



**Facultad de Ingeniería**  
**Departamento de Ingeniería Química**

**Estudio del empleo de los ciclones como  
método de captación de partículas sólidas y  
purificación de gases para la protección del  
Medio Ambiente en la Industria**

**Autora: Elizabeth Safonts Rodríguez**

**Tutores: Dr.C. Rafael Antonio Goytisoló Espinosa**

**Junio 2014**

**“Año 56 de la Revolución”**

DECLARACION DE AUTORIDAD  
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



“Carlos Rafael Rodríguez”

Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

---

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de este envergadura, referido a la temática señalada.

---

Información Científico Técnico  
Nombre y Apellidos. Firma.

---

Vice Decano.

---

Firma del Tutor  
Nombre y Apellidos. Firma

---

Sistema de Documentación y Proyecto.  
Nombre y Apellido. Firma.



*Pensamiento*

## PENSAMIENTOS

*El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad."*

***Victor Hugo***

*"Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa. "*

***Mahatma Gandhi***

*"Si caes es para levantarte, si te levantas es para seguir, si sigues es para llegar a donde quieres ir y si llegas es para saber que lo mejor está por venir... "*

***Elbano Mendoza***



# *Dedicatoria*

## DEDICATORIA

*A mis papis que durante toda mi vida han estado apoyándome, aconsejándome y guiándome para ser cada día mejor persona, que han estado para mí en todos los buenos y malos momentos y que siempre, siempre, siempre me han protegido. Gracias por tanto amor para mí, los adoro....*

*A Adrian por darme tanto amor, por ayudarme en todo, por estar siempre junto a mi corazón aunque esté bien lejos, gracias por tu tiempo, por tu espera, por tu confianza y gracias por haberme hecho desde que te conocí la persona más dichosa, gracias por tu amor. Te amo*

# *Agradecimientos*

## AGRADECIMIENTOS

*En este día tan especial para mí, primeramente quiero agradecer con todo mi corazón*

*A:*

*Mi **Diosito** por darme el privilegio de vivir, y de poder ser quien soy.*

*Al **Goyo** por ser mi tutor, por ayudarme incondicional en la realización de esta mi tesis, por todo su amor, y más que nada por ser parte de mi familia.*

*A **mis padres** y a toda mi familia en general que me quieren y siempre me han apoyado y me han dado la mano en todo este caminar.*

*A ti **mi amor** por estar junto a mí en todos los momentos aunque sea en mi corazón, y junto a ti **tus papis** que me han llenado de amor y que para mí son como otros padres.*

*A mis compañeros de aula pero principalmente a Yesi, Rosy, Beatriz, Delvys y especialmente a Betty por haberme ayudado tanto incondicionalmente, por ser todos tan especiales y por tantos buenos momentos.*

*A todas las personas que me quieren, mis amigos del PRE especialmente Li por estar siempre presente en mi vida, a mis vecinos que tanto me ayudaron y que son tan buenas personas conmigo.*

*Gracias por todo el amor, la confianza y gracias por siempre darme un pedacito de sus corazones. Los Quiero.*

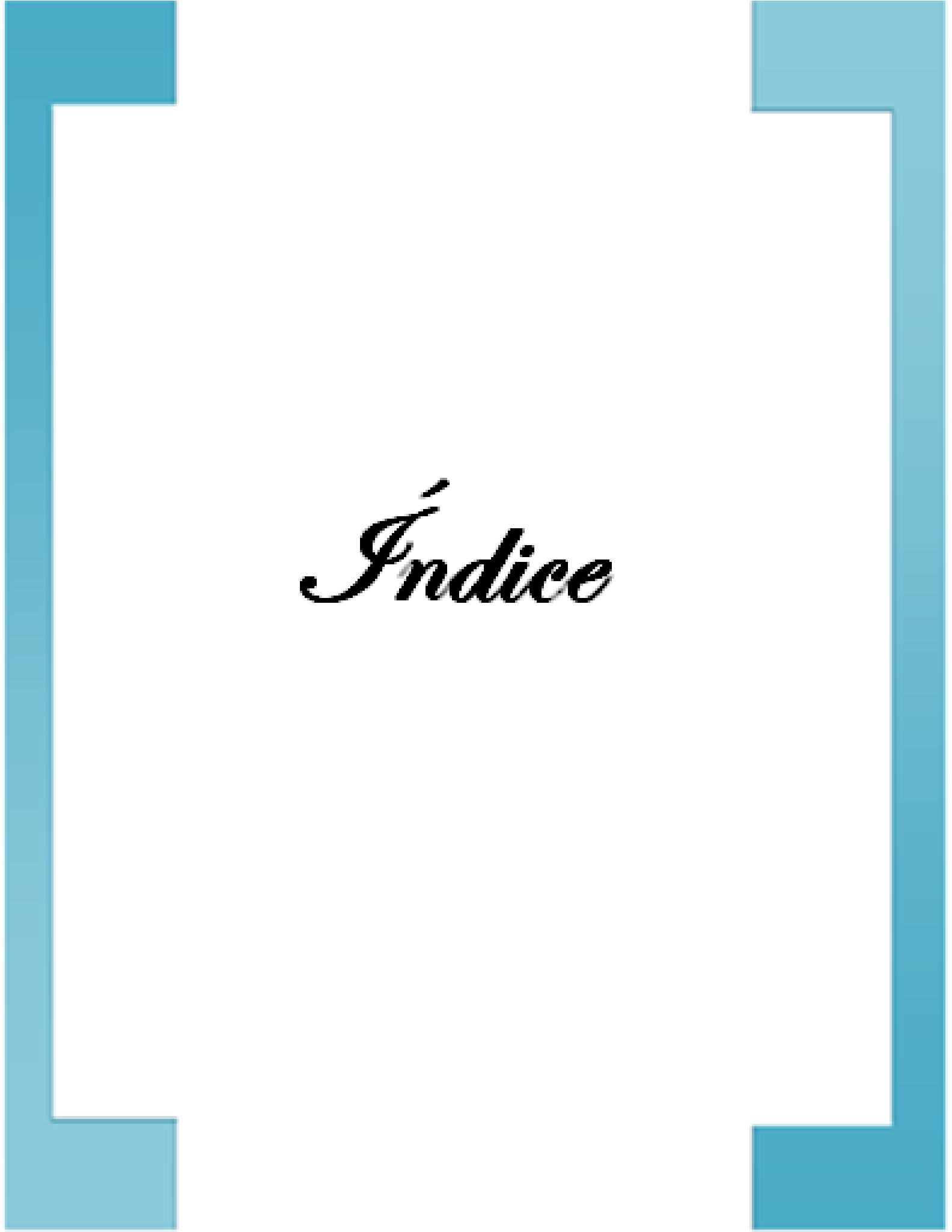


# *Resumen*



### Resumen

En el trabajo se realizó una amplia búsqueda bibliográfica sobre las propiedades de los sistemas de partículas tales como: tamaño, forma, dispersidad y contenido del polvo en los gases. Se investigó en la literatura las particularidades de la formación de polvos y gases polvorientos en los procesos industriales más comunes, así como los riesgos medioambientales por la presencia del polvo en los procesos industriales y la necesidad de su minimización. Finalmente se investigaron algunos Índices técnico-económicos de las instalaciones de captación de polvo y su importancia económica. Se investigó en la literatura todo lo referente al diseño y construcción de los ciclones simples y ciclones tipo batería. Se concluye que las aplicaciones de los ciclones incluyen cualquier ámbito de separación para productos pulverulentos de alto valor, condiciones de trabajo críticas, y donde el uso de filtros de mangas debe ser evitado por razones económicas y técnicas. Finalmente en el trabajo se elabora una metodología de cálculo, para diseñar ciclones simples y ciclones tipo batería como elementos captadores de polvo, en función de los parámetros del proceso y del tamaño de las partículas que se desean separar.



# *Índice*

## Índice.

|                                                                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introducción.....</b>                                                                                                              | <b>1</b>  |
| <b>Capítulo 1 Marco Teórico sobre el tratamiento de sólidos en forma de partículas en la industria en general. ....</b>               | <b>4</b>  |
| 1.1 Breve Información histórica sobre el desarrollo de la captación de polvo.....                                                     | 4         |
| 1.2 Tratamiento de sólidos en forma de partículas. (Mc Cabe et. al. 1998) .....                                                       | 5         |
| 1.3 Formación de polvos y gases polvorientos en los procesos metalúrgicos. ....                                                       | 23        |
| 1.4 Formación de polvos y gases polvorientos y minimización del riesgo medioambiental en la industria de fabricación del cemento..... | 25        |
| 1.4.1 Gastos de los diferentes sistemas captadores de polvo.....                                                                      | 42        |
| 1.4.2 Importancia económica de la captación del anhídrido sulfuroso y utilización del azufre contenido en los gases. ....             | 45        |
| 1.5 Conclusiones Parciales del Capítulo I .....                                                                                       | 46        |
| <b>Capítulo II Los ciclones simples y ciclones tipo batería como sistemas de captación de partículas sólidas. ....</b>                | <b>47</b> |
| 2.1 Descripción de los ciclones.....                                                                                                  | 47        |
| 2.2 Principio de Funcionamiento de los ciclones. ....                                                                                 | 49        |
| 2.3 Ventajas y desventajas del uso de los ciclones. ....                                                                              | 53        |
| 2.4 Elevación de la eficiencia de separación del ciclón. ....                                                                         | 54        |
| 2.5 Hidrociclones. ....                                                                                                               | 54        |
| 2.6 Formas, materiales, tamaños y distintos tipos de ciclones. ....                                                                   | 57        |
| 2.7 Conclusiones Parciales del Capítulo II. ....                                                                                      | 79        |
| <b>Capítulo III Cálculo de los ciclones ordinarios y ciclones tipo batería.....</b>                                                   | <b>81</b> |
| 3.1 Los ciclones como captadores de polvo. Principio de funcionamiento en la captación de polvos. ....                                | 81        |
| 3.2 Influencia de diferentes factores en la captación de polvo en los ciclones. ....                                                  | 82        |
| 3.3 Cálculo de la caída de presión en los ciclones. ....                                                                              | 85        |
| 3.4 Cálculo del diámetro de partícula mínima retenida. ....                                                                           | 88        |
| 3.5 Metodología de cálculo de las dimensiones exteriores de los ciclones. ....                                                        | 90        |
| 3.6 Determinación de la eficiencia de los ciclones. ....                                                                              | 92        |

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 3.7 Construcciones típicas de algunos ciclones..... | 97  |
| 3.8 Conclusiones Parciales del Capítulo III.....    | 104 |
| <b>Conclusiones Generales</b> .....                 | 105 |
| <b>Recomendaciones</b> .....                        | 106 |
| <b>Bibliografía</b> .....                           | 107 |



# *Introducción*

### **Introducción.**

El Desarrollo Científico – Técnico ha resuelto innumerables problemas para la humanidad, sin embargo ha agudizado también muchos problemas, entre ellos uno de los más importantes es la relación entre el hombre y el medio ambiente.

Los recursos naturales resultaron ser no tan inagotables como se pensaba hace unas décadas y el problema de la protección de la naturaleza – medio ambiente del hombre, contra las consecuencias negativas de su propia actividad ha adquirido una importancia social, ya que la amenaza es válida no sólo para la salud de los hombres, sino para la existencia de toda la humanidad.

Es sobre todo importante el problema de la protección de la naturaleza en lo referente a la purificación de los gases que se originan en el proceso, para todas las ramas de la industria: la producción de cemento, fertilizantes, materiales de la construcción, refinación de petróleo, centrales termoeléctricas, siderurgias y la metalúrgica, en particular sobre todo la de metales no ferrosos, etc.

Los sólidos son, en general, más difíciles de tratar que los líquidos, vapores o gases. En la industria de procesos en general, los sólidos pueden presentarse de diversas formas: grandes pedazos, en láminas continuas o en polvos finamente divididos. Pueden ser duros y abrasivos, resistentes o gomosos, blandos o frágiles, polvorientos, plásticos o pegajosos. Con independencia de su forma, es preciso encontrar medios para manipular los sólidos tal como se presentan, y si es posible mejorar sus características de manipulación.

En los procesos químicos los sólidos se encuentran más frecuentemente en forma de partículas. Este trabajo trata fundamentalmente de las propiedades, métodos de formación, modificación y separación de sólidos en forma de partículas.

En la industria de procesos en general se utilizan diferentes vías para la captación de polvos y partículas como son: los ciclones, captadores de polvo por vía húmeda, lavadores de gas, filtros de espuma, filtros de tela, coagulación de aerosoles, cámaras de polvos y gasoductos, filtros electrostáticos, etc.

En el presente trabajo se aspira a describir en general los diferentes procesos empleados en la industria para la captación de polvo y purificación de gases y profundizar en particular en la captación de polvos en ciclones simples y en ciclones tipo batería con vistas a elaborar sendas Metodologías para el diseño y cálculo de ciclones simples y del tipo de batería.

El **Problema Científico** a resolver es que en la literatura no se describen detalladamente dichas Metodologías para el diseño y cálculo de los ciclones ordinarios y del tipo de batería.

Se puede entonces formular la siguiente **Hipótesis**: Resulta posible organizando adecuadamente la información existente en la literatura especializada elaborar una Metodología para el cálculo de los parámetros fundamentales y el dimensionado de ciclones simples y del tipo de batería.

En la Investigación se emplearán los siguientes **Métodos Científicos**:

1. Método Hipotético – Deductivo al elaborar el Problema Científico y la posible solución del mismo, la Hipótesis y los Objetivos General y Específicos para darle cumplimiento.
2. Método Analítico – Sintético, este es el Método Fundamental que será empleado en la Investigación: Mediante el análisis se evaluarán las expresiones de cálculo, tablas, gráficos, etc. existentes en la literatura y la síntesis permitirá integrar todos estos elementos de la bibliografía hasta conformar las Metodología de diseño y cálculo de ciclones simples y del tipo de batería deseadas en el trabajo.
3. Métodos Matemáticos, se aspira a elaborar Modelos Matemáticos organizados para poder diseñar y calcular los ciclones simples y del tipo de batería planteados en el trabajo.

El **Objetivo General** formulado es entonces el siguiente: Elaborar una metodología de cálculo, para diseñar ciclones simples y ciclones tipo batería como elementos captadores de polvo, en función de los parámetros del proceso y del tamaño de las partículas que se desean separar.

Para su cumplimiento se han establecido los siguientes **Objetivos Específicos**:

1. Investigar en la literatura las propiedades de los sistemas de partículas tales como tamaño, forma, densidad y dispersidad y contenido del polvo en los gases. La formación de polvos y gases polvorientos en los procesos industriales más comunes.
2. Investigar en particular el empleo de los ciclones simples y los ciclones tipo batería, su principio de funcionamiento, sus particularidades constructivas, sus ventajas y desventajas y los aspectos vinculados con su explotación.
3. Elaborar la Metodología de diseño y cálculo de los ciclones ordinarios y de los ciclones tipo batería, que permita valorar los aspectos constructivos que influyen en el trabajo de los mismos y abordar aquellos aspectos mecánicos de su diseño y construcción que resulten más importantes para un ingeniero químico.

# *Capítulo 1*

## **Capítulo 1 Marco Teórico sobre el tratamiento de sólidos en forma de partículas en la industria en general.**

### **1.1 Breve Información histórica sobre el desarrollo de la captación de polvo.**

La industrialización de muchos países de Europa y de América a fines del siglo pasado contribuyó el fomento intensivo de los procesos de captación de polvo y de gases en las industrias metalúrgicas, química y otras ramas de la economía.

Aproximadamente en los años 20 del siglo pasado fue aplicada a escala industrial la purificación eléctrica de gases. Aparecieron las construcciones mejoradas de filtros, el primer filtro electrostático fue construido en la antigua URSS en el año 1925, se fabricaron los filtros por vía húmeda, filtros de tela, y los primeros ciclones, etc. (Gordon y Peisajov, 1981)

Sin embargo, aún no estaban elaborados los principios teóricos, y los cálculos de los captadores de polvo, su elección, su construcción se basaban sobre los datos empíricos.

Terminada la Segunda Guerra Mundial y, sobre todo, en el período de la revolución científico-técnica, y cuando el problema de protección del espacio aéreo tienen una enorme importancia social, tiene lugar un crecimiento intensivo de las investigaciones teóricas y experimentales sobre algunos asuntos de la captación de polvo lo que favoreció la creación de la tecnología de captación de polvo como una rama muy importante de la técnica que se dedica a los procesos tecnológicos y equipos (Gordon y Peisajov, 1981).

Un gran papel pertenece a los científicos e ingenieros de la antigua URSS en lo referente a la explotación de los sistemas aereodispersos y de la mecánica de aerosoles; en la elaboración e introducción en la industria de los equipos de captación del polvo de alta eficiencia.

Merecen ser destacados los trabajos los trabajos de V. I. Popkov, N. A. Kaptsov, B. L. Shneerson, S. P. Zhebrovski, V.N. Uzhov e I. Sh. Plotinski respecto de la purificación eléctrica de gases; los de S. N. Sirkin y M. M. Záitsev acerca de la simulación de ciclones; las investigaciones de A. N. Kolmogórov y M. A. Leontóvich sobre la teoría del

movimiento browniano y difusión de partículas; las de N. A. Fux en la Mecánica de Aerosoles; las de I. E. Idelchik respecto de la aerodinámica de los aparatos de purificación de gases; las de P. A. Kouzov sobre el análisis granulométrico de polvo (Gordon y Peisajov, 1981).

Los especialistas soviéticos tienen la prioridad en crear nuevos tipos de captadores de polvo. Por ejemplo, purificación eléctrica por vía húmeda del gas de alto horno fue elaborada por un grupo de ingenieros a cargo de B. L. Shneerson, elaboraron además algunas construcciones originales de ciclones, filtros de manga, captadores de polvo con espuma y rápidos (turbulentos) y otras instalaciones de purificación en todo el resto del siglo XX hasta la desaparición de la URSS.

## **1.2 Tratamiento de sólidos en forma de partículas. (Mc Cabe et. al. 1998)**

Las partículas sólidas individuales se caracterizan por su tamaño, forma y densidad. Las partículas de sólidos homogéneos tienen la misma densidad que el material original. Las partículas que se obtienen por rotura de un sólido compuesto, tal como una mena metálica, tienen varias densidades, generalmente diferentes de la densidad del material original. El tamaño y la forma se pueden especificar fácilmente para partículas regulares, tales como esferas o cubos, pero para partículas irregulares (tales como granos de arena o láminas de mica) los términos «tamaño» y «forma» no resultan tan claros y es preciso definirlos arbitrariamente.

- **Forma de las partículas.**

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

$$\Phi_s = \frac{6 \cdot V_p}{D_p \cdot S_p} \quad (1.1)$$

Donde:  $D_p$  = Diámetro equivalente o diámetro nominal de una partículas.

$S_p$  = Área superficial de una partícula

$V_p$  = Volumen de una partícula

El diámetro equivalente se define a veces como el diámetro de una esfera de igual volumen. Sin embargo, para materiales granulares finos resulta difícil determinar con exactitud el volumen y el área de la superficie de una partícula, y generalmente  $D$ , se toma como el tamaño nominal basado en análisis por tamizado o en examen microscópico. El área de la superficie se obtiene a partir de medidas de adsorción o de la caída de presión en un lecho de partículas, y después se utiliza la Ecuación (1.1) para calcular  $\Phi_s$ . Para muchos materiales triturados  $\Phi_s$  está comprendida entre 0,6 y 0,8 mm, tal como se muestra en la Tabla 1.1, pero en el caso de partículas redondeadas obtenidas por abrasión  $\Phi_s$  puede tener un valor de hasta 0,95.

- **Tamaño de partículas:**

El tamaño de las partículas se puede especificar como su «diámetro» 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 aciculares,  $D$ , 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 ó nanómetros. Las partículas ultra finas se describen a veces en función de su área superficial por unidad de masa, generalmente en metros cuadrados por gramo.

- **Tamaños de partículas mezcladas y análisis de tamaños:**

En una muestra de partículas uniformes de diámetro  $D_p$ , el volumen total de las partículas es  $m$  y  $\rho_p$ , donde  $m$  y  $\rho_p$ , son la masa total de la muestra y la densidad de las partículas, respectivamente. Puesto que el volumen de una partícula es  $v_p$ , el número  $N$  de partículas en la muestra es:

$$N = \frac{m}{v_p \rho_p} \quad (1.2)$$

| Tabla 1.1 Esfericidad de varios materiales (Mc Cabe et. al. 1998) |                 |                               |             |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------|
| Material                                                          | Esfericidad     | Material                      | Esfericidad |
| Esferas, cubos, cilindros cortos (L = D)                          | 1,0             | Arena de Ottawa <b>0,95</b>   | 0,95        |
| Anillos Raschig (L = D <sub>p</sub> )                             | 1,0             | Arena redondeada <b>0,83</b>  | 0,83        |
| Ídem (L = D <sub>o</sub> ); D <sub>i</sub> = 0,5 D <sub>o</sub>   | 0,58 *          | Polvo de carbón <b>0,73</b>   | 0,73        |
| Ídem (L = D <sub>o</sub> ); D <sub>i</sub> = 0,75 D <sub>o</sub>  | 0,33 *          | Arena de pedernal <b>0,65</b> | 0,65        |
| Monturas Berl                                                     | 0,3             | Vidrio molido <b>0,65</b>     | 0,65        |
| • Valores calculados                                              | Escamas de mica | 0,28                          |             |

De acuerdo con las ecuaciones (1.1) y (1.2), el área de la superficie total de las partículas es

$$A = N s_p = \frac{6 \cdot m}{D_p \cdot \phi_s \cdot \rho_p} \quad (1.3)$$

Para aplicar las ecuaciones (1.2) y (1.3) a mezclas de partículas que tienen varios tamaños y densidades, la mezcla se divide en fracciones, cada una de ellas de densidad constante y tamaño aproximadamente constante. Cada fracción se puede entonces pesar, o bien las partículas individuales se pueden contar o medir por numerosos métodos. Después se pueden aplicar las ecuaciones (1.2) y (1.3) a cada fracción y sumar los resultados.

La información obtenida de este análisis del tamaño de las partículas se tabula expresando la fracción de tamaño o de número en cada incremento de tamaño en función del tamaño medio de las partículas (o del intervalo de tamaños) en el incremento. Un análisis tabulado en esta forma recibe el nombre de análisis diferencial. Los resultados se presentan con frecuencia en un histograma como el de la Figura 1.2 a) con una curva continua como la línea de trazos utilizada para aproximar la distribución. Una segunda forma de presentar la información es mediante un análisis

acumulativo, que se obtiene sumando, consecutivamente, los incrementos individuales, comenzando con el que tiene las partículas más pequeñas, y tabulando o representando las sumas acumulativas frente al diámetro máximo de las partículas en el incremento. La Figura 1.2 b) es una representación del análisis acumulativo de la distribución que se muestra en la Figura 1.2 a). En un análisis acumulativo los datos se pueden representar adecuadamente más pequeñas, y tabulando o representando las sumas acumulativas frente al diámetro máximo de las partículas en el incremento. La Figura 1.2 b) es una representación del análisis acumulativo de la distribución que se muestra en la Figura 1.2 a). En un análisis acumulativo los datos se pueden representar adecuadamente mediante una curva continua.

Los cálculos del tamaño medio de las partículas, del área de la superficie específica o de la población de partículas de una mezcla se pueden basar tanto en el análisis diferencial como en el acumulativo. En principio, los métodos basados en el análisis acumulativo son más precisos que los basados en el análisis diferencial, ya que cuando se utiliza el análisis acumulativo no es preciso suponer que todas las partículas de una sola fracción son de igual tamaño. Sin embargo, la exactitud de las medidas de tamaño de las partículas raramente es suficientemente grande como para justificar el uso del análisis acumulativo, y los análisis casi siempre se basan en el análisis diferencial.

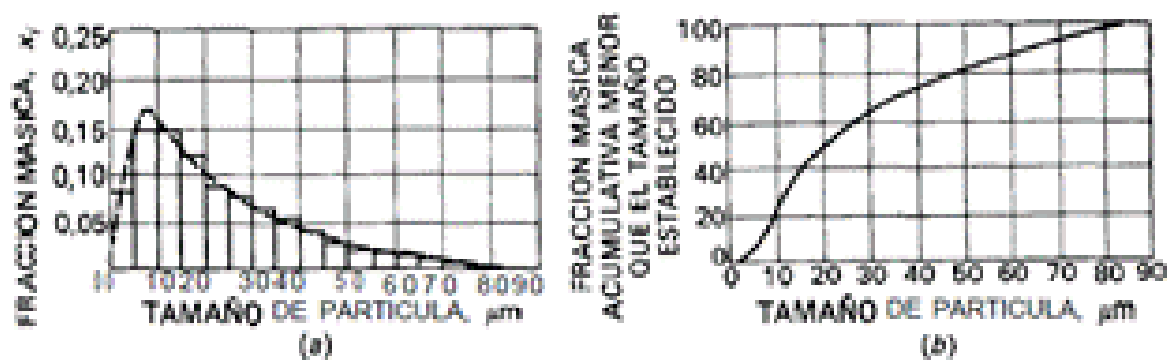


Figura 1.2 Distribución de las partículas de polvo. (Mc Cabe et. al. 1998)

a) Análisis diferencial

b) Análisis acumulativo

- Superficie específica de una mezcla.

Si se conoce la densidad  $\rho_p$  y la esfericidad  $\Phi_s$  de las partículas se puede calcular el área de la superficie de las partículas en cada fracción a partir de la ecuación (1.3), y sumar los resultados de todas las fracciones para obtener  $A$ , la superficie específica (el área de la superficie total de una unidad de masa de partículas). Si  $\rho_p$  y  $\Phi_s$  son constantes,  $A$  viene dada por:

$$\begin{aligned} A_w &= \frac{6x_1}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{p1}} + \frac{6x_2}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{p2}} + \dots + \frac{6x_n}{\Phi_s \rho_p \bar{D}_{pn}} \\ &= \frac{6}{\Phi_s \rho_p} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Donde los subíndices = incrementos individuales

$X_i$  = fracción másica en un determinado incremento

$n$  = número de incrementos

$D_{pi}$  = diámetro medio de las partículas, tomado como media aritmética de los diámetros mayor y menor en el incremento

- **Tamaño medio de las partículas.**

El tamaño medio de las partículas para una mezcla de las mismas se identifica de varias formas diferentes. El más usado es probablemente el diámetro medio volumen-superficie  $D_s$  que está relacionado con el área de la superficie específica  $A_w$  y está definido por la ecuación

$$\bar{D}_s \equiv \frac{6}{\Phi_s A_w \rho_p} \quad (1.5)$$

- **Número de partículas en la mezcla.**

Para calcular, a partir del análisis diferencial, el número de partículas en una mezcla, se utiliza la Ecuación (1.2) para calcular el número de partículas en cada fracción, y  $N$ , la población total en una unidad de masa de la muestra, se obtiene sumando todas las fracciones. Para una forma dada de las partículas, el volumen de una partícula cualquiera es proporcional a su «diámetro» elevado al cubo.

$$v_p = a \cdot D_p^3 \quad (1.6)$$

Donde  $a$  es el factor volumétrico de forma. Por tanto, a partir de la ecuación (1.2), suponiendo que  $a$  es independiente del tamaño,

$$N_w = \frac{1}{a\rho_p} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\bar{D}_{pi}^3} = \frac{1}{a\rho_p \bar{D}_V^3} \quad (1.7)$$

El área de la superficie específica, los diferentes diámetros medios y el número de partículas, se calculan fácilmente a partir de los análisis de tamaños de las partículas utilizando sencillos programas de ordenador. Muchos instrumentos de medida para partículas muy finas están programados para dar directamente estas magnitudes.

- **Análisis por tamizado; series normales de tamices.**

Para medir el tamaño (y la distribución de tamaños) de las partículas en el intervalo de tamaños comprendido entre 76 mm y 38  $\mu$ m), se utilizan tamices normalizados. Los tamices de ensayo se construyen con telas de alambre, cuyas dimensiones y mallas están cuidadosamente normalizadas. Las aberturas son cuadradas. Cada tamiz se identifica por las mallas por pulgada. Sin embargo, las aberturas reales son menores que las correspondientes al número de mallas, debido al espesor de los alambres. Las características de una serie común, que es la serie de tamices normales Tyler, se dan en la Tabla 1.2.

Tablas 1.2 Escala de Tamices estándar según Tyler. (Mc Cabe et. al. 1998)

| Mallas | Abertura de malla, mm | Abertura apox. pulg. | Diámetro del bol, cm |
|--------|-----------------------|----------------------|----------------------|
|        | 25,4                  | 1                    | 0,375                |
| 4      | 22,4                  | 7/8                  | 0,342                |
|        | 18,0                  | 3/4                  | 0,342                |
| 8      | 15,0                  | 5/8                  | 0,298                |
|        | 12,5                  | 1/2                  | 0,254                |
| 10     | 11,2                  | 7/16                 | 0,254                |
|        | 9,5                   | 3/8                  | 0,236                |
| 20     | 7,5                   | 5/16                 | 0,236                |
| 30     | 6,0                   | 1/4                  | 0,178                |
| 40     | 5,0                   | 7/32                 | 0,165                |
| 60     | 4,0                   | 3/16                 | 0,165                |
| 80     | 3,0                   | 5/32                 | 0,117                |
| 100    | 2,5                   | 1/8                  | 0,094                |
| 120    | 2,0                   | 7/64                 | 0,083                |
| 140    | 1,6                   | 3/32                 | 0,072                |
| 160    | 1,0                   | 5/64                 | 0,063                |
| 180    | 0,8                   | 1/16                 | 0,059                |
| 200    | 0,75                  |                      | 0,051                |
| 220    | 0,6                   | 3/64                 | 0,045                |
| 240    | 0,5                   |                      | 0,039                |
| 280    | 0,425                 | 1/32                 | 0,036                |
| 320    | 0,375                 |                      | 0,032                |
| 360    | 0,33                  |                      | 0,027                |
| 400    | 0,3                   |                      | 0,025                |
| 450    | 0,26                  | 1/64                 | 0,022                |
| 500    | 0,25                  |                      | 0,020                |
| 560    | 0,22                  |                      | 0,017                |
| 630    | 0,19                  |                      | 0,015                |
| 700    | 0,17                  |                      | 0,013                |
| 800    | 0,15                  |                      | 0,012                |
| 900    | 0,13                  |                      | 0,011                |
| 1000   | 0,125                 |                      | 0,010                |
| 1250   | 0,106                 |                      | 0,009                |
| 1500   | 0,09                  |                      | 0,008                |
| 1750   | 0,078                 |                      | 0,007                |
| 2000   | 0,075                 |                      | 0,006                |

Esta serie de tamices está basada en la abertura del tamiz de 200 mallas, que está establecida en 0,074 mm. El área de las aberturas de un tamiz cualquiera de la serie es exactamente el doble que la de las aberturas del tamiz inmediatamente más pequeño. La relación entre la dimensión real de las mallas de un tamiz cualquiera y la del inmediatamente más pequeño es, por tanto,  $\sqrt{2} = 1,41$ . Para tamaños más próximos, existen tamices intermedios, cada uno de los cuales tiene una dimensión de malla de  $\sqrt[4]{2}$  o sea, 1,189 veces la del tamiz normalizado inmediatamente más pequeño. Ordinariamente no se utilizan los tamices intermedios. Para realizar un análisis se coloca un conjunto de tamices normalizados, acoplados verticalmente, con el tamiz más

pequeño en el fondo y el más grande en la parte superior. La muestra se coloca en el tamiz superior y el conjunto se somete a sacudidas mecánicas durante un tiempo determinado, tal como veinte minutos. Las partículas retenidas sobre cada tamiz se retiran y se pesan, y las masas de los incrementos individuales sobre cada tamiz se convierten en fracciones másicas o en porcentajes de masa de la muestra total. Las partículas que pasan a través del tamiz más fino se recogen en una tapadera situada en el fondo de la columna de tamices.

Los resultados de un análisis por tamizado se tabulan para mostrar la fracción másica de cada incremento sobre el tamiz en función del intervalo del incremento del tamaño de las mallas. Puesto que las partículas que son retenidas por un tamiz han pasado a través del tamiz situado inmediatamente encima de él, se necesitan dos números para especificar el intervalo de tamaños de un incremento: uno para el tamiz a través del cual pasa la fracción y otro para el tamiz sobre el que es retenida. Así, la notación 14/20 quiere decir «a través de 14 mallas y sobre 20 mallas».

En la Tabla 1.3 se muestra un análisis por tamizado típico. Las dos primeras columnas dan el tamaño de malla y la anchura de la abertura de los tamices; la tercera columna es la fracción de masa de la muestra total que es retenida sobre el tamiz en cuestión. Esto es  $x_i$ , donde  $i$  es el número del tamiz comenzando por el fondo de la batería; por tanto,  $i = 1$  para la tapadera del fondo, e  $i + 1$  corresponde al tamiz que está inmediatamente encima del tamiz  $i$ . El símbolo  $D_{pi}$  indica que el diámetro de las partículas es igual a la abertura de malla del tamiz  $i$ .

**Tabla 1.3 Análisis por tamizado típico. (Mc Cabe et. al. 1998)**

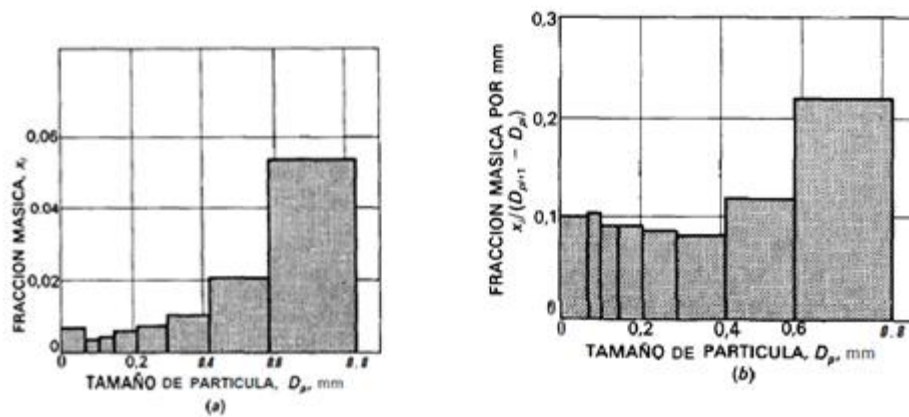
| Mallas   | Abertura del tamiz, $D_{pi}$ , mm | Fracción másica retenida, $x_i$ | Diámetro medio de las partículas en el incremento, $\bar{D}_{pi}$ , mm | Fracción acumulativa inferior a $D_{pi}$ |
|----------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 4        | 4,699                             | 0,0000                          | —                                                                      | 1,0000                                   |
| 6        | 3,321                             | 0,0251                          | 4,013                                                                  | 0,9749                                   |
| 8        | 2,362                             | 0,1250                          | 2,845                                                                  | 0,8499                                   |
| 10       | 1,651                             | 0,3207                          | 2,007                                                                  | 0,5292                                   |
| 14       | 1,168                             | 0,2570                          | 1,409                                                                  | 0,2722                                   |
| 20       | 0,833                             | 0,1590                          | 1,001                                                                  | 0,1132                                   |
| 28       | 0,589                             | 0,0538                          | 0,711                                                                  | 0,0594                                   |
| 35       | 0,417                             | 0,0210                          | 0,503                                                                  | 0,0384                                   |
| 48       | 0,295                             | 0,0102                          | 0,356                                                                  | 0,0282                                   |
| 65       | 0,208                             | 0,0077                          | 0,252                                                                  | 0,0205                                   |
| 100      | 0,147                             | 0,0058                          | 0,178                                                                  | 0,0147                                   |
| 150      | 0,104                             | 0,0041                          | 0,126                                                                  | 0,0106                                   |
| 200      | 0,074                             | 0,0031                          | 0,089                                                                  | 0,0075                                   |
| Tapadera | —                                 | 0,0075                          | 0,037                                                                  | 0,0000                                   |

Las dos últimas columnas de la Tabla 1.3 muestran el diámetro medio de las partículas  $D_{pi}$  en cada incremento y la fracción acumulativa menor que cada valor de  $D_{pi}$ . En los análisis por tamizado las fracciones acumulativas se presentan a veces comenzando por el tamiz superior y se expresan como la fracción «mayor que» un tamaño dado.

Una representación diferencial de los datos de las columnas 2 y 3 de la Tabla 1.3 da una falsa impresión de la distribución de tamaños de las partículas debido a que el intervalo de tamaños de las partículas que comprende es diferente de un incremento a otro. Cuando el intervalo de tamaños de las partículas es estrecho se retiene menos material en un incremento que cuando el intervalo es ancho. En la Figura 1.2 los intervalos son todos iguales y los datos se pueden representar directamente. Sin embargo, en este caso se obtiene una mejor imagen de la distribución mediante una representación gráfica de  $x_i/(D_{pi+1} - D_{pi})$ , donde  $D_{pi+1} - D_{pi}$  es el intervalo de tamaños de las partículas en el incremento  $i$ . Esto se ilustra en las Figuras 1.3 a y b, que son representaciones gráficas directas y diferencial ajustada para los tamaños de partículas 20/28 mallas e inferiores de la Tabla 1.3.

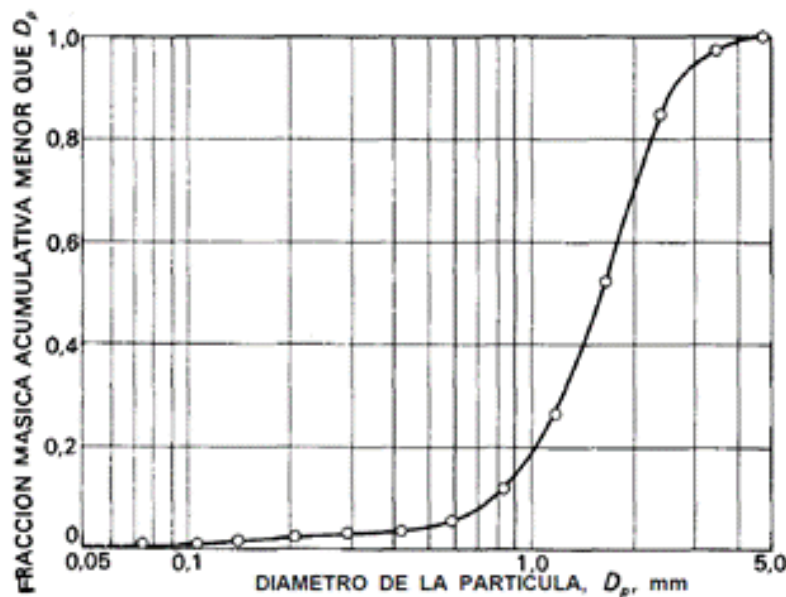
Las gráficas acumulativas se construyen a partir de resultados como los de las columnas 2 y 5 de la Tabla 1.3. Cuando el intervalo global de los tamaños de las partículas es grande, tales gráficas con frecuencia utilizan una escala logarítmica para

el diámetro. En la Figura 1.4 se presenta una gráfica acumulativa semilogarítmica del análisis de la Tabla 1.3.



**Figura 1.3 Análisis Diferencial por Tamizado.**

a) Representación directa de la Tabla 1.3. b) Representación ajustada para el intervalo de trabajo del incremento. (Mc Cabe et. al. 1998)



**Figura 1.4 gráfica acumulativa semilogarítmica del análisis de la Tabla 1.3.**  
(Mc Cabe et. al. 1998)

En la construcción en papel logarítmico-probabilidad en el que la escala de abscisas se divide de acuerdo con una distribución gaussiana de probabilidad. Los análisis por tamizado del producto procedente de un triturador o un molino con frecuencia dan una representación lineal en este tipo de papel, por lo menos para la mayor parte del intervalo de tamaños de las partículas.

Gráficas de este tipo se han utilizado para la extrapolación hasta tamaños de partículas inferiores al intervalo de los tamices usados en el análisis 5b, pero con los métodos actualmente disponibles para la medida de partículas muy finas ya no son necesarias.

- **Medida del tamaño con partículas finas.**

Los tamaños de partículas demasiado finas para el análisis por tamizado se miden por diversos métodos, incluyendo sedimentación diferencial, medidas de la porosidad de lechos sedimentados, absorción de luz en suspensiones, adsorción de gases sobre la superficie de las partículas y por recuento visual utilizando un microscopio<sup>4</sup>. En un aparato de medida, llamado contador de Coulter, se prepara una suspensión diluida de partículas en un líquido eléctricamente conductor, que pasa lentamente a través de un pequeño orificio. A través del orificio se establece una diferencia de potencial eléctrico en el líquido y se mide la corriente eléctrica que circula entre dos electrodos situados antes y después del orificio. Cuando una partícula pasa a través del orificio se reduce momentáneamente la conductividad eléctrica y se produce una perturbación de la corriente. La magnitud de la perturbación es proporcional al volumen de la partícula y, en parte, a la forma de la partícula. A partir del número de perturbaciones y sus magnitudes se calcula automáticamente el tamaño y la distribución de tamaños de las partículas.

- **Propiedades de masas de partículas**

Las masas de partículas sólidas, especialmente cuando las partículas están secas y no se pegan, poseen muchas de las propiedades de un fluido. Ejercen presión sobre las paredes de un contenedor, fluyen a través de un orificio o descienden por una tolva. Sin embargo, se diferencian de los líquidos y gases en varios aspectos, ya que las partículas se entrecruzan y adhieren por efecto de la presión y no pueden deslizarse unas sobre otras hasta que la fuerza aplicada no alcanza un cierto valor. Contrariamente a lo

que ocurre con la mayor parte de los fluidos, los sólidos granulares y las masas sólidas resisten permanentemente la distorsión cuando se someten a una fuerza distorsionante moderada. Cuando la fuerza es suficientemente grande se produce la rotura y una capa de partículas desliza sobre otra, pero entre las capas situadas a ambos lados de la fisura hay una considerable fricción.

Las masas de sólidos tienen las siguientes propiedades distintivas:

1. La presión no es la misma en todas las direcciones. En general, una presión aplicada en una dirección genera alguna presión en otras direcciones, pero siempre es más pequeña que la presión aplicada.
2. Un esfuerzo cortante aplicado en la superficie de una masa se transmite a través de toda una masa estática de partículas mientras no se produzca rotura.
3. La densidad de la masa puede variar, dependiendo del grado de empaquetamiento de los granos. La densidad de un fluido es una función exclusiva de la temperatura y la presión, como lo es cada una de las partículas individuales de un sólido, pero, en cambio, no ocurre lo mismo con la densidad global o aparente. La densidad global es mínima cuando la masa está «suelta» y alcanza un máximo cuando la masa se somete a vibración o apisonamiento.

Dependiendo de sus propiedades de flujo, los sólidos en forma de partículas se dividen en dos clases: cohesivos y no cohesivos. Los materiales no cohesivos como grano, arena o briznas de plástico, fluyen fácilmente desde depósitos o silos. Los sólidos cohesivos, tales como arcilla húmeda, se caracterizan por su dificultad para fluir a través de orificios.

- **Angulo de fricción interna y ángulo de reposo.**

El ángulo  $\alpha_m$  es el ángulo de fricción interna del material. La tangente de este ángulo es el coeficiente de fricción entre las dos capas de partículas. Cuando se apilan sólidos granulares sobre una superficie plana, los lados de la pila forman un ángulo definido reproducible con la horizontal. Este ángulo  $\alpha$ , es el ángulo de reposo del material. Idealmente, si la masa fuese totalmente homogénea,  $\alpha$ , y  $\alpha_m$  serían iguales. En la práctica el ángulo de reposo es menor que el ángulo de fricción interna debido a que los

granos de la superficie exterior están menos empaquetados que los de la masa interior y con frecuencia están más secos y presentan una menor adherencia.

El ángulo de reposo es menor cuando los granos son lisos y redondeados, y es grande cuando se trata de partículas muy finas, angulares o adherentes. Para sólidos cohesivos  $K'$  tiende hacia cero. Para materiales granulares que fluyen libremente  $\alpha_m$  con frecuencia está comprendido entre 0,35 y 0,6, lo que indica que  $\alpha_m$  varía entre 15 y 30°.

- **Almacenamiento de sólidos**

Almacenamiento a la intemperie. Los materiales gruesos, tales como grava y carbón, se almacenan a la intemperie en grandes apilamientos. Cuando se trata de centenares o millares de toneladas de material, éste es el método más económico. Los sólidos se retiran del apilamiento por medio de una cinta transportadora o una pala excavadora. El almacenamiento a la intemperie puede dar lugar a problemas ambientales tales como formación de polvos o lixiviación de material soluble contenido en el apilamiento. La formación de polvos puede exigir algún tipo de recubrimiento protector del sólido almacenado; la lixiviación se puede controlar recubriendo el apilamiento o bien construyendo en su base un estanque poco profundo con el fondo impermeabilizado, de donde se puede retirar con seguridad el líquido de lixiviación.

- **Almacenamiento en depósitos**

Los sólidos que son demasiado valiosos o demasiado 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. Tal como se trata más adelante, el principal problema de diseño de un depósito es conseguir una descarga satisfactoria.

- **Presiones en depósitos, tolvas y silos.**

Diagrama de un depósito cilíndrico que muestra la distribución de presiones y fuerzas. Se indica la superficie de los sólidos, la pared del depósito, un arco diferencial, el fondo del depósito y la fuerza de flotación. Se definen las alturas  $Z$  y  $dZ$ , el radio  $r$ , y las fuerzas  $F_V$ ,  $F_V + dF_V$  y  $F_B = \pi r^2 \rho_B$ . Se detallan las presiones  $p_L$  y  $\mu' p_L$ , y el ángulo  $\tan^{-1} \mu'$ .

18

que la capa diferencial es un émbolo que presiona frente al sólido situado debajo y que el émbolo está accionado por una fuerza vertical concentrada  $F$ , que actúa desde la parte superior. Por tanto, la presión vertical  $p_v$  en el nivel  $Z$  es:

$$p_v = \frac{F_v}{\pi \cdot r^2} \quad (1.8)$$

$$dF_v = \pi \cdot r^2 dp_v \quad (1.9)$$

El aumento neto de la fuerza dirigida hacia abajo causado por la capa diferencial es la fuerza de gravedad  $dF_g$ , menos la fuerza de fricción  $dF_{fr}$ . Por tanto:

$$dF_v = dF_g - dF_{fr} \quad (2.0)$$

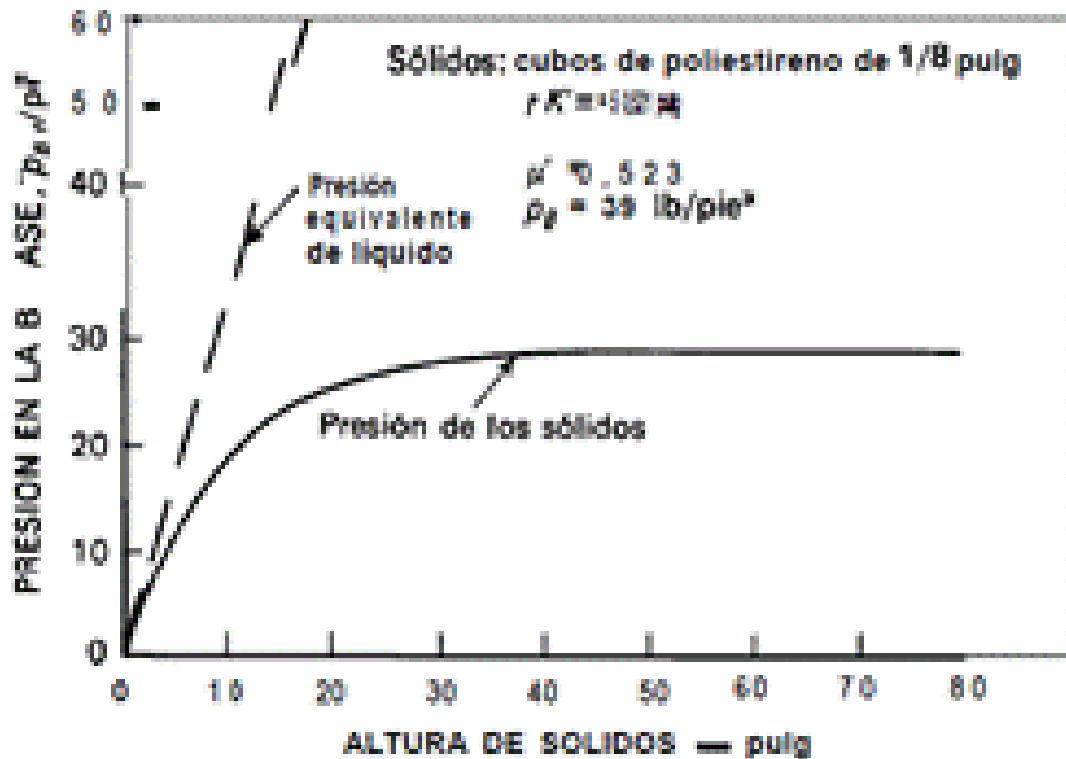
La fuerza de gravedad que actúa sobre la capa es:  $(g/g_c) \cdot \pi \cdot \rho_b \cdot r^2 \cdot dZ$ , donde  $\rho_b$  es la densidad global del material. La fuerza de fricción es el producto del coeficiente de fricción  $\mu'$  en la pared del depósito por la fuerza lateral  $F_L$ . La fuerza lateral viene dada, a su vez, por el producto de la presión lateral  $p_L$  por el área sobre la que actúa:  $2\pi r dZ$ . Por tanto,

$$dF_v = \pi \cdot r^2 \cdot dp_v = \pi \cdot r^2 \cdot \rho_b (g/g_c) \cdot dZ - \mu' (2\pi \cdot r \cdot p_L \cdot dZ) \quad (2.1)$$

Dividiendo por  $\pi \cdot r$ , teniendo en cuenta que  $p_L/p_v = K'$ , despejando  $dZ$  e integrando  $dZ$  de 0 a  $Z_t$  y  $dp_v$  de 0 a  $p_b$ , evaluando para los límites de integración y reordenando se obtiene:

$$p_b = (\rho_b (g/g_c) / 2\mu' K') \cdot (1 - e^{[2\mu' K' \cdot Z_t / r]}) \quad (2.2)$$

La Ecuación (2.2) es la ecuación de Janssen, que ha sido comprobada experimentalmente.



**Figura 1.6 Presión en la base de depósitos cilíndricos conteniendo partículas sólidas.**

En la Figura 1.6 se muestra una relación típica entre la presión en la base y la altura. Cuando existe una gran cantidad de sólido y la altura alcanza un valor aproximadamente tres veces superior al diámetro del depósito, el material adicional virtualmente no tiene efecto sobre la presión en la base. La masa total de depósito más material sigue, por supuesto, aumentando, pero la masa adicional es soportada por la pared y el lecho, y no por el fondo del depósito.

Cuando la sección del depósito no es circular,  $r$  se sustituye por dos veces el radio hidráulico. El coeficiente de fricción se obtiene experimentalmente determinando el ángulo para el cual los sólidos comienzan justamente a deslizar sobre un plano inclinado. El coeficiente  $\mu'$  es la tangente de este ángulo. Para materiales granulares sobre superficies metálicas o de hormigón,  $\mu'$  varía entre 0,35 y 0,55.

- **Descarga de depósitos.**

Los sólidos tienden a descargar por cualquier orificio de un depósito, pero descargan mejor a través de un orificio situado en el fondo. La presión en una salida lateral es menor que la presión vertical para el mismo nivel, de forma que la salida se obstruye con mayor facilidad; además, la retirada de sólidos por una salida lateral de un depósito aumenta considerablemente la presión lateral sobre el otro lado durante el tiempo que está fluyendo el sólido. Una salida por el fondo no se obstruye tan fácilmente y no genera presiones anormalmente elevadas sobre ningún punto de las paredes. Excepto para depósitos pequeños, no es posible abrir todo el fondo para la descarga. Generalmente un fondo cónico o piramidal conduce a una pequeña salida circular cerrada con una válvula o a un alimentador rotatorio. La presión en el fondo de la sección cónica o piramidal es considerablemente menor que la expresada por la Ecuación (26.24). Además, la presión vertical fluctúa a medida que descarga el material y, por término medio, es del 5 al 10 por 100 más elevada que cuando la masa es estacionaria.

Cuando se abre la salida situada en el fondo de un depósito que contiene sólidos que fluyen libremente, el material situado inmediatamente encima de la abertura comienza a fluir. Se desarrollan uno o dos modelos de flujo dependiendo de la inclinación de las paredes en la sección inferior del depósito y del coeficiente de fricción entre los sólidos y las paredes del depósito<sup>5</sup>. En depósitos de fondo cónico, con un cono alto, se desarrolla flujo de masa, caracterizado porque todo el material desciende uniformemente desde la parte superior del depósito. En depósitos con un cono corto, o con paredes verticales y una abertura central en el fondo, tiene lugar flujo de túnel. En este caso, una columna vertical de sólidos, situada sobre la abertura, desciende sin perturbar al material lateral. Eventualmente comienza el flujo lateral, primeramente desde la capa más alta de sólidos, formándose una depresión cónica en la masa. Los sólidos situados en el fondo del depósito o cerca de las paredes son los últimos en salir. El material desliza lateralmente hacia la columna central con un ángulo aproximadamente igual al ángulo de fricción interna de los sólidos. Si se añade más material por la parte superior del depósito con la misma velocidad con la que descarga

por el fondo, los sólidos próximos a las paredes del depósito permanecen estancados y no descargan cualquiera que sea el tiempo que dure el flujo.

La velocidad de flujo de sólidos granulares por gravedad a través de una abertura circular en el fondo del depósito depende del diámetro de la abertura y de las propiedades de los sólidos. En un amplio intervalo, no depende de la altura del lecho de sólidos. Una ecuación empírica dimensional para partículas de densidad  $\rho$ , que fluyen libremente, en el intervalo de tamaños comprendido entre 4 y 20 mallas, es 1

PPD::

$$m = (6,288 \text{ tga} + 23,16)(D + 1,889) - 44,90$$

(26925)

Donde  $r_{iz}$  = velocidad de flujo de sólidos, lb/min

$D_a$  = diámetro de la abertura, pulg

$\phi$  = ángulo de fricción interna de los sólidos

$D_p$  = diámetro de las partículas

El exponente  $n$  varía desde aproximadamente 2,8 para partículas angulosas hasta aproximadamente 3,1 para esferas. (Laforge y Boruff, 1964) y (Smith y Hattiangadi, 1980) han realizado estudios detallados sobre el flujo de partículas a través de orificios.

En general, con sólidos cohesivos es difícil iniciar el flujo. Sin embargo, una vez que comienza, éste se restablece en el material situado directamente encima de la abertura de descarga. Con frecuencia la columna de sólidos situada encima de la salida se desplaza como un émbolo, dejando un «agujero de ratón» con paredes casi verticales.

Los sólidos adherentes, y aun también algunos polvos secos, se adhieren fuertemente a las superficies verticales y tienen suficiente fuerza de corte para soportar un tapón de considerable diámetro encima de una abertura de descarga. Por tanto, para iniciar el flujo y mantener el material en movimiento, con frecuencia se requieren vibradores sobre las paredes del depósito, cuchillas rascadoras cerca del fondo del depósito, o chorros de aire en la abertura de descarga. La abertura de descarga ha de ser suficientemente pequeña para que pueda ser cerrada fácilmente cuando los sólidos están fluyendo, pero no tanto que se obstruya. Es preferible hacer la abertura suficientemente grande para que pase todo el flujo deseado cuando está semiabierta.

En este caso se puede abrir más para contrarrestar una obstrucción parcial. Sin embargo, si la abertura es demasiado grande, la válvula de cierre puede ser difícil de accionar y el control de la velocidad de flujo será malo.

### **1.3 Formación de polvos y gases polvorientos en los procesos metalúrgicos.**

Casi todas las etapas de los procesos de producción de metales no ferrosos y raros van acompañadas de la formación del polvo que sale con los gases tecnológicos y de ventilación. A estos gases se les unen en forma de impurezas los óxidos de azufre (anhídrido sulfúrico y sulfuros), cloruro de hidrogeno, cloro, flúor y algunos otros componentes de la materia prima.

La cantidad del polvo formado – el llamado arrastre o conversión del metal en polvo- depende del proceso metalúrgico, su intensidad, estructura del equipo, característica físico-químicas, de la carga, dimensiones, resistencia, contenido de metales y compuestos fáciles de sublimar, etc. y de otros factores.

Con mayor intensidad el polvo se forma durante los procesos metalúrgicos nuevos tales como la calcinación y fusión de concentrados en la capa hirviente y en suspensión, procesos de sublimación, etc.

A continuación en la Tabla 1.1 se exponen los datos sobre el arrastre o conversión de metal en polvo (% contra masa), en los procesos piro-metalúrgicos de obtención de cobre, plomo, zinc, níquel.

Estos datos en algunos casos están referidos a las condiciones concretas de unas empresas metalúrgicas las cuales influyen en el coeficiente de arrastre de polvo. El proceso de captación de polvo bien organizado es muy importante para el aprovechamiento completo de todos los componentes de materia prima a elaborar. Por ejemplo, en los procesos de sublimado de escoria en hornos rotatorios y en hornos de cubas prácticamente todas las partículas de metales raros y ferrosos salen en forma de polvo con los gases y la captación poco eficaz de polvo conlleva grandes pérdidas económicas.

| <b>Tabla 1.1 Arrastre o conversión de metal en polvo (% contra masa), en los procesos piro-metalúrgicos de obtención de cobre, plomo, zinc y níquel.</b> |                               |                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Proceso piro metalúrgico (Equipo)                                                                                                                        | Arrastre de polvo de la carga | Conversión de metal en polvo |
| <b>Cobre</b>                                                                                                                                             |                               |                              |
| Hornos de calcinación:                                                                                                                                   |                               |                              |
| De soleras múltiples                                                                                                                                     | 5- 15                         | -                            |
| En capa hirviente                                                                                                                                        | 35-45                         | -                            |
| Fusión de hornos de cuba                                                                                                                                 |                               |                              |
| Materia prima                                                                                                                                            | 2-8                           | -                            |
| Materia prima secundaria                                                                                                                                 | 3-4                           | 45,0 Zn                      |
| Fusión de concentrados de concentrados de cobre en suspensión (soplado caliente y con oxígeno )                                                          | 6-7                           | -                            |
| Fusión en horno de reverbero                                                                                                                             | Hasta 1,0                     | 4,5Pb;0,8-0,9 Cu             |
| Afino con viento                                                                                                                                         |                               |                              |
| Materia prima                                                                                                                                            | -                             | 1,0-3,3Cu                    |
| Materia prima secundaria                                                                                                                                 | -                             | 65,8Zn;32,8Pb;50,8Sn         |
| <b>Plomo</b>                                                                                                                                             |                               |                              |
| Hornos de aglomeración                                                                                                                                   | -                             | 2 ,1 Pb                      |
| Fusión de hornos de cuba                                                                                                                                 | 0,5-1,0                       | 0,5-,0Pb                     |
| Fusión de hornos                                                                                                                                         | 25-30                         | 15-20Pb                      |
| Sublimado de escoria(fuming)                                                                                                                             | -                             | 95-97Pb ,88-90Zn             |
| <b>Zinc</b>                                                                                                                                              |                               |                              |
| Hornos de calcinación                                                                                                                                    | 30-40                         | -                            |
| Hornos rotatorios                                                                                                                                        | -                             | 92 Zn;85Pb ;97Cd;75Zn        |
| <b>Níquel</b>                                                                                                                                            |                               |                              |
| Hornos de calcinación para sulfuros de níquel                                                                                                            | 8-10                          | -                            |
| Hornos de cuba(fusión de níquel oxidado )                                                                                                                | 7-16                          | 2,4 NI                       |
| Convertidores                                                                                                                                            | 2- 2,5                        | -                            |

De lo anterior se deduce que la mayor parte de los componentes concomitantes se convierte en polvo (cadmio, germanio, talio, selenio y otros metales con volatilidad elevada). Por esta razón el polvo representa una materia prima muy valiosa para la recuperación de metales y al mismo tiempo muy dañino para la salud humana.

Sin embargo, el significado de la captación de polvo en el sistema de aprovechamiento completo de materia prima no se limita a la utilización del polvo captado. La purificación de los gases de polvo es imprescindible, si los óxidos de azufre contenidos deben ser utilizados.

#### **1.4 Formación de polvos y gases polvorientos y minimización del riesgo medioambiental en la industria de fabricación del cemento.**

- **Riesgos medioambientales durante la producción de cemento.**

En la industria del cemento, tanto el producto final como los intermedios son polvorientos. La producción de polvo es una inevitable secuela que acompaña al proceso de desmenuzamiento y a la manipulación técnica de los minerales.

El Cemento es un material que se obtiene mezclando, en proporciones adecuadas y moliendo a un alto grado de finura, materias primas calizas y arcillosas, que calentadas hasta prácticamente su límite de fusión (1 450°C) dan lugar al clínker.

El clínker está compuesto fundamentalmente de silicatos de calcio, responsables principales en el endurecimiento, y de otros compuestos como el aluminato tricálcico y el ferrito aluminato tetracálcico necesarios en la tecnología del cemento para disminuir la temperatura de formación de los silicatos cálcicos. Pequeñas proporciones de otros óxidos (MgO, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) se encuentran presentes por formar parte de las materias primas o del combustible utilizado.

El cemento es un aglomerante fácilmente moldeable y resistente una vez fraguado, estas características hacen de él un elemento básico en la construcción de infraestructuras.

Los principales aspectos medioambientales que caracterizan a esta industria son:

- Emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y partículas, asociadas al funcionamiento del horno de clínker. Del mismo modo, la descarbonatación de la caliza entrante en el proceso, genera la emisión de CO<sub>2</sub>, vapor de agua y oxígeno. Adicionalmente, se pueden producir emisiones de CO y COV durante la combustión. La cantidad

liberada por el horno dependerá del contenido en materia orgánica del combustible, así como de las condiciones de la combustión.

- El eventual uso de residuos orgánicos, como combustibles alternativos, podría aportar un riesgo adicional, como es la posible generación de emisiones de dioxinas y foranos, asociadas a la presencia de cloro y compuestos orgánicos durante la combustión.
- Emisiones de partículas durante las operaciones de manipulación, transporte y almacenamiento de materias primas y combustibles sólidos.
- Emisiones de metales y sus compuestos, presentes tanto en las materias primas como en los combustibles utilizados en el horno.
- Residuos procedentes de la depuración de las materias primas durante el proceso de preparación del crudo.
- Residuos compuestos por las partículas acumuladas en los filtros, que no puedan ser recirculadas.
- Residuos originados en la instalación como consecuencia del mantenimiento mecánico de los equipos (aceites, filtros, baterías, material contaminado por Hidrocarburos). Igualmente, el mantenimiento eléctrico supone la generación de residuos peligrosos como fluorescentes, baterías, plásticos, ó material contaminado con PCB's.
- Ruido asociado a procesos de molienda, ventilación, conducción de gases y enfriamiento. Generalmente, estos ruidos se ven atenuados con la utilización de cerramientos de materiales absorbentes y barreras acústicas.
- Contaminación de aguas pluviales por arrastre de los combustibles (carbón, coque), y ciertos aditivos, normalmente acumulados en acopios exteriores ubicados a la intemperie.

Actualmente, existen cuatro tipos de procesos de producción de cemento:

1. Vía seca: las materias primas, son enviadas a un proceso de trituración y secado antes de alimentar al pre calcinador ó al horno. Es el proceso que supone un menor coste económico.
2. Vía semiseca: el crudo se peletiza con agua para después ser enviado, según la instalación a un precalentador de parrillas ó a un horno largo.
3. Vía semihúmeda: se añade agua al crudo hasta formar una pasta, ésta es escurrida en un filtro prensa. La torta resultante del filtrado es introducida en un precalentador de parrillas ó bien en un secador donde se convertirá en crudo.
4. Vía húmeda: se realiza una molienda de materias primas con agua hasta formar una pasta. Ésta es introducida en el horno, pudiendo, en ocasiones, ser secada previamente.

La elección de una u otra forma de obtención de cemento, está ligada al contenido en agua de las materias primas utilizadas.

El análisis de los riesgos ambientales, que será objeto de este epígrafe, se centrará en los principales riesgos ambientales asociados al proceso de producción de cemento por vía seca, ya que es el más frecuentemente utilizado en Cuba. Esto se debe principalmente, a la disponibilidad de materias primas con un bajo contenido en agua.

En los últimos años, el uso de residuos o subproductos como combustibles de sustitución ha aumentado de forma notable. Este hecho supone la aparición de nuevos riesgos medioambientales asociados a estas prácticas, que también serán objeto de análisis en este epígrafe.

- **Evaluación de riesgos medioambientales:**
  - **Para el aire**

Las emisiones liberadas a la atmósfera, son el principal riesgo de la industria cementera. Las emisiones más significativas, están asociadas al funcionamiento del horno utilizado para la fabricación de clínker. Los principales contaminantes generados son óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas. Adicionalmente, se emiten también partículas al medio de forma difusa, durante las labores de extracción, transporte, manipulación y almacenamiento de materias primas.

En los últimos años, se han comenzado a utilizar combustibles “alternativos” a los convencionales, como residuos con poder calorífico adecuado. En estos casos, pueden generarse emisiones de otros contaminantes como dioxinas, furanos, metales pesados, HF y HCl.

En las operaciones, que se pueden considerar, propiamente, como parte del proceso de fabricación de cemento, es posible distinguir los siguientes riesgos medioambientales:

- Emisiones de partículas, como consecuencia de las reacciones de transformación de las materias primas en el horno, y del funcionamiento de los enfriadores de clínker.
- Emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}$ ), asociadas a las altas temperaturas registradas en el horno. Éstos compuestos se generan a partir de la reacción con oxígeno, tanto del  $\text{N}_2$  del aire, como del presente en el combustible.
- Emisiones de  $\text{SO}_2$  generadas a partir del azufre que entra en el proceso formando parte de materias primas y combustibles. De ellas sólo un 30% de las aportadas por las materias primas será liberada a la atmósfera, mientras que el resto será retenido en el clínker gracias a las altas temperaturas y tiempo de residencia.
- Emisión de  $\text{CO}_2$  procedente de la descarbonatación de la caliza, y en menor medida, de la combustión. Pueden originarse asimismo, emisiones de  $\text{CO}$ , relacionadas con un alto contenido en materia orgánica, ó con una combustión incompleta.
- Emisión de COV durante las primeras fases de la combustión, debido a la volatilización de las materias primas al entrar en contacto con los gases calientes.
- Emisión de Hg y Tl, contenidos en materias primas o combustible, debido a su elevada volatilidad, que hace difícil su fijación al clínker.

- Emisiones de dioxinas y furanos, aunque no es común, podrían originarse cuando los combustibles ó las materias primas poseen un alto contenido en materia orgánica, y se une a este hecho la presencia de cloro.
- Emisión de HCl y HF, asociada al uso de combustibles orgánicos. En el caso de tratamiento de residuos, el control de estos contaminantes junto con el de dioxinas, furanos y metales, garantiza el buen funcionamiento del horno.
- Emisiones de polvo y partículas como consecuencia de labores de molienda, manipulación y tratamiento de materias primas.
- Emisiones de partículas, generadas durante la eliminación de residuos inertes.
- Ruido asociado a labores de extracción de materias primas (perforaciones, voladuras, excavaciones).
- Ruido provocado por los molinos de materias primas y clínker, debido a la fricción de sólidos en su interior.
- Ruido provocado por las conducciones de gases y por los sistemas de enfriamiento de clínker (ventiladores).
- **Para el agua**

El consumo de agua, así como la producción de vertidos, tienen una menor relevancia en el proceso de fabricación de cemento. En este tipo de industrias, no se producen vertidos de agua de proceso. Esto es debido a que la única incorporación de agua se produce junto con las materias primas, en los procesos de algunas industrias (vía semiseca, semihúmeda y húmeda). En cualquiera de los casos anteriores, el agua incorporada al crudo, será eliminada por evaporación a su paso por el pre calcinador ó por el horno de clínker.

Pese a que no se generan efluentes residuales líquidos asociados a la producción, dentro de las instalaciones se van a generar otros efluentes residuales, que hay que tener en cuenta, éstos son los siguientes:

- Aguas sanitarias asociadas a vestuarios y servicios de las instalaciones.
- Aguas pluviales contaminadas: el almacenamiento de combustible en acopios ubicados a la intemperie, suponen un riesgo de contaminación de las aguas

pluviales, debido a la posibilidad de arrastre de materiales hasta la red de drenaje pública ó a zonas sin pavimentar que favorezcan su infiltración al suelo. Aguas de riego de almacenamientos de combustible: en ocasiones, cuando los acopios de combustible ó materias primas lo requieren, es necesario un riego de éstos para evitar, una acción erosiva del viento. Las aguas utilizadas en este proceso contienen una carga contaminante, por lo que deben ser enviadas a un drenaje, independiente de aquel de las aguas pluviales, para su posterior tratamiento.

- **Para el suelo**

La industria cementera, produce como único residuo de su proceso, una baja cantidad de materiales que son desechados de las materias primas durante su preparación. Este hecho, unido a la escasa utilización de agua en la instalación, hace que las posibles afecciones, derivadas del proceso industrial, al suelo no sean un riesgo significativo.

Sin embargo, pueden existir riesgos asociados a la gestión inadecuada de residuos peligrosos y a situaciones de fuga accidental de lubricante utilizado en las instalaciones, entre los que se distinguen:

- Riesgo de contaminación del suelo asociado a residuos:
- Aceites usados
- Grasas usadas
- Líquidos procedentes de los transformadores eléctricos
- Material impregnado en hidrocarburos (filtros, chatarra...)
- Baterías
- Riesgos asociados a un mal almacenamiento del combustible:

Los combustibles utilizados en el proceso pueden ser muy diversos, aunque en la actualidad los más comúnmente usados son el coque de petróleo y el carbón. Éstos, actualmente se están sustituyendo parcialmente por residuos como combustibles alternativos.

Adicionalmente, se suele disponer de fuel para las operaciones de puesta en funcionamiento del horno.

Una mala gestión en los depósitos de almacenamiento, así como en las operaciones de carga y descarga pueden ser causa de contaminación del suelo por dispersión de materiales pulverulentos.

En el caso de combustibles líquidos (fuel), o residuos sustitutivos (pinturas, disolventes, aceites usados, barnices), su almacenamiento, conlleva un riesgo asociado de contaminación del suelo. Estas afecciones pueden ser originadas por derrames ó fugas de las conducciones que alimentan el horno ó en operaciones de transporte alternativo de los mismos.

- **Síntesis de los riesgos medioambientales identificados.**

Los riesgos evaluados quedan representados en el siguiente esquema donde pueden ubicarse cada uno de ellos según su gravedad y la frecuencia con la que acontecen gravedad y frecuencia han sido valoradas con puntuaciones de cero a cinco. El producto de ambas magnitudes genera una esfera que nos permite la valoración cualitativa del riesgo.

La línea roja discontinua separa los riesgos que se consideran significativos, es decir sobre aquellos que deberán centrarse nuestras actuaciones para minimizar el riesgo global de la instalación con respecto al medioambiente.

Los riesgos ambientales significativos asociados a la fabricación de cemento están relacionados con la emisión de contaminantes a la atmósfera.

Los principales contaminantes generados son los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre y las partículas.

- **Gerencia de riesgos medioambientales.**

A continuación se describen algunas de las pautas más relevantes a tener en cuenta para la minimización de los riesgos medioambientales identificados.

- **Política de control de riesgos medioambientales**

La disposición de una política de minimización de riesgos ambientales es un elemento clave para la reducción del riesgo ambiental de una instalación. Es la política un elemento integrador entre el compromiso de la entidad con la protección del medio ambiente y las acciones a tomar para la reducción del riesgo.

El objetivo prioritario será la protección del medio ambiente y el elemento a potenciar la Seguridad Ambiental, fundamentada ésta en la protección del ambiente interno y externo de la instalación y la búsqueda en la compatibilidad entre nuestra actividad y el medio ambiente.

Un primer paso para la correcta gerencia de los riesgos medioambientales, es el conocimiento de los riesgos de nuestra propia instalación, tomando como referencia la calidad del entorno su valoración y la selección de los riesgos verdaderamente significativos con el fin de reducirlos al máximo empleando la menor cantidad de recursos posibles.

La identificación de riesgos particularizados para una instalación no es un proceso sencillo y requiere de herramientas de gestión.

La adecuada gestión de los riesgos permitirá la adecuada toma de decisiones para la organización en situaciones en las que se puedan ver alterados los estándares de Seguridad Ambiental deseados.

- **Gestión del riesgo medioambiental.**

Identificados y evaluados los principales riesgos en la industria de fabricación de cemento, es posible emprender algunas acciones para su minimización. La aplicabilidad de éstas dependerá del tipo de industria y se fundamentará en la realización de un análisis de las condiciones operativas, económicas y técnicas de cada situación en cuestión.

- **Materias Primas**

Las materias primas utilizadas en el proceso de fabricación de cemento, son en su mayoría minerales (calizas, margas, arcillas, yesos). Este hecho favorece que la trascendencia, de los riesgos asociados al transporte y almacenamiento, sea menor.

Sin embargo, la elección de la composición de las materias primas, condiciona la calidad de las emisiones liberadas a la atmósfera. De esta forma, la emisión de SO<sub>2</sub>, será minimizada con la elección de materias primas pobres en azufre. De esta relación, entre composición de los materiales introducidos en el proceso y emisiones liberadas, se deduce la necesidad de control sobre las materias primas.

El consumo de materias primas puede verse reducido mediante la sustitución de éstas, por residuos inorgánicos aptos para la preparación del crudo, como arenas de fundición ó residuos de construcción y demolición.

La utilización alternativa de subproductos y residuos como combustible, supone, además de una forma de valorización, un ahorro significativo de recursos naturales.

Los materiales susceptibles de ser usados como combustibles son de muy diversa naturaleza:

- Papel y plásticos
- Neumáticos
- Disolventes, pinturas y barnices (No halogenados)
- Lodos de depuradora
- Aceites usados
- Harinas de carne

En el caso de algunos residuos generados en las propias instalaciones, es posible su reintroducción en las líneas de producción, como por ejemplo, las partículas retenidas en el filtro del horno de clínker, que pueden ser reintroducidas en el proceso, contribuyendo de esta forma, a la reducción de materias primas

### **• Procesos**

El riesgo medioambiental más importante asociado al proceso de fabricación de cemento, se basa en la emisión de gases y partículas. Su reducción, está condicionada por la incorporación de las mejores técnicas disponibles (MTD's). Adicionalmente,

éstas, pueden ser completadas con la implantación de buenas prácticas en las distintas operaciones, lo que en muchos casos puede suponer una minimización del riesgo, sin la necesidad de acometer grandes inversiones.

El buen funcionamiento del horno, supone un parámetro crítico en la emisión de gases. La eficiencia de éste, aumenta si se procura una adecuada homogenización de las materias primas, una correcta dosificación de material entrante en el horno y una elevada velocidad de enfriamiento del clínker. De forma adicional, con estas prácticas se consiguen otras prestaciones como reducir el consumo de combustible.

El control del contenido en O<sub>2</sub> en el horno, es un factor que puede variar la cantidad de emisiones generadas.

En el caso de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>, NO) su generación se ve favorecida por altos niveles de concentración de O<sub>2</sub>, por el contrario en el caso del SO<sub>2</sub> y CO se ven favorecidos por la ausencia de una concentración de oxígeno suficiente. Además de este control, las condiciones de trabajo del horno, existen una serie de medidas específicas, consideradas, actualmente, las mejores técnicas disponibles (MTD's), en la minimización de emisiones, que pueden ser aplicadas para la reducción de las mismas.

- **Control de emisiones de NO<sub>x</sub>**

Instalación de un quemador de bajo NO<sub>x</sub>, en este tipo de equipos es menor la cantidad de aire requerido para la combustión, y por tanto se genera una atmