

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



“evaluación De una unidad complementaria de clasificación de partículas en la
planta de molienda de minerales no metálicos”

REALIZADO POR:
Br. ANTONIO JOSÉ SÁNCHEZ GUTIÉRREZ

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito
parcial para optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**

Puerto La Cruz, Agosto De 2007

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



“evaluación De una unidad complementaria de clasificación de partículas en la
planta de molienda de minerales no metálicos”

ASESORES

Ing. Quím. Héctor Silva (M.Sc)
Asesor Académico

Ing. Quím. Wilfredo Zevallos
Asesor Industrial

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



“evaluación De una unidad complementaria de clasificación de partículas en la
planta de molienda de minerales no metálicos”

Jurado calificador

Ing. Quím. Héctor Silva (M.Sc)

Asesor Académico

Ing. Quím. Petra Martínez
(M.Sc)

Ing. Quím. Frank Parra
Jurado principal

Puerto la cruz, agosto de 2007

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”

DEDICATORIA

A mis padres Maria de Sánchez y Víctor Sánchez por estar siempre a mi lado en todo momento por servir de guía espiritual, por compartir y hacer mis problemas y preocupaciones de ustedes, este triunfo también es suyo. A mis dos grandes amores Besmary Salazar y mi hija Ariana Sánchez.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por apoyarme y ayudado en todo cuando los necesité para poder alcanzar esta meta.

A mi esposa Besmary por darme su amor y apoyo cada día.

A las señoras de la residencia Lola y felicia por haberme acogido en su casa.

A mi tutor académico Héctor Silva por haber aceptado ser parte de este proyecto mediante su ayuda, guía y consejos, por su entrega en el aula en los cursos de: “Introducción a la ingeniería química” y “Fisicoquímica 2”, por siempre fomentar en sus estudiantes la confianza necesaria para alcanzar las metas propuestas. Gracias.

A mi tutor industrial Wilfredo Zevallos por haberme dado la oportunidad de conocer en la practica el maravilloso mundo de los procesos operacionales y de concluir esta etapa indispensable en mi formación como ingeniero químico, por su guía a través del desarrollo del proyecto y ayudarme a enfocar la solución de los problemas en el momento en que se presentaron las dificultades. Gracias.

Al equipo que labora en MICRA, supervisores, analistas, personal de mantenimiento, por brindarme el apoyo necesario para culminar este proyecto.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la evaluación de una unidad complementaria de clasificación de partículas en una línea de producción de la planta N° 2, de Micronizados caribe, C.A, la cual está ubicada en Cumaná, estado Sucre. Y se dedica a la producción de carbonato de calcio micronizado, con el fin de obtener un producto final con un tamaño medio de partícula ($D_{50\%}$) menor que la alimentación y con una mayor área superficial, características muy importantes requeridas por la industria del papel. El sistema complementario de clasificación, se evaluó utilizando un equipo de difracción láser que analiza la distribución granulométrica del material alimentado y de los productos; evaluando dichos resultados por la curva de selectividad o de Tromp. Se escogieron como variables para realizar una corrida control, la velocidad, el sentido de giro del rotor y la concentración de partículas con un valor definido. Posteriormente se realizaron corridas de prueba en las que se varía una de las variables por vez, con el fin de medir su efecto sobre el tamaño de las partículas y establecer comparaciones entre ellas. De las condiciones de operación escogidas, se obtuvo una buena clasificación de partículas cuando se trabajó con el sentido de giro del rotor en reversa, una concentración de material de alimentación de 157,13 g polvo/m³ aire y una velocidad del rotor de 549 rpm; logrando aumentar el área superficial de las partículas de 0,4971 m²/g en la alimentación a 0,6466 m²/g en el producto del ciclón, y bajar el tamaño de partícula promedio ($D_{50\%}$) de 11,33 µm en la alimentación a 7,05 µm en el producto del ciclón. Los resultados obtenidos demuestran que el microclasificador complementario permite obtener un producto más fino y de mayor área superficial, destinado a suplir a la industria de fabricación de papel.

ÍNDICE

| | |
|--|-----|
| RESOLUCIÓN | i |
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTO | iii |
| RESUMEN | iv |
| ÍNDICE | 1 |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Presentación De La Empresa | 1 |
| 1.2. Planteamiento Del Problema. | 2 |
| 1.3. Objetivos..... | 4 |
| 1.3.1. Objetivo General..... | 4 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos. | 4 |
| CAPÍTULO 2 | 6 |
| MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1. Antecedentes..... | 6 |
| 2.2. Generalidades Del Carbonato De Calcio. | 7 |
| 2.2.1. Dolomita. | 7 |
| 2.3 Características De Las Partículas Sólidas..... | 8 |
| 2.4. Medición Del Tamaño De Partículas..... | 10 |
| 2.5 Sistemas De Transporte De Partículas..... | 18 |
| 2.6 Sistemas De Válvulas. | 20 |
| 2.7 Ventiladores..... | 22 |
| 2.8 Almacenamiento De Materiales Particulados..... | 23 |
| 2.9 Clasificación De Partículas..... | 25 |
| 2.10 Filtros De Manga. | 31 |
| 2.11 Descripción Del Proceso De Producción Y De La Unidad Complementaria De Clasificación De Partículas En Micronizados Caribe..... | 34 |

| | |
|--|-----|
| 2.12 Factores Que Afectan La Eficacia De La Clasificación..... | 38 |
| 2.13 Criterios De La Clasificación De Partículas Sólidas..... | 39 |
| 2.14 Métodos Para Determinar El Funcionamiento De Un Clasificador. | 43 |
| Capítulo 3 | 57 |
| Desarrollo del proyecto | 57 |
| 3.1 Identificación De Las Variables Que Afectan La Distribución Granulométrica De Las Partículas En Un Microclasificador..... | 57 |
| 3.2 Determinación De La Influencia De Las Variables Seleccionadas En La Distribución Del Tamaño De Las Partículas..... | 59 |
| 3.3 Determinación Del Funcionamiento Del Clasificador. | 64 |
| 3.4 Establecimiento De Las Condiciones De Trabajo Adecuadas Del Sistema De Clasificación Complementario..... | 65 |
| 3.5 Equipos, Materiales Y Sustancias. | 65 |
| 3.6 Muestra De Cálculos. | 68 |
| CAPÍTULO 4 | 80 |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 80 |
| 4.1 Análisis De Resultados..... | 80 |
| 4.2 Conclusiones..... | 99 |
| 4.3 Recomendaciones | 100 |
| BIBLIOGRAFÍA CITA..... | 100 |
| anexos | 103 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación De La Empresa.

En la industria química el uso de partículas sólidas micronizadas (carbonato de calcio), es de uso común y tiene múltiples aplicaciones que van desde fertilizantes para la neutralización de suelos ácidos hasta polvos muy finos para la fabricación de pinturas, y papel entre otras. Para lograr este tipo de producto existen industrias que utilizan sistemas de molienda, clasificación y separación de partículas, que dependen de la eficiencia de sus equipos para lograr el tamaño de partícula deseado, que van de rangos desde 100 % pasante en tamiz 100 (150 micras) hasta productos de 99,5 % pasante en tamiz 635 (20 micras).

Una de esas industrias es Micronizados Caribe, C.A (MICRA), la cual es una empresa venezolana ubicada en Cumaná, estado Sucre, fundada en el año 1994. En sus inicios comenzó con la molienda de rocas calcáreas para producir diversos grados de carbonato de calcio micronizados, en una planta ubicada en Guirintal, a 18 km de la ciudad, en la carretera Cumaná – Carúpano. Esta primera planta contaba con un molino que tenía una producción de 1500 ton/mes, posteriormente en 1997 se adquirió otro molino para así aumentar la producción a 3000 ton/mes.

En el año 2000, MICRA adquirió una segunda planta, ubicada en la zona industrial El Peñón, Cumaná, a la cual se le denominó planta N° 2. Ésta consta de



tres líneas de molienda, con una capacidad total de producción de 2500 ton/mes. Adicionalmente, cada planta cuenta con laboratorios de control de calidad, sistemas de premolienda, talleres de mantenimiento, generación propia de energía eléctrica, entre otros.

Desde su creación en 1994, MICRA se ha convertido en líder en la industria de la molienda fina de minerales no metálicos, mediante la fabricación de productos de la más alta calidad, la presentación de un sobresaliente servicio técnico y el logro de un óptimo nivel de costos que satisfacen los requerimientos mutuamente establecidos con sus clientes. Para conseguir y mantener el liderazgo que garantice un crecimiento continuo de su organización, se adapta a los cambios que implican progreso tecnológico, aumenta tenazmente el espíritu de su personal, participa activamente en el desarrollo de la comunidad, y se compromete a realizar sus operaciones conforme a la observancia de los reglamentos y leyes aplicables.

Micronizados Caribe moltura minerales no metálicos produciendo varios grados técnicos de carbonato de calcio micronizado, tanto calcáreos como dolomíticos. Los productos se manufacturan cumpliendo los requerimientos de los clientes respecto de la granulometría, el color y la calidad química, al adoptar las normas ISO 9000, COVENIN y ASTM, como estándares para mantener la alta calidad y el mejoramiento constante en toda la empresa. Suple a importantes clientes del país en la industria de pinturas, plásticos, fibra de vidrio, lodos de perforación y alimentos, entre otros.

1.2. Planteamiento Del Problema.

La planta N° 1 de MICRA actualmente está dedicada a la obtención de productos de distribuciones granulométricas gruesa, de rangos estrechos, destinados a



la industria petrolera; mientras que en la N° 2 se obtienen productos de distribuciones granulométricas finas de amplios rangos, supliendo a importantes clientes del país en la industria de pinturas, plásticos, alimentos, etc.

En la actualidad, la empresa Micronizados Caribe, específicamente en sus líneas de producción de la planta N° 2 tiene la capacidad tecnológica de producir diversos grados de carbonato de calcio micronizado, en un rango que va desde 100 % pasante en tamiz 325 (45 micras) y para tamaños de partículas que dividen la población de partículas en dos partes iguales ($D_{50\%}$) de 10 - 13 micras, hasta productos de 99,5 % pasante en tamiz 450 (25 micras) y tamaños de partículas de $D_{50\%}$ de 6 – 9 micras.

Las unidades de molienda existentes en ambas plantas son de procesos continuos, y están limitadas para elaborar sólo productos con las finuras descritas anteriormente, logrando un aceptable rendimiento de producción. Sin embargo, esos productos contienen a su vez una cierta cantidad de partículas finas, las cuales se podrían extraer por sistemas complementarios de clasificación, obteniéndose así un producto más fino y de un rango más amplio que permita atender nuevos mercados, tal como el de papel.

En 2005, MICRA instaló un sistema complementario de clasificación de partículas con el objetivo de obtener productos más finos, tales como 99,5% pasante en tamiz 635 (20 micras) con diámetros de $D_{50\%}$ de 4 - 5 micras. Este microclasificador podría ser alimentado con el producto fino proveniente de una línea de producción de la planta N° 2, con lo cual se lograría separar el producto en dos tipos de cortes, uno más grueso que la alimentación y otro más fino el cual podría ser ofertado al mercado del papel.



En consecuencia, en el presente trabajo se pretende evaluar ese sistema complementario de clasificación, para mejorar el rango de distribución de partículas finas del producto obtenido, a partir de la alimentación antes mencionada. Para ello se identificarán las diferentes variables que influyen en la granulometría de las partículas, el tamaño de las mismas, se determinará el funcionamiento del microclasificador por medio del rendimiento, tamaño de corte, agudeza del corte y finalmente se establecerán las condiciones de trabajo más adecuadas del sistema de clasificación complementario estudiado.

Con los resultados del presente trabajo, la empresa Micronizados Caribe logrará obtener productos finos con un área superficial mayor, cumpliendo con las especificaciones establecidas por las empresas que demandan estos productos. Este aumento de productos finos permitirá darle mayor valor agregado a la producción, traduciéndose en una ganancia para la misma.

1.3. Objetivos.

Los objetivos de la investigación realizada fueron los siguientes:

1.3.1. Objetivo General.

Evaluar la unidad complementaria de clasificación de partículas en la planta de molienda de minerales no metálicos micronizados caribe.

1.3.2. Objetivos Específicos.

1. Identificar las variables del proceso que afectan la distribución granulométrica de las partículas en el microclasificador.



2. Determinar la influencia de las variables seleccionadas en la distribución del tamaño de las partículas.
3. Determinar el funcionamiento del microclasificador de partículas por medio del rendimiento, tamaño de corte y agudeza del corte.
4. Establecer las condiciones de trabajo adecuadas del sistema de clasificación complementario.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Para realizar la presente investigación debió tomarse en cuenta el conocimiento previamente construido, que constituye la base teórica fundamental en la que se sustenta el trabajo. Los aspectos más relevantes se presentan a continuación.

2.1. Antecedentes.

Este estudio sobre la evaluación de una unidad de clasificación de partículas complementaria en una planta de molienda de minerales no metálicos ha conducido a la búsqueda de material de investigación, que pueden considerarse antecedentes directos o indirectos del trabajo realizado, algunos de los cuales son los siguientes:

Ortiz A. [1]. En esta investigación se, realizó una evaluación al sistema de molienda de cemento en la planta de pertigalete II de Cemex, estado Anzoátegui. Para ello se determinó la eficiencia, el rendimiento y la habilidad del separador para llevar las partículas finas al producto final. De los resultados obtenidos, el autor concluyó que la curva de selección de Tromp demostró que los separadores de los molinos N° 11 y N° 13 trabajaban en forma eficiente, realizando una buena selección del material, en partículas finas y gruesas. Además, variando el tamaño y número de aspas de selección y disminuyendo el espacio entre éstas se logra aumentar la producción, disminuir el consumo energético y disponer de un producto terminado a una temperatura adecuada. Recomendó realizar un análisis granulométrico “láser” con la finalidad de determinar la repartición del material para tamaños de partículas



inferiores a 30 micras, lo cual permitiría establecer la curva de selección y determinar el límite de agudeza del separador, para ser comparado con los resultados obtenidos del análisis granulométrico utilizando microtamices.

Xavier E. [2]. En este estudio se trabajó con una serie de equipos de trituración, molienda, separación y clasificación de partículas, entre otros, para lograr una buena distribución granulométrica del producto final, para su posterior moldeado y conformación, con el fin de optimizar la fabricación de los materiales cerámicos.

2.2. Generalidades Del Carbonato De Calcio.

El carbonato de calcio es un compuesto muy usado en la industria química en estado puro e impuro. Generalmente se le obtiene a partir de material rocoso mineral natural, el cual es pulverizado y convertido en partículas de diversos tamaños [3].

Entre las rocas naturales de donde puede obtenerse el carbonato de calcio se encuentran:

2.2.1. Dolomita.

También llamada piedra caliza dolomítica. Es un mineral formado por carbonato de calcio y magnesio. Es una roca sedimentaria cuya cantidad de calcio y magnesio es igual en la mayoría de los especímenes, aunque en algunos casos se presentan en proporciones desiguales. Posee también pequeñas cantidades de hierro y manganeso. La dolomita se utiliza para hacer la magnesia, de aplicación en medicina; en la industria química para la preparación de sales de magnesio; también es utilizada como piedra ornamental y estructural, y en metalurgia para la extracción de metales [4].



2.2.2 Calcita.

Es una roca sedimentaria y uno de los minerales más importantes del carbonato de calcio (CaCO_3). La calcita se utiliza en el cemento, como agregados, fabricación rápida de la cal, aplicaciones metalúrgicas y para un número de otras aplicaciones industriales.

2.3 Características De Las Partículas Sólidas.

Las partículas sólidas individuales generalmente se caracterizan por su tamaño, forma y densidad.

El tamaño y las formas de las partículas se pueden especificar fácilmente para las regulares, tales como esferas o cubos, pero para las irregulares (tales como granos de arena o laminas de mica), los términos tamaños y forma no resultan tan claros, y es preciso definirlos arbitrariamente [5].

2.3.1 Forma De Las Partículas.

La forma de una partícula individual se puede expresar convenientemente en función de su esfericidad, la cual es independiente del tamaño de la partícula. Para una partícula esférica de diámetro D_p , la esfericidad $\Phi_s = 1$; Para una partícula no esférica, la esfericidad se define por la relación siguiente:

$$\Phi_s = (6v_p) / (D_p \rho_p) \quad (\text{Ec.2.1})$$

Donde



D_p = diámetro equivalente o diámetro nominal de una partícula (m).

S_p = área superficial de una partícula (m^2/g).

v_p = volumen de una partícula (m^3).

ρ = densidad de la partícula (g/m^3).

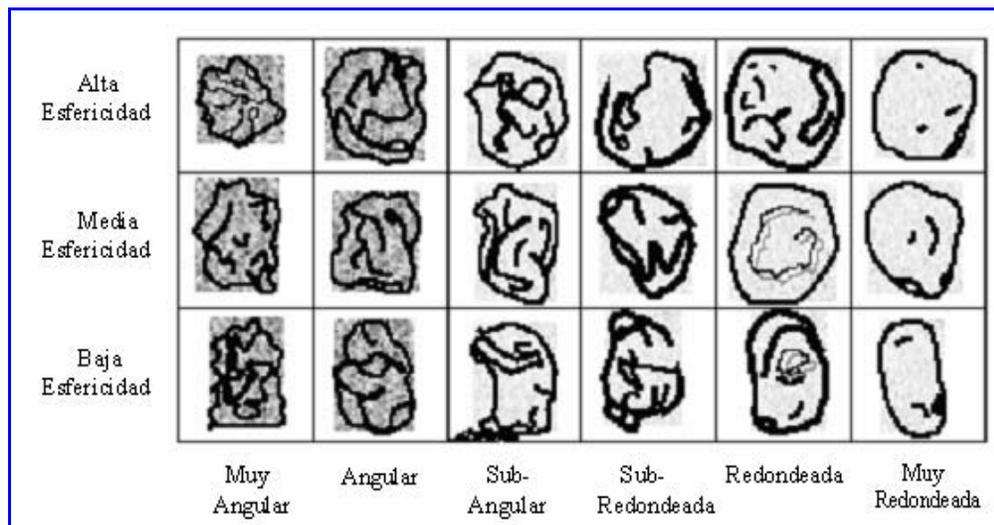


Figura 2.1. Algunos tipos de formas de granos [7].

El diámetro equivalente se define a veces como el diámetro de una esfera de igual volumen. Sin embargo, para materiales granulares finos resulta difícil de determinar con exactitud el volumen y el área de la superficie de una partícula, y generalmente, D_p se toma como el tamaño nominal basado en análisis por tamizado o en examen microscópico. En la figura 2.1 que se muestra a continuación se pueden observar algunas formas de los granos [5, 6].



2.3.2 Tamaño De Las Partículas.

Una partícula consiste en una agregación de moléculas sin límite en el tamaño superior. En general se puede especificar diámetros para cualquier partícula equidimensional. Las partículas que no son equidimensionales, es decir, que son más largas en una dirección que en otras, con frecuencia se caracterizan por la segunda dimensión de mayor longitud. Por ejemplo en el caso de partículas en forma de hojas puntiagudas, D_p deberá referirse al espesor de la partícula y no a su longitud.

Por convenio, los tamaños de las partículas se expresan en diferentes unidades dependiendo del intervalo de tamaños que intervienen. Las partículas gruesas se miden en pulgadas o milímetros, las partículas finas en función de la luz del tamiz, y las partículas muy finas en micrómetros o nanómetros. Las partículas ultrafinas se describen a veces en función de su área superficial por unidad de masa, generalmente en metros cuadrados por gramo.

Sin embargo, durante la clasificación de las partículas en un microclasificador, se utiliza el término “tamaño de corte” como el tamaño de las partículas que durante la alimentación del equipo, tienen igual probabilidad de ser separadas en las fracciones gruesas o finas del contenido total alimentado.

2.4. Medición Del Tamaño De Partículas.

Los dos criterios más importantes a tomar en cuenta en la medición del tamaño de las partículas son el muestreo y el análisis de tamaño.



2.4.1 Muestreo.

En el estudio de cualquier material se necesitan técnicas apropiadas de muestreo, en especial cuando el material es una fase constituida por partículas sólidas. Los errores que resultan debido a un mal muestreo pueden ser muchas veces mayores que aquellos que ocurren debido a un tamizado ineficiente, mala calibración de un equipo, etc. El método generalmente aceptado para el muestreo de sólidos es por partición, que puede llevarse a cabo de manera manual o mecánica, el cual consiste en tomar simples muestras de un material para obtener la información sobre la composición de la cantidad total del material, lo que se refiere a una o más cualidades, tales como: contenido de metal, contenido de ceniza, humedad, tamaño de la partícula, forma de la partícula, etc. [8, 9].

La muestra es una porción del material total bajo consideración; el análisis del 100% del material total no es posible, ya sea por razones económicas, cuando el método requerido para la investigación de grandes cantidades totales no puede ser justificado o cuando el producto se destruye durante el análisis. Los métodos de selección de muestras para analizar partículas sólidas pueden ser clasificados de acuerdo a:

Muestreo aleatorio: una muestra se dice que es extraída al azar cuando la manera de selección es tal, que cada elemento de la población tiene igual oportunidad de ser seleccionado. Una muestra aleatoria es también llamada una muestra probabilística, y generalmente es preferida por los estadísticos porque la selección de la muestra es objetiva y el error muestral puede ser medido en términos de probabilidad bajo la curva normal. Los tipos comunes de muestreo aleatorio son el muestreo aleatorio simple, muestreo sistemático, muestreo estratificado y muestreo de conglomerados.



Muestreo simple: este tipo de muestreo toma solamente una muestra de una población dada para el propósito de inferencia estadística. Puesto que solamente una muestra es tomada, el tamaño de la muestra debe ser lo suficientemente grande para llegar a una conclusión.

Muestreo doble: bajo este tipo de muestreo, cuando el resultado del estudio de la primera muestra no es decisivo, una segunda muestra es extraída de la misma población. Las dos muestras son combinadas para analizar los resultados. Este método permite a una persona empezar con una muestra relativamente pequeña para ahorrar costos y tiempo. Si la primera muestra arroja un resultado definitivo, la segunda muestra puede no necesitarse.

Muestreo múltiple: el procedimiento bajo este método es similar al expuesto en el muestreo doble, excepto que el número de muestras sucesivas requeridas para llegar a una decisión es más de dos muestras.

Muestreo de juicio: una muestra es llamada muestra de juicio cuando sus elementos son seleccionados mediante juicio personal. La persona que selecciona los elementos de la muestra, usualmente es un experto en tomar la medida. Una muestra de juicio es llamada una muestra no probabilística, puesto que este método está basado en los puntos de vista subjetivos de una persona y la teoría de la probabilidad no puede ser empleada para medir el error de muestreo, Las principales ventajas de una muestra de juicio son la facilidad de obtenerla y que el costo usualmente es bajo [9].

2.4.2 Análisis de Tamaño.

En general, cualquier método de análisis de tamaño se puede emplear para determinar la selectividad, y además para determinar el funcionamiento del



clasificador. La opción es a menudo dictada por la disponibilidad, costos de capital, y gastos de explotación. Para el proceso o los usos de la clasificación, la distribución en masa es generalmente de primer interés; por lo tanto, los métodos que dan directamente la distribución en masa son preferidos a los que den la distribución en número. Por ejemplo, la omisión de una sola partícula de 10 μm en una distribución, es equivalente a omitir mil partículas de 1 μm . Así, cuanto más estrecha es la distribución de tamaño, menor es el error potencial [10].

Tamizado: ésta es la técnica más antigua empleada, cuya principal ventaja es la de ser muy barata y de mayor uso para partículas grandes. El objetivo de un tamiz es separar una mezcla de partículas de varios tamaños en dos corrientes una inferior que pasa a través del tamiz y otra superior que es rechazada por el tamiz. Cada tamiz tiene pequeñas aberturas que van disminuyendo en tamaño con respecto al anterior, por lo general con una serie $2^{1/n}$. En este caso, la fase sólida se coloca en la parte superior de una serie de mallas, las cuales al vibrar permiten que, las partículas caigan a través de ellas hasta alcanzar un tamiz en el que las aberturas son demasiado pequeñas para que las partículas pasen. Existen dificultades de reproducibilidad de los tamices, aunque las principales desventajas son: a.) Complicaciones para medidas de polvo seco por debajo de un tamiz 400 (38 micras). La solución sería tamiz en húmedo, aunque los resultados observados en esta técnica en húmedo y para estos valores, dan muy poca reproducibilidad y son complicados de realizar. b.) Complicaciones para materiales cohesivos y aglomerados como las arcillas. c.) No es posible la medida de atomizador o emulsiones. d.) Largos tiempos de medida o cortos tiempos de respuesta, como partículas orientadas sobre sí mismas, que caen a través del tamiz. Estas medidas que requieren estos tiempos de muestreo y métodos de operación, necesitan estar muy rígidamente estandarizadas. e.) No se produce una correcta distribución del peso. Esto puede dar resultados extraños en partículas con forma de varilla [7, 8].



Sedimentación: éste, ha sido el método tradicional de medida en la industria de la cerámica y de la pintura. El rango aplicable está entre 2 y 50 micras. El principio de medida está basado en la ecuación de la Ley de Stokes, la cual expresa:

$$U_s = ((\rho_s - \rho_f) D^2 g) / 18\eta \quad (\text{Ec.2.2})$$

U_s = Velocidad Terminal (cm/seg).

ρ_s = Densidad de la superficie (g/cm³).

ρ_f = Densidad del fluido (g/cm³).

D = Diámetro de la partícula (cm).

g = aceleración de la gravedad (cm/seg²).

η = Viscosidad del fluido (g/cm.seg)

El equipo puede ser sencillo como la pipeta de Andreasen, o más complicado cuando entra a formar parte el uso de equipos centrífugos o de rayos X. Examinando la ecuación 2.2, se observa uno o dos peligros potenciales, tales como:

a.) La densidad del material es necesaria, por tanto el método no es adecuado para emulsiones donde el material no sedimenta, o para materiales muy densos los cuales sedimentan muy rápidamente. El resultado final es un diámetro de Stokes (D_{st}) y es simplemente una comparación de la velocidad de caída de las partículas a una esfera que cae a la misma velocidad. b.) La viscosidad del denominador indica que se necesitará un control de la temperatura con mucha precisión; cambios de 1 °C en la temperatura produce un cambio del 2 % en la viscosidad.



La Ley de Stokes es sólo válida para partículas cuasiesféricas que poseen una única característica en la forma compacta del volumen o área superficial. Por tanto, partículas con formas más irregulares a la normal, poseerán más área superficial que la esfera, con lo que caerán más lentamente y ofrecerán más resistencia a su propio movimiento. La Ley de Stokes sólo aplica la sedimentación gravitacional. Se producirán errores muy grandes, (aproximadamente del 20%) si la sedimentación es usada para partículas de tamaños por debajo de 2 micras y los errores serán máximos de hasta el 100 % para partículas de 0,5 micras. En resumen, las principales desventajas son las siguientes: a.) Velocidad de la medida, los tiempos medios están entre 25 minutos y 1 hora para una medida. Haciendo repeticiones del análisis, se dificulta e incrementan los cambios por reaglomeración. b.) Control preciso de la temperatura, es necesario prevenir gradientes de temperatura para evitar cambios en la viscosidad que alterarían la medida. b.) Uso de rayos X, algunos sistemas usan rayos X, por lo que en teoría, el personal deberá ser chequeado por seguridad. c.) Rango limitado: por debajo de 2 micras predomina el movimiento Browniano y el sistema es inseguro, por encima de 50 micras, la velocidad de sedimentación es alta y la Ley de Stokes de nuevo es inaplicable [7].

Microscopía: ésta es una excelente técnica, ya que permite ver las partículas directamente. También puede ser estudiada la forma de las mismas, lo que permite juzgar muy bien sobre si se ha realizado una correcta dispersión, o por el contrario existen aglomeraciones presentes en el sistema. Es interesante resaltar que 1 gramo de partículas de 10 micras (densidad 2.5 g/cm³) contiene 760x10⁶ partículas, por lo que todas éstas, nunca podrán ser examinadas individualmente por microscopía. Por tanto, no es precisamente una técnica de control de calidad o producción apropiada, salvo como un criterio de la forma. Relativamente unas pocas partículas son examinadas, por tanto existe el peligro real de realizar un muestreo no representativo. Además, si es medida una distribución en peso, los errores se incrementan, ya que ignorando una



partícula de 10 micras se produce el mismo efecto que ignorando 1000 partículas de 1 micra.

Difracción láser: este método está proporcionado el estándar en muchas industrias. Este instrumento es un analizador que permite conocer la distribución de tamaños de partículas. La técnica utiliza muestra en polvo, emulsión y/o suspensiones, húmedas o secas. Los resultados son expresados en forma gráfica y tabular, para un análisis de partículas en el rango de 0,3 a 2000 μm . Este instrumento determina el tamaño de partícula por difracción láser, su método se basa en el principio donde “el ángulo de difracción es inversamente proporcional al tamaño de la partícula”. Este equipo es desarrollado entre otras empresas por Malvern y es muy importante resaltar que en la tabla de análisis aparecen: a.) $D [4,3]$: es el diámetro medio de volumen equivalente. También denominado “media de Broucker”. b.) $D [v, 0,5]$: es la mediana en volumen. Algunas veces denominada $D_{50\%}$ ó $D_{0,5}$. c.) $D [3,2]$: es el diámetro medio de la superficie equivalente. Denominado también “diámetro medio Sauter”. d.) Área superficial: es la media de las partículas expresadas en m^2/g . e.) % de distribución del tamaño de las partículas para diámetros que van desde 0,36 μm a 301,68 μm .

Este instrumento consiste en: a.) Un láser como fuente de luz coherente con una longitud de onda fija. Los láseres de He-Ne, son los más comunes, ya que proporcionan mayor estabilidad. b.) Un apropiado detector. Normalmente suele ser una estructura muy fina tipo diapositiva de sílice fotosensible, que dispone de un número de detectores discretos. c.) Un lente de Fourier. Es el que recoge la luz dispersada del conjunto de partículas.

Con la ayuda de matemáticas complejas, la distribución de la intensidad de la luz dispersada puede utilizarse para calcular la distribución del tamaño de



partícula del colectivo de las partículas. La figura 2.2 revela los componentes de un equipo de difracción láser (Malvern).

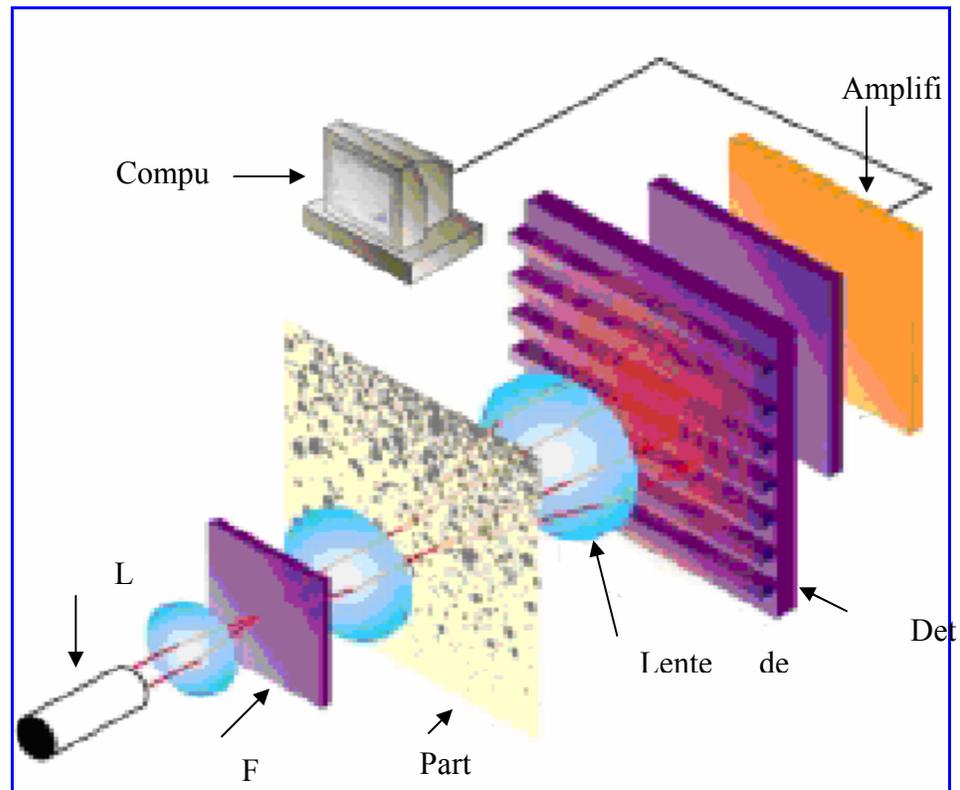


Figura 2.2. Diagrama de composición de un equipo de difracción por láser [11].

La tecnología de difracción láser proporciona las siguientes ventajas: a.) Es un método absoluto basado en principios científicos fundamentales. Por tanto, no se necesita calibrar el instrumento periódicamente de forma estándar. b.) Emulsiones y suspensiones líquidas pueden ser medidas en sistemas de recirculación que proporcionan una alta reproducibilidad y permite además, la incorporación de aditivos, dispersantes y surfactantes que ayudan a determinar el correcto tamaño de partícula. c.) Flexibilidad. Por ejemplo, es posible medir a la salida de una boquilla de spray en una cabina de pintura. d.) Dispone de un amplio rango dinámico. El



Malvern, permite al usuario medir en un rango entre 0.02 y 2000 micras. Incluso partículas mayores, siempre que el material esté en suspensión y no sedimente. e.) Polvos secos pueden ser medidos directamente, aunque a veces pueden provocar peores dispersiones que en un medio dispersante líquido [7].

Análisis del área superficial: el área superficial es probablemente la característica más importante de un polvo, porque controla el índice del mismo y de la interacción con sus alrededores. Aunque el área superficial no da una distribución de tamaño, es una función integrada de la distribución de tamaño. El área superficial es de gran interés en muchos usos, tales como molienda, reacción de la catálisis y del producto químico, combustión, etc. El análisis del área superficial puede proporcionar una información más relevante con respecto a la disolución y/o a la biodisponibilidad de la partícula.

2.5 Sistemas De Transporte De Partículas.

Una de las técnicas más importantes de manejo de materiales en la industria química es el desplazamiento de materiales suspendidos en una corriente de aire, sobre distancias horizontales y verticales que van de unos pocos a varios centenares de metros. Se pueden manejar materiales que van de polvos finos hasta gránulos de 6,35mm y densidades desde 16 a más de 3200 kg/m³ [12].

Entre los sistemas más utilizados se encuentran:

2.5.1 Sistemas Neumáticos.



En general, los transportes neumáticos se clasifican en cinco tipos básicos: de presión, de vacío, de combinación de presión y vacío, fluidización y de tanque ventilador.

Sistemas de presión: en este caso, el material se deja caer en una corriente de aire (por encima de la presión atmosférica) mediante un alimentador giratorio. La velocidad de alimentación mantiene al material a granel en suspensión hasta que llega al recipiente receptor, donde se separa del aire mediante un filtro o un separador de ciclón.

Sistemas de vacío: se caracterizan por el desplazamiento de materiales en una corriente de aire de presión menor que la ambiental. Las ventajas de este tipo son las que toda la energía de bombeo se usa para mover el producto y se puede absorber material en la línea de transportador sin necesidad de alimentador giratorio o un sello similar entre el recipiente de almacenamiento y el transportador. El material permanece suspendido en el aire hasta que llega a un receptor. Un filtro o un separador de ciclón separan al material del aire, haciendo pasar este último por el separador, cerca de la succión del ventilador de desplazamiento positivo o alguna otra fuente de potencia.

Sistemas de presión-vacío: son una combinación de lo mejor de los métodos de presión y vacío. Se usa el vacío para inducir al material a entrar al transportador y desplazarse a una corta distancia hasta un separador. El aire pasa por un filtro al lado de succión de un ventilador de desplazamiento positivo. A continuación, se alimenta el material a la corriente de aire de presión positiva del transportador mediante un alimentador giratorio, que procede del lado de descarga del ventilador.

Sistemas de fluidización: los sistemas de fluidización transportan con frecuencia materiales prefluidizados, divididos finamente y aquellos que no fluyen



con libertad a distancias cortas, como por ejemplo desde las tolvas de almacenamientos o vehículos de transporte a la entrada de un sistema principal de transporte. La fluidización se logra por medio de una cámara en la que se hace pasar aire por una membrana porosa que se forma en el fondo del transportador, sobre el que se reposa el material que va a ser desplazado. Conforme pasa aire por la membrana, cada partícula se ve rodeada por una película de aire.

Sistemas tanque ventilador: fue una de las primeras aplicaciones de transporte neumático. En la actualidad se usa poco y funciona mediante la introducción de aire a presión a la parte superior de un recipiente que contiene carga de material. Si el material es de flujo libre, fluirá a través de una válvula al fondo de la cámara y se desplazará por una línea corta de transporte, que se limita por lo común a un máximo de 16 m dependiendo del producto, aunque se encuentran en servicio sistemas de hasta 457 m.

2.6 Sistemas De Válvulas.

Las válvulas son accesorios que se colocan en las tuberías para cumplir con una función específica, tal como regular, desviar, bloquear el flujo de un fluido, etc.

Generalmente una válvula está compuesta por tres partes: a.) El cuerpo: debe la adecuada resistencia a las presiones no sólo del fluido sino también de los componentes internos. b.) El obturador: es el elemento móvil y que tiene como función primordial abrir, restringir o bloquear la sección de paso del fluido. c.) Mecanismo de accionamiento: pueden ser manuales, hidráulico y eléctricos.

Es muy importante seleccionar siempre la válvula adecuada a la necesidad del sistema hidráulico. Para ello debe conocerse muy a fondo tanto la función que cada



una de ellas puede realizar, como también la naturaleza del fluido y las presiones de trabajo, con la finalidad de seleccionar las válvulas no sólo del material adecuado, sino también del espesor y robustez adecuada de sus componentes [13].

Entre los tipos de válvulas más utilizadas en los procesos químicos, se encuentran:

Válvulas de compuerta: este tipo de válvula garantiza un buen corte de flujo. Son las más recomendadas para cumplir esta función y cuando se encuentra abierta produce una muy pequeña caída de presión en el flujo. El elemento obturador tiene la forma de un disco que, dependiendo de las presiones, puede ser hasta doble. Pueden ser instaladas en cualquier posición y no se recomienda, por ningún concepto para una regulación de flujo, pues cuando realizan esta función, el mecanismo se daña y además se produce el fenómeno de cavitación con todos los daños que este ocasiona.

Válvulas de retención: son el tipo de válvulas que permite el paso del fluido en un solo sentido, por lo que impiden el regreso del fluido por la tubería de impulsión.

Válvula mariposa: el mecanismo de cierre de esta válvula está compuesto por una barra que requiere de un gran torque para moverse, debido a que el elemento obturador es un disco que gira sobre un eje colocado en el centro de válvula y que a medida que se va girando, se va oponiendo gradualmente al flujo.

Válvulas globo: este tipo de válvula es el más indicado para la regulación del flujo, debido a que su diseño disminuye el efecto de vibraciones y cavitación, al reducir en ella la sección de pasaje. El elemento obturador es una especie de tapón circular que baja hasta llegar a un asiento horizontal.



Válvulas esfera: el elemento obturador en este caso es una esfera con una perforación cilíndrica del mismo diámetro que la tubería; cuando esta perforación está en el mismo sentido del flujo, éste pasa, y cuando la perforación está perpendicular al fluido, dicho paso se corta. Adicionalmente, estas válvulas son utilizadas para regular caudal o presión.

2.7 Ventiladores.

Los ventiladores se utilizan para bajas presiones en general, con cargas de presión de menos de 3,447kpa. Por lo común se clasifican en centrífugo y de flujo axial. Los dos tipos se utilizan para trabajos de ventilación, suministro de corriente de aire a hornos y calderas, desplazamiento de grandes volúmenes de aire o gas por ductos, suministro de aire para desecación, transporte de materiales suspendidos en corrientes de gas, eliminación de humos, etc.

2.7.1 Ventiladores Centrífugos.

Se construyen de tres tipos generales: de paletas rectas o placas de acero, de hojas curvas hacia delante y de hojas curvas hacia atrás [12].

Ventiladores de paletas rectas: tienen rotores de diámetro relativamente grande con varias aletas radiales (5 a 12 aletas) que se parecen a ruedas de paletas y funcionan a velocidades relativamente bajas.

Ventiladores de hojas curvas hacia delante: por lo común son del tipo “Sirocco” de aletas múltiples (20 a 64 aletas). Los rotores son de menor diámetro y funcionan a velocidades más altas que las unidades de paletas rectas.



Ventiladores de hojas curvas hacia atrás: son del tipo de aletas múltiples (10 a 50). Estos ventiladores son sumamente útiles.

2.7.2 Ventiladores De Flujo Axial.

Son de dos tipos generales: de disco y de hélice.

Ventiladores de tipo disco: tienen paletas rectas o curvas, similares a las de un ventilador domestico ordinario. Por lo común se utiliza para la circulación general o para trabajos de eliminación sin ductos.

Ventiladores del tipo de hélice: tienen aletas similares a las de diseño aerodinámico. Estos ventiladores pueden ser de dos etapas.

2.8 Almacenamiento De Materiales Particulados.

Las masas de partículas sólidas, al momento de ser almacenadas se debe considerar el propósito de su almacenamiento, las condiciones en las cuales se encuentran (tamaño, forma, densidad, etc.) y el costo de las mismas; para tal fin existen varios tipos de almacenamientos entre los cuales se pueden destacar:

2.8.1 Almacenamiento En Depósitos.

Los sólidos que son demasiado valiosos o solubles, para estar expuestos a la intemperie, se almacenan en depósitos, tolvas o silos, que son recipientes cilíndricos o rectangulares de hormigón o metal. Los silos suelen ser altos y de diámetro relativamente pequeño, mientras que los depósitos son bastante anchos y no tan altos. Una tolva es un pequeño depósito con un fondo oblicuo, que se



utiliza para el almacenamiento temporal antes de introducir los sólidos como alimentación del proceso. Todos estos contenedores se cargan por la parte superior utilizando algún tipo de elevador, mientras que la descarga se realiza generalmente por el fondo. Cuando sólidos granulares se almacenan en un depósito o una tolva, se producen presiones sobre las partículas; las cuales pueden ocasionar flujos característicos en los materiales durante la descarga. Dos de las definiciones más importantes de estos flujos son:

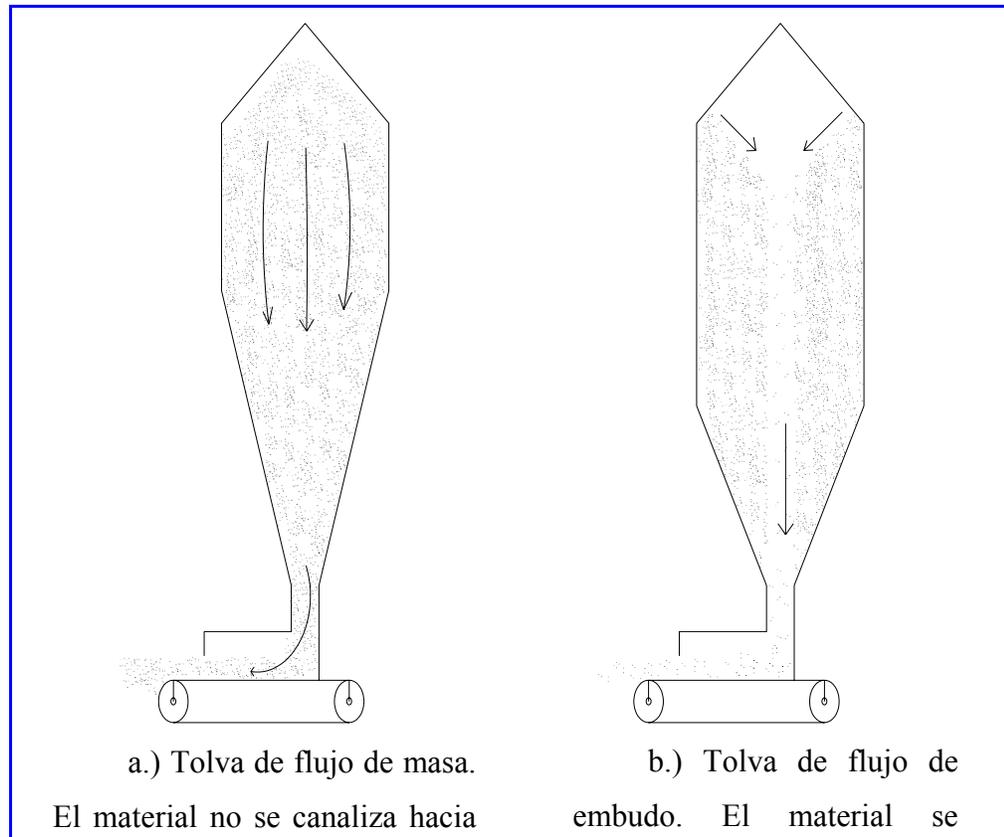


Figura 2.3. Tipos de flujo que se pueden producir en tolvas [12].

El flujo de masa: que significa que todos los materiales en el recipiente se desplazan cuando se retira una parte.



El flujo de embudo: que se produce cuando fluye sólo una porción del material, por lo común en un canal o un “agujero de rata” en el centro del sistema [5,12].

En la figura 2.3 se representan los posibles flujos de partículas en las tolvas.

2.8.2 Almacenamiento A La Intemperie.

Los materiales gruesos, tales como grava, piedra caliza y carbón, se almacenan a la intemperie en grandes apilamientos. Cuando se trata de centenares o millares de toneladas de material, este método es el más económico. Los sólidos se retiran del apilamiento por medio de una cinta transportadora o una pala escavadora.

2.8.3 Almacenamiento En Embalaje.

Se define a menudo en la industria química como aquella operación que incluye todos los embalajes, recipientes o contenedores con dos toneladas métricas de producto o menos. Estos contenedores incluyen bolsas, cajas de cartón, tambores y cubos, latas y botellas. Los materiales de construcción de estos contenedores pueden ser papel, plásticos, metal o combinaciones de éstos.

2.9 Clasificación De Partículas.

La clasificación es la separación de un material de partículas en una fracción gruesa y una fina. La separación es generalmente por tamaño, pero puede también ser por otras características de la partícula tales como la densidad. Dependiendo del



equipo usado, la clasificación puede ser también afectada por la forma, las características eléctricas, magnéticas y superficiales de las partículas, además de otros factores.

La clasificación sólido-gas debe distinguirse de la separación de sólido-líquido, aunque los principios básicamente son los mismos y los términos se utilizan a menudo alternativamente. Por ejemplo, los ciclones se consideran un equipo de la separación aunque una fracción superfina se arrastra con el gas de salida y se puede recuperar en otra separación o paso, como en un filtro de manga aguas abajo [14].

2.9.1 Funcionamiento De Los Clasificadores De Partículas.

Todos los dispositivos de clasificación por aire emplean las etapas del proceso que se muestra en la figura 2.4.

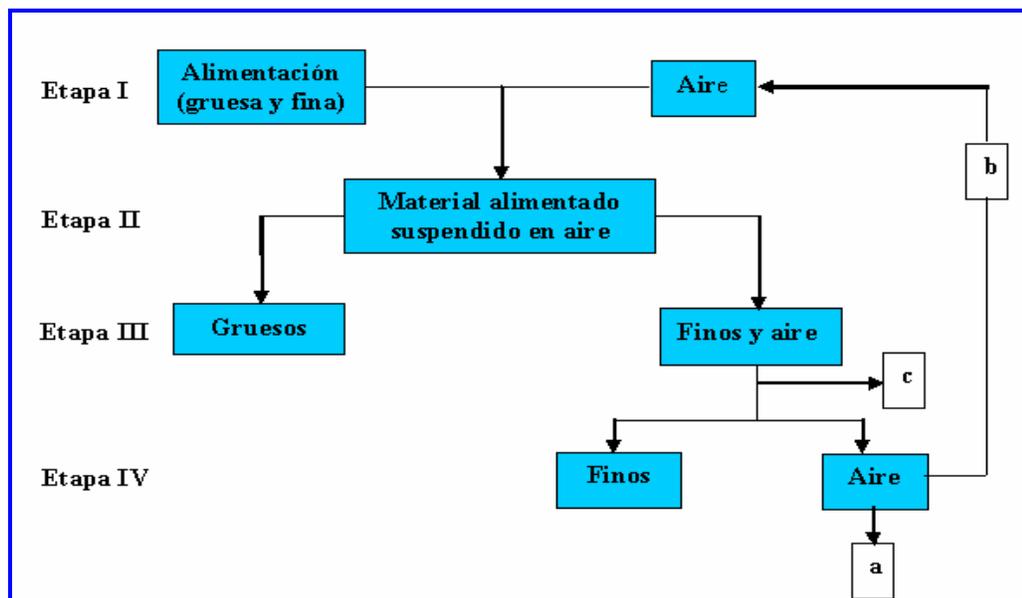


Figura 2.4. Diagrama de la operación de los clasificadores de partículas [15].



Etapa I: suspensión del material de la alimentación que se clasificará en una corriente de aire. La etapa I a veces se omite totalmente del proceso de clasificación cuando el clasificador está en la dirección del flujo de aire-sólido de un circuito de molienda.

Etapa II: la introducción del flujo de aire-sólidos en la zona de la clasificación.

Etapa III: la separación de la fracción gruesa de la fina. El aire fluye oponiendo la fuerza de arrastre creada por él contra la fuerza gravitacional, la fuerza de inercia o centrífuga o una combinación de ellas. La fuerza de arrastre es proporcional a la energía primaria del diámetro de una partícula. La fuerza de inercia o centrífuga es proporcional al cubo del diámetro de la partícula. Si la partícula es bastante pequeña, se moverá con la corriente de aire. Si las fuerzas son iguales, la partícula se mantendrá en equilibrio. Este equilibrio determina el tamaño de corte de un clasificador ideal. El tamaño de corte por lo tanto es igual al tamaño de partícula que tiene una ocasión 50-50 de terminar en la fracción fina o la fracción gruesa.

Etapa IV: la separación y la recolección de la fracción fina de la corriente de aire. El aire se lanza a la atmósfera (a) para formar un " sistema de aire abierto " o a (b) recirculado para formar un " sistema de aire cerrado." La etapa IV se elimina a veces pasando la mezcla del aire a otros procesos (c) tal como otro clasificador, etc.

2.9.2 Bases Para El Diseño De Los Clasificadores De Partículas.

Los diseñadores de clasificadores se aprovechan de un número de factores tales como: la caída en el aire de las partículas pequeñas es más lenta que las partículas grandes. Las partículas grandes tienen una mayor fuerza centrífuga en un flujo ciclónico que las pequeñas. Las partículas pequeñas tienen menos inercia y pueden cambiar su dirección de flujo más fácil que las partículas grandes. Las



partículas grandes requieren una velocidad transportadora mayor y tiene una probabilidad más alta de colisión con una lámina rotatoria. Se diseña un clasificador de modo que haya un mínimo de interferencia material entre las partículas en la zona de la clasificación [14].

Las fuerzas que actúan sobre las partículas individuales son las responsables de dirigir a las partículas grandes y pequeñas a sus compartimientos de recolección respectivos. Las fuerzas que actúan sobre las partículas durante la clasificación por aire son: a) fuerza de gravedad, b) fuerza de arrastre aerodinámica, c) fuerza centrífuga, d) fuerza de la colisión. Cada uno de los tipos de equipo utiliza una o más de estas fuerzas.

2.9.3 Clasificadores De Partículas Sólidas.

Existe una gran variedad de equipos destinados industrialmente a la separación de partículas. La característica principal de ellos es que la corriente de material sólido va disperso en un flujo de aire. A continuación se describen dos tipos de ellos:

Clasificador tipo ciclón: consiste en un cilindro vertical con un fondo cónico, una entrada tangencial cerca de la parte superior y una salida para el polvo situada en el fondo del cono. La entrada generalmente es rectangular. La conducción de la salida se prolonga dentro del cilindro para evitar que se forme un corto circuito de aire desde la entrada hasta la salida. La mezcla de gas y partículas sólidas entran tangencialmente por la parte superior. La penetración de la mezcla le imparte un movimiento giratorio, y el remolino que se desarrolla producido por la fuerza centrífuga, f_c , arrastra a las partículas radialmente hacia la pared.

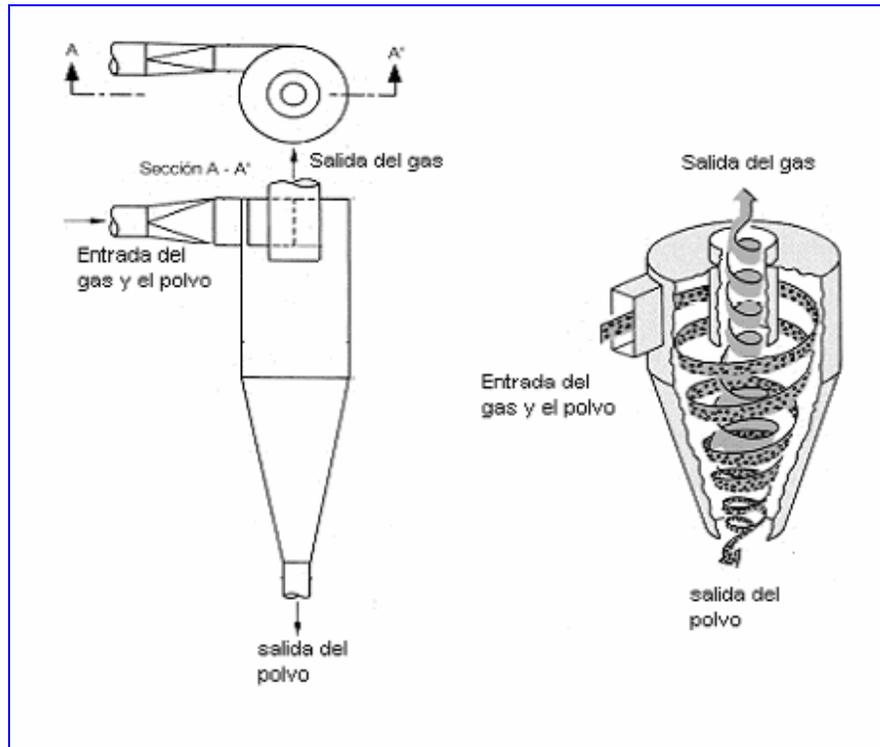


Figura 2.5. Clasificador tipo ciclón [16].

Al entrar, el material en suspensión fluye hacia abajo en una espiral o vórtice adyacente a la pared. Cuando el aire se aproxima al fondo cónico, vuelve a subir en una pequeña espiral en el centro del cono y del cilindro. Por consiguiente, se forma un vórtice doble. Las espirales descendentes y ascendentes giran en el mismo sentido. Las partículas son arrastradas hacia la pared y caen al fondo, saliendo por la parte inferior del cono. Es un dispositivo de precipitación, en el que las fuerzas que arrastran a las partículas hacia afuera a velocidades tangenciales altas, son varias veces superiores a la fuerza de gravedad, f_G [17, 18]. En la figura 2.5 se muestra unos dibujos de la forma y el recorrido del material a través del clasificador ciclón.

Clasificador centrífugo: consiste de un rotor, provisto de palas inclinadas en la periferia que giran a una velocidad determinada sobre una espiral que va del



exterior al interior. El material a clasificar se introduce verticalmente en el clasificador por transporte neumático, a través de su embudo telescópico, conduciéndolo debajo del cono inferior del rotor. De allí se reparte por la cámara de clasificación alrededor del rotor, el cual comunica a la mezcla de aire y polvo un movimiento rotatorio de velocidad determinada que actúa sobre el variador de velocidad. Las partículas transportadas son sometidas a tres fuerzas: la fuerza de gravedad f_G , la fuerza de frotamiento del aire f_D , dirigida hacia el interior, y la fuerza centrífuga f_C , creada por el rotor y dirigida hacia el exterior. Dependiendo del tamaño de las partículas, serán introducidas en el interior, o si son suficientemente grandes, serán lanzadas hacia afuera debido a la fuerza centrífuga, y serán atrapadas bajo la fuerza de la gravedad. Existe un tamaño de corte por encima del cual el material es siempre arrojado a la corriente de gruesos y por debajo del cual va a la corriente de finos. Las partículas de dimensiones inferiores al tamaño de corte son arrastradas por el aire entre las palas del rotor, hacia el conducto de salida. Las partículas de dimensiones superiores al tamaño de corte son proyectadas sobre la pared de la cámara desde donde descienden hacia el conducto de evacuación de rechazos.

En teoría, para el ajuste particular de un clasificador se utiliza el tamaño de corte. En la práctica, por supuesto, no ocurre esto. El material fino puede aglomerarse y comportarse como una partícula grande o ser atrapado dentro de una acumulación de partículas gruesas. Alternativamente, las partículas grandes cuya ruta es perturbada por el flujo de aire, pueden ser introducidas dentro de la corriente de finos [1, 17]. En la figura 2.6 se muestra un clasificador centrífugo de partículas.

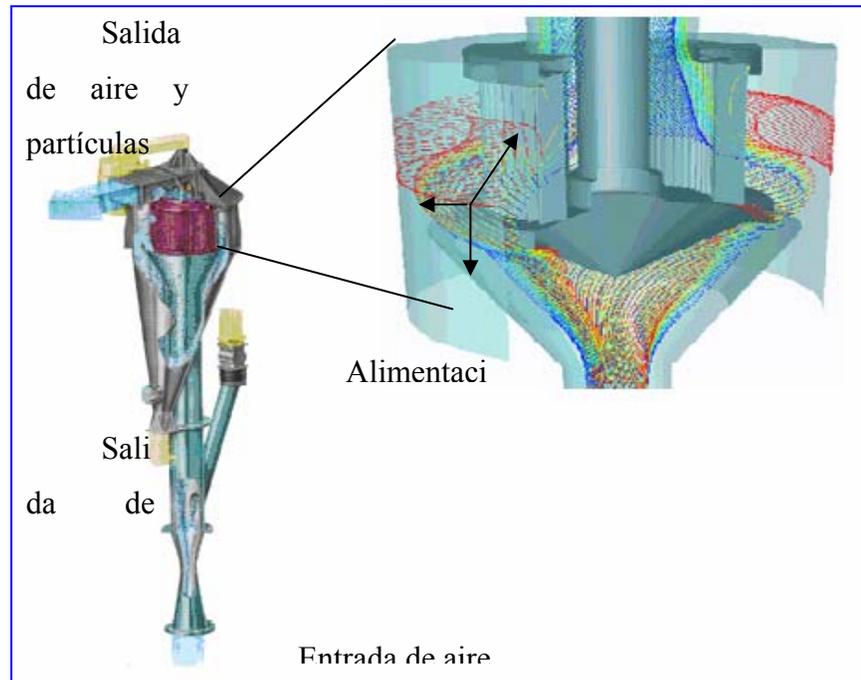


Figura 2.6. Clasificador centrífugo en funcionamiento [18].

2.10 Filtros De Manga.

La captación y depuración de partículas presenta una problemática muy diversa en los distintos procesos industriales que generan emisiones a la atmósfera. La recuperación de productos en polvo del gas de descarga es vital para cualquier industria para evitar los problemas de contaminación o aumentar el rendimiento de la planta. Los filtros de manga son uno de los equipos más representativos de la separación sólido-gas mediante un medio poroso. Aparecen en todos aquellos procesos en los que sea necesaria la eliminación de partículas sólidas de una corriente gaseosa. Eliminan las partículas sólidas que arrastra una corriente gaseosa haciéndola pasar a través de un tejido.



Los filtros de manga son capaces de recoger altas cargas de partículas resultantes de procesos industriales de muy diversos sectores, tales como: cemento, yeso, cerámica, caucho, química, petroquímica, siderúrgica, automovilística, cal, minera, amianto, aluminio, hierro, silicatos, almidón, carbón, anilina, fibras de granos, etc. La recogida de polvo o eliminación de partículas dispersas en gases se efectúa para finalidades tan diversas como: a.) Control de la contaminación del aire. b.) Reducción del costo de mantenimiento de los equipos. c.) Eliminación de peligros para la salud o para la seguridad. d.) Mejora de la calidad del producto. e.) Recuperación de productos valiosos. f.) Recogida de productos en polvo.

2.10.1 Funcionamiento De Los Filtros.

La separación del sólido se efectúa haciendo pasar a través del equipo el aire con partículas en suspensión mediante un ventilador, el flujo choca contra una serie de paneles y se divide en varias corrientes, pasando el aire a través la tela que forma la bolsa. De esa forma, las partículas más gruesas se depositan directamente en el fondo de la tolva cuando chocan contra dichos paneles y las partículas finas se depositan en la superficie del tejido quedando retenidas entre los intersticios de la tela formando una torta filtrante. De esta manera la torta va engrosando con lo que aumenta la pérdida de carga del sistema. Una vez que el gas ha sido filtrado, éste fluye (ya limpio) a través de la salida y se descarga a la atmósfera.

2.10.2 Limpieza De Las Mangas.

Para evitar disminuciones en el caudal, se procede a efectuar una limpieza periódica de las mangas. La característica principal que diferencia unos tipos de filtros de manga de otros, es la forma en que se lleve a cabo su limpieza. Esto además condiciona que los filtros sean continuos o discontinuos. En los continuos la limpieza se realiza sin que cese el paso del aire por el filtro. En los discontinuos



es necesario aislar temporalmente la bolsa de la corriente de aire. Según este criterio, se tienen tres tipos principales de filtros de manga:

Filtros de sacudida: se realiza cuando existe la posibilidad de suspender el servicio del filtro durante un corto periodo de tiempo. Por tanto, exige un funcionamiento discontinuo con un ciclo de filtración y otro de limpieza. El tipo más barato y sencillo consiste en un cierto número de bolsas reunidas en el interior de una carcasa. Funciona con una velocidad aproximada de 1cm/s a través de la bolsa filtrante. La limpieza se puede llevar a cabo manualmente para unidades pequeñas. Existe también una versión más complicada y robusta que puede funcionar por métodos mecánicos, vibratorios o de pulsación que incluye un mecanismo automático de agitación para la limpieza de las telas. Las bolsas están sujetas a un soporte mecánico conectado a un sistema capaz de emitir sacudidas o vibraciones mediante un motor eléctrico.

Filtro de sacudida y Aire inverso: se emplean para conseguir un funcionamiento continuo. Para ello los elementos filtrantes deben encontrarse distribuidos entre dos o más cámaras independientes, cada una de las cuales dispone de su propio sistema de sacudida y de una entrada de aire limpio. El aire entra en las mangas en sentido contrario por medio de un ventilador que fuerza el flujo, de fuera a dentro, lo que favorece la separación de la torta.

Filtro de aire inverso: existen muchos dispositivos diferentes pero el mecanismo habitual de limpieza consiste en la introducción, en contracorriente y durante un breve periodo de tiempo, de un chorro de aire a alta presión mediante una tobera conectada a una red de aire comprimido.

Para una correcta efectividad en un sistema de filtración de polvo hay que tener en cuenta las características del polvo a tratar, grado de humedad, temperatura,



espacio disponible y otros factores específicos. La limpieza de las mangas no es completa en ningún caso debido a la dificultad para desprender la torta en su totalidad y también porque, si se aplicaran procedimientos más vigorosos de limpieza, el desgaste de las mangas sería mayor y se provocaría un mayor número de paradas de planta motivadas por el cambio de las mangas [19]. La figura 2.7 muestra un filtro de manga.

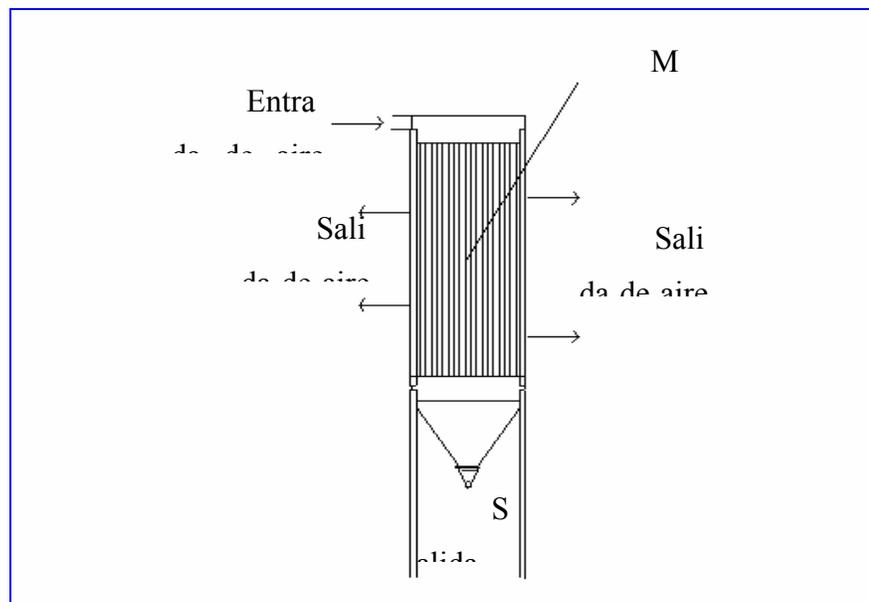


Figura 2.7. Filtro de manga.

2.11 Descripción Del Proceso De Producción Y De La Unidad Complementaria De Clasificación De Partículas En Micronizados Caribe.

En el diagrama de la figura 2.8 se puede apreciar el proceso de producción y de la unidad complementaria de clasificación.

Como se puede ver en el diagrama del proceso de producción, (parte a) el material pasa a través de un triturador de martillo, el cual lo reduce a tamaños de 1/4



a 2 pulg, para luego pasar a una tolva de almacenaje por medio de una correa transportadora; posteriormente el material es transportado a un molino de péndulos, reduciéndose a partículas, éstas pasan en una corriente de aire a un separador en la parte superior del molino por transporte neumático, dejando pasar solamente las partículas más finas al proceso de clasificación del ciclón, el flujo de aire cargado de partículas recorre un camino en espiral, sedimentándose las partículas más gruesa por acción de la gravedad, cayendo en la tolva de recolección obteniéndose el producto P1 (aproximadamente de 45 micras); saliendo las partículas ultrafinas por la parte superior del ciclón, luego la corriente de aire cargada de partículas pasa a través del ventilador V1, el cual la divide en dos corrientes una que retorna al molino y otra que pasa al filtro de manga por donde pasa el aire radialmente a través de la tela, retornando el aire limpio a la atmósfera, reteniéndose las partículas las cuales pasan a una tolva de recolección, obteniéndose así un producto ultrafino.

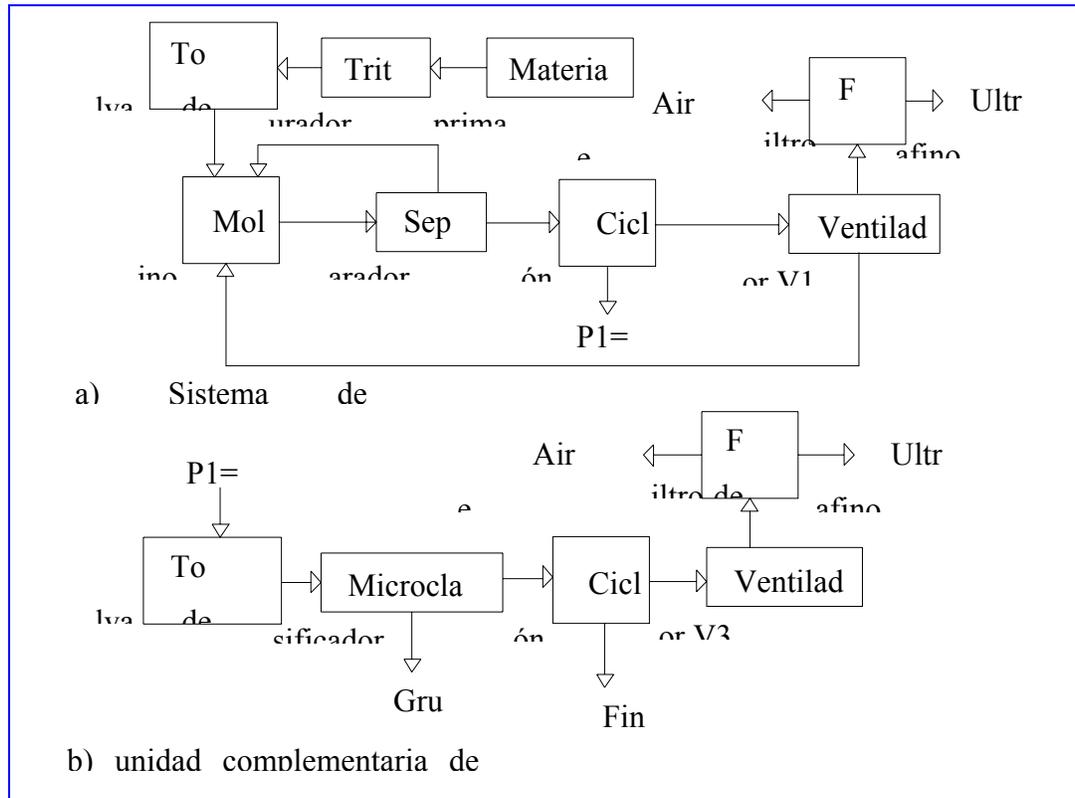


Figura 2.8. Diagrama del proceso de producción y la unidad complementaria de clasificación de partículas.

En la parte (b) del diagrama antes descrito se puede apreciar el proceso de la unidad complementaria de clasificación de partículas; el material que contiene la tolva de alimentación puede ser del tipo P1 obtenido en el proceso anterior, éste es impulsado hasta el tubo telescópico del microclasificador por medio de un ventilador, formando una corriente de flujo de aire y polvo, la cual es succionada a través del proceso por transporte neumático, producido por el ventilador; el flujo de partículas pasa a través del microclasificador, provocándose una acción de dispersión sobre las partículas, separando las más finas de las gruesas, éstas últimas por acción de la fuerzas centrífuga se pegan a las paredes y caen por acción de la gravedad en la tolva de recolección, obteniéndose un producto de partículas gruesas; por la parte



superior del clasificador salen las partículas más finas por medio de la fuerza de arrastre de la corriente de aire, continuando de allí a un ciclón, donde el flujo de aire cargado de partículas recorre un camino en espiral, sedimentándose las partículas por acción de la gravedad para caer en la tolva de recolección, obteniéndose un producto más fino que la alimentación, saliendo las partículas ultrafinas por la parte superior del ciclón con la corriente de aire, ésta pasa a través del ventilador V3, para pasar por último a un filtro de manga por donde pasará el aire radialmente a través de la tela retornando el gas limpio a la atmósfera, reteniéndose las partículas y cayendo a la tolva de recolección, obteniéndose un producto más fino que los anteriores (ultrafino).

En el proceso de clasificación se obtienen una serie de productos de diferentes tamaños de corte, usualmente los gruesos, los finos y los ultrafinos.

Producto grueso: es la fracción que tiene mayor porcentaje de partículas de dimensiones más grandes que el tamaño del corte del clasificador. El producto grueso se obtiene del material que es rechazado en el microclasificador por la acción de la fuerza centrífuga.

Producto fino: es la fracción que tiene mayor porcentaje de partículas de dimensiones más pequeñas que el tamaño del corte del clasificador. El producto fino se obtiene del material que pasa a través del microclasificador y pasa al ciclón donde cae en la tolva del mismo por la acción de la gravedad.

Producto ultrafino: es la fracción que tiene mayor porcentaje de partículas de dimensiones más pequeñas que el tamaño del corte al cual el ciclón clasifica. El producto ultrafino se obtiene del material que pasa a través del ciclón por la corriente de aire que lo arrastra hasta el filtro de manga donde las partículas quedan retenidas para luego caer en la tolva de recolección.



2.12 Factores Que Afectan La Eficacia De La Clasificación.

Los resultados de las fracciones obtenidas del material pulverizado por los dispositivos de clasificación por aire, son controlados por las características físicas del material que se clasifica. Entre ellos se encuentran:

Dispersión: es el acto de distribuir las partículas en un medio, de modo que las partículas existan como entidades separadas y que no se adhieran una a la otra. El grado de dispersión es la dimensión a la cual el proceso de la dispersión es eficaz. Las partículas que no se dispersan serán las que se aglomeran o floculan. Estos términos se resumen de la siguiente manera: a.) Un aglomerado: es cualquier recolección de partículas que se asocian por fuerzas físicas o químicas. Estas fuerzas pueden incluir fuerzas intermoleculares y electrostáticas en aglomerados muy finos; las fuerzas capilares actúan cuando hay líquidos presentes, y se forman puentes entre sólidos secos o sinterizados. b.) Un floculó: es un ensamblaje débil, que puede ser temporal si las fuerzas que unen las partículas no son suficientemente resistentes a las fuerzas de inercia [10].

Humedad superficial: cuando el contenido de agua libre está presente, en la superficie de las partículas del material pulverizado, la distribución de tamaños cambia y se forman aglomeraciones de partículas [18].

Características del flujo: los materiales que fluyen libremente se dispersan fácilmente en una corriente de aire y se pueden distribuir uniformemente sin dificultad. Ambos factores son requisitos previos importantes en una buena clasificación, mientras es lo contrario para los materiales con características de flujo de aire pobre. Además, los materiales que tienen tendencia a acumularse en la superficie del clasificador crearán disturbios de flujo o tapan el clasificador.



Área superficial: el número de partículas por unidad de volumen es un factor importante en la determinación de la capacidad de cualquier dispositivo que se clasifica. Cuanto más fino es el material, más partículas serán transportadas o movilizadas por una unidad de volumen y más baja será la capacidad del dispositivo que las clasifica. Debido a la mezcla heterogénea de los materiales pulverizados y por otras razones técnicas, el número de partículas se utiliza raramente y la fineza de un producto se expresa en los términos del área superficial desarrollada, expresado en cm^2/g , medido generalmente por las pruebas de Blaine o de Wagner [10]. El área superficial se expresa a veces en términos del tamaño medio de partícula.

Dureza de la partícula: las partículas duras además de ser abrasivas tienen una tendencia a desalojar y a rebotar dentro del compartimiento del clasificador cuando son movidas en el medio a altas velocidades. Esto da lugar a cantidades anormales de partículas gruesas perdidas en el producto fino.

Viscosidad de la corriente del gas: los clasificadores de aire pueden funcionar con aire calentado o refrigerado u otros gases tales como nitrógeno, de diversas viscosidades respecto del aire estándar. Dado que la fuerza de arrastre que actúa en las partículas se relaciona directamente con la viscosidad de la corriente del gas, la fuerza gravitacional, de inercia o centrífuga que actúa en la partícula se debe cambiar proporcionalmente para conservar un tamaño de corte en el sistema.

2.13 Criterios De La Clasificación De Partículas Sólidas.

A continuación se definen una serie de términos relacionados con la clasificación de partículas sólidas [10].



La alimentación: es la cantidad total del material particulado con que se alimenta al clasificador, para ser separadas en una o más fracciones, según las características específicas de las partículas.

La fracción: es el término aplicado a cada porción resultante de una recolección de partículas, de un proceso de clasificación. Una fracción se puede medir en términos tales como distribución de masa, volumen, número o tamaño de área superficial. Aunque un proceso de clasificación puede generar una gran cantidad de fracciones, tal proceso se puede considerar como una separación en una fracción gruesa y una fina, cada una con un diverso tamaño de partículas.

El producto: es la fracción (o fracciones) que supuestamente contiene el material con las características especificadas deseadas.

La fracción fina: es la cantidad total de material fino obtenido como producto. Adicionalmente se obtiene otro producto (grueso) los cuales tienen otras aplicaciones.

$$Y_f = W_f / W_a = 1 - Y_c \quad (\text{Ec.2.3})$$

Donde:

Y_f = es la fracción fina.

W_f = es el flujo de masa de la fracción fina por hora.

W_a = es el flujo de masa alimentada por hora.

Y_c = es la fracción gruesa.



Selectividad (S_D): es un término aplicado a la medición del funcionamiento de la clasificación. En un proceso de clasificación, cada tamaño de partícula en la distribución de la alimentación tiene cierta probabilidad de entrar en la fracción gruesa. Por ejemplo, las partículas más pequeñas tienen una menor probabilidad de entrar en la fracción gruesa que partículas más grandes. La selectividad del tamaño se define de acuerdo con la expresión:

$$S_D = \frac{\text{Cantidad del tamaño } D \text{ que entra en la fracción gruesa}}{\text{Cantidad del tamaño } D \text{ de la alimentación}} \quad (\text{Ec.2.4})$$

Según una base de masa se tiene una expresión matemática equivalente:

$$S_D = W_c \cdot d\phi_c / W_a \cdot d\phi_a = W_c \cdot d\phi_c / (W_c \cdot d\phi_c + W_f \cdot d\phi_f) \quad (\text{Ec.2.5})$$

Donde:

ϕ_c = es el porcentaje acumulativo por masa de la fracción gruesa menor que el tamaño de partícula D .

ϕ_f = es el porcentaje acumulativo por masa de la fracción fina menor que el tamaño de partícula D .

ϕ_a = es el porcentaje acumulativo por masa de la alimentación menor que el tamaño de partícula D .

W_c = es el flujo de masa de la fracción gruesa por hora.

W_f = es el flujo de masa de la fracción fina por hora.



W_a = es el flujo de masa alimentada por hora.

La agudeza del corte (β): es el término que representa la eficacia de la clasificación de las partículas y viene expresada por la siguiente ecuación:

$$\beta = D_{25\%} / D_{75\%} \quad (\text{Ec.2.6})$$

Donde:

$D_{25\%}$ = es el tamaño de la partícula que corresponde al valor de la selectividad del 25 %.

$D_{75\%}$ = es el tamaño de la partícula que corresponde al valor de la selectividad del 75 %.

El rendimiento (R): definido como la razón entre la cantidad de finos que contiene el producto y la cantidad de finos presentes en el material alimentado al equipo de clasificación [1]. Puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$R_{Df} = W_f \cdot \phi_f / \phi_a \cdot W_a \quad (\text{Ec.2.7})$$

Donde:

R_{Df} = es el rendimiento de los finos contenidos en el material alimentado menor que el tamaño de partícula D .

ϕ_f = es el porcentaje acumulativo por masa de la fracción fina menor que el tamaño de partícula D .



ϕ_a = es el porcentaje acumulativo por masa de la alimentación menor que el tamaño de partícula D .

W_f = es el flujo de masa de la fracción fina por hora.

W_a = es el flujo de masa alimentada por hora.

El tamaño del corte ($D_{50\%}$): es el tamaño de la partícula en la alimentación, que tiene la probabilidad igual de entrar en la fracción gruesa o fina.

2.14 Métodos Para Determinar El Funcionamiento De Un Clasificador.

La selectividad del tamaño es el método más completo para expresar el funcionamiento del clasificador, bajo un sistema de condiciones de operación. Básicamente existen tres parámetros que deben ser enfocados en sentido de evaluar el funcionamiento del clasificador; el tamaño del corte, la agudeza del corte (éstas afectan la distribución del tamaño de las partículas del producto), y la capacidad de proceso. El tamaño del corte es esencial porque representa el tamaño de la partícula en la cual la clasificación ocurre realmente, mientras que la agudeza representa la eficacia con que se hace. La capacidad es importante porque se relaciona directamente con el costo del producto acabado [10].

El tamaño y la agudeza del corte se pueden calcular de datos de la selectividad del tamaño. La selectividad es representada como una curva y expresa la probabilidad de encontrar una partícula de un tamaño indicado en la fracción gruesa.

Determinación de las masas del sistema: la ecuación 2.8 expresa con palabras el concepto de balance de masa. Para ilustrar los procedimientos de cálculo para



evaluar un clasificador hay que saber la cantidad de material que se clasifica, supóngase que se tiene un sistema de clasificación en funcionamiento estable, y se quiere saber cómo funciona el clasificador. Primero se especifica en que consiste el sistema para el cual se hará el balance de materia y se establece sus fronteras [20].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{acumulación} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{entrada por} \\ \text{las fronteras} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{salida por} \\ \text{las fronteras} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{generación} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{consumo} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} \quad (\text{Ec.2.8})$$

La ecuación (2.8) puede transformarse según sea el caso, la figura 2.9 representa un sistema continuo, en estado estacionario, donde no ocurre acumulación y no se consideran los términos de generación y consumo; por lo tanto el balance de materia se reduce a una relación muy sencilla para el total de materiales, que puede expresarse en palabras como: “Lo que entra debe salir”, o sea.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{entrada de} \\ \text{masa por las} \\ \text{fronteras del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{salida de} \\ \text{masa por las} \\ \text{fronteras del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} \quad (\text{Ec.2.9})$$

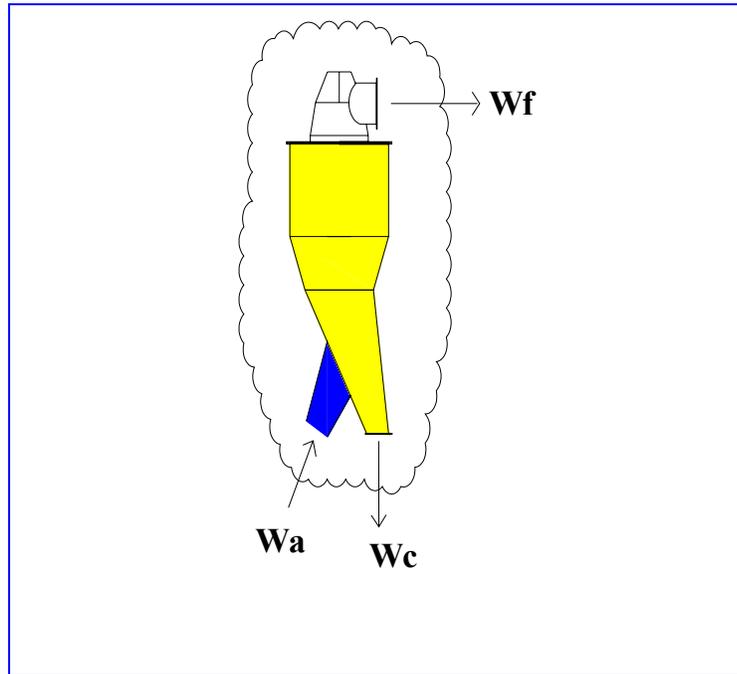


Figura 2.9. Frontera del sistema del microclasificador.

De acuerdo con la figura 2.9 W_a , W_c y W_f son respectivamente, el flujo de alimentación al clasificador, flujo de gruesos y flujo de finos. Realizando un balance en el clasificador la ecuación 2.9 queda de la siguiente forma:

Balance de materia

$$W_a = W_c + W_f \quad (\text{Ec.2.10})$$

La distribución de tamaño acumulativa de la alimentación para un tamaño de partícula determinado, se puede calcular a partir de los análisis de distribuciones de tamaños acumulativas de los productos gruesos y finos, aplicando lo siguiente a la ecuación 2.10; el porcentaje acumulativo de partículas de la alimentación ϕ_a , multiplicado por el flujo W_a (alimentación al clasificador), es igual a la multiplicación del porcentaje acumulativo de partículas del producto grueso ϕ_c , por el



flujo W_c (gruesos a la salida del clasificador), sumado al resultado de multiplicar el porcentaje acumulativo de partículas del producto fino ϕ_f , por el flujo W_f (finos a la salida del clasificador), o:

$$\phi_a \cdot W_a = \phi_c \cdot W_c + \phi_f \cdot W_f \quad (\text{Ec.2.11})$$

La distribución de tamaño acumulativa de la alimentación, ϕ_a , se calcula despejándola, como sigue:

$$\phi_a = (W_c/W_a)\phi_c + (W_f/W_a)\phi_f \quad (\text{Ec.2.12})$$

Donde:

ϕ_c = es el porcentaje acumulativo por masa de la fracción gruesa menor que el tamaño de partícula D.

ϕ_f = es el porcentaje acumulativo por masa de la fracción fina menor que el tamaño de partícula D.

ϕ_a = es el porcentaje acumulativo por masa de la alimentación menor que el tamaño de partícula D.

W_c = es el flujo de masa de la fracción gruesa por hora.

W_f = es el flujo de masa de la fracción fina por hora.

W_a = es el flujo de masa alimentada por hora.

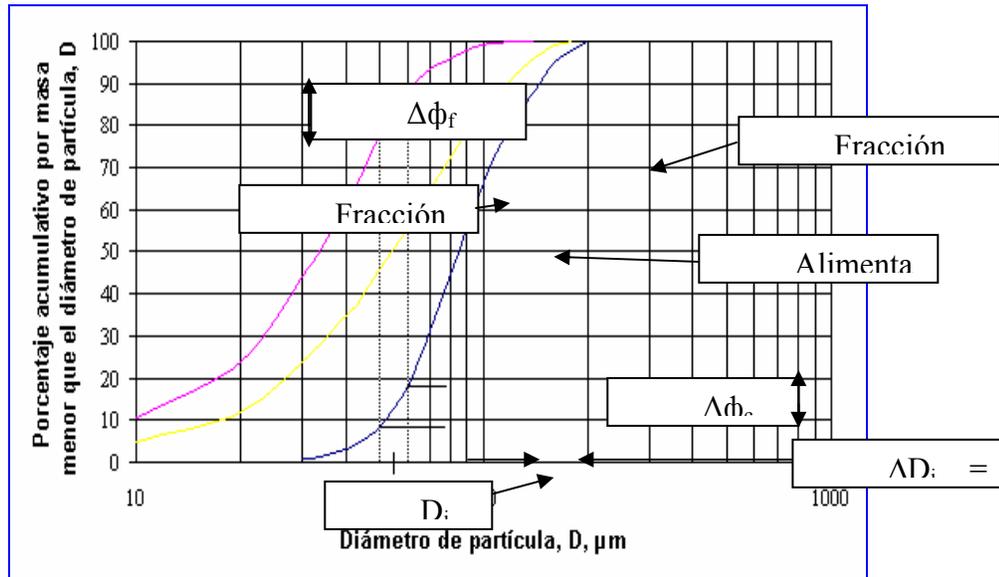


Figura 2.10. Gráfica del ejemplo de cálculo de selectividad del tamaño [10].

Cálculo de la selectividad del tamaño: para los propósitos de calcular selectividad del tamaño a partir de los datos de distribución acumulativa de tamaños de partícula, la ecuación (2.5) puede expresarse en forma de incrementos, como sigue:

$$S_{D_i} = W_c \cdot \Delta\phi_{ci} / (W_c \cdot \Delta\phi_{ci} + W_f \cdot \Delta\phi_{fi}) \quad (\text{Ec.2.13})$$

Donde, según lo definido en la figura 2.10, $\Delta\phi_{ci}$ y $\Delta\phi_{fi}$ son respectivamente, los intervalos de distribución de tamaños acumulativos de las fracciones gruesas y finas, asociados con el intervalo de tamaño ΔD_i . Un intervalo de tamaño representativo D_i , es tomado en forma arbitraria como el punto medio de ΔD_i .

La precisión en el uso de la ecuación 2.13 se logra, dependiendo de cuan estrecho se elige ΔD_i . No es necesario seleccionar un valor constante de ΔD_i en la selectividad del tamaño. Una buena regla a seguir es que los ΔD_i deben ser menores



que el 20% de D_i ; mientras que los ΔD_i se deben tomar tan pequeños como sea posible, para dar una medida matemáticamente correcta de S_{D_i} .

Una forma para alcanzar una división apropiada es elegir los tamaños con fracciones más estrechas en los extremos, especialmente el extremo fino de las distribuciones.

La figura 2.11 muestra un ejemplo de la curva de Tromp o una función calculada de la selectividad del tamaño. Si la separación fuera ideal, consistiría en una línea recta vertical al tamaño del corte equiprobable $D_{50\%}$. Esto significa que todas las partículas de la alimentación más grandes que $D_{50\%}$ entrarán en la fracción gruesa, y todas las partículas más pequeñas que el $D_{50\%}$ entrarán en la fracción fina. Para una clasificación real, la curva varía ligeramente de la verticalidad, indicando el grado al cual las partículas de cada tamaño se colocan mal. De la definición del tamaño del corte, $D_{50\%}$ corresponde al valor de 50% en la curva de la selectividad del tamaño.

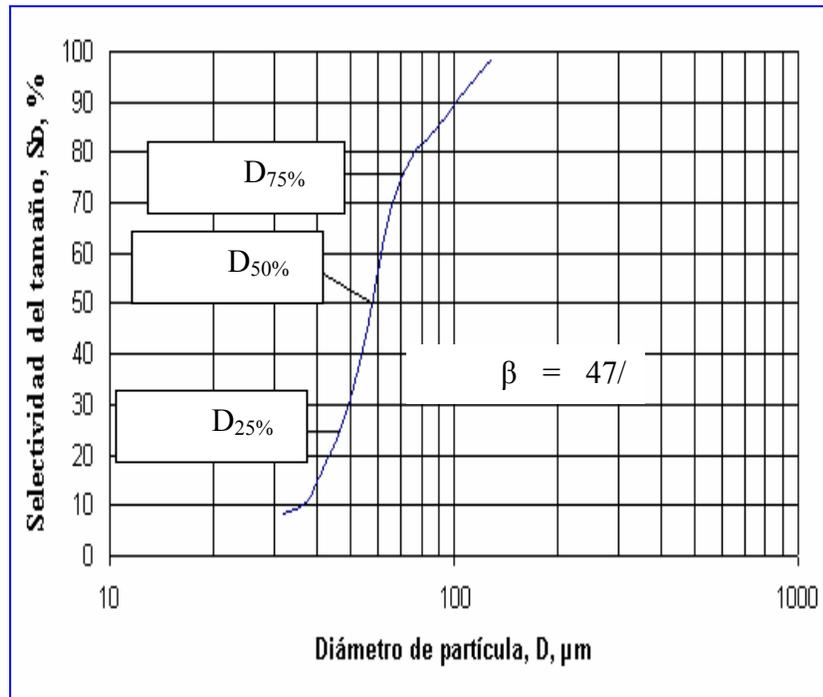


Figura 2.11. Ejemplo de una curva de selectividad [10].

La forma de la curva de la selectividad en $D_{50\%}$ indica la extensión del material que se ha colocado o la agudeza del corte. Hay muchas maneras en las cuales la agudeza puede ser expresada. Un índice relacionado con la forma de la curva de la selectividad que se ha utilizado extensamente es el cociente de la ecuación (2.6). Para la clasificación perfecta, el valor de β será igual a la unidad; cuando el valor de β es muy pequeño, significa que existe una agudeza escasa en la clasificación. La figura 2.11 muestra un ejemplo de agudeza.

La figura 2.12 representa los varios tipos de curvas de selectividad de tamaño que se pueden obtener. En la figura, se ha elegido arbitrariamente el tamaño de corte $D_{50\%}$, para todas las curvas. También se asume que las curvas se derivan de los análisis de tamaño que han medido correctamente los diámetros de las partículas de las fracciones pertinentes, lo cual asume que las partículas no dispersadas en el



clasificador han sido disgregadas (o dispersadas) durante el análisis. Si las partículas floculan y complican los análisis de tamaño, se obtendría, una amplia variedad de resultados erráticos y sin sentido.

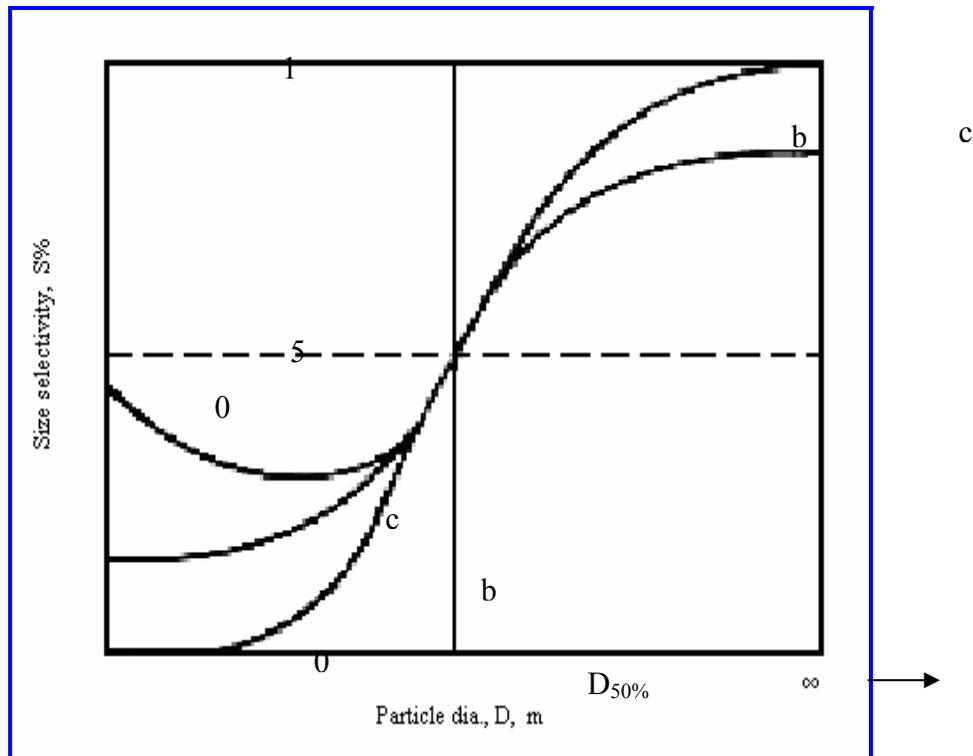


Figura 2.12. Tipos de curvas de la selectividad del tamaño [14].

La curva a-a' representa una separación perfecta. La curva b-b' representa la capacidad intrínseca de un determinado clasificador, y es la mejor que se podría lograr con ese clasificador a bajas concentraciones de partículas.

Las curvas b-c', c-b', c-c', d-b', y d-c' representan los resultados de selectividad del tamaño que se pueden obtener como producto de las complicaciones adicionales introducidas por el modo de operación del equipo, o por la interacción de las partículas.



Las desviaciones de una curva semejante a la b-b', que pasa del 0 % del tamaño de la partícula más fina al 100 % de la más gruesa, pueden deberse a lo siguiente: a.) Pérdida del material durante el proceso de la clasificación. b.) La trituración (o molido) del material durante la clasificación. c.) Las corrientes de reciclaje dentro del clasificador. d.) Desvíos resultantes de la división del flujo principal del fluido. Ejemplo, algunos de los pasos de alimentación directamente al producto. e.) Fallas en la dispersión o floculación de las partículas durante la clasificación.

Si el análisis del tamaño del material de alimentación calculado por la ecuación 2.12 está en correspondencia con el tamaño real del material, se obtendría la misma curva de selectividad, sin importar cuál es la combinación de fracciones utilizadas para el cálculo. Si por el contrario, el análisis de alimentación calculado no está en correspondencia con el material de alimentación medido, se obtendría una curva de selectividad diferente, dependiendo del tipo de combinación de análisis de tamaños que se use para el cálculo.

La curva c' podría reflejar los efectos del molido. Esto podría confirmarse si el análisis de alimentación calculado por la ecuación 2.12 para las fracciones fina y gruesa es más fina que la medida para el material total de alimentación.

La curva d es indicativa de una mala dispersión del material de alimentación. Las partículas finas cuando se aglomeran actúan como partículas gruesas en el clasificador. Esta condición puede ser detectada solo si los aglomerados son redispersados en el analizador de tamaño de partícula.

La nivelación demostrada en la curva c puede ser debida a la contaminación de la fracción fina por las corrientes de reciclaje o por fallas en la



dispersión del material de alimentación. En general, los balances, tanto de la masa total, como del tamaño de las partículas, revelan cuáles son los fenómenos responsables (pérdida de material, reciclaje, molido, o mala dispersión) de las desviaciones de una curva de la forma $b-b'$, en cualquier caso específico [10].

Otra forma para evaluar un equipo de clasificación: mientras que la selectividad del tamaño es una medida completa del funcionamiento del clasificador del tamaño de partícula, una medida práctica del funcionamiento total de la clasificación para un uso dado, puede ser obtenida calculando la producción y el rendimiento, utilizando las ecuaciones 2.3 y 2.7 respectivamente. La producción es una medida obtenida independiente de la calidad del producto.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROYECTO

El presente trabajo se desarrolló siguiendo las etapas que se describen a continuación:

3.1 Identificación De Las Variables Que Afectan La Distribución Granulométrica De Las Partículas En Un Microclasificador.

Con la finalidad de identificar las variables que afectan la distribución granulométrica de las partículas en un microclasificador; se obtuvo información del manual del microclasificador de partículas PTM 1500 [17]. Éste nos describe como está compuesto el microclasificador y los diferentes factores que determinan la regulación satisfactoria del tamaño de corte; basándose en una serie de pruebas realizadas por sus diseñadores, con materiales tales como: cementos, caliza, talco, bentonita, entre otras. Posteriormente se hizo un recorrido de reconocimiento del sistema de clasificación, con la finalidad de visualizar la ubicación de los equipos y tener un enfoque general del proceso de clasificación de partículas. Además, se visitó la sala de control, donde se pudo observar cómo actuaba el operador sobre las variables del sistema.

A continuación se reseñan las variables que afectan la distribución granulométrica de las partículas:



Velocidad del rotor: actúa directamente sobre el tamaño de corte del producto clasificado. La elevación de la velocidad favorece el logro de un tamaño de corte más fino. Para el microclasificador la regulación de esta velocidad se obtiene muy fácil y rápidamente por la acción sobre el volante del variador. La velocidad de rotación dependerá del tamaño de corte que se quiera obtener, además de las condiciones del material de alimentación, tales como: la humedad, forma de las partículas, concentración en el aire, etc.

Palas del rotor: el número de palas constituye otra variable de la clasificación, e influye en el tamaño de corte del producto clasificado. mientras más estrecha es la distancia entre las palas del rotor, mayor resistencia al paso tendrán las partículas.

Sentido de giro del rotor: el rotor está compuesto por un número de palas, las cuales tienen una inclinación y forma que determinan trayectorias mecánicas de circulación muy precisas, justificables matemáticamente, que impiden o dejan pasar las partículas según su tamaño; éstas al cambiar el sentido de giro del rotor forman otras trayectorias. No se entrará en detalles de estos cálculos, de interés práctico, ya que la finalidad es la de suministrar datos, bajo la forma de tablas y de gráficos, de unos elementos que permitan el ajuste y la realización de una regulación adaptada a cada problema en particular que pueda presentar un material.

Posición del tubo telescópico ajustable: por medio de este equipo se controla la distancia de caída del material a la cámara de clasificación. El descenso de este tubo permite una mejor dispersión del material en la cámara de clasificación y por ello una separación más fina del clasificador.

Caudal de aire total: actúa para favorecer la dispersión del polvo en el aire permitiendo así la circulación de las partículas.



Caudal de aire secundario: su función es la de favorecer la clasificación de las partículas y la destrucción de aglomerados.

Concentración de alimentación: ésta es otra de las variables importantes que relaciona la cantidad del material sólido, en gramos, dividido por el volumen de aire total en metros cúbicos. Sin embargo, a diferencia de velocidades altas, la concentración máxima debe ser evitada siempre que sea posible, porque concentraciones elevadas tienen como consecuencia una peor dispersión del producto en el aire, permitiendo que partículas gruesas pasen a formar parte del producto fino y partículas finas pasen a formar parte del producto grueso, afectando a la finura del corte y el rendimiento de la operación. Para el clasificador ptm 1500 una concentración de 450 g polvo/m³aire, debe ser considerada como un máximo.

Otros factores pueden, sin embargo, entrar en consideración, tales como: densidad, forma y humedad del material alimentado.

3.2 Determinación De La Influencia De Las Variables Seleccionadas En La Distribución Del Tamaño De Las Partículas.

Sin restarles importancia a algunas variables mencionadas en el punto anterior, se seleccionaron la velocidad del rotor, la concentración de la alimentación (g sólido/m³ aire) y el sentido de giro del rotor, como las variables que mayormente influyen en la distribución del tamaño de las partículas. Esta selección se fundamentó en la experiencia del personal que labora en esta planta.

Se realizaron un total de ocho corridas, modificando cada vez una variable y manteniendo las demás constantes. Para la concentración de la alimentación se utilizaron las siguientes relaciones: 157, 186 y 211 g sólido/m³ aire, tomando las más



parecidas como una constante; las velocidades del rotor utilizadas fueron 473 y 549 rpm y finalmente se trabajó con el sentido de giro del rotor en reversa y directo. La tabla 3.1 muestra las condiciones de operación.

El flujo de aire total (m^3/h) se determinó por medio de la gráfica del ventilador, la cual es suministrada por el fabricante, introduciendo en la misma los siguientes datos: tipo 3800, tamaño 045, velocidad del rotor 1760 rpm y la presión de 600 mm de agua, se obtuvo un flujo de $15000 \text{ m}^3/\text{h}$, como se puede observar en la figura A.1 del anexo A; mientras que el flujo de material sólido (g/min) se obtiene pesando la cantidad de material que sale a través de la válvula alveolar de la alimentación en un tiempo determinado.

Tabla 3.1. Condiciones de las variables escogidas para cada corrida.

| Corrida | Condiciones de operación | | | | |
|---------|---|---|---|----------------------------|---------------------------|
| | Caudal de alimentación (W_a) g/min | Caudal de aire (Q) m^3/h | Concentración de alimentación g polvo/ m^3 aire | Velocidad del rotor rpm | Sentido de giro del rotor |
| 1 | 39217, | 15000 | 156,87 | 473 | Dire |



| | | | | | |
|---|--------------|-------|--------|-----|-------------|
| | 50 | | | | cto |
| 2 | 46667, 50 | 15000 | 186,67 | 473 | Dire cto |
| 3 | 46132, 50 | 15000 | 184,53 | 549 | Dire cto |
| 4 | 52832, 50 | 15000 | 211,33 | 549 | Dire cto |
| 5 | 39217, 50 | 15000 | 156,87 | 549 | Dire cto |
| 6 | 39150, 00 | 15000 | 156,60 | 473 | Rev ersa |
| 7 | 52832, 50 | 15000 | 211,33 | 473 | Rev ersa |
| 8 | 39282, 50 | 15000 | 157,13 | 549 | Rev ersa |

3.2.1 Caracterización Del Material Sólido Alimentado (Carbonato De Calcio).

Para cada corrida se tomaron muestras en diferentes puntos del proceso de llenado del sistema de alimentación, seguidamente a las muestras se le realizó una serie de análisis para determinar la granulometría, el porcentaje de humedad y la densidad aparente.

La granulometría se determinó con el equipo Malvern por difracción láser, con el cual se determinó detalladamente el porcentaje de partículas para un determinado diámetro, en un rango de 0,36 a 301 micras. Los resultados se expresan en diámetros equivalentes y área superficial, el diámetro debe estar en un rango de 10,00 a 14,00 micras para el correspondiente a D_{50%}. La tabla 4.1



muestra los análisis estadísticos obtenidos por el equipo Malvern para las diferentes alimentaciones. Los resultados del Malvern son más confiables ya que resuelve completamente las ecuaciones por interacción de la luz con la materia, condensando al volumen de la partícula, como una predicción del área proyectada.

Aplicando la técnica COVENIN 1429-79 a las muestras se le determinó el porcentaje de humedad, para precisar si el material podría aglomerarse o formar flóculos. Por lo tanto, se regularon las condiciones del sistema de clasificación para trabajar con un caudal de aire parecido al utilizado en la empresa, que evitará la formación de aglomeraciones o flóculos. El porcentaje de humedad de las alimentaciones se resume en la tabla 4.2.

La caracterización finalizó determinando la densidad aparente del material de alimentación mediante el uso de la técnica ASTM 1895-69, con la finalidad de establecer la cantidad de masa que ocupa el material en un volumen determinado. La tabla 4.3 muestra la densidad aparente de cada una de las corridas.

3.2.2 Procedimiento Experimental Para La Unidad De Clasificación.

La figura B.1 (anexo B), muestra el diagrama del procedimiento experimental el cual fue como sigue:

1. Se cargó la muestra de carbonato de calcio, previamente pesada, en la tolva de alimentación, seguidamente se cerró.
2. Se comprobó el correcto montaje de las transmisiones y el sentido correcto de rotación de los aparatos (ventilador, motor del microclasificador, mando del microclasificador).



3. Se abre la válvula mariposa Vm-2, dejando la válvula alveolar Va-1 cerrada.

4. Se puso en marcha el motor del clasificador, fijando la velocidad del rotor al valor previsto.

5. Se accionaron los motores de cada ventilador.

6. Se controló el volumen de aire del ventilador principal por la abertura progresiva de la válvula mariposa Vm-3, hasta obtener el volumen deseado.

7. Se reguló el caudal del alimentador al valor previsto.

8. Se comprobó si el amperaje del ventilador principal no había cambiado. De lo contrario, se manipularía sobre la válvula mariposa Vm-3 para volver al amperaje a su valor inicial.

9. Se puso en marcha la alimentación con la válvula alveolar Va-1 y se accionó el cronómetro.

10. Se comprobaron los amperajes del microclasificador y del ventilador. Se tomaron las muestras cuando el funcionamiento del sistema estaba estable.

11. Finalmente, se descargaron todos los productos y se pesaron.

Todas las muestras fueron analizadas por el equipo de difracción de láser.



3.3 Determinación Del Funcionamiento Del Clasificador.

Para la determinación del funcionamiento del clasificador se seleccionó el método de las curvas de Tromp, debido a que es una herramienta que ofrece diversos parámetros para tal fin, tales como: la agudeza del corte, el tamaño de corte y los criterios con respecto a los varios tipos de curvas de Tromp. También se determinó el rendimiento, el cual permite tener una apreciación del funcionamiento para un determinado tamaño de partícula. Para determinar la clasificación exacta del clasificador se unieron en una sola, las corrientes de los productos del ciclón y del filtro de manga, llamándola producto fino. Para aplicar la curva Tromp al análisis de un equipo de clasificación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Determinar los caudales y el análisis granulométrico completo de la alimentación, gruesos y finos.
2. Calcular la selectividad S_{D_i} ; tomando un intervalo de tamaño representativo D_i como punto medio de ΔD_i , estando el mismo asociado a los intervalos de distribución de tamaños acumulativos $\Delta\phi_{ci}$ y $\Delta\phi_{fi}$ respectivamente de los productos gruesos y finos.
3. Graficar D_i contra S_{D_i} en escala logarítmica.
4. Determinar el tamaño y la agudeza del corte.
5. Analizar la curva de Tromp obtenida.



3.4 Establecimiento De Las Condiciones De Trabajo Adecuadas Del Sistema De Clasificación Complementario.

En esta etapa se analizaron las cantidades de los productos que se obtuvieron durante cada corrida, se compararon los análisis granulométricos superpuestos en una gráfica correspondiente a una alimentación y sus productos obtenidos en una corrida, la forma de la curva de Tromp para cada corrida y las condiciones de las variables en las que se obtuvieron los mejores resultados. A partir de estos análisis se recomendaron algunos cambios para incrementar la producción de productos finos, los cuales cumplen con las especificaciones establecidas por las empresas que demandan dichos productos.

3.5 Equipos, Materiales Y Sustancias.

3.5.1 Equipos.

Para el desarrollo experimental del proyecto se utilizaron los siguientes equipos:

3.5.1.1 Equipos De Ventilación.

Ventilador de aire: constituido por un rotor de disco de 0,5 metros diámetro, con 6 paletas curvas, marca Turbovent. Motor General. Modelo LCL, serial 226537A, 220/400 voltios.



Ventilador de aire: constituido por un rotor de disco de diámetro 1,5 metros, con 6 paletas curvas, marca Turbovent, tipo VR 38 RU450R. Motor General. Modelo LCL, serial 2226625, 220/400 voltios.

3.5.1.2 Equipos De Clasificación Y Separación De Partículas.

Clasificador tipo ciclón: constituido por un cilindro vertical con un fondo cónico que va desde 0,50 a 1,24 metros de diámetro, una altura total de 4,60 metros y un cilindro interno de 0,68 metros de diámetro y 1 metro de longitud.

Microclasificador de partículas PTM 1500: constituido por un tubo de alimentación que entra en una cámara cónica provista de un rotor con 18 palas inclinadas, con control automático de velocidad y giro de rotor en directo y reversa. con velocidades de oscilación entre 0 a 568 rpm. Motor General. Modelo AEG, serial 39233h-2, 220/400 voltios.

Filtro de mangas: de tipo manual, con 299 mangas de tela de 3,94 metros de altura.

3.5.1.3 Equipos De Almacenamientos.

Tolvas: las tolvas usadas fueron de capacidad de 10 m³.

Silos: el silo usado fue con capacidad de 15 m³.



3.5.1.4 Equipos Reguladores.

Sami: variador de frecuencia, marca ABB, modelo Acs501, serial 5084086.

Válvula alveolar: regulador de la entrada de aire, de 50 cm de diámetro.

3.5.1.5 Equipos Para Los Ensayos Físicos.

Medidor de tamaño de partículas: marca Malvern, modelo Mastersizer micro UK, versión 2.19, Serial numero 33442-70, rango de 0,3 a 300 micras, exactitud de $\pm 2\%$ sobre el Dv50.

Estufa: marca Memmert, rango de 20 °C a 1000 °C, exactitud de ± 1 °C.

Balanza analítica: marca Sauter, modelo D-7470, rango de 0,01g a 2500g, exactitud de ± 1 g.

Balanza de plataforma: marca Toledo, tipo electrónica, seriales ci060006238, capacidad de 25 kg a 2000 kg, exactitud de $\pm 0,5$ kg.

Equipo: para determinar densidad aparente.

Tubo pitot: modelo telescópico, serial 171805301.

3.5.2 Materiales

Espátulas de acero inoxidable.



Beakers de 500 ml.

Cronómetro.

Recipientes de recolección.

Recipiente de metal de 17,28 cm³.

Pizetas.

Tamices.

Columna de agua.

3.5.3 Sustancias.

Agua: se utilizó agua destilada.

Carbonato de calcio: se utilizó un carbonato de calcio molido, con una granulometría de un diámetro aproximadamente entre 10,00 a 14,00 micras correspondiente al D_{50%} del equipo Malvern.

3.6 Muestra De Cálculos.

3.6.1 Cálculo Del Caudal Del Producto Fino Del Microclasificador.

Para la determinación del caudal del producto fino (W_f), que sale del microclasificador se utilizaron las cantidades del material alimentado y el tiempo en el cual se suministró, además de las cantidades de los productos obtenidos.

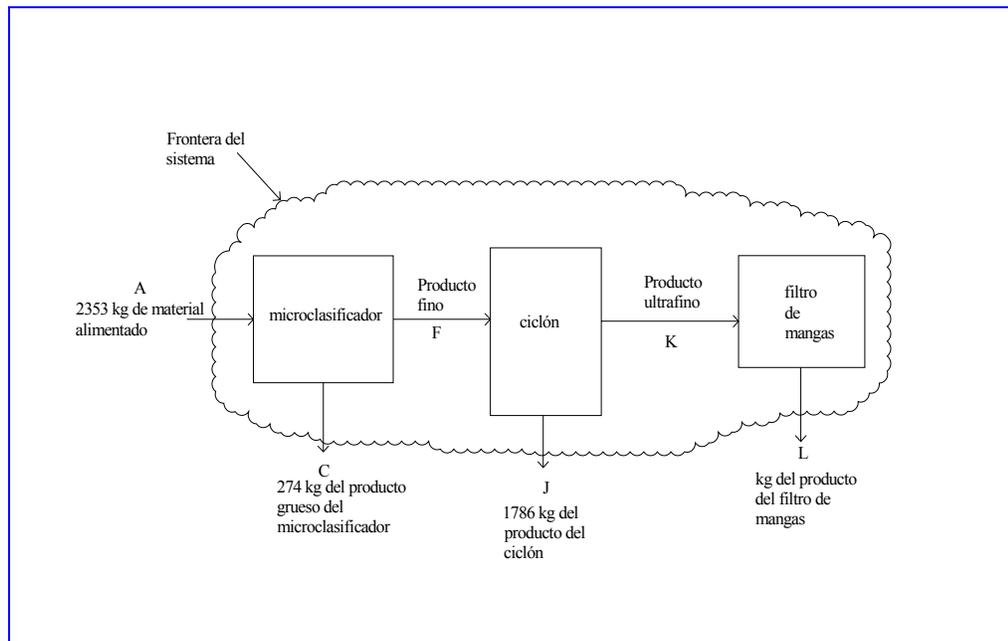
Se procedió haciendo un balance de masa global para el sistema, como se indica en la figura 3.1, donde la cantidad de masa que entra al sistema es igual a la que sale, ya que es un sistema donde no hay acumulación, ni reacción química. Fijando como base de cálculo una hora de proceso para la corrida N° 1 y utilizando el principio de la ecuación 2.9, se tiene:

$$\text{Masa alimentación} = \text{Masa de gruesos} + \text{Masa del ciclón} + \text{Masa del filtro} \quad (\text{Ec.3.1})$$

$$A = C + J + L \quad (\text{Ec.3.2})$$

$$2353 \text{ kg} = 274 \text{ kg} + 1786 \text{ kg} + L$$

$$L = 2353 \text{ kg} - 274 \text{ kg} - 1786 \text{ kg} = 293 \text{ kg}$$



**Figura 3.1. Balance de materia total para la corrida 1.**

Seguidamente se realizó un balance en el microclasificador, como se indica en la figura 3.2.

$$\text{Masa de alimentación} = \text{Masa de gruesos} + \text{Masa producto fino (Ec.3.3)}$$

$$A = C + F \quad (\text{Ec.3.4})$$

$$2353 \text{ kg} = 274 \text{ kg} + F$$

$$F = 2353 \text{ kg} - 274 \text{ kg} = 2079 \text{ kg}$$

De igual forma, se procedió en la determinación del resto de los caudales del producto fino del microclasificador de las demás corridas reportándose en la (tabla 4.6).

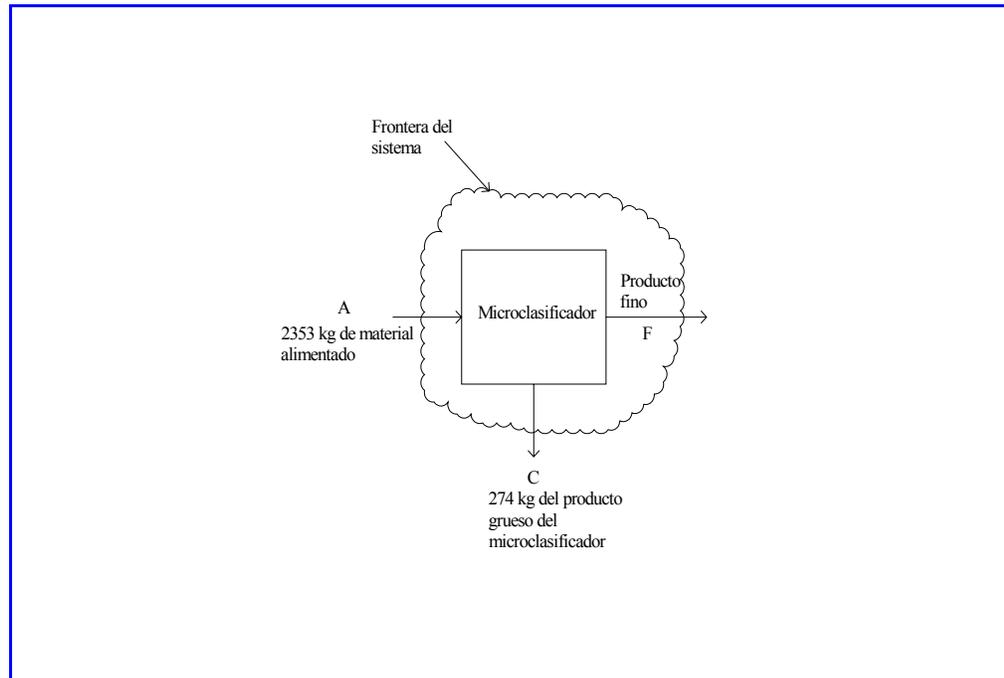


Figura 3.2. Balance de materia del microclasificador para la corrida 1.

3.6.2 Cálculo De La Distribución Granulometría Del Producto Fino Del Microclasificador.

A todas las muestras se les realizó unos análisis granulométricos utilizando el equipo Malvern, tabulándose los promedios en las tablas del anexo C. Los análisis granulométricos por difracción láser de los productos que se obtuvieron a la salida del ciclón y a la salida del filtro de mangas, se relacionaron con los caudales de los productos del ciclón y del filtro por el principio de la ecuación 2.12, para formar la granulometría del producto fino que sale del microclasificador; asumiendo un balance de masa de la distribución granulométrica en el ciclón para la corrida N° 1, como se puede ver en la figura 3.3. Sustituyendo en la ecuación 3.8 los valores de la corrida N° 1, de la distribución granulométrica cuando n es igual a 0 correspondiente al diámetro $0,36 \mu\text{m}$, de los productos del ciclón y del filtro de manga tabulados en el anexo C



(tablas C.3 y C.4) y los valores calculados anteriormente (W_j , W_l y W_f) con respecto a la corrida N° 1, se obtiene:

$$\text{Masa de finos} = \text{masa de ciclón} + \text{masa de filtro} \quad (\text{Ec.3.5})$$

$$F = J + L \quad (\text{Ec.3.6})$$

$$W_f \cdot \phi_{fi} = W_j \cdot \phi_{ji} + W_l \cdot \phi_{li} \quad (\text{Ec.3.7})$$

$$\phi_{fi} = (W_j / W_f) \cdot \phi_{ji} + (W_l / W_f) \cdot \phi_{li} \quad (\text{Ec.3.8})$$

$$\phi_{f0\% < 0,36} = \left(\frac{1786 \frac{kg}{h}}{2079 \frac{kg}{h}} \cdot 0,32\% \right) + \left(\frac{293 \frac{kg}{h}}{2079 \frac{kg}{h}} \cdot 0,51\% \right) = 0,35\%$$

Para la determinación de los demás porcentajes acumulativos (hasta completar ϕ_{f36}) de la fracción fina menor que el tamaño de la partícula D, se procedió de la misma forma tabulándose estos resultados en la tabla D.1 (anexo D). De igual manera, se procedió con las otras corridas y éstas se reportan en las tablas siguientes del mismo anexo.

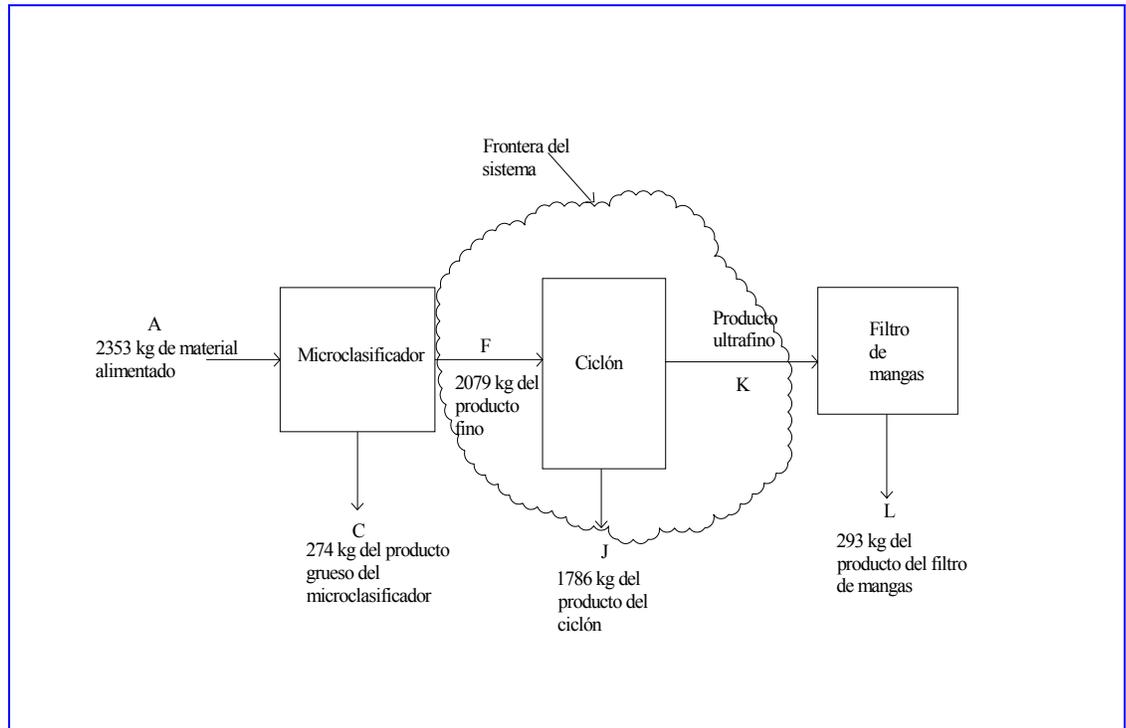


Figura 3.3. Balance de materia del ciclón para la corrida 1.

3.6.3 Construcción De La Curva De Selectividad O Tromp.

La selectividad del tamaño o curva de Tromp se construyó a partir de la distribución granulométrica (calculada) del producto fino que sale del microclasificador y de los datos de las distribuciones granulométricas de los análisis de la alimentación y gruesos, reportados por el equipo Malvern. Las tablas correspondientes a los análisis por láser reportados por el equipo Malvern de todos los promedios de las muestras, para cada una de las corridas se organizan en el anexo C. Este equipo proporcionó la información de los porcentajes de partículas para un rango de diámetros desde 0,36 a 301,68 μm . Sin embargo, para la construcción de las curvas se trabajó con los porcentajes correspondientes a los diámetros que van de 0,36 a 88,91 μm , reduciendo el número de intervalos. Para

la construcción de la curva de selectividad se utilizó la ecuación 2.13 la cual se expresa en forma de incrementos, como sigue:

$$S_{Di} = W_c \cdot \Delta\phi_{ci} / (W_c \cdot \Delta\phi_{ci} + W_f \cdot \Delta\phi_{fi}) \quad (\text{Ec.3.9})$$

Para determinar cada uno de los intervalos de distribución de tamaños acumulativos ($\Delta\phi_{ci}$), ($\Delta\phi_{fi}$) para las fracciones gruesas y finas que salían del microclasificador de la corrida N° 1; se graficaron las distribuciones granulométricas correspondientes a la alimentación, la fracción gruesa y la fracción fina en el eje del Y versus el diámetro de las partículas en el eje de las X en coordenadas logarítmicas, utilizando los datos de la tabla E.1 del anexo E, y reportándose la gráfica en la figura F.1 del anexo F. Se rededujeron las distribuciones granulométricas a 34 intervalos de distribución de tamaños acumulativos ($\Delta\phi_{ci}$), ($\Delta\phi_{fi}$), con fracciones más estrechas en los extremos, especialmente el extremo fino de las distribuciones, asociadas con el intervalo de tamaño ΔD_i , respectivamente. Como se puede ver en la figura F.1, el intervalo de tamaño representativo D_i , se tomó como el punto medio de ΔD_i ; y se determinó por la siguiente ecuación:

$$D_i = [(D_{n+1} - D_n) / 2] + D_n \quad (\text{Ec.3.10})$$

Donde:

D_i = punto medio.

Sustituyendo los valores correspondientes D_{n+1} y D_n que se muestran en la tabla E.1 (anexo E), cuando la n es igual a 0 se obtiene:

$$D_0 = (0,42 \mu\text{m} - 0,36 \mu\text{m}) / 2 + 0,36 \mu\text{m} = 0,39 \mu\text{m}$$



Para el resto de los D_i se procedió igual hasta completar los intervalos D_{34} tabulándose éstos en la tabla G.1 (anexo G). Los intervalos de distribución de tamaños acumulativos de la fracción gruesa ($\Delta\phi_{ci}$) se determinan por la siguiente ecuación:

$$\Delta\phi_{ci} = (\phi_{cn+1} - \phi_{cn}) \quad (\text{Ec.3.11})$$

Sustituyendo los valores correspondientes ϕ_{cn+1} y ϕ_{cn} que se muestran en la tabla E.1, (anexo E) cuando la n es igual a 0 se obtiene:

$$\Delta\phi_{c0} = (0,77 \% - 0,27 \%) = 0,5 \%$$

Para el resto de los $\Delta\phi_{ci}$ se procedió igual hasta completar los intervalos $\Delta\phi_{c34}$ tabulándose éstos en la tabla G.1 (anexo G).

Los intervalos de distribución de tamaños acumulativos de la fracción fina ($\Delta\phi_{fi}$) se determinaron por la siguiente ecuación:

$$\Delta\phi_{fi} = (\phi_{fn+1} - \phi_{fn}) \quad (\text{Ec.3.12})$$

Sustituyendo los valores correspondientes ϕ_{fn+1} y ϕ_{fn} que se muestran en la tabla E.1, (anexo E) cuando la n es igual a 0 se obtiene:

$$\Delta\phi_{f0} = (0,97 \% - 0,35 \%) = 0,62 \%$$

Para el resto de los $\Delta\phi_{fi}$ se procedió igual hasta completar los intervalos $\Delta\phi_{f34}$ tabulándose éstos igualmente que los de la fracción gruesa en la tabla G.1 (anexo G).

Sustituyendo en la ecuación 3.9 los caudales del producto grueso y fino correspondiente a la corrida N° 1 de la tabla 4.6, al igual que las distribuciones de tamaños acumulativos de la fracción gruesa y fina correspondientes al intervalo 0 que se encuentran en la tabla G.1 (anexo G), para determinar la selectividad del tamaño correspondiente a dicho intervalo:

$$S_{D0} = \frac{274 \frac{kg}{h} \cdot 0,5\%}{274 \frac{kg}{h} \cdot 0,5\% + 2079 \frac{kg}{h} \cdot 0,62\%} \cdot 100\% = 9,61\%$$

Para el resto de los S_{Di} se procedió igual hasta completar los intervalos S_{D34} tabulándose éstos en la tabla H.1 (anexo H), con los datos de D_i y los S_{Di} de dicha tabla se construyó la curva de Tromp, graficando los S_{Di} en el eje de las Y y los D_i en el eje de las X en coordenadas logarítmicas, como se observa en la figura I.1 (anexo I).

De igual manera se procedió para determinar los S_{Di} correspondientes a las demás corridas tabulándose en las tablas siguientes de anexo H, seguidamente graficándose las figuras en el anexo I.

3.6.4 determinación Del Tamaño Y La Agudeza Del Corte.

Tanto el tamaño como la agudeza del corte se determinaron de la curva de selectividad, siendo el tamaño del corte el valor correspondiente al $D_{50\%}$. El tamaño del corte de la figura I.1 correspondiente a la corrida N° 1 es $D_{50\%} = 64,08 \mu\text{m}$.



Para la determinación de la agudeza se utilizó la ecuación 2.6, la cual relaciona los diámetros correspondientes a los valores del $D_{75\%}$ y $D_{25\%}$. Tomando los valores $D_{75\%} = 67,50 \mu\text{m}$ y $D_{25\%} = 49,15 \mu\text{m}$ de la curva de Tromp de la figura I.1 correspondiente a la corrida N° 1, e introduciéndolos en la ecuación:

$$\beta = \frac{D_{25\%}}{D_{75\%}} = \frac{49,15}{67,50} = 0,73$$

De igual forma, se procedió a determinar el tamaño y la agudeza para las demás corridas, reportándose los valores en la tabla 4.7.

3.6.5 Determinación Del Rendimiento.

El rendimiento del microclasificador se determinó usando la ecuación 2.7, refiriéndose a un tamaño de partícula específico, para un diámetro de $10,48 \mu\text{m}$ y $65,51 \mu\text{m}$. Para la corrida N° 1 se introdujeron en la ecuación 2.7 los valores correspondientes al diámetro de $10,48 \mu\text{m}$ de la tabla D.1 (anexo D), $\phi_a = 47,70\%$, $\phi_f = 52,02\%$, y los valores de la corrida N° 1 correspondientes al caudal de la alimentación y el caudal de la producción de finos tabulados en la misma $W_a = 2353 \text{ kg/h}$, $W_f = 2079 \text{ kg/h}$.

$$R_{10,48} = \frac{2079 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 52,02\%}{2353 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 47,70\%} \cdot 100\% = 96,36\%$$

De la misma forma se introdujeron en la ecuación 2.7 los valores correspondientes al diámetro de $65,51 \mu\text{m}$ de la tabla D.1 (anexo D), $\phi_a = 100,00\%$

%, $\phi_f = 99,85\%$, y los valores de la corrida N° 1 correspondientes al caudal de la alimentación y el caudal de la producción de finos tabulados en la misma $W_a = 2353 \text{ kg/h}$, $W_f = 2079 \text{ kg/h}$.

$$R_{65,51} = \frac{2079 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 99,85\%}{2353 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 100,00\%} \cdot 100\% = 88,23\%$$

Igualmente se procedió a la determinación de los rendimientos de las demás corridas reportándose éstos en la tabla 4.8

3.6.6 Cálculo Del Porcentaje De La Fracción De Finos.

Tanto la fracción fina como la gruesa se expresaron como un porcentaje de la alimentación, utilizando la ecuación 2.3. En la tabla 4.6 se resumen los caudales de los productos obtenidos. Para la corrida N° 1 se introducen los valores correspondientes a los caudales de alimentación y de finos en dicha ecuación y se obtuvo:

$$Y_f = \frac{2079 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{2353 \frac{\text{kg}}{\text{h}}} \cdot 100\% = 88,36\%$$

Para obtener el porcentaje de la fracción de grueso se aplicó la siguiente ecuación:

$$Y_c = 100 - Y_f \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$Y_c = 100 - Y_f = 100\% - 88,36\% = 11,64\%$$



De la misma forma se determinaron los demás porcentajes de la fracción de finos y gruesos para las demás corridas, reportándose éstos en la tabla 4.9.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los productos obtenidos por la unidad complementaria de clasificación fueron analizados por el equipo Malvern, el cual nos reportó la distribución granulométrica de las partículas; partiendo de ésta se evaluó la unidad de clasificación, por medio de los siguientes parámetros: fineza del producto obtenido, área superficial, forma de la curva de Tromp, agudeza del corte, tamaño del corte, rendimiento del producto fino para un determinado diámetro de partícula y el porcentaje de producción de las fracciones; comparando los resultados de por lo menos dos corridas.

4.1. Análisis De Resultados.

4.1.1 Identificación De Las Variables Que Afectan La Distribución Granulométrica De Las Partículas En Un Micro Clasificador.

La identificación de las variables que afectaron la distribución granulométrica de las partículas de la unidad complementaria se llevó a cabo con la finalidad de conocer el proceso de clasificación de carbonato de calcio, así como, los distintos equipos y mecanismos de control utilizados para controlar dichas variables. El microclasificador cuando realizó la clasificación de las partículas en fracciones gruesas y finas, en las pruebas realizadas por sus diseñadores; dependió de una serie de variables, para obtener el tamaño de corte deseado para la fracción fina. Analizando la información recopilada y las



actuaciones de los operadores de la empresa sobre las variables del sistema se puede decir lo siguiente:

El tamaño de corte del producto fino disminuyó a medida que se aumenta la velocidad de rotación, es decir predominó la fuerza centrífuga sobre las partículas de dimensiones más grandes (más pesadas).

Cuando el rotor trabajó con el máximo número de palas (en el PTM 1500, es de 18), el tamaño de corte del producto fino fue menor en comparación cuando se utilizó un menor número de palas en el rotor; es decir, la distancia entre ellas es más estrecha. Por lo tanto, mayor resistencia al paso tienen las partículas, pasando a través del rotor mayor porcentaje de partículas finas.

El descenso del tubo telescópico ajustable baja la producción. Sin embargo, permite que el material de alimentación se disperse mejor en la cámara de clasificación.

Cuando el rotor gira en directo forma trayectorias mecánicas de circulación muy precisas, que impiden o dejan pasar las partículas según su tamaño; éstas al cambiar el sentido de giro del rotor forman otras trayectorias.

El caudal de aire total que atraviesa todo el sistema, condiciona la velocidad de circulación de las partículas. Por lo tanto, una velocidad de circulación más elevada de aire favorece una mejor dispersión de la mezcla aire – polvo; contrarrestándose el arrastre de partículas gruesas con el aumento de la velocidad del rotor. La función del caudal de aire secundario es la de favorecer la clasificación de las partículas y la destrucción de los aglomerados. Por lo tanto, cuando más húmedo es un material, más elevado deberá ser el caudal de aire secundario.



Para el calificador PTM 1500 concentraciones mayores a 450 g polvo/m³aire deben ser evitadas, ya que impiden la dispersión del producto en el aire, permitiendo que un porcentaje alto de partículas gruesas pasen a formar parte del producto fino y un porcentaje alto de partículas finas pasen a formar parte del producto grueso.

Otros factores pueden, sin embargo, entrar en consideración, tales como: densidad, forma y humedad del material alimentado

4.1.2 Caracterización Del Material Sólido Alimentado.

El promedio de los resultados de los análisis granulométricos de los materiales alimentados en cada una de las corridas que se realizaron, cumplieron con las especificaciones que requerían los mismos para ser alimentados. Los resultados de los análisis granulométricos con el equipo Malvern por difracción láser se pueden observar en la tabla 4.1 donde se evidencia que cumplieron con sus especificaciones en un rango de 10,00 a 14,00 micras para el diámetro equivalente correspondiente a D₅₀%. Además, se puede observar que a medida que baja el D₅₀%, aumenta el área superficial del material alimentado, cumpliendo igualmente con sus especificaciones en un rango de 0,4500 a 0,5200 m²/g.

Como se puede observar en la tabla 4.2 el promedio de los porcentajes de humedad de los materiales alimentados en cada corrida se mantuvo entre 0,59 y 0,60 %, siendo todos estos valores inferiores a 0,61 % de humedad, que es la especificación del porcentaje de humedad de la empresa micronizados caribe. Por lo tanto, se reguló el caudal de aire del ventilador a 15000 m³/h, lo cual garantizó que el material no formó aglomeraciones o flóculos durante el proceso.



Tabla 4.1. Análisis estadísticos por Malvern de los materiales alimentados.

| Alimentación de la corrida | Análisis 1 | | Análisis 2 | | Análisis 3 | | Promedio | |
|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | D _{50%} µm | Área superficial m ² /g |
| 1 | 11,06 | 0,4975 | 11,06 | 0,4977 | 11,04 | 0,4977 | 11,05 | 0,4976 |
| 2 | 13,43 | 0,4640 | 13,40 | 0,4641 | 13,41 | 0,4642 | 13,41 | 0,4641 |
| 3 | 12,05 | 0,4791 | 12,01 | 0,4792 | 12,03 | 0,4793 | 12,03 | 0,4792 |
| 4 | 11,44 | 0,4885 | 11,39 | 0,4885 | 11,46 | 0,4882 | 11,43 | 0,4884 |
| 5 | 10,63 | 0,5094 | 10,70 | 0,5093 | 10,64 | 0,5096 | 10,66 | 0,5094 |
| 6 | 10,56 | 0,5005 | 10,58 | 0,5005 | 10,54 | 0,5002 | 10,56 | 0,5004 |
| 7 | 11,40 | 0,4948 | 11,46 | 0,4930 | 11,44 | 0,4936 | 11,43 | 0,4938 |
| 8 | 11,35 | 0,4970 | 11,31 | 0,4972 | 11,34 | 0,4971 | 11,33 | 0,4971 |

Tabla 4.2. Porcentaje de humedad de las diversas alimentaciones.

| Alimentación de la corrida | Análisis 1 | Análisis 2 | Análisis 3 | Promedio |
|----------------------------|------------|------------|------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| | Humedad % | Humedad % | Humedad % | Humedad % |
| 1 | 0,59 | 0,59 | 0,58 | 0,59 |
| 2 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| 3 | 0,60 | 0,59 | 0,60 | 0,60 |
| 4 | 0,60 | 0,60 | 0,59 | 0,60 |
| 5 | 0,59 | 0,59 | 0,59 | 0,59 |
| 6 | 0,59 | 0,60 | 0,58 | 0,59 |
| 7 | 0,59 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| 8 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |



Como se pueden observar en la tabla 4.3 el promedio de las densidades aparente de los materiales a alimentados encada corrida, fue semejante entre ellas; esto garantizó que el material se comporto igual al momento de descender en la tolva de alimentación y al pasar a través de la válvula.

Tabla 4.3. Densidad aparente de las diversas alimentaciones.

| Alimentación de la corrida | Análisis | Análisis | Análisis | Promedio |
|----------------------------------|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | |
| | Densidad aparente (ρ_a) g/cm ³ |
| 1 | 0,601 | 0,600 | 0,601 | 0,601 |
| 2 | 0,613 | 0,611 | 0,605 | 0,610 |
| 3 | 0,603 | 0,603 | 0,604 | 0,603 |
| 4 | 0,602 | 0,602 | 0,603 | 0,602 |
| 5 | 0,601 | 0,601 | 0,601 | 0,601 |
| 6 | 0,600 | 0,600 | 0,601 | 0,600 |
| 7 | 0,603 | 0,602 | 0,602 | 0,602 |
| 8 | 0,603 | 0,601 | 0,602 | 0,602 |

4.1.3 Selección De Las Variables Que Se Estudiaron.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, existe un gran número de variables y factores que determinan la regulación satisfactoria del tamaño de corte de las partículas. Partiendo de las experiencias de los operadores y de los



resultados obtenidos por los sistemas de clasificación, se escogieron algunas de esas variables para la realización de la evaluación de la unidad complementaria de clasificación, las cuales son: la velocidad del rotor, el sentido de giro del rotor y la concentración de la alimentación.

4.1.4 Efectos De Las Variables Seleccionadas En Los Productos Obtenidos.

Para la medición de las variables seleccionadas se mantuvieron fijas las condiciones de operación durante el proceso de cada corrida. A medida que se realizaba una corrida se modificaba una variable para medir su efecto. A todas las muestras analizadas se le realizaron las respectivas técnicas de muestreo, analizando los productos por difracción láser. El análisis de las variables se realizó comparando los promedios del diámetro de las partículas correspondiente al $D_{50\%}$ y su área superficial del material alimentado, con la de los productos obtenidos. En las tablas del anexo J se reportan los promedios de los análisis estadísticos reportados por el equipo Malvern correspondientes al material de alimentación y los productos del ciclón, rechazo del microclasificador y del filtro de manga, para cada corrida.

Tabla 4.4. Efecto de la velocidad del rotor, con concentraciones constantes y sin cambio en sentido de giro del rotor.

| Corrida | Velocidad del rotor rpm | Concentración g polvo/m ³ aire | Sentido de giro del rotor | Tipo de material | $D_{50\%}$ μm | Área superficial m ² /g |
|---------|-------------------------|---|---------------------------|------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 6 | 473 | 156,60 | Reversa | Alimentación | 10,56 | 0,5004 |
| | | | | Rechazo (grosso) | 17,60 | 0,3088 |
| | | | | Ciclón (fino) | 7,88 | 0,5913 |



| | | | | | | |
|---|-----|--------|---------|--------------------|-------|--------|
| | | | | Filtro (ultrafino) | 3,78 | 0,9334 |
| 8 | 549 | 157,13 | Reversa | Alimentación | 11,33 | 0,4971 |
| | | | | Rechazo (grueso) | 18,09 | 0,2998 |
| | | | | Ciclón (fino) | 7,05 | 0,6466 |
| | | | | Filtro (ultrafino) | 4,30 | 0,8538 |

4.1.4.1 Efecto De La Velocidad Del Rotor.

El efecto de la velocidad del rotor se puede apreciar con mayor precisión cuando se comparan los resultados obtenidos en las corridas N° 6 y 8 mostradas en la tabla 4.4, donde las velocidades del rotor fueron de 473 rpm y 549 rpm respectivamente, manteniendo las demás condiciones de operación estables; las concentraciones de las corridas N° 6 y 8 son parecidas; por lo tanto se tomaron como una constante.

En la tabla 4.4 se puede observar que para la alimentación de la corrida N° 6, el promedio del diámetro del D_{50%} de las partículas es de 10,56 µm, éste baja significativamente a 7,88 µm después de la clasificación en el producto del ciclón. Sin embargo, para la corrida N° 8 en la alimentación el promedio del diámetro del D_{50%} fue de 11,33 µm, más grueso que el de la corrida N° 6, bajando mucho más que el anterior a 7,05 µm después de la clasificación en el producto del ciclón; indicando el efecto de la velocidad del rotor la cual evidenció que a mayor velocidad se restringe el paso a un porcentaje de partículas gruesas; las cuales pasan a formar parte



del producto de gruesos, donde el $D_{50\%}$ es igual a 17,60 μm de la corrida N° 6 y el $D_{50\%}$ es igual a 18,09 μm de la corrida N° 8.

El área superficial es otra de las formas de evidenciar la finura del producto obtenido. A medida que ésta se acerca a la unidad, más fino es el producto; es decir, cubre una superficie de 1 m^2 con poca cantidad en peso. Por lo tanto, el promedio del área superficial del producto del ciclón de la corrida N° 6 es 0,5913, menor que el promedio del área superficial del producto del ciclón de la corrida N° 8 la cual es de 0,6466. Esto se debe al paso de un porcentaje mayor de partículas gruesas (más pesadas) al producto del ciclón de la corrida N° 6.

La comparación se basa principalmente entre la alimentación y los productos gruesos y los finos del ciclón, ya que en éste último se obtiene mayor cantidad, en comparación con el filtro de manga.

4.1.4.2 Efecto Del Sentido De Giro Del Rotor.

Como ya se mencionó anteriormente, el rotor presenta trayectorias de circulación diferentes cuando está girando en directo y cuando gira en reversa; siendo la reversa el sentido de giro que proporcionó los mejores resultados con respecto a la clasificación de partículas. Este efecto se puede apreciar mejor al comparar gráficamente la distribución granulométrica de las corridas N° 1 y 6. La figura 4.1 representa las curvas de los promedios de las distribuciones granulométricas de la corrida N° 1, que se trabajó con el sentido de giro en directo, velocidad del rotor de 473 rpm y una concentración de alimentación de 156,87 g polvo/ m^3 aire. Aquí la curva de la distribución granulométrica de la alimentación es prácticamente similar a la curva del producto del ciclón, apreciándose que no hubo una diferencia



significativa en la clasificación y una leve diferencia con respecto al producto grueso (rechazo del microclasificador).

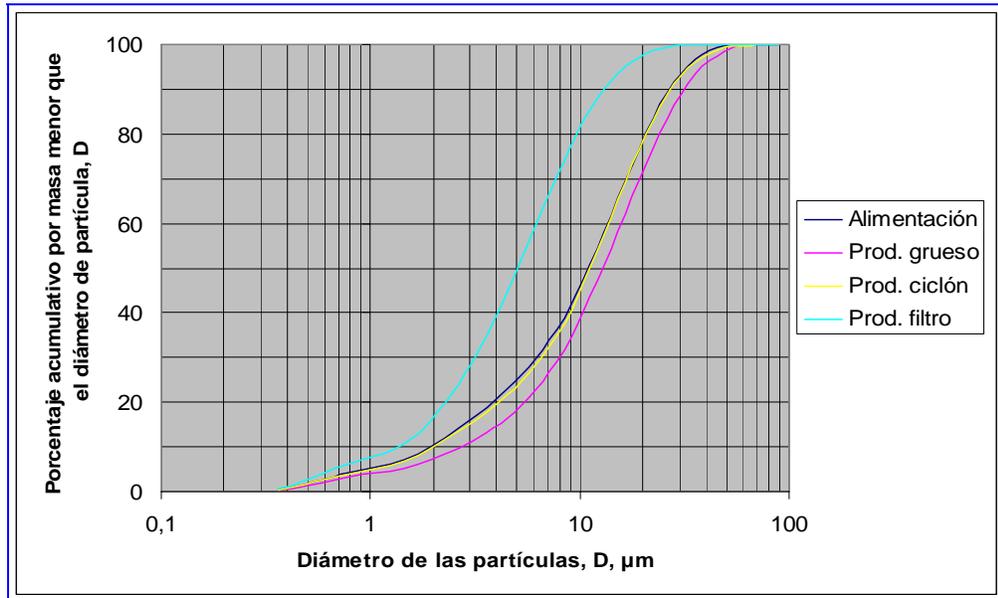


Figura 4.1. Gráfica de las distribuciones granulométricas de la corrida 1, con sentido de giro directo.

Sin embargo, para la corrida N° 6, que se muestra en la figura 4.2 se trabajó con el sentido de giro en reversa, la velocidad de rotor de 473 rpm y una concentración de alimentación de 156,60 g polvo/m³aire; se produjo una buena separación entre las curvas de distribución de la alimentación y las de los productos obtenidos, lo cual indica que cuando el rotor gira en reversa las trayectorias de circulación presentan un mejor resultado en la clasificación de las partículas. Las tablas de las distribuciones granulométricas de todas las corridas se pueden observar en el anexo K y las gráficas de las distribuciones granulométricas de las demás corridas se pueden observar en el anexo L.

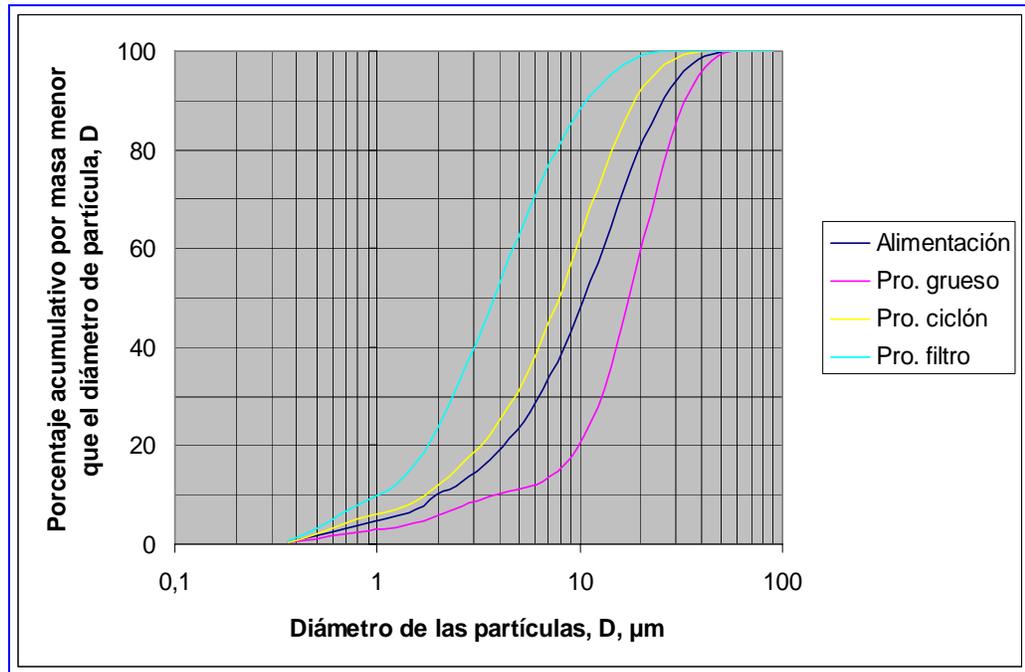


Figura 4.2. Gráfica de las distribuciones granulométricas de la corrida 6, con sentido de giro en reversa.

4.1.4.3 Efecto De La Concentración De Alimentación.

Analizando los resultados obtenidos en la tabla 4.5, con respecto a las diferentes concentraciones para las corridas N° 3 y 4, donde las demás condiciones de operación, velocidad y sentido de giro en directo fueron iguales; se observa que el promedio del diámetro de la partícula para el $D_{50\%}$ en los productos del ciclón fue más eficiente cuando se trabajó con la concentración de 211,33 g polvo/m³ aire; cuando es comparado con el diámetro de la partícula del $D_{50\%}$ del material alimentado, después de realizarse la clasificación. Para la corrida N° 3 cuya concentración fue de 184,53 g polvo/m³ aire y el promedio del $D_{50\%}$ para la alimentación fue de 12,03 µm, se obtuvo en el ciclón un $D_{50\%}$ de 12,29 µm, se observó que no hubo una buena clasificación. Sin embargo, para la corrida N° 4 cuya



concentración fue de 211,33 g polvo/m³ aire y las demás condiciones de operación iguales a la de la corrida N° 3, el promedio del D_{50%} para la alimentación fue de 11,43 μm y el del D_{50%} del producto del ciclón bajo a 10,95 μm, se observó que hubo una leve mejoría al aumentar la concentración.

Analizando las corridas N° 6 y 7, cuyas concentraciones fueron de 156,60 g polvo/m³ aire y 211,33 g polvo/m³aire respectivamente, y las demás condiciones constantes, el promedio del D_{50%} para la alimentación de la corrida N° 6 fue de 10,56 μm pasando a 7,88 μm en el producto del ciclón, se observó que hubo una buena clasificación; mientras para la corrida N° 7 la clasificación fue mejorada pasando el promedio del D_{50%} de 11,43 μm de la alimentación a 7,05 μm en el producto del ciclón.

Según la teoría [17], a concentraciones menores de 450 g polvo/m³ aire, mejor es la dispersión de las partículas y por consiguiente la clasificación de las mismas; analizando los resultados obtenidos para las condiciones de operación evaluadas a concentraciones menores de 211,33 g polvo/m³ aire, la clasificación fue menos eficiente con respecto al diámetro del D_{50%} de las partículas para el producto del ciclón. Esto se pudo haber debido a que cuando se trabajó con concentraciones de 211,33 g polvo/m³ aire ocurrió en algún momento determinado el efecto del agujero de rata durante el proceso de clasificación y no pasó la cantidad del material a través de la válvula de alimentación como se esperaba.

Tabla 4.5. Efecto de la concentración, con velocidad constante y sin cambio en el sentido de giro del rotor.

| | Concentración g polvo/m ³ aire | Velocidad del rotor rpm | Sentido de giro del rotor | Tipo De material | D _{50%} μm | Área superficial m ² /g |
|--|---|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|--|
|--|---|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|--|



| | | | | | |
|--------|-----|---------|-----------------------|-------|--------|
| 184,53 | 549 | Directo | Alimentación | 12,03 | 0,4792 |
| | | | Rechazo (grosso) | 14,27 | 0,4088 |
| | | | Ciclón (fino) | 12,29 | 0,4536 |
| | | | Filtro (ultrafino) | 4,35 | 0,8377 |
| 211,33 | 549 | Directo | Alimentación | 11,43 | 0,4884 |
| | | | Rechazo (grosso) | 12,27 | 0,4474 |
| | | | Ciclón (fino) | 10,95 | 0,5036 |
| | | | Filtro (ultrafino) | 4,13 | 0,8849 |
| 156,60 | 473 | Reversa | Alimentación | 10,56 | 0,5004 |
| | | | Rechazo (grosso) | 17,60 | 0,3088 |
| | | | Ciclón (fino) | 7,88 | 0,5913 |
| | | | Filtro (ultrafino) | 3,78 | 0,9334 |
| 211,33 | 473 | Reversa | Alimentación | 11,43 | 0,4938 |
| | | | Rechazo (grosso) | 18,74 | 0,2894 |
| | | | Ciclón (fino) | 7,05 | 0,6364 |
| | | | Filtro (ultrafino) | 4,29 | 0,8472 |

Se trabajó con dichas concentraciones para evitar los efectos de una mala dispersión de las partículas en el aire, y no se pudo evidenciar que efecto tendría una concentración mayor a 211,30 y menor a 450 g polvo/m³ aire, ya que el caudal de la



alimentación no permitía pasar más de 52832,50 g/min. Sin embargo podría haberse reducido el caudal de aire, pudiendo ocasionar mala circulación de las partículas.

4.1.5 Evaluación Del Micro Clasificador.

Para evaluar el clasificador por aire se empleó la técnica de la curva de Tromp. Las curvas de Tromp muestran la eficacia de un equipo de clasificación a través de todo el rango de tamaño de las diferentes partículas. Este método, además de que permite determinar el grado de selección del clasificador, permite calcular la habilidad del separador para llevar las partículas finas al producto fino, el tamaño y la agudeza del corte. De acuerdo al modelo teórico [14], la curva de Tromp puede presentarse de muchas formas, dependiendo de los resultados de la clasificación; tal como se mostró en el capítulo 2.

Tabla 4.6. Caudales que entran y salen del sistema.

| Alimentación (W _a) kg/h | Producto grueso del microclasificador | | Producto del ciclón | | Producto del filtro | | Caudal del producto fino del microclasificador (W _f)=(W _J + W _L) kg/h |
|--|--|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|---|
| | (W _c), kg/h | % | (W _J), kg/h | % | (W _L), kg/h | % | |
| 2353 | 274 | 11,64 | 1786 | 75,90 | 293 | 12,45 | 2079 |
| 2800 | 400 | 14,29 | 2080 | 74,29 | 320 | 11,43 | 2400 |
| 2768 | 433 | 15,64 | 2037 | 73,59 | 298 | 10,77 | 2335 |
| 3170 | 536 | 16,91 | 2278 | 71,86 | 356 | 11,23 | 2634 |
| 2353 | 358 | 15,21 | 1732 | 73,61 | 263 | 11,18 | 1995 |
| 2349 | 856 | 36,55 | 1239 | 52,75 | 254 | 10,81 | 1493 |
| 3170 | 1500 | 47,32 | 1367 | 43,12 | 303 | 9,56 | 1670 |
| 2357 | 1162 | 49,30 | 962 | 40,81 | 233 | 9,86 | 1195 |



Se determinaron todos los caudales que entraban y salían del clasificador, por medio de una serie de balances de masa, obteniéndose una mayor cantidad de producto en el ciclón cuando se utilizó el sentido de giro en directo. Ésto se debe a que la fuerza centrífuga no fue eficiente; es decir, predominó la fuerza de arrastre sobre las partículas, pasando un gran número de ellas con diámetros de corte parecidos a los de la alimentación. Los resultados se muestran en la tabla 4.6.

Para la realización de la curva de Tromp se unieron los caudales de los productos del ciclón y del filtro en uno solo, denominándosele producto fino que sale del microclasificador, reportándose los valores en la tabla 4.6. Además se determinó la distribución granulométrica del producto fino por la ecuación 2.12 reportándose en las tablas del anexo D.

Se emplearon varios criterios para evaluar el equipo de clasificación con las curvas de Tromp, empezando por el análisis de las gráficas por el criterio del tamaño de corte ($D_{50\%}$) de Tromp, en el anexo I se muestran las gráficas correspondientes a las curvas de Tromp, donde las corridas que presentaron mejores resultados en la clasificación fueron las 6, 7 y 8 con diámetros del $D_{50\%}$ de 15,34 μm , 12,85 μm y 11,82 μm respectivamente, mientras que las primeras corridas 1, 2, 3, 4 y 5 tuvieron diámetros para el $D_{50\%}$ de 64,13 μm , 59,23 μm , 61,19 μm , 53,09 μm y 53,46 μm respectivamente. Los resultados de los diámetros se muestran en la tabla 4.7, los cuales indican que el clasificador realizó una mejor selección con el sentido de giro en reversa, a una velocidad del rotor de 549 rpm y a concentraciones de alimentación de 157,13 g polvo/ m^3 aire. A medida que se aumenta la velocidad mejora la clasificación y con concentraciones bajas, mejor es la dispersión de las partículas en el clasificador. Sin embargo, las trayectorias de circulación que presenta el rotor cuando gira en reversa fueron las que mejores resultados arrojaron.

**Tabla 4.7. Diámetro del corte y agudeza del corte del microclasificador.**

| Corrida | D _{25%} μm | D _{75%} μm | Diámetro del corte D _{50%} μm | Agudeza del corte B |
|---------|------------------------|------------------------|--|---------------------------|
| 1 | 49,36 | 67,52 | 64,13 | 0,73 |
| 2 | 45,61 | 65,39 | 59,23 | 0,70 |
| 3 | 41,23 | 66,06 | 61,19 | 0,62 |
| 4 | 38,53 | 56,98 | 53,09 | 0,68 |
| 5 | 38,76 | 56,78 | 53,46 | 0,68 |
| 6 | 9,58 | 25,85 | 15,34 | 0,37 |
| 7 | 8,22 | 20,22 | 12,85 | 0,41 |
| 8 | 8,13 | 18,72 | 11,82 | 0,43 |

Otro de los criterios para la evaluación del clasificador es la agudeza del corte, la cual mientras más se acerque a la unidad, más eficiente será la clasificación. Según los resultados obtenidos por la agudeza los mejores fueron los correspondientes a las corridas en directo, como se puede observar en la tabla 4.7. Estos resultados se deben a la pequeña inclinación de las curvas a partir de los diámetros de las partículas de 50 μm en adelante como se pueden observar en las figuras I.1, I.2, I.3, I.4 y I.5 del anexo I correspondientes a las corridas N° 1, 2, 3, 4 y 5. A demás, se observa una curva casi horizontal en los diámetros inferiores a las mismas; no obstante, el análisis de la forma obtenida en las curvas en relación con la figura 2.12, se puede constatar que las mismas presentan una



forma de la curva distorsionada. Sin embargo, para las gráficas I.6, I.7 y I.8, la curva es más semejante y la agudeza del corte, ratifica lo comprobado por el tamaño del corte. La mejor clasificación se obtiene con las condiciones de operación mencionadas anterior mente.

Al comparar las gráficas de las curvas de Tromp, correspondientes a las corridas N° 6, 7 y 8 con las diferentes formas que se podrían obtener; se puede observar que éstas tienden a formar una curva en forma de anzuelo en la parte más fina de los productos. Esto indica que posiblemente algunas partículas finas se aglomeraron y fueron rechazadas por el microclasificador, o que éste no las dispersó eficientemente para un rango inferior a 4 μm , al estar trabajando con las condiciones de operación que reportaron los mejores resultados.

Las curvas de Tromp reportadas por las corridas en directo tienen una tendencia a la forma de la curva c' (figura 2.12); indicando el efecto de la trituración del microclasificador.

Tabla 4.8. Rendimientos para los diámetros de 10,48 μm y 65,51 μm del microclasificador.

| Corrida | R _{10,48} % | R _{65,51} % |
|---------|----------------------|----------------------|
| 1 | 96,36 | 88,23 |
| 2 | 96,23 | 85,83 |
| 3 | 91,45 | 84,50 |
| 4 | 96,66 | 83,12 |
| 5 | 92,25 | 84,79 |
| 6 | 87,94 | 63,56 |
| 7 | 81,86 | 52,68 |
| 8 | 78,80 | 50,70 |



Tabla 4.9. Porcentajes de la producción de las fracciones del microclasificador.

| Corrida | Fracción gruesa (Y_c) % | Fracción fina (Y_f) % |
|---------|-----------------------------|---------------------------|
| 1 | 11,64 | 88,36 |
| 2 | 14,29 | 85,71 |
| 3 | 15,64 | 84,36 |
| 4 | 16,91 | 83,09 |
| 5 | 15,21 | 84,79 |
| 6 | 36,55 | 63,45 |
| 7 | 47,32 | 57,68 |
| 8 | 49,30 | 50,70 |

El rendimiento del clasificador no depende en sí de la curva de Tromp si no de la distribución granulométrica y de la cantidad de producto obtenido. Como se puede observar en la tabla 4.8, los rendimientos para un diámetro de partícula de $10,48 \mu\text{m}$ y $65,61 \mu\text{m}$ fueron más altos para las corridas N° 1, 2, 3, 4 y 5 lo cual fue debido a la gran cantidad de producto que se obtuvo (tabla 4.6). Sin embargo, como se mencionó anteriormente esas corridas no presentan las mejores clasificaciones de partículas, mientras que para las corridas N° 6, 7 y 8, que si presentan las mejores clasificaciones, se puede observar que entre ellas la corrida N° 6 representa el rendimiento más alto con un 87,94 % y 63,56 % para los diámetros de partícula de $10,48 \mu\text{m}$ y $65,61 \mu\text{m}$ respectivamente. Estos resultados indican que a medida que el diámetro de las partículas aumenta, el rendimiento disminuye. Además, como se puede observar en la tabla 4.9, cuando se trabajó en directo el porcentaje de la fracción fina es mayor que en reversa; esto se debió a que pasaban muchas más partículas con diámetros superiores al producto fino; es decir, para las corridas en directo el tamaño de corte aumenta y el área superficial de las partículas disminuye.



4.1.6 Condiciones Adecuadas Del Sistema De Clasificación Complementario.

Con base a las condiciones en las cuales se obtuvo el mejor resultado del producto fino de la clasificación y la información recopiladas para obtener dicho producto; las condiciones adecuadas en el sistema complementario de clasificación serían:

Sentido del giro: el sentido de giro del rotor en reversa; es decir, contrario al giro de las agujas del reloj, ya que el mismo proporcionó los mejores resultados en la clasificación de las partículas; debido a que las trayectorias de circulación que se produjeron fueron más efectivas en la retención de partículas gruesas, dejando pasar las más finas.

Caudal de aire total: el caudal de aire total de 15000 m³/h es el más conveniente, siendo éste actualmente la máxima capacidad del sistema, favorece una velocidad de circulación mayor, produciéndose una mejor dispersión de la mezcla aire-polvo y una mayor fuerza de atracción de las partículas; contrarrestándose el arrastre de partículas gruesas con una alta velocidad del rotor.

Concentración de alimentación: ya que concentraciones muy altas favorecen una mala dispersión de las partículas en el aire afectando la finura del corte y el rendimiento de la operación, la concentración de 157,13 g polvo/m³ aire es la más conveniente; obteniéndose por la misma buenos resultados en el área superficial de las partículas del producto del ciclón para la corrida 8.

Velocidad del rotor: las altas velocidades del rotor mejoran la clasificación de las partículas. Con una velocidad de 549 rpm se obtuvo para la curva de Tromp un diámetro de corte de 11,82 µm en el producto fino. Sin embargo, si se aumenta más su velocidad se podría obtener uno menor.



Estas condiciones no son fijas, pudieran ser cambiadas para mejorar el proceso de clasificación y además aumentar la producción. Dependen de las condiciones del material alimentado y de la finura del producto que se buscaría. La cantidad del producto que se produce por hora pudiera influir en su rentabilidad.



4.2 Conclusiones.

1. La velocidad del rotor es inversamente proporcional al tamaño del corte.
2. El sentido del giro del rotor en reversa mejoró la clasificación de las partículas aumentando el área superficial de las mismas para el producto del ciclón y disminuyendo éstas para el producto del rechazo del clasificador en comparación con el directo.
3. A concentraciones de alimentación menores que 211,33 g polvo/m³ aire, la clasificación fue menos eficiente con respecto al diámetro del D_{50%} de las partículas obtenidas en el producto del ciclón.
4. La curva de selección de Tromp demostró que el clasificador trabajó mejor con el sentido del giro en reversa, la concentración 157,13 g polvo/m³ aire y con una velocidad de 549 rpm.
5. El clasificador no realiza una buena dispersión de las partículas para un rango de tamaño inferior a 4 µm, bajo las condiciones de operación que mejores resultados arrojaron. Con las condiciones de operación más satisfactorias se logró incrementar el área superficial de las partículas de 0,4971 m²/g en la alimentación a 0,6466 m²/g en el producto del ciclón.
6. El porcentaje de la producción de la fracción fina es inversamente proporcional al área superficial del producto.



4.3 Recomendaciones

1. Realizar una evaluación en el ciclón a fin de aumentar la eficiencia de la recolección, ya que ésto permitiría que un gran número de partículas no pasen al filtro de manga.

2. Se recomienda cambiar el sistema de llenado de la alimentación, pasando el material directamente al mismo; ya que durante este estudio, el material de la alimentación se almacenó en sacos de 1000 kg un tiempo determinado, para luego vaciarlos en la tolva de almacenamiento, pudiendo provocar aglomeraciones en las partículas.

3. Realizar un estudio con un material de alimentación más fino al utilizado en este estudio, aumentando la velocidad del rotor a su máximo, el sentido de giro en reversa y una concentración de $157,13 \text{ g polvo/m}^3 \text{ aire}$, para observar su efecto en la clasificación. El producto del rechazo no será tan grueso, la finura del producto del ciclón y la producción del mismo determinará si es rentable.

BIBLIOGRAFÍA CITA

[1] Ortiz A., “Implementación de un programa de evaluación al sistema de molienda de cemento en la planta de pertigalete II”, Trabajo de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz (1990).

[2] Xavier E., “**Optimización de procesos cerámicos industriales**” Monografía, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín (2001).

[3] Austin, G., “**Manual de proceso químicos en la industria**”, Primera edición en español, tomo I. Editorial McGraw-Hill, México (1988).

[4] González, A., “**Rocas y minerales**” [en línea], disponible, [http: // www.BFI Optilas](http://www.BFI Optilas) (2005).

[5] McCabe, W; Smith, J y Harriott P., “**Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**”, Cuarta edición, Editorial interamericana de España S.A.U, (1991).

[6] Allen T., “**Particle size measurement**”, Primera edición, Editorial Barnes & Noble, Inc U.S.A. (1968).

[7] Pueblas J., “**Malvern**”, [en línea], disponible, [http: // www.BFI Optilas](http://www.BFI Optilas) (2005).

[8] Foust A., “**Principios de Operaciones Unitarias**”, Segunda edición, Editorial continental, México (1989).

[9] Sommer K., “**Sampling of powders and bulk materials**”, Editorial Berlin Heidelberg, New York Tokyo, U.S.A. (1986).

[10] AIChE American Institute of Chemical Engineers. “**Particle Size Classifier Procedure**”, Segunda Edición, New York (1993).

[11] “**Laser diffraction particle size analysers**”, [en línea], disponible, <http://www.Malvern.co.uk> (2005).

[12] Perry R., “**Manual del Ingeniero Químico**”. Sexta edición, tomo II. Editorial McGraw-Hill, México (1992).

[13] PDVSA, “Manual de diseño de proceso: flujo de fluidos, flujo en fase líquida”, INTEVEP, Caracas (1986).

[14] Klumpar, I; Currier, F y Ring T., “**Air classifiers**”, Chemical Engineering, volume 93, N° 5, marzo, (1986).

[15] “**Introduction to air classification**”, [en línea], disponible, <http://www..co.uk> (2003).

[16] Paule S., “**Ciclones**”, [en línea], disponible, <http://www.solerpalau.com> (2005).

[17] S.A de Molinos PTM, “Manual del microclasificador PTM 1500”, Barcelona, (1978).



[18] Fisher K, **“Clasificiers”**, [en línea], disponible, [http:// www.fkinc.com](http://www.fkinc.com) (2003).

[19] Emisor, **“Filtros de manga”**, [http:// emison.com](http://emison.com) (2004).

[20] Geankoplis C., **“Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias”**, Tercera edición, Editorial continental, S.A. de México (1998).

ANEXOS

Anexo A.

Gráfica de los volúmenes de aire del ventilador.

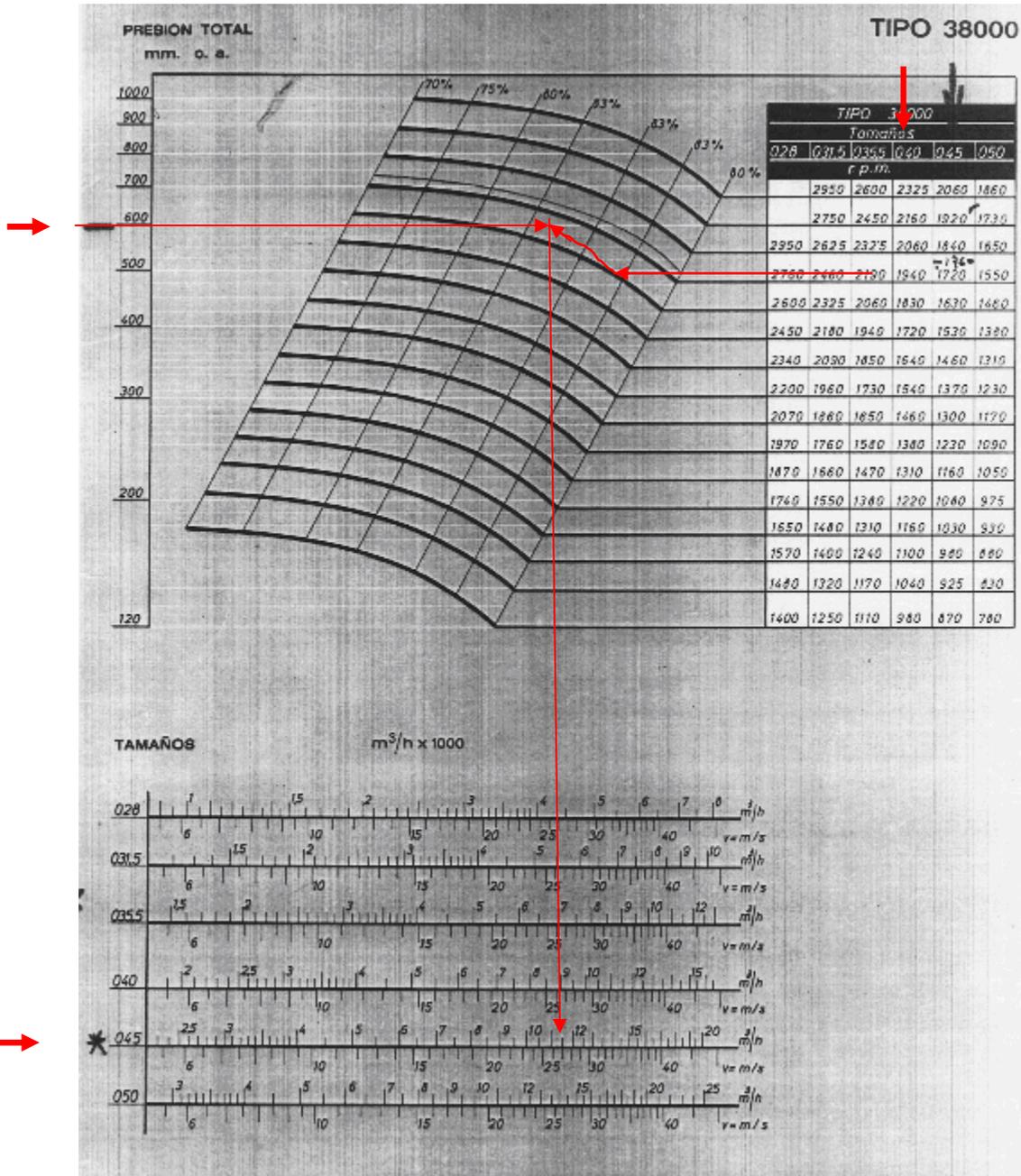
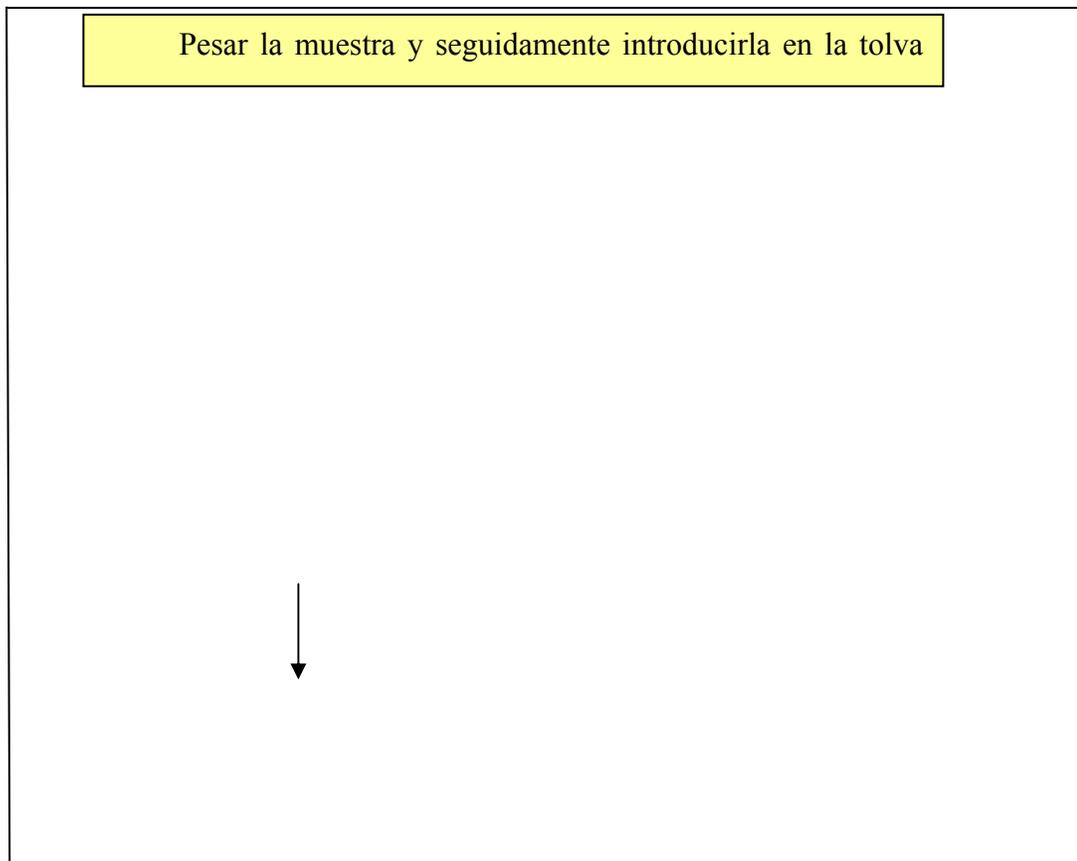


Figura A.1. Gráfica para determinar el volumen de aire del ventilador.

Anexo B.

Diagrama del procedimiento experimental.



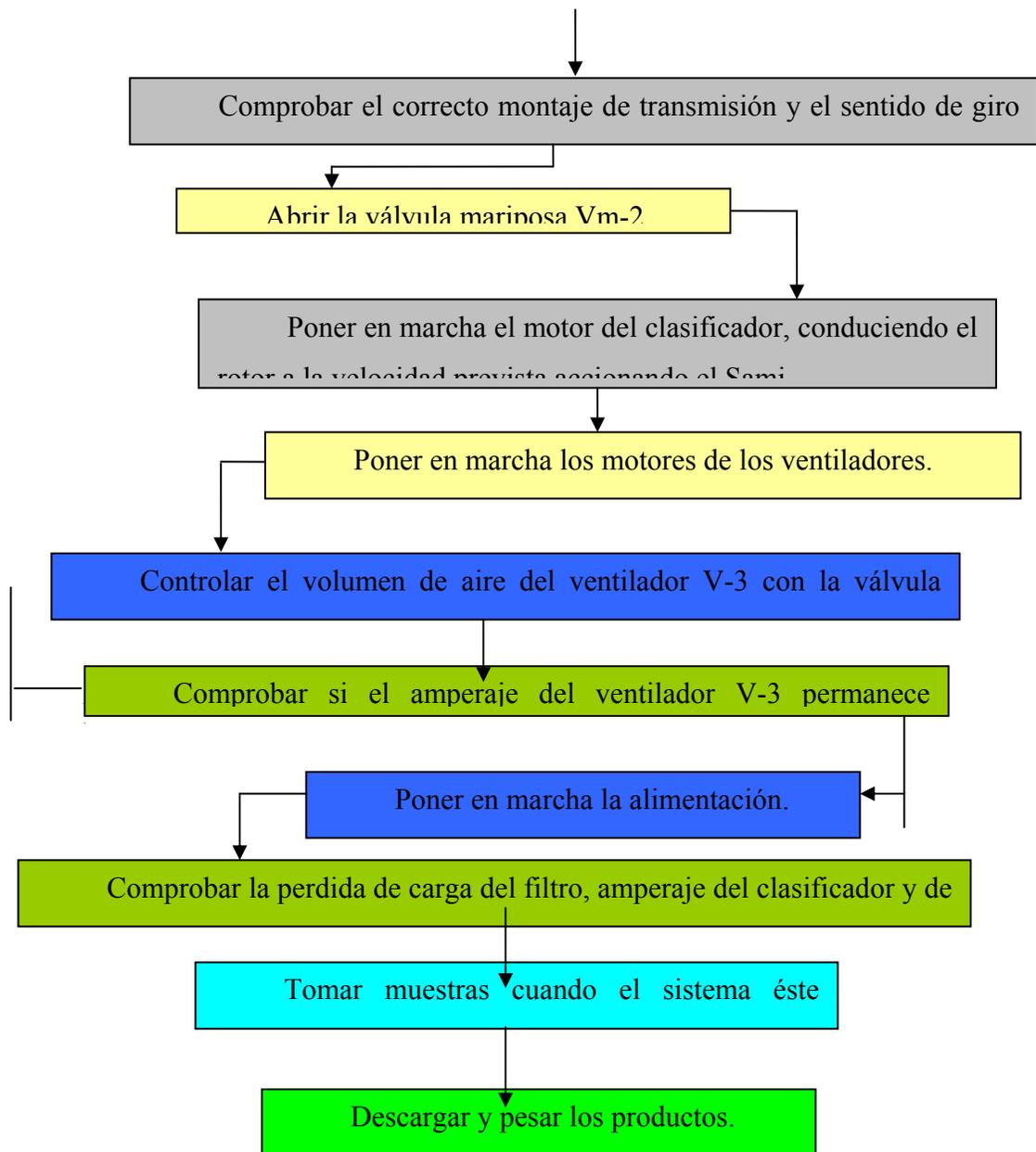


Figura B.1. Diagrama del procedimiento experimental.

Anexo C.

Resultado de los promedios de los análisis granulométricos reportados por el Malvern.

Tabla C.1. Análisis granulométrico del material alimentado.

| Diámetro de la partícula | Corrida | | | | | | | |
|-----------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| | Porcentaje de partículas menor que el diámetro D, alimentación (ϕ_a) | | | | | | | |
| 0,36 | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,29 | 0,34 | 0,31 | 0,33 | |
| 0,42 | 0,93 | 0,85 | 0,90 | 0,81 | 0,95 | 0,88 | 0,93 | |
| 0,49 | 1,72 | 1,57 | 1,66 | 1,49 | 1,74 | 1,62 | 1,7 | |
| 0,58 | 2,57 | 2,34 | 2,48 | 2,23 | 2,6 | 2,41 | 2,55 | |
| 0,67 | 3,39 | 3,09 | 3,27 | 2,94 | 3,42 | 3,17 | 3,37 | |
| 0,78 | 4,11 | 3,76 | 3,96 | 3,55 | 4,14 | 3,84 | 4,10 | |
| 0,91 | 4,74 | 4,35 | 4,56 | 4,06 | 4,77 | 4,41 | 4,74 | |
| 1,06 | 5,35 | 4,96 | 5,15 | 4,53 | 5,4 | 4,97 | 5,37 | |
| 1,24 | 6,07 | 5,70 | 5,84 | 5,06 | 6,17 | 5,63 | 6,12 | |
| 1,44 | 7,06 | 6,73 | 6,80 | 5,76 | 7,25 | 6,52 | 7,15 | |
| 1,68 | 8,42 | 8,17 | 8,12 | 6,71 | 8,73 | 7,73 | 8,55 | |
| 1,95 | 10,14 | 9,91 | 9,81 | 7,91 | 10,58 | 9,96 | 10,3 | |
| 2,28 | 12,12 | 11,92 | 11,76 | 9,28 | 12,68 | 10,99 | 12,28 | |
| 2,65 | 14,23 | 14,04 | 13,86 | 10,77 | 14,9 | 12,83 | 14,36 | |
| 3,09 | 16,47 | 16,24 | 16,11 | 12,42 | 17,23 | 14,85 | 16,55 | |
| 3,60 | 18,89 | 18,54 | 18,55 | 14,34 | 19,75 | 17,17 | 18,9 | |
| 4,19 | 21,54 | 20,95 | 21,20 | 16,67 | 22,51 | 19,89 | 21,47 | |
| 4,88 | 24,49 | 23,52 | 24,09 | 19,63 | 25,6 | 23,12 | 24,33 | |
| 5,69 | 27,86 | 26,30 | 27,30 | 23,08 | 29,12 | 26,96 | 27,59 | |
| 6,63 | 31,75 | 29,36 | 30,89 | 27,42 | 33,18 | 31,51 | 31,35 | |
| 7,72 | 36,30 | 32,81 | 34,94 | 32,64 | 37,85 | 36,82 | 35,70 | |
| 9,00 | 41,60 | 41,28 | 39,54 | 38,77 | 43,21 | 42,88 | 40,73 | |
| 10,48 | 47,70 | 46,48 | 44,75 | 45,73 | 49,27 | 49,64 | 46,44 | |
| 12,21 | 54,52 | 52,36 | 50,58 | 53,34 | 55,96 | 56,93 | 52,81 | |
| 14,22 | 61,88 | 58,85 | 56,96 | 61,32 | 63,1 | 64,5 | 59,69 | |
| 16,57 | 69,45 | 65,75 | 63,72 | 69,25 | 70,37 | 72,02 | 66,84 | |
| 19,31 | 76,80 | 72,76 | 70,59 | 76,71 | 77,4 | 79,08 | 73,93 | |
| 22,49 | 83,50 | 79,53 | 77,26 | 83,31 | 83,78 | 85,32 | 80,58 | |
| 26,20 | 89,20 | 85,66 | 83,37 | 88,78 | 89,17 | 90,48 | 86,46 | |

| | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| 30,53 | 93,64 | 90,83 | 88,64 | 93,00 | 93,39 | 94,42 | 91,32 | |
| 35,56 | 96,78 | 94,81 | 92,87 | 96,03 | 96,42 | 97,16 | 95,01 | |
| 41,43 | 98,70 | 97,55 | 95,99 | 98,02 | 98,35 | 98,85 | 97,55 | |
| 48,27 | 99,66 | 99,16 | 98,06 | 99,18 | 99,42 | 99,71 | 99,06 | |
| 56,23 | 100,00 | 99,87 | 99,27 | 99,76 | 99,89 | 100,00 | 99,79 | |
| 65,51 | 100,00 | 100,00 | 99,83 | 99,97 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 76,32 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 88,91 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |

Tabla C.2. Análisis granulométricos de los productos gruesos del microclasificador.

| Diámetro | Corrida | | | | | | | |
|----------|---------|---|---|---|---|---|---|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 0, | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0, |
| 0, | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0, |
| 0, | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1, |
| 0, | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1, |
| 0, | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2, |
| 0, | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2, |
| 0, | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2, |
| 1, | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3, |
| 1, | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3, |
| 1, | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 3 | 3 | 4, |
| 1, | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 4 | 4 | 4, |
| 1, | 7 | 7 | 7 | 8 | 9 | 5 | 5 | 5, |
| 2, | 8 | 8 | 9 | 1 | 1 | 6 | 6 | 6, |
| 2, | 9 | 9 | 1 | 1 | 1 | 7 | 7 | 7, |
| 3, | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 8 | 7 | 8, |
| 3, | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 9 | 8 | 8, |
| 4, | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 8 | 9, |
| 4, | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 9 | 9, |
| 5, | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 9, |
| 6, | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 10 |
| 7, | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 12 |
| 9, | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 14 |
| 10 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 2 | 1 | 19 |
| 12 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 | 2 | 2 | 25 |
| 14 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 33 |
| 16 | 6 | 4 | 5 | 6 | 6 | 4 | 4 | 43 |
| 19 | 6 | 5 | 6 | 7 | 7 | 5 | 5 | 54 |
| 22 | 7 | 6 | 7 | 7 | 8 | 6 | 6 | 65 |
| 26 | 8 | 7 | 7 | 8 | 8 | 7 | 7 | 76 |
| 30 | 8 | 7 | 8 | 8 | 9 | 8 | 8 | 84 |

| | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 35 | 9 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 91 |
| 41 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 95 |
| 48 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 98 |
| 56 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 99 |
| 65 | 1 | 9 | 9 | 9 | 1 | 1 | 9 | 10 |
| 76 | 1 | 9 | 9 | 9 | 1 | 1 | 1 | 10 |
| 88 | 1 | 9 | 9 | 9 | 1 | 1 | 1 | 10 |

Tabla C.3. Análisis granulométricos de los productos del ciclón.

| Diámetro de la partícula | Corrida | | | | | | | |
|-----------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | Porcentaje de partículas menor que el diámetro D, Ciclón (ϕ_i) | | | | | | | |
| 0,36 | 0,32 | 0,29 | 0,30 | 0,33 | 0,32 | 0,40 | 0,41 | 0,42 |
| 0,42 | 0,89 | 0,82 | 0,80 | 0,94 | 0,91 | 1,14 | 1,16 | 1,17 |
| 0,49 | 1,64 | 1,51 | 1,54 | 1,73 | 1,68 | 2,09 | 2,14 | 2,15 |
| 0,58 | 2,44 | 2,26 | 2,29 | 2,59 | 2,51 | 3,13 | 3,22 | 3,23 |
| 0,67 | 3,21 | 2,96 | 3,01 | 3,41 | 3,32 | 4,12 | 4,27 | 4,28 |
| 0,78 | 3,89 | 3,58 | 3,63 | 4,15 | 4,03 | 5,00 | 5,21 | 5,22 |
| 0,91 | 4,48 | 4,10 | 4,17 | 4,79 | 4,64 | 5,77 | 6,06 | 6,07 |
| 1,06 | 5,07 | 4,60 | 4,70 | 5,44 | 5,25 | 6,39 | 6,89 | 6,90 |
| 1,24 | 5,79 | 5,19 | 5,34 | 6,21 | 5,96 | 7,12 | 7,87 | 7,88 |
| 1,44 | 6,78 | 6,00 | 6,25 | 7,27 | 6,95 | 8,15 | 9,17 | 9,18 |
| 1,68 | 8,12 | 7,12 | 7,49 | 8,71 | 8,29 | 9,63 | 10,94 | 10,95 |
| 1,95 | 9,80 | 8,55 | 9,07 | 10,53 | 9,98 | 11,58 | 13,19 | 13,20 |
| 2,28 | 11,68 | 10,18 | 10,86 | 12,56 | 11,93 | 13,86 | 15,80 | 15,81 |
| 2,65 | 13,61 | 11,90 | 12,72 | 14,66 | 14,00 | 16,32 | 18,68 | 18,69 |
| 3,09 | 15,62 | 13,76 | 14,67 | 16,84 | 16,21 | 19,07 | 21,93 | 21,94 |
| 3,60 | 17,81 | 15,81 | 16,78 | 19,18 | 18,59 | 22,30 | 25,69 | 25,70 |
| 4,19 | 20,27 | 18,11 | 19,12 | 21,74 | 21,23 | 26,12 | 30,07 | 30,08 |
| 4,88 | 23,08 | 20,69 | 21,74 | 24,62 | 24,19 | 30,63 | 35,11 | 35,12 |
| 5,69 | 26,40 | 23,64 | 24,78 | 27,96 | 27,63 | 35,96 | 40,85 | 40,86 |
| 6,63 | 30,35 | 27,00 | 28,34 | 31,88 | 31,67 | 42,12 | 47,24 | 47,25 |
| 7,72 | 35,05 | 30,86 | 32,54 | 36,50 | 36,45 | 49,06 | 54,14 | 54,15 |
| 9,00 | 40,07 | 35,30 | 37,48 | 41,90 | 42,09 | 56,59 | 61,34 | 61,35 |
| 10,48 | 46,92 | 40,37 | 43,21 | 48,08 | 48,58 | 64,42 | 68,58 | 68,59 |
| 12,21 | 53,99 | 46,13 | 49,71 | 54,95 | 55,81 | 72,18 | 75,57 | 75,58 |
| 14,22 | 61,55 | 52,55 | 56,83 | 62,31 | 63,54 | 79,42 | 82,00 | 82,01 |
| 16,57 | 69,24 | 59,51 | 64,32 | 69,83 | 71,35 | 85,73 | 87,59 | 87,60 |
| 19,31 | 76,64 | 66,79 | 71,82 | 77,12 | 78,77 | 90,84 | 92,13 | 92,14 |
| 22,49 | 83,31 | 74,07 | 78,92 | 83,76 | 85,36 | 94,64 | 95,55 | 95,56 |
| 26,20 | 88,90 | 80,98 | 85,24 | 89,39 | 90,76 | 97,2 | 97,87 | 97,88 |
| 30,53 | 93,23 | 87,15 | 90,48 | 93,78 | 94,82 | 98,76 | 99,24 | 99,25 |

| | | | | | | | | |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| 35,56 | 96,27 | 92,25 | 94,48 | 96,88 | 97,55 | 99,58 | 99,87 | |
| 41,43 | 98,17 | 96,05 | 97,25 | 98,79 | 99,14 | 99,92 | 100,00 | |
| 48,27 | 99,20 | 98,49 | 98,92 | 99,73 | 99,84 | 100,00 | 100,00 | |
| 56,23 | 99,66 | 99,72 | 99,74 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 65,51 | 99,83 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 76,32 | 99,90 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 88,91 | 99,97 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |

Tabla C.4. Análisis granulométricos de los productos del filtro de mangas.

| Diámetro de la partícula (D) μm | Corrida | | | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| | Porcentaje de partículas menor que el diámetro D, filtro de manga (ϕ_i) | | | | | | | |
| 0,36 | 0,51 | 0,54 | 0,53 | 0,6 | 0,63 | 0,61 | 0,54 | |
| 0,42 | 1,45 | 1,52 | 1,49 | 1,69 | 1,76 | 1,72 | 1,52 | |
| 0,49 | 2,66 | 2,79 | 2,73 | 3,08 | 3,20 | 3,16 | 2,78 | |
| 0,58 | 3,97 | 4,17 | 4,06 | 4,56 | 4,74 | 4,73 | 4,14 | |
| 0,67 | 5,22 | 5,48 | 5,33 | 5,97 | 6,23 | 6,26 | 5,44 | |
| 0,78 | 6,3 | 6,63 | 6,45 | 7,22 | 7,56 | 7,66 | 6,60 | |
| 0,91 | 7,22 | 7,64 | 7,49 | 8,35 | 8,57 | 8,98 | 7,64 | |
| 1,06 | 8,09 | 8,66 | 8,63 | 9,57 | 9,68 | 10,38 | 8,74 | |
| 1,24 | 9,15 | 9,96 | 10,17 | 11,19 | 11,08 | 12,18 | 10,20 | |
| 1,44 | 10,67 | 11,84 | 12,45 | 13,57 | 13,08 | 14,72 | 12,34 | |
| 1,68 | 12,88 | 14,53 | 15,69 | 16,99 | 15,93 | 18,30 | 15,39 | |
| 1,95 | 15,86 | 18,12 | 19,88 | 21,53 | 19,73 | 23,02 | 19,41 | |
| 2,28 | 19,58 | 22,47 | 24,80 | 26,79 | 24,32 | 28,56 | 24,22 | |
| 2,65 | 23,95 | 27,45 | 30,17 | 32,31 | 29,49 | 34,54 | 29,63 | |
| 3,09 | 29,03 | 33,04 | 35,92 | 38,11 | 35,23 | 40,91 | 35,58 | |
| 3,60 | 34,88 | 39,24 | 42,03 | 44,28 | 41,56 | 47,71 | 42,07 | |
| 4,19 | 41,44 | 45,95 | 48,41 | 50,67 | 48,35 | 54,69 | 48,98 | |
| 4,88 | 48,55 | 52,99 | 54,95 | 57,11 | 55,39 | 61,62 | 56,15 | |
| 5,69 | 55,99 | 60,16 | 61,52 | 63,53 | 62,51 | 68,34 | 63,40 | |
| 6,63 | 63,46 | 67,19 | 67,95 | 69,77 | 69,42 | 74,61 | 70,48 | |
| 7,72 | 70,65 | 73,84 | 74,08 | 75,68 | 75,88 | 80,27 | 77,15 | |
| 9,00 | 77,27 | 79,89 | 79,72 | 81,11 | 81,69 | 85,19 | 83,16 | |
| 10,48 | 83,11 | 85,19 | 84,76 | 85,93 | 86,71 | 89,34 | 88,32 | |
| 12,21 | 88,04 | 89,65 | 89,07 | 90,06 | 90,89 | 92,71 | 92,51 | |
| 14,22 | 92,00 | 93,21 | 92,62 | 93,44 | 94,21 | 95,38 | 98,68 | |
| 16,57 | 95,03 | 95,87 | 95,39 | 96,05 | 96,69 | 97,38 | 97,88 | |
| 19,31 | 97,20 | 97,70 | 97,41 | 97,94 | 98,39 | 98,78 | 99,21 | |
| 22,49 | 98,63 | 98,83 | 98,76 | 99,14 | 99,4 | 99,62 | 99,84 | |

| | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| 26,20 | 99,47 | 99,46 | 99,56 | 99,77 | 99,98 | 99,99 | 100,00 | |
| 30,53 | 99,88 | 99,79 | 99,93 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 35,56 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 41,43 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 48,27 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 56,23 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 65,51 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 76,32 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |
| 88,91 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | |

Anexo D.

Tablas de las distribuciones granulométricas y caudales para calcular la distribución del producto fino.

Tabla D.1. Distribuciones granulométricas y caudal de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y del fino a la salida del microclasificador para la corrida 1.

| de | N° de la partícula | Distribuciones granulométricas de la corrida 1. | | | | |
|----|-----------------------|---|--------|--------|-------|-------|
| | | Alimentación | Ciclón | Filtro | Fino | |
| | 0 | 0,36 | 0,33 | 0,32 | 0,51 | 0,35 |
| | 1 | 0,42 | 0,93 | 0,89 | 1,45 | 0,97 |
| | 2 | 0,49 | 1,72 | 1,64 | 2,66 | 1,78 |
| | 3 | 0,58 | 2,57 | 2,44 | 3,97 | 2,66 |
| | 4 | 0,67 | 3,39 | 3,21 | 5,22 | 3,49 |
| | 5 | 0,78 | 4,11 | 3,89 | 6,30 | 4,23 |
| | 6 | 0,91 | 4,74 | 4,48 | 7,22 | 4,87 |
| | 7 | 1,06 | 5,35 | 5,07 | 8,09 | 5,50 |
| | 8 | 1,24 | 6,07 | 5,79 | 9,15 | 6,26 |
| | 9 | 1,44 | 7,06 | 6,78 | 10,67 | 7,33 |
| | 10 | 1,68 | 8,42 | 8,12 | 12,88 | 8,79 |
| | 11 | 1,95 | 10,14 | 9,8 | 15,86 | 10,65 |
| | 12 | 2,28 | 12,12 | 11,68 | 19,58 | 12,79 |
| | 13 | 2,65 | 14,23 | 13,61 | 23,95 | 15,07 |
| | 14 | 3,09 | 16,47 | 15,62 | 29,03 | 17,51 |
| | 15 | 3,60 | 18,89 | 17,81 | 34,88 | 20,22 |
| | 16 | 4,19 | 21,54 | 20,27 | 41,44 | 23,25 |
| | 17 | 4,88 | 24,49 | 23,08 | 48,55 | 26,67 |
| | 18 | 5,69 | 27,86 | 26,40 | 55,99 | 30,57 |
| | 19 | 6,63 | 31,75 | 30,35 | 63,46 | 35,02 |

| | | | | | |
|----|-------|--------|-------|--------|-------|
| 20 | 7,72 | 36,30 | 35,05 | 70,65 | 40,07 |
| 21 | 9,00 | 41,60 | 40,07 | 77,27 | 45,31 |
| 22 | 10,48 | 47,70 | 46,92 | 83,11 | 52,02 |
| 23 | 12,21 | 54,52 | 53,99 | 88,04 | 58,79 |
| 24 | 14,22 | 61,88 | 61,55 | 92,00 | 65,84 |
| 25 | 16,57 | 69,45 | 69,24 | 95,03 | 72,87 |
| 26 | 19,31 | 76,80 | 76,64 | 97,20 | 79,54 |
| 27 | 22,49 | 83,50 | 83,31 | 98,63 | 85,47 |
| 28 | 26,20 | 89,20 | 88,90 | 99,47 | 90,39 |
| 29 | 30,53 | 93,64 | 93,23 | 99,88 | 94,17 |
| 30 | 35,56 | 96,78 | 96,27 | 100,00 | 96,80 |
| 31 | 41,43 | 98,70 | 98,17 | 100,00 | 98,43 |
| 32 | 48,27 | 99,66 | 99,20 | 100,00 | 99,31 |
| 33 | 56,23 | 100,00 | 99,66 | 100,00 | 99,71 |
| 34 | 65,51 | 100,00 | 99,83 | 100,00 | 99,85 |
| 35 | 76,32 | 100,00 | 99,90 | 100,00 | 99,91 |
| 36 | 88,91 | 100,00 | 99,97 | 100,00 | 99,97 |

Tabla D.2. Distribuciones granulométricas y caudal de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y del fino a la salida del microclasificador para la corrida 2.

| de | N° de la partícula | Distribuciones granulométricas de la corrida 2 | | | |
|----|-----------------------|--|--------|--------|-------|
| | | Alimentación | Ciclón | Filtro | Fino |
| | 0 | 0,33 | 0,29 | 0,54 | 0,32 |
| | 1 | 0,85 | 0,82 | 1,52 | 0,91 |
| | 2 | 1,57 | 1,51 | 2,79 | 1,68 |
| | 3 | 2,34 | 2,26 | 4,17 | 2,51 |
| | 4 | 3,09 | 2,96 | 5,48 | 3,30 |
| | 5 | 3,76 | 3,58 | 6,63 | 3,99 |
| | 6 | 4,35 | 4,10 | 7,64 | 4,57 |
| | 7 | 4,96 | 4,60 | 8,66 | 5,14 |
| | 8 | 5,70 | 5,19 | 9,96 | 5,83 |
| | 9 | 6,73 | 6,00 | 11,84 | 6,78 |
| | 10 | 8,17 | 7,12 | 14,53 | 8,11 |
| | 11 | 9,91 | 8,55 | 18,12 | 9,83 |
| | 12 | 11,92 | 10,18 | 22,47 | 11,82 |
| | 13 | 14,04 | 11,90 | 27,45 | 13,97 |
| | 14 | 16,24 | 13,76 | 33,04 | 16,33 |
| | 15 | 18,54 | 15,81 | 39,24 | 18,93 |
| | 16 | 20,95 | 18,11 | 45,95 | 21,82 |
| | 17 | 23,52 | 20,69 | 52,99 | 25,00 |
| | 18 | 26,30 | 23,64 | 60,16 | 28,51 |
| | 19 | 29,36 | 27,00 | 67,19 | 32,36 |
| | 20 | 32,81 | 30,86 | 73,84 | 36,59 |

| | | | | | |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|
| 21 | 9,00 | 41,28 | 35,30 | 79,89 | 41,25 |
| 22 | 10,48 | 46,48 | 40,37 | 85,19 | 46,35 |
| 23 | 12,21 | 52,36 | 46,13 | 89,65 | 51,93 |
| 24 | 14,22 | 58,85 | 52,55 | 93,21 | 57,97 |
| 25 | 16,57 | 65,75 | 59,51 | 95,87 | 64,36 |
| 26 | 19,31 | 72,76 | 66,79 | 97,70 | 70,91 |
| 27 | 22,49 | 79,53 | 74,07 | 98,83 | 77,37 |
| 28 | 26,20 | 85,66 | 80,98 | 99,46 | 83,44 |
| 29 | 30,53 | 90,83 | 87,15 | 99,79 | 88,84 |
| 30 | 35,56 | 94,81 | 92,25 | 100,00 | 93,28 |
| 31 | 41,43 | 97,55 | 96,05 | 100,00 | 96,58 |
| 32 | 48,27 | 99,16 | 98,49 | 100,00 | 98,69 |
| 33 | 56,23 | 99,87 | 99,72 | 100,00 | 99,76 |
| 34 | 65,51 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 35 | 76,32 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 36 | 88,91 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Tabla D.3. Distribuciones granulométricas y caudal de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y del fino a la salida del microclasificador para la corrida 3.

| N de interval o n | Día metros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 3 | | | |
|----------------------------|---|--|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % <D | Filtro ϕ_l % < D | Fi no ϕ_f % <D |
| 0 | 0,36 | 0,32 | 0,30 | 0,53 | 0, |
| 1 | 0,42 | 0,90 | 0,80 | 1,49 | 0, |
| 2 | 0,49 | 1,66 | 1,54 | 2,73 | 1, |
| 3 | 0,58 | 2,48 | 2,29 | 4,06 | 2, |
| 4 | 0,67 | 3,27 | 3,01 | 5,33 | 3, |
| 5 | 0,78 | 3,96 | 3,63 | 6,45 | 3, |
| 6 | 0,91 | 4,56 | 4,17 | 7,49 | 4, |
| 7 | 1,06 | 5,15 | 4,70 | 8,63 | 5, |
| 8 | 1,24 | 5,84 | 5,34 | 10,17 | 5, |
| 9 | 1,44 | 6,80 | 6,25 | 12,45 | 7, |
| 1 | 1,68 | 8,12 | 7,49 | 15,69 | 8, |
| 1 | 1,95 | 9,81 | 9,07 | 19,88 | 1 |
| 1 | 2,28 | 11,76 | 10,86 | 24,80 | 1 |
| 1 | 2,65 | 13,86 | 12,72 | 30,17 | 1 |
| 1 | 3,09 | 16,11 | 14,67 | 35,92 | 1 |

| | | | | | |
|---|------|--------|--------|--------|---|
| 1 | 3,60 | 18,55 | 16,78 | 42,03 | 2 |
| 1 | 4,19 | 21,20 | 19,12 | 48,41 | 2 |
| 1 | 4,88 | 24,09 | 21,74 | 54,95 | 2 |
| 1 | 5,69 | 27,30 | 24,78 | 61,52 | 2 |
| 1 | 6,63 | 30,89 | 28,34 | 67,95 | 3 |
| 2 | 7,72 | 34,94 | 32,54 | 74,08 | 3 |
| 2 | 9,00 | 39,54 | 37,48 | 79,72 | 4 |
| 2 | 10,4 | 44,75 | 43,21 | 84,76 | 4 |
| 2 | 12,2 | 50,58 | 49,71 | 89,07 | 5 |
| 2 | 14,2 | 56,96 | 56,83 | 92,62 | 6 |
| 2 | 16,5 | 63,72 | 64,32 | 95,39 | 6 |
| 2 | 19,3 | 70,59 | 71,82 | 97,41 | 7 |
| 2 | 22,4 | 77,26 | 78,92 | 98,76 | 8 |
| 2 | 26,2 | 83,37 | 85,24 | 99,56 | 8 |
| 2 | 30,5 | 88,64 | 90,48 | 99,93 | 9 |
| 3 | 35,5 | 92,87 | 94,48 | 100,00 | 9 |
| 3 | 41,4 | 95,99 | 97,25 | 100,00 | 9 |
| 3 | 48,2 | 98,06 | 98,92 | 100,00 | 9 |
| 3 | 56,2 | 99,27 | 99,74 | 100,00 | 9 |
| 3 | 65,5 | 99,83 | 100,00 | 100,00 | 1 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1 |

Tabla D.4. Distribuciones granulométricas y caudal de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y del fino a la salida del microclasificador para la corrida 4.

| N o de interval o n | Día metros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 4 | | | |
|------------------------------|---|--|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | Fin o ϕ_f % < D |
| 0 | 0,36 | 0,29 | 0,33 | 0,60 | 0,3 |
| 1 | 0,42 | 0,81 | 0,94 | 1,69 | 1,0 |
| 2 | 0,49 | 1,49 | 1,73 | 3,08 | 1,9 |
| 3 | 0,58 | 2,23 | 2,59 | 4,56 | 2,8 |
| 4 | 0,67 | 2,94 | 3,41 | 5,97 | 3,7 |
| 5 | 0,78 | 3,55 | 4,15 | 7,22 | 4,5 |
| 6 | 0,91 | 4,06 | 4,79 | 8,35 | 5,2 |
| 7 | 1,06 | 4,53 | 5,44 | 9,57 | 6,0 |
| 8 | 1,24 | 5,06 | 6,21 | 11,19 | 6,8 |
| 9 | 1,44 | 5,76 | 7,27 | 13,57 | 8,1 |
| 1 | 1,68 | 6,71 | 8,71 | 16,99 | 9,8 |

| | | | | | |
|---|------|--------|--------|--------|-----|
| 1 | 1,95 | 7,91 | 10,53 | 21,53 | 12, |
| 1 | 2,28 | 9,28 | 12,56 | 26,79 | 14, |
| 1 | 2,65 | 10,77 | 14,66 | 32,31 | 17, |
| 1 | 3,09 | 12,42 | 16,84 | 38,11 | 19, |
| 1 | 3,60 | 14,34 | 19,18 | 44,28 | 22, |
| 1 | 4,19 | 16,67 | 21,74 | 50,67 | 25, |
| 1 | 4,88 | 19,63 | 24,62 | 57,11 | 29, |
| 1 | 5,69 | 23,08 | 27,96 | 63,53 | 32, |
| 1 | 6,63 | 27,42 | 31,88 | 69,77 | 37, |
| 2 | 7,72 | 32,64 | 36,50 | 75,68 | 41, |
| 2 | 9,00 | 38,77 | 41,90 | 81,11 | 47, |
| 2 | 10,4 | 45,73 | 48,08 | 85,93 | 53, |
| 2 | 12,2 | 53,34 | 54,95 | 90,06 | 59, |
| 2 | 14,2 | 61,32 | 62,31 | 93,44 | 66, |
| 2 | 16,5 | 69,25 | 69,83 | 96,05 | 73, |
| 2 | 19,3 | 76,71 | 77,12 | 97,94 | 79, |
| 2 | 22,4 | 83,31 | 83,76 | 99,14 | 85, |
| 2 | 26,2 | 88,78 | 89,39 | 99,77 | 90, |
| 2 | 30,5 | 93,00 | 93,78 | 100,00 | 94, |
| 3 | 35,5 | 96,03 | 96,88 | 100,00 | 97, |
| 3 | 41,4 | 98,02 | 98,79 | 100,00 | 98, |
| 3 | 48,2 | 99,18 | 99,73 | 100,00 | 99, |
| 3 | 56,2 | 99,76 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 65,5 | 99,97 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |

Tabla D.5. Distribuciones granulométricas y caudal de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y del fino a la salida del microclasificador para la corrida 5.

| N de interval o n | Día metros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 5 | | | |
|----------------------------|---|--|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % <D | Filtro ϕ_l % < D | Fi no ϕ_f % <D |
| 0 | 0,36 | 0,34 | 0,32 | 0,63 | 0, |
| 1 | 0,42 | 0,95 | 0,91 | 1,76 | 1, |
| 2 | 0,49 | 1,74 | 1,68 | 3,2 | 1, |
| 3 | 0,58 | 2,60 | 2,51 | 4,74 | 2, |
| 4 | 0,67 | 3,42 | 3,32 | 6,23 | 3, |
| 5 | 0,78 | 4,14 | 4,03 | 7,56 | 4, |
| 6 | 0,91 | 4,77 | 4,64 | 8,57 | 5, |

| | | | | | |
|---|------|--------|--------|--------|----|
| 7 | 1,06 | 5,40 | 5,25 | 9,68 | 5, |
| 8 | 1,24 | 6,17 | 5,96 | 11,08 | 6, |
| 9 | 1,44 | 7,25 | 6,95 | 13,08 | 7, |
| 1 | 1,68 | 8,73 | 8,29 | 15,93 | 9, |
| 1 | 1,95 | 10,58 | 9,98 | 19,73 | 1 |
| 1 | 2,28 | 12,68 | 11,93 | 24,32 | 1 |
| 1 | 2,65 | 14,90 | 14,00 | 29,49 | 1 |
| 1 | 3,09 | 17,23 | 16,21 | 35,23 | 1 |
| 1 | 3,60 | 19,75 | 18,59 | 41,56 | 2 |
| 1 | 4,19 | 22,51 | 21,23 | 48,35 | 2 |
| 1 | 4,88 | 25,60 | 24,19 | 55,39 | 2 |
| 1 | 5,69 | 29,12 | 27,63 | 62,51 | 3 |
| 1 | 6,63 | 33,18 | 31,67 | 69,42 | 3 |
| 2 | 7,72 | 37,85 | 36,45 | 75,88 | 4 |
| 2 | 9,00 | 43,21 | 42,09 | 81,69 | 4 |
| 2 | 10,4 | 49,27 | 48,58 | 86,71 | 5 |
| 2 | 12,2 | 55,96 | 55,81 | 90,89 | 6 |
| 2 | 14,2 | 63,10 | 63,54 | 94,21 | 6 |
| 2 | 16,5 | 70,37 | 71,35 | 96,69 | 7 |
| 2 | 19,3 | 77,40 | 78,77 | 98,39 | 8 |
| 2 | 22,4 | 83,78 | 85,36 | 99,40 | 8 |
| 2 | 26,2 | 89,17 | 90,76 | 99,98 | 9 |
| 2 | 30,5 | 93,39 | 94,82 | 100,00 | 9 |
| 3 | 35,5 | 96,42 | 97,55 | 100,00 | 9 |
| 3 | 41,4 | 98,35 | 99,14 | 100,00 | 9 |
| 3 | 48,2 | 99,42 | 99,84 | 100,00 | 9 |
| 3 | 56,2 | 99,89 | 100,00 | 100,00 | 1 |
| 3 | 65,5 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1 |

Tabla D.6. Distribuciones granulométricas y caudal de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y del fino a la salida del microclasificador para la corrida 6.

| N o de interval o n | Día metros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 6 | | | |
|---------------------------------|---|--|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | Fin o ϕ_f % < D |
| 0 | 0,36 | 0,31 | 0,40 | 0,61 | 0,4 |
| 1 | 0,42 | 0,88 | 1,14 | 1,72 | 1,2 |
| 2 | 0,49 | 1,62 | 2,09 | 3,16 | 2,2 |

| | | | | | |
|---|------|--------|--------|--------|-----|
| 3 | 0,58 | 2,41 | 3,13 | 4,73 | 3,4 |
| 4 | 0,67 | 3,17 | 4,12 | 6,26 | 4,4 |
| 5 | 0,78 | 3,84 | 5,00 | 7,66 | 5,4 |
| 6 | 0,91 | 4,41 | 5,77 | 8,98 | 6,3 |
| 7 | 1,06 | 4,97 | 6,39 | 10,38 | 7,0 |
| 8 | 1,24 | 5,63 | 7,12 | 12,18 | 7,9 |
| 9 | 1,44 | 6,52 | 8,15 | 14,72 | 9,2 |
| 1 | 1,68 | 7,73 | 9,63 | 18,30 | 11, |
| 1 | 1,95 | 9,96 | 11,58 | 23,02 | 13, |
| 1 | 2,28 | 10,99 | 13,86 | 28,56 | 16, |
| 1 | 2,65 | 12,83 | 16,32 | 34,54 | 19, |
| 1 | 3,09 | 14,85 | 19,07 | 40,91 | 22, |
| 1 | 3,60 | 17,17 | 22,30 | 47,71 | 26, |
| 1 | 4,19 | 19,89 | 26,12 | 54,69 | 31, |
| 1 | 4,88 | 23,12 | 30,63 | 61,62 | 35, |
| 1 | 5,69 | 26,96 | 35,96 | 68,34 | 41, |
| 1 | 6,63 | 31,51 | 42,12 | 74,61 | 47, |
| 2 | 7,72 | 36,82 | 49,06 | 80,27 | 54, |
| 2 | 9,00 | 42,88 | 56,59 | 85,19 | 61, |
| 2 | 10,4 | 49,64 | 64,42 | 89,34 | 68, |
| 2 | 12,2 | 56,93 | 72,18 | 92,71 | 75, |
| 2 | 14,2 | 64,50 | 79,42 | 95,38 | 82, |
| 2 | 16,5 | 72,02 | 85,73 | 97,38 | 87, |
| 2 | 19,3 | 79,08 | 90,84 | 98,78 | 92, |
| 2 | 22,4 | 85,32 | 94,64 | 99,62 | 95, |
| 2 | 26,2 | 90,48 | 97,20 | 99,99 | 97, |
| 2 | 30,5 | 94,42 | 98,76 | 100,00 | 98, |
| 3 | 35,5 | 97,16 | 99,58 | 100,00 | 99, |
| 3 | 41,4 | 98,85 | 99,92 | 100,00 | 99, |
| 3 | 48,2 | 99,71 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 56,2 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 65,5 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |

Tabla D.7. Distribuciones granulométricas y caudal de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y del fino a la salida del microclasificador para la corrida 7.

| N ° de interval o n | Día metros de la partícula | Distribuciones granulométricas de la corrida 7 | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | Fin ϕ_f |

| | D, μm | D | | | % < D |
|---|------------------|--------|--------|--------|-------|
| 0 | 0,36 | 0,33 | 0,41 | 0,54 | 0,4 |
| 1 | 0,42 | 0,93 | 1,16 | 1,52 | 1,2 |
| 2 | 0,49 | 1,70 | 2,14 | 2,78 | 2,2 |
| 3 | 0,58 | 2,55 | 3,22 | 4,14 | 3,3 |
| 4 | 0,67 | 3,37 | 4,27 | 5,44 | 4,4 |
| 5 | 0,78 | 4,10 | 5,21 | 6,60 | 5,4 |
| 6 | 0,91 | 4,74 | 6,06 | 7,64 | 6,3 |
| 7 | 1,06 | 5,37 | 6,89 | 8,74 | 7,2 |
| 8 | 1,24 | 6,12 | 7,87 | 10,20 | 8,2 |
| 9 | 1,44 | 7,15 | 9,17 | 12,34 | 9,7 |
| 1 | 1,68 | 8,55 | 10,94 | 15,39 | 11, |
| 1 | 1,95 | 10,30 | 13,19 | 19,41 | 14, |
| 1 | 2,28 | 12,28 | 15,80 | 24,22 | 17, |
| 1 | 2,65 | 14,36 | 18,68 | 29,63 | 20, |
| 1 | 3,09 | 16,55 | 21,93 | 35,58 | 24, |
| 1 | 3,60 | 18,90 | 25,69 | 42,07 | 28, |
| 1 | 4,19 | 21,47 | 30,07 | 48,98 | 33, |
| 1 | 4,88 | 24,33 | 35,11 | 56,15 | 38, |
| 1 | 5,69 | 27,59 | 40,85 | 63,40 | 44, |
| 1 | 6,63 | 31,35 | 47,24 | 70,48 | 51, |
| 2 | 7,72 | 35,70 | 54,14 | 77,15 | 58, |
| 2 | 9,00 | 40,73 | 61,34 | 83,16 | 65, |
| 2 | 10,4 | 46,44 | 68,58 | 88,32 | 72, |
| 2 | 12,2 | 52,81 | 75,57 | 92,51 | 78, |
| 2 | 14,2 | 59,69 | 82,00 | 98,68 | 85, |
| 2 | 16,5 | 66,84 | 87,59 | 97,88 | 89, |
| 2 | 19,3 | 73,93 | 92,13 | 99,21 | 93, |
| 2 | 22,4 | 80,58 | 95,55 | 99,84 | 96, |
| 2 | 26,2 | 86,46 | 97,87 | 100,00 | 98, |
| 2 | 30,5 | 91,32 | 99,24 | 100,00 | 99, |
| 3 | 35,5 | 95,01 | 99,87 | 100,00 | 99, |
| 3 | 41,4 | 97,55 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 48,2 | 99,06 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 56,2 | 99,79 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 65,5 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |

Tabla D.8. Distribuciones granulométricas y caudal de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y del fino a la salida del microclasificador para la corrida 8.

| N | Diá | Distribuciones granulométricas de la corrida 8 |
|---|-----|--|
|---|-----|--|

| ° de interval o n | metros de la partícula D, μm | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | Fin o ϕ_f % < D |
|-------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 0 | 0,36 | 0,32 | 0,42 | 0,51 | 0,44 |
| 1 | 0,42 | 0,92 | 1,21 | 1,45 | 1,26 |
| 2 | 0,49 | 1,69 | 2,23 | 2,67 | 2,32 |
| 3 | 0,58 | 2,55 | 3,35 | 4,03 | 3,48 |
| 4 | 0,67 | 3,39 | 4,46 | 5,37 | 4,64 |
| 5 | 0,78 | 4,15 | 5,46 | 6,64 | 5,69 |
| 6 | 0,91 | 4,84 | 6,35 | 7,87 | 6,65 |
| 7 | 1,06 | 5,51 | 7,23 | 9,21 | 7,62 |
| 8 | 1,24 | 6,29 | 8,24 | 10,94 | 8,77 |
| 9 | 1,44 | 7,31 | 9,57 | 13,34 | 10,3 |
| 1 | 1,68 | 8,67 | 11,33 | 16,6 | 12,3 |
| 1 | 1,95 | 10,37 | 13,51 | 20,74 | 14,9 |
| 1 | 2,28 | 12,29 | 16,00 | 25,57 | 17,8 |
| 1 | 2,65 | 14,34 | 18,74 | 30,86 | 21,1 |
| 1 | 3,09 | 16,51 | 21,81 | 36,54 | 24,6 |
| 1 | 3,60 | 18,88 | 25,39 | 42,59 | 28,7 |
| 1 | 4,19 | 21,49 | 29,63 | 48,92 | 33,3 |
| 1 | 4,88 | 24,40 | 34,63 | 55,41 | 38,6 |
| 1 | 5,69 | 27,72 | 40,48 | 61,97 | 44,6 |
| 1 | 6,63 | 31,54 | 47,10 | 68,43 | 51,2 |
| 2 | 7,72 | 35,95 | 54,36 | 74,62 | 58,3 |
| 2 | 9,00 | 41,02 | 61,98 | 80,39 | 65,5 |
| 2 | 10,4 | 46,79 | 69,62 | 85,55 | 72,7 |
| 2 | 12,2 | 53,23 | 76,90 | 89,98 | 79,4 |
| 2 | 14,2 | 60,19 | 83,48 | 93,58 | 85,4 |
| 2 | 16,5 | 67,40 | 89,05 | 96,29 | 90,4 |
| 2 | 19,3 | 74,52 | 93,43 | 98,15 | 94,3 |
| 2 | 22,4 | 81,16 | 96,58 | 99,27 | 97,1 |
| 2 | 26,2 | 86,98 | 98,58 | 99,81 | 98,8 |
| 2 | 30,5 | 91,75 | 99,64 | 99,98 | 99,7 |
| 3 | 35,5 | 95,36 | 100,00 | 100,00 | 100, |
| 3 | 41,4 | 97,83 | 100,00 | 100,00 | 100, |
| 3 | 48,2 | 99,30 | 100,00 | 100,00 | 100, |
| 3 | 56,2 | 99,94 | 100,00 | 100,00 | 100, |
| 3 | 65,5 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100, |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100, |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100, |

Anexo E.

Distribución granulométrica de la alimentación, grueso y el fino calculado por la ecuación 2.12.

Tabla E.1. Distribuciones granulométricas de la alimentación, grueso y el fino calculado por la ecuación 2.12 para la corrida 1.

| N° de intervalo n | Diámetros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 1 | | |
|----------------------------|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| | | Grueso $\Phi_c \% < D$ | Fino $\Phi_f \% < D$ | Alimentación $\Phi_a \% < D$ |
| 0 | 0,36 | 0,27 | 0,35 | 0,33 |
| 1 | 0,42 | 0,77 | 0,97 | 0,93 |
| 2 | 0,49 | 1,41 | 1,78 | 1,72 |
| 3 | 0,58 | 2,1 | 2,66 | 2,57 |
| 4 | 0,67 | 2,75 | 3,49 | 3,39 |
| 5 | 0,78 | 3,32 | 4,23 | 4,11 |
| 6 | 0,91 | 3,78 | 4,87 | 4,74 |
| 7 | 1,06 | 4,2 | 5,50 | 5,35 |
| 8 | 1,24 | 4,66 | 6,26 | 6,07 |
| 9 | 1,44 | 5,28 | 7,33 | 7,06 |
| 10 | 1,68 | 6,13 | 8,79 | 8,42 |
| 11 | 1,95 | 7,23 | 10,65 | 10,14 |
| 12 | 2,28 | 8,49 | 12,79 | 12,12 |
| 13 | 2,65 | 9,86 | 15,07 | 14,23 |
| 14 | 3,09 | 11,39 | 17,51 | 16,47 |
| 15 | 3,60 | 13,19 | 20,22 | 18,89 |
| 16 | 4,19 | 15,32 | 23,25 | 21,54 |
| 17 | 4,88 | 17,87 | 26,67 | 24,49 |
| 18 | 5,69 | 20,96 | 30,57 | 27,86 |
| 19 | 6,63 | 24,68 | 35,02 | 31,75 |
| 20 | 7,72 | 29,12 | 40,07 | 36,30 |
| 21 | 9,00 | 34,34 | 45,31 | 41,60 |
| 22 | 10,48 | 40,35 | 52,02 | 47,70 |
| 23 | 12,21 | 47,12 | 58,79 | 54,52 |
| 24 | 14,22 | 54,48 | 65,84 | 61,88 |
| 25 | 16,57 | 62,18 | 72,87 | 69,45 |
| 26 | 19,31 | 69,86 | 79,54 | 76,80 |
| 27 | 22,49 | 77,14 | 85,47 | 83,50 |
| 28 | 26,20 | 83,65 | 90,39 | 89,20 |
| 29 | 30,53 | 89,13 | 94,17 | 93,64 |
| 30 | 35,56 | 93,43 | 96,80 | 96,78 |
| 31 | 41,43 | 96,52 | 98,43 | 98,70 |
| 32 | 48,27 | 98,52 | 99,31 | 99,66 |
| 33 | 56,23 | 99,60 | 99,71 | 100,00 |
| 34 | 65,51 | 100,00 | 99,85 | 100,00 |
| 35 | 76,32 | 100,00 | 99,91 | 100,00 |
| 36 | 88,91 | 100,00 | 99,97 | 100,00 |

Tabla E.2. Distribuciones granulométricas de la alimentación, grueso y el fino calculado por la ecuación 2.12 para la corrida 2.

| N° de intervalo n | Diámetros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 2 | | |
|----------------------------|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| | | Grueso $\phi_c \% < D$ | Fino $\phi_f \% < D$ | Alimentación $\phi_a \% < D$ |
| 0 | 0,36 | 0,26 | 0,32 | 0,33 |
| 1 | 0,42 | 0,73 | 0,91 | 0,85 |
| 2 | 0,49 | 1,34 | 1,68 | 1,57 |
| 3 | 0,58 | 2,02 | 2,51 | 2,34 |
| 4 | 0,67 | 2,67 | 3,30 | 3,09 |
| 5 | 0,78 | 3,24 | 3,99 | 3,76 |
| 6 | 0,91 | 3,72 | 4,57 | 4,35 |
| 7 | 1,06 | 4,16 | 5,14 | 4,96 |
| 8 | 1,24 | 4,65 | 5,83 | 5,70 |
| 9 | 1,44 | 5,29 | 6,78 | 6,73 |
| 10 | 1,68 | 6,17 | 8,11 | 8,17 |
| 11 | 1,95 | 7,28 | 9,83 | 9,91 |
| 12 | 2,28 | 8,57 | 11,82 | 11,92 |
| 13 | 2,65 | 9,98 | 13,97 | 14,04 |
| 14 | 3,09 | 11,52 | 16,33 | 16,24 |
| 15 | 3,60 | 13,23 | 18,93 | 18,54 |
| 16 | 4,19 | 15,12 | 21,82 | 20,95 |
| 17 | 4,88 | 17,21 | 25,00 | 23,52 |
| 18 | 5,69 | 19,55 | 28,51 | 26,30 |
| 19 | 6,63 | 22,18 | 32,36 | 29,36 |
| 20 | 7,72 | 25,16 | 36,59 | 32,81 |
| 21 | 9,00 | 28,6 | 41,25 | 41,28 |
| 22 | 10,48 | 32,61 | 46,35 | 46,48 |
| 23 | 12,21 | 37,32 | 51,93 | 52,36 |
| 24 | 14,22 | 42,83 | 57,97 | 58,85 |
| 25 | 16,57 | 49,13 | 64,36 | 65,75 |
| 26 | 19,31 | 56,13 | 70,91 | 72,76 |
| 27 | 22,49 | 63,57 | 77,37 | 79,53 |
| 28 | 26,20 | 71,10 | 83,44 | 85,66 |
| 29 | 30,53 | 78,29 | 88,84 | 90,83 |
| 30 | 35,56 | 84,73 | 93,28 | 94,81 |
| 31 | 41,43 | 90,08 | 96,58 | 97,55 |
| 32 | 48,27 | 94,16 | 98,69 | 99,16 |
| 33 | 56,23 | 96,98 | 99,76 | 99,87 |
| 34 | 65,51 | 98,71 | 100,00 | 100,00 |
| 35 | 76,32 | 99,61 | 100,00 | 100,00 |

| | | | | |
|----|-------|-------|--------|--------|
| 36 | 88,91 | 99,96 | 100,00 | 100,00 |
|----|-------|-------|--------|--------|

Tabla E.3. Distribuciones granulométricas de la alimentación, grueso y el fino calculado por la ecuación 2.12 para la corrida 3.

| N° de intervalo n | Diámetros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 3 | | |
|----------------------------|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| | | Grueso $\Phi_c \% < D$ | Fino $\Phi_f \% < D$ | Alimentación $\Phi_a \% < D$ |
| 0 | 0,36 | 0,27 | 0,33 | 0,32 |
| 1 | 0,42 | 0,77 | 0,89 | 0,90 |
| 2 | 0,49 | 1,42 | 1,69 | 1,66 |
| 3 | 0,58 | 2,11 | 2,52 | 2,48 |
| 4 | 0,67 | 2,76 | 3,31 | 3,27 |
| 5 | 0,78 | 3,33 | 3,99 | 3,96 |
| 6 | 0,91 | 3,80 | 4,59 | 4,56 |
| 7 | 1,06 | 4,24 | 5,20 | 5,15 |
| 8 | 1,24 | 4,76 | 5,96 | 5,84 |
| 9 | 1,44 | 5,47 | 7,04 | 6,80 |
| 10 | 1,68 | 6,47 | 8,54 | 8,12 |
| 11 | 1,95 | 7,76 | 10,45 | 9,81 |
| 12 | 2,28 | 9,26 | 12,64 | 11,76 |
| 13 | 2,65 | 10,87 | 14,95 | 13,86 |
| 14 | 3,09 | 12,63 | 17,38 | 16,11 |
| 15 | 3,60 | 14,60 | 20,00 | 18,55 |
| 16 | 4,19 | 16,82 | 22,86 | 21,20 |
| 17 | 4,88 | 19,31 | 25,98 | 24,09 |
| 18 | 5,69 | 22,14 | 29,47 | 27,30 |
| 19 | 6,63 | 25,37 | 33,40 | 30,89 |
| 20 | 7,72 | 29,06 | 37,84 | 34,94 |
| 21 | 9,00 | 33,29 | 42,87 | 39,54 |
| 22 | 10,48 | 38,14 | 48,51 | 44,75 |
| 23 | 12,21 | 43,66 | 54,73 | 50,58 |
| 24 | 14,22 | 49,85 | 61,40 | 56,96 |
| 25 | 16,57 | 56,59 | 68,29 | 63,72 |
| 26 | 19,31 | 63,69 | 75,09 | 70,59 |
| 27 | 22,49 | 70,82 | 81,45 | 77,26 |
| 28 | 26,20 | 77,63 | 87,07 | 83,37 |
| 29 | 30,53 | 83,75 | 91,69 | 88,64 |
| 30 | 35,56 | 88,90 | 95,18 | 92,87 |
| 31 | 41,43 | 92,92 | 97,60 | 95,99 |
| 32 | 48,27 | 95,82 | 99,06 | 98,06 |
| 33 | 56,23 | 97,74 | 99,77 | 99,27 |

| | | | | |
|----|-------|-------|--------|--------|
| 34 | 65,51 | 98,90 | 100,00 | 99,83 |
| 35 | 76,32 | 99,54 | 100,00 | 100,00 |
| 36 | 88,91 | 99,87 | 100,00 | 100,00 |

Tabla E.4. Distribuciones granulométricas de la alimentación, grueso y el fino calculado por la ecuación 2.12 para la corrida 4.

| N° de intervalo n | Diámetros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 4 | | |
|----------------------------|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| | | Grueso $\phi_c \% < D$ | Fino $\phi_f \% < D$ | Alimentación $\phi_a \% < D$ |
| 0 | 0,36 | 0,29 | 0,37 | 0,29 |
| 1 | 0,42 | 0,82 | 1,04 | 0,81 |
| 2 | 0,49 | 1,51 | 1,91 | 1,49 |
| 3 | 0,58 | 2,24 | 2,86 | 2,23 |
| 4 | 0,67 | 2,94 | 3,76 | 2,94 |
| 5 | 0,78 | 3,55 | 4,56 | 3,55 |
| 6 | 0,91 | 4,07 | 5,27 | 4,06 |
| 7 | 1,06 | 4,58 | 6,00 | 4,53 |
| 8 | 1,24 | 5,2 | 6,88 | 5,06 |
| 9 | 1,44 | 6,05 | 8,12 | 5,76 |
| 10 | 1,68 | 7,24 | 9,83 | 6,71 |
| 11 | 1,95 | 8,75 | 12,02 | 7,91 |
| 12 | 2,28 | 10,49 | 14,48 | 9,28 |
| 13 | 2,65 | 12,33 | 17,05 | 10,77 |
| 14 | 3,09 | 14,30 | 19,71 | 12,42 |
| 15 | 3,60 | 16,48 | 22,57 | 14,34 |
| 16 | 4,19 | 18,92 | 25,65 | 16,67 |
| 17 | 4,88 | 21,67 | 29,01 | 19,63 |
| 18 | 5,69 | 24,83 | 32,77 | 23,08 |
| 19 | 6,63 | 28,49 | 37,00 | 27,42 |
| 20 | 7,72 | 32,76 | 41,80 | 32,64 |
| 21 | 9,00 | 37,71 | 47,20 | 38,77 |
| 22 | 10,48 | 43,4 | 53,20 | 45,73 |
| 23 | 12,21 | 49,8 | 59,70 | 53,34 |
| 24 | 14,22 | 56,79 | 66,52 | 61,32 |
| 25 | 16,57 | 64,12 | 73,37 | 69,25 |
| 26 | 19,31 | 71,44 | 79,93 | 76,71 |
| 27 | 22,49 | 78,35 | 85,84 | 83,31 |
| 28 | 26,20 | 84,49 | 90,79 | 88,78 |
| 29 | 30,53 | 89,57 | 94,62 | 93,00 |
| 30 | 35,56 | 93,46 | 97,30 | 96,03 |
| 31 | 41,43 | 96,16 | 98,95 | 98,02 |

| | | | | |
|----|-------|-------|--------|--------|
| 32 | 48,27 | 97,84 | 99,77 | 99,18 |
| 33 | 56,23 | 98,75 | 100,00 | 99,76 |
| 34 | 65,51 | 99,17 | 100,00 | 99,97 |
| 35 | 76,32 | 99,33 | 100,00 | 100,00 |
| 36 | 88,91 | 99,42 | 100,00 | 100,00 |

Tabla E.5. Distribuciones granulométricas de la alimentación, grueso y el fino calculado por la ecuación 2.12 para la corrida 5.

| N° de intervalo n | Diámetros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 5 | | |
|----------------------------|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| | | Grueso $\phi_c \% < D$ | Fino $\phi_f \% < D$ | Alimentación $\phi_a \% < D$ |
| 0 | 0,36 | 0,31 | 0,36 | 0,34 |
| 1 | 0,42 | 0,88 | 1,02 | 0,95 |
| 2 | 0,49 | 1,62 | 1,88 | 1,74 |
| 3 | 0,58 | 2,43 | 2,80 | 2,60 |
| 4 | 0,67 | 3,20 | 3,70 | 3,42 |
| 5 | 0,78 | 3,89 | 4,50 | 4,14 |
| 6 | 0,91 | 4,48 | 5,16 | 4,77 |
| 7 | 1,06 | 5,04 | 5,83 | 5,40 |
| 8 | 1,24 | 5,68 | 6,63 | 6,17 |
| 9 | 1,44 | 6,55 | 7,76 | 7,25 |
| 10 | 1,68 | 7,74 | 9,30 | 8,73 |
| 11 | 1,95 | 9,25 | 11,27 | 10,58 |
| 12 | 2,28 | 11,00 | 13,56 | 12,68 |
| 13 | 2,65 | 12,9 | 16,04 | 14,90 |
| 14 | 3,09 | 14,97 | 18,72 | 17,23 |
| 15 | 3,60 | 17,28 | 21,62 | 19,75 |
| 16 | 4,19 | 19,87 | 24,81 | 22,51 |
| 17 | 4,88 | 22,82 | 28,30 | 25,60 |
| 18 | 5,69 | 26,21 | 32,23 | 29,12 |
| 19 | 6,63 | 30,13 | 36,65 | 33,18 |
| 20 | 7,72 | 34,67 | 41,65 | 37,85 |
| 21 | 9,00 | 39,90 | 47,31 | 43,21 |
| 22 | 10,48 | 45,85 | 53,61 | 49,27 |
| 23 | 12,21 | 52,45 | 60,43 | 55,96 |
| 24 | 14,22 | 59,54 | 67,58 | 63,10 |
| 25 | 16,57 | 66,86 | 74,69 | 70,37 |
| 26 | 19,31 | 74,06 | 81,36 | 77,40 |
| 27 | 22,49 | 80,76 | 87,21 | 83,78 |
| 28 | 26,20 | 86,63 | 91,98 | 89,17 |
| 29 | 30,53 | 91,46 | 95,50 | 93,39 |

| | | | | |
|----|-------|--------|--------|--------|
| 30 | 35,56 | 95,13 | 97,87 | 96,42 |
| 31 | 41,43 | 97,66 | 99,25 | 98,35 |
| 32 | 48,27 | 99,17 | 99,86 | 99,42 |
| 33 | 56,23 | 99,87 | 100,00 | 99,89 |
| 34 | 65,51 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 35 | 76,32 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 36 | 88,91 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Tabla E.6. Distribuciones granulométricas de la alimentación, grueso y el fino calculado por la ecuación 2.12 para la corrida 6.

| N° de intervalo n | Diámetros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 6 | | |
|----------------------------|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| | | Grueso $\phi_{c\% < D}$ | Fino $\phi_f \% < D$ | Alimentación $\phi_a \% < D$ |
| 0 | 0,36 | 0,19 | 0,44 | 0,31 |
| 1 | 0,42 | 0,57 | 1,24 | 0,88 |
| 2 | 0,49 | 1,06 | 2,27 | 1,62 |
| 3 | 0,58 | 1,59 | 3,40 | 2,41 |
| 4 | 0,67 | 2,08 | 4,49 | 3,17 |
| 5 | 0,78 | 2,49 | 5,45 | 3,84 |
| 6 | 0,91 | 2,81 | 6,32 | 4,41 |
| 7 | 1,06 | 3,10 | 7,07 | 4,97 |
| 8 | 1,24 | 3,45 | 7,98 | 5,63 |
| 9 | 1,44 | 3,96 | 9,27 | 6,52 |
| 10 | 1,68 | 4,7 | 11,11 | 7,73 |
| 11 | 1,95 | 5,66 | 13,54 | 9,96 |
| 12 | 2,28 | 6,73 | 16,37 | 10,99 |
| 13 | 2,65 | 7,78 | 19,43 | 12,83 |
| 14 | 3,09 | 8,76 | 22,80 | 14,85 |
| 15 | 3,60 | 9,64 | 26,64 | 17,17 |
| 16 | 4,19 | 10,43 | 31,00 | 19,89 |
| 17 | 4,88 | 11,03 | 35,93 | 23,12 |
| 18 | 5,69 | 11,76 | 41,49 | 26,96 |
| 19 | 6,63 | 12,84 | 47,67 | 31,51 |
| 20 | 7,72 | 14,61 | 54,39 | 36,82 |
| 21 | 9,00 | 17,46 | 61,48 | 42,88 |
| 22 | 10,48 | 21,81 | 68,68 | 49,64 |
| 23 | 12,21 | 27,98 | 75,69 | 56,93 |
| 24 | 14,22 | 36,07 | 82,15 | 64,50 |
| 25 | 16,57 | 45,83 | 87,72 | 72,02 |
| 26 | 19,31 | 56,64 | 92,20 | 79,08 |
| 27 | 22,49 | 67,58 | 95,49 | 85,32 |

| | | | | |
|----|-------|--------|--------|--------|
| 28 | 26,20 | 77,69 | 97,68 | 90,48 |
| 29 | 30,53 | 86,14 | 98,97 | 94,42 |
| 30 | 35,56 | 92,49 | 99,65 | 97,16 |
| 31 | 41,43 | 96,66 | 99,93 | 98,85 |
| 32 | 48,27 | 98,96 | 100,00 | 99,71 |
| 33 | 56,23 | 99,88 | 100,00 | 100 |
| 34 | 65,51 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 35 | 76,32 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 36 | 88,91 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Tabla E.7. Distribuciones granulométricas de la alimentación, grueso y el fino calculado por la ecuación 2.12 para la corrida 7.

| N° de intervalo n | Diámetros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 7 | | |
|----------------------------|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| | | Grueso $\phi_c \% < D$ | Fino $\phi_f \% < D$ | Alimentación $\phi_a \% < D$ |
| 0 | 0,36 | 0,19 | 0,43 | 0,33 |
| 1 | 0,42 | 0,54 | 1,23 | 0,93 |
| 2 | 0,49 | 0,99 | 2,26 | 1,70 |
| 3 | 0,58 | 1,47 | 3,39 | 2,55 |
| 4 | 0,67 | 1,93 | 4,48 | 3,37 |
| 5 | 0,78 | 2,33 | 5,46 | 4,10 |
| 6 | 0,91 | 2,67 | 6,35 | 4,74 |
| 7 | 1,06 | 3,00 | 7,23 | 5,37 |
| 8 | 1,24 | 3,39 | 8,29 | 6,12 |
| 9 | 1,44 | 3,92 | 9,75 | 7,15 |
| 10 | 1,68 | 4,62 | 11,75 | 8,55 |
| 11 | 1,95 | 5,47 | 14,32 | 10,30 |
| 12 | 2,28 | 6,36 | 17,33 | 12,28 |
| 13 | 2,65 | 7,17 | 20,67 | 14,36 |
| 14 | 3,09 | 7,88 | 24,41 | 16,55 |
| 15 | 3,60 | 8,47 | 28,66 | 18,90 |
| 16 | 4,19 | 8,96 | 33,50 | 21,47 |
| 17 | 4,88 | 9,44 | 38,93 | 24,33 |
| 18 | 5,69 | 10,04 | 44,94 | 27,59 |
| 19 | 6,63 | 11,02 | 51,46 | 31,35 |
| 20 | 7,72 | 12,69 | 58,31 | 35,70 |
| 21 | 9,00 | 15,41 | 65,30 | 40,73 |
| 22 | 10,48 | 19,51 | 72,16 | 46,44 |
| 23 | 12,21 | 25,27 | 78,64 | 52,81 |
| 24 | 14,22 | 32,77 | 85,03 | 59,69 |
| 25 | 16,57 | 41,84 | 89,46 | 66,84 |

| | | | | |
|----|-------|--------|--------|--------|
| 26 | 19,31 | 52,03 | 93,41 | 73,93 |
| 27 | 22,49 | 62,60 | 96,33 | 80,58 |
| 28 | 26,20 | 72,73 | 98,26 | 86,46 |
| 29 | 30,53 | 81,67 | 99,38 | 91,32 |
| 30 | 35,56 | 88,88 | 99,89 | 95,01 |
| 31 | 41,43 | 94,14 | 100,00 | 97,55 |
| 32 | 48,27 | 97,52 | 100,00 | 99,06 |
| 33 | 56,23 | 99,31 | 100,00 | 99,79 |
| 34 | 65,51 | 99,97 | 100,00 | 100,00 |
| 35 | 76,32 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 36 | 88,91 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Tabla E.8. Distribuciones granulométricas de la alimentación, grueso y el fino calculado por la ecuación 2.12 para la corrida 8.

| N° de intervalo n | Diámetros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 7 | | |
|----------------------------|--|--|--------------------------|----------------------------------|
| | | Grueso $\Phi_{c\% < D}$ | Fino $\Phi_{f\% < D}$ | Alimentación $\Phi_{a\% < D}$ |
| 0 | 0,36 | 0,21 | 0,44 | 0,32 |
| 1 | 0,42 | 0,6 | 1,26 | 0,92 |
| 2 | 0,49 | 1,09 | 2,32 | 1,69 |
| 3 | 0,58 | 1,62 | 3,48 | 2,55 |
| 4 | 0,67 | 2,12 | 4,64 | 3,39 |
| 5 | 0,78 | 2,53 | 5,69 | 4,15 |
| 6 | 0,91 | 2,88 | 6,65 | 4,84 |
| 7 | 1,06 | 3,19 | 7,62 | 5,51 |
| 8 | 1,24 | 3,56 | 8,77 | 6,29 |
| 9 | 1,44 | 4,08 | 10,31 | 7,31 |
| 10 | 1,68 | 4,79 | 12,36 | 8,67 |
| 11 | 1,95 | 5,68 | 14,92 | 10,37 |
| 12 | 2,28 | 6,61 | 17,87 | 12,29 |
| 13 | 2,65 | 7,47 | 21,10 | 14,34 |
| 14 | 3,09 | 8,19 | 24,68 | 16,51 |
| 15 | 3,60 | 8,76 | 28,74 | 18,88 |
| 16 | 4,19 | 9,19 | 33,39 | 21,49 |
| 17 | 4,88 | 9,48 | 38,68 | 24,40 |
| 18 | 5,69 | 9,9 | 44,67 | 27,72 |
| 19 | 6,63 | 10,69 | 51,26 | 31,54 |
| 20 | 7,72 | 12,24 | 58,31 | 35,95 |
| 21 | 9,00 | 14,97 | 65,57 | 41,02 |
| 22 | 10,48 | 19,32 | 72,73 | 46,79 |
| 23 | 12,21 | 25,59 | 79,45 | 53,23 |

| | | | | |
|----|-------|--------|--------|--------|
| 24 | 14,22 | 33,84 | 85,45 | 60,19 |
| 25 | 16,57 | 43,77 | 90,46 | 67,40 |
| 26 | 19,31 | 54,76 | 94,35 | 74,52 |
| 27 | 22,49 | 65,88 | 97,10 | 81,16 |
| 28 | 26,20 | 76,17 | 98,82 | 86,98 |
| 29 | 30,53 | 84,82 | 99,71 | 91,75 |
| 30 | 35,56 | 91,40 | 100,00 | 95,36 |
| 31 | 41,43 | 95,83 | 100,00 | 97,83 |
| 32 | 48,27 | 98,41 | 100,00 | 99,30 |
| 33 | 56,23 | 99,62 | 100,00 | 99,94 |
| 34 | 65,51 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 35 | 76,32 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 36 | 88,91 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Anexo F.

Gráficas de la distribución granulométrica de las alimentación, fracción gruesa y fracción fina versus el diámetro de las partículas.

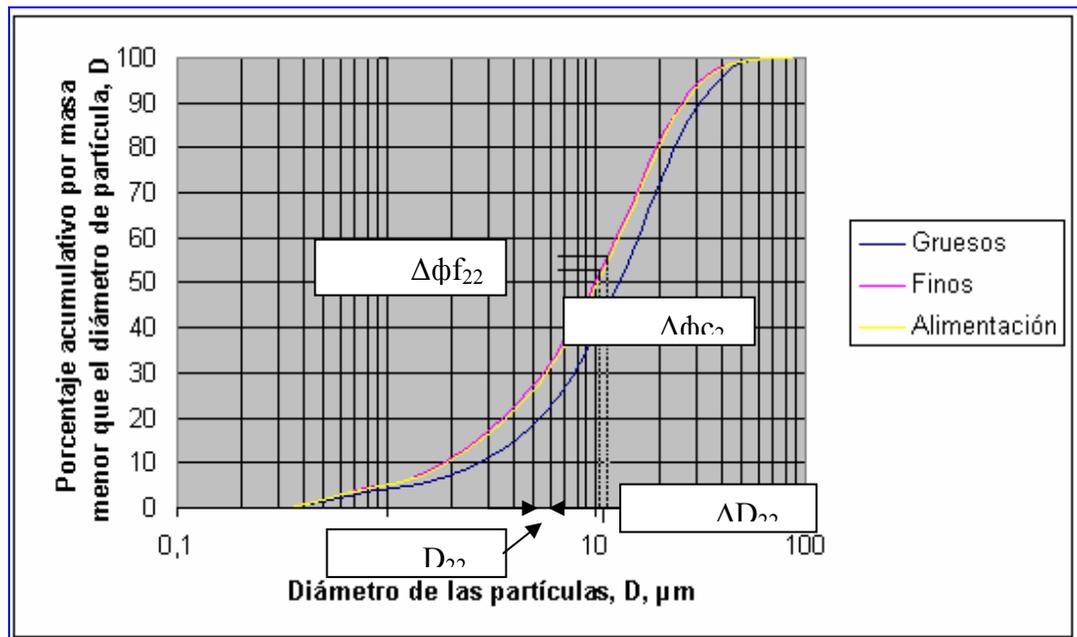


Figura F.1. Gráfica de las distribuciones granulométricas para el cálculo de la curva de Tromp de la corrida 1.

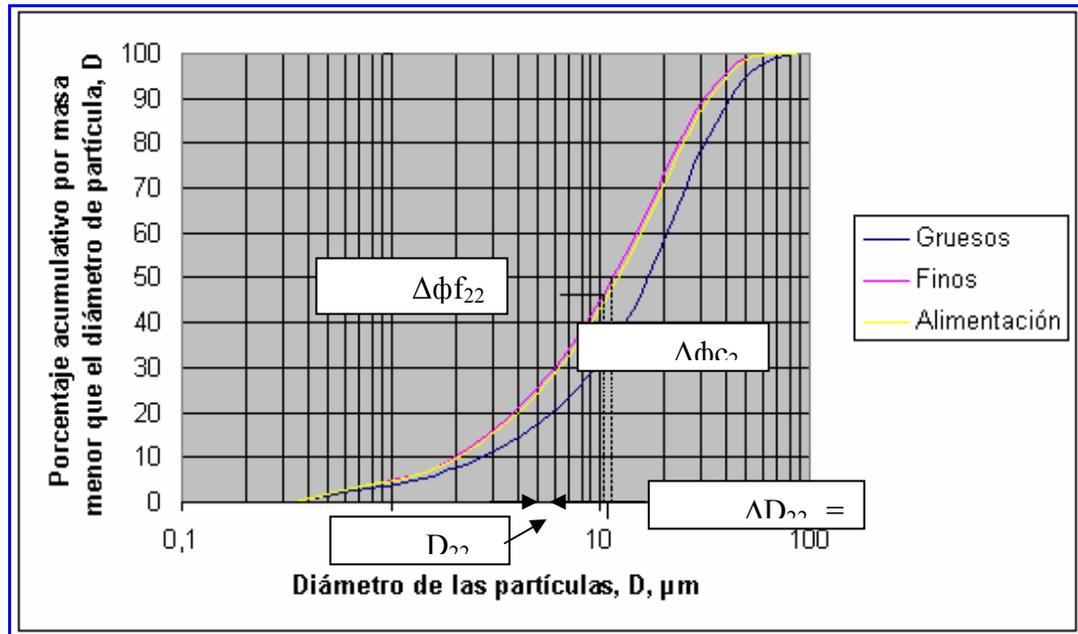


Figura F.2. Gráfica de las distribuciones granulométricas para el cálculo de la curva de Tromp de la corrida 2.

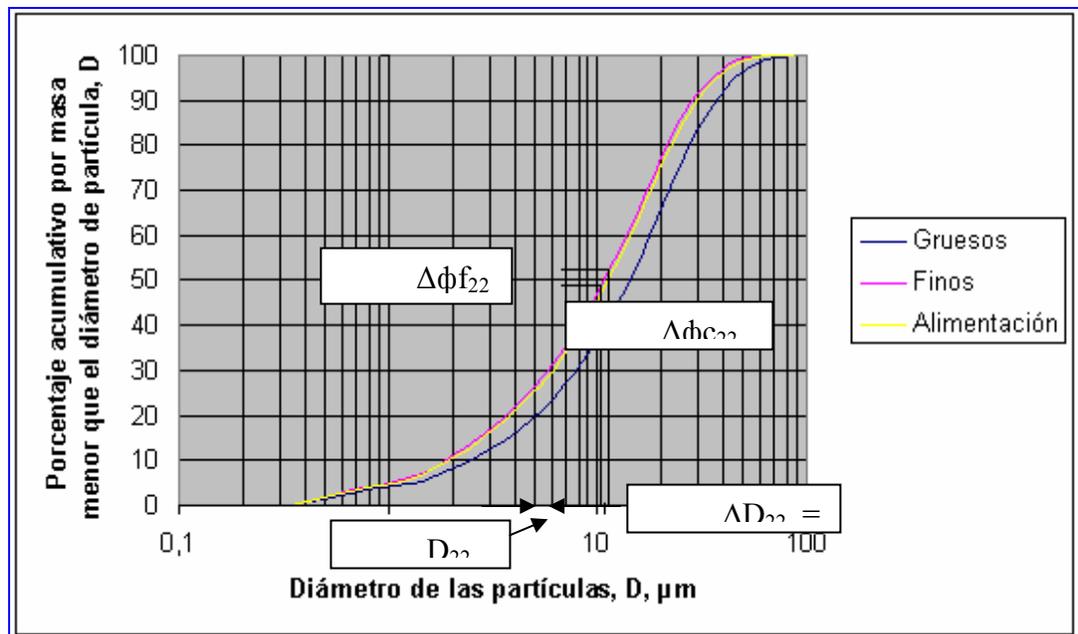


Figura F.3. Gráfica de las distribuciones granulométricas para el cálculo de la curva de Tromp de la corrida 3.

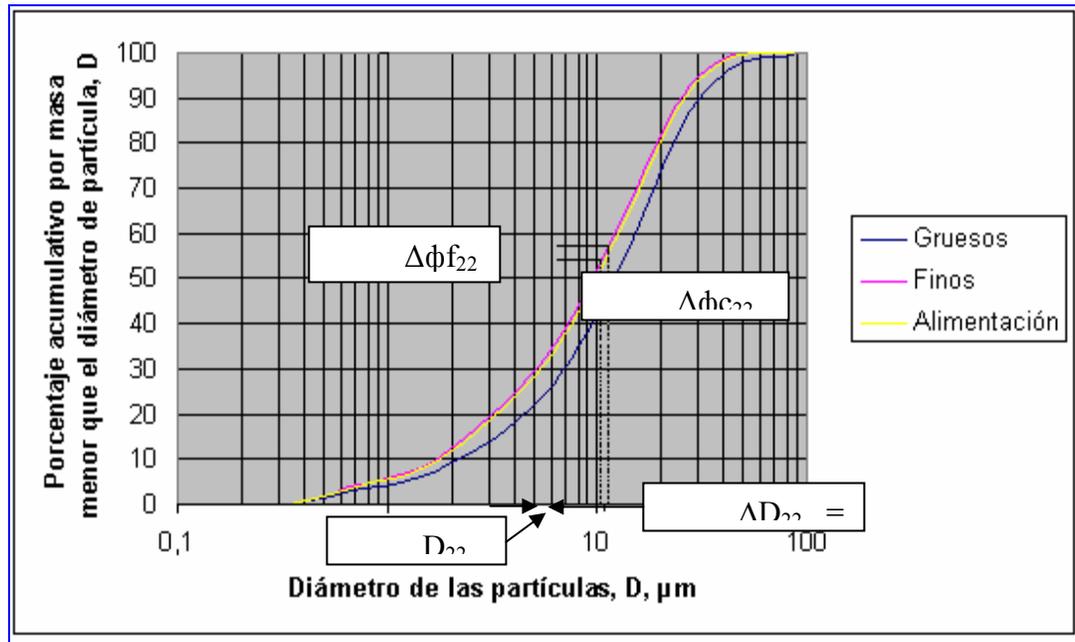


Figura F.4. Gráfica de las distribuciones granulométricas para el cálculo de la curva de Tromp de la corrida 4.

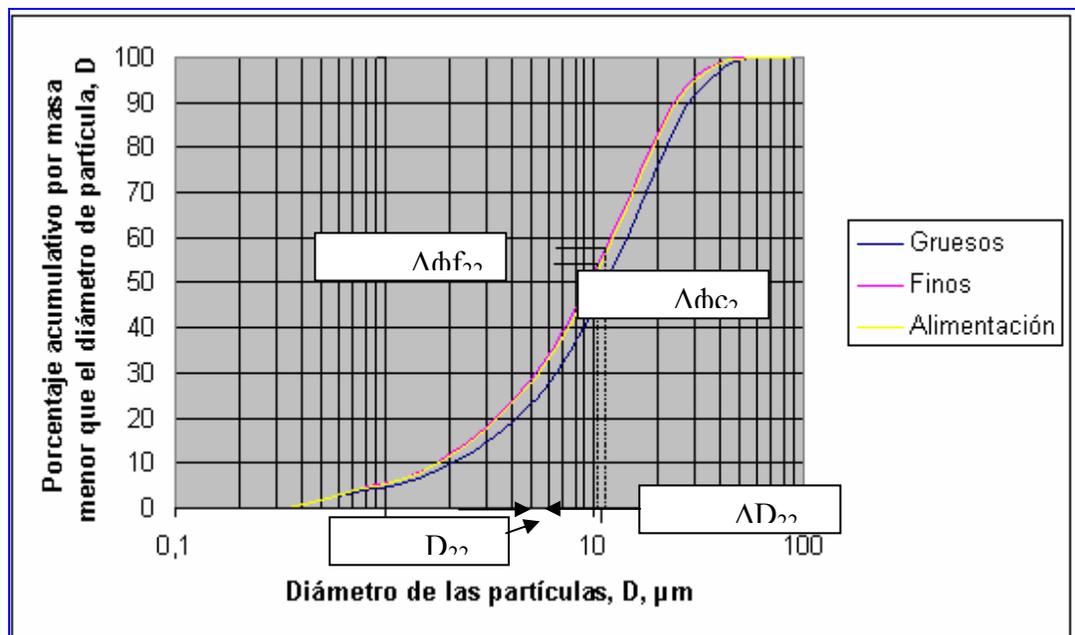


Figura F.5. Gráfica de las distribuciones granulométricas para el cálculo de la curva de Tromp de la corrida 5.

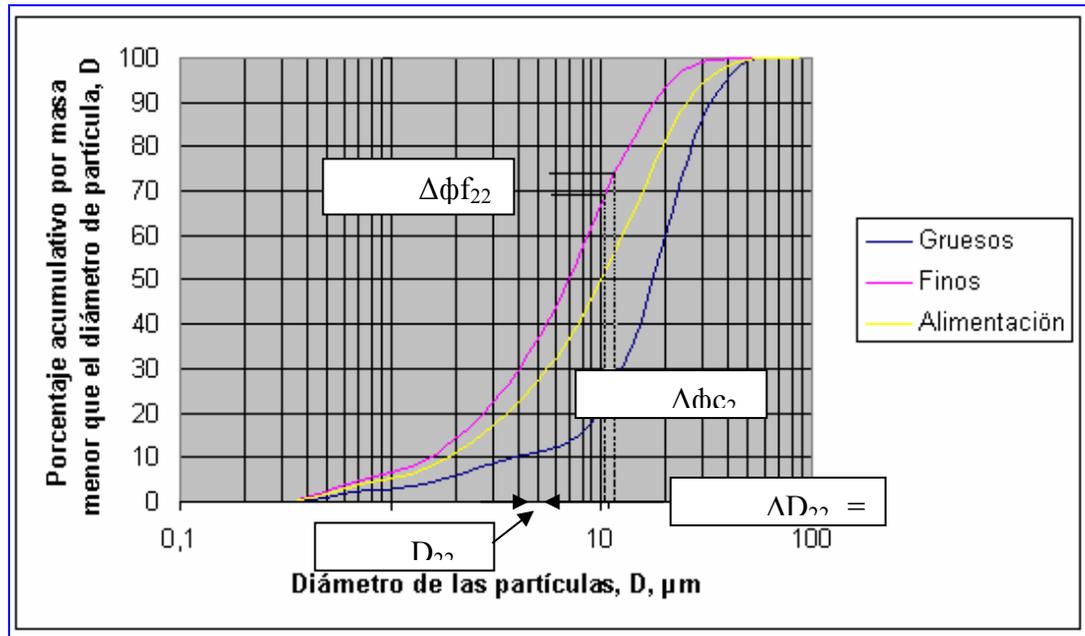


Figura F.6. Gráfica de las distribuciones granulométricas para el cálculo de la curva de Tromp de la corrida 6.

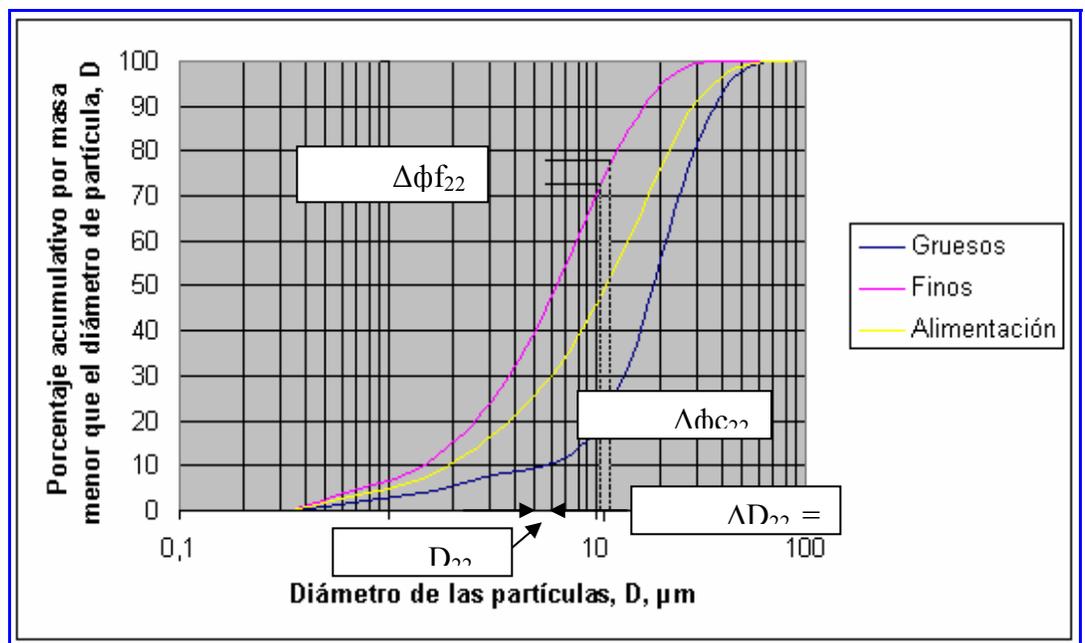


Figura F.7. Gráfica de las distribuciones granulométricas para el cálculo de la curva de Tromp de la corrida 7.

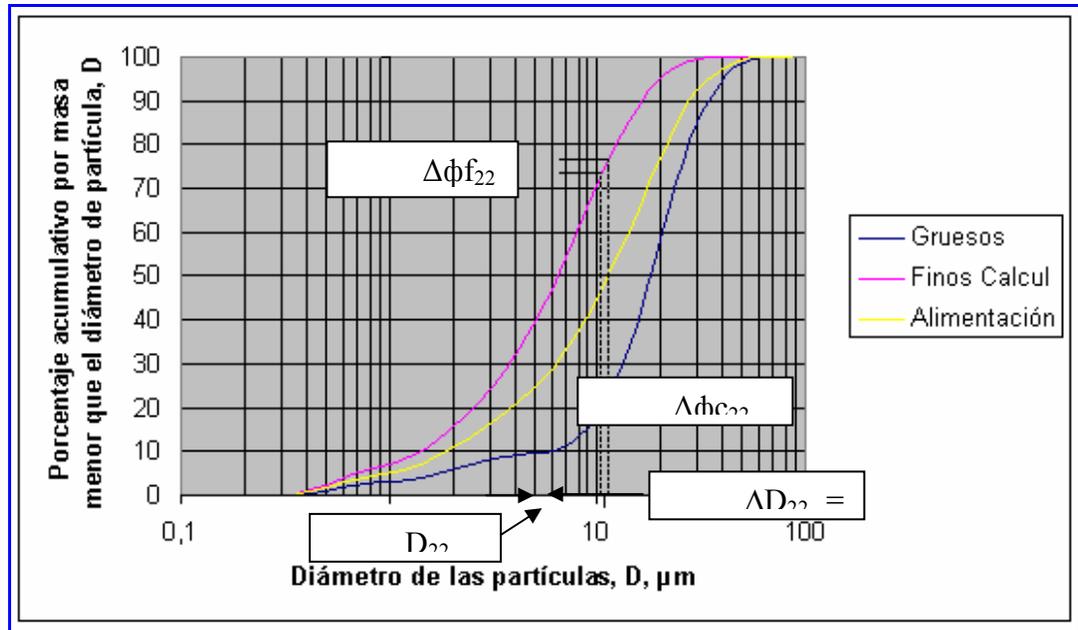


Figura F.8. Gráfica de las distribuciones granulométricas para el cálculo de la curva de Tromp de la corrida 8.

Anexo G.

Tablas de los puntos medio y los intervalos de distribución de tamaños acumulativos.

Tabla G.1. Intervalos de distribución de tamaños acumulativos para la corrida 1.

| N° de intervalo i | Punto medio D_i μm | Intervalos de distribuciones de tamaños acumulativos de la corrida 1 | |
|----------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------|
| | | Grueso $\Delta\phi_{ci}$ % | Fino $\Delta\phi_{fi}$ % |
| 0 | 0,39 | 0,50 | 0,62 |
| 1 | 0,46 | 0,64 | 0,81 |
| 2 | 0,54 | 0,69 | 0,87 |
| 3 | 0,63 | 0,65 | 0,84 |
| 4 | 0,73 | 0,57 | 0,74 |
| 5 | 0,85 | 0,46 | 0,64 |
| 6 | 0,99 | 0,42 | 0,63 |
| 7 | 1,15 | 0,46 | 0,77 |
| 8 | 1,34 | 0,62 | 1,06 |
| 9 | 1,56 | 0,85 | 1,46 |

| | | | |
|----|-------|------|------|
| 10 | 1,82 | 1,10 | 1,86 |
| 11 | 2,12 | 1,26 | 2,14 |
| 12 | 2,47 | 1,37 | 2,27 |
| 13 | 2,87 | 1,53 | 2,44 |
| 14 | 3,35 | 1,80 | 2,71 |
| 15 | 3,90 | 2,13 | 3,04 |
| 16 | 4,54 | 2,55 | 3,42 |
| 17 | 5,29 | 3,09 | 3,90 |
| 18 | 6,16 | 3,72 | 4,45 |
| 19 | 7,18 | 4,44 | 5,05 |
| 20 | 8,36 | 5,22 | 5,25 |
| 21 | 9,74 | 6,01 | 6,71 |
| 22 | 11,35 | 6,77 | 6,77 |
| 23 | 13,22 | 7,36 | 7,05 |
| 24 | 15,40 | 7,70 | 7,03 |
| 25 | 17,94 | 7,68 | 6,66 |
| 26 | 20,90 | 7,28 | 5,93 |
| 27 | 24,35 | 6,51 | 4,92 |
| 28 | 28,37 | 5,48 | 3,78 |
| 29 | 33,05 | 4,3 | 2,63 |
| 30 | 38,50 | 3,09 | 1,63 |
| 31 | 44,85 | 2,00 | 0,88 |
| 32 | 52,25 | 1,08 | 0,40 |
| 33 | 60,87 | 0,40 | 0,15 |
| 34 | 70,92 | 0,00 | 0,06 |

Tabla G.2. Intervalos de distribución de tamaños acumulativos para la corrida 2.

| Nº de intervalo i | Punto medio D_i μm | Intervalos de distribuciones de tamaños acumulativos de la corrida 2 | |
|----------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------------|
| | | Grueso $\Delta\phi_{ci}$ % | Fino $\Delta\phi_{fi}$ % |
| 0 | 0,39 | 0,47 | 0,59 |
| 1 | 0,46 | 0,61 | 0,77 |
| 2 | 0,54 | 0,68 | 0,83 |
| 3 | 0,63 | 0,65 | 0,78 |
| 4 | 0,73 | 0,57 | 0,69 |
| 5 | 0,85 | 0,48 | 0,59 |
| 6 | 0,99 | 0,44 | 0,57 |
| 7 | 1,15 | 0,49 | 0,68 |

| | | | |
|----|-------|------|------|
| 8 | 1,34 | 0,64 | 0,95 |
| 9 | 1,56 | 0,88 | 1,33 |
| 10 | 1,82 | 1,11 | 1,72 |
| 11 | 2,12 | 1,29 | 1,99 |
| 12 | 2,47 | 1,41 | 2,15 |
| 13 | 2,87 | 1,54 | 2,36 |
| 14 | 3,35 | 1,71 | 2,60 |
| 15 | 3,90 | 1,89 | 2,89 |
| 16 | 4,54 | 2,09 | 3,17 |
| 17 | 5,29 | 2,34 | 3,51 |
| 18 | 6,16 | 2,63 | 3,85 |
| 19 | 7,18 | 2,98 | 4,23 |
| 20 | 8,36 | 3,44 | 4,65 |
| 21 | 9,74 | 4,01 | 5,10 |
| 22 | 11,35 | 4,71 | 5,59 |
| 23 | 13,22 | 5,51 | 6,04 |
| 24 | 15,40 | 6,30 | 6,39 |
| 25 | 17,94 | 7,00 | 6,55 |
| 26 | 20,90 | 7,44 | 6,46 |
| 27 | 24,35 | 7,53 | 6,07 |
| 28 | 28,37 | 7,19 | 5,39 |
| 29 | 33,05 | 6,44 | 4,45 |
| 30 | 38,50 | 5,35 | 3,29 |
| 31 | 44,85 | 4,08 | 2,11 |
| 32 | 52,25 | 2,82 | 1,07 |
| 33 | 60,87 | 1,73 | 0,24 |
| 34 | 70,92 | 0,90 | 0,00 |

Tabla G.3. Intervalos de distribución de tamaños acumulativos para la corrida 3.

| Nº de intervalo i | Punto medio D_i μm | Intervalos de distribuciones de tamaños acumulativos de la corrida 3 | |
|----------------------------|---------------------------------|---|-----------------------------|
| | | Grueso $\Delta\phi_{ci}$ % | Fino $\Delta\phi_{fi}$ % |
| 0 | 0,39 | 0,5 | 0,56 |
| 1 | 0,46 | 0,65 | 0,80 |
| 2 | 0,54 | 0,69 | 0,82 |
| 3 | 0,63 | 0,65 | 0,79 |
| 4 | 0,73 | 0,57 | 0,68 |
| 5 | 0,85 | 0,47 | 0,60 |

| | | | |
|----|-------|------|------|
| 6 | 0,99 | 0,44 | 0,61 |
| 7 | 1,15 | 0,52 | 0,75 |
| 8 | 1,34 | 0,71 | 1,08 |
| 9 | 1,56 | 1,00 | 1,50 |
| 10 | 1,82 | 1,29 | 1,91 |
| 11 | 2,12 | 1,50 | 2,19 |
| 12 | 2,47 | 1,61 | 2,31 |
| 13 | 2,87 | 1,76 | 2,43 |
| 14 | 3,35 | 1,97 | 2,62 |
| 15 | 3,90 | 2,22 | 2,86 |
| 16 | 4,54 | 2,49 | 3,12 |
| 17 | 5,29 | 2,83 | 3,49 |
| 18 | 6,16 | 3,23 | 3,93 |
| 19 | 7,18 | 3,69 | 4,45 |
| 20 | 8,36 | 4,23 | 5,03 |
| 21 | 9,74 | 4,85 | 5,64 |
| 22 | 11,35 | 5,52 | 6,22 |
| 23 | 13,22 | 6,19 | 6,66 |
| 24 | 15,40 | 6,74 | 6,89 |
| 25 | 17,94 | 7,10 | 6,80 |
| 26 | 20,90 | 7,13 | 6,37 |
| 27 | 24,35 | 6,81 | 5,62 |
| 28 | 28,37 | 6,12 | 4,62 |
| 29 | 33,05 | 5,15 | 3,50 |
| 30 | 38,50 | 4,02 | 2,42 |
| 31 | 44,85 | 2,90 | 1,46 |
| 32 | 52,25 | 1,92 | 0,72 |
| 33 | 60,87 | 1,16 | 0,23 |
| 34 | 70,92 | 0,64 | 0,00 |

Tabla G.4. Intervalos de distribución de tamaños acumulativos para la corrida 4.

| N° de intervalo i | Punto medio D_i μm | Intervalos de distribuciones de tamaños acumulativos de la corrida 4 | |
|----------------------------|---------------------------------|---|-----------------------------|
| | | Grueso $\Delta\phi_{ci}$ % | Fino $\Delta\phi_{fi}$ % |
| 0 | 0,39 | 0,53 | 0,67 |
| 1 | 0,46 | 0,69 | 0,87 |
| 2 | 0,54 | 0,73 | 0,94 |
| 3 | 0,63 | 0,70 | 0,90 |

| | | | |
|----|-------|------|------|
| 4 | 0,73 | 0,61 | 0,81 |
| 5 | 0,85 | 0,52 | 0,71 |
| 6 | 0,99 | 0,51 | 0,73 |
| 7 | 1,15 | 0,62 | 0,88 |
| 8 | 1,34 | 0,85 | 1,24 |
| 9 | 1,56 | 1,19 | 1,71 |
| 10 | 1,82 | 1,51 | 2,19 |
| 11 | 2,12 | 1,74 | 2,47 |
| 12 | 2,47 | 1,84 | 2,56 |
| 13 | 2,87 | 1,97 | 2,67 |
| 14 | 3,35 | 2,18 | 2,86 |
| 15 | 3,90 | 2,44 | 3,08 |
| 16 | 4,54 | 2,75 | 3,36 |
| 17 | 5,29 | 3,16 | 3,76 |
| 18 | 6,16 | 3,66 | 4,23 |
| 19 | 7,18 | 4,27 | 4,79 |
| 20 | 8,36 | 4,95 | 5,40 |
| 21 | 9,74 | 5,69 | 6,00 |
| 22 | 11,35 | 6,40 | 6,50 |
| 23 | 13,22 | 6,99 | 6,82 |
| 24 | 15,40 | 7,33 | 6,86 |
| 25 | 17,94 | 7,32 | 6,56 |
| 26 | 20,90 | 6,91 | 5,90 |
| 27 | 24,35 | 6,14 | 4,95 |
| 28 | 28,37 | 5,08 | 3,83 |
| 29 | 33,05 | 3,89 | 2,68 |
| 30 | 38,50 | 2,70 | 1,65 |
| 31 | 44,85 | 1,68 | 0,81 |
| 32 | 52,25 | 0,91 | 0,23 |
| 33 | 60,87 | 0,42 | 0,00 |
| 34 | 70,92 | 0,16 | 0,00 |

Tabla G.5. Intervalos de distribución de tamaños acumulativos para la corrida 5.

| Nº de intervalo i | Punto medio D_i μm | Intervalos de distribuciones de tamaños acumulativos de la corrida 5 | |
|----------------------|------------------------------|--|-----------------------------|
| | | Grueso $\Delta\phi_{ci}$ % | Fino $\Delta\phi_{fi}$ % |
| 0 | 0,39 | 0,66 | 0,65 |
| 1 | 0,46 | 0,86 | 0,84 |

| | | | |
|----|-------|-------|------|
| 0 | 0,39 | 0,38 | 0,80 |
| 1 | 0,46 | 0,49 | 1,03 |
| 2 | 0,54 | 0,53 | 1,13 |
| 3 | 0,63 | 0,49 | 1,08 |
| 4 | 0,73 | 0,41 | 0,97 |
| 5 | 0,85 | 0,32 | 0,86 |
| 6 | 0,99 | 0,29 | 0,75 |
| 7 | 1,15 | 0,35 | 0,91 |
| 8 | 1,34 | 0,51 | 1,29 |
| 9 | 1,56 | 0,74 | 1,84 |
| 10 | 1,82 | 0,96 | 2,42 |
| 11 | 2,12 | 1,07 | 2,84 |
| 12 | 2,47 | 1,05 | 3,06 |
| 13 | 2,87 | 0,98 | 3,37 |
| 14 | 3,35 | 0,88 | 3,84 |
| 15 | 3,90 | 0,79 | 4,36 |
| 16 | 4,54 | 0,60 | 4,92 |
| 17 | 5,29 | 0,73 | 5,57 |
| 18 | 6,16 | 1,08 | 6,18 |
| 19 | 7,18 | 1,77 | 6,72 |
| 20 | 8,36 | 2,85 | 7,08 |
| 21 | 9,74 | 4,35 | 7,20 |
| 22 | 11,35 | 6,17 | 7,01 |
| 23 | 13,22 | 8,09 | 6,46 |
| 24 | 15,40 | 9,76 | 5,57 |
| 25 | 17,94 | 10,81 | 4,48 |
| 26 | 20,90 | 10,94 | 3,29 |
| 27 | 24,35 | 10,11 | 2,19 |
| 28 | 28,37 | 8,45 | 1,30 |
| 29 | 33,05 | 6,35 | 0,68 |
| 30 | 38,50 | 4,17 | 0,28 |
| 31 | 44,85 | 2,3 | 0,07 |
| 32 | 52,25 | 0,92 | 0,00 |
| 33 | 60,87 | 0,12 | 0,00 |
| 34 | 70,92 | 0,00 | 0,00 |

Tabla G.7. Intervalos de distribución de tamaños acumulativos para la corrida 7.

| N° de intervalo | Punto medio D_i μm | Intervalos de distribuciones de tamaños acumulativos de la corrida 7 | |
|-----------------------|---------------------------------|---|------------------------|
| | | Grueso | Fino $\Delta\phi_{fi}$ |

| i | | $\Delta\phi_{ci}$ | % |
|----|-------|-------------------|------|
| | | % | |
| 0 | 0,39 | 0,35 | 0,79 |
| 1 | 0,46 | 0,45 | 1,03 |
| 2 | 0,54 | 0,48 | 1,13 |
| 3 | 0,63 | 0,46 | 1,10 |
| 4 | 0,73 | 0,40 | 0,98 |
| 5 | 0,85 | 0,34 | 0,88 |
| 6 | 0,99 | 0,33 | 0,88 |
| 7 | 1,15 | 0,39 | 1,07 |
| 8 | 1,34 | 0,53 | 1,45 |
| 9 | 1,56 | 0,70 | 2,00 |
| 10 | 1,82 | 0,85 | 2,57 |
| 11 | 2,12 | 0,89 | 3,01 |
| 12 | 2,47 | 0,81 | 3,34 |
| 13 | 2,87 | 0,71 | 3,74 |
| 14 | 3,35 | 0,59 | 4,26 |
| 15 | 3,90 | 0,49 | 4,84 |
| 16 | 4,54 | 0,48 | 5,43 |
| 17 | 5,29 | 0,60 | 6,01 |
| 18 | 6,16 | 0,98 | 6,52 |
| 19 | 7,18 | 1,67 | 6,86 |
| 20 | 8,36 | 2,72 | 6,98 |
| 21 | 9,74 | 4,10 | 6,86 |
| 22 | 11,35 | 5,76 | 6,48 |
| 23 | 13,22 | 7,50 | 6,38 |
| 24 | 15,40 | 9,07 | 4,43 |
| 25 | 17,94 | 10,19 | 3,96 |
| 26 | 20,90 | 10,57 | 2,91 |
| 27 | 24,35 | 10,13 | 1,93 |
| 28 | 28,37 | 8,94 | 1,12 |
| 29 | 33,05 | 7,21 | 0,52 |
| 30 | 38,50 | 5,26 | 0,11 |
| 31 | 44,85 | 3,38 | 0,00 |
| 32 | 52,25 | 1,79 | 0,00 |
| 33 | 60,87 | 0,66 | 0,00 |
| 34 | 70,92 | 0,03 | 0,00 |

Tabla G.8. Intervalos de distribución de tamaños acumulativos para la corrida 8.

| Nº | Punto | Intervalos de distribuciones de |
|----|-------|---------------------------------|
|----|-------|---------------------------------|

| de intervalo i | medio D_i μm | tamaños acumulativos de la corrida 8 | |
|----------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| | | Grueso $\Delta\phi_{ci}$ % | Fino $\Delta\phi_{fi}$ % |
| 0 | 0,39 | 0,39 | 0,82 |
| 1 | 0,46 | 0,49 | 1,06 |
| 2 | 0,54 | 0,53 | 1,17 |
| 3 | 0,63 | 0,50 | 1,15 |
| 4 | 0,73 | 0,41 | 1,05 |
| 5 | 0,85 | 0,35 | 0,96 |
| 6 | 0,99 | 0,31 | 0,97 |
| 7 | 1,15 | 0,37 | 1,15 |
| 8 | 1,34 | 0,52 | 1,54 |
| 9 | 1,56 | 0,71 | 2,05 |
| 10 | 1,82 | 0,89 | 2,56 |
| 11 | 2,12 | 0,93 | 2,95 |
| 12 | 2,47 | 0,86 | 3,24 |
| 13 | 2,87 | 0,72 | 3,58 |
| 14 | 3,35 | 0,57 | 4,06 |
| 15 | 3,90 | 0,43 | 4,65 |
| 16 | 4,54 | 0,29 | 5,29 |
| 17 | 5,29 | 0,42 | 5,99 |
| 18 | 6,16 | 0,79 | 6,59 |
| 19 | 7,18 | 1,55 | 7,05 |
| 20 | 8,36 | 2,73 | 7,26 |
| 21 | 9,74 | 4,35 | 7,16 |
| 22 | 11,35 | 6,27 | 6,72 |
| 23 | 13,22 | 8,25 | 6,00 |
| 24 | 15,40 | 9,93 | 5,01 |
| 25 | 17,94 | 10,99 | 3,89 |
| 26 | 20,90 | 11,12 | 2,75 |
| 27 | 24,35 | 10,29 | 1,72 |
| 28 | 28,37 | 8,65 | 0,89 |
| 29 | 33,05 | 6,58 | 0,29 |
| 30 | 38,50 | 4,43 | 0,00 |
| 31 | 44,85 | 2,58 | 0,00 |
| 32 | 52,25 | 1,21 | 0,00 |
| 33 | 60,87 | 0,38 | 0,00 |
| 34 | 70,92 | 0,00 | 0,00 |

Anexo H.

Tablas del diámetro versus selectividad para la construcción de las curvas de Tromp.

Tabla H.1. Datos de los diámetros versus selectividad para construir la curva de Tromp para la corrida 1.

| N° de intervalo i | Punto medio D_i μm | S_{D_i} % |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 0 | 0,39 | 9,61 |
| 1 | 0,46 | 9,43 |
| 2 | 0,54 | 9,46 |
| 3 | 0,63 | 9,25 |
| 4 | 0,73 | 9,22 |
| 5 | 0,85 | 8,65 |
| 6 | 0,99 | 8,08 |
| 7 | 1,15 | 7,30 |
| 8 | 1,34 | 7,16 |
| 9 | 1,56 | 7,13 |
| 10 | 1,82 | 7,23 |
| 11 | 2,12 | 7,20 |
| 12 | 2,47 | 7,37 |
| 13 | 2,87 | 7,63 |
| 14 | 3,35 | 8,05 |
| 15 | 3,90 | 8,45 |
| 16 | 4,54 | 8,95 |
| 17 | 5,29 | 9,45 |
| 18 | 6,16 | 9,92 |
| 19 | 7,18 | 10,38 |
| 20 | 8,36 | 11,59 |
| 21 | 9,74 | 10,56 |
| 22 | 11,35 | 11,64 |
| 23 | 13,22 | 12,09 |
| 24 | 15,40 | 12,61 |
| 25 | 17,94 | 13,19 |
| 26 | 20,90 | 13,93 |
| 27 | 24,35 | 14,85 |
| 28 | 28,37 | 16,04 |
| 29 | 33,05 | 17,73 |
| 30 | 38,50 | 19,99 |
| 31 | 44,85 | 23,05 |
| 32 | 52,25 | 26,25 |
| 33 | 60,87 | 26,01 |
| 34 | 70,92 | 100,00 |

Tabla H.2. Datos de los diámetros versus selectividad para construir la curva de Tromp para la corrida 2.

| N° de intervalo i | Punto medio D_i μm | S_{D_i} % |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 0 | 0,39 | 11,72 |
| 1 | 0,46 | 11,66 |
| 2 | 0,54 | 12,01 |
| 3 | 0,63 | 12,20 |
| 4 | 0,73 | 12,10 |
| 5 | 0,85 | 11,94 |
| 6 | 0,99 | 11,40 |
| 7 | 1,15 | 10,72 |
| 8 | 1,34 | 10,09 |
| 9 | 1,56 | 9,93 |
| 10 | 1,82 | 9,71 |
| 11 | 2,12 | 9,75 |
| 12 | 2,47 | 9,85 |
| 13 | 2,87 | 9,81 |
| 14 | 3,35 | 9,88 |
| 15 | 3,90 | 9,83 |
| 16 | 4,54 | 9,90 |
| 17 | 5,29 | 10,00 |
| 18 | 6,16 | 10,22 |
| 19 | 7,18 | 10,51 |
| 20 | 8,36 | 10,98 |
| 21 | 9,74 | 11,59 |
| 22 | 11,35 | 12,31 |
| 23 | 13,22 | 13,20 |
| 24 | 15,40 | 14,11 |
| 25 | 17,94 | 15,12 |
| 26 | 20,90 | 16,10 |
| 27 | 24,35 | 17,13 |
| 28 | 28,37 | 18,19 |
| 29 | 33,05 | 19,43 |
| 30 | 38,50 | 21,32 |
| 31 | 44,85 | 24,37 |
| 32 | 52,25 | 30,52 |
| 33 | 60,87 | 54,57 |
| 34 | 70,92 | 100,00 |

Tabla H.3. Datos de los diámetros versus selectividad para construir la curva de Tromp para la corrida 3.

| N° de intervalo i | Punto medio D_i μm | S_{D_i} % |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 0 | 0,39 | 14,21 |
| 1 | 0,46 | 13,09 |
| 2 | 0,54 | 13,50 |
| 3 | 0,63 | 13,24 |
| 4 | 0,73 | 13,45 |
| 5 | 0,85 | 12,68 |
| 6 | 0,99 | 11,80 |
| 7 | 1,15 | 11,39 |
| 8 | 1,34 | 10,87 |
| 9 | 1,56 | 11,00 |
| 10 | 1,82 | 11,13 |
| 11 | 2,12 | 11,27 |
| 12 | 2,47 | 11,45 |
| 13 | 2,87 | 11,84 |
| 14 | 3,35 | 12,24 |
| 15 | 3,90 | 12,58 |
| 16 | 4,54 | 12,89 |
| 17 | 5,29 | 13,07 |
| 18 | 6,16 | 13,23 |
| 19 | 7,18 | 13,33 |
| 20 | 8,36 | 13,49 |
| 21 | 9,74 | 13,75 |
| 22 | 11,35 | 14,13 |
| 23 | 13,22 | 14,70 |
| 24 | 15,40 | 15,35 |
| 25 | 17,94 | 16,22 |
| 26 | 20,90 | 17,19 |
| 27 | 24,35 | 18,35 |
| 28 | 28,37 | 19,72 |
| 29 | 33,05 | 21,44 |
| 30 | 38,50 | 23,55 |
| 31 | 44,85 | 26,92 |
| 32 | 52,25 | 33,09 |
| 33 | 60,87 | 48,33 |
| 34 | 70,92 | 100,00 |

Tabla H.4. Datos de los diámetros versus selectividad para construir la curva de Tromp para la corrida 4.

| N° de intervalo i | Punto medio D_i μm | S_{D_i} % |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 0 | 0,39 | 13,87 |
| 1 | 0,46 | 13,90 |
| 2 | 0,54 | 13,65 |
| 3 | 0,63 | 13,66 |
| 4 | 0,73 | 13,29 |
| 5 | 0,85 | 12,97 |
| 6 | 0,99 | 12,45 |
| 7 | 1,15 | 12,54 |
| 8 | 1,34 | 12,24 |
| 9 | 1,56 | 12,40 |
| 10 | 1,82 | 12,30 |
| 11 | 2,12 | 12,54 |
| 12 | 2,47 | 12,76 |
| 13 | 2,87 | 13,05 |
| 14 | 3,35 | 13,43 |
| 15 | 3,90 | 13,88 |
| 16 | 4,54 | 14,28 |
| 17 | 5,29 | 14,60 |
| 18 | 6,16 | 14,97 |
| 19 | 7,18 | 15,35 |
| 20 | 8,36 | 15,72 |
| 21 | 9,74 | 16,18 |
| 22 | 11,35 | 16,69 |
| 23 | 13,22 | 17,26 |
| 24 | 15,40 | 17,86 |
| 25 | 17,94 | 18,50 |
| 26 | 20,90 | 19,25 |
| 27 | 24,35 | 20,15 |
| 28 | 28,37 | 21,25 |
| 29 | 33,05 | 22,80 |
| 30 | 38,50 | 24,98 |
| 31 | 44,85 | 29,68 |
| 32 | 52,25 | 44,60 |
| 33 | 60,87 | 100,00 |
| 34 | 70,92 | 100,00 |

Tabla H.5. Datos de los diámetros versus selectividad para construir la curva de Tromp para la corrida 5.

| N° de intervalo i | Punto medio D_i μm | S_{D_i} % |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 0 | 0,39 | 13,42 |
| 1 | 0,46 | 13,38 |
| 2 | 0,54 | 13,64 |
| 3 | 0,63 | 13,31 |
| 4 | 0,73 | 13,55 |
| 5 | 0,85 | 13,82 |
| 6 | 0,99 | 12,88 |
| 7 | 1,15 | 12,55 |
| 8 | 1,34 | 12,23 |
| 9 | 1,56 | 12,18 |
| 10 | 1,82 | 12,09 |
| 11 | 2,12 | 12,01 |
| 12 | 2,47 | 12,09 |
| 13 | 2,87 | 12,17 |
| 14 | 3,35 | 12,51 |
| 15 | 3,90 | 12,72 |
| 16 | 4,54 | 13,14 |
| 17 | 5,29 | 13,40 |
| 18 | 6,16 | 13,73 |
| 19 | 7,18 | 14,01 |
| 20 | 8,36 | 14,22 |
| 21 | 9,74 | 14,49 |
| 22 | 11,35 | 14,78 |
| 23 | 13,22 | 15,11 |
| 24 | 15,40 | 15,59 |
| 25 | 17,94 | 16,23 |
| 26 | 20,90 | 17,05 |
| 27 | 24,35 | 18,12 |
| 28 | 28,37 | 19,71 |
| 29 | 33,05 | 21,75 |
| 30 | 38,50 | 24,75 |

| | | |
|----|-------|--------|
| 31 | 44,85 | 30,76 |
| 32 | 52,25 | 47,29 |
| 33 | 60,87 | 100,00 |
| 34 | 70,92 | 100,00 |

Tabla H.6. Datos de los diámetros versus selectividad para construir la curva de Tromp para la corrida 6.

| N° de intervalo i | Punto medio D_i μm | S_{D_i} % |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 0 | 0,39 | 21,48 |
| 1 | 0,46 | 21,51 |
| 2 | 0,54 | 21,27 |
| 3 | 0,63 | 20,72 |
| 4 | 0,73 | 19,58 |
| 5 | 0,85 | 17,65 |
| 6 | 0,99 | 18,22 |
| 7 | 1,15 | 18,14 |
| 8 | 1,34 | 18,55 |
| 9 | 1,56 | 18,81 |
| 10 | 1,82 | 18,60 |
| 11 | 2,12 | 17,83 |
| 12 | 2,47 | 16,50 |
| 13 | 2,87 | 14,35 |
| 14 | 3,35 | 11,66 |
| 15 | 3,90 | 9,45 |
| 16 | 4,54 | 6,56 |
| 17 | 5,29 | 7,02 |
| 18 | 6,16 | 9,15 |
| 19 | 7,18 | 13,17 |
| 20 | 8,36 | 18,82 |
| 21 | 9,74 | 25,82 |
| 22 | 11,35 | 33,64 |
| 23 | 13,22 | 41,91 |
| 24 | 15,40 | 50,23 |
| 25 | 17,94 | 58,16 |
| 26 | 20,90 | 65,70 |
| 27 | 24,35 | 72,67 |
| 28 | 28,37 | 78,92 |
| 29 | 33,05 | 84,32 |
| 30 | 38,50 | 89,56 |
| 31 | 44,85 | 94,98 |
| 32 | 52,25 | 100,00 |
| 33 | 60,87 | 100,00 |

| | | |
|----|-------|--------|
| 34 | 70,92 | 100,00 |
|----|-------|--------|

Tabla H.7. Datos de los diámetros versus selectividad para construir la curva de Tromp para la corrida 7.

| N° de intervalo i | Punto medio D_i μm | S_{D_i} % |
|----------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 0 | 0,39 | 28,47 |
| 1 | 0,46 | 28,18 |
| 2 | 0,54 | 27,62 |
| 3 | 0,63 | 27,31 |
| 4 | 0,73 | 26,83 |
| 5 | 0,85 | 25,76 |
| 6 | 0,99 | 25,20 |
| 7 | 1,15 | 24,66 |
| 8 | 1,34 | 24,72 |
| 9 | 1,56 | 23,92 |
| 10 | 1,82 | 22,90 |
| 11 | 2,12 | 20,98 |
| 12 | 2,47 | 17,89 |
| 13 | 2,87 | 14,57 |
| 14 | 3,35 | 11,06 |
| 15 | 3,90 | 8,34 |
| 16 | 4,54 | 7,36 |
| 17 | 5,29 | 8,23 |
| 18 | 6,16 | 11,89 |
| 19 | 7,18 | 17,94 |
| 20 | 8,36 | 25,93 |
| 21 | 9,74 | 34,93 |
| 22 | 11,35 | 44,40 |
| 23 | 13,22 | 51,36 |
| 24 | 15,40 | 64,78 |
| 25 | 17,94 | 69,80 |
| 26 | 20,90 | 76,54 |
| 27 | 24,35 | 82,50 |
| 28 | 28,37 | 87,76 |
| 29 | 33,05 | 92,57 |
| 30 | 38,50 | 97,72 |
| 31 | 44,85 | 100,00 |

| | | |
|----|-------|--------|
| 32 | 52,25 | 100,00 |
| 33 | 60,87 | 100,00 |
| 34 | 70,92 | 100,00 |

Tabla H.8. Datos de los diámetros versus selectividad para construir la curva de Tromp para la corrida 8.

| Nº de intervalo i | Punto medio D_i μm | S_{D_i} % |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 0 | 0,39 | 31,63 |
| 1 | 0,46 | 31,01 |
| 2 | 0,54 | 30,58 |
| 3 | 0,63 | 29,71 |
| 4 | 0,73 | 27,52 |
| 5 | 0,85 | 26,17 |
| 6 | 0,99 | 23,71 |
| 7 | 1,15 | 23,83 |
| 8 | 1,34 | 24,72 |
| 9 | 1,56 | 25,19 |
| 10 | 1,82 | 25,26 |
| 11 | 2,12 | 23,46 |
| 12 | 2,47 | 20,52 |
| 13 | 2,87 | 16,36 |
| 14 | 3,35 | 12,01 |
| 15 | 3,90 | 8,25 |
| 16 | 4,54 | 5,06 |
| 17 | 5,29 | 6,38 |
| 18 | 6,16 | 10,44 |
| 19 | 7,18 | 17,61 |
| 20 | 8,36 | 26,77 |
| 21 | 9,74 | 37,14 |
| 22 | 11,35 | 47,57 |
| 23 | 13,22 | 57,21 |
| 24 | 15,40 | 65,84 |
| 25 | 17,94 | 73,31 |
| 26 | 20,90 | 79,72 |
| 27 | 24,35 | 85,33 |

| | | |
|----|-------|--------|
| 28 | 28,37 | 90,43 |
| 29 | 33,05 | 95,66 |
| 30 | 38,50 | 100,00 |
| 31 | 44,85 | 100,00 |
| 32 | 52,25 | 100,00 |
| 33 | 60,87 | 100,00 |
| 34 | 70,92 | 100,00 |

Anexo I.**Figuras de la selectividad.**

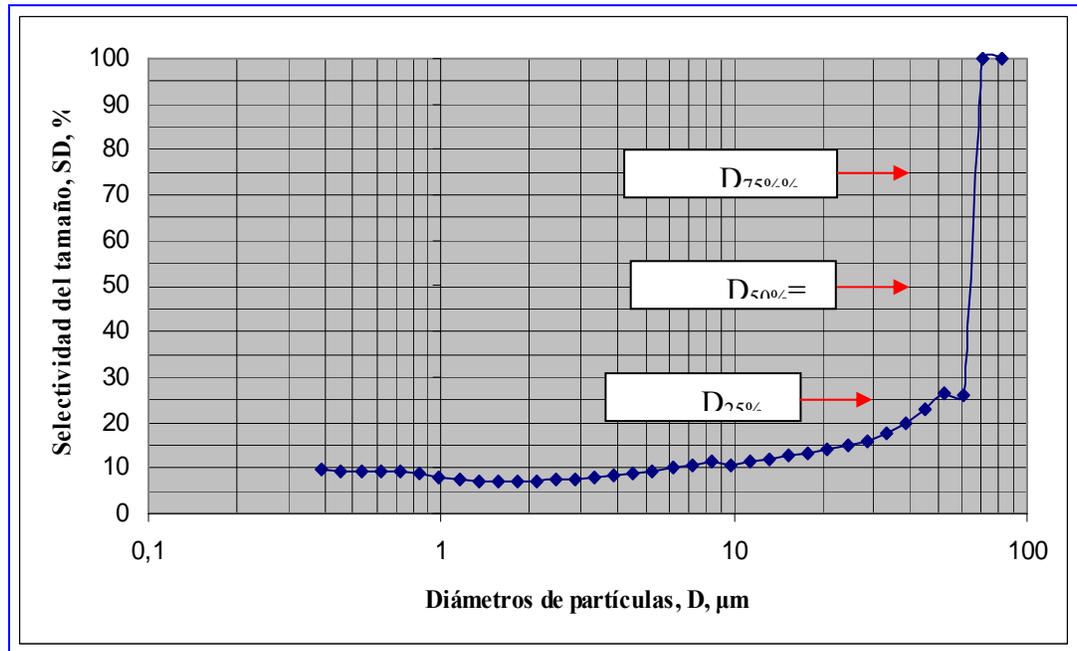


Figura I.1. Representación de la curva de selectividad para la corrida 1.

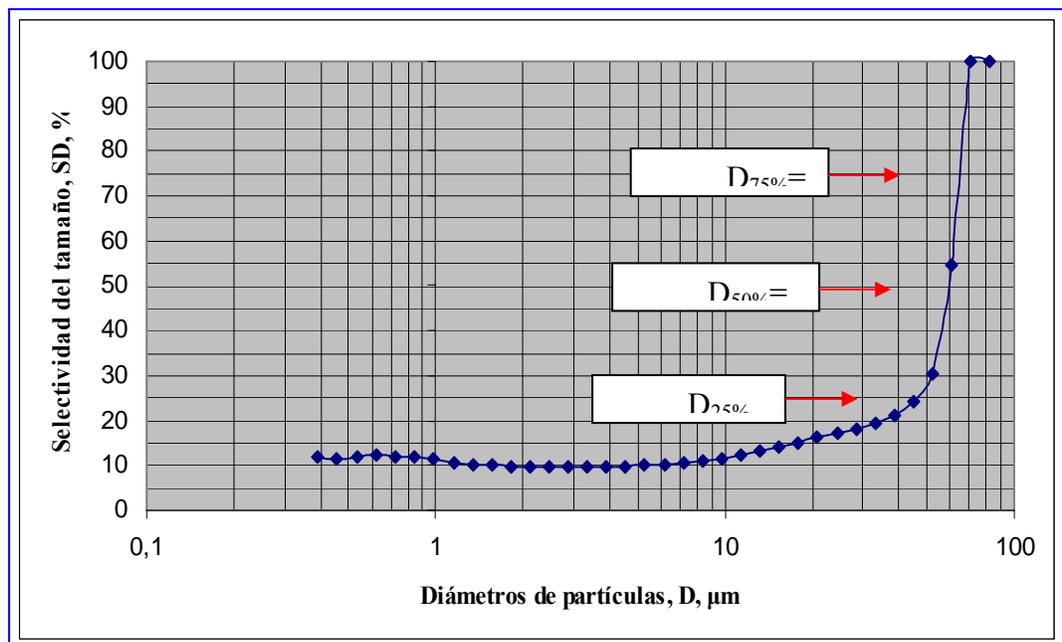
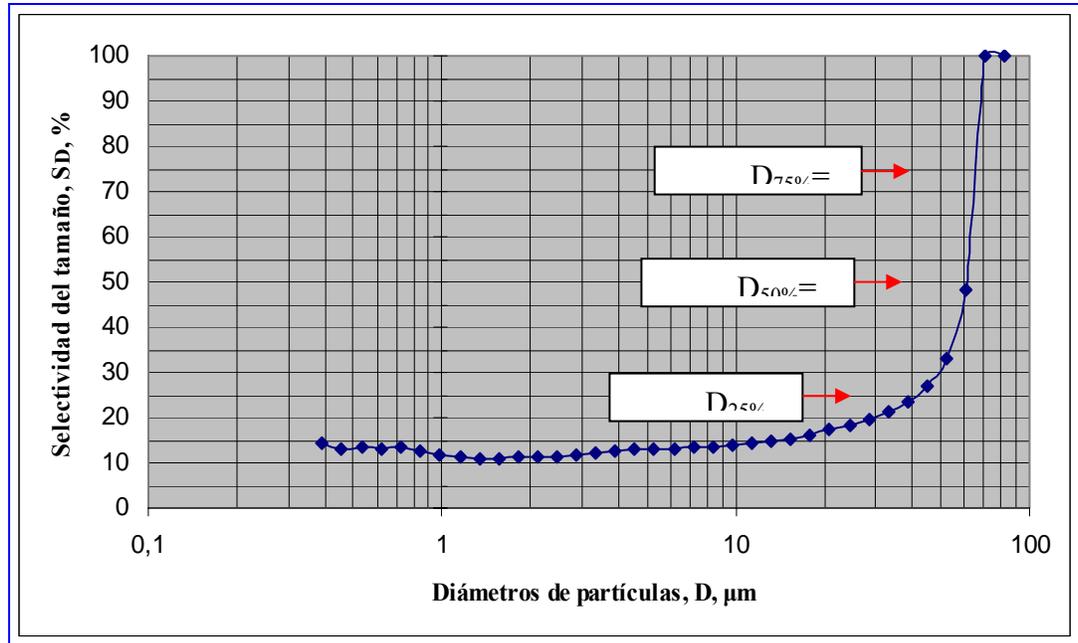


Figura I.2. Representación de la curva de selectividad para la corrida 2.**Figura I.3. Representación de la curva de selectividad para la corrida 3.**

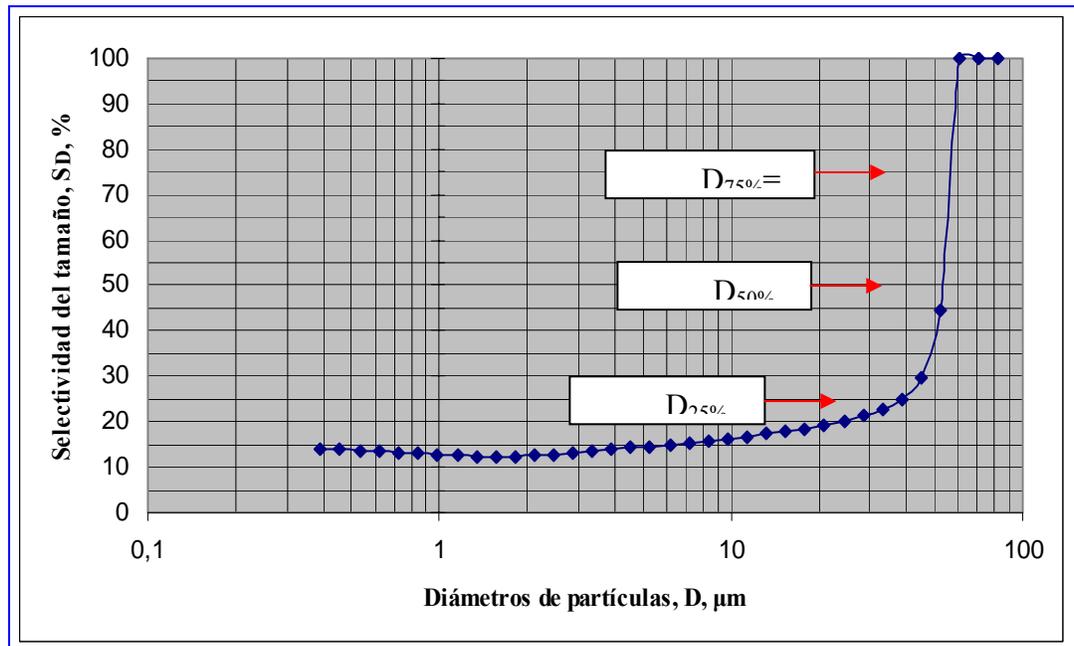


Figura I.4. Representación de la curva de selectividad para la corrida 4.

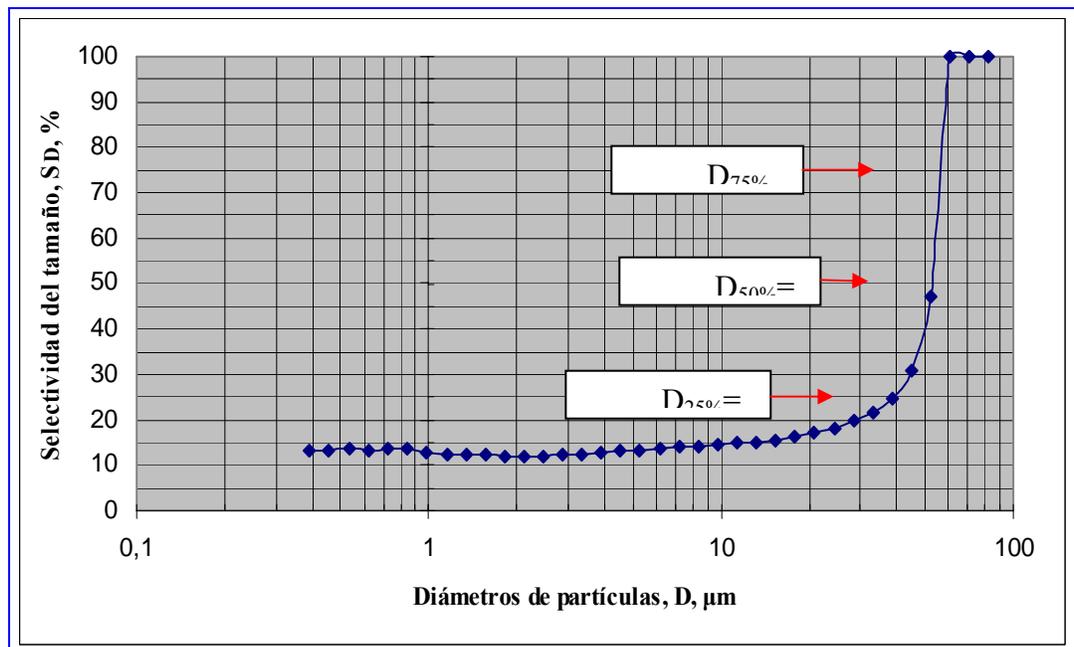


Figura I.5. Representación de la curva de selectividad para la corrida 5.

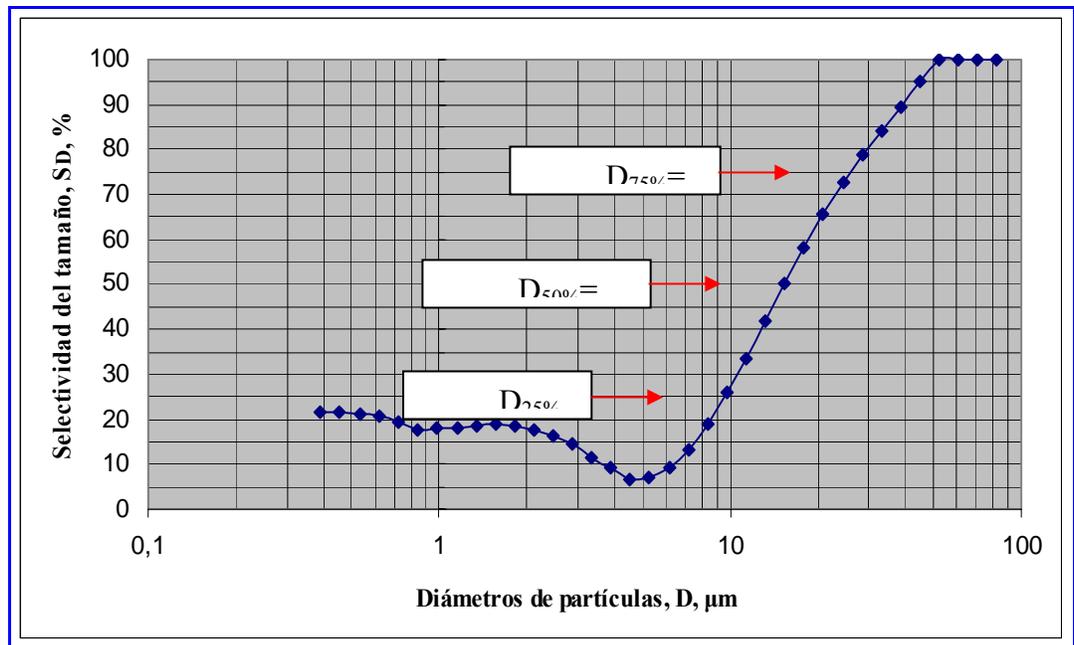


Figura I.6. Representación de la curva de selectividad para la corrida 6.

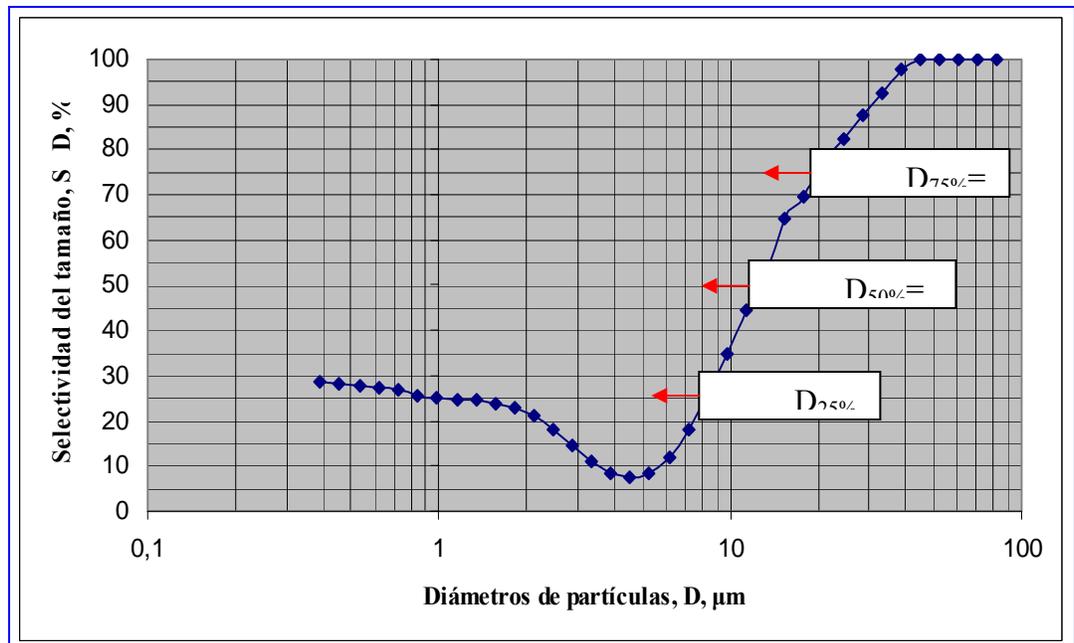


Figura I.7. Representación de la curva de selectividad para la corrida 7.

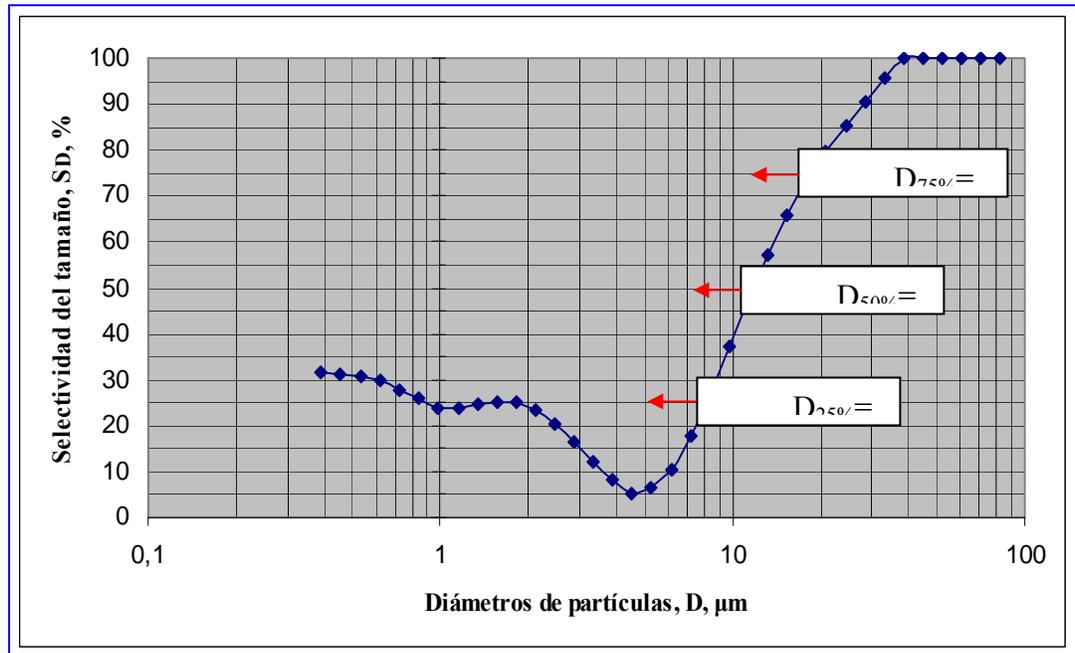


Figura I.8. Representación de la curva de selectividad para la corrida 8.

Anexo J.

Tablas de los promedios de los análisis estadísticos del Malvern.

Tabla J.1. Análisis estadísticos por Malvern de los materiales alimentados.

| Alimentación de la corrida | D _{50%} μm | Área superficial m ² /g |
|-------------------------------|------------------------|--|
| 1 | 11,05 | 0,4976 |
| 2 | 13,41 | 0,4641 |
| 3 | 12,03 | 0,4792 |
| 4 | 11,43 | 0,4884 |
| 5 | 10,66 | 0,5094 |
| 6 | 10,56 | 0,5004 |
| 7 | 11,43 | 0,4938 |
| 8 | 11,33 | 0,4971 |

Tabla J.2. Análisis estadísticos por Malvern de los productos gruesos del microclasificador.

| Producto de la corrida | D _{50%} μm | Área superficial m ² /g |
|------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 12,98 | 0,4065 |
| 2 | 16,90 | 0,3793 |
| 3 | 14,27 | 0,4088 |
| 4 | 12,27 | 0,4474 |
| 5 | 11,56 | 0,4714 |
| 6 | 17,60 | 0,3088 |
| 7 | 18,74 | 0,2894 |
| 8 | 18,09 | 0,2998 |

Tabla J.3. Análisis estadísticos por Malvern de los productos del ciclón.

| Producto de la corrida | D _{50%} μm | Área superficial m ² /g |
|------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 11,22 | 0,4815 |
| 2 | 13,41 | 0,4349 |
| 3 | 12,29 | 0,4536 |
| 4 | 10,95 | 0,5036 |
| 5 | 10,81 | 0,4595 |
| 6 | 7,88 | 0,5913 |
| 7 | 7,05 | 0,6364 |
| 8 | 7,05 | 0,6466 |

Tabla J.4. Análisis estadísticos por Malvern de los productos del filtro de manga.

| Producto de la corrida | D _{50%} μm | Área superficial m ² /g |
|------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 5,03 | 0,7665 |
| 2 | 4,58 | 0,8180 |
| 3 | 4,35 | 0,8377 |
| 4 | 4,13 | 0,8849 |
| 5 | 4,35 | 0,8698 |
| 6 | 3,78 | 0,9334 |
| 7 | 4,29 | 0,8472 |
| 8 | 4,30 | 0,8538 |

Anexo K.

Tablas de la distribución granulométrica.

Tabla K.1. Distribuciones granulométricas de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y gruesos a la salida del microclasificador para la corrida 1.

| Número de intervalo | Día metros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 1 | | | |
|---------------------|---|--|---------------|---------------|------------------|
| | | Alimen tación | Ciclón | Filtro | Grue so |
| | | ϕ_a % < D | ϕ_j % <D | ϕ_l % <D | ϕ_c % <D |
| 0 | 0,36 | 0,33 | 0,32 | 0,51 | 0,27 |
| 1 | 0,42 | 0,93 | 0,89 | 1,45 | 0,77 |
| 2 | 0,49 | 1,72 | 1,64 | 2,66 | 1,41 |
| 3 | 0,58 | 2,57 | 2,44 | 3,97 | 2,10 |
| 4 | 0,67 | 3,39 | 3,21 | 5,22 | 2,75 |
| 5 | 0,78 | 4,11 | 3,89 | 6,30 | 3,32 |
| 6 | 0,91 | 4,74 | 4,48 | 7,22 | 3,78 |
| 7 | 1,06 | 5,35 | 5,07 | 8,09 | 4,20 |
| 8 | 1,24 | 6,07 | 5,79 | 9,15 | 4,66 |
| 9 | 1,44 | 7,06 | 6,78 | 10,67 | 5,28 |
| 1 | 1,68 | 8,42 | 8,12 | 12,88 | 6,13 |
| 1 | 1,95 | 10,14 | 9,8 | 15,86 | 7,23 |

| | | | | | |
|---|------|--------|-------|--------|------|
| 1 | 2,28 | 12,12 | 11,68 | 19,58 | 8,49 |
| 1 | 2,65 | 14,23 | 13,61 | 23,95 | 9,86 |
| 1 | 3,09 | 16,47 | 15,62 | 29,03 | 11,3 |
| 1 | 3,60 | 18,89 | 17,81 | 34,88 | 13,1 |
| 1 | 4,19 | 21,54 | 20,27 | 41,44 | 15,3 |
| 1 | 4,88 | 24,49 | 23,08 | 48,55 | 17,8 |
| 1 | 5,69 | 27,86 | 26,40 | 55,99 | 20,9 |
| 1 | 6,63 | 31,75 | 30,35 | 63,46 | 24,6 |
| 2 | 7,72 | 36,30 | 35,05 | 70,65 | 29,1 |
| 2 | 9,00 | 41,60 | 40,07 | 77,27 | 34,3 |
| 2 | 10,4 | 47,70 | 46,92 | 83,11 | 40,3 |
| 2 | 12,2 | 54,52 | 53,99 | 88,04 | 47,1 |
| 2 | 14,2 | 61,88 | 61,55 | 92,00 | 54,4 |
| 2 | 16,5 | 69,45 | 69,24 | 95,03 | 62,1 |
| 2 | 19,3 | 76,80 | 76,64 | 97,20 | 69,8 |
| 2 | 22,4 | 83,50 | 83,31 | 98,63 | 77,1 |
| 2 | 26,2 | 89,20 | 88,90 | 99,47 | 83,6 |
| 2 | 30,5 | 93,64 | 93,23 | 99,88 | 89,1 |
| 3 | 35,5 | 96,78 | 96,27 | 100,00 | 93,4 |
| 3 | 41,4 | 98,70 | 98,17 | 100,00 | 96,5 |
| 3 | 48,2 | 99,66 | 99,20 | 100,00 | 98,5 |
| 3 | 56,2 | 100,00 | 99,66 | 100,00 | 99,6 |
| 3 | 65,5 | 100,00 | 99,83 | 100,00 | 100, |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 99,90 | 100,00 | 100, |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 99,97 | 100,00 | 100, |

Tabla K.2. Distribuciones granulométricas de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y gruesos a la salida del microclasificador para la corrida 2.

| N de interval o n | Día metros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 2 | | | |
|----------------------------|---|--|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | G rueso ϕ c % < D |
| 0 | 0,36 | 0,33 | 0,29 | 0,54 | 0, |
| 1 | 0,42 | 0,85 | 0,82 | 1,52 | 0, |
| 2 | 0,49 | 1,57 | 1,51 | 2,79 | 1, |
| 3 | 0,58 | 2,34 | 2,26 | 4,17 | 2, |
| 4 | 0,67 | 3,09 | 2,96 | 5,48 | 2, |
| 5 | 0,78 | 3,76 | 3,58 | 6,63 | 3, |

| | | | | | |
|---|------|--------|--------|--------|----|
| 6 | 0,91 | 4,35 | 4,10 | 7,64 | 3, |
| 7 | 1,06 | 4,96 | 4,60 | 8,66 | 4, |
| 8 | 1,24 | 5,70 | 5,19 | 9,96 | 4, |
| 9 | 1,44 | 6,73 | 6,00 | 11,84 | 5, |
| 1 | 1,68 | 8,17 | 7,12 | 14,53 | 6, |
| 1 | 1,95 | 9,91 | 8,55 | 18,12 | 7, |
| 1 | 2,28 | 11,92 | 10,18 | 22,47 | 8, |
| 1 | 2,65 | 14,04 | 11,90 | 27,45 | 9, |
| 1 | 3,09 | 16,24 | 13,76 | 33,04 | 1 |
| 1 | 3,60 | 18,54 | 15,81 | 39,24 | 1 |
| 1 | 4,19 | 20,95 | 18,11 | 45,95 | 1 |
| 1 | 4,88 | 23,52 | 20,69 | 52,99 | 1 |
| 1 | 5,69 | 26,30 | 23,64 | 60,16 | 1 |
| 1 | 6,63 | 29,36 | 27,00 | 67,19 | 2 |
| 2 | 7,72 | 32,81 | 30,86 | 73,84 | 2 |
| 2 | 9,00 | 41,28 | 35,30 | 79,89 | 2 |
| 2 | 10,4 | 46,48 | 40,37 | 85,19 | 3 |
| 2 | 12,2 | 52,36 | 46,13 | 89,65 | 3 |
| 2 | 14,2 | 58,85 | 52,55 | 93,21 | 4 |
| 2 | 16,5 | 65,75 | 59,51 | 95,87 | 4 |
| 2 | 19,3 | 72,76 | 66,79 | 97,70 | 5 |
| 2 | 22,4 | 79,53 | 74,07 | 98,83 | 6 |
| 2 | 26,2 | 85,66 | 80,98 | 99,46 | 7 |
| 2 | 30,5 | 90,83 | 87,15 | 99,79 | 7 |
| 3 | 35,5 | 94,81 | 92,25 | 100,00 | 8 |
| 3 | 41,4 | 97,55 | 96,05 | 100,00 | 9 |
| 3 | 48,2 | 99,16 | 98,49 | 100,00 | 9 |
| 3 | 56,2 | 99,87 | 99,72 | 100,00 | 9 |
| 3 | 65,5 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 9 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 9 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 9 |

Tabla K.3. Distribuciones granulométricas de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y gruesos a la salida del microclasificador para la corrida 3.

| N de interval o n | Día metros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 3 | | | |
|----------------------------|---|--|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | G rueso ϕ_c % < D |
| 0 | 0,36 | 0,32 | 0,30 | 0,53 | 0, |
| 1 | 0,42 | 0,90 | 0,80 | 1,49 | 0, |

| | | | | | |
|---|------|--------|--------|--------|----|
| 2 | 0,49 | 1,66 | 1,54 | 2,73 | 1, |
| 3 | 0,58 | 2,48 | 2,29 | 4,06 | 2, |
| 4 | 0,67 | 3,27 | 3,01 | 5,33 | 2, |
| 5 | 0,78 | 3,96 | 3,63 | 6,45 | 3, |
| 6 | 0,91 | 4,56 | 4,17 | 7,49 | 3, |
| 7 | 1,06 | 5,15 | 4,70 | 8,63 | 4, |
| 8 | 1,24 | 5,84 | 5,34 | 10,17 | 4, |
| 9 | 1,44 | 6,80 | 6,25 | 12,45 | 5, |
| 1 | 1,68 | 8,12 | 7,49 | 15,69 | 6, |
| 1 | 1,95 | 9,81 | 9,07 | 19,88 | 7, |
| 1 | 2,28 | 11,76 | 10,86 | 24,80 | 9, |
| 1 | 2,65 | 13,86 | 12,72 | 30,17 | 1 |
| 1 | 3,09 | 16,11 | 14,67 | 35,92 | 1 |
| 1 | 3,60 | 18,55 | 16,78 | 42,03 | 1 |
| 1 | 4,19 | 21,20 | 19,12 | 48,41 | 1 |
| 1 | 4,88 | 24,09 | 21,74 | 54,95 | 1 |
| 1 | 5,69 | 27,30 | 24,78 | 61,52 | 2 |
| 1 | 6,63 | 30,89 | 28,34 | 67,95 | 2 |
| 2 | 7,72 | 34,94 | 32,54 | 74,08 | 2 |
| 2 | 9,00 | 39,54 | 37,48 | 79,72 | 3 |
| 2 | 10,4 | 44,75 | 43,21 | 84,76 | 3 |
| 2 | 12,2 | 50,58 | 49,71 | 89,07 | 4 |
| 2 | 14,2 | 56,96 | 56,83 | 92,62 | 4 |
| 2 | 16,5 | 63,72 | 64,32 | 95,39 | 5 |
| 2 | 19,3 | 70,59 | 71,82 | 97,41 | 6 |
| 2 | 22,4 | 77,26 | 78,92 | 98,76 | 7 |
| 2 | 26,2 | 83,37 | 85,24 | 99,56 | 7 |
| 2 | 30,5 | 88,64 | 90,48 | 99,93 | 8 |
| 3 | 35,5 | 92,87 | 94,48 | 100,00 | 8 |
| 3 | 41,4 | 95,99 | 97,25 | 100,00 | 9 |
| 3 | 48,2 | 98,06 | 98,92 | 100,00 | 9 |
| 3 | 56,2 | 99,27 | 99,74 | 100,00 | 9 |
| 3 | 65,5 | 99,83 | 100,00 | 100,00 | 9 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 9 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 9 |

Tabla K.4. Distribuciones granulométricas de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y gruesos a la salida del microclasificador para la corrida 4.

| N º de interval o n | Día metros de la partícula | Distribuciones granulométricas de la corrida 4 | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | Gru eso ϕ_c |

| | D, μm | D | | | % < D |
|---|------------------|--------|--------|--------|-------|
| 0 | 0,36 | 0,29 | 0,33 | 0,60 | 0,2 |
| 1 | 0,42 | 0,81 | 0,94 | 1,69 | 0,8 |
| 2 | 0,49 | 1,49 | 1,73 | 3,08 | 1,5 |
| 3 | 0,58 | 2,23 | 2,59 | 4,56 | 2,2 |
| 4 | 0,67 | 2,94 | 3,41 | 5,97 | 2,9 |
| 5 | 0,78 | 3,55 | 4,15 | 7,22 | 3,5 |
| 6 | 0,91 | 4,06 | 4,79 | 8,35 | 4,0 |
| 7 | 1,06 | 4,53 | 5,44 | 9,57 | 4,5 |
| 8 | 1,24 | 5,06 | 6,21 | 11,19 | 5,2 |
| 9 | 1,44 | 5,76 | 7,27 | 13,57 | 6,0 |
| 1 | 1,68 | 6,71 | 8,71 | 16,99 | 7,2 |
| 1 | 1,95 | 7,91 | 10,53 | 21,53 | 8,7 |
| 1 | 2,28 | 9,28 | 12,56 | 26,79 | 10, |
| 1 | 2,65 | 10,77 | 14,66 | 32,31 | 12, |
| 1 | 3,09 | 12,42 | 16,84 | 38,11 | 14, |
| 1 | 3,60 | 14,34 | 19,18 | 44,28 | 16, |
| 1 | 4,19 | 16,67 | 21,74 | 50,67 | 18, |
| 1 | 4,88 | 19,63 | 24,62 | 57,11 | 21, |
| 1 | 5,69 | 23,08 | 27,96 | 63,53 | 24, |
| 1 | 6,63 | 27,42 | 31,88 | 69,77 | 28, |
| 2 | 7,72 | 32,64 | 36,50 | 75,68 | 32, |
| 2 | 9,00 | 38,77 | 41,90 | 81,11 | 37, |
| 2 | 10,4 | 45,73 | 48,08 | 85,93 | 43, |
| 2 | 12,2 | 53,34 | 54,95 | 90,06 | 49, |
| 2 | 14,2 | 61,32 | 62,31 | 93,44 | 56, |
| 2 | 16,5 | 69,25 | 69,83 | 96,05 | 64, |
| 2 | 19,3 | 76,71 | 77,12 | 97,94 | 71, |
| 2 | 22,4 | 83,31 | 83,76 | 99,14 | 78, |
| 2 | 26,2 | 88,78 | 89,39 | 99,77 | 84, |
| 2 | 30,5 | 93,00 | 93,78 | 100,00 | 89, |
| 3 | 35,5 | 96,03 | 96,88 | 100,00 | 93, |
| 3 | 41,4 | 98,02 | 98,79 | 100,00 | 96, |
| 3 | 48,2 | 99,18 | 99,73 | 100,00 | 97, |
| 3 | 56,2 | 99,76 | 100,00 | 100,00 | 98, |
| 3 | 65,5 | 99,97 | 100,00 | 100,00 | 99, |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 99, |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 99, |

Tabla K.5. Distribuciones granulométricas de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y gruesos a la salida del microclasificador para la corrida 5.

| N | Día | Distribuciones granulométricas de la corrida 5 |
|---|-----|--|
|---|-----|--|

| ° de interval o n | metros de la partícula D, μm | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | Gru eso ϕ_c % < D |
|-------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 0 | 0,36 | 0,34 | 0,32 | 0,63 | 0,3 |
| 1 | 0,42 | 0,95 | 0,91 | 1,76 | 0,8 |
| 2 | 0,49 | 1,74 | 1,68 | 3,2 | 1,6 |
| 3 | 0,58 | 2,60 | 2,51 | 4,74 | 2,4 |
| 4 | 0,67 | 3,42 | 3,32 | 6,23 | 3,2 |
| 5 | 0,78 | 4,14 | 4,03 | 7,56 | 3,8 |
| 6 | 0,91 | 4,77 | 4,64 | 8,57 | 4,4 |
| 7 | 1,06 | 5,40 | 5,25 | 9,68 | 5,0 |
| 8 | 1,24 | 6,17 | 5,96 | 11,08 | 5,6 |
| 9 | 1,44 | 7,25 | 6,95 | 13,08 | 6,5 |
| 1 | 1,68 | 8,73 | 8,29 | 15,93 | 7,7 |
| 1 | 1,95 | 10,58 | 9,98 | 19,73 | 9,2 |
| 1 | 2,28 | 12,68 | 11,93 | 24,32 | 11, |
| 1 | 2,65 | 14,90 | 14,00 | 29,49 | 12, |
| 1 | 3,09 | 17,23 | 16,21 | 35,23 | 14, |
| 1 | 3,60 | 19,75 | 18,59 | 41,56 | 17, |
| 1 | 4,19 | 22,51 | 21,23 | 48,35 | 19, |
| 1 | 4,88 | 25,60 | 24,19 | 55,39 | 22, |
| 1 | 5,69 | 29,12 | 27,63 | 62,51 | 26, |
| 1 | 6,63 | 33,18 | 31,67 | 69,42 | 30, |
| 2 | 7,72 | 37,85 | 36,45 | 75,88 | 34, |
| 2 | 9,00 | 43,21 | 42,09 | 81,69 | 39, |
| 2 | 10,4 | 49,27 | 48,58 | 86,71 | 45, |
| 2 | 12,2 | 55,96 | 55,81 | 90,89 | 52, |
| 2 | 14,2 | 63,10 | 63,54 | 94,21 | 59, |
| 2 | 16,5 | 70,37 | 71,35 | 96,69 | 66, |
| 2 | 19,3 | 77,40 | 78,77 | 98,39 | 74, |
| 2 | 22,4 | 83,78 | 85,36 | 99,40 | 80, |
| 2 | 26,2 | 89,17 | 90,76 | 99,98 | 86, |
| 2 | 30,5 | 93,39 | 94,82 | 100,00 | 91, |
| 3 | 35,5 | 96,42 | 97,55 | 100,00 | 95, |
| 3 | 41,4 | 98,35 | 99,14 | 100,00 | 97, |
| 3 | 48,2 | 99,42 | 99,84 | 100,00 | 99, |
| 3 | 56,2 | 99,89 | 100,00 | 100,00 | 97, |
| 3 | 65,5 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |

Tabla K.6. Distribuciones granulométricas de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y gruesos a la salida del microclasificador para la corrida 6.

| N o de interval o n | Diá metros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 6 | | | |
|------------------------------------|---|--|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | Gru eso ϕ_c % < D |
| 0 | 0,36 | 0,31 | 0,40 | 0,61 | 0,1 |
| 1 | 0,42 | 0,88 | 1,14 | 1,72 | 0,5 |
| 2 | 0,49 | 1,62 | 2,09 | 3,16 | 1,0 |
| 3 | 0,58 | 2,41 | 3,13 | 4,73 | 1,5 |
| 4 | 0,67 | 3,17 | 4,12 | 6,26 | 2,0 |
| 5 | 0,78 | 3,84 | 5,00 | 7,66 | 2,4 |
| 6 | 0,91 | 4,41 | 5,77 | 8,98 | 2,8 |
| 7 | 1,06 | 4,97 | 6,39 | 10,38 | 3,1 |
| 8 | 1,24 | 5,63 | 7,12 | 12,18 | 3,4 |
| 9 | 1,44 | 6,52 | 8,15 | 14,72 | 3,9 |
| 1 | 1,68 | 7,73 | 9,63 | 18,30 | 4,7 |
| 1 | 1,95 | 9,96 | 11,58 | 23,02 | 5,6 |
| 1 | 2,28 | 10,99 | 13,86 | 28,56 | 6,7 |
| 1 | 2,65 | 12,83 | 16,32 | 34,54 | 7,7 |
| 1 | 3,09 | 14,85 | 19,07 | 40,91 | 8,7 |
| 1 | 3,60 | 17,17 | 22,30 | 47,71 | 9,6 |
| 1 | 4,19 | 19,89 | 26,12 | 54,69 | 10, |
| 1 | 4,88 | 23,12 | 30,63 | 61,62 | 11, |
| 1 | 5,69 | 26,96 | 35,96 | 68,34 | 11, |
| 1 | 6,63 | 31,51 | 42,12 | 74,61 | 12, |
| 2 | 7,72 | 36,82 | 49,06 | 80,27 | 14, |
| 2 | 9,00 | 42,88 | 56,59 | 85,19 | 17, |
| 2 | 10,4 | 49,64 | 64,42 | 89,34 | 21, |
| 2 | 12,2 | 56,93 | 72,18 | 92,71 | 27, |
| 2 | 14,2 | 64,50 | 79,42 | 95,38 | 36, |
| 2 | 16,5 | 72,02 | 85,73 | 97,38 | 45, |
| 2 | 19,3 | 79,08 | 90,84 | 98,78 | 56, |
| 2 | 22,4 | 85,32 | 94,64 | 99,62 | 67, |
| 2 | 26,2 | 90,48 | 97,20 | 99,99 | 77, |
| 2 | 30,5 | 94,42 | 98,76 | 100,00 | 86, |
| 3 | 35,5 | 97,16 | 99,58 | 100,00 | 92, |
| 3 | 41,4 | 98,85 | 99,92 | 100,00 | 96, |
| 3 | 48,2 | 99,71 | 100,00 | 100,00 | 98, |

| | | | | | |
|---|------|--------|--------|--------|-----|
| 3 | 56,2 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 99, |
| 3 | 65,5 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |

Tabla K.7. Distribuciones granulométricas de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y gruesos a la salida del microclasificador para la corrida 7.

| N° de intervalo n | Di ámetros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 7 | | | |
|----------------------------|---|--|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | G rueso ϕ c % < D |
| 0 | 0,36 | 0,33 | 0,41 | 0,54 | 0, |
| 1 | 0,42 | 0,93 | 1,16 | 1,52 | 0, |
| 2 | 0,49 | 1,70 | 2,14 | 2,78 | 0, |
| 3 | 0,58 | 2,55 | 3,22 | 4,14 | 1, |
| 4 | 0,67 | 3,37 | 4,27 | 5,44 | 1, |
| 5 | 0,78 | 4,10 | 5,21 | 6,60 | 2, |
| 6 | 0,91 | 4,74 | 6,06 | 7,64 | 2, |
| 7 | 1,06 | 5,37 | 6,89 | 8,74 | 3, |
| 8 | 1,24 | 6,12 | 7,87 | 10,20 | 3, |
| 9 | 1,44 | 7,15 | 9,17 | 12,34 | 3, |
| 10 | 1,68 | 8,55 | 10,94 | 15,39 | 4, |
| 11 | 1,95 | 10,30 | 13,19 | 19,41 | 5, |
| 12 | 2,28 | 12,28 | 15,80 | 24,22 | 6, |
| 13 | 2,65 | 14,36 | 18,68 | 29,63 | 7, |
| 14 | 3,09 | 16,55 | 21,93 | 35,58 | 7, |
| 15 | 3,60 | 18,90 | 25,69 | 42,07 | 8, |
| 16 | 4,19 | 21,47 | 30,07 | 48,98 | 8, |
| 17 | 4,88 | 24,33 | 35,11 | 56,15 | 9, |
| 18 | 5,69 | 27,59 | 40,85 | 63,40 | 1 |
| 19 | 6,63 | 31,35 | 47,24 | 70,48 | 1 |
| 20 | 7,72 | 35,70 | 54,14 | 77,15 | 1 |
| 21 | 9,00 | 40,73 | 61,34 | 83,16 | 1 |
| 22 | 10,4 | 46,44 | 68,58 | 88,32 | 1 |
| 23 | 12,2 | 52,81 | 75,57 | 92,51 | 2 |
| 24 | 14,2 | 59,69 | 82,00 | 98,68 | 3 |
| 25 | 16,5 | 66,81 | 87,55 | 97,00 | 4 |
| 26 | 19,3 | 73,93 | 92,13 | 99,21 | 5 |
| 27 | 22,4 | 80,58 | 95,55 | 99,84 | 6 |
| 28 | 26,2 | 86,46 | 97,87 | 100,00 | 7 |

| | | | | | |
|----|----|--------|--------|--------|---|
| 29 | 30 | 91,32 | 99,24 | 100,00 | 8 |
| 30 | 35 | 95,01 | 99,87 | 100,00 | 8 |
| 31 | 41 | 97,55 | 100,00 | 100,00 | 9 |
| 32 | 48 | 99,06 | 100,00 | 100,00 | 9 |
| 33 | 56 | 99,79 | 100,00 | 100,00 | 9 |
| 34 | 65 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 9 |
| 35 | 76 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1 |
| 36 | 88 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1 |

Tabla K.8. Distribuciones granulométricas de la alimentación y de los productos del ciclón, filtro y gruesos a la salida del microclasificador para la corrida 8.

| N o de interval o n | Día metros de la partícula D, μm | Distribuciones granulométricas de la corrida 8 | | | |
|------------------------------------|---|--|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| | | Alimen tación ϕ_a % < D | Ciclón ϕ_j % < D | Filtro ϕ_l % < D | Gru eso ϕ_c % < D |
| 0 | 0,36 | 0,32 | 0,42 | 0,51 | 0,2 |
| 1 | 0,42 | 0,92 | 1,21 | 1,45 | 0,6 |
| 2 | 0,49 | 1,69 | 2,23 | 2,67 | 1,0 |
| 3 | 0,58 | 2,55 | 3,35 | 4,03 | 1,6 |
| 4 | 0,67 | 3,39 | 4,46 | 5,37 | 2,1 |
| 5 | 0,78 | 4,15 | 5,46 | 6,64 | 2,5 |
| 6 | 0,91 | 4,84 | 6,35 | 7,87 | 2,8 |
| 7 | 1,06 | 5,51 | 7,23 | 9,21 | 3,1 |
| 8 | 1,24 | 6,29 | 8,24 | 10,94 | 3,5 |
| 9 | 1,44 | 7,31 | 9,57 | 13,34 | 4,0 |
| 1 | 1,68 | 8,67 | 11,33 | 16,6 | 4,7 |
| 1 | 1,95 | 10,37 | 13,51 | 20,74 | 5,6 |
| 1 | 2,28 | 12,29 | 16,00 | 25,57 | 6,6 |
| 1 | 2,65 | 14,34 | 18,74 | 30,86 | 7,4 |
| 1 | 3,09 | 16,51 | 21,81 | 36,54 | 8,1 |
| 1 | 3,60 | 18,88 | 25,39 | 42,59 | 8,7 |
| 1 | 4,19 | 21,49 | 29,63 | 48,92 | 9,1 |
| 1 | 4,88 | 24,40 | 34,63 | 55,41 | 9,4 |
| 1 | 5,69 | 27,72 | 40,48 | 61,97 | 9,9 |
| 1 | 6,63 | 31,54 | 47,10 | 68,43 | 10, |
| 2 | 7,72 | 35,95 | 54,36 | 74,62 | 12, |
| 2 | 9,00 | 41,02 | 61,98 | 80,39 | 14, |
| 2 | 10,4 | 46,79 | 69,62 | 85,55 | 19, |
| 2 | 12,2 | 53,23 | 76,90 | 89,98 | 25, |
| 2 | 14,2 | 60,19 | 83,48 | 93,58 | 33, |

| | | | | | |
|---|------|--------|--------|--------|-----|
| 2 | 16,5 | 67,40 | 89,05 | 96,29 | 43, |
| 2 | 19,3 | 74,52 | 93,43 | 98,15 | 54, |
| 2 | 22,4 | 81,16 | 96,58 | 99,27 | 65, |
| 2 | 26,2 | 86,98 | 98,58 | 99,81 | 76, |
| 2 | 30,5 | 91,75 | 99,64 | 99,98 | 84, |
| 3 | 35,5 | 95,36 | 100,00 | 100,00 | 91, |
| 3 | 41,4 | 97,83 | 100,00 | 100,00 | 95, |
| 3 | 48,2 | 99,30 | 100,00 | 100,00 | 98, |
| 3 | 56,2 | 99,94 | 100,00 | 100,00 | 99, |
| 3 | 65,5 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 76,3 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |
| 3 | 88,9 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 |

Anexo L.

Gráficas de la distribución granulométrica de las alimentación, fracción gruesa, fracción ciclón, fracción filtro versus el diámetro de las partículas.

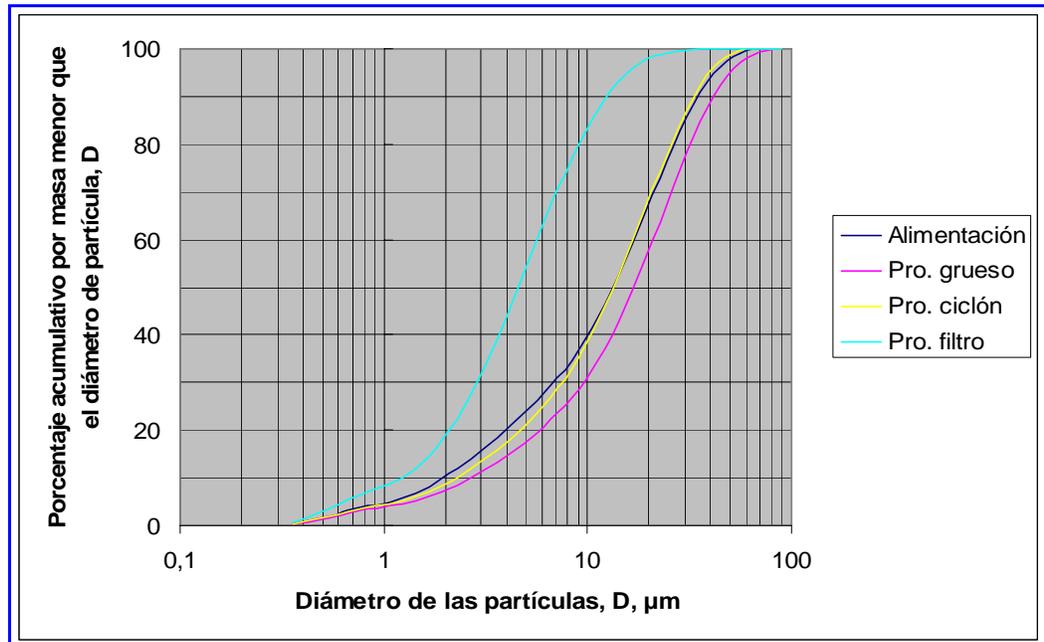


Figura L.1. Gráfica de las distribuciones granulométricas de la corrida 2.

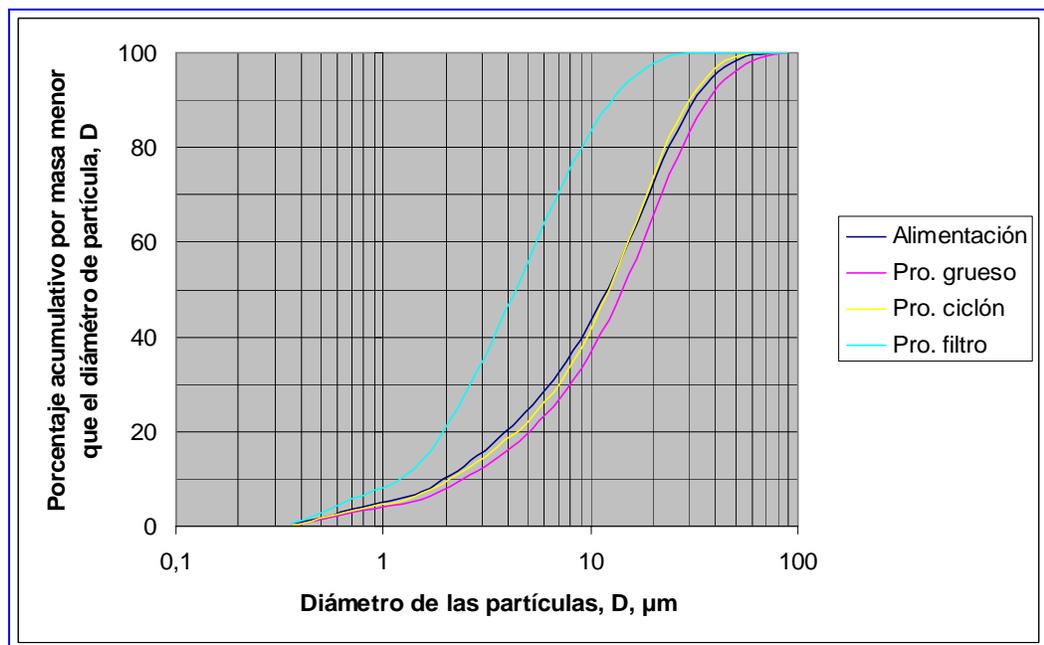


Figura L.2. Gráfica de las distribuciones granulométricas de la corrida 3.

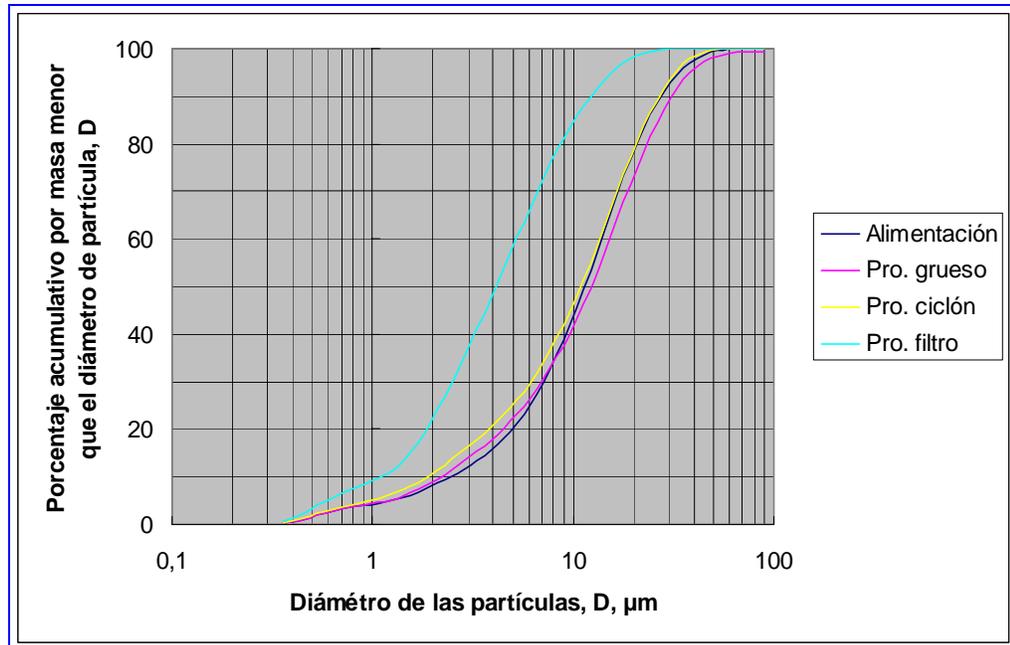


Figura L.3. Gráfica de las distribuciones granulométricas de la corrida 4.

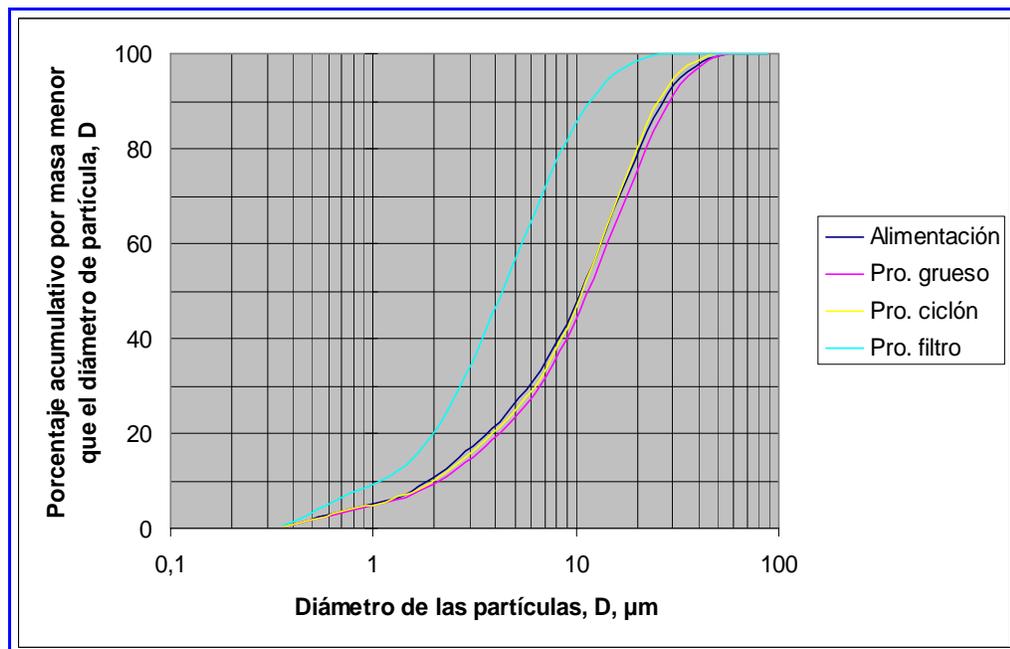


Figura L.4. Gráfica de las distribuciones granulométricas de la corrida 5.

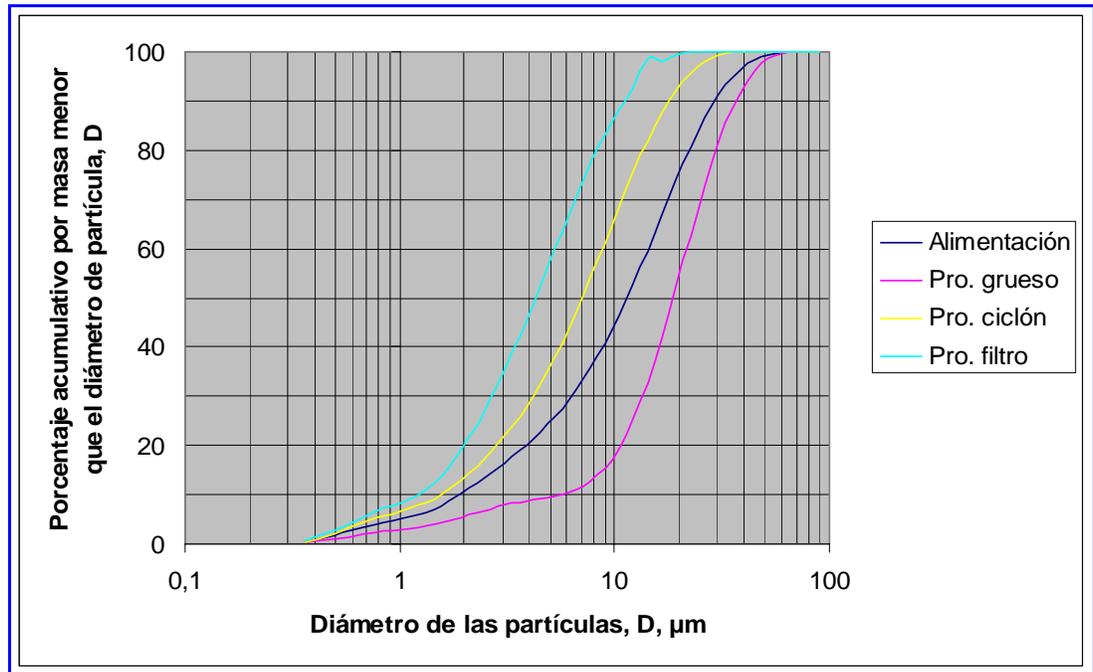


Figura L.5. Gráfica de las distribuciones granulométricas de la corrida 7.

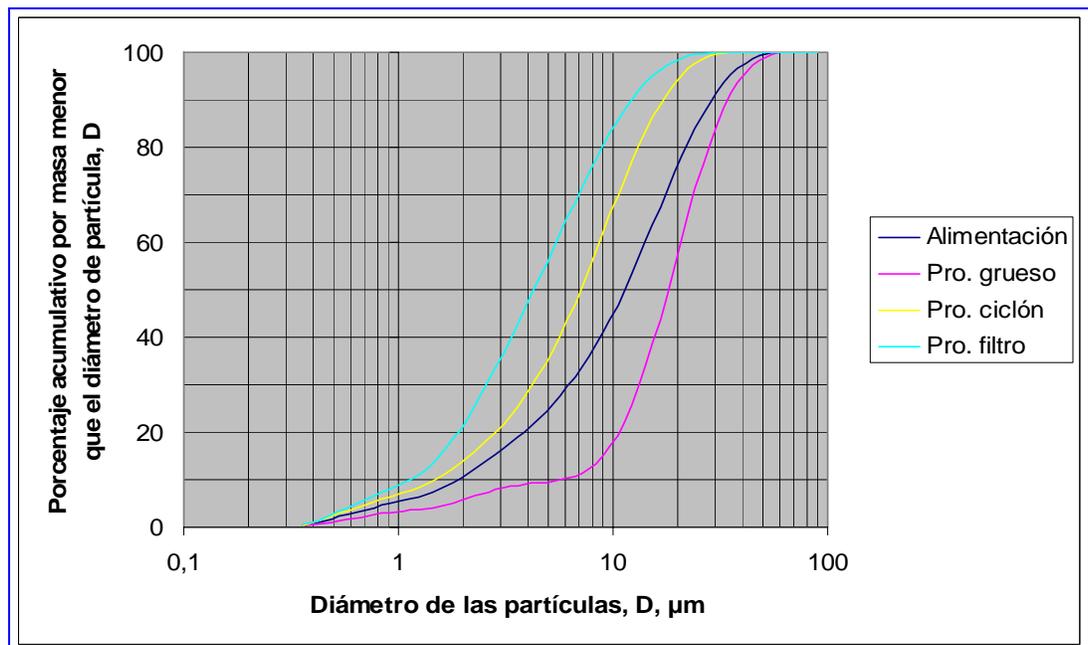


Figura L.6. Gráfica de las distribuciones granulométricas de la corrida 8.

