140	0,99859	0,99887	0,99900	0,99924	0,99938	0,99940
0,11971	0,99869	0,99895	0,99906	0,99930	0,99943	0,99945
0,12864	0,99879	0,99902	0,99912	0,99936	0,99947	0,99949
0,13824	0,99887	0,99908	0,99917	0,99941	0,99951	0,99952
0,14855	0,99894	0,99913	0,99921	0,99945	0,99955	0,99956
0,15963	0,99901	0,99918	0,99925	0,99949	0,99958	0,99958
0,17154	0,99907	0,99922	0,99928	0,99953	0,99961	0,99961
0,18434	0,99912	0,99925	0,99930	0,99956	0,99963	0,99963
0,19810	0,99917	0,99928	0,99932	0,99959	0,99966	0,99965
0,21288	0,99921	0,99930	0,99933	0,99962	0,99968	0,99966
0,22876	0,99924	0,99932	0,99934	0,99965	0,99970	0,99967
0,24582	0,99927	0,99933	0,99934	0,99967	0,99971	0,99968
0,26416	0,99929	0,99933	0,99933	0,99969	0,99973	0,99968
0,28387	0,99930	0,99933	0,99932	0,99971	0,99974	0,99967
0,30505	0,99931	0,99933	0,99930	0,99973	0,99975	0,99966
0,32781	0,99932	0,99931	0,99928	0,99975	0,99975	0,99964
0,35227	0,99932	0,99929	0,99924	0,99976	0,99975	0,99961
0,37855	0,99931	0,99926	0,99920	0,99977	0,99975	0,99956
0,40679	0,99930	0,99922	0,99914	0,99979	0,99974	0,99950
0,43714	0,99927	0,99918	0,99908	0,99980	0,99973	0,99941
0,46976	0,99924	0,99912	0,99900	0,99980	0,99971	0,99930
0,50481	0,99921	0,99905	0,99891	0,99981	0,99968	0,99914
0,54247	0,99916	0,99897	0,99880	0,99982	0,99963	0,99894
0,58294	0,99910	0,99887	0,99867	0,99982	0,99957	0,99868
0,65000	0,99898	0,99869	0,99844	0,99982	0,99943	0,99812
0,70200	0,99888	0,99854	0,99824	0,99981	0,99929	0,99755
0,76700	0,99875	0,99832	0,99797	0,99980	0,99907	0,99666
0,83200	0,99859	0,99809	0,99768	0,99978	0,99879	0,99554
0,91300	0,99838	0,99778	0,99728	0,99974	0,99834	0,99376
0,99400	0,99815	0,99743	0,99684	0,99969	0,99776	0,99148
1,09400	0,99783	0,99696	0,99625	0,99961	0,99684	0,98787
1,19300	0,99749	0,99645	0,99561	0,99950	0,99566	0,98326
1,31600	0,99702	0,99576	0,99475	0,99932	0,99375	0,97586
1,43800	0,99651	0,99501	0,99381	0,99909	0,99129	0,96638
1,58700	0,99582	0,99401	0,99255	0,99871	0,98736	0,95143
1,73500	0,99508	0,99292	0,99118	0,99822	0,98229	0,93235
1,91400	0,99409	0,99147	0,98937	0,99744	0,97430	0,90288
2,09200	0,99301	0,98990	0,98740	0,99642	0,96399	0,86592
2,30400	0,99160	0,98785	0,98484	0,99484	0,94813	0,81128
2,51600	0,99006	0,98560	0,98203	0,99277	0,92781	0,74505
2,76500	0,98808	0,98272	0,97842	0,98960	0,89748	0,65386
3,01400	0,98592	0,97957	0,97448	0,98550	0,85952	0,55174
3,30300	0,98318	0,97558	0,96950	0,97934	0,80534	0,50528
3,59100	0,98020	0,97125	0,96409	0,97148	0,74059	0,50501

3,92000	0,97651	0,96587	0,95736	0,96003	0,65474	0,50460
4,24800	0,97251	0,96005	0,95008	0,94562	0,55951	0,50409
4,61700	0,96763	0,95295	0,94120	0,92536	0,48774	0,50335
4,98600	0,96235	0,94527	0,93160	0,90032	0,48751	0,50242
5,39400	0,95604	0,93610	0,92014	0,82006	0,48719	0,50113
5,80200	0,94925	0,92621	0,90778	0,71420	0,48679	0,49952
6,24600	0,94130	0,91465	0,89333	0,60957	0,48625	0,49735
6,69000	0,93277	0,90225	0,87782	0,51496	0,48559	0,49468
7,16800	0,92295	0,88795	0,85995	0,42351	0,48471	0,49118
7,64600	0,91245	0,87268	0,79740	0,34233	0,48364	0,48695
8,15600	0,90051	0,85531	0,71690	0,26668	0,48227	0,48153
8,66500	0,88783	0,78149	0,64512	0,23546	0,48062	0,47510
9,20800	0,87347	0,70626	0,57681	0,21829	0,47853	0,46701
9,75000	0,85827	0,63879	0,51604	0,20377	0,47605	0,45757
10,33000	0,79815	0,57403	0,45813	0,19065	0,47291	0,44585
10,91000	0,72959	0,51601	0,40657	0,17962	0,46924	0,43238
11,54000	0,66217	0,45967	0,35671	0,16960	0,46457	0,41572
12,17000	0,60129	0,40933	0,31228	0,16125	0,45913	0,41256
12,87000	0,54041	0,35945	0,26825	0,15359	0,45212	0,41256
13,57000	0,48580	0,31499	0,22887	0,14730	0,44402	0,41256
14,37500	0,42973	0,26947	0,18826	0,14142	0,43325	0,41256
20,00000	0,16790	0,04760	0,00000	0,12222	0,39400	0,41256
40,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,11505	0,39401	0,41257
60,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,11443	0,39401	0,41257
80,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,11443	0,39401	0,41257
100,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,11443	0,39401	0,41257

Figura 5.2

d _p (mm)	h _{divisor de flujo}					
	SMPS			Contador Óptico		
	2,0 l/min.	5,0 l/min.	15,0 l/min.	5,0 l/min.	10,0 l/min.	15,0 l/min.
0,0163	0,855	0,867	0,904	--	--	--
0,0169	0,858	0,871	0,905	--	--	--
0,0175	0,864	0,873	0,907	--	--	--
0,0181	0,866	0,874	0,908	--	--	--
0,0188	0,868	0,877	0,908	--	--	--
0,0195	0,870	0,879	0,910	--	--	--
0,0202	0,874	0,881	0,910	--	--	--
0,0209	0,876	0,883	0,912	--	--	--
0,0217	0,878	0,885	0,912	--	--	--
0,0225	0,883	0,889	0,913	--	--	--
0,0233	0,887	0,891	0,915	--	--	--
0,0241	0,890	0,895	0,915	--	--	--
0,0250	0,891	0,896	0,917	--	--	--

0,0259	0,894	0,900	0,918	--	--	--
0,0269	0,899	0,903	0,918	--	--	--
0,0279	0,900	0,905	0,924	--	--	--
0,0289	0,904	0,908	0,930	--	--	--
0,0300	0,909	0,910	0,933	--	--	--
0,0311	0,910	0,912	0,936	--	--	--
0,0322	0,908	0,912	0,941	--	--	--
0,0334	0,908	0,916	0,945	--	--	--
0,0346	0,907	0,917	0,948	--	--	--
0,0359	0,909	0,919	0,953	--	--	--
0,0372	0,910	0,921	0,955	--	--	--
0,0385	0,912	0,923	0,957	--	--	--
0,0400	0,914	0,924	0,960	--	--	--
0,0414	0,915	0,925	0,961	--	--	--
0,0429	0,917	0,927	0,961	--	--	--
0,0445	0,916	0,928	0,961	--	--	--
0,0461	0,918	0,930	0,962	--	--	--
0,0478	0,922	0,931	0,961	--	--	--
0,0496	0,922	0,933	0,964	--	--	--
0,0514	0,926	0,936	0,966	--	--	--
0,0533	0,928	0,938	0,965	--	--	--
0,0552	0,932	0,939	0,966	--	--	--
0,0573	0,933	0,939	0,965	--	--	--
0,0594	0,936	0,941	0,964	--	--	--
0,0615	0,939	0,942	0,966	--	--	--
0,0638	0,940	0,942	0,966	--	--	--
0,0661	0,943	0,944	0,967	--	--	--
0,0686	0,945	0,947	0,968	--	--	--
0,0711	0,948	0,949	0,971	--	--	--
0,0737	0,952	0,950	0,970	--	--	--
0,0764	0,953	0,951	0,971	--	--	--
0,0792	0,953	0,953	0,973	--	--	--
0,0821	0,955	0,956	0,972	--	--	--
0,0851	0,955	0,958	0,975	--	--	--
0,0882	0,955	0,958	0,975	--	--	--
0,0914	0,956	0,959	0,974	--	--	--
0,0948	0,958	0,960	0,977	--	--	--
0,0982	0,958	0,961	0,978	--	--	--
0,1018	0,959	0,961	0,979	--	--	--
0,1056	0,959	0,962	0,980	--	--	--
0,1094	0,959	0,963	0,980	--	--	--
0,1134	0,962	0,964	0,980	--	--	--
0,1176	0,964	0,964	0,978	--	--	--
0,1219	0,963	0,962	0,978	--	--	--
0,1264	0,966	0,963	0,978	--	--	--
0,1310	0,965	0,966	0,977	--	--	--
0,1358	0,966	0,965	0,978	--	--	--
0,1408	0,966	0,967	0,978	--	--	--
0,1459	0,964	0,968	0,978	--	--	--
0,1513	0,965	0,967	0,978	--	--	--

0,1568	0,965	0,967	0,981	--	--	--
0,1626	0,966	0,967	0,982	--	--	--
0,1685	0,964	0,966	0,983	--	--	--
0,1747	0,963	0,967	0,987	--	--	--
0,1811	0,963	0,969	0,992	--	--	--
0,1877	0,963	0,971	0,993	--	--	--
0,1946	0,965	0,973	0,995	--	--	--
0,2017	0,964	0,974	0,996	--	--	--
0,2091	0,966	0,974	0,996	--	--	--
0,2168	0,969	0,975	0,996	--	--	--
0,2247	0,972	0,976	0,996	--	--	--
0,2329	0,973	0,976	0,997	--	--	--
0,2415	0,974	0,978	0,996	--	--	--
0,2503	0,974	0,977	0,999	--	--	--
0,2595	0,976	0,980	0,998	--	--	--
0,2690	0,981	0,979	0,998	--	--	--
0,2789	0,981	0,982	0,997	--	--	--
0,2891	0,984	0,981	0,998	--	--	--
0,2997	0,986	0,982	1,001	--	--	--
0,3106	0,988	0,983	0,999	--	--	--
0,3220	0,988	0,985	1,000	--	--	--
0,3338	0,987	0,985	1,000	--	--	--
0,3460	0,987	0,987	1,001	--	--	--
0,3587	0,989	0,990	1,001	--	--	--
0,3719	0,994	0,991	1,001	--	--	--
0,3855	0,997	0,991	1,001	--	--	--
0,3996	0,999	0,992	1,001	--	--	--
0,4142	0,997	0,993	1,002	--	--	--
0,4294	0,998	0,994	1,001	--	--	--
0,4452	0,996	0,995	1,000	--	--	--
0,4615	0,997	0,995	1,001	--	--	--
0,4784	0,997	0,997	1,000	--	--	--
0,4959	0,996	0,995	1,001	--	--	--
0,5141	0,998	0,996	1,001	--	--	--
0,5329	0,996	0,996	1,001	--	--	--
0,5524	0,997	0,997	1,000	--	--	--
0,5726	0,996	0,996	0,999	--	--	--
0,5936	0,995	0,996	0,999	--	--	--
0,6154	0,994	0,994	0,999	--	--	--
--	--	--	--	--	--	--
0,514	--	--	--	1,010	0,965	0,799
0,535	--	--	--	1,005	0,958	0,781
0,556	--	--	--	1,007	0,947	0,765
0,577	--	--	--	1,003	0,940	0,753
0,598	--	--	--	1,002	0,932	0,742
0,624	--	--	--	1,000	0,916	0,724
0,650	--	--	--	1,003	0,904	0,707
0,676	--	--	--	0,998	0,891	0,692
0,702	--	--	--	0,996	0,877	0,681
0,735	--	--	--	0,993	0,866	0,668

0,767	--	--	--	0,987	0,851	0,655
0,800	--	--	--	0,988	0,842	0,645
0,832	--	--	--	0,985	0,823	0,634
0,873	--	--	--	0,981	0,812	0,625
0,913	--	--	--	0,979	0,802	0,610
0,954	--	--	--	0,975	0,793	0,609
0,994	--	--	--	0,968	0,783	0,598
1,044	--	--	--	0,966	0,771	0,586
1,094	--	--	--	0,961	0,762	0,580
1,143	--	--	--	0,956	0,752	0,578
1,193	--	--	--	0,951	0,740	0,568
1,254	--	--	--	0,945	0,730	0,558
1,316	--	--	--	0,938	0,718	0,541
1,377	--	--	--	0,934	0,706	0,531
1,438	--	--	--	0,928	0,692	0,530
1,512	--	--	--	0,923	0,683	0,520
1,587	--	--	--	0,917	0,668	0,488
1,661	--	--	--	0,912	0,655	0,486
1,735	--	--	--	0,904	0,641	0,476
1,824	--	--	--	0,899	0,624	0,449
1,914	--	--	--	0,894	0,608	0,440
2,003	--	--	--	0,890	0,595	0,427
2,092	--	--	--	0,885	0,578	0,410
2,198	--	--	--	0,881	0,563	0,398
2,304	--	--	--	0,871	0,548	0,390
2,410	--	--	--	0,863	0,534	0,383
2,516	--	--	--	0,857	0,521	0,366
2,641	--	--	--	0,848	0,506	0,355
2,765	--	--	--	0,845	0,494	0,328
2,890	--	--	--	0,842	0,479	0,320
3,014	--	--	--	0,834	0,463	0,303
3,158	--	--	--	0,827	0,449	0,300
3,303	--	--	--	0,819	0,434	0,282
3,447	--	--	--	0,813	0,421	0,268
3,591	--	--	--	0,803	0,405	0,256
3,755	--	--	--	0,794	0,391	0,235
3,920	--	--	--	0,786	0,376	0,222
4,084	--	--	--	0,779	0,364	0,219
4,248	--	--	--	0,773	0,351	0,209
4,433	--	--	--	0,760	0,338	0,211
4,617	--	--	--	0,745	0,326	0,197
4,802	--	--	--	0,738	0,314	0,187
4,986	--	--	--	0,723	0,302	0,174
5,190	--	--	--	0,709	0,291	0,169
5,394	--	--	--	0,695	0,279	0,173
5,598	--	--	--	0,685	0,271	0,154
5,802	--	--	--	0,664	0,261	0,166
6,024	--	--	--	0,655	0,255	0,156
6,246	--	--	--	0,643	0,247	0,160
6,468	--	--	--	0,627	0,241	0,152

6,690	--	--	--	0,611	0,232	0,139
6,929	--	--	--	0,599	0,225	0,147
7,168	--	--	--	0,581	0,218	0,150
7,407	--	--	--	0,564	0,213	0,148
7,646	--	--	--	0,549	0,206	0,149
7,901	--	--	--	0,535	0,205	0,148
8,156	--	--	--	0,520	0,204	0,145
8,410	--	--	--	0,515	0,204	0,149
8,665	--	--	--	0,500	0,200	0,145
8,936	--	--	--	0,484	0,195	0,138
9,208	--	--	--	0,475	0,194	0,132
9,479	--	--	--	0,481	0,198	0,130
9,750	--	--	--	0,468	0,192	0,140
10,040	--	--	--	0,448	0,194	0,131
10,330	--	--	--	0,436	0,198	0,133
10,620	--	--	--	0,428	0,206	0,133
10,910	--	--	--	0,407	0,199	0,142
11,225	--	--	--	0,398	0,185	0,133
11,540	--	--	--	0,388	0,168	0,129
11,855	--	--	--	0,376	0,185	0,131
12,170	--	--	--	0,347	0,207	0,137
12,520	--	--	--	0,316	0,226	0,131
12,870	--	--	--	0,277	0,193	0,132
13,220	--	--	--	0,258	0,212	0,122
13,570	--	--	--	0,244	0,236	0,128
13,973	--	--	--	0,220	0,243	0,129
14,375	--	--	--	0,220	0,251	0,118
14,778	--	--	--	0,202	0,206	0,124
15,180	--	--	--	0,171	0,210	0,117
15,663	--	--	--	0,164	0,224	0,124
16,145	--	--	--	0,149	0,213	0,125
16,628	--	--	--	0,146	0,199	0,113
17,110	--	--	--	0,114	0,196	0,112
17,720	--	--	--	0,089	0,187	0,119
18,330	--	--	--	0,055	0,198	0,120
18,940	--	--	--	0,027	0,202	0,118
19,550	--	--	--	0,002	0,211	0,118

Figura 5.3

5,0 l/min.		10,0 l/min.		15,0 l/min.	
d_p (mm)	$h_{\text{ciclón}}$	d_p (mm)	$h_{\text{ciclón}}$	d_p (mm)	$h_{\text{ciclón}}$
0,00041	0,99975	0,00033	0,99975	0,00029	0,99975
0,00061	0,99963	0,00049	0,99963	0,00043	0,99963
0,00123	0,99928	0,00097	0,99928	0,00085	0,99928
0,00151	0,99912	0,00120	0,99912	0,00105	0,99912
0,00172	0,99900	0,00136	0,99900	0,00119	0,99900

0,00277	0,99841	0,00220	0,99841	0,00192	0,99841
0,00335	0,99809	0,00266	0,99809	0,00232	0,99809
0,00584	0,99672	0,00464	0,99672	0,00405	0,99672
0,00713	0,99602	0,00566	0,99602	0,00494	0,99602
0,00806	0,99552	0,00640	0,99552	0,00559	0,99552
0,00882	0,99511	0,00700	0,99511	0,00612	0,99511
0,00947	0,99476	0,00751	0,99476	0,00656	0,99476
0,01004	0,99446	0,00797	0,99446	0,00696	0,99446
0,01055	0,99418	0,00837	0,99418	0,00731	0,99418
0,01410	0,99229	0,01119	0,99229	0,00977	0,99229
0,01437	0,99215	0,01140	0,99215	0,00996	0,99215
0,01663	0,99096	0,01319	0,99096	0,01152	0,99096
0,01841	0,99003	0,01460	0,99003	0,01275	0,99003
0,01989	0,98925	0,01578	0,98925	0,01378	0,98925
0,02119	0,98858	0,01680	0,98858	0,01467	0,98858
0,02234	0,98798	0,01772	0,98798	0,01547	0,98798
0,02339	0,98744	0,01855	0,98744	0,01620	0,98744
0,02435	0,98694	0,01931	0,98694	0,01686	0,98694
0,02524	0,98648	0,02001	0,98648	0,01748	0,98648
0,02607	0,98605	0,02067	0,98605	0,01805	0,98605
0,02685	0,98565	0,02129	0,98565	0,01859	0,98565
0,02759	0,98527	0,02188	0,98527	0,01911	0,98527
0,02830	0,98491	0,02244	0,98491	0,01959	0,98491
0,02897	0,98456	0,02297	0,98456	0,02005	0,98456
0,02961	0,98423	0,02347	0,98423	0,02050	0,98423
0,03022	0,98392	0,02396	0,98392	0,02092	0,98392
0,03081	0,98362	0,02443	0,98362	0,02133	0,98362
0,03965	0,97913	0,03143	0,97913	0,02744	0,97913
0,04573	0,97609	0,03623	0,97609	0,03163	0,97609
0,05053	0,97370	0,04003	0,97370	0,03494	0,97370
0,05457	0,97170	0,04323	0,97170	0,03773	0,97170
0,05809	0,96996	0,04601	0,96996	0,04016	0,96996
0,06124	0,96842	0,04850	0,96842	0,04233	0,96842
0,06410	0,96702	0,05076	0,96702	0,04430	0,96702
0,06673	0,96574	0,05284	0,96574	0,04611	0,96574
0,06918	0,96456	0,05477	0,96456	0,04779	0,96456
0,07943	0,95963	0,06286	0,95963	0,05484	0,95963
0,08760	0,95574	0,06931	0,95574	0,06045	0,95574
0,09452	0,95248	0,07476	0,95248	0,06520	0,95248
0,10057	0,94964	0,07953	0,94964	0,06935	0,94964
0,10600	0,94712	0,08380	0,94712	0,07306	0,94712
0,11094	0,94483	0,08768	0,94483	0,07645	0,94483
0,11549	0,94274	0,09126	0,94274	0,07956	0,94274
0,11972	0,94080	0,09459	0,94080	0,08245	0,94080
0,15180	0,92640	0,11976	0,92640	0,10433	0,92640
0,17454	0,91648	0,13757	0,91648	0,11978	0,91648
0,19280	0,90868	0,15183	0,90868	0,13214	0,90868
0,20833	0,90216	0,16393	0,90216	0,14263	0,90216
0,22198	0,89651	0,17457	0,89651	0,15184	0,89651

0,23426	0,89150	0,18411	0,89150	0,16010	0,89150
0,46316	0,80804	0,35986	0,80804	0,31125	0,80804
0,58283	0,77081	0,45016	0,77081	0,38825	0,77081
0,67334	0,74503	0,51783	0,74503	0,44569	0,74503
0,74878	0,72492	0,57386	0,72492	0,49307	0,72492
0,81469	0,70827	0,62256	0,70827	0,53415	0,70827
0,87389	0,69400	0,66614	0,69400	0,57082	0,69400
0,92807	0,68145	0,70588	0,68145	0,60419	0,68145
0,97829	0,67023	0,74262	0,67023	0,63499	0,67023
1,02530	0,66007	0,77693	0,66007	0,66371	0,66007
1,06965	0,65077	0,80922	0,65077	0,69071	0,65077
1,11174	0,64219	0,83981	0,64219	0,71626	0,64219
1,15187	0,63421	0,86893	0,63421	0,74055	0,63421
1,19030	0,62676	0,89678	0,62676	0,76375	0,62676
1,22722	0,61976	0,92350	0,61976	0,78599	0,61976
1,26280	0,61316	0,94921	0,61316	0,80739	0,61316
1,29717	0,60691	0,97403	0,60691	0,82802	0,60691
1,33045	0,60098	0,99804	0,60098	0,84796	0,60098
1,36273	0,59533	1,02130	0,59533	0,86727	0,59533
1,39410	0,58994	1,04390	0,58994	0,88601	0,58994
1,42463	0,58478	1,06587	0,58478	0,90423	0,58478
1,45439	0,57984	1,08727	0,57984	0,92197	0,57984
1,48343	0,57509	1,10814	0,57509	0,93925	0,57509
1,51179	0,57052	1,12851	0,57052	0,95612	0,57052
1,53954	0,56611	1,14843	0,56611	0,97261	0,56611
1,56669	0,56186	1,16792	0,56186	0,98873	0,56186
1,59330	0,55775	1,18700	0,55775	1,00451	0,55775
1,61939	0,55378	1,20570	0,55378	1,01997	0,55378
1,64498	0,54993	1,22405	0,54993	1,03512	0,54993
1,67012	0,54620	1,24205	0,54620	1,05000	0,54620
1,69481	0,54258	1,25973	0,54258	1,06460	0,54258
1,71909	0,53906	1,27712	0,53906	1,07895	0,53906
1,74297	0,53564	1,29421	0,53564	1,09306	0,53564
1,76647	0,53231	1,31102	0,53231	1,10693	0,53231
1,78962	0,52907	1,32758	0,52907	1,12059	0,52907
1,81241	0,52591	1,34388	0,52591	1,13404	0,52591
1,83488	0,52283	1,35994	0,52283	1,14728	0,52283
1,85703	0,51982	1,37578	0,51982	1,16033	0,51982
1,87888	0,51688	1,39139	0,51688	1,17320	0,51688
1,93226	0,50983	1,42952	0,50983	1,20462	0,50983
1,93546	0,50942	1,43181	0,50942	1,20650	0,50942
1,93873	0,50899	1,43414	0,50899	1,20843	0,50899
1,94206	0,50856	1,43652	0,50856	1,21039	0,50856
1,94547	0,50811	1,43896	0,50811	1,21239	0,50811
1,94895	0,50766	1,44144	0,50766	1,21444	0,50766
1,95250	0,50720	1,44398	0,50720	1,21653	0,50720
1,95613	0,50673	1,44657	0,50673	1,21867	0,50673
1,95984	0,50626	1,44922	0,50626	1,22085	0,50626
1,96364	0,50577	1,45193	0,50577	1,22308	0,50577

1,96752	0,50527	1,45470	0,50527	1,22536	0,50527
1,97148	0,50476	1,45753	0,50476	1,22769	0,50476
1,97554	0,50424	1,46043	0,50424	1,23008	0,50424
1,97970	0,50371	1,46339	0,50371	1,23252	0,50371
1,98395	0,50317	1,46643	0,50317	1,23502	0,50317
1,98830	0,50261	1,46954	0,50261	1,23758	0,50261
1,99276	0,50204	1,47272	0,50204	1,24020	0,50204
1,99732	0,50146	1,47598	0,50146	1,24288	0,50146
2,00200	0,50087	1,47932	0,50087	1,24563	0,50087
2,00680	0,50027	1,48274	0,50027	1,24845	0,50027
2,01172	0,49964	1,48626	0,49964	1,25134	0,49964
2,01677	0,49901	1,48986	0,49901	1,25431	0,49901
2,02194	0,49836	1,49355	0,49836	1,25735	0,49836
2,02726	0,49769	1,49734	0,49769	1,26047	0,49769
2,03271	0,49701	1,50124	0,49701	1,26368	0,49701
2,03832	0,49631	1,50524	0,49631	1,26697	0,49631
2,04407	0,49560	1,50935	0,49560	1,27035	0,49560
2,04999	0,49486	1,51357	0,49486	1,27382	0,49486
2,05607	0,49411	1,51791	0,49411	1,27740	0,49411
2,06233	0,49334	1,52237	0,49334	1,28107	0,49334
2,06877	0,49255	1,52697	0,49255	1,28485	0,49255
2,07540	0,49173	1,53170	0,49173	1,28874	0,49173
2,08222	0,49090	1,53657	0,49090	1,29275	0,49090
2,08925	0,49004	1,54158	0,49004	1,29688	0,49004
2,09650	0,48916	1,54675	0,48916	1,30113	0,48916
2,10397	0,48825	1,55208	0,48825	1,30552	0,48825
2,11168	0,48732	1,55758	0,48732	1,31004	0,48732
2,11963	0,48636	1,56325	0,48636	1,31471	0,48636
2,12784	0,48537	1,56911	0,48537	1,31952	0,48537
2,13633	0,48436	1,57516	0,48436	1,32450	0,48436
2,14509	0,48331	1,58141	0,48331	1,32964	0,48331
2,15416	0,48224	1,58788	0,48224	1,33496	0,48224
2,16354	0,48113	1,59457	0,48113	1,34046	0,48113
2,17325	0,47998	1,60149	0,47998	1,34615	0,47998
2,18330	0,47880	1,60866	0,47880	1,35205	0,47880
2,19372	0,47759	1,61609	0,47759	1,35816	0,47759
2,20452	0,47633	1,62379	0,47633	1,36449	0,47633
2,21573	0,47503	1,63178	0,47503	1,37106	0,47503
2,22736	0,47369	1,64007	0,47369	1,37788	0,47369
2,23945	0,47230	1,64869	0,47230	1,38496	0,47230
2,25201	0,47087	1,65764	0,47087	1,39232	0,47087
2,26508	0,46938	1,66696	0,46938	1,39998	0,46938
2,27868	0,46785	1,67665	0,46785	1,40795	0,46785
2,29285	0,46625	1,68675	0,46625	1,41625	0,46625
2,30762	0,46461	1,69727	0,46461	1,42490	0,46461
2,32303	0,46289	1,70825	0,46289	1,43392	0,46289
2,33911	0,46112	1,71972	0,46112	1,44334	0,46112
2,35592	0,45928	1,73169	0,45928	1,45318	0,45928
2,37351	0,45736	1,74422	0,45736	1,46347	0,45736

2,39191	0,45537	1,75733	0,45537	1,47424	0,45537
2,41119	0,45330	1,77107	0,45330	1,48553	0,45330
2,43142	0,45115	1,78547	0,45115	1,49736	0,45115
2,45265	0,44891	1,80060	0,44891	1,50978	0,44891
2,47497	0,44657	1,81649	0,44657	1,52284	0,44657
2,49845	0,44413	1,83322	0,44413	1,53657	0,44413
2,52319	0,44159	1,85083	0,44159	1,55103	0,44159
2,54928	0,43893	1,86941	0,43893	1,56629	0,43893
2,57683	0,43615	1,88903	0,43615	1,58239	0,43615
2,60597	0,43324	1,90977	0,43324	1,59942	0,43324
2,63683	0,43019	1,93174	0,43019	1,61745	0,43019
2,66956	0,42700	1,95503	0,42700	1,63657	0,42700
2,70433	0,42364	1,97978	0,42364	1,65688	0,42364
2,74133	0,42012	2,00612	0,42012	1,67850	0,42012
2,78079	0,41642	2,03420	0,41642	1,70153	0,41642
2,82294	0,41252	2,06419	0,41252	1,72614	0,41252
2,86806	0,40841	2,09630	0,40841	1,75248	0,40841
2,91648	0,40407	2,13075	0,40407	1,78074	0,40407
2,96857	0,39948	2,16780	0,39948	1,81113	0,39948
3,02475	0,39463	2,20776	0,39463	1,84391	0,39463
3,08552	0,38947	2,25099	0,38947	1,87936	0,38947
3,15149	0,38400	2,29791	0,38400	1,91782	0,38400
3,22334	0,37817	2,34900	0,37817	1,95972	0,37817
3,30192	0,37195	2,40488	0,37195	2,00552	0,37195
3,38824	0,36529	2,46625	0,36529	2,05583	0,36529
3,48354	0,35815	2,53399	0,35815	2,11135	0,35815
3,58935	0,35046	2,60920	0,35046	2,17299	0,35046
3,70760	0,34216	2,69323	0,34216	2,24186	0,34216
3,84074	0,33316	2,78783	0,33316	2,31937	0,33316
3,99193	0,32335	2,89525	0,32335	2,40738	0,32335
4,16540	0,31262	3,01847	0,31262	2,50832	0,31262
4,36682	0,30078	3,16151	0,30078	2,62549	0,30078
4,60414	0,28765	3,33000	0,28765	2,76349	0,28765
4,88876	0,27295	3,53203	0,27295	2,92893	0,27295
5,23783	0,25633	3,77974	0,25633	3,13174	0,25633
5,67849	0,23728	4,09232	0,23728	3,38762	0,23728
6,25668	0,21511	4,50231	0,21511	3,72315	0,21511
7,05793	0,18875	5,07023	0,18875	4,18780	0,18875
8,26474	0,15653	5,92519	0,15653	4,88703	0,15653
10,36302	0,11555	7,41091	0,11555	6,10162	0,11555
15,36709	0,06055	10,95206	0,06055	8,99506	0,06055
17,50631	0,04704	12,46544	0,04704	10,23129	0,04704
19,40734	0,03793	13,81019	0,03793	11,32968	0,03793
21,13552	0,03139	15,03259	0,03139	12,32808	0,03139
22,73086	0,02649	16,16098	0,02649	13,24965	0,02649
24,21998	0,02269	17,21420	0,02269	14,10980	0,02269
25,62162	0,01967	18,20553	0,01967	14,91939	0,01967
26,94961	0,01723	19,14475	0,01723	15,68640	0,01723
28,21446	0,01522	20,03929	0,01522	16,41692	0,01522

29,42440	0,01354	20,89499	0,01354	17,11571	0,01354
30,58602	0,01212	21,71650	0,01212	17,78657	0,01212
31,70468	0,01091	22,50763	0,01091	18,43261	0,01091
32,78483	0,00987	23,27151	0,00987	19,05640	0,00987
33,83018	0,00896	24,01078	0,00896	19,66008	0,00896
34,84390	0,00818	24,72767	0,00818	20,24549	0,00818
35,82869	0,00748	25,42410	0,00748	20,81418	0,00748
36,78691	0,00687	26,10173	0,00687	21,36753	0,00687
37,72058	0,00633	26,76201	0,00633	21,90669	0,00633
38,63151	0,00584	27,40620	0,00584	22,43272	0,00584
39,52129	0,00541	28,03542	0,00541	22,94652	0,00541
40,39131	0,00502	28,65067	0,00502	23,44892	0,00502
41,24284	0,00467	29,25285	0,00467	23,94063	0,00467
42,07702	0,00435	29,84274	0,00435	24,42232	0,00435
42,89485	0,00406	30,42109	0,00406	24,89457	0,00406
43,69727	0,00379	30,98852	0,00379	25,35792	0,00379
44,48512	0,00355	31,54566	0,00355	25,81284	0,00355
45,25915	0,00333	32,09302	0,00333	26,25980	0,00333
46,02009	0,00313	32,63112	0,00313	26,69918	0,00313
46,76855	0,00295	33,16040	0,00295	27,13136	0,00295
47,50515	0,00277	33,68128	0,00277	27,55669	0,00277
48,23043	0,00262	34,19416	0,00262	27,97548	0,00262
48,94489	0,00247	34,69939	0,00247	28,38802	0,00247
49,64900	0,00234	35,19731	0,00234	28,79459	0,00234
50,34321	0,00221	35,68821	0,00221	29,19544	0,00221
51,02791	0,00209	36,17240	0,00209	29,59079	0,00209
51,70349	0,00198	36,65013	0,00198	29,98088	0,00198
52,37031	0,00188	37,12167	0,00188	30,36591	0,00188
53,02869	0,00179	37,58723	0,00179	30,74606	0,00179
53,67894	0,00170	38,04706	0,00170	31,12153	0,00170
54,32137	0,00162	38,50135	0,00162	31,49247	0,00162
54,95625	0,00154	38,95029	0,00154	31,85905	0,00154
55,58383	0,00147	39,39408	0,00147	32,22142	0,00147
56,20437	0,00140	39,83289	0,00140	32,57972	0,00140
56,81809	0,00134	40,26688	0,00134	32,93408	0,00134
57,42522	0,00128	40,69620	0,00128	33,28464	0,00128
58,02596	0,00122	41,12101	0,00122	33,63151	0,00122
58,62052	0,00117	41,54144	0,00117	33,97480	0,00117
59,20907	0,00112	41,95762	0,00112	34,31463	0,00112
59,79179	0,00107	42,36969	0,00107	34,65109	0,00107
60,36887	0,00102	42,77776	0,00102	34,98429	0,00102
60,94045	0,00098	43,18194	0,00098	35,31432	0,00098
61,50669	0,00094	43,58235	0,00094	35,64126	0,00094
62,06774	0,00090	43,97908	0,00090	35,96521	0,00090
62,62373	0,00087	44,37225	0,00087	36,28624	0,00087
63,17481	0,00083	44,76193	0,00083	36,60443	0,00083
63,72110	0,00080	45,14823	0,00080	36,91985	0,00080

Figura 5.4

d_p (mm)	$h_{\text{ciclón}}$					
	SMPS			Contador Óptico		
	2,8 l/min.	5,0 l/min.	15,0 l/min.	5,0 l/min.	10,0 l/min.	15,0 l/min.
0,0163	0,830	0,784	0,751			
0,0169	0,831	0,784	0,750			
0,0175	0,836	0,783	0,752			
0,0181	0,836	0,784	0,752			
0,0188	0,841	0,786	0,754			
0,0195	0,842	0,788	0,760			
0,0202	0,843	0,791	0,766			
0,0209	0,846	0,793	0,771			
0,0217	0,848	0,796	0,774			
0,0225	0,852	0,800	0,783			
0,0233	0,853	0,809	0,786			
0,0241	0,858	0,815	0,795			
0,0250	0,863	0,821	0,797			
0,0259	0,867	0,829	0,801			
0,0269	0,871	0,832	0,805			
0,0279	0,872	0,840	0,808			
0,0289	0,877	0,843	0,815			
0,0300	0,880	0,843	0,819			
0,0311	0,884	0,846	0,821			
0,0322	0,887	0,850	0,826			
0,0334	0,890	0,853	0,827			
0,0346	0,893	0,855	0,830			
0,0359	0,897	0,858	0,833			
0,0372	0,900	0,863	0,838			
0,0385	0,902	0,866	0,841			
0,0400	0,904	0,869	0,844			
0,0414	0,907	0,872	0,848			
0,0429	0,910	0,877	0,851			
0,0445	0,914	0,880	0,854			
0,0461	0,916	0,884	0,857			
0,0478	0,920	0,888	0,860			
0,0496	0,922	0,893	0,864			
0,0514	0,923	0,898	0,867			
0,0533	0,924	0,901	0,869			
0,0552	0,926	0,902	0,870			
0,0573	0,928	0,904	0,872			
0,0594	0,930	0,907	0,873			
0,0615	0,932	0,909	0,874			
0,0638	0,934	0,910	0,875			
0,0661	0,934	0,914	0,876			
0,0686	0,935	0,918	0,878			
0,0711	0,935	0,921	0,879			

0,0737	0,937	0,922	0,881			
0,0764	0,938	0,924	0,881			
0,0792	0,940	0,924	0,882			
0,0821	0,941	0,927	0,884			
0,0851	0,944	0,927	0,886			
0,0882	0,945	0,928	0,888			
0,0914	0,946	0,931	0,890			
0,0948	0,947	0,932	0,891			
0,0982	0,949	0,937	0,893			
0,1018	0,946	0,936	0,894			
0,1056	0,949	0,936	0,895			
0,1094	0,952	0,938	0,895			
0,1134	0,953	0,937	0,896			
0,1176	0,954	0,943	0,898			
0,1219	0,957	0,943	0,900			
0,1264	0,958	0,944	0,901			
0,1310	0,959	0,947	0,902			
0,1358	0,958	0,947	0,902			
0,1408	0,958	0,948	0,904			
0,1459	0,957	0,948	0,905			
0,1513	0,959	0,949	0,907			
0,1568	0,958	0,949	0,907			
0,1626	0,961	0,951	0,907			
0,1685	0,957	0,948	0,907			
0,1747	0,959	0,951	0,907			
0,1811	0,960	0,952	0,907			
0,1877	0,963	0,953	0,907			
0,1946	0,964	0,954	0,907			
0,2017	0,966	0,954	0,907			
0,2091	0,968	0,956	0,907			
0,2168	0,968	0,956	0,907			
0,2247	0,972	0,954	0,907			
0,2329	0,966	0,955	0,907			
0,2415	0,966	0,955	0,907			
0,2503	0,968	0,952	0,907			
0,2595	0,966	0,952	0,907			
0,2690	0,964	0,954	0,907			
0,2789	0,964	0,951	0,907			
0,2891	0,964	0,950	0,907			
0,2997	0,960	0,948	0,905			
0,3106	0,963	0,947	0,902			
0,3220	0,959	0,943	0,898			
0,3338	0,959	0,941	0,895			
0,3460	0,955	0,938	0,895			
0,3587	0,951	0,935	0,892			
0,3719	0,949	0,931	0,883			
0,3855	0,947	0,935	0,888			
0,3996	0,947	0,929	0,881			
0,4142	0,947	0,927	0,880			
0,4294	0,944	0,925	0,877			

0,4452	0,939	0,922	0,866			
0,4615	0,936	0,917	0,863			
0,4784	0,933	0,912	0,854			
0,4959	0,933	0,909	0,848			
0,5141	0,930	0,905	0,842			
0,5329	0,919	0,900	0,837			
0,5524	0,922	0,896	0,828			
0,5726	0,921	0,891	0,823			
0,5936	0,914	0,888	0,816			
0,6154	0,912	0,883	0,801			
--	--	--	--			
0,465	--	--	--	0,917	0,843	0,815
0,481	--	--	--	0,912	0,837	0,805
0,498	--	--	--	0,912	0,828	0,791
0,514	--	--	--	0,904	0,816	0,774
0,535	--	--	--	0,898	0,801	0,759
0,556	--	--	--	0,883	0,781	0,739
0,577	--	--	--	0,873	0,762	0,706
0,598	--	--	--	0,861	0,740	0,675
0,624	--	--	--	0,837	0,712	0,647
0,650	--	--	--	0,817	0,685	0,601
0,676	--	--	--	0,797	0,648	0,560
0,702	--	--	--	0,766	0,617	0,520
0,735	--	--	--	0,738	0,585	0,478
0,767	--	--	--	0,705	0,551	0,408
0,800	--	--	--	0,668	0,519	0,361
0,832	--	--	--	0,624	0,461	0,312
0,873	--	--	--	0,590	0,423	0,265
0,913	--	--	--	0,546	0,369	0,216
0,954	--	--	--	0,499	0,323	0,170
0,994	--	--	--	0,458	0,290	0,151
1,044	--	--	--	0,405	0,243	0,113
1,094	--	--	--	0,351	0,203	0,091
1,143	--	--	--	0,313	0,169	0,067
1,193	--	--	--	0,270	0,135	0,047
1,254	--	--	--	0,229	0,113	0,034
1,316	--	--	--	0,199	0,092	0,027
1,377	--	--	--	0,172	0,075	0,019
1,438	--	--	--	0,147	0,063	0,017
1,512	--	--	--	0,121	0,051	0,009
1,587	--	--	--	0,098	0,042	0,010
1,661	--	--	--	0,083	0,032	0,009
1,735	--	--	--	0,069	0,032	0,005
1,824	--	--	--	0,057	0,020	0,006
1,914	--	--	--	0,047	0,015	0,001
2,003	--	--	--	0,039	0,016	0,002
2,092	--	--	--	0,032	0,013	0,004
2,198	--	--	--	0,025	0,011	0,002
2,304	--	--	--	0,020	0,006	0,002
2,410	--	--	--	0,016	0,002	0,002

2,516	--	--	--	0,014	0,000	0,005
2,641	--	--	--	0,010	0,001	0,006
2,765	--	--	--	0,008	0,000	0,004
2,890	--	--	--	0,007	0,000	0,002
3,014	--	--	--	0,006	0,000	0,001
3,158	--	--	--	0,005	0,000	0,005
3,303	--	--	--	0,004	0,000	0,004
3,447	--	--	--	0,003	0,000	0,003
3,591	--	--	--	0,003	0,000	0,003
3,755	--	--	--	0,002	0,000	0,002
3,920	--	--	--	0,002	0,000	0,002
4,084	--	--	--	0,002	0,000	0,002
4,248	--	--	--	0,002	0,000	0,002
4,433	--	--	--	0,002	0,000	0,002
4,617	--	--	--	0,002	0,000	0,002
4,802	--	--	--	0,002	0,000	0,002
4,986	--	--	--	0,002	0,000	0,002
5,190	--	--	--	0,002	0,000	0,002
5,394	--	--	--	0,002	0,000	0,002
5,598	--	--	--	0,002	0,000	0,002
5,802	--	--	--	0,002	0,000	0,002
6,024	--	--	--	0,002	0,000	0,002
6,246	--	--	--	0,002	0,000	0,002
6,468	--	--	--	0,002	0,000	0,002
6,690	--	--	--	0,002	0,000	0,002
6,929	--	--	--	0,002	0,000	0,002
7,168	--	--	--	0,002	0,000	0,002
7,407	--	--	--	0,002	0,000	0,002
7,646	--	--	--	0,002	0,000	0,002
7,901	--	--	--	0,003	0,000	0,003
8,156	--	--	--	0,003	0,000	0,003
8,410	--	--	--	0,003	0,000	0,003
8,665	--	--	--	0,003	0,000	0,003
8,936	--	--	--	0,003	0,000	0,003
9,208	--	--	--	0,004	0,000	0,004
9,479	--	--	--	0,004	0,000	0,004
9,750	--	--	--	0,005	0,000	0,005
10,040	--	--	--	0,005	0,001	0,005

Figura 5.5

d_p (mm)	$h_{\text{cámara de muestreo}}$				
	(2.75 l/min)	(5.0 l/min)	(10.0 l/min)	(20.0 l/min)	(30.0 l/min)
0,02458	0,96251	0,97456	0,98389	0,98986	0,99227
0,02642	0,96566	0,97674	0,98530	0,99075	0,99296
0,02839	0,96854	0,97874	0,98658	0,99157	0,99358
0,03051	0,97118	0,98055	0,98775	0,99231	0,99415
0,03278	0,97358	0,98221	0,98881	0,99298	0,99466
0,03523	0,97578	0,98372	0,98977	0,99359	0,99513
0,03786	0,97778	0,98509	0,99065	0,99415	0,99555
0,04068	0,97960	0,98634	0,99144	0,99465	0,99593
0,04371	0,98125	0,98747	0,99216	0,99510	0,99628
0,04698	0,98275	0,98849	0,99281	0,99552	0,99660
0,05048	0,98410	0,98942	0,99340	0,99589	0,99688
0,05425	0,98533	0,99025	0,99394	0,99623	0,99714
0,05829	0,98643	0,99101	0,99442	0,99653	0,99737
0,06264	0,98742	0,99169	0,99485	0,99681	0,99758
0,06732	0,98831	0,99230	0,99524	0,99705	0,99777
0,07234	0,98910	0,99284	0,99559	0,99728	0,99794
0,07774	0,98981	0,99333	0,99590	0,99748	0,99810
0,08354	0,99042	0,99376	0,99618	0,99766	0,99823
0,08977	0,99096	0,99413	0,99643	0,99782	0,99836
0,09647	0,99143	0,99446	0,99665	0,99796	0,99847
0,10366	0,99182	0,99475	0,99684	0,99808	0,99856
0,11140	0,99215	0,99499	0,99700	0,99819	0,99865
0,11971	0,99241	0,99519	0,99714	0,99828	0,99872
0,12864	0,99261	0,99534	0,99725	0,99836	0,99879
0,13824	0,99274	0,99546	0,99734	0,99843	0,99884
0,14855	0,99281	0,99554	0,99741	0,99848	0,99888
0,15963	0,99281	0,99558	0,99746	0,99852	0,99892
0,17154	0,99275	0,99558	0,99748	0,99855	0,99894
0,18434	0,99261	0,99553	0,99748	0,99856	0,99896
0,19810	0,99240	0,99545	0,99746	0,99856	0,99896
0,21288	0,99212	0,99532	0,99741	0,99855	0,99896
0,22876	0,99175	0,99513	0,99734	0,99852	0,99895
0,24582	0,99128	0,99490	0,99723	0,99848	0,99892
0,26416	0,99071	0,99460	0,99710	0,99842	0,99889
0,28387	0,99003	0,99424	0,99693	0,99835	0,99884
0,30505	0,98922	0,99381	0,99673	0,99825	0,99878
0,32781	0,98827	0,99330	0,99648	0,99814	0,99871
0,35227	0,98715	0,99270	0,99619	0,99800	0,99862
0,37855	0,98586	0,99199	0,99584	0,99783	0,99851
0,40679	0,98435	0,99117	0,99544	0,99763	0,99838
0,43714	0,98262	0,99022	0,99497	0,99740	0,99823
0,46976	0,98061	0,98912	0,99442	0,99713	0,99805
0,50481	0,97830	0,98785	0,99379	0,99682	0,99784

0,54247	0,97565	0,98638	0,99306	0,99645	0,99760
0,58294	0,97260	0,98469	0,99221	0,99603	0,99732
0,65000	0,96711	0,98165	0,99068	0,99527	0,99681
0,70200	0,96249	0,97908	0,98939	0,99462	0,99638
0,76700	0,95626	0,97561	0,98764	0,99375	0,99580
0,83200	0,94956	0,97187	0,98575	0,99280	0,99517
0,91300	0,94054	0,96682	0,98320	0,99151	0,99431
0,99400	0,93080	0,96135	0,98043	0,99012	0,99338
1,09400	0,91780	0,95404	0,97671	0,98824	0,99212
1,19300	0,90390	0,94619	0,97271	0,98622	0,99077
1,31600	0,88524	0,93561	0,96731	0,98348	0,98894
1,43800	0,86526	0,92423	0,96148	0,98052	0,98695
1,58700	0,83895	0,90916	0,95373	0,97658	0,98431
1,73500	0,81084	0,89296	0,94535	0,97232	0,98144
1,91400	0,77435	0,87176	0,93435	0,96669	0,97766
2,09200	0,73554	0,84900	0,92247	0,96060	0,97356
2,30400	0,68633	0,81982	0,90713	0,95270	0,96823
2,51600	0,63423	0,78849	0,89052	0,94412	0,96244
2,76500	0,56991	0,74914	0,86947	0,93318	0,95504
3,01400	0,50291	0,70722	0,84679	0,92133	0,94700
3,30300	0,42287	0,65569	0,81851	0,90645	0,93690
3,59100	0,34211	0,60165	0,78836	0,89047	0,92601
3,92000	0,25087	0,53720	0,75165	0,87084	0,91259
4,24800	0,16416	0,47075	0,71282	0,84985	0,89820
4,61700	0,07734	0,39441	0,66672	0,82462	0,88082
4,98600	0,01284	0,31769	0,61834	0,79775	0,86224
5,39400	0,00000	0,23434	0,56258	0,76623	0,84033
5,80200	0,00000	0,15520	0,50490	0,73293	0,81704
6,24600	0,00000	0,07824	0,44058	0,69483	0,79020
6,69000	0,00000	0,01866	0,37537	0,65494	0,76189
7,16800	0,00000	0,00000	0,30518	0,61023	0,72985
7,64600	0,00000	0,00000	0,23625	0,56392	0,69632
8,15600	0,00000	0,00000	0,16586	0,51306	0,65902
8,66500	0,00000	0,00000	0,10128	0,46115	0,62038
9,20800	0,00000	0,00000	0,04268	0,40496	0,57779
9,75000	0,00000	0,00000	0,00331	0,34856	0,53406
10,33000	0,00000	0,00000	0,00000	0,28853	0,48620
10,91000	0,00000	0,00000	0,00000	0,22968	0,43752
11,54000	0,00000	0,00000	0,00000	0,16828	0,38411
12,17000	0,00000	0,00000	0,00000	0,11112	0,33060
12,87000	0,00000	0,00000	0,00000	0,05539	0,27169
13,57000	0,00000	0,00000	0,00000	0,01301	0,21418
14,37500	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,15113
20,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
40,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
60,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
80,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
100,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Figura 5.6

t=0 s		t=1 s		t=5 s		t=10 s		t=20 s	
$d_{p(o)}$ (mm)	$dc_{n(o)}/dlogd_p$ (part./cm ³)	$d_{p(f)}$ (mm)	$dc_{n(f)}/dlogd_p$ (part./cm ³)	$d_{p(f)}$ (mm)	$dc_{n(f)}/dlogd_p$ (part./cm ³)	$d_{p(f)}$ (mm)	$dc_{n(f)}/dlogd_p$ (part./cm ³)	$d_{p(f)}$ (mm)	$dc_{n(f)}/dlogd_p$ (part./cm ³)
0,03	9,27E+05	0,03	7,29E+05	0,03	3,93E+05	0,03	2,49E+05	0,03	1,44E+05
0,10	2,26E+06	0,10	2,08E+06	0,10	1,58E+06	0,10	1,22E+06	0,10	8,37E+05
0,29	6,76E+05	0,29	6,72E+05	0,29	6,59E+05	0,29	6,43E+05	0,29	6,14E+05
0,52	1,30E+06	0,52	1,29E+06	0,52	1,29E+06	0,52	1,28E+06	0,52	1,27E+06
0,85	2,10E+06	0,85	2,09E+06	0,86	2,07E+06	0,87	2,04E+06	0,90	1,99E+06
1,67	1,61E+06	1,68	1,61E+06	1,71	1,60E+06	1,76	1,59E+06	1,84	1,57E+06
3,28	9,46E+05	3,29	9,45E+05	3,37	9,44E+05	3,45	9,42E+05	3,62	9,38E+05
5,92	4,68E+05	5,94	4,68E+05	6,04	4,68E+05	6,16	4,68E+05	6,39	4,67E+05
9,59	1,57E+05	9,61	1,57E+05	9,68	1,57E+05	9,76	1,57E+05	9,93	1,57E+05
14,79	1,91E+04	14,79	1,91E+04	14,81	1,91E+04	14,84	1,91E+04	14,88	1,91E+04

t=30 s		t=40 s		t=50 s		t=60 s	
$d_{p(f)}$ (mm)	$dc_{n(f)}/dlogd_p$ (part./cm ³)	$d_{p(f)}$ (mm)	$dc_{n(f)}/dlogd_p$ (part./cm ³)	$d_{p(f)}$ (mm)	$dc_{n(f)}/dlogd_p$ (part./cm ³)	$d_{p(f)}$ (mm)	$dc_{n(f)}/dlogd_p$ (part./cm ³)
0,03	1,01E+05	0,03	7,80E+04	0,03	6,34E+04	0,03	5,35E+04
0,10	6,37E+05	0,10	5,14E+05	0,10	4,31E+05	0,10	3,71E+05
0,29	5,87E+05	0,29	5,62E+05	0,30	5,39E+05	0,30	5,19E+05
0,52	1,25E+06	0,53	1,24E+06	0,53	1,23E+06	0,53	1,21E+06
0,92	1,94E+06	0,94	1,89E+06	0,96	1,84E+06	0,98	1,80E+06
1,91	1,55E+06	1,98	1,54E+06	2,05	1,52E+06	2,11	1,50E+06
3,78	9,35E+05	3,93	9,31E+05	4,07	9,27E+05	4,21	9,24E+05
6,61	4,67E+05	6,82	4,66E+05	7,03	4,66E+05	7,23	4,65E+05
10,10	1,57E+05	10,26	1,57E+05	10,41	1,57E+05	10,57	1,57E+05
14,93	1,91E+04	14,98	1,91E+04	15,03	1,91E+04	15,08	1,91E+04

Figura 5.7

d_p (mm)	$h_{\text{cámara de muestreo}}$				
	SMPS			Contador Óptico	
	2,75 l/min.	3,5 l/min.	5,0 l/min.	5,0 l/min.	10,0 l/min.
0,0202	0,868	0,968	0,995		
0,0209	0,874	0,972	0,997		
0,0217	0,879	0,977	0,998		
0,0225	0,883	0,982	0,999		

0,0233	0,887	0,984	0,999		
0,0241	0,892	0,985	1,000		
0,0250	0,897	0,988	1,000		
0,0259	0,901	0,988	1,000		
0,0269	0,907	0,990	1,000		
0,0279	0,914	0,989	1,000		
0,0289	0,919	0,989	1,000		
0,0300	0,926	0,990	1,000		
0,0311	0,933	0,990	0,999		
0,0322	0,938	0,991	0,998		
0,0334	0,943	0,991	0,998		
0,0346	0,947	0,994	0,999		
0,0359	0,951	0,995	1,000		
0,0372	0,954	0,995	1,000		
0,0385	0,957	0,998	1,000		
0,0400	0,960	0,998	1,000		
0,0414	0,962	1,000	1,000		
0,0429	0,965	1,000	1,000		
0,0445	0,968	1,000	1,000		
0,0461	0,970	1,000	1,000		
0,0478	0,973	1,000	1,000		
0,0496	0,976	1,000	1,000		
0,0514	0,978	1,000	1,000		
0,0533	0,980	1,000	1,000		
0,0552	0,980	1,000	0,998		
0,0573	0,982	1,000	0,997		
0,0594	0,983	1,000	0,995		
0,0615	0,984	1,000	0,995		
0,0638	0,984	1,000	0,995		
0,0661	0,986	1,000	0,995		
0,0686	0,988	1,000	0,995		
0,0711	0,988	1,000	0,995		
0,0737	0,989	1,000	0,996		
0,0764	0,991	1,000	0,997		
0,0792	0,992	1,000	0,999		
0,0821	0,991	1,000	1,000		
0,0851	0,992	1,000	1,000		
0,0882	0,993	1,000	1,000		
0,0914	0,995	1,000	1,000		
0,0948	0,996	1,000	1,000		
0,0982	0,997	1,000	1,000		
0,1018	0,998	1,000	1,000		
0,1056	0,999	1,000	1,000		
0,1094	0,998	1,000	1,000		
0,1134	0,997	1,000	1,000		
0,1176	0,997	1,000	1,000		
0,1219	0,997	1,000	1,000		
0,1264	0,999	1,000	1,000		
0,1310	1,000	1,000	1,000		
0,1358	1,000	1,000	1,000		

0,1408	1,000	1,000	1,000		
0,1459	1,000	1,000	1,000		
0,1513	1,000	1,000	1,000		
0,1568	1,000	1,000	1,000		
0,1626	1,000	1,000	1,000		
0,1685	1,000	1,000	1,000		
0,1747	1,000	1,000	1,000		
0,1811	1,000	1,000	1,000		
0,1877	1,000	1,000	1,000		
0,1946	1,000	1,000	1,000		
0,2017	1,000	1,000	1,000		
0,2091	1,000	1,000	1,000		
0,2168	1,000	1,000	1,000		
0,2247	1,000	1,000	1,000		
0,2329	1,000	1,000	1,000		
0,2415	1,000	1,000	1,000		
0,2503	1,000	1,000	1,000		
0,2595	1,000	1,000	1,000		
0,2690	1,000	1,000	1,000		
0,2789	1,000	1,000	1,000		
0,2891	1,000	1,000	1,000		
0,2997	1,000	1,000	1,000		
0,3106	1,000	1,000	1,000		
0,3220	1,000	1,000	1,000		
0,3338	1,000	1,000	1,000		
0,3460	1,000	1,000	1,000		
0,3587	1,000	1,000	1,000		
0,3719	1,000	1,000	1,000		
0,3855	1,000	1,000	1,000		
0,3996	1,000	1,000	1,000		
0,4142	1,000	1,000	1,000		
0,4294	1,000	1,000	1,000		
0,4452	1,000	1,000	1,000		
0,4615	1,000	1,000	1,000		
0,4784	1,000	1,000	1,000		
0,4959	1,000	1,000	1,000		
0,5141	1,000	1,000	1,000		
0,5329	1,000	1,000	1,000		
0,5524	1,000	1,000	1,000		
0,5726	1,000	1,000	1,000		
0,5936	1,000	1,000	1,000		
0,6154	1,000	1,000	1,000		
--	--	--	--		--
0,535	--	--	--	0,993	0,990
0,556	--	--	--	0,993	0,995
0,577	--	--	--	0,997	0,995
0,598	--	--	--	0,997	0,998
0,624	--	--	--	0,989	0,997
0,650	--	--	--	0,995	0,991
0,676	--	--	--	0,990	1,000

0,702	--	--	--	0,993	0,994
0,735	--	--	--	0,984	0,995
0,767	--	--	--	0,986	0,992
0,800	--	--	--	0,976	0,992
0,832	--	--	--	0,982	0,989
0,873	--	--	--	0,979	0,989
0,913	--	--	--	0,969	0,985
0,954	--	--	--	0,971	0,985
0,994	--	--	--	0,969	0,982
1,044	--	--	--	0,967	0,982
1,094	--	--	--	0,957	0,978
1,143	--	--	--	0,950	0,979
1,193	--	--	--	0,956	0,975
1,254	--	--	--	0,950	0,976
1,316	--	--	--	0,945	0,973
1,377	--	--	--	0,943	0,974
1,438	--	--	--	0,937	0,971
1,512	--	--	--	0,935	0,972
1,587	--	--	--	0,933	0,970
1,661	--	--	--	0,931	0,968
1,735	--	--	--	0,930	0,969
1,824	--	--	--	0,921	0,964
1,914	--	--	--	0,919	0,962
2,003	--	--	--	0,918	0,957
2,092	--	--	--	0,920	0,960
2,198	--	--	--	0,915	0,955
2,304	--	--	--	0,914	0,952
2,410	--	--	--	0,909	0,949
2,516	--	--	--	0,905	0,948
2,641	--	--	--	0,904	0,944
2,765	--	--	--	0,903	0,939
2,890	--	--	--	0,890	0,934
3,014	--	--	--	0,881	0,929
3,158	--	--	--	0,872	0,928
3,303	--	--	--	0,867	0,923
3,447	--	--	--	0,858	0,918
3,591	--	--	--	0,853	0,917
3,755	--	--	--	0,844	0,915
3,920	--	--	--	0,838	0,910
4,084	--	--	--	0,833	0,900
4,248	--	--	--	0,820	0,902
4,433	--	--	--	0,816	0,896
4,617	--	--	--	0,810	0,890
4,802	--	--	--	0,805	0,884
4,986	--	--	--	0,793	0,878
5,190	--	--	--	0,784	0,871
5,394	--	--	--	0,775	0,869
5,598	--	--	--	0,766	0,866
5,802	--	--	--	0,757	0,859
6,024	--	--	--	0,752	0,856

6,246	--	--	--	0,746	0,857
6,468	--	--	--	0,733	0,850
6,690	--	--	--	0,722	0,843
6,929	--	--	--	0,712	0,840
7,168	--	--	--	0,701	0,836
7,407	--	--	--	0,698	0,832
7,646	--	--	--	0,690	0,827
7,901	--	--	--	0,682	0,822
8,156	--	--	--	0,669	0,818
8,410	--	--	--	0,660	0,813
8,665	--	--	--	0,651	0,807
8,936	--	--	--	0,645	0,794
9,208	--	--	--	0,632	0,792
9,479	--	--	--	0,622	0,785
9,750	--	--	--	0,620	0,774
10,040	--	--	--	0,613	0,770
10,330	--	--	--	0,603	0,759
10,620	--	--	--	0,590	0,747
10,910	--	--	--	0,581	0,761
11,225	--	--	--	0,571	0,739
11,540	--	--	--	0,561	0,741
11,855	--	--	--	0,555	0,731
12,170	--	--	--	0,550	0,720
12,520	--	--	--	0,540	0,707
12,870	--	--	--	0,531	0,695
13,220	--	--	--	0,521	0,683
13,570	--	--	--	0,511	0,667
13,973	--	--	--	0,506	0,666
14,375	--	--	--	0,491	0,657
14,778	--	--	--	0,477	0,657
15,180	--	--	--	0,473	0,647
15,663	--	--	--	0,457	0,639
16,145	--	--	--	0,449	0,630
16,628	--	--	--	0,440	0,622
17,110	--	--	--	0,437	0,613
17,720	--	--	--	0,425	0,601
18,330	--	--	--	0,415	0,596
18,940	--	--	--	0,403	0,583
19,550	--	--	--	0,393	0,574

Figura 5.8

t=0,5 s		t=1 s		t=2 s		t=5 s	
$d_{p(f)}$ (mm)	h	$d_{p(f)}$ (mm)	h	$d_{p(f)}$ (mm)	h	$d_{p(f)}$ (mm)	h
0,03	0,88	0,03	0,79	0,03	0,65	0,03	0,42
0,10	0,96	0,10	0,92	0,10	0,85	0,10	0,70
0,29	1,00	0,29	0,99	0,29	0,99	0,29	0,98
0,52	1,00	0,52	1,00	0,52	1,00	0,52	0,99
0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	0,99	0,86	0,99
1,67	1,00	1,68	1,00	1,69	1,00	1,71	0,99
3,29	1,00	3,29	1,00	3,31	1,00	3,37	1,00
5,93	1,00	5,94	1,00	5,97	1,00	6,04	1,00
9,60	1,00	9,61	1,00	9,63	1,00	9,68	1,00
14,79	1,00	14,79	1,00	14,80	1,00	14,81	1,00

Figura 5.9

d_p (mm)	h_{secador}				
	(0,3 l/min)	(0,5 l/min)	(1,0 l/min)	(1,5 l/min)	(2,0 l/min)
0,02458	0,94651	0,96128	0,97528	0,98107	0,98435
0,02642	0,95091	0,96455	0,97742	0,98272	0,98572
0,02839	0,95496	0,96754	0,97937	0,98422	0,98698
0,03051	0,95867	0,97027	0,98114	0,98560	0,98811
0,03278	0,96207	0,97277	0,98276	0,98685	0,98915
0,03523	0,96518	0,97506	0,98424	0,98798	0,99009
0,03786	0,96802	0,97714	0,98558	0,98901	0,99095
0,04068	0,97062	0,97903	0,98680	0,98995	0,99172
0,04371	0,97298	0,98076	0,98791	0,99080	0,99243
0,04698	0,97514	0,98232	0,98892	0,99158	0,99307
0,05048	0,97709	0,98375	0,98983	0,99228	0,99365
0,05425	0,97887	0,98504	0,99065	0,99291	0,99417
0,05829	0,98047	0,98620	0,99140	0,99348	0,99465
0,06264	0,98192	0,98725	0,99208	0,99400	0,99507
0,06732	0,98322	0,98820	0,99268	0,99447	0,99546
0,07234	0,98438	0,98905	0,99323	0,99489	0,99581
0,07774	0,98542	0,98981	0,99372	0,99526	0,99612
0,08354	0,98634	0,99048	0,99416	0,99560	0,99640
0,08977	0,98715	0,99108	0,99455	0,99590	0,99665
0,09647	0,98786	0,99160	0,99489	0,99617	0,99688
0,10366	0,98847	0,99206	0,99519	0,99641	0,99707
0,11140	0,98898	0,99245	0,99546	0,99661	0,99725
0,11971	0,98941	0,99278	0,99568	0,99679	0,99740
0,12864	0,98974	0,99305	0,99587	0,99694	0,99753

0,13824	0,98999	0,99326	0,99603	0,99707	0,99764
0,14855	0,99015	0,99341	0,99615	0,99717	0,99772
0,15963	0,99022	0,99350	0,99624	0,99725	0,99780
0,17154	0,99021	0,99354	0,99629	0,99731	0,99785
0,18434	0,99010	0,99352	0,99631	0,99734	0,99788
0,19810	0,98990	0,99343	0,99630	0,99734	0,99789
0,21288	0,98959	0,99328	0,99626	0,99733	0,99789
0,22876	0,98918	0,99306	0,99617	0,99728	0,99786
0,24582	0,98864	0,99277	0,99605	0,99721	0,99782
0,26416	0,98797	0,99240	0,99588	0,99711	0,99775
0,28387	0,98716	0,99193	0,99567	0,99698	0,99765
0,30505	0,98619	0,99137	0,99540	0,99681	0,99753
0,32781	0,98504	0,99069	0,99508	0,99660	0,99738
0,35227	0,98369	0,98990	0,99470	0,99635	0,99720
0,37855	0,98211	0,98896	0,99424	0,99605	0,99698
0,40679	0,98028	0,98786	0,99370	0,99570	0,99671
0,43714	0,97815	0,98659	0,99307	0,99528	0,99641
0,46976	0,97569	0,98512	0,99234	0,99480	0,99605
0,50481	0,97286	0,98342	0,99149	0,99424	0,99563
0,54247	0,96960	0,98145	0,99051	0,99359	0,99514
0,58294	0,96585	0,97919	0,98938	0,99283	0,99457
0,65000	0,95910	0,97510	0,98733	0,99146	0,99355
0,70200	0,95341	0,97165	0,98559	0,99030	0,99268
0,76700	0,94576	0,96700	0,98324	0,98873	0,99150
0,83200	0,93752	0,96198	0,98069	0,98703	0,99022
0,91300	0,92644	0,95521	0,97726	0,98473	0,98849
0,99400	0,91448	0,94788	0,97353	0,98223	0,98661
1,09400	0,89855	0,93809	0,96854	0,97887	0,98408
1,19300	0,88153	0,92760	0,96317	0,97526	0,98136
1,31600	0,85874	0,91348	0,95591	0,97037	0,97767
1,43800	0,83438	0,89832	0,94809	0,96510	0,97369
1,58700	0,80240	0,87829	0,93772	0,95808	0,96839
1,73500	0,76834	0,85681	0,92652	0,95050	0,96266
1,91400	0,72431	0,82880	0,91183	0,94053	0,95511
2,09200	0,67773	0,79885	0,89600	0,92976	0,94694
2,30400	0,61905	0,76063	0,87562	0,91584	0,93636
2,51600	0,55745	0,71984	0,85361	0,90077	0,92489
2,76500	0,48223	0,66894	0,82580	0,88162	0,91029
3,01400	0,40505	0,61522	0,79596	0,86099	0,89450
3,30300	0,31481	0,54991	0,75894	0,83522	0,87474
3,59100	0,22665	0,48238	0,71968	0,80771	0,85356
3,92000	0,13239	0,40335	0,67219	0,77415	0,82762
4,24800	0,05225	0,32398	0,62238	0,73858	0,79999
4,61700	0,00000	0,23615	0,56381	0,69623	0,76692
4,98600	0,00000	0,15291	0,50311	0,65165	0,73188
5,39400	0,00000	0,07151	0,43426	0,60009	0,69101
5,80200	0,00000	0,01151	0,36448	0,54650	0,64813
6,24600	0,00000	0,00000	0,28878	0,48638	0,59944
6,69000	0,00000	0,00000	0,21494	0,42497	0,54896
7,16800	0,00000	0,00000	0,13997	0,35818	0,49302

7,64600	0,00000	0,00000	0,07322	0,29164	0,43590
8,15600	0,00000	0,00000	0,01786	0,22220	0,37424
8,66500	0,00000	0,00000	0,00000	0,15617	0,31271
9,20800	0,00000	0,00000	0,00000	0,09185	0,24803
9,75000	0,00000	0,00000	0,00000	0,03787	0,18566
10,33000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00110	0,12309
10,91000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,06736
11,54000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,01941
12,17000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
12,87000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
13,57000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
14,37500	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
20,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
40,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
60,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
80,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
100,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Figura 5.10

d_p (mm)	h_{secador}		
	(0,3 l/min)	(1,5 l/min)	(2,0 l/min)
0,0163	0,284	0,422	0,526
0,0169	0,284	0,424	0,524
0,0175	0,286	0,426	0,521
0,0181	0,286	0,424	0,523
0,0188	0,291	0,427	0,527
0,0195	0,292	0,430	0,529
0,0202	0,290	0,435	0,532
0,0209	0,294	0,440	0,539
0,0217	0,298	0,445	0,541
0,0225	0,295	0,452	0,547
0,0233	0,301	0,460	0,553
0,0241	0,304	0,465	0,559
0,0250	0,308	0,478	0,564
0,0259	0,310	0,483	0,571
0,0269	0,320	0,492	0,576
0,0279	0,322	0,500	0,587
0,0289	0,332	0,513	0,588
0,0300	0,342	0,519	0,600
0,0311	0,347	0,529	0,609
0,0322	0,360	0,537	0,615
0,0334	0,368	0,546	0,623
0,0346	0,381	0,555	0,627

0,0359	0,392	0,563	0,636
0,0372	0,402	0,572	0,645
0,0385	0,416	0,581	0,653
0,0400	0,433	0,591	0,664
0,0414	0,445	0,602	0,677
0,0429	0,459	0,613	0,687
0,0445	0,471	0,621	0,700
0,0461	0,487	0,632	0,714
0,0478	0,501	0,640	0,725
0,0496	0,512	0,653	0,732
0,0514	0,532	0,666	0,747
0,0533	0,545	0,683	0,754
0,0552	0,555	0,693	0,770
0,0573	0,573	0,704	0,776
0,0594	0,587	0,717	0,790
0,0615	0,603	0,730	0,797
0,0638	0,615	0,747	0,807
0,0661	0,628	0,756	0,818
0,0686	0,640	0,769	0,828
0,0711	0,653	0,776	0,833
0,0737	0,665	0,785	0,841
0,0764	0,676	0,793	0,847
0,0792	0,687	0,805	0,854
0,0821	0,700	0,813	0,856
0,0851	0,713	0,822	0,868
0,0882	0,726	0,829	0,878
0,0914	0,737	0,839	0,881
0,0948	0,749	0,847	0,887
0,0982	0,765	0,852	0,893
0,1018	0,777	0,861	0,896
0,1056	0,788	0,868	0,898
0,1094	0,803	0,870	0,900
0,1134	0,812	0,878	0,910
0,1176	0,822	0,884	0,915
0,1219	0,831	0,891	0,913
0,1264	0,839	0,897	0,917
0,1310	0,847	0,900	0,918
0,1358	0,855	0,906	0,925
0,1408	0,860	0,911	0,933
0,1459	0,864	0,912	0,933
0,1513	0,868	0,915	0,936
0,1568	0,872	0,915	0,936
0,1626	0,873	0,915	0,941
0,1685	0,878	0,917	0,940
0,1747	0,880	0,917	0,942
0,1811	0,880	0,919	0,939

0,1877	0,877	0,919	0,941
0,1946	0,873	0,921	0,941
0,2017	0,870	0,920	0,940
0,2091	0,865	0,919	0,938
0,2168	0,859	0,917	0,935
0,2247	0,852	0,915	0,936
0,2329	0,844	0,911	0,933
0,2415	0,837	0,905	0,928
0,2503	0,826	0,901	0,924
0,2595	0,812	0,891	0,925
0,2690	0,805	0,883	0,919
0,2789	0,789	0,873	0,919
0,2891	0,783	0,868	0,915
0,2997	0,770	0,857	0,908
0,3106	0,758	0,850	0,908
0,3220	0,746	0,836	0,901
0,3338	0,733	0,824	0,898
0,3460	0,710	0,815	0,889
0,3587	0,696	0,802	0,886
0,3719	0,680	0,788	0,882
0,3855	0,664	0,777	0,875
0,3996	0,653	0,763	0,868
0,4142	0,633	0,752	0,860
0,4294	0,618	0,736	0,851
0,4452	0,604	0,720	0,840
0,4615	0,589	0,701	0,825
0,4784	0,574	0,684	0,817
0,4959	0,561	0,665	0,800
0,5141	0,544	0,642	0,792
0,5329	0,526	0,628	0,778
0,5524	0,509	0,612	0,770
0,5726	0,494	0,594	0,761
0,5936	0,476	0,572	0,750
0,6154	0,461	0,547	0,739

Figura 5.11

d_p (mm)	h_{secador}		
	(0,3 l/min)	(1,5 l/min)	(2,0 l/min)
0,0250	0,152	0,331	0,439
0,0259	0,151	0,334	0,438
0,0269	0,150	0,333	0,441

0,0279	0,150	0,331	0,444
0,0289	0,152	0,336	0,446
0,0300	0,154	0,335	0,448
0,0311	0,159	0,341	0,453
0,0322	0,162	0,341	0,455
0,0334	0,167	0,347	0,458
0,0346	0,171	0,347	0,464
0,0359	0,176	0,354	0,470
0,0372	0,179	0,357	0,474
0,0385	0,184	0,364	0,483
0,0400	0,188	0,367	0,489
0,0414	0,192	0,371	0,497
0,0429	0,200	0,376	0,504
0,0445	0,205	0,386	0,515
0,0461	0,214	0,397	0,524
0,0478	0,221	0,405	0,536
0,0496	0,231	0,414	0,541
0,0514	0,243	0,428	0,553
0,0533	0,252	0,443	0,561
0,0552	0,266	0,455	0,572
0,0573	0,279	0,469	0,584
0,0594	0,293	0,484	0,595
0,0615	0,307	0,501	0,606
0,0638	0,322	0,517	0,615
0,0661	0,337	0,526	0,625
0,0686	0,352	0,541	0,632
0,0711	0,369	0,557	0,645
0,0737	0,386	0,570	0,658
0,0764	0,403	0,586	0,671
0,0792	0,419	0,599	0,686
0,0821	0,437	0,615	0,699
0,0851	0,455	0,627	0,711
0,0882	0,474	0,645	0,724
0,0914	0,493	0,656	0,737
0,0948	0,512	0,668	0,749
0,0982	0,532	0,678	0,759
0,1018	0,552	0,695	0,768
0,1056	0,571	0,709	0,779
0,1094	0,591	0,723	0,790
0,1134	0,612	0,741	0,801
0,1176	0,633	0,754	0,809
0,1219	0,653	0,767	0,819
0,1264	0,674	0,780	0,831
0,1310	0,694	0,791	0,841
0,1358	0,715	0,806	0,853
0,1408	0,736	0,816	0,863

0,1459	0,754	0,830	0,876
0,1513	0,774	0,843	0,888
0,1568	0,795	0,855	0,899
0,1626	0,814	0,867	0,910
0,1685	0,833	0,876	0,923
0,1747	0,851	0,890	0,936
0,1811	0,867	0,903	0,947
0,1877	0,884	0,915	0,956
0,1946	0,898	0,925	0,962
0,2017	0,913	0,936	0,967
0,2091	0,923	0,948	0,977
0,2168	0,935	0,958	0,980
0,2247	0,941	0,968	0,986
0,2329	0,953	0,974	0,994
0,2415	0,958	0,980	0,991
0,2503	0,967	0,987	0,993
0,2595	0,975	0,990	1,000
0,2690	0,980	0,997	0,999
0,2789	0,986	0,993	0,996
0,2891	0,991	0,998	0,998
0,2997	0,992	0,997	0,998
0,3106	1,000	0,996	0,999
0,3220	0,997	1,000	0,998
0,3338	1,004	1,000	0,998
0,3460	1,000	1,000	1,000
0,3587	1,001	1,000	0,998
0,3719	1,000	1,000	0,998
0,3855	1,000	1,000	0,997
0,3996	0,995	0,998	0,998

Figura 5.12

d_p (mm)	$h_{preimpactador}$		
	(0,3 l/min)	(0,6 l/min)	(1,0 l/min)
0,0136	0,8970	--	--
0,0141	0,9048	--	--
0,0146	0,9063	--	--
0,0151	0,9122	--	--
0,0157	0,9068	--	--
0,0163	0,9078	--	--
0,0169	0,9136	--	--
0,0175	0,9195	--	--

0,0181	0,9122	--	--
0,0188	0,9185	--	--
0,0195	0,9180	--	--
0,0202	0,9141	--	--
0,0209	0,9165	--	--
0,0217	0,9165	--	--
0,0225	0,9195	--	--
0,0233	0,9185	--	--
0,0242	0,9175	--	--
0,0250	0,9195	--	--
0,0260	0,9209	--	--
0,0269	0,9161	--	--
0,0279	0,9131	--	--
0,0289	0,9209	--	--
0,0300	0,9180	--	--
0,0311	0,9151	--	--
0,0322	0,9136	--	--
0,0334	0,9063	--	--
0,0346	0,9178	--	--
0,0359	0,9156	--	--
0,0372	0,9160	--	--
0,0386	0,9134	--	--
0,0400	0,9141	--	--
0,0414	0,9135	--	--
0,0429	0,9118	--	--
0,0445	0,9104	--	--
0,0462	0,9096	--	--
0,0478	0,9116	--	--
0,0496	0,9130	--	--
0,0514	0,9163	--	--
0,0533	0,9177	--	--
0,0552	0,9186	--	--
0,0573	0,9176	--	--
0,0594	0,9170	--	--
0,0615	0,9172	--	--
0,0638	0,9184	--	--
0,0661	0,9205	--	--
0,0686	0,9229	--	--
0,0711	0,9236	--	--
0,0737	0,9257	--	--
0,0764	0,9254	--	--
0,0792	0,9249	--	--
0,0821	0,9248	--	--
0,0851	0,9291	--	--
0,0882	0,9315	--	--
0,0914	0,9333	--	--

0,0948	0,9347	--	--
0,0982	0,9349	--	--
0,1018	0,9347	--	--
0,1056	0,9345	--	--
0,1094	0,9336	--	--
0,1134	0,9343	--	--
0,1176	0,9368	--	--
0,1219	0,9385	--	--
0,1264	0,9366	--	--
0,1310	0,9356	--	--
0,1358	0,9347	--	--
0,1408	0,9355	--	--
0,1459	0,9365	--	--
0,1513	0,9376	--	--
0,1568	0,9403	--	--
0,1626	0,9420	--	--
0,1685	0,9415	--	--
0,1747	0,9396	--	--
0,1811	0,9368	--	--
0,1877	0,9365	--	--
0,1946	0,9360	--	--
0,2017	0,9362	--	--
0,2091	0,9336	--	--
0,2168	0,9323	--	--
0,2246	0,9363	--	--
0,2331	0,9351	--	--
0,2415	0,9358	--	--
0,2502	0,9346	--	--
0,2596	0,9334	--	--
0,2690	0,9307	--	--
0,2787	0,9322	--	--
0,2892	0,9297	--	--
0,2996	0,9312	--	--
0,3104	0,9234	--	--
0,3222	0,9234	--	--
0,3338	0,9205	--	--
0,3458	0,9180	--	--
0,3588	0,9124	--	--
0,3718	0,9034	--	--
0,3852	0,8951	--	--
0,3996	0,8896	--	--
0,4139	0,8824	--	--
0,4297	0,8727	--	--
0,4450	0,8641	--	--
0,4615	0,8613	--	--
0,4790	0,8462	--	--

0,4961	0,8333--	--
0,4905	0,8386--	--
--	--	--
0,0102--		0,9624--
0,0106--		0,9566--
0,0109--		0,9536--
0,0113--		0,9507--
0,0118--		0,9502--
0,0122--		0,9463--
0,0126--		0,9478--
0,0131--		0,9468--
0,0136--		0,9444--
0,0141--		0,9468--
0,0146--		0,9370--
0,0151--		0,9434--
0,0157--		0,9400--
0,0163--		0,9410--
0,0169--		0,9380--
0,0175--		0,9429--
0,0181--		0,9395--
0,0188--		0,9410--
0,0195--		0,9346--
0,0202--		0,9346--
0,0209--		0,9317--
0,0217--		0,9297--
0,0225--		0,9317--
0,0233--		0,9327--
0,0242--		0,9346--
0,0250--		0,9327--
0,0260--		0,9351--
0,0269--		0,9351--
0,0279--		0,9312--
0,0289--		0,9370--
0,0300--		0,9395--
0,0311--		0,9346--
0,0322--		0,9419--
0,0334--		0,9434--
0,0346--		0,9429--
0,0359--		0,9444--
0,0372--		0,9502--
0,0386--		0,9399--
0,0400--		0,9448--
0,0414--		0,9481--
0,0429--		0,9507--
0,0445--		0,9544--
0,0462--		0,9567--

0,0478--	0,9592--
0,0496--	0,9620--
0,0514--	0,9634--
0,0533--	0,9659--
0,0552--	0,9670--
0,0573--	0,9672--
0,0594--	0,9669--
0,0615--	0,9672--
0,0638--	0,9681--
0,0661--	0,9682--
0,0686--	0,9691--
0,0711--	0,9694--
0,0737--	0,9692--
0,0764--	0,9696--
0,0792--	0,9693--
0,0821--	0,9694--
0,0851--	0,9698--
0,0882--	0,9703--
0,0914--	0,9698--
0,0948--	0,9692--
0,0982--	0,9690--
0,1018--	0,9686--
0,1056--	0,9683--
0,1094--	0,9681--
0,1134--	0,9681--
0,1176--	0,9671--
0,1219--	0,9657--
0,1264--	0,9707--
0,1310--	0,9693--
0,1359--	0,9700--
0,1408--	0,9695--
0,1459--	0,9705--
0,1514--	0,9683--
0,1568--	0,9685--
0,1625--	0,9702--
0,1686--	0,9705--
0,1747--	0,9676--
0,1810--	0,9690--
0,1878--	0,9705--
0,1946--	0,9671--
0,2016--	0,9649--
0,2092--	0,9619--
0,2168--	0,9517--
0,2246--	0,9563--
0,2331--	0,9468--
0,2415--	0,9378--

0,2503--		0,9329--	
0,2596--		0,9314--	
0,2688--		0,9324--	
0,2788--		0,9250--	
0,2891--		0,9250--	
0,2994--		0,9201--	
0,3105--		0,9119--	
0,3221--		0,9070--	
0,3340--		0,8960--	
0,3459--		0,8922--	
0,3587--		0,8794--	
0,3720--		0,8645--	
0,3852--		0,8566--	
0,3995--		0,8368--	
0,4143--		0,8245--	
0,4297--		0,8084--	
0,4322--		0,7894--	
--	--	--	--
0,0102--	--		0,9844
0,0106--	--		0,9829
0,0109--	--		0,9844
0,0113--	--		0,9839
0,0118--	--		0,9878
0,0122--	--		0,9805
0,0126--	--		0,9805
0,0131--	--		0,9844
0,0136--	--		0,9834
0,0141--	--		0,9819
0,0146--	--		0,9873
0,0151--	--		0,9849
0,0157--	--		0,9819
0,0163--	--		0,9883
0,0169--	--		0,9854
0,0175--	--		0,9898
0,0181--	--		0,9907
0,0188--	--		0,9935
0,0195--	--		0,9919
0,0202--	--		0,9924
0,0209--	--		0,9959
0,0217--	--		0,9929
0,0225--	--		0,9897
0,0233--	--		0,9869
0,0242--	--		0,9882
0,0250--	--		0,9879
0,0260--	--		0,9905
0,0269--	--		0,9889

0,0279--	--	0,9914
0,0289--	--	0,9932
0,0300--	--	0,9936
0,0311--	--	0,9919
0,0322--	--	0,9928
0,0334--	--	0,9943
0,0346--	--	0,9975
0,0359--	--	0,9983
0,0372--	--	0,9993
0,0386--	--	0,9995
0,0400--	--	1,0005
0,0414--	--	1,0004
0,0429--	--	1,0009
0,0445--	--	1,0015
0,0462--	--	1,0031
0,0478--	--	1,0036
0,0496--	--	1,0046
0,0514--	--	1,0054
0,0533--	--	1,0063
0,0552--	--	1,0062
0,0573--	--	1,0066
0,0594--	--	1,0074
0,0615--	--	1,0061
0,0638--	--	1,0055
0,0661--	--	1,0035
0,0686--	--	1,0005
0,0711--	--	0,9982
0,0737--	--	1,0024
0,0764--	--	1,0024
0,0791--	--	1,0042
0,0821--	--	1,0017
0,0851--	--	1,0044
0,0881--	--	1,0029
0,0915--	--	1,0012
0,0948--	--	1,0000
0,0982--	--	1,0002
0,1019--	--	0,9993
0,1055--	--	1,0012
0,1094--	--	0,9990
0,1135--	--	0,9985
0,1176--	--	0,9968
0,1218--	--	0,9961
0,1264--	--	0,9956
0,1310--	--	0,9929
0,1359--	--	0,9910
0,1408--	--	0,9898

0,1459	--	--	0,9866
0,1499	--	--	0,9866
0,1568	--	--	0,9884
0,1624	--	--	0,9890
0,1687	--	--	0,9905
0,1747	--	--	0,9911
0,1809	--	--	0,9899
0,1879	--	--	0,9881
0,1946	--	--	0,9852
0,2015	--	--	0,9811
0,2093	--	--	0,9788
0,2167	--	--	0,9723
0,2248	--	--	0,9650
0,2331	--	--	0,9600
0,2414	--	--	0,9495
0,2503	--	--	0,9460
0,2596	--	--	0,9337
0,2688	--	--	0,9170
0,2788	--	--	0,9062
0,2891	--	--	0,8821
0,2994	--	--	0,8622
0,3105	--	--	0,8491
0,3221	--	--	0,8274

Figura 5.13

d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./cm ³)					
	Qmuestreo =10 l/min.				Q _{SMPS} = 0,3 l/min.	
	Aerosol muestreado (10 l/min.)	Divisor de flujo	Ciclón	Cámara de muestreo	Secador	Preimpactador
0,017	4,73E+05	4,20E+05	3,07E+05	3,07E+05	1,33E+05	1,25E+05
0,018	5,50E+05	4,90E+05	3,64E+05	3,64E+05	1,63E+05	1,54E+05
0,019	6,29E+05	5,64E+05	4,25E+05	4,25E+05	1,97E+05	1,87E+05
0,021	7,16E+05	6,45E+05	4,93E+05	4,93E+05	2,37E+05	2,24E+05
0,022	8,66E+05	7,84E+05	6,06E+05	6,06E+05	3,02E+05	2,86E+05
0,024	1,03E+06	9,37E+05	7,34E+05	7,34E+05	3,79E+05	3,58E+05
0,025	1,21E+06	1,10E+06	8,72E+05	8,72E+05	4,66E+05	4,40E+05
0,027	1,38E+06	1,27E+06	1,01E+06	1,01E+06	5,60E+05	5,30E+05
0,029	1,56E+06	1,43E+06	1,16E+06	1,16E+06	6,62E+05	6,26E+05
0,032	1,72E+06	1,59E+06	1,30E+06	1,30E+06	7,68E+05	7,26E+05
0,034	1,88E+06	1,74E+06	1,44E+06	1,44E+06	8,76E+05	8,28E+05
0,037	2,02E+06	1,88E+06	1,57E+06	1,57E+06	9,81E+05	9,27E+05
0,039	2,13E+06	1,99E+06	1,68E+06	1,68E+06	1,08E+06	1,02E+06

0,042	2,22E+06	2,08E+06	1,77E+06	1,77E+06	1,17E+06	1,11E+06
0,045	2,28E+06	2,14E+06	1,83E+06	1,83E+06	1,25E+06	1,18E+06
0,049	2,31E+06	2,18E+06	1,88E+06	1,88E+06	1,32E+06	1,25E+06
0,052	2,32E+06	2,19E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,37E+06	1,29E+06
0,056	2,30E+06	2,18E+06	1,90E+06	1,90E+06	1,40E+06	1,33E+06
0,060	2,25E+06	2,14E+06	1,87E+06	1,87E+06	1,42E+06	1,34E+06
0,065	2,18E+06	2,08E+06	1,83E+06	1,83E+06	1,42E+06	1,34E+06
0,070	2,09E+06	2,00E+06	1,77E+06	1,77E+06	1,41E+06	1,33E+06
0,075	1,99E+06	1,91E+06	1,70E+06	1,70E+06	1,38E+06	1,30E+06
0,081	1,88E+06	1,81E+06	1,62E+06	1,62E+06	1,34E+06	1,26E+06
0,087	1,77E+06	1,70E+06	1,53E+06	1,53E+06	1,29E+06	1,22E+06
0,093	1,65E+06	1,60E+06	1,44E+06	1,44E+06	1,23E+06	1,16E+06
0,100	1,54E+06	1,54E+06	1,39E+06	1,39E+06	1,21E+06	1,15E+06
0,108	1,42E+06	1,43E+06	1,29E+06	1,29E+06	1,14E+06	1,08E+06
0,116	1,30E+06	1,31E+06	1,18E+06	1,18E+06	1,07E+06	1,00E+06
0,124	1,19E+06	1,19E+06	1,08E+06	1,08E+06	9,88E+05	9,30E+05
0,133	1,08E+06	1,08E+06	9,82E+05	9,82E+05	9,10E+05	8,56E+05
0,143	9,76E+05	9,77E+05	8,86E+05	8,86E+05	8,31E+05	7,81E+05
0,154	8,76E+05	8,77E+05	7,95E+05	7,95E+05	7,54E+05	7,07E+05
0,166	7,82E+05	7,82E+05	7,09E+05	7,09E+05	6,79E+05	6,36E+05
0,178	6,91E+05	6,91E+05	6,26E+05	6,26E+05	6,05E+05	5,65E+05
0,191	6,07E+05	6,07E+05	5,49E+05	5,49E+05	5,34E+05	4,98E+05
0,205	5,27E+05	5,26E+05	4,69E+05	4,69E+05	4,59E+05	4,26E+05
0,221	4,54E+05	4,53E+05	4,02E+05	4,01E+05	3,95E+05	3,65E+05
0,237	3,85E+05	3,84E+05	3,39E+05	3,38E+05	3,34E+05	3,08E+05
0,255	3,24E+05	3,23E+05	2,83E+05	2,83E+05	2,80E+05	2,56E+05
0,274	2,69E+05	2,68E+05	2,33E+05	2,32E+05	2,31E+05	2,09E+05
0,294	2,20E+05	2,19E+05	1,89E+05	1,88E+05	1,87E+05	1,68E+05
0,316	1,75E+05	1,74E+05	1,48E+05	1,47E+05	1,47E+05	1,30E+05
0,340	1,45E+05	1,44E+05	1,20E+05	1,20E+05	1,19E+05	1,04E+05
0,365	1,19E+05	1,18E+05	9,71E+04	9,68E+04	9,57E+04	8,24E+04
0,393	8,47E+04	8,39E+04	6,77E+04	6,75E+04	6,64E+04	5,60E+04
0,422	6,27E+04	6,20E+04	4,89E+04	4,86E+04	4,77E+04	3,92E+04
0,453	5,03E+04	4,97E+04	3,81E+04	3,79E+04	3,69E+04	2,94E+04
0,487	4,03E+04	3,97E+04	2,94E+04	2,93E+04	2,83E+04	2,18E+04
0,524	3,18E+04	3,13E+04	2,23E+04	2,22E+04	2,13E+04	1,57E+04
0,563	2,41E+04	2,36E+04	1,61E+04	1,60E+04	1,52E+04	1,07E+04
0,605	1,77E+04	1,73E+04	1,12E+04	1,12E+04	1,05E+04	6,92E+03
0,615	1,27E+04	1,24E+04	7,95E+03	7,88E+03	7,38E+03	4,81E+03
0,627	1,11E+04	1,09E+04	6,87E+03	6,81E+03	6,36E+03	4,07E+03
0,674	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,724	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,251	3,39E+05	3,38E+05	2,97E+05	2,96E+05	2,93E+05	2,69E+05
0,254	3,47E+05	3,46E+05	3,04E+05	3,03E+05	3,00E+05	2,75E+05
0,257	3,61E+05	3,60E+05	3,15E+05	3,14E+05	3,12E+05	2,85E+05
0,259	3,68E+05	3,67E+05	3,21E+05	3,21E+05	3,18E+05	2,90E+05
0,262	3,79E+05	3,78E+05	3,30E+05	3,29E+05	3,27E+05	2,98E+05
0,266	4,11E+05	4,10E+05	3,58E+05	3,57E+05	3,54E+05	3,22E+05

0,270	4,30E+05	4,28E+05	3,73E+05	3,72E+05	3,69E+05	3,35E+05
0,273	4,48E+05	4,46E+05	3,88E+05	3,87E+05	3,84E+05	3,49E+05
0,277	4,66E+05	4,64E+05	4,02E+05	4,02E+05	3,99E+05	3,61E+05
0,282	4,74E+05	4,72E+05	4,09E+05	4,08E+05	4,05E+05	3,66E+05
0,287	4,92E+05	4,90E+05	4,23E+05	4,22E+05	4,20E+05	3,78E+05
0,291	5,18E+05	5,16E+05	4,45E+05	4,44E+05	4,41E+05	3,97E+05
0,296	5,41E+05	5,38E+05	4,63E+05	4,61E+05	4,59E+05	4,12E+05
0,302	5,50E+05	5,47E+05	4,69E+05	4,67E+05	4,65E+05	4,16E+05
0,309	5,77E+05	5,74E+05	4,90E+05	4,89E+05	4,86E+05	4,33E+05
0,315	6,07E+05	6,04E+05	5,14E+05	5,12E+05	5,09E+05	4,52E+05
0,321	5,85E+05	5,82E+05	4,93E+05	4,92E+05	4,89E+05	4,33E+05
0,329	6,14E+05	6,11E+05	5,15E+05	5,14E+05	5,10E+05	4,49E+05
0,338	6,41E+05	6,37E+05	5,34E+05	5,33E+05	5,28E+05	4,63E+05
0,346	6,67E+05	6,63E+05	5,53E+05	5,51E+05	5,46E+05	4,77E+05
0,354	6,93E+05	6,88E+05	5,71E+05	5,69E+05	5,64E+05	4,89E+05
0,364	7,27E+05	7,21E+05	5,94E+05	5,92E+05	5,86E+05	5,05E+05
0,375	7,55E+05	7,49E+05	6,13E+05	6,10E+05	6,03E+05	5,15E+05
0,385	7,75E+05	7,68E+05	6,23E+05	6,21E+05	6,13E+05	5,19E+05
0,395	7,99E+05	7,92E+05	6,38E+05	6,36E+05	6,26E+05	5,26E+05
0,408	8,22E+05	8,14E+05	6,49E+05	6,46E+05	6,35E+05	5,28E+05
0,422	8,38E+05	8,29E+05	6,53E+05	6,50E+05	6,37E+05	5,24E+05
0,435	8,78E+05	8,68E+05	6,76E+05	6,73E+05	6,58E+05	5,34E+05
0,448	8,92E+05	8,82E+05	6,79E+05	6,76E+05	6,59E+05	5,28E+05
0,465	9,09E+05	8,97E+05	6,80E+05	6,77E+05	6,57E+05	5,18E+05
0,481	9,21E+05	9,09E+05	6,78E+05	6,74E+05	6,53E+05	5,06E+05
0,498	9,36E+05	9,22E+05	6,76E+05	6,72E+05	6,48E+05	4,93E+05
0,514	9,49E+05	9,34E+05	6,74E+05	6,70E+05	6,44E+05	4,80E+05
0,535	9,54E+05	9,38E+05	6,61E+05	6,57E+05	6,28E+05	4,56E+05
0,556	9,67E+05	9,50E+05	6,54E+05	6,49E+05	6,17E+05	4,37E+05
0,577	9,78E+05	9,59E+05	6,44E+05	6,39E+05	6,05E+05	4,16E+05
0,598	9,87E+05	9,67E+05	6,33E+05	6,28E+05	5,91E+05	3,94E+05
0,624	9,97E+05	9,76E+05	6,17E+05	6,13E+05	5,72E+05	3,68E+05
0,650	1,01E+06	9,88E+05	6,05E+05	6,00E+05	5,56E+05	3,43E+05
0,676	1,01E+06	9,82E+05	5,80E+05	5,75E+05	5,30E+05	3,14E+05
0,702	1,02E+06	9,90E+05	5,64E+05	5,59E+05	5,12E+05	2,90E+05
0,735	1,02E+06	9,93E+05	5,40E+05	5,34E+05	4,85E+05	2,60E+05
0,767	1,03E+06	9,98E+05	5,18E+05	5,13E+05	4,61E+05	2,34E+05
0,800	1,01E+06	9,81E+05	4,85E+05	4,79E+05	4,27E+05	2,04E+05
0,832	1,02E+06	9,81E+05	4,62E+05	4,57E+05	4,04E+05	1,82E+05
0,873	1,01E+06	9,72E+05	4,30E+05	4,25E+05	3,71E+05	1,55E+05
0,913	1,01E+06	9,68E+05	4,02E+05	3,97E+05	3,43E+05	1,33E+05
0,954	9,86E+05	9,44E+05	3,68E+05	3,63E+05	3,10E+05	1,11E+05
0,994	9,79E+05	9,35E+05	3,42E+05	3,37E+05	2,86E+05	9,50E+04
1,044	9,65E+05	9,18E+05	3,11E+05	3,06E+05	2,56E+05	7,74E+04
1,094	9,56E+05	9,06E+05	2,84E+05	2,79E+05	2,30E+05	6,33E+04
1,143	9,28E+05	8,76E+05	2,55E+05	2,50E+05	2,04E+05	5,11E+04
1,193	9,10E+05	8,57E+05	2,31E+05	2,26E+05	1,82E+05	4,16E+04
1,254	8,89E+05	8,33E+05	2,05E+05	2,00E+05	1,59E+05	3,24E+04
1,316	8,74E+05	8,14E+05	1,82E+05	1,79E+05	1,39E+05	2,54E+04

1,377	8,40E+05	7,79E+05	1,60E+05	1,56E+05	1,20E+05	1,97E+04
1,438	7,93E+05	7,32E+05	1,38E+05	1,34E+05	1,02E+05	1,50E+04
1,512	7,74E+05	7,10E+05	1,21E+05	1,17E+05	8,76E+04	1,14E+04
1,587	7,57E+05	6,90E+05	1,06E+05	1,03E+05	7,56E+04	8,68E+03
1,661	7,23E+05	6,55E+05	9,14E+04	8,87E+04	6,40E+04	6,53E+03
1,735	7,01E+05	6,31E+05	8,03E+04	7,78E+04	5,53E+04	5,03E+03
1,824	6,76E+05	6,03E+05	6,90E+04	6,67E+04	4,65E+04	3,71E+03
1,914	6,57E+05	5,81E+05	5,99E+04	5,78E+04	3,96E+04	2,77E+03
2,003	6,24E+05	5,48E+05	5,12E+04	4,93E+04	3,31E+04	2,05E+03
2,092	6,02E+05	5,24E+05	4,45E+04	4,28E+04	2,83E+04	1,55E+03
2,198	5,78E+05	4,98E+05	3,80E+04	3,65E+04	2,36E+04	1,13E+03
2,304	5,61E+05	4,79E+05	3,30E+04	3,15E+04	2,00E+04	8,42E+02
2,410	5,59E+05	4,72E+05	2,96E+04	2,82E+04	1,76E+04	6,50E+02
2,516	5,33E+05	4,45E+05	2,54E+04	2,41E+04	1,48E+04	4,85E+02
2,641	5,10E+05	4,21E+05	2,17E+04	2,05E+04	1,23E+04	3,52E+02
2,765	4,94E+05	4,02E+05	1,88E+04	1,78E+04	1,04E+04	2,62E+02
2,890	4,67E+05	3,76E+05	1,61E+04	1,51E+04	8,72E+03	1,93E+02
3,014	4,49E+05	3,56E+05	1,40E+04	1,31E+04	7,43E+03	1,46E+02
3,158	4,31E+05	3,37E+05	1,21E+04	1,13E+04	6,24E+03	1,07E+02
3,303	4,18E+05	3,21E+05	1,05E+04	9,81E+03	5,32E+03	8,03E+01
3,447	3,95E+05	2,99E+05	9,05E+03	8,39E+03	4,46E+03	5,95E+01
3,591	3,79E+05	2,82E+05	7,93E+03	7,32E+03	3,82E+03	4,53E+01
3,755	3,62E+05	2,65E+05	6,86E+03	6,31E+03	3,22E+03	3,36E+01
3,920	3,51E+05	2,51E+05	6,06E+03	5,54E+03	2,77E+03	2,55E+01
4,084	3,32E+05	2,34E+05	5,26E+03	4,79E+03	2,35E+03	1,92E+01
4,248	3,18E+05	2,19E+05	4,63E+03	4,20E+03	2,02E+03	1,47E+01
4,433	3,03E+05	2,05E+05	4,05E+03	3,66E+03	1,72E+03	1,11E+01
4,617	2,92E+05	1,93E+05	3,60E+03	3,23E+03	1,49E+03	8,53E+00
4,802	2,76E+05	1,78E+05	3,15E+03	2,81E+03	1,27E+03	6,48E+00
4,986	2,62E+05	1,66E+05	2,78E+03	2,46E+03	1,09E+03	5,00E+00
5,190	2,50E+05	1,54E+05	2,45E+03	2,16E+03	9,39E+02	3,82E+00
5,394	2,41E+05	1,44E+05	2,19E+03	1,92E+03	8,20E+02	2,98E+00
5,598	2,27E+05	1,32E+05	1,93E+03	1,68E+03	7,04E+02	2,30E+00
5,802	2,13E+05	1,21E+05	1,70E+03	1,47E+03	6,05E+02	1,78E+00
6,024	2,03E+05	1,12E+05	1,51E+03	1,30E+03	5,24E+02	1,38E+00
6,246	1,93E+05	1,04E+05	1,35E+03	1,15E+03	4,57E+02	1,08E+00
6,468	1,81E+05	9,42E+04	1,19E+03	1,01E+03	3,92E+02	8,40E-01
6,690	1,70E+05	8,58E+04	1,05E+03	8,86E+02	3,38E+02	6,57E-01
6,929	1,59E+05	7,76E+04	9,23E+02	7,73E+02	2,90E+02	5,08E-01
7,168	1,50E+05	7,09E+04	8,22E+02	6,83E+02	2,52E+02	4,00E-01
7,407	1,38E+05	6,32E+04	7,15E+02	5,90E+02	2,14E+02	3,08E-01
7,646	1,27E+05	5,64E+04	6,26E+02	5,13E+02	1,83E+02	2,40E-01
7,901	1,16E+05	4,97E+04	5,40E+02	4,39E+02	1,54E+02	1,84E-01
8,156	1,08E+05	4,45E+04	4,74E+02	3,83E+02	1,32E+02	1,44E-01
8,410	1,00E+05	3,96E+04	4,15E+02	3,32E+02	1,13E+02	1,12E-01
8,665	8,93E+04	3,41E+04	3,52E+02	2,79E+02	9,32E+01	8,50E-02
8,936	8,05E+04	2,95E+04	2,99E+02	2,36E+02	7,75E+01	6,46E-02
9,208	7,35E+04	2,58E+04	2,59E+02	2,02E+02	6,54E+01	5,00E-02
9,479	6,58E+04	2,22E+04	2,19E+02	1,70E+02	5,42E+01	3,80E-02

9,750	5,86E+04	1,89E+04	1,85E+02	1,42E+02	4,47E+01	2,89E-02
10,040	5,18E+04	1,59E+04	1,54E+02	1,17E+02	3,63E+01	2,16E-02
10,330	4,64E+04	1,36E+04	1,31E+02	9,85E+01	3,00E+01	1,64E-02
10,620	4,04E+04	1,13E+04	1,07E+02	8,01E+01	2,41E+01	1,21E-02
10,910	3,58E+04	9,52E+03	8,96E+01	6,64E+01	1,97E+01	9,17E-03
11,225	3,09E+04	7,78E+03	7,26E+01	5,33E+01	1,56E+01	6,67E-03
11,540	2,71E+04	6,45E+03	5,97E+01	4,34E+01	1,25E+01	4,94E-03
11,855	2,33E+04	5,23E+03	4,81E+01	3,46E+01	9,86E+00	3,60E-03
12,170	1,99E+04	4,21E+03	3,85E+01	2,74E+01	7,71E+00	2,61E-03
12,520	1,69E+04	3,33E+03	3,02E+01	2,13E+01	5,91E+00	1,84E-03
12,870	1,43E+04	2,64E+03	2,38E+01	1,66E+01	4,54E+00	1,30E-03
13,220	1,20E+04	2,05E+03	1,84E+01	1,27E+01	3,43E+00	9,11E-04
13,570	1,00E+04	1,58E+03	1,42E+01	9,68E+00	2,58E+00	6,33E-04
13,973	8,48E+03	1,22E+03	1,09E+01	7,34E+00	1,93E+00	4,35E-04
14,375	7,25E+03	9,48E+02	8,39E+00	5,60E+00	1,45E+00	3,01E-04
14,778	5,95E+03	7,00E+02	6,16E+00	4,06E+00	1,04E+00	1,99E-04
15,180	5,41E+03	5,69E+02	4,99E+00	3,25E+00	8,20E-01	1,45E-04
15,663	4,44E+03	4,02E+02	3,51E+00	2,26E+00	5,61E-01	9,06E-05
16,145	4,05E+03	3,11E+02	2,71E+00	1,71E+00	4,20E-01	6,21E-05
16,628	3,58E+03	2,27E+02	1,97E+00	1,23E+00	2,97E-01	4,04E-05
17,110	3,25E+03	1,65E+02	1,43E+00	8,77E-01	2,09E-01	2,61E-05
17,720	3,09E+03	1,09E+02	9,40E-01	5,68E-01	1,33E-01	1,50E-05
18,330	3,06E+03	6,35E+01	5,46E-01	3,24E-01	7,50E-02	7,66E-06
18,940	2,90E+03	2,01E+01	1,72E-01	1,00E-01	2,29E-02	2,13E-06
19,550		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Figura 5.14

d_p (mm)	h					
	SMPS (preimpact.)	SMPS (preimpact. camara)	SMPS (preimpact. Camara ciclón)	SMPS (preimpact camara, secador)	SMPS (todos)	Impactador, filtro y SEM
0,017	0,95	0,95	0,69	0,30	0,27	1,00
0,018	0,95	0,95	0,70	0,31	0,28	1,00
0,019	0,95	0,95	0,71	0,33	0,30	1,00
0,021	0,95	0,95	0,72	0,35	0,31	1,00
0,022	0,95	0,95	0,73	0,36	0,33	1,00
0,024	0,95	0,95	0,74	0,38	0,35	1,00
0,025	0,95	0,95	0,75	0,40	0,37	1,00
0,027	0,95	0,95	0,76	0,42	0,38	1,00
0,029	0,95	0,95	0,77	0,44	0,40	1,00
0,032	0,95	0,95	0,77	0,46	0,42	1,00
0,034	0,95	0,95	0,78	0,47	0,44	1,00
0,037	0,95	0,95	0,79	0,49	0,46	1,00

0,039	0,95	0,95	0,80	0,51	0,48	1,00
0,042	0,95	0,95	0,80	0,53	0,50	1,00
0,045	0,95	0,95	0,81	0,55	0,52	1,00
0,049	0,95	0,95	0,81	0,57	0,54	1,00
0,052	0,95	0,95	0,82	0,59	0,56	1,00
0,056	0,95	0,95	0,82	0,61	0,58	1,00
0,060	0,94	0,94	0,83	0,63	0,60	1,00
0,065	0,94	0,94	0,83	0,65	0,62	1,00
0,070	0,94	0,94	0,84	0,66	0,63	1,00
0,075	0,94	0,94	0,84	0,68	0,65	1,00
0,081	0,94	0,94	0,84	0,70	0,67	1,00
0,087	0,94	0,94	0,85	0,71	0,69	1,00
0,093	0,94	0,94	0,85	0,73	0,70	1,00
0,100	0,94	0,94	0,85	0,74	0,72	1,00
0,108	0,94	0,94	0,85	0,76	0,73	1,00
0,116	0,94	0,94	0,85	0,77	0,75	1,00
0,124	0,94	0,94	0,85	0,78	0,76	1,00
0,133	0,94	0,94	0,85	0,79	0,77	1,00
0,143	0,94	0,94	0,85	0,80	0,78	1,00
0,154	0,94	0,94	0,85	0,81	0,79	1,00
0,166	0,94	0,94	0,85	0,81	0,80	1,00
0,178	0,93	0,93	0,85	0,82	0,80	1,00
0,191	0,93	0,93	0,84	0,82	0,81	1,00
0,205	0,93	0,93	0,83	0,81	0,81	1,00
0,221	0,92	0,92	0,82	0,81	0,81	1,00
0,237	0,92	0,92	0,81	0,80	0,80	1,00
0,255	0,91	0,91	0,80	0,79	0,79	1,00
0,274	0,91	0,90	0,79	0,78	0,78	1,00
0,294	0,90	0,90	0,77	0,77	0,76	1,00
0,316	0,89	0,89	0,75	0,75	0,74	0,99
0,340	0,88	0,87	0,73	0,73	0,72	0,99
0,365	0,86	0,86	0,71	0,70	0,69	0,99
0,393	0,84	0,84	0,68	0,67	0,66	0,99
0,422	0,82	0,82	0,64	0,63	0,63	0,99
0,453	0,80	0,79	0,61	0,59	0,59	0,99
0,487	0,77	0,77	0,57	0,55	0,54	0,99
0,524	0,74	0,73	0,52	0,50	0,49	0,98
0,563	0,70	0,70	0,48	0,45	0,44	0,98
0,605	0,66	0,66	0,43	0,40	0,39	0,98
0,615	0,65	0,65	0,41	0,39	0,38	0,98
0,627	0,64	0,63	0,40	0,37	0,37	0,98
0,674	0,59	0,59	0,35	0,32	0,31	0,98
0,724	0,55	0,54	0,30	0,27	0,26	0,97
0,500	0,76	0,75	0,55	0,53	0,52	0,99
0,251	0,92	0,91	0,80	0,79	0,79	1,00
0,254	0,91	0,91	0,80	0,79	0,79	1,00
0,257	0,91	0,91	0,80	0,79	0,79	1,00
0,259	0,91	0,91	0,80	0,79	0,79	1,00

0,262	0,91	0,91	0,79	0,79	0,79	1,00
0,266	0,91	0,91	0,79	0,79	0,78	1,00
0,270	0,91	0,91	0,79	0,78	0,78	1,00
0,273	0,91	0,91	0,79	0,78	0,78	1,00
0,277	0,91	0,90	0,78	0,78	0,78	1,00
0,282	0,90	0,90	0,78	0,78	0,77	1,00
0,287	0,90	0,90	0,78	0,77	0,77	1,00
0,291	0,90	0,90	0,77	0,77	0,77	1,00
0,296	0,90	0,90	0,77	0,76	0,76	1,00
0,302	0,89	0,89	0,76	0,76	0,76	1,00
0,309	0,89	0,89	0,76	0,75	0,75	0,99
0,315	0,89	0,89	0,75	0,75	0,74	0,99
0,321	0,89	0,88	0,75	0,74	0,74	0,99
0,329	0,88	0,88	0,74	0,74	0,73	0,99
0,338	0,88	0,87	0,73	0,73	0,72	0,99
0,346	0,87	0,87	0,73	0,72	0,71	0,99
0,354	0,87	0,86	0,72	0,71	0,71	0,99
0,364	0,86	0,86	0,71	0,70	0,69	0,99
0,375	0,85	0,85	0,70	0,69	0,68	0,99
0,385	0,85	0,84	0,69	0,68	0,67	0,99
0,395	0,84	0,84	0,68	0,66	0,66	0,99
0,408	0,83	0,83	0,66	0,65	0,64	0,99
0,422	0,82	0,82	0,64	0,63	0,63	0,99
0,435	0,81	0,81	0,63	0,62	0,61	0,99
0,448	0,80	0,80	0,61	0,60	0,59	0,99
0,465	0,79	0,78	0,59	0,58	0,57	0,99
0,481	0,77	0,77	0,57	0,56	0,55	0,99
0,498	0,76	0,76	0,55	0,53	0,53	0,99
0,514	0,75	0,74	0,53	0,51	0,51	0,98
0,535	0,73	0,72	0,51	0,49	0,48	0,98
0,556	0,71	0,70	0,48	0,46	0,45	0,98
0,577	0,69	0,68	0,46	0,43	0,43	0,98
0,598	0,67	0,66	0,43	0,41	0,40	0,98
0,624	0,64	0,64	0,40	0,38	0,37	0,98
0,650	0,62	0,61	0,37	0,35	0,34	0,98
0,676	0,59	0,59	0,35	0,32	0,31	0,98
0,702	0,57	0,56	0,32	0,29	0,29	0,97
0,735	0,54	0,53	0,29	0,26	0,25	0,97
0,767	0,51	0,50	0,26	0,23	0,23	0,97
0,800	0,48	0,47	0,23	0,21	0,20	0,97
0,832	0,45	0,45	0,21	0,19	0,18	0,97
0,873	0,42	0,41	0,18	0,16	0,15	0,96
0,913	0,39	0,38	0,16	0,14	0,13	0,96
0,954	0,36	0,35	0,14	0,12	0,11	0,96
0,994	0,33	0,33	0,12	0,10	0,10	0,95
1,044						0,95
1,094						0,95
1,143						0,94
1,193						0,94

1,254						0,94
1,316						0,93
1,377						0,93
1,438						0,92
1,512						0,92
1,587						0,91
1,661						0,91
1,735						0,90
1,824						0,89
1,914						0,89
2,003						0,88
2,092						0,87
2,198						0,86
2,304						0,85
2,410						0,84
2,516						0,84
2,641						0,82
2,765						0,81
2,890						0,80
3,014						0,79
3,158						0,78
3,303						0,77
3,447						0,76
3,591						0,74
3,755						0,73
3,920						0,72
4,084						0,70
4,248						0,69
4,433						0,68
4,617						0,66
4,802						0,65
4,986						0,63
5,190						0,62
5,394						0,60
5,598						0,58
5,802						0,57
6,024						0,55
6,246						0,54
6,468						0,52
6,690						0,51
6,929						0,49
7,168						0,47
7,407						0,46
7,646						0,44
7,901						0,43
8,156						0,41
8,410						0,40
8,665						0,38
8,936						0,37

9,208						0,35
9,479						0,34
9,750						0,32
10,040						0,31
10,330						0,29
10,620						0,28
10,910						0,27
11,225						0,25
11,540						0,24
11,855						0,22
12,170						0,21
12,520						0,20
12,870						0,18
13,220						0,17
13,570						0,16
13,973						0,14
14,375						0,13
14,778						0,12
15,180						0,11
15,663						0,09
16,145						0,08
16,628						0,06
17,110						0,05
17,720						0,04
18,330						0,02
18,940						0,01
19,550						0,01

Figura 5.16

Contador optico		Impactador		SEM	
$d_p(\text{mm})$	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)	$d_p(\text{mm})$	$dc_m/d\log(d_p)$ (g/Nm ³)	$d_p(\text{mm})$	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)
0,3085	4,22E+05	0,100	0,000	0,100	4,88E+03
0,3152	4,13E+05	0,100	0,013	0,200	7,51E+03
0,3217	4,35E+05	0,501	0,013	0,300	1,69E+04
0,3281	4,19E+05	0,502	0,000	0,400	1,80E+04
0,3344	4,05E+05	0,503	0,020	0,500	2,23E+04
0,3405	4,03E+05	0,761	0,020	0,600	2,54E+04
0,3466	3,76E+05	0,762	0,000	0,700	2,70E+04
0,3555	3,60E+05	0,763	0,186	0,800	2,74E+04
0,3642	3,32E+05	1,257	0,186	0,900	2,80E+04
0,3699	3,15E+05	1,258	0,000	1,000	2,88E+04
0,3783	2,93E+05	1,259	0,113	1,100	2,86E+04

0,3865	2,69E+05	2,534	0,113	1,200	2,70E+04
0,3945	2,46E+05	2,535	0,000	1,300	2,71E+04
0,4025	1,94E+05	2,536	0,062	1,400	2,44E+04
0,4103	1,76E+05	4,068	0,062	1,500	2,22E+04
0,4204	1,58E+05	4,069	0,000	1,600	2,10E+04
0,4304	1,24E+05	4,070	0,081	1,700	2,13E+04
0,4402	1,11E+05	5,861	0,081	1,800	2,09E+04
0,4498	8,61E+04	5,862	0,000	1,900	1,89E+04
0,4592	7,49E+04	5,863	0,016	2,000	1,63E+04
0,4685	5,55E+04	8,702	0,016	2,100	1,58E+04
0,4776	4,15E+04	8,703	0,000	2,200	1,31E+04
0,4889	3,15E+04	8,704	0,010	2,300	1,36E+04
0,4999	2,41E+04	13,915	0,010	2,400	1,32E+04
0,5108	1,86E+04	13,916	0,000	2,500	1,30E+04
0,5236	1,43E+04	13,917	0,016	2,600	1,20E+04
0,5342	1,12E+04	25,000	0,016	2,700	1,09E+04
0,5445	9,35E+03	25,100	0,000	2,800	9,84E+03
0,5568	7,09E+03			2,900	1,02E+04
0,5709	6,31E+03			3,000	9,88E+03
0,5849	5,63E+03			3,100	1,22E+04
0,5967	5,35E+03			3,200	1,15E+04
0,6103	5,75E+03			3,300	1,04E+04
0,6256	5,99E+03			3,400	1,18E+04
0,6407	6,60E+03			3,500	1,11E+04
0,6557	7,12E+03			3,600	1,09E+04
0,6705	8,05E+03			3,700	1,10E+04
0,6869	8,77E+03			3,800	1,08E+04
0,7032	9,54E+03			3,900	9,55E+03
0,7194	1,04E+04			4,000	7,44E+03
0,7371	1,13E+04			4,100	6,64E+03
0,7565	1,24E+04			4,200	6,64E+03
0,7758	1,32E+04			4,300	4,22E+03
0,7948	1,44E+04			4,400	4,34E+03
0,8155	1,55E+04			4,500	3,32E+03
0,8361	1,66E+04			4,600	2,80E+03
0,8581	1,78E+04			4,700	2,38E+03
0,8801	1,87E+04			4,800	3,04E+03
0,9037	1,99E+04			4,900	2,48E+03
0,9288	2,08E+04			5,000	1,91E+03
0,9537	2,20E+04			5,100	1,91E+03
0,9803	2,30E+04			5,200	1,91E+03
1,0067	2,37E+04			5,300	2,02E+03
1,0347	2,50E+04			5,400	2,02E+03
1,0642	2,54E+04			5,500	2,02E+03
1,0954	2,63E+04			5,600	1,38E+03
1,128	2,68E+04			5,700	7,21E+02

1,1606	2,74E+04			5,800	1,50E+03
1,1948	2,79E+04			5,900	1,50E+03
1,2305	2,81E+04			6,000	1,50E+03
1,2678	2,83E+04			6,100	1,50E+03
1,3066	2,82E+04			6,200	7,84E+02
1,347	2,82E+04			6,300	1,63E+03
1,389	2,83E+04			6,400	1,63E+03
1,4326	2,78E+04			6,500	1,63E+03
1,4777	2,75E+04			6,600	2,51E+03
1,5252	2,69E+04			6,700	1,73E+03
1,5752	2,63E+04			6,800	1,73E+03
1,6274	2,55E+04			6,900	1,73E+03
1,6818	2,47E+04			7,000	1,73E+03
1,7379	2,39E+04			7,100	1,73E+03
1,7955	2,33E+04			7,200	8,84E+02
1,8562	2,24E+04			7,300	8,84E+02
1,9199	2,15E+04			7,400	8,84E+02
1,9851	2,06E+04			7,500	0,00E+00
2,0534	1,96E+04			7,600	0,00E+00
2,1244	1,87E+04			7,700	0,00E+00
2,1985	1,78E+04			7,800	0,00E+00
2,2753	1,69E+04			7,900	0,00E+00
2,354	1,61E+04			8,000	0,00E+00
2,4374	1,53E+04			8,100	0,00E+00
2,5239	1,45E+04			8,200	0,00E+00
2,6134	1,38E+04			8,300	0,00E+00
2,7056	1,30E+04			8,400	0,00E+00
2,8013	1,22E+04			8,500	0,00E+00
2,8993	1,15E+04			8,600	0,00E+00
3,0014	1,08E+04			8,700	0,00E+00
3,1086	1,03E+04			8,800	0,00E+00
3,2192	9,66E+03			8,900	0,00E+00
3,3319	9,10E+03			9,000	0,00E+00
3,4495	8,46E+03				
3,5717	7,90E+03				
3,6957	7,35E+03				
3,8241	6,80E+03				
3,9582	6,27E+03				
4,0964	5,79E+03				
4,2387	5,36E+03				
4,3852	4,97E+03				
4,5364	4,54E+03				
4,6929	4,16E+03				
4,8545	3,76E+03				
5,0218	3,45E+03				
5,1938	3,10E+03				

5,3703	2,79E+03				
5,5524	2,49E+03				
5,7412	2,24E+03				
5,9354	2,02E+03				
6,1361	1,78E+03				
6,343	1,56E+03				
6,556	1,38E+03				
6,7763	1,21E+03				
7,0033	1,06E+03				
7,2383	9,24E+02				
7,4808	8,09E+02				
7,7311	7,17E+02				
7,989	6,31E+02				
8,2551	5,48E+02				
8,5304	4,92E+02				
8,8153	4,44E+02				
9,1094	3,63E+02				
9,4125	3,36E+02				
9,7257	3,09E+02				
10,05	2,86E+02				
10,385	2,64E+02				
10,816	2,53E+02				

Figura 5.18

d_p(mm)	C_r(circularidad relativa)	d_p(mm)	C_r(circularidad relativa)	d_p(mm)	C_r(circularidad relativa)
0,17	2,12	0,68	1,29	1,45	1,46
0,17	2,11	0,68	1,29	1,46	1,49
0,17	2,10	0,68	1,29	1,46	1,50
0,17	2,09	0,68	1,29	1,46	1,50
0,17	2,09	0,68	1,29	1,47	1,50
0,17	2,08	0,68	1,29	1,48	1,50
0,17	2,07	0,68	1,30	1,48	1,52
0,17	2,06	0,70	1,30	1,48	1,54
0,17	2,13	0,70	1,30	1,49	1,54
0,17	2,12	0,70	1,30	1,50	1,56
0,17	2,11	0,70	1,30	1,50	1,56
0,17	2,11	0,70	1,30	1,50	1,56
0,17	2,09	0,70	1,30	1,50	1,56
0,17	2,08	0,70	1,31	1,50	1,56
0,17	2,07	0,72	1,31	1,51	1,58
0,17	2,07	0,72	1,31	1,54	1,59

0,17	2,06	0,72	1,31	1,55	1,59
0,17	2,05	0,72	1,31	1,56	1,59
0,17	2,04	0,72	1,31	1,57	1,58
0,17	2,03	0,72	1,31	1,57	1,58
0,17	2,02	0,72	1,31	1,59	1,57
0,17	2,02	0,72	1,31	1,59	1,66
0,17	2,01	0,72	1,31	1,59	1,66
0,17	2,01	0,72	1,30	1,59	1,68
0,17	2,00	0,72	1,31	1,59	1,69
0,17	2,00	0,72	1,31	1,59	1,69
0,17	1,99	0,72	1,31	1,59	1,68
0,17	1,98	0,74	1,31	1,60	1,69
0,17	1,97	0,74	1,32	1,62	1,70
0,17	1,97	0,74	1,32	1,62	1,72
0,24	1,96	0,74	1,32	1,62	1,72
0,24	1,96	0,76	1,32	1,62	1,72
0,24	1,96	0,76	1,32	1,63	1,74
0,24	1,95	0,76	1,32	1,63	1,74
0,24	1,94	0,76	1,32	1,66	1,75
0,24	1,93	0,76	1,33	1,67	1,77
0,24	1,93	0,76	1,33	1,70	1,77
0,24	1,92	0,76	1,33	1,71	1,79
0,24	1,91	0,76	1,33	1,71	1,79
0,24	1,91	0,76	1,35	1,72	1,79
0,24	1,90	0,77	1,35	1,72	1,80
0,24	1,90	0,77	1,34	1,72	1,79
0,24	1,90	0,77	1,34	1,72	1,79
0,24	1,89	0,77	1,34	1,73	1,78
0,24	1,89	0,79	1,35	1,74	1,79
0,24	1,88	0,79	1,35	1,75	1,80
0,24	1,88	0,79	1,35	1,76	1,80
0,24	1,88	0,79	1,35	1,76	1,81
0,29	1,87	0,79	1,36	1,76	1,81
0,29	1,86	0,79	1,35	1,77	1,83
0,29	1,86	0,79	1,35	1,80	1,83
0,29	1,85	0,79	1,35	1,80	1,85
0,29	1,85	0,79	1,36	1,82	1,86
0,29	1,84	0,81	1,36	1,84	1,89
0,29	1,84	0,81	1,35	1,84	1,90
0,29	1,82	0,81	1,35	1,87	1,90
0,29	1,83	0,81	1,36	1,87	1,91
0,34	1,82	0,81	1,36	1,89	1,90
0,34	1,80	0,83	1,35	1,90	1,92
0,34	1,80	0,83	1,35	1,93	1,92
0,34	1,77	0,83	1,36	1,94	1,93
0,34	1,77	0,83	1,36	1,97	1,94

0,34	1,77	0,83	1,36	1,97	1,98
0,34	1,76	0,85	1,36	1,99	2,01
0,34	1,76	0,85	1,36	2,01	2,03
0,34	1,75	0,86	1,35	2,01	2,03
0,34	1,74	0,86	1,35	2,02	2,03
0,34	1,74	0,86	1,36	2,04	2,03
0,34	1,72	0,88	1,36	2,10	2,07
0,34	1,67	0,88	1,36	2,10	2,08
0,34	1,66	0,88	1,36	2,10	2,10
0,34	1,66	0,88	1,36	2,12	2,10
0,34	1,65	0,88	1,36	2,12	2,11
0,34	1,64	0,88	1,36	2,13	2,11
0,34	1,64	0,89	1,35	2,16	2,14
0,34	1,63	0,89	1,35	2,17	2,14
0,34	1,62	0,89	1,35	2,19	2,14
0,34	1,62	0,89	1,34	2,24	2,15
0,34	1,63	0,89	1,34	2,24	2,16
0,34	1,62	0,89	1,33	2,27	2,17
0,34	1,61	0,89	1,33	2,27	2,19
0,34	1,61	0,91	1,32	2,28	2,21
0,34	1,61	0,91	1,32	2,29	2,22
0,34	1,61	0,91	1,31	2,29	2,25
0,38	1,61	0,91	1,32	2,29	2,27
0,38	1,60	0,91	1,32	2,32	2,29
0,38	1,60	0,91	1,33	2,35	2,30
0,38	1,60	0,91	1,33	2,37	2,31
0,38	1,57	0,91	1,33	2,37	2,31
0,38	1,57	0,91	1,33	2,38	2,33
0,38	1,50	0,91	1,32	2,46	2,33
0,38	1,50	0,91	1,32	2,48	2,35
0,38	1,50	0,91	1,32	2,50	2,37
0,41	1,49	0,93	1,32	2,52	2,39
0,41	1,49	0,93	1,32	2,53	2,42
0,41	1,48	0,93	1,32	2,55	2,43
0,41	1,48	0,93	1,32	2,55	2,44
0,41	1,47	0,93	1,33	2,58	2,46
0,41	1,47	0,94	1,33	2,61	2,47
0,41	1,46	0,94	1,32	2,70	2,48
0,41	1,46	0,94	1,32	2,70	2,51
0,41	1,46	0,94	1,32	2,75	2,54
0,41	1,45	0,94	1,32	2,75	2,53
0,41	1,45	0,96	1,32	2,75	2,62
0,41	1,44	0,96	1,32	2,76	2,71
0,41	1,44	0,96	1,32	2,86	2,72
0,45	1,44	0,97	1,32	2,90	2,73
0,45	1,43	0,97	1,31	2,90	2,73

0,45	1,43	0,97	1,31	2,91	2,73
0,45	1,38	0,97	1,32	2,92	2,74
0,45	1,38	0,99	1,32	2,96	2,73
0,45	1,37	0,99	1,31	3,04	2,74
0,45	1,37	0,99	1,31	3,09	2,76
0,45	1,37	0,99	1,31	3,09	2,78
0,45	1,37	0,99	1,31	3,13	2,79
0,45	1,37	0,99	1,31	3,13	2,78
0,45	1,36	0,99	1,31	3,17	2,80
0,48	1,36	1,00	1,31	3,24	2,82
0,48	1,36	1,00	1,32	3,30	2,84
0,48	1,36	1,00	1,32	3,32	2,86
0,48	1,36	1,00	1,32	3,33	2,87
0,48	1,36	1,01	1,32	3,41	2,89
0,48	1,35	1,01	1,32	3,43	2,81
0,48	1,35	1,01	1,32	3,46	2,82
0,48	1,34	1,01	1,32	3,50	2,82
0,48	1,34	1,01	1,32	3,53	2,83
0,48	1,33	1,03	1,31	3,55	2,85
0,48	1,33	1,03	1,31	3,57	2,87
0,48	1,33	1,04	1,32	3,59	2,88
0,48	1,33	1,04	1,32	3,59	2,90
0,51	1,32	1,04	1,33	3,61	2,89
0,51	1,32	1,06	1,34	3,61	2,91
0,51	1,31	1,06	1,34	3,66	2,90
0,51	1,31	1,06	1,34	3,84	2,90
0,51	1,31	1,07	1,34	3,85	2,93
0,51	1,30	1,07	1,34	3,87	2,94
0,51	1,30	1,08	1,33	3,89	2,93
0,51	1,30	1,08	1,34	3,90	2,95
0,53	1,30	1,08	1,34	3,96	2,95
0,53	1,29	1,08	1,33	4,03	2,98
0,53	1,30	1,08	1,33	4,10	3,00
0,53	1,29	1,08	1,33	4,10	3,02
0,53	1,29	1,08	1,35	4,26	3,04
0,53	1,28	1,10	1,35	4,29	3,07
0,53	1,28	1,10	1,35	4,50	3,10
0,53	1,28	1,11	1,34	4,53	3,10
0,53	1,28	1,11	1,35	4,81	3,12
0,53	1,27	1,11	1,36	5,12	3,16
0,53	1,27	1,11	1,35	5,27	3,15
0,53	1,27	1,12	1,35	5,75	3,18
0,56	1,27	1,12	1,35	6,28	3,19
0,56	1,27	1,15	1,35	6,76	3,21
0,56	1,27	1,15	1,35	7,06	3,20
0,56	1,27	1,15	1,35	9,51	3,23

0,56	1,27	1,16	1,35	10,00	3,20
0,56	1,27	1,16	1,36		
0,56	1,26	1,16	1,36		
0,56	1,25	1,17	1,36		
0,56	1,25	1,17	1,37		
0,56	1,25	1,17	1,37		
0,56	1,25	1,18	1,37		
0,59	1,24	1,20	1,36		
0,59	1,24	1,21	1,36		
0,59	1,24	1,21	1,37		
0,59	1,25	1,22	1,37		
0,59	1,25	1,22	1,37		
0,59	1,25	1,23	1,37		
0,59	1,25	1,24	1,37		
0,59	1,25	1,24	1,36		
0,61	1,25	1,25	1,36		
0,61	1,25	1,26	1,36		
0,61	1,25	1,28	1,36		
0,61	1,25	1,29	1,37		
0,61	1,26	1,29	1,38		
0,63	1,26	1,31	1,38		
0,63	1,26	1,33	1,39		
0,63	1,27	1,34	1,39		
0,63	1,27	1,34	1,39		
0,63	1,27	1,35	1,40		
0,63	1,26	1,35	1,40		
0,63	1,27	1,36	1,39		
0,63	1,27	1,36	1,39		
0,63	1,27	1,36	1,40		
0,65	1,28	1,36	1,40		
0,65	1,28	1,37	1,40		
0,65	1,28	1,38	1,40		
0,65	1,28	1,38	1,41		
0,65	1,28	1,38	1,41		
0,65	1,28	1,39	1,41		
0,65	1,29	1,39	1,41		
0,65	1,29	1,40	1,41		
0,65	1,29	1,40	1,41		
0,65	1,29	1,41	1,41		
0,65	1,28	1,41	1,42		
0,65	1,29	1,41	1,43		
0,68	1,28	1,41	1,44		
0,68	1,29	1,42	1,46		
0,68	1,29	1,42	1,47		
0,68	1,29	1,43	1,46		
0,68	1,29	1,45	1,46		

Figura 5.21

Contador optico		SMPS		Impactador		SEM	
d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)	d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)	d_p (mm)	$dc_m/d\log(d_p)$ (g/Nm ³)	d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)
0,295	1,68E+02	0,0143	5,00E+04	0,100	0,000	0,357	0,00E+00
0,302	2,40E+02	0,0149	4,31E+04	0,101	0,232	0,450	4,91E+05
0,305	2,40E+02	0,0154	3,12E+04	0,507	0,232	0,567	5,88E+05
0,309	3,36E+02	0,0160	2,73E+04	0,508	0,000	0,713	8,23E+05
0,315	9,59E+02	0,0165	2,09E+04	0,509	4,538	0,898	9,53E+05
0,316	9,59E+02	0,0172	1,74E+04	0,751	4,538	1,131	1,09E+06
0,322	2,39E+03	0,0178	1,21E+04	0,752	0,000	1,424	1,13E+06
0,328	4,43E+03	0,0184	8,32E+03	0,753	5,106	1,792	1,12E+06
0,328	4,43E+03	0,0191	7,27E+03	1,223	5,106	2,257	9,72E+05
0,334	1,43E+04	0,0198	6,15E+03	1,224	0,000	2,841	7,78E+05
0,340	1,96E+04	0,0205	4,27E+03	1,225	3,734	3,577	6,18E+05
0,341	1,96E+04	0,0213	4,27E+03	2,441	3,734	4,504	4,52E+05
0,347	2,36E+04	0,0221	3,12E+03	2,442	0,000	5,670	2,90E+05
0,352	2,49E+04	0,0229	3,25E+03	2,443	1,991	7,138	1,99E+05
0,356	2,84E+04	0,0237	3,37E+03	3,906	1,991	8,987	1,36E+05
0,364	2,96E+04	0,0246	2,87E+03	3,907	0,000		
0,365	2,96E+04	0,0255	4,24E+03	3,908	2,177		
0,370	3,18E+04	0,0264	5,02E+03	5,617	2,177		
0,378	3,16E+04	0,0274	5,31E+03	5,618	0,000		
0,379	3,16E+04	0,0284	5,88E+03	5,619	1,245		
0,387	2,58E+04	0,0294	6,06E+03	8,330	1,245		
0,392	2,49E+04	0,0305	8,74E+03	8,331	0,000		
0,395	2,49E+04	0,0316	8,44E+03	8,332	1,054		
0,403	2,63E+04	0,0328	1,31E+04	13,306	1,054		
0,407	2,50E+04	0,0340	1,36E+04	13,307	0,000		
0,410	2,75E+04	0,0352	1,74E+04	13,308	1,922		
0,420	3,26E+04	0,0365	1,95E+04	24,999	1,922		
0,422	3,26E+04	0,0379	2,39E+04	25,000	0,000		
0,430	3,67E+04	0,0392	2,65E+04				
0,437	4,32E+04	0,0407	3,10E+04				
0,440	4,32E+04	0,0422	3,35E+04				
0,450	4,99E+04	0,0437	3,79E+04				
0,453	5,29E+04	0,0453	3,92E+04				
0,459	6,37E+04	0,0470	4,31E+04				
0,469	7,32E+04	0,0487	4,56E+04				
0,470	7,32E+04	0,0505	4,36E+04				
0,478	9,32E+04	0,0523	4,65E+04				
0,487	1,01E+05	0,0542	5,07E+04				
0,489	1,15E+05	0,0562	5,52E+04				

0,500	1,30E+05	0,0583	5,71E+04				
0,505	1,41E+05	0,0604	6,06E+04				
0,511	1,58E+05	0,0626	6,19E+04				
0,523	1,87E+05	0,0649	5,92E+04				
0,524	1,87E+05	0,0673	6,28E+04				
0,534	2,30E+05	0,0698	6,85E+04				
0,542	2,51E+05	0,0723	7,45E+04				
0,545	2,66E+05	0,0750	7,48E+04				
0,557	2,96E+05	0,0777	7,24E+04				
0,562	2,96E+05	0,0806	7,58E+04				
0,571	3,48E+05	0,0835	7,94E+04				
0,583	4,12E+05	0,0866	7,87E+04				
0,585	4,12E+05	0,0898	8,12E+04				
0,597	4,71E+05	0,0931	8,51E+04				
0,604	5,03E+05	0,0965	8,57E+04				
0,610	5,29E+05	0,1000	8,30E+04				
0,626	5,71E+05	0,1037	8,66E+04				
0,626	5,71E+05	0,1075	8,49E+04				
0,641	6,52E+05	0,1114	8,95E+04				
0,649	6,96E+05	0,1155	9,01E+04				
0,656	7,07E+05	0,1197	8,78E+04				
0,671	7,67E+05	0,1241	8,56E+04				
0,673	7,94E+05	0,1286	8,72E+04				
0,687	8,24E+05	0,1334	8,70E+04				
0,698	9,03E+05	0,1382	8,69E+04				
0,703	9,13E+05	0,1433	8,83E+04				
0,719	9,74E+05	0,1486	8,86E+04				
0,723	1,03E+06	0,1540	8,48E+04				
0,737	1,04E+06	0,1596	8,47E+04				
0,757	1,07E+06	0,1655	8,37E+04				
0,776	1,07E+06	0,1715	8,14E+04				
0,795	1,12E+06	0,1778	8,31E+04				
0,816	1,13E+06	0,1843	8,43E+04				
0,836	1,13E+06	0,1911	7,89E+04				
0,858	1,14E+06	0,1981	7,68E+04				
0,880	1,12E+06	0,2054	7,53E+04				
0,904	1,12E+06	0,2129	7,41E+04				
0,929	1,10E+06	0,2207	7,11E+04				
0,954	1,08E+06	0,2288	6,98E+04				
0,980	1,05E+06	0,2371	6,48E+04				
1,007	1,01E+06	0,2458	6,53E+04				
1,035	9,81E+05	0,2548	7,10E+04				
1,064	9,22E+05	0,2642	6,54E+04				
1,095	8,81E+05	0,2738	5,37E+04				
1,128	8,27E+05	0,2839	6,03E+04				
1,161	7,77E+05	0,2943					

1,195	7,28E+05	0,2948				
1,231	6,73E+05	0,3017	6,33E+04			
1,268	6,22E+05	0,3051				
1,307	5,66E+05	0,3085				
1,347	5,16E+05	0,3152	5,79E+04			
1,389	4,71E+05	0,3162				
1,433	4,22E+05	0,3217	5,85E+04			
1,478	3,81E+05	0,3278				
1,525	3,38E+05	0,3281				
1,575	3,02E+05	0,3344	5,73E+04			
1,627	2,65E+05	0,3398				
1,682	2,33E+05	0,3405				
1,738	2,04E+05	0,3466	5,62E+04			
1,796	1,77E+05	0,3523				
1,856	1,53E+05	0,3555				
1,920	1,31E+05	0,3642	5,05E+04			
1,985	1,11E+05	0,3652				
2,053	9,36E+04	0,3699				
2,124	7,86E+04	0,3783	5,30E+04			
2,199	6,59E+04	0,3786				
2,275	5,41E+04	0,3865	5,45E+04			
2,354	4,47E+04	0,3924				
2,437	3,64E+04	0,3945				
2,524	2,95E+04	0,4025	5,38E+04			
2,613	2,38E+04	0,4068				
2,706	1,90E+04	0,4103				
2,801	1,50E+04	0,4204	4,91E+04			
2,899	1,17E+04	0,4217				
3,001	9,36E+03	0,4304	4,68E+04			
3,109	7,29E+03	0,4371				
3,219	5,68E+03	0,4402				
3,332	4,39E+03	0,4498	4,86E+04			
3,450	3,39E+03	0,4532				
3,572	2,65E+03	0,4592				
3,696	1,99E+03	0,4685	5,03E+04			
3,824	1,53E+03	0,4698				
3,958	1,20E+03	0,4776	4,92E+04			
4,096	9,44E+02	0,4870				
4,239	7,07E+02	0,4889				
4,385	5,36E+02	0,4999	5,04E+04			
4,536	4,50E+02	0,5048				
4,693	3,95E+02	0,5108	5,23E+04			
4,855	3,08E+02	0,5233				
5,022	2,57E+02	0,5236				
5,194	2,22E+02	0,5342	5,03E+04			
5,370	1,90E+02	0,5425				

5,552	1,54E+02	0,5445				
5,741	1,38E+02	0,5568	5,33E+04			
5,935	1,22E+02	0,5623				
6,136	1,22E+02	0,5709	5,47E+04			
6,343	1,09E+02	0,5829				
6,556	8,99E+01	0,5849				
6,776	7,71E+01	0,5967	5,64E+04			
7,003	8,03E+01	0,6043				
7,238	8,03E+01	0,6103				
7,481	7,07E+01	0,6256	5,81E+04			
7,731	6,75E+01	0,6264				
7,989	5,78E+01	0,6407	5,69E+04			
8,255	5,46E+01	0,6494				
8,530	4,82E+01	0,6557				
8,815	3,85E+01	0,6705	6,30E+04			
9,109	3,21E+01	0,6732				
9,413	3,53E+01	0,6869	6,40E+04			
9,726	3,53E+01	0,6978				
10,050	2,65E+01	0,7032				
10,385	3,03E+01	0,7194	7,48E+04			
10,816	2,94E+01					

Figura 5.23

d_p(mm)	C_r(circularidad relativa)
0,25	1,91
0,32	1,84
0,40	1,77
0,50	1,66
0,63	1,61
0,80	1,52
1,00	1,48
1,26	1,51
1,59	1,57
2,00	1,69
2,52	1,88
3,17	2,05
3,99	2,40
5,02	2,78
6,32	3,32
7,96	3,55
10,00	3,95

Figura 5.26

Contador optico		SMPS		Impactador		SEM	
d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)	d_p (mm)	$dc_m/d\log(d_p)$ (g/Nm ³)	d_p (mm)	$dc_m/d\log(d_p)$ (g/Nm ³)	d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)
0,251	0,00E+00	0,0102	2,15E+06	0,001	0,0000	0,001	2,41E+06
0,254	7,60E+04	0,0106	1,90E+06	0,001	0,0375	0,002	5,55E+06
0,257	7,74E+04	0,0109	1,75E+06	0,803	0,0375	0,003	9,64E+06
0,259	9,63E+04	0,0113	1,78E+06	0,804	0,0000	0,004	1,47E+07
0,262	8,46E+04	0,0118	1,92E+06	0,805	0,0000	0,006	2,12E+07
0,266	6,27E+04	0,0122	2,19E+06	1,202	0,0000	0,009	2,93E+07
0,270	7,08E+04	0,0126	2,56E+06	1,203	0,0000	0,014	4,10E+07
0,273	8,18E+04	0,0131	3,08E+06	1,204	0,0071	0,020	4,71E+07
0,277	7,00E+04	0,0136	3,62E+06	1,965	0,0071	0,030	4,43E+07
0,282	4,62E+04	0,0141	4,34E+06	1,966	0,0000	0,044	4,02E+07
0,287	6,79E+04	0,0146	5,19E+06	1,967	0,0030	0,065	2,61E+07
0,291	4,94E+04	0,0151	6,20E+06	3,936	0,0030	0,096	2,75E+06
0,296	3,86E+04	0,0157	7,27E+06	3,937	0,0000	0,142	3,59E+05
0,302	3,20E+04	0,0163	8,43E+06	3,938	0,0000	0,211	9,57E+05
0,309	2,80E+04	0,0169	9,46E+06	6,305	0,0000	0,114	1,58E+05
0,315	2,79E+04	0,0175	1,06E+07	6,306	0,0000	0,198	2,56E+05
0,321	1,70E+04	0,0181	1,28E+07	6,307	0,0076	0,344	3,60E+05
0,329	1,20E+04	0,0188	1,42E+07	9,072	0,0076	0,598	4,61E+05
0,338	1,02E+04	0,0195	1,59E+07	9,073	0,0000	1,038	4,97E+05
0,346	8,46E+03	0,0202	1,74E+07	9,074	0,0053	1,805	5,34E+05
0,354	5,53E+03	0,0209	1,94E+07	13,456	0,0053	3,136	5,42E+05
0,364	3,89E+03	0,0217	2,19E+07	13,457	0,0000	5,450	4,77E+05
0,375	3,02E+03	0,0225	2,37E+07	13,458	0,0030	9,470	3,59E+05
0,385	2,50E+03	0,0233	2,71E+07	21,502	0,0030	16,458	8,42E+04
0,395	1,61E+03	0,0241	3,04E+07	21,503	0,0000	28,600	1,25E+04
0,408	1,09E+03	0,0250	3,20E+07	21,504	0,0000	49,702	3,22E+04
0,422	8,74E+02	0,0259	3,31E+07	49,999	0,0000	50,000	1,40E-02
0,435	7,75E+02	0,0269	3,52E+07	50,000	0,0000		
0,448	4,92E+02	0,0279	3,64E+07				
0,465	3,88E+02	0,0289	4,03E+07				
0,481	3,11E+02	0,0300	4,21E+07				
0,498	2,54E+02	0,0311	4,03E+07				
0,514	2,17E+02	0,0322	4,42E+07				
0,535	1,44E+02	0,0334	4,45E+07				
0,556	1,29E+02	0,0346	4,37E+07				
0,577	1,10E+02	0,0359	3,84E+07				
0,598	7,73E+01	0,0372	3,73E+07				
0,624	6,38E+01	0,0385	3,61E+07				

0,650	5,30E+01	0,0400	3,38E+07				
0,676	4,33E+01	0,0414	3,24E+07				
0,702	3,09E+01	0,0429	3,04E+07				
0,735	2,57E+01	0,0445	2,99E+07				
0,767	2,22E+01	0,0461	2,80E+07				
0,800	2,74E+01	0,0478	2,53E+07				
0,832	1,75E+01	0,0496	2,39E+07				
0,873	1,53E+01	0,0514	2,13E+07				
0,913	1,75E+01	0,0533	1,81E+07				
0,954	1,73E+01	0,0552	1,54E+07				
0,994	1,22E+01	0,0573	1,47E+07				
1,044	1,18E+01	0,0594	1,27E+07				
1,094	1,29E+01	0,0615	1,09E+07				
1,143	1,56E+01	0,0638	9,02E+06				
1,193	1,22E+01	0,0661	7,54E+06				
1,254	1,29E+01	0,0686	6,52E+06				
1,316	1,29E+01	0,0711	5,69E+06				
1,377	1,41E+01	0,0737	4,53E+06				
1,438	1,01E+01	0,0764	3,87E+06				
1,512	9,74E+00	0,0792	3,19E+06				
1,587	8,07E+00	0,0821	2,95E+06				
1,661	1,51E+01	0,0851	2,49E+06				
1,735	6,65E+00	0,0882	2,06E+06				
1,824	8,32E+00	0,0914	1,67E+06				
1,914	6,58E+00	0,0948	1,35E+06				
2,003	4,74E+00	0,0982	1,19E+06				
2,092	7,86E+00	0,1018	1,07E+06				
2,198	6,64E+00	0,1056	8,91E+05				
2,304	7,82E+00	0,1094	8,29E+05				
2,410	7,31E+00	0,1134	6,35E+05				
2,516	6,87E+00	0,1176	5,30E+05				
2,641	6,48E+00	0,1219	4,91E+05				
2,765	8,11E+00	0,1264	4,29E+05				
2,890	4,93E+00	0,1310	3,83E+05				
3,014	3,94E+00	0,1358	3,57E+05				
3,158	4,44E+00	0,1408	3,07E+05				
3,303	5,08E+00	0,1459	2,86E+05				
3,447	5,36E+00	0,1513	2,69E+05				
3,591	3,33E+00	0,1568	2,38E+05				
3,755	4,05E+00	0,1626	2,12E+05				
3,920	2,82E+00	0,1685	1,90E+05				
4,084	3,19E+00	0,1747	1,75E+05				
4,248	3,27E+00	0,1811	1,53E+05				
4,433	3,34E+00	0,1877	1,46E+05				
4,617	3,73E+00	0,1946	1,36E+05				
4,802	2,32E+00	0,2017	1,44E+05				

4,986	1,28E+00	0,2091	1,34E+05				
5,190	2,66E+00	0,2168	1,21E+05				
5,394	2,50E+00	0,2247	1,13E+05				
5,598	3,23E+00	0,2329	1,07E+05				
5,802	1,47E+00	0,2415	1,05E+05				
6,024	4,91E-01	0,2503	9,40E+04				
6,246	6,43E-01	0,2595	8,80E+04				
6,468	1,70E+00	0,2690	8,58E+04				
6,690	1,74E+00	0,2789	8,14E+04				
6,929	9,13E-01	0,2891	7,82E+04				
7,168	6,69E-01	0,2997	7,28E+04				
7,407	4,63E-01	0,3106	6,62E+04				
7,646	1,37E+00	0,3220	6,31E+04				
7,901	9,21E-01	0,3338	5,98E+04				
8,156	5,29E-01	0,3460	9,22E+03				
8,410	2,19E+00						
8,665	1,99E-01						
8,936	1,04E-01						
9,208	6,85E-01						
9,479	4,03E-01						
9,750	6,10E-01						
10,040	9,97E-02						
10,330	1,03E-01						
10,620	2,89E-01						
10,910	1,71E-01						
11,225	0,00E+00						
11,540	1,15E+00						
11,855	0,00E+00						
12,170	4,22E-01						
12,520	0,00E+00						
12,870	1,16E-01						
13,220	0,00E+00						
13,570	1,04E-01						
13,973	0,00E+00						
14,375	1,03E-01						
14,778	0,00E+00						
15,180	1,08E-01						
15,663	0,00E+00						
16,145	0,00E+00						
16,628	0,00E+00						
17,110	0,00E+00						
17,720	0,00E+00						
18,330	0,00E+00						
18,940	0,00E+00						
19,550	0,00E+00						

Figura 5.28

d_p(mm)	C_r (circularidad relativa)	d_p(mm)	C_r (circularidad relativa)
0,004	1,77	0,620	1,61
0,005	1,75	0,809	1,61
0,006	1,73	0,872	1,61
0,007	1,72	0,872	1,62
0,009	1,71	0,917	1,63
0,010	1,70	1,069	1,64
0,011	1,69	1,199	1,65
0,013	1,68	1,233	1,65
0,014	1,67	1,325	1,65
0,016	1,66	1,509	1,63
0,018	1,65	1,636	1,62
0,019	1,62	1,723	1,59
0,021	1,59	1,752	1,60
0,023	1,57	1,871	1,62
0,025	1,55	2,009	1,63
0,027	1,54	2,108	1,62
0,029	1,53	2,189	1,62
0,032	1,52	2,336	1,61
0,034	1,51	2,457	1,62
0,036	1,51	2,598	1,63
0,038	1,50	2,786	1,65
0,040	1,50	2,951	1,68
0,042	1,49	3,132	1,70
0,044	1,49	3,341	1,74
0,046	1,49	3,568	1,78
0,048	1,49	3,804	1,83
0,050	1,48	4,056	1,84
0,051	1,50	4,372	1,84
0,053	1,51	4,737	1,85
0,055	1,53	5,174	1,86
0,057	1,55	5,662	1,88
0,059	1,55	6,235	1,90
0,062	1,55	6,839	1,94
0,066	1,54	7,670	1,95
0,070	1,57	9,157	1,97
0,091	1,58	10,000	1,99
0,223	1,60		
0,547	1,60		
0,617	1,61		

0,617	1,61		
-------	------	--	--

Figura 5.30

ESP (ON) (30 kV)		ESP (OFF)	
d_p (mm)	$dc_m/d\log(d_p)$ (g/Nm ³)	d_p (mm)	$dc_m/d\log(d_p)$ (g/Nm ³)
0,529	0,000	0,499	0,000
0,530	0,000	0,500	0,000
0,531	0,197	0,501	4,576
0,779	0,197	0,737	4,576
0,780	0,000	0,738	0,000
0,781	0,436	0,739	5,135
1,262	0,436	1,197	5,135
1,263	0,000	1,198	0,000
1,264	0,107	1,199	3,750
2,507	0,107	2,384	3,750
2,508	0,000	2,385	0,000
2,509	0,021	2,386	1,996
4,005	0,021	3,811	1,996
4,006	0,000	3,812	0,000
4,007	0,029	3,813	2,181
5,754	0,029	5,478	2,181
5,755	0,000	5,479	0,000
5,756	0,030	5,480	1,247
8,527	0,030	8,119	1,247
8,528	0,000	8,120	0,000
8,529	0,009	8,121	1,055
13,614	0,009	12,967	1,055
13,615	0,000	12,968	0,000
13,616	0,000	12,969	1,848
25,000	0,000	25,000	1,848
25,100	0,000	25,100	0,000

Figura 5.31

d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³) (SMPS)						
	35 KV	30 KV	25 KV	20 KV	15 KV	10 KV	0 KV
0,016	8,25E+02	5,38E+02	1,23E+03	7,16E+02	2,05E+03	1,49E+04	4,24E+04
0,017	6,71E+02	1,83E+02	8,23E+02	5,79E+02	1,26E+03	1,21E+04	2,92E+04
0,017	7,72E+02	2,15E+02	4,15E+02	5,08E+02	9,22E+02	7,63E+03	2,13E+04

0,018	5,83E+02	2,06E+02	5,20E+02	3,77E+02	7,79E+02	6,94E+03	1,49E+04
0,018	5,80E+02	1,75E+02	3,23E+02	3,45E+02	6,34E+02	4,78E+03	1,26E+04
0,019	3,60E+02	1,47E+02	3,30E+02	3,47E+02	5,00E+02	4,07E+03	8,94E+03
0,020	5,63E+02	6,05E+01	3,11E+02	2,61E+02	3,73E+02	3,23E+03	6,89E+03
0,021	6,56E+02	1,16E+02	2,31E+02	1,98E+02	2,87E+02	2,44E+03	5,06E+03
0,021	6,36E+02	3,72E+01	2,17E+02	3,30E+02	2,93E+02	1,69E+03	4,15E+03
0,022	3,90E+02	7,17E+01	9,74E+01	1,43E+02	3,09E+02	1,76E+03	4,47E+03
0,023	4,46E+02	8,63E+01	1,90E+02	1,89E+02	2,85E+02	2,18E+03	5,00E+03
0,024	4,81E+02	6,62E+01	1,99E+02	1,69E+02	3,27E+02	1,84E+03	4,33E+03
0,025	4,81E+02	1,28E+02	3,04E+02	1,40E+02	3,39E+02	1,94E+03	6,17E+03
0,025	3,63E+02	9,30E+01	3,32E+02	2,67E+02	3,28E+02	2,40E+03	6,25E+03
0,026	4,22E+02	7,37E+01	2,02E+02	2,33E+02	3,81E+02	2,13E+03	8,25E+03
0,027	4,03E+02	5,90E+01	2,75E+02	2,41E+02	5,46E+02	2,69E+03	9,67E+03
0,028	3,26E+02	1,26E+02	3,08E+02	3,76E+02	6,00E+02	3,18E+03	1,10E+04
0,029	2,67E+02	2,29E+02	3,56E+02	2,39E+02	6,15E+02	3,35E+03	1,48E+04
0,031	3,54E+02	1,05E+02	3,71E+02	3,81E+02	7,21E+02	3,33E+03	1,50E+04
0,032	2,74E+02	1,14E+02	4,21E+02	2,94E+02	7,45E+02	4,14E+03	1,59E+04
0,033	3,28E+02	2,13E+02	4,18E+02	3,98E+02	8,14E+02	4,79E+03	2,10E+04
0,034	3,07E+02	2,13E+02	3,94E+02	5,57E+02	9,07E+02	6,17E+03	2,32E+04
0,035	3,13E+02	2,85E+02	6,01E+02	6,07E+02	1,17E+03	6,84E+03	2,65E+04
0,037	3,95E+02	3,11E+02	6,02E+02	5,47E+02	1,17E+03	7,92E+03	2,83E+04
0,038	4,24E+02	3,33E+02	6,28E+02	6,48E+02	1,39E+03	8,41E+03	3,44E+04
0,039	3,01E+02	2,40E+02	7,03E+02	7,03E+02	1,54E+03	9,77E+03	3,58E+04
0,041	3,90E+02	2,26E+02	9,77E+02	7,14E+02	1,74E+03	1,18E+04	3,97E+04
0,042	3,62E+02	3,17E+02	6,96E+02	7,97E+02	1,69E+03	1,26E+04	4,46E+04
0,044	4,32E+02	4,09E+02	8,93E+02	8,86E+02	1,91E+03	1,38E+04	4,90E+04
0,045	3,05E+02	2,75E+02	9,53E+02	9,96E+02	1,99E+03	1,57E+04	4,91E+04
0,047	4,60E+02	3,65E+02	1,28E+03	9,25E+02	2,49E+03	1,85E+04	5,64E+04
0,049	4,36E+02	5,23E+02	1,16E+03	1,12E+03	2,37E+03	1,94E+04	5,71E+04
0,050	3,49E+02	5,00E+02	8,81E+02	1,01E+03	2,61E+03	2,09E+04	5,92E+04
0,052	3,10E+02	3,71E+02	9,75E+02	1,18E+03	2,75E+03	2,21E+04	6,59E+04
0,054	2,99E+02	6,43E+02	1,05E+03	1,11E+03	2,79E+03	2,41E+04	6,53E+04
0,056	3,97E+02	4,33E+02	1,35E+03	1,14E+03	2,98E+03	2,54E+04	6,82E+04
0,058	3,64E+02	4,74E+02	1,17E+03	1,34E+03	3,21E+03	2,75E+04	6,82E+04
0,060	3,23E+02	4,20E+02	1,30E+03	1,22E+03	3,53E+03	2,97E+04	7,12E+04
0,063	4,23E+02	6,97E+02	1,23E+03	1,37E+03	3,68E+03	2,90E+04	7,10E+04
0,065	3,66E+02	7,09E+02	1,32E+03	1,33E+03	3,70E+03	3,11E+04	7,31E+04
0,067	3,64E+02	5,64E+02	1,29E+03	1,36E+03	4,13E+03	3,08E+04	7,77E+04
0,070	3,03E+02	6,99E+02	1,54E+03	1,42E+03	4,01E+03	3,20E+04	7,59E+04
0,072	3,15E+02	7,09E+02	1,44E+03	1,62E+03	4,30E+03	3,32E+04	8,06E+04
0,075	3,25E+02	6,11E+02	1,30E+03	1,59E+03	4,38E+03	3,51E+04	7,58E+04
0,078	3,28E+02	5,50E+02	1,41E+03	1,61E+03	4,39E+03	3,55E+04	8,00E+04
0,081	3,15E+02	5,11E+02	1,43E+03	1,64E+03	4,48E+03	3,72E+04	7,54E+04
0,084	3,47E+02	5,11E+02	1,42E+03	1,45E+03	4,38E+03	3,57E+04	7,74E+04
0,087	2,49E+02	5,66E+02	1,52E+03	1,89E+03	4,39E+03	3,61E+04	7,91E+04
0,090	3,08E+02	4,86E+02	1,46E+03	1,66E+03	4,69E+03	3,84E+04	7,82E+04

0,093	3,31E+02	6,63E+02	1,56E+03	1,56E+03	4,84E+03	3,87E+04	8,24E+04
0,096	3,10E+02	4,55E+02	1,49E+03	1,76E+03	4,70E+03	3,82E+04	7,60E+04
0,100	3,16E+02	5,89E+02	1,48E+03	1,57E+03	4,96E+03	3,73E+04	7,96E+04
0,104	3,16E+02	5,54E+02	1,73E+03	1,60E+03	4,84E+03	4,08E+04	8,25E+04
0,107	3,21E+02	5,67E+02	1,64E+03	1,70E+03	4,91E+03	4,06E+04	7,56E+04
0,111	2,29E+02	5,15E+02	1,48E+03	1,63E+03	4,93E+03	4,10E+04	7,80E+04
0,115	2,90E+02	5,01E+02	1,63E+03	1,62E+03	5,04E+03	4,09E+04	8,03E+04
0,120	2,26E+02	6,20E+02	1,65E+03	1,76E+03	4,99E+03	4,14E+04	7,71E+04
0,124	2,63E+02	6,61E+02	1,66E+03	1,65E+03	4,59E+03	4,20E+04	7,72E+04
0,129	3,69E+02	6,15E+02	1,52E+03	1,51E+03	4,80E+03	4,09E+04	7,98E+04
0,133	2,60E+02	6,45E+02	1,49E+03	1,70E+03	4,78E+03	4,12E+04	7,74E+04
0,138	2,01E+02	6,11E+02	1,65E+03	1,59E+03	4,67E+03	4,23E+04	7,68E+04
0,143	2,37E+02	4,88E+02	1,61E+03	1,51E+03	4,66E+03	4,26E+04	7,57E+04
0,149	2,35E+02	4,59E+02	1,55E+03	1,39E+03	4,63E+03	4,23E+04	7,18E+04
0,154	2,09E+02	5,56E+02	1,66E+03	1,33E+03	4,60E+03	4,25E+04	7,46E+04
0,160	2,69E+02	5,19E+02	1,57E+03	1,37E+03	4,75E+03	4,11E+04	6,69E+04
0,165	2,03E+02	4,90E+02	1,43E+03	1,26E+03	4,63E+03	4,09E+04	7,48E+04
0,172	1,70E+02	3,77E+02	1,44E+03	1,37E+03	4,67E+03	4,12E+04	7,33E+04
0,178	2,09E+02	5,03E+02	1,48E+03	1,37E+03	4,46E+03	3,99E+04	6,93E+04
0,184	1,97E+02	4,96E+02	1,69E+03	1,38E+03	4,25E+03	4,02E+04	6,68E+04
0,191	1,52E+02	5,12E+02	1,58E+03	1,35E+03	3,84E+03	4,11E+04	6,55E+04
0,198	1,52E+02	4,85E+02	1,44E+03	1,19E+03	4,21E+03	3,98E+04	6,35E+04
0,205	2,25E+02	4,59E+02	1,47E+03	1,28E+03	4,15E+03	4,00E+04	6,09E+04
0,213	2,30E+02	4,84E+02	1,33E+03	1,22E+03	4,08E+03	3,91E+04	5,83E+04
0,221	2,07E+02	4,52E+02	1,48E+03	1,16E+03	4,12E+03	3,91E+04	5,68E+04
0,229	1,57E+02	4,52E+02	1,26E+03	1,07E+03	3,72E+03	3,77E+04	5,61E+04
0,237	1,74E+02	4,85E+02	1,33E+03	1,08E+03	4,08E+03	3,89E+04	5,39E+04
0,246	1,93E+02	4,92E+02	1,26E+03	1,18E+03	3,59E+03	3,63E+04	5,07E+04
0,255	2,42E+02	3,87E+02	1,26E+03	1,18E+03	3,57E+03	3,59E+04	4,79E+04
0,264	2,11E+02	3,07E+02	1,08E+03	1,06E+03	3,91E+03	3,66E+04	4,80E+04
0,274	2,30E+02	3,68E+02	9,54E+02	9,77E+02	3,68E+03	3,60E+04	4,66E+04
0,284	1,94E+02	3,51E+02	9,70E+02	1,14E+03	3,25E+03	3,48E+04	4,25E+04
0,294	2,12E+02	2,86E+02	9,91E+02	9,64E+02	3,20E+03	3,48E+04	4,11E+04
0,305	1,63E+02	2,87E+02	1,03E+03	1,12E+03	3,20E+03	3,27E+04	4,15E+04
0,316	9,98E+01	4,01E+02	9,99E+02	9,18E+02	3,11E+03	3,28E+04	4,05E+04
0,328	1,21E+02	3,51E+02	9,10E+02	7,90E+02	3,19E+03	2,98E+04	3,79E+04
0,340	1,92E+02	2,79E+02	9,09E+02	7,90E+02	2,72E+03	3,05E+04	3,63E+04
0,352	1,27E+02	3,16E+02	8,52E+02	8,41E+02	2,59E+03	3,02E+04	3,57E+04
0,365	1,16E+02	3,78E+02	8,63E+02	7,95E+02	3,07E+03	2,90E+04	3,53E+04
0,379	1,69E+02	4,53E+02	9,45E+02	8,62E+02	2,89E+03	2,90E+04	3,23E+04
0,392	9,80E+01	3,06E+02	9,02E+02	6,47E+02	2,67E+03	2,90E+04	3,07E+04
0,407	1,45E+02	1,83E+02	7,65E+02	7,41E+02	2,67E+03	2,76E+04	3,10E+04
0,422	2,07E+02	2,50E+02	7,96E+02	6,64E+02	2,64E+03	2,68E+04	2,95E+04
0,437	1,90E+02	3,33E+02	7,79E+02	6,75E+02	2,24E+03	2,58E+04	2,96E+04
0,453	2,56E+02	2,37E+02	6,42E+02	7,39E+02	2,55E+03	2,48E+04	2,90E+04
0,470	1,75E+02	2,84E+02	9,03E+02	6,06E+02	2,27E+03	2,48E+04	2,72E+04

0,487	1,46E+02	2,40E+02	7,05E+02	6,31E+02	2,32E+03	2,44E+04	2,43E+04
0,505	1,60E+02	2,25E+02	7,34E+02	6,06E+02	2,24E+03	2,34E+04	2,49E+04
0,523	1,71E+02	1,82E+02	6,70E+02	7,23E+02	2,23E+03	2,22E+04	2,55E+04
0,542	1,37E+02	2,95E+02	7,54E+02	5,70E+02	2,00E+03	2,21E+04	2,33E+04
0,562	1,53E+02	1,76E+02	5,56E+02	7,45E+02	1,87E+03	2,13E+04	2,32E+04
0,583	1,81E+02	1,47E+02	4,25E+02	5,43E+02	1,97E+03	1,98E+04	2,11E+04
0,604	1,90E+02	1,04E+02	6,28E+02	5,55E+02	1,67E+03	2,07E+04	2,09E+04

$d_p(\text{mm})$	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³) (Contador óptico)						
	35 KV	30 KV	25 KV	20 KV	15 KV	10 KV	0 KV
0,295	4,59E+02	7,58E+02	2,03E+03	2,32E+03	7,97E+03	2,74E+04	4,57E+04
0,302	3,12E+02	5,59E+02	1,64E+03	2,81E+03	6,94E+03	2,46E+04	3,68E+04
0,309	2,20E+02	4,39E+02	1,23E+03	1,72E+03	5,24E+03	1,82E+04	2,84E+04
0,315	9,18E+01	3,59E+02	1,11E+03	1,54E+03	4,02E+03	1,38E+04	2,24E+04
0,322	1,65E+02	3,59E+02	5,66E+02	1,15E+03	3,42E+03	1,08E+04	1,74E+04
0,328	1,10E+02	2,20E+02	9,18E+02	6,25E+02	2,41E+03	9,00E+03	1,62E+04
0,334	1,47E+02	1,80E+02	4,49E+02	6,64E+02	2,83E+03	9,57E+03	1,37E+04
0,341	1,28E+02	7,98E+01	5,86E+02	7,23E+02	2,50E+03	8,74E+03	1,46E+04
0,347	5,51E+01	1,40E+02	6,44E+02	7,42E+02	2,58E+03	8,59E+03	1,44E+04
0,356	3,49E+02	4,79E+02	1,15E+03	2,15E+03	5,33E+03	1,99E+04	3,37E+04
0,364	2,20E+02	2,79E+02	4,69E+02	8,40E+02	2,70E+03	8,80E+03	1,41E+04
0,370	7,34E+01	2,40E+02	7,03E+02	1,04E+03	2,96E+03	1,09E+04	1,54E+04
0,378	2,57E+02	5,39E+02	1,54E+03	2,09E+03	5,28E+03	2,08E+04	3,63E+04
0,387	2,94E+02	2,99E+02	7,62E+02	1,04E+03	3,48E+03	1,08E+04	1,76E+04
0,395	3,49E+02	6,39E+02	1,56E+03	2,91E+03	6,39E+03	2,41E+04	3,95E+04
0,403	2,39E+02	2,20E+02	1,19E+03	1,66E+03	3,61E+03	1,33E+04	2,06E+04
0,410	4,59E+02	5,59E+02	1,78E+03	2,87E+03	8,05E+03	2,73E+04	4,65E+04
0,420	3,67E+02	8,18E+02	1,78E+03	3,12E+03	8,43E+03	3,15E+04	5,16E+04
0,430	3,85E+02	9,18E+02	2,54E+03	3,38E+03	1,00E+04	3,29E+04	5,60E+04
0,440	5,69E+02	1,04E+03	3,12E+03	4,06E+03	9,77E+03	3,85E+04	6,04E+04
0,450	6,06E+02	9,78E+02	3,14E+03	4,16E+03	1,10E+04	4,09E+04	6,68E+04
0,459	8,62E+02	1,02E+03	3,44E+03	4,80E+03	1,30E+04	4,44E+04	7,45E+04
0,469	8,44E+02	1,22E+03	3,96E+03	5,31E+03	1,36E+04	4,82E+04	7,92E+04
0,478	1,01E+03	1,14E+03	3,93E+03	5,61E+03	1,54E+04	5,34E+04	8,57E+04
0,489	1,76E+03	2,42E+03	6,37E+03	9,45E+03	2,47E+04	8,73E+04	1,41E+05
0,500	1,34E+03	2,22E+03	4,84E+03	7,27E+03	1,90E+04	6,46E+04	1,04E+05
0,511	1,95E+03	2,81E+03	8,40E+03	1,19E+04	3,31E+04	1,11E+05	1,72E+05
0,524	2,02E+03	3,43E+03	8,63E+03	1,25E+04	3,26E+04	1,12E+05	1,73E+05
0,534	1,65E+03	2,85E+03	6,33E+03	9,69E+03	2,35E+04	8,43E+04	1,34E+05
0,545	2,59E+03	4,01E+03	1,07E+04	1,58E+04	3,88E+04	1,38E+05	2,15E+05
0,557	2,59E+03	4,45E+03	1,20E+04	1,61E+04	4,18E+04	1,46E+05	2,31E+05
0,571	4,06E+03	7,47E+03	1,67E+04	2,47E+04	5,97E+04	2,21E+05	3,44E+05
0,585	3,36E+03	5,51E+03	1,48E+04	1,99E+04	5,12E+04	1,77E+05	2,82E+05
0,597	3,56E+03	5,23E+03	1,48E+04	2,27E+04	5,50E+04	1,85E+05	2,94E+05
0,610	5,10E+03	7,88E+03	2,11E+04	3,15E+04	7,99E+04	2,69E+05	4,28E+05

0,626	5,23E+03	9,02E+03	2,37E+04	3,35E+04	8,29E+04	2,94E+05	4,66E+05
0,641	6,17E+03	9,40E+03	2,50E+04	3,51E+04	9,17E+04	3,18E+05	5,05E+05
0,656	6,50E+03	9,76E+03	2,59E+04	3,69E+04	9,72E+04	3,44E+05	5,26E+05
0,671	7,03E+03	9,80E+03	2,79E+04	4,08E+04	1,03E+05	3,62E+05	5,63E+05
0,687	7,19E+03	1,39E+04	3,55E+04	5,19E+04	1,34E+05	4,77E+05	7,35E+05
0,703	7,01E+03	1,15E+04	3,01E+04	4,50E+04	1,15E+05	3,98E+05	6,32E+05
0,719	8,83E+03	1,51E+04	4,06E+04	5,89E+04	1,49E+05	5,20E+05	8,21E+05
0,737	8,95E+03	1,61E+04	4,12E+04	6,07E+04	1,54E+05	5,50E+05	8,66E+05
0,757	1,14E+04	1,87E+04	5,47E+04	7,81E+04	2,01E+05	6,96E+05	1,11E+06
0,776	9,82E+03	1,68E+04	4,40E+04	6,52E+04	1,70E+05	5,91E+05	9,34E+05
0,795	1,20E+04	1,97E+04	5,40E+04	7,89E+04	2,11E+05	7,39E+05	1,17E+06
0,816	1,24E+04	2,04E+04	5,61E+04	8,25E+04	2,17E+05	7,57E+05	1,20E+06
0,836	1,16E+04	1,94E+04	5,81E+04	8,60E+04	2,26E+05	7,78E+05	1,24E+06
0,858	1,43E+04	2,39E+04	6,91E+04	9,90E+04	2,67E+05	9,42E+05	1,49E+06
0,880	1,07E+04	1,97E+04	5,80E+04	8,56E+04	2,27E+05	8,05E+05	1,27E+06
0,904	1,57E+04	2,66E+04	7,85E+04	1,16E+05	3,09E+05	1,09E+06	1,75E+06
0,929	1,31E+04	2,32E+04	6,78E+04	1,03E+05	2,75E+05	9,70E+05	1,56E+06
0,954	1,47E+04	2,76E+04	7,96E+04	1,16E+05	3,15E+05	1,10E+06	1,77E+06
0,980	1,47E+04	2,46E+04	7,85E+04	1,15E+05	3,11E+05	1,10E+06	1,80E+06
1,007	1,45E+04	2,51E+04	7,89E+04	1,14E+05	3,10E+05	1,10E+06	1,77E+06
1,035	1,58E+04	2,72E+04	8,50E+04	1,27E+05	3,45E+05	1,22E+06	1,97E+06
1,064	1,54E+04	2,55E+04	8,16E+04	1,25E+05	3,41E+05	1,20E+06	1,95E+06
1,095	1,66E+04	2,88E+04	8,99E+04	1,38E+05	3,78E+05	1,32E+06	2,15E+06
1,128	1,56E+04	2,87E+04	8,66E+04	1,30E+05	3,62E+05	1,27E+06	2,09E+06
1,161	1,47E+04	2,54E+04	8,24E+04	1,26E+05	3,49E+05	1,24E+06	2,03E+06
1,195	1,62E+04	2,79E+04	8,95E+04	1,34E+05	3,75E+05	1,33E+06	2,21E+06
1,231	1,53E+04	2,50E+04	8,72E+04	1,28E+05	3,57E+05	1,25E+06	2,07E+06
1,268	1,52E+04	2,65E+04	8,87E+04	1,33E+05	3,72E+05	1,32E+06	2,17E+06
1,307	1,49E+04	2,49E+04	8,32E+04	1,27E+05	3,54E+05	1,25E+06	2,11E+06
1,347	1,38E+04	2,52E+04	8,54E+04	1,27E+05	3,60E+05	1,29E+06	2,16E+06
1,389	1,41E+04	2,26E+04	7,89E+04	1,19E+05	3,46E+05	1,22E+06	2,04E+06
1,433	1,35E+04	2,24E+04	7,88E+04	1,19E+05	3,48E+05	1,22E+06	2,06E+06
1,478	1,16E+04	2,04E+04	7,42E+04	1,11E+05	3,30E+05	1,15E+06	1,95E+06
1,525	1,12E+04	2,09E+04	7,28E+04	1,11E+05	3,23E+05	1,14E+06	1,95E+06
1,575	1,18E+04	1,94E+04	7,06E+04	1,09E+05	3,18E+05	1,12E+06	1,93E+06
1,627	1,11E+04	1,93E+04	7,19E+04	1,06E+05	3,15E+05	1,11E+06	1,93E+06
1,682	1,02E+04	1,79E+04	6,17E+04	9,44E+04	2,87E+05	1,01E+06	1,75E+06
1,738	1,01E+04	1,60E+04	6,16E+04	9,28E+04	2,79E+05	9,71E+05	1,70E+06
1,796	8,33E+03	1,42E+04	5,51E+04	8,28E+04	2,52E+05	8,90E+05	1,57E+06
1,856	8,83E+03	1,45E+04	5,38E+04	8,19E+04	2,58E+05	9,03E+05	1,58E+06
1,920	7,47E+03	1,32E+04	4,82E+04	7,58E+04	2,31E+05	8,06E+05	1,44E+06
1,985	6,97E+03	1,18E+04	4,51E+04	6,93E+04	2,24E+05	7,71E+05	1,38E+06
2,053	6,61E+03	1,04E+04	4,21E+04	6,76E+04	2,10E+05	7,18E+05	1,29E+06
2,124	5,71E+03	9,84E+03	3,87E+04	6,22E+04	1,91E+05	6,76E+05	1,21E+06
2,199	5,56E+03	8,84E+03	3,67E+04	5,59E+04	1,85E+05	6,26E+05	1,15E+06
2,275	5,52E+03	7,84E+03	3,25E+04	5,27E+04	1,68E+05	5,78E+05	1,06E+06

Figura 5.32

d_p(mm)	h_(r) %(masa)	d_p(mm)	h_(r) %(número)
0,500	95,69	0,019	98,74
0,740	91,50	0,020	98,76
1,200	97,15	0,021	98,76
2,390	98,95	0,021	98,77
3,810	98,69	0,022	98,78
5,480	97,61	0,023	98,80
8,120	99,13	0,024	98,82
10,000	100,00	0,025	98,84
		0,025	98,85
		0,026	98,87
		0,027	98,89
		0,028	98,90
		0,029	98,89
		0,031	98,91
		0,032	98,92
		0,033	98,94
		0,034	98,97
		0,035	98,98
		0,037	99,03
		0,038	99,02
		0,039	99,05
		0,041	99,08
		0,042	99,10
		0,044	99,14
		0,045	99,17
		0,047	99,17
		0,049	99,17
		0,050	99,18
		0,052	99,21
		0,054	99,21
		0,056	99,21
		0,058	99,22
		0,060	99,23
		0,063	99,24
		0,065	99,26
		0,067	99,27
		0,070	99,26
		0,072	99,25
		0,075	99,25

		0,078	99,25
		0,081	99,24
		0,084	99,24
		0,087	99,25
		0,090	99,26
		0,093	99,25
		0,096	99,26
		0,100	99,26
		0,104	99,26
		0,107	99,26
		0,111	99,26
		0,115	99,27
		0,120	99,27
		0,124	99,27
		0,129	99,28
		0,133	99,28
		0,138	99,27
		0,143	99,26
		0,149	99,25
		0,154	99,26
		0,160	99,25
		0,165	99,25
		0,172	99,25
		0,178	99,25
		0,184	99,24
		0,191	99,23
		0,198	99,23
		0,205	99,22
		0,213	99,21
		0,221	99,20
		0,229	99,19
		0,237	99,20
		0,246	99,19
		0,255	99,18
		0,264	99,17
		0,274	99,16
		0,284	99,16
		0,294	99,15
		0,305	99,14
		0,316	99,13
		0,328	99,12
		0,340	99,13
		0,352	99,12
		0,365	99,09
		0,379	99,05
		0,392	99,02

		0,407	98,98
		0,422	98,95
		0,437	98,92
		0,453	98,89
		0,470	98,85
		0,487	98,81
		0,505	98,78
		0,523	98,75
		0,542	98,71
		0,562	98,69
		0,583	98,67
		0,604	98,64
		0,610	98,62
		0,626	98,60
		0,641	98,60
		0,656	98,58
		0,671	98,56
		0,687	98,54
		0,703	98,53
		0,719	98,51
		0,737	98,50
		0,757	98,49
		0,776	98,48
		0,795	98,46
		0,816	98,46
		0,836	98,45
		0,858	98,43
		0,880	98,44
		0,904	98,47
		0,929	98,49
		0,954	98,52
		0,980	98,54
		1,007	98,57
		1,035	98,60
		1,064	98,62
		1,095	98,65
		1,128	98,68
		1,161	98,71
		1,195	98,74
		1,231	98,76
		1,268	98,79
		1,307	98,82
		1,347	98,84
		1,389	98,87
		1,433	98,89
		1,478	98,92

		1,525	98,95
		1,575	98,97
		1,627	98,99
		1,682	99,01
		1,738	99,04
		1,796	99,06
		1,856	99,09
		1,920	99,11
		1,985	99,14
		2,053	99,16
		2,124	99,18
		2,199	99,21
		2,275	99,23
		2,354	99,25
		2,437	99,26
		2,524	99,29
		2,613	99,31
		2,706	99,33
		2,801	99,35
		2,899	99,37
		3,001	99,39
		3,109	99,39
		3,219	99,41
		3,332	99,43
		3,450	99,43
		3,572	99,44
		3,696	99,46
		3,824	99,47
		3,958	99,47
		4,096	99,46
		4,239	99,45
		4,385	99,44
		4,536	99,44
		4,693	99,46
		4,855	99,46
		5,022	99,45
		5,194	99,42
		5,370	99,44
		5,552	99,41
		5,741	99,42
		5,935	99,44
		6,136	99,45
		6,343	99,45
		6,556	99,45
		6,776	99,45
		7,003	99,45

		7,238	99,44
		7,481	99,43
		7,731	99,42
		7,989	99,41
		8,255	99,40
		8,530	99,40
		8,815	99,41
		9,109	99,39
		9,413	99,39
		9,726	99,39
		9,726	99,39

Figura 5.33

15 kV		20 kV		30 kV		35 kV	
d_p (mm)	C_r (circularidad relativa)	d_p (mm)	C_r (circularidad relativa)	d_p (mm)	C_r (circularidad relativa)	d_p (mm)	C_r (circularidad relativa)
1,002	1,63	1,009	1,501	1,037	1,55	1,127	1,754465
1,032	1,62	1,079	1,507	1,093	1,68	1,269	1,759548
1,080	1,49	1,144	1,709	1,155	1,59	1,341	1,653286
1,106	1,54	1,235	1,477	1,201	1,79	1,483	1,578895
1,141	1,49	1,319	1,692	1,255	1,71	1,619	1,430841
1,182	1,57	1,412	1,519	1,316	1,64	1,711	1,431454
1,221	1,66	1,505	1,589	1,380	1,74	1,830	1,479537
1,270	1,55	1,606	1,647	1,455	1,71	1,968	1,437075
1,314	1,62	1,733	1,657	1,528	1,60	2,121	1,535472
1,363	1,58	1,878	1,778	1,611	1,91	2,289	1,512095
1,389	1,81	2,014	1,957	1,700	1,93	2,461	1,640401
1,442	1,54	2,182	1,722	1,792	1,82	2,639	1,682838
1,476	1,67	2,371	1,912	1,918	1,93	2,853	1,698592
1,523	1,68	2,584	2,051	2,077	1,94	3,095	1,505311
1,575	1,66	2,852	2,173	2,247	2,02	3,337	1,74685
1,636	1,57	3,200	2,111	2,467	2,07	3,679	1,778131
1,680	1,79	3,720	2,703	2,731	2,50	4,038	1,774245
1,739	1,62	4,616	3,093	3,149	2,64	4,445	1,741769
1,795	1,63	5,920	3,695	3,952	2,80	4,880	1,865372
1,851	1,93	10,010	5,410	6,000	3,31	5,550	1,973677
1,916	1,94					6,313	2,155214
1,997	1,82					7,468	2,341942
2,069	1,82					9,168	2,861822
2,151	1,90					13,071	3,148559
2,239	1,87						

2,326	2,00						
2,431	2,14						
2,521	1,94						
2,663	2,09						
2,793	2,07						
2,913	2,12						
3,084	2,37						
3,274	2,33						
3,580	2,56						
3,902	2,93						
4,218	3,12						
4,685	3,53						
5,258	3,65						
6,098	4,07						
7,862	4,77						
13,108	7,59						

Figura 5.34

Elemento	% en peso			
	15kV	20kV	25kV	35kV
Al	12,10	7,53	12,88	11,44
Co	0,18	0,23	0,21	0,13
Fe	10,72	6,50	3,71	1,81
Mg	1,24	0,71	0,66	0,29
Ni	0,91	0,25	0,15	
Sr	0,23	0,01	0,04	0,01
Ti	0,66	0,53	0,47	0,38

Figura 5.35

SMPS			Contador optico		
d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)		d_p (mm)	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)	
	ESP (ON) (30kV)	ESP (OFF)		ESP (OFF)	ESP (ON) (30kV)
0,0169	2,64E+05	2,53E+05	0,254	3,14E+02	2,53E+02
0,0175	2,72E+05	2,58E+05	0,257	3,65E+02	3,17E+02
0,0181	2,90E+05	2,70E+05	0,259	6,78E+02	4,50E+02
0,0188	3,00E+05	2,99E+05	0,262	4,57E+02	4,26E+02

0,0195	3,37E+05	3,14E+05	0,266	4,10E+02	3,35E+02
0,0202	3,70E+05	3,41E+05	0,270	5,71E+02	3,77E+02
0,0209	4,04E+05	3,80E+05	0,273	8,46E+02	5,74E+02
0,0217	4,35E+05	4,02E+05	0,277	7,73E+02	5,46E+02
0,0225	4,81E+05	4,53E+05	0,282	5,07E+02	4,18E+02
0,0233	5,27E+05	5,17E+05	0,287	8,00E+02	5,74E+02
0,0241	6,00E+05	5,77E+05	0,291	8,11E+02	4,83E+02
0,0250	6,61E+05	6,47E+05	0,296	8,91E+02	5,43E+02
0,0259	7,52E+05	7,33E+05	0,302	6,22E+02	4,73E+02
0,0269	8,42E+05	8,25E+05	0,309	5,98E+02	4,47E+02
0,0279	8,88E+05	8,91E+05	0,315	7,62E+02	6,25E+02
0,0289	9,72E+05	9,84E+05	0,321	6,66E+02	4,65E+02
0,0300	1,05E+06	1,07E+06	0,329	6,14E+02	3,83E+02
0,0311	1,11E+06	1,21E+06	0,338	5,68E+02	3,93E+02
0,0322	1,19E+06	1,34E+06	0,346	5,66E+02	4,40E+02
0,0334	1,24E+06	1,48E+06	0,354	5,95E+02	3,63E+02
0,0346	1,32E+06	1,65E+06	0,364	4,71E+02	3,37E+02
0,0359	1,49E+06	1,79E+06	0,375	4,52E+02	3,14E+02
0,0372	1,54E+06	1,87E+06	0,385	4,83E+02	2,87E+02
0,0385	1,66E+06	2,13E+06	0,395	3,87E+02	2,17E+02
0,0400	1,79E+06	2,36E+06	0,408	2,92E+02	1,89E+02
0,0414	1,92E+06	2,67E+06	0,422	3,05E+02	1,97E+02
0,0429	2,00E+06	2,85E+06	0,435	2,98E+02	1,78E+02
0,0445	2,20E+06	2,93E+06	0,448	2,55E+02	1,46E+02
0,0461	2,36E+06	3,10E+06	0,465	1,74E+02	1,11E+02
0,0478	2,57E+06	3,22E+06	0,481	1,99E+02	1,18E+02
0,0496	2,62E+06	3,74E+06	0,498	2,05E+02	8,81E+01
0,0514	2,45E+06	3,84E+06	0,514	1,39E+02	7,86E+01
0,0533	2,88E+06	4,63E+06	0,535	1,03E+02	5,32E+01
0,0552	2,91E+06	4,82E+06	0,556	7,35E+01	6,00E+01
0,0573	3,22E+06	5,33E+06	0,577	7,28E+01	5,24E+01
0,0594	3,51E+06	5,81E+06	0,598	4,50E+01	3,35E+01
0,0615	4,08E+06	6,08E+06	0,624	3,33E+01	3,58E+01
0,0638	4,46E+06	6,56E+06	0,650	4,10E+01	2,53E+01
0,0661	4,70E+06	6,62E+06	0,676	4,59E+01	2,02E+01
0,0686	5,08E+06	7,63E+06	0,702	3,34E+01	2,01E+01
0,0711	5,15E+06	7,70E+06	0,735	2,28E+01	1,35E+01
0,0737	5,67E+06	7,90E+06	0,767	1,79E+01	1,55E+01
0,0764	5,67E+06	7,74E+06	0,800	1,55E+01	1,32E+01
0,0792	6,01E+06	7,53E+06	0,832	2,02E+01	8,17E+00
0,0821	5,94E+06	7,27E+06	0,873	1,36E+01	6,42E+00
0,0851	5,98E+06	7,08E+06	0,913	1,14E+01	6,72E+00
0,0882	5,76E+06	6,76E+06	0,954	2,97E+00	1,26E+01
0,0914	5,71E+06	6,64E+06	0,994	0,00E+00	5,27E+00
0,0948	5,10E+06	5,91E+06	1,044	0,00E+00	0,00E+00
0,0982	4,98E+06	5,69E+06	1,094	0,00E+00	0,00E+00

0,1018	4,31E+06	4,86E+06	1,143	2,90E+00	1,37E+00
0,1056	4,21E+06	4,58E+06	1,193	0,00E+00	0,00E+00
0,1094	3,72E+06	3,97E+06	1,254	5,17E+00	0,00E+00
0,1134	3,49E+06	3,62E+06	1,316	0,00E+00	0,00E+00
0,1176	2,69E+06	3,18E+06	1,377	0,00E+00	1,34E+00
0,1219	2,53E+06	2,76E+06	1,438	2,68E+00	0,00E+00
0,1264	1,94E+06	2,40E+06	1,512	0,00E+00	0,00E+00
0,1310	1,79E+06	1,94E+06	1,587	0,00E+00	1,27E+00
0,1358	1,40E+06	1,62E+06	1,661	0,00E+00	0,00E+00
0,1408	1,23E+06	1,35E+06	1,735	0,00E+00	0,00E+00
0,1459	9,87E+05	1,13E+06	1,824	0,00E+00	0,00E+00
0,1513	8,53E+05	9,53E+05	1,914	0,00E+00	1,28E+00
0,1568	5,92E+05	8,20E+05	2,003	0,00E+00	0,00E+00
0,1626	5,43E+05	6,81E+05	2,092	0,00E+00	0,00E+00
0,1685	4,74E+05	5,78E+05	2,198	0,00E+00	0,00E+00
0,1747	4,17E+05	5,03E+05	2,304	0,00E+00	0,00E+00
0,1811	3,47E+05	4,44E+05	2,410	0,00E+00	1,36E+00
0,1877	3,08E+05	3,97E+05	2,516	0,00E+00	0,00E+00
0,1946	2,74E+05	3,48E+05	2,641	0,00E+00	0,00E+00
0,2017	2,49E+05	3,13E+05	2,765	0,00E+00	0,00E+00
0,2091	2,28E+05	2,91E+05	2,890	0,00E+00	0,00E+00
0,2168	2,07E+05	2,67E+05	3,014	0,00E+00	0,00E+00
0,2247	1,85E+05	2,41E+05	3,158	0,00E+00	0,00E+00
0,2329	1,62E+05	2,16E+05	3,303	0,00E+00	0,00E+00
0,2415	1,45E+05	1,92E+05	3,447	0,00E+00	0,00E+00
0,2503	1,34E+05	1,77E+05	3,591	0,00E+00	0,00E+00
0,2595	1,19E+05	1,62E+05	3,755	0,00E+00	0,00E+00
0,2690	1,20E+05	1,53E+05	3,920	0,00E+00	0,00E+00
0,2789	1,18E+05	1,50E+05	4,084	0,00E+00	0,00E+00
0,2891	1,27E+05	1,49E+05	4,248	0,00E+00	0,00E+00
0,2997	1,20E+05	1,41E+05	4,433	0,00E+00	0,00E+00
0,3106	1,09E+05	1,34E+05	4,617	0,00E+00	0,00E+00
0,3220	1,00E+05	1,24E+05	4,802	0,00E+00	0,00E+00
0,3338	9,52E+04	1,18E+05	4,986	0,00E+00	0,00E+00
0,3460	8,89E+04	1,13E+05	5,190	0,00E+00	0,00E+00
0,3587	8,28E+04	1,06E+05	5,394	0,00E+00	0,00E+00
0,3719	8,62E+04	1,07E+05	5,598	0,00E+00	0,00E+00
0,3855	1,09E+05	1,35E+05	5,802	0,00E+00	0,00E+00
0,3996	1,06E+05	1,25E+05	6,024	0,00E+00	0,00E+00
0,4142	1,01E+05	1,20E+05	6,246	0,00E+00	0,00E+00
0,4294	9,88E+04	1,19E+05	6,468	0,00E+00	0,00E+00
0,4452	9,48E+04	1,09E+05	6,690	0,00E+00	0,00E+00
0,4615	8,93E+04	1,02E+05	6,929	0,00E+00	0,00E+00
0,4784	8,43E+04	1,01E+05	7,168	0,00E+00	0,00E+00
0,4959	8,16E+04	9,62E+04	7,407	0,00E+00	0,00E+00
0,5141	7,90E+04	9,11E+04	7,646	0,00E+00	0,00E+00

0,5329	7,50E+04	9,07E+04	7,901	0,00E+00	0,00E+00
0,5524	7,45E+04	8,55E+04	8,156	0,00E+00	0,00E+00
0,5726	7,05E+04	8,08E+04	8,410	0,00E+00	0,00E+00
0,5936	6,93E+04	7,66E+04	8,665	0,00E+00	0,00E+00
0,6154	6,45E+04	7,48E+04	8,936	0,00E+00	0,00E+00
			9,208	0,00E+00	0,00E+00
			9,479	0,00E+00	0,00E+00
			9,750	0,00E+00	0,00E+00

Figura 5.36

Combustión de carbón		Combustión de gas-oil	
d_p (mm)	$h_{(r)}$ %	d_p (mm)	$h_{(r)}$ %
0,0160	98,67	0,0279	6,44
0,0165	98,68	0,0289	8,34
0,0172	98,67	0,0300	9,43
0,0178	98,70	0,0311	10,33
0,0184	98,73	0,0322	11,51
0,0191	98,74	0,0334	12,65
0,0198	98,76	0,0346	15,16
0,0205	98,76	0,0359	17,75
0,0213	98,77	0,0372	19,87
0,0221	98,78	0,0385	21,30
0,0229	98,80	0,0400	22,15
0,0237	98,82	0,0414	23,40
0,0246	98,84	0,0429	24,90
0,0255	98,85	0,0445	26,77
0,0264	98,87	0,0461	28,79
0,0274	98,89	0,0478	30,37
0,0284	98,90	0,0496	31,77
0,0294	98,89	0,0514	32,21
0,0305	98,91	0,0533	32,41
0,0316	98,92	0,0552	32,77
0,0328	98,94	0,0573	33,64
0,0340	98,97	0,0594	34,81
0,0352	98,98	0,0615	34,66
0,0365	99,03	0,0638	33,80
0,0379	99,02	0,0661	32,21
0,0392	99,05	0,0686	30,27
0,0407	99,08	0,0711	28,08
0,0422	99,10	0,0737	25,83
0,0437	99,14	0,0764	24,12

0,0453	99,17	0,0792	22,45
0,0470	99,17	0,0821	20,95
0,0487	99,17	0,0851	18,92
0,0505	99,18	0,0882	16,64
0,0523	99,21	0,0914	14,64
0,0542	99,21	0,0948	12,53
0,0562	99,21	0,0982	12,11
0,0583	99,22	0,1018	11,23
0,0604	99,23	0,1056	11,56
0,0626	99,24	0,1094	10,97
0,0649	99,26	0,1134	10,96
0,0673	99,27	0,1176	10,49
0,0698	99,26	0,1219	10,48
0,0723	99,25	0,1264	10,42
0,0750	99,25	0,1310	12,21
0,0777	99,25	0,1358	13,49
0,0806	99,24	0,1408	14,80
0,0835	99,24	0,1459	14,94
0,0866	99,25	0,1513	16,14
0,0898	99,26	0,1568	16,43
0,0931	99,25	0,1626	17,61
0,0965	99,26	0,1685	18,19
0,1000	99,26	0,1747	19,38
0,1037	99,26	0,1811	20,29
0,1075	99,26	0,1877	21,45
0,1114	99,26	0,1946	21,18
0,1155	99,27	0,2017	21,55
0,1197	99,27	0,2091	22,10
0,1241	99,27	0,2168	22,95
0,1286	99,28	0,2247	22,94
0,1334	99,28	0,2329	22,81
0,1382	99,27	0,2415	22,25
0,1433	99,26	0,2503	21,71
0,1486	99,25	0,2595	21,45
0,1540	99,26	0,2690	21,16
0,1596	99,25	0,2789	20,79
0,1655	99,25	0,2891	20,49
0,1715	99,25	0,2997	20,29
0,1778	99,25	0,3106	19,84
0,1843	99,24	0,3220	19,15
0,1911	99,23	0,3338	18,59
0,1981	99,23	0,3460	18,15
0,2054	99,22	0,3587	18,34
0,2129	99,21	0,3719	18,23
0,2207	99,20	0,3855	17,68
0,2288	99,19	0,3996	17,42

0,2371	99,20	0,4142	17,05
0,2458	99,19	0,4294	16,30
0,2548	99,18	0,4452	15,86
0,2642	99,17	0,4615	15,28
0,2738	99,16	0,4784	14,74
0,2839	99,16	0,4959	14,17
0,2943	99,15	0,5141	13,96
0,3051	99,14	0,5329	13,65
0,3162	99,13	0,5524	13,71
0,3278	99,12	0,5726	13,86
0,3398	99,13	0,5936	13,50
0,3523	99,12	0,6154	13,22
0,3652	99,09		
0,3786	99,05		
0,3924	99,02		
0,4068	98,98		
0,4217	98,95		
0,4371	98,92		
0,4532	98,89		
0,4698	98,85		
0,4870	98,81		
0,5048	98,78		
0,5233	98,75		
0,5425	98,71		
0,5623	98,69		
0,5829	98,67		
0,6043	98,64		
0,6103	98,62		
0,6256	98,60		
0,6407	98,60		
0,6557	98,58		
0,6705	98,56		
0,6869	98,54		
0,7032	98,53		
0,7194	98,51		
0,7371	98,50		
0,7565	98,49		
0,7758	98,48		
0,7948	98,46		
0,8155	98,46		
0,8361	98,45		
0,8581	98,43		
0,8801	98,44		
0,9037	98,47		
0,9288	98,49		
0,9537	98,52		

0,9803	98,54		
1,0067	98,57		
1,0347	98,60		
1,0642	98,62		
1,0954	98,65		
1,1280	98,68		
1,1606	98,71		
1,1948	98,74		
1,2305	98,76		
1,2678	98,79		
1,3066	98,82		
1,3470	98,84		
1,3890	98,87		
1,4326	98,89		
1,4777	98,92		
1,5252	98,95		
1,5752	98,97		
1,6274	98,99		
1,6818	99,01		
1,7379	99,04		
1,7955	99,06		
1,8562	99,09		
1,9199	99,11		
1,9851	99,14		
2,0534	99,16		
2,1244	99,18		
2,1985	99,21		
2,2753	99,23		
2,3540	99,25		
2,4374	99,26		
2,5239	99,29		
2,6134	99,31		
2,7056	99,33		
2,8013	99,35		
2,8993	99,37		
3,0014	99,39		
3,1086	99,39		
3,2192	99,41		
3,3319	99,43		
3,4495	99,43		
3,5717	99,44		
3,6957	99,46		
3,8241	99,47		
3,9582	99,47		
4,0964	99,46		
4,2387	99,45		

4,3852	99,44		
4,5364	99,44		
4,6929	99,46		
4,8545	99,46		
5,0218	99,45		
5,1938	99,42		
5,3703	99,44		
5,5524	99,41		
5,7412	99,42		
5,9354	99,44		
6,1361	99,45		
6,3430	99,45		
6,5560	99,45		
6,7763	99,45		
7,0033	99,45		
7,2383	99,44		
7,4808	99,43		
7,7311	99,42		
7,9890	99,41		
8,2551	99,40		
8,5304	99,40		
8,8153	99,41		
9,1094	99,39		
9,4125	99,39		
9,7257	99,39		
9,7257	99,39		

Figura 5.39

SMPS			Contador optico		
$d_p(\text{mm})$	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)		$d_p(\text{mm})$	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)	
	-FA+ESP	+FA(4T400W)+ESP		+FA(4T400W)+ESP	-FA+ESP
0,0160	1,12E+02	1,66E+02	0,2948	1,96E+03	3,30E+03
0,0165	1,48E+02	1,31E+02	0,3017	1,89E+03	3,30E+03
0,0172	1,75E+02	1,84E+02	0,3051		
0,0178	1,59E+02	1,94E+02	0,3085	1,56E+03	2,02E+03
0,0184	1,10E+02	2,35E+02	0,3152	1,09E+03	1,96E+03
0,0191	1,61E+02	1,66E+02	0,3162		
0,0198	1,23E+02	2,67E+02	0,3217	7,04E+02	1,77E+03
0,0205	1,55E+02	3,31E+02	0,3278		
0,0213	1,99E+02	2,65E+02	0,3281	7,22E+02	9,06E+02
0,0221	1,59E+02	2,14E+02	0,3344	5,93E+02	1,00E+03
0,0229	1,44E+02	2,40E+02	0,3398		

0,0237	1,70E+02	3,21E+02	0,3405	6,67E+02	8,30E+02
0,0246	1,91E+02	2,74E+02	0,3466	5,74E+02	1,19E+03
0,0255	2,32E+02	1,68E+02	0,3523		
0,0264	1,36E+02	3,77E+02	0,3555	1,02E+03	2,13E+03
0,0274	1,98E+02	3,86E+02	0,3642	6,30E+02	1,04E+03
0,0284	1,62E+02	3,28E+02	0,3652		
0,0294	1,66E+02	3,37E+02	0,3699	8,89E+02	1,32E+03
0,0305	1,84E+02	3,84E+02	0,3783	1,37E+03	2,70E+03
0,0316	3,10E+02	3,81E+02	0,3786		
0,0328	2,38E+02	3,86E+02	0,3865	6,11E+02	1,25E+03
0,0340	3,10E+02	4,14E+02	0,3924		
0,0352	2,27E+02	3,01E+02	0,3945	1,63E+03	2,91E+03
0,0365	1,97E+02	4,93E+02	0,4025	7,41E+02	2,04E+03
0,0379	1,56E+02	4,08E+02	0,4068		
0,0392	2,56E+02	4,84E+02	0,4103	1,85E+03	3,15E+03
0,0407	2,41E+02	3,83E+02	0,4204	2,06E+03	3,58E+03
0,0422	2,42E+02	3,90E+02	0,4304	2,30E+03	3,94E+03
0,0437	3,00E+02	3,59E+02	0,4402	2,52E+03	4,04E+03
0,0453	2,70E+02	3,94E+02	0,4498	3,09E+03	5,08E+03
0,0470	1,92E+02	3,18E+02	0,4592	3,67E+03	5,51E+03
0,0487	2,42E+02	3,22E+02	0,4685	3,30E+03	5,66E+03
0,0505	2,47E+02	4,48E+02	0,4776	3,65E+03	5,79E+03
0,0523	1,42E+02	4,14E+02	0,4889	6,69E+03	1,05E+04
0,0542	2,61E+02	3,70E+02	0,4999	4,63E+03	8,25E+03
0,0562	1,90E+02	4,13E+02	0,5108	7,93E+03	1,32E+04
0,0583	1,98E+02	3,36E+02	0,5236	7,81E+03	1,34E+04
0,0604	1,44E+02	3,84E+02	0,5342	5,89E+03	1,00E+04
0,0626	2,09E+02	3,50E+02	0,5445	9,31E+03	1,60E+04
0,0649	2,53E+02	3,19E+02	0,5568	1,03E+04	1,75E+04
0,0673	1,46E+02	3,46E+02	0,5709	1,57E+04	2,70E+04
0,0698	1,56E+02	2,61E+02	0,5849	1,25E+04	2,30E+04
0,0723	2,14E+02	2,85E+02	0,5967	1,35E+04	2,40E+04
0,0750	1,80E+02	3,60E+02	0,6103	1,88E+04	3,32E+04
0,0777	1,24E+02	2,49E+02	0,6256	2,15E+04	3,57E+04
0,0806	1,74E+02	2,16E+02	0,6407	2,31E+04	4,03E+04
0,0835	1,36E+02	2,49E+02	0,6557	2,46E+04	4,28E+04
0,0866	1,69E+02	2,25E+02	0,6705	2,72E+04	4,26E+04
0,0898	1,15E+02	1,82E+02	0,6869	3,29E+04	5,73E+04
0,0931	9,25E+01	2,14E+02	0,7032	2,92E+04	4,74E+04
0,0965	6,63E+01	2,19E+02	0,7194	3,63E+04	6,41E+04
0,1000	1,11E+02	1,64E+02	0,7371	3,96E+04	6,58E+04
0,1037	7,97E+01	2,32E+02	0,7565	4,97E+04	8,49E+04
0,1075	1,15E+02	1,47E+02	0,7758	4,26E+04	7,18E+04
0,1114	8,48E+01	1,53E+02	0,7948	5,29E+04	9,05E+04
0,1155	8,69E+01	1,18E+02	0,8155	5,28E+04	9,15E+04
0,1197	6,62E+01	1,84E+02	0,8361	5,50E+04	9,62E+04

0,1241	3,76E+01	1,54E+02	0,8581	6,67E+04	1,14E+05
0,1286	7,59E+01	1,32E+02	0,8801	5,70E+04	9,80E+04
0,1334	3,11E+01	9,94E+01	0,9037	7,73E+04	1,33E+05
0,1382	4,67E+01	1,37E+02	0,9288	6,74E+04	1,18E+05
0,1433	7,13E+01	1,05E+02	0,9537	7,94E+04	1,35E+05
0,1486	4,73E+01	1,40E+02	0,9803	7,79E+04	1,34E+05
0,1540	5,20E+01	1,06E+02	1,0067	7,86E+04	1,33E+05
0,1596	4,25E+01	9,15E+01	1,0347	8,48E+04	1,47E+05
0,1655	5,10E+01	9,98E+01	1,0642	8,26E+04	1,44E+05
0,1715	6,56E+01	9,62E+01	1,0954	8,97E+04	1,58E+05
0,1778	1,84E+01	7,01E+01	1,1280	8,88E+04	1,56E+05
0,1843	3,57E+01	6,80E+01	1,1606	8,91E+04	1,52E+05
0,1911	2,63E+01	6,65E+01	1,1948	9,50E+04	1,59E+05
0,1981	2,02E+01	5,17E+01	1,2305	8,55E+04	1,52E+05
0,2054	4,08E+01	6,50E+01	1,2678	9,12E+04	1,55E+05
0,2129	4,06E+01	5,09E+01	1,3066	8,64E+04	1,50E+05
0,2207	2,55E+01	4,13E+01	1,3470	8,95E+04	1,57E+05
0,2288	3,30E+01	6,97E+01	1,3890	8,51E+04	1,48E+05
0,2371	1,27E+01	5,25E+01	1,4326	8,34E+04	1,49E+05
0,2458	2,30E+01	7,49E+01	1,4777	7,90E+04	1,41E+05
0,2548	1,45E+01	5,54E+01	1,5252	8,11E+04	1,42E+05
0,2642	5,23E+01	4,23E+01	1,5752	7,96E+04	1,42E+05
0,2738	3,01E+01	3,55E+01	1,6274	7,92E+04	1,37E+05
0,2839	6,03E+01	4,63E+01	1,6818	7,17E+04	1,26E+05
0,2943	3,60E+01	5,87E+01	1,7379	7,09E+04	1,21E+05
0,2948			1,7955	6,61E+04	1,12E+05
0,3017			1,8562	6,35E+04	1,14E+05
0,3051	4,34E+01	4,58E+01	1,9199	6,20E+04	1,06E+05
0,3085			1,9851	5,74E+04	1,02E+05
0,3152			2,0534	5,49E+04	9,53E+04
0,3162	0,00E+00	2,93E+01	2,1244	5,02E+04	8,99E+04
0,3217			2,1985	4,89E+04	8,61E+04
0,3278	2,25E+01	1,90E+01	2,2753	4,66E+04	7,84E+04
0,3281			2,3540	4,18E+04	7,37E+04
0,3344			2,4374	3,97E+04	6,88E+04
0,3398	2,67E+01	3,81E+01	2,5239	3,52E+04	6,40E+04
0,3405			2,6134	3,51E+04	6,09E+04
0,3466			2,7056	3,19E+04	5,55E+04
0,3523	1,14E+01	3,15E+01	2,8013	2,92E+04	5,16E+04
0,3555			2,8993	2,75E+04	4,60E+04
0,3642			3,0014	2,52E+04	4,29E+04
0,3652	2,32E+01	5,79E+01	3,1086	2,20E+04	3,83E+04
0,3699			3,2192	2,09E+04	3,49E+04
0,3783			3,3319	1,88E+04	3,07E+04
0,3786	3,25E+01	2,73E+01	3,4495	1,78E+04	2,70E+04
0,3865			3,5717	1,37E+04	2,45E+04

0,3924	4,87E+01	2,72E+01	3,6957	1,21E+04	2,18E+04
0,3945			3,8241	1,14E+04	1,99E+04
0,4025			3,9582	1,01E+04	1,78E+04
0,4068	2,48E+01	6,62E+01	4,0964	8,78E+03	1,49E+04
			4,2387	7,96E+03	1,22E+04
			4,3852	6,50E+03	1,12E+04
			4,5364	6,04E+03	9,13E+03
			4,6929	5,22E+03	8,06E+03
			4,8545	4,22E+03	7,53E+03
			5,0218	3,39E+03	5,81E+03
			5,1938	3,35E+03	5,77E+03
			5,3703	2,69E+03	4,55E+03
			5,5524	2,65E+03	3,87E+03
			5,7412	1,91E+03	3,21E+03
			5,9354	1,50E+03	2,64E+03
			6,1361	1,59E+03	2,13E+03
			6,3430	1,24E+03	1,98E+03
			6,5560	9,81E+02	1,47E+03
			6,7763	6,48E+02	1,19E+03
			7,0033	6,11E+02	1,02E+03
			7,2383	6,30E+02	9,25E+02
			7,4808	3,89E+02	8,68E+02
			7,7311	4,07E+02	6,23E+02
			7,9890	3,89E+02	5,66E+02
			8,2551	2,59E+02	6,42E+02
			8,5304	2,78E+02	4,53E+02
			8,8153	2,59E+02	4,34E+02
			9,1094	2,78E+02	2,64E+02
			9,4125	1,30E+02	1,89E+02
			9,7257	9,26E+01	1,51E+02

Figura 5.40

FA(4T80W)(10kHz)		FA(4T400W)(10kHz)		FA(4T80W)(20kHz)		FA(4T400W)(20kHz)	
d_p (mm)	Mejora de la Efi. del ESP %	d_p (mm)	Mejora de la Efic. del ESP %	d_p (mm)	Mejora de la Efic. del ESP %	d_p (mm)	Mejora de la Efic. del ESP %
0,0143	41,30	0,0143	42,58	0,0305	13,85	0,0160	35,76
0,0149	41,30	0,0149	39,17	0,0316	14,47	0,0165	36,75
0,0154	41,30	0,0154	37,11	0,0328	14,84	0,0172	37,62
0,0160	40,62	0,0160	37,15	0,0340	14,28	0,0178	38,47
0,0165	40,62	0,0165	36,77	0,0352	14,57	0,0184	37,37
0,0172	37,61	0,0172	36,59	0,0365	15,33	0,0191	37,42
0,0178	37,61	0,0178	35,38	0,0379	15,50	0,0198	36,81

0,0184	37,61	0,0184	34,90	0,0392	15,92	0,0205	36,22
0,0191	37,61	0,0191	34,37	0,0407	15,98	0,0213	37,31
0,0198	37,61	0,0198	34,32	0,0422	16,10	0,0221	38,37
0,0205	34,84	0,0205	33,03	0,0437	16,82	0,0229	38,74
0,0213	33,89	0,0213	32,40	0,0453	16,56	0,0237	38,67
0,0221	33,89	0,0221	31,82	0,0470	16,92	0,0246	38,63
0,0229	31,94	0,0229	31,54	0,0487	17,41	0,0255	37,81
0,0237	29,85	0,0237	31,76	0,0505	18,03	0,0264	37,58
0,0246	29,85	0,0246	30,55	0,0523	18,05	0,0274	37,66
0,0255	29,86	0,0255	30,44	0,0542	18,65	0,0284	37,39
0,0264	28,93	0,0264	29,74	0,0562	19,52	0,0294	37,64
0,0274	28,17	0,0274	29,31	0,0583	19,94	0,0305	39,66
0,0284	26,66	0,0284	29,51	0,0604	20,79	0,0316	40,03
0,0294	25,59	0,0294	29,24	0,0626	20,84	0,0328	40,05
0,0305	25,59	0,0305	28,35	0,0649	20,91	0,0340	41,31
0,0316	23,03	0,0316	28,00	0,0673	21,02	0,0352	41,60
0,0328	22,34	0,0328	28,53	0,0698	21,53	0,0365	41,17
0,0340	19,10	0,0340	28,36	0,0723	21,89	0,0379	41,03
0,0352	16,80	0,0352	27,14	0,0750	22,06	0,0392	42,09
0,0365	15,39	0,0365	26,42	0,0777	22,17	0,0407	42,11
0,0379	15,16	0,0379	25,50	0,0806	22,90	0,0422	41,37
0,0392	14,57	0,0392	24,86	0,0835	22,69	0,0437	42,02
0,0407	13,21	0,0407	23,86	0,0866	22,82	0,0453	42,28
0,0422	13,65	0,0422	23,46	0,0898	23,49	0,0470	40,85
0,0437	13,85	0,0437	22,45	0,0931	23,71	0,0487	40,75
0,0453	14,47	0,0453	23,12	0,0965	23,84	0,0505	39,92
0,0470	14,84	0,0470	23,74	0,1000	23,71	0,0523	39,48
0,0487	14,28	0,0487	23,03	0,1037	23,25	0,0542	39,63
0,0505	14,57	0,0505	22,67	0,1075	23,90	0,0562	41,28
0,0523	15,33	0,0523	22,48	0,1114	23,69	0,0583	41,08
0,0542	15,50	0,0542	22,62	0,1155	23,83	0,0604	42,39
0,0562	15,92	0,0562	22,31	0,1197	24,84	0,0626	42,29
0,0583	15,98	0,0583	21,77	0,1241	25,09	0,0649	41,79
0,0604	16,10	0,0604	20,78	0,1286	25,30	0,0673	40,66
0,0626	16,82	0,0626	21,18	0,1334	25,79	0,0698	41,20
0,0649	16,56	0,0649	20,98	0,1382	26,19	0,0723	42,44
0,0673	16,92	0,0673	20,48	0,1433	26,16	0,0750	42,59
0,0698	17,41	0,0698	20,25	0,1486	26,72	0,0777	44,28
0,0723	18,03	0,0723	19,40	0,1540	27,04	0,0806	45,39
0,0750	18,05	0,0750	19,37	0,1596	27,87	0,0835	45,13
0,0777	18,65	0,0777	18,91	0,1655	27,98	0,0866	46,47
0,0806	19,52	0,0806	19,15	0,1715	27,66	0,0898	46,66
0,0835	19,94	0,0835	19,21	0,1778	27,59	0,0931	46,27
0,0866	20,79	0,0866	19,27	0,1843	27,09	0,0965	46,90
0,0898	20,84	0,0898	19,18	0,1911	27,79	0,1000	46,18
0,0931	20,91	0,0931	19,11	0,1981	26,86	0,1037	47,23

0,0965	21,02	0,0965	18,45	0,2054	26,29	0,1075	46,75
0,1000	21,53	0,1000	17,41	0,2129	26,28	0,1114	47,40
0,1037	21,89	0,1037	17,17	0,2207	24,73	0,1155	48,69
0,1075	22,06	0,1075	16,43	0,2288	24,65	0,1197	48,04
0,1114	22,17	0,1114	16,35	0,2371	25,16	0,1241	47,38
0,1155	22,90	0,1155	15,91	0,2458	24,73	0,1286	47,82
0,1197	22,69	0,1197	16,30	0,2548	25,26	0,1334	47,90
0,1241	22,82	0,1241	15,97	0,2642	24,05	0,1382	48,73
0,1286	23,49	0,1286	15,49	0,2738	22,96	0,1433	50,34
0,1334	23,71	0,1334	15,50	0,2839	22,85	0,1486	51,25
0,1382	23,84	0,1382	14,88	0,2943	21,95	0,1540	52,13
0,1433	23,71	0,1433	13,39	0,2948	22,16	0,1596	51,41
0,1486	23,25	0,1486	13,26	0,3017	23,20	0,1655	51,22
0,1540	23,90	0,1540	12,77	0,3051	23,14	0,1715	50,15
0,1596	23,69	0,1596	12,10	0,3085	23,43	0,1778	50,44
0,1655	22,52	0,1655	12,02	0,3152	24,33	0,1843	49,65
0,1715	23,49	0,1715	11,60	0,3162	23,38	0,1911	49,09
0,1778	24,18	0,1778	14,08	0,3217	23,38	0,1981	48,35
0,1843	24,65	0,1843	16,72	0,3278	23,04	0,2054	48,96
0,1911	25,10	0,1911	16,40	0,3281	22,65	0,2129	48,42
0,1981	25,82	0,1981	18,24	0,3344	22,65	0,2207	47,88
0,2054	25,68	0,2054	21,77	0,3398	22,61	0,2288	48,08
0,2129	26,16	0,2129	22,88	0,3405	22,58	0,2371	46,28
0,2207	26,49	0,2207	24,54	0,3466	21,83	0,2458	45,35
0,2288	27,16	0,2288	26,52	0,3523	20,73	0,2548	45,27
0,2371	27,34	0,2371	29,93	0,3555	20,68	0,2642	43,55
0,2458	27,13	0,2458	30,82	0,3642	20,68	0,2738	43,58
0,2548	27,05	0,2548	29,79	0,3652	20,68	0,2839	43,96
0,2642	27,92	0,2642	30,80	0,3699	20,89	0,2943	44,08
0,2738	28,15	0,2738	30,67	0,3783	20,82	0,2948	44,36
0,2839	27,50	0,2839	29,37	0,3786	20,82	0,3017	43,84
0,2943	27,18	0,2943	31,79	0,3865	21,78	0,3051	43,29
0,2948	26,49	0,2948	31,35	0,3924	21,81	0,3085	42,88
0,3017	26,38	0,3017	31,35	0,3945	22,44	0,3152	42,18
0,3051	27,18	0,3051	32,18	0,4025	21,62	0,3162	42,70
0,3085	26,94	0,3085	32,03	0,4068	21,17	0,3217	43,60
0,3152	26,66	0,3152	31,77	0,4103	20,40	0,3278	43,83
0,3162	26,56	0,3162	31,95	0,4204	20,14	0,3281	44,26
0,3217	25,81	0,3217	32,53	0,4304	20,67	0,3344	43,73
0,3278	25,15	0,3278	32,63	0,4402	20,12	0,3398	42,61
0,3281	25,06	0,3281	33,18	0,4498	19,88	0,3405	41,36
0,3344	24,57	0,3344	33,18	0,4592	19,63	0,3466	41,38
0,3398	24,63	0,3398	33,52	0,4685	19,33	0,3523	42,24
0,3405	24,81	0,3405	33,55	0,4776	19,13	0,3555	42,12
0,3466	25,20	0,3466	33,15	0,4889	17,90	0,3642	41,93
0,3523	25,50	0,3523	33,73	0,4999	17,59	0,3652	41,98

0,3555	27,32	0,3555	34,27	0,5108	16,78	0,3699	41,76
0,3642	26,51	0,3642	34,47	0,5236	15,91	0,3783	42,92
0,3652	26,01	0,3652	34,78	0,5342	15,72	0,3786	43,70
0,3699	25,72	0,3699	34,58	0,5445	15,70	0,3865	43,54
0,3783	25,11	0,3783	34,48	0,5568	14,74	0,3924	43,47
0,3786	24,71	0,3786	34,03	0,5709	14,51	0,3945	42,79
0,3865	25,34	0,3865	33,39	0,5849	14,23	0,4025	42,75
0,3924	24,81	0,3924	33,28	0,5967	13,38	0,4068	43,47
0,3945	25,16	0,3945	33,33	0,6103	13,36	0,4103	43,50
0,4025	24,41	0,4025	33,27	0,6256	13,28	0,4204	44,05
0,4068	23,99	0,4068	32,60	0,6407	13,07	0,4304	44,88
0,4103	23,92	0,4103	32,23	0,6557	13,09	0,4402	44,60
0,4204	23,87	0,4204	33,10	0,6705	13,11	0,4498	43,77
0,4217	23,05	0,4217	32,58	0,6869	13,02	0,4592	43,45
0,4304	23,36	0,4304	32,92	0,7032	12,78	0,4685	43,56
0,4371	24,16	0,4371	33,70	0,7194	13,12	0,4776	42,74
0,4402	25,41	0,4402	31,94	0,7371	12,87	0,4889	43,08
0,4498	26,05	0,4498	32,46	0,7565	12,61	0,4999	42,71
0,4532	25,89	0,4532	32,59	0,7758	12,66	0,5108	42,73
0,4592	25,51	0,4592	31,66	0,7948	12,84	0,5236	42,36
0,4685	25,93	0,4685	31,90	0,8155	12,65	0,5342	42,33
0,4698	25,95	0,4698	32,13	0,8361	12,75	0,5445	42,23
0,4776	26,21	0,4776	31,87	0,8581	12,63	0,5568	41,52
0,4870	26,83	0,4870	31,32	0,8801	12,60	0,5709	40,86
0,4889	26,95	0,4889	31,07	0,9037	12,53	0,5849	40,91
0,4999	27,00	0,4999	31,09	0,9288	12,44	0,5967	40,87
0,5048	27,15	0,5048	31,36	0,9537	12,34	0,6103	40,87
0,5108	27,93	0,5108	32,02	0,9803	12,48	0,6256	41,01
0,5233	28,30	0,5233	32,07	1,0067	12,41	0,6407	41,12
0,5236	27,16	0,5236	33,51	1,0347	12,49	0,6557	41,38
0,5342	26,89	0,5342	33,64	1,0642	12,45	0,6705	41,38
0,5425	26,53	0,5425	33,60	1,0954	12,23	0,6869	41,50
0,5445	26,12	0,5445	33,23	1,1280	11,94	0,7032	41,69
0,5568	26,01	0,5568	32,60	1,1606	12,06	0,7194	41,64
0,5623	25,73	0,5623	32,60	1,1948	11,84	0,7371	41,74
0,5709	25,75	0,5709	32,80	1,2305	12,05	0,7565	41,79
0,5829	25,60	0,5829	33,15	1,2678	12,18	0,7758	41,79
0,5849	24,34	0,5849	33,15	1,3066	12,00	0,7948	41,75
0,5967	24,45	0,5967	33,49	1,3470	11,90	0,8155	41,83
0,6043	24,04	0,6043	33,67	1,3890	12,10	0,8361	41,82
0,6103	24,23	0,6103	33,92	1,4326	12,07	0,8581	41,72
0,6256	24,47	0,6256	33,87	1,4777	11,93	0,8801	41,69
0,6264	24,37	0,6264	33,95	1,5252	11,89	0,9037	41,66
0,6407	24,47	0,6407	34,02	1,5752	11,77	0,9288	41,79
0,6494	24,23	0,6494	34,14	1,6274	11,65	0,9537	41,83
0,6557	24,02	0,6557	34,14	1,6818	11,68	0,9803	41,84

0,6705	23,98	0,6705	34,47	1,7379	11,75	1,0067	42,08
0,6732	23,28	0,6732	35,69	1,7955	11,50	1,0347	42,07
0,6869	23,28	0,6869	35,63	1,8562	11,38	1,0642	42,22
0,6978	23,46	0,6978	35,59	1,9199	11,29	1,0954	42,16
0,7032	23,02	0,7032	36,02	1,9851	11,24	1,1280	42,20
0,7194	23,20	0,7194	36,08	2,0534	11,40	1,1606	42,28
0,7234	23,27	0,7234	36,09	2,1244	11,22	1,1948	42,31
0,7371	23,42	0,7371	36,34	2,1985	11,19	1,2305	42,37
0,7565	23,60	0,7565	36,50	2,2753	11,02	1,2678	42,38
0,7758	23,66	0,7758	36,79	2,3540	11,11	1,3066	42,42
0,7948	23,74	0,7948	36,82	2,4374	11,55	1,3470	42,48
0,8155	23,88	0,8155	36,83	2,5239	11,68	1,3890	42,44
0,8361	23,38	0,8361	36,82	2,6134	11,51	1,4326	42,49
0,8581	23,47	0,8581	36,85	2,7056	11,24	1,4777	42,48
0,8801	23,63	0,8801	36,21	2,8013	10,85	1,5252	42,60
0,9037	23,80	0,9037	36,24	2,8993	10,91	1,5752	42,62
0,9288	23,79	0,9288	36,35	3,0014	11,18	1,6274	42,67
0,9537	23,95	0,9537	36,61	3,1086	11,03	1,6818	42,71
0,9803	24,07	0,9803	36,67	3,2192	10,97	1,7379	42,63
1,0067	24,42	1,0067	36,69	3,3319	10,92	1,7955	42,57
1,0347	24,54	1,0347	36,70	3,4495	10,55	1,8562	42,55
1,0642	24,70	1,0642	36,85	3,5717	10,47	1,9199	42,52
1,0954	25,48	1,0954	36,88	3,6957	12,09	1,9851	42,47
1,1280	25,64	1,1280	36,95	3,8241	12,22	2,0534	42,16
1,1606	25,71	1,1606	36,95	3,9582	12,10	2,1244	42,24
1,1948	25,76	1,1948	37,00	4,0964	13,57	2,1985	42,31
1,2305	25,83	1,2305	37,05	4,2387	13,73	2,2753	42,31
1,2678	25,97	1,2678	37,15	4,3852	15,82	2,3540	42,33
1,3066	26,01	1,3066	37,13	4,5364	16,07	2,4374	42,23
1,3470	26,10	1,3470	37,21	4,6929	16,46	2,5239	41,93
1,3890	26,33	1,3890	37,27	4,8545	16,59	2,6134	41,90
1,4326	26,41	1,4326	37,46			2,7056	41,58
1,4777	26,55	1,4777	37,63			2,8013	41,36
1,5252	26,73	1,5252	37,80			2,8993	41,39
1,5752	26,86	1,5752	38,01			3,0014	41,39
1,6274	26,92	1,6274	38,09			3,1086	41,43
1,6818	27,09	1,6818	38,16			3,2192	41,32
1,7379	27,23	1,7379	38,26			3,3319	41,00
1,7955	27,49	1,7955	38,30			3,4495	40,90
1,8562	27,65	1,8562	38,36			3,5717	40,93
1,9199	27,78	1,9199	38,45			3,6957	40,32
1,9851	27,85	1,9851	38,55			3,8241	40,13
2,0534	27,95	2,0534	38,63			3,9582	39,90
2,1244	27,93	2,1244	38,70			4,0964	39,97
2,1985	27,99	2,1985	38,90			4,2387	39,89
2,2753	28,18	2,2753	38,98			4,3852	39,47

2,3540	28,29	2,3540	39,09			4,5364	39,89
2,4374	28,45	2,4374	39,20			4,6929	39,63
2,5239	28,56	2,5239	39,21			4,8545	39,24
2,6134	28,59	2,6134	39,30			5,0218	39,87
2,7056	28,64	2,7056	39,21			5,1938	39,78
2,8013	28,68	2,8013	39,08			5,3703	39,71
2,8993	28,59	2,8993	39,08			5,5524	39,69
3,0014	28,70	3,0014	39,02			5,7412	39,44
3,1086	28,94	3,1086	38,90			5,9354	39,59
3,2192	28,79	3,2192	38,80			6,1361	39,45
3,3319	29,22	3,3319	38,52			6,3430	39,26
3,4495	29,35	3,4495	38,53			6,5560	39,13
3,5717	29,46	3,5717	38,22			6,7763	38,97
3,6957	29,83	3,6957	38,09			7,0033	38,89
3,8241	29,68	3,8241	37,84			7,2383	39,07
3,9582	29,35	3,9582	37,25			7,4808	38,95
4,0964	29,43	4,0964	37,04			7,7311	39,17
4,2387	29,40	4,2387	36,65			7,9890	39,37
4,3852	29,20	4,3852	36,01			8,2551	39,14
4,5364	28,90	4,5364	35,35			8,5304	39,00
4,6929	28,47	4,6929	34,68			8,8153	38,84
4,8545	28,58	4,8545	34,49			9,1094	38,72
5,0218	28,83	5,0218	33,58			9,4125	39,16
5,1938	27,91	5,1938	32,88			9,7257	39,07
5,3703	28,23	5,3703	32,67				
5,5524	29,32	5,5524	31,88				
5,7412	29,28	5,7412	30,67				
5,9354	30,02	5,9354	29,87				
6,1361	30,15	6,1361	29,57				
6,3430	30,22	6,3430	29,09				
6,5560	30,19	6,5560	28,69				
6,7763	30,22	6,7763	28,23				
7,0033	30,20	7,0033	27,78				
7,2383	30,22	7,2383	27,35				
7,4808	30,41	7,4808	26,76				
7,7311	30,41	7,7311	26,42				
7,9890	30,56	7,9890	26,10				
8,2551	30,86	8,2551	25,46				
8,5304	30,85	8,5304	24,91				
8,8153	30,57	8,8153	24,27				
9,1094	30,91	9,1094	23,66				
9,4125	30,43	9,4125	23,20				
9,7257	30,34	9,7257	22,22				

Figura 5.41

FA (4T400W) (20 kHz)					
d_p(mm)	h_(r) (%)		d_p(mm)	h_(r) (%)	
	Sin humedad	6% (V/V) (H₂O)_v		Sin humedad	6% (V/V) (H₂O)_v
0,0146		62,94	0,1264	36,20	51,40
0,0151		64,43	0,1310	36,52	51,70
0,0157		66,01	0,1358	36,81	52,07
0,0163		67,57	0,1408	37,05	52,50
0,0169		69,04	0,1459	37,26	53,07
0,0175		70,38	0,1513	37,47	53,81
0,0181		71,59	0,1568	37,61	54,68
0,0188		72,67	0,1626	37,70	55,61
0,0195		73,61	0,1685	37,67	56,69
0,0202		74,45	0,1747	37,68	57,72
0,0209		75,17	0,1811	37,63	58,63
0,0217		75,79	0,1877	37,31	59,49
0,0225		76,32	0,1946	36,71	60,39
0,0233	14,92	76,74	0,2017	36,10	61,25
0,0241	13,15	77,06	0,2091	35,70	62,11
0,0250	11,99	77,30	0,2168	35,42	62,92
0,0259	10,49	77,87	0,2247	35,43	63,74
0,0269	9,12	78,42	0,2329	35,44	64,48
0,0279	7,65	78,95	0,2415	35,47	65,12
0,0289	6,48	79,62	0,2503	35,47	65,67
0,0300	6,23	80,29	0,2595	35,46	66,11
0,0311	6,46	80,90	0,2690	35,48	66,42
0,0322	7,44	81,42	0,2789	35,42	66,71
0,0334	8,42	81,88	0,2891	35,42	67,00
0,0346	9,22	82,29	0,2997	35,50	67,27
0,0359	9,95	82,63	0,3106	35,46	67,51
0,0372	10,70	82,84	0,3220	35,43	67,76
0,0385	11,56	82,95	0,3338	35,47	68,00
0,0400	12,32	82,90	0,3460	35,31	68,20
0,0414	13,18	82,57	0,3587	35,13	68,38
0,0429	14,07	81,96	0,3719	35,02	68,54
0,0445	14,90	81,08	0,3855	34,76	68,59
0,0461	15,71	79,98	0,3996	34,69	68,59
0,0478	16,46	78,62	0,4142	34,49	68,55
0,0496	17,14	77,00	0,4294	34,38	68,49
0,0514	17,87	75,23	0,4452	34,28	68,49
0,0533	18,59	73,40	0,4615	34,17	68,49
0,0552	19,31	71,42	0,4784	34,04	68,47
0,0573	19,97	69,51	0,4959	33,92	68,45

0,0594	20,63	67,77	0,5141	33,88	68,42
0,0615	21,51	66,11	0,5329	33,78	68,38
0,0638	22,61	64,47	0,5524	33,71	68,34
0,0661	23,65	62,91	0,5726	33,67	68,28
0,0686	24,47	61,38	0,5936	33,66	68,19
0,0711	25,08	59,96	0,6154	33,67	68,09
0,0737	26,19	58,58	0,6379	33,55	68,01
0,0764	27,19	57,33	0,6613	33,47	67,93
0,0792	28,11	56,22	0,6855	33,38	67,86
0,0821	29,03	55,27	0,7106	33,33	67,82
0,0851	29,94	54,45	0,7366	33,32	67,82
0,0882	30,78	53,80			
0,0914	31,50	53,22			
0,0948	32,11	52,72			
0,0982	32,73	52,32			
0,1018	33,25	51,98			
0,1056	33,84	51,66			
0,1094	34,40	51,41			
0,1134	34,90	51,27			
0,1176	35,37	51,19			
0,1219	35,82	51,21			

Figura 5.42

$d_p(\text{mm})$	6% (V/V) (H ₂ O) _v		$d_p(\text{mm})$	6% (V/V) (H ₂ O) _v	
	$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)			$dc_n/d\log(d_p)$ (part./Ncm ³)	
	FA(OFF)	FA(ON) (4T400W)(20kHz)		FA(OFF)	FA(ON) (4T400W)(20kHz)
0,0181	3,98E+05	1,71E+05	0,1176	6,16E+06	3,51E+06
0,0188	3,45E+05	1,48E+05	0,1219	5,48E+06	3,04E+06
0,0195	2,30E+05	9,65E+04	0,1264	4,80E+06	2,71E+06
0,0202	1,56E+05	6,43E+04	0,1310	4,24E+06	2,30E+06
0,0209	1,09E+05	4,32E+04	0,1358	3,72E+06	1,94E+06
0,0217	7,88E+04	3,00E+04	0,1408	3,23E+06	1,57E+06
0,0225	5,96E+04	2,11E+04	0,1459	2,81E+06	1,28E+06
0,0233	4,89E+04	1,50E+04	0,1513	2,45E+06	1,03E+06
0,0241	4,44E+04	1,08E+04	0,1568	2,08E+06	8,52E+05
0,0250	4,47E+04	7,99E+03	0,1626	1,77E+06	7,09E+05
0,0259	5,07E+04	5,99E+03	0,1685	1,53E+06	6,02E+05
0,0269	6,27E+04	4,47E+03	0,1747	1,31E+06	5,08E+05
0,0279	8,28E+04	3,65E+03	0,1811	1,13E+06	4,41E+05

0,0289	1,13E+05	3,39E+03	0,1877	9,95E+05	3,82E+05
0,0300	1,56E+05	4,25E+03	0,1946	8,82E+05	3,30E+05
0,0311	2,15E+05	6,45E+03	0,2017	7,76E+05	2,88E+05
0,0322	2,94E+05	1,08E+04	0,2091	6,91E+05	2,51E+05
0,0334	3,94E+05	1,82E+04	0,2168	6,24E+05	2,19E+05
0,0346	5,28E+05	2,93E+04	0,2247	5,67E+05	1,94E+05
0,0359	6,89E+05	4,65E+04	0,2329	5,15E+05	1,72E+05
0,0372	8,76E+05	7,02E+04	0,2415	4,69E+05	1,53E+05
0,0385	1,09E+06	1,04E+05	0,2503	4,27E+05	1,35E+05
0,0400	1,35E+06	1,55E+05	0,2595	3,85E+05	1,21E+05
0,0414	1,64E+06	2,23E+05	0,2690	3,48E+05	1,08E+05
0,0429	2,00E+06	3,11E+05	0,2789	3,13E+05	9,64E+04
0,0445	2,39E+06	4,23E+05	0,2891	2,80E+05	8,64E+04
0,0461	2,92E+06	5,57E+05	0,2997	2,51E+05	7,69E+04
0,0478	3,52E+06	7,08E+05	0,3106	2,24E+05	6,88E+04
0,0496	4,13E+06	8,99E+05	0,3220	2,03E+05	6,12E+04
0,0514	4,80E+06	1,11E+06	0,3338	1,82E+05	5,44E+04
0,0533	5,60E+06	1,37E+06	0,3460	1,63E+05	4,83E+04
0,0552	6,26E+06	1,69E+06	0,3587	1,42E+05	4,32E+04
0,0573	7,07E+06	2,01E+06	0,3719	1,27E+05	3,85E+04
0,0594	8,19E+06	2,39E+06	0,3855	1,12E+05	3,46E+04
0,0615	8,94E+06	2,74E+06	0,3996	9,90E+04	3,12E+04
0,0638	9,59E+06	3,17E+06	0,4142	8,95E+04	2,87E+04
0,0661	1,02E+07	3,54E+06	0,4294	8,18E+04	2,60E+04
0,0686	1,07E+07	3,93E+06	0,4452	7,25E+04	2,31E+04
0,0711	1,07E+07	4,38E+06	0,4615	6,47E+04	2,09E+04
0,0737	1,12E+07	4,84E+06	0,4784	5,87E+04	1,87E+04
0,0764	1,14E+07	5,14E+06	0,4959	5,24E+04	1,64E+04
0,0792	1,18E+07	5,41E+06	0,5141	4,70E+04	1,46E+04
0,0821	1,16E+07	5,75E+06	0,5329	4,17E+04	1,31E+04
0,0851	1,07E+07	5,82E+06	0,5524	3,70E+04	1,15E+04
0,0882	1,01E+07	5,83E+06	0,5726	3,28E+04	1,02E+04
0,0914	9,70E+06	5,77E+06	0,5936	2,93E+04	9,18E+03
0,0948	8,92E+06	5,74E+06	0,6154	2,58E+04	8,13E+03
0,0982	8,60E+06	5,40E+06	0,6379	2,30E+04	7,22E+03
0,1018	8,80E+06	5,17E+06	0,6613	2,02E+04	6,79E+03
0,1056	8,33E+06	4,74E+06	0,6855	1,90E+04	6,50E+03
0,1094	7,59E+06	4,37E+06	0,7106	1,76E+04	6,09E+03
0,1134	6,87E+06	3,88E+06	0,7366	1,66E+04	5,74E+03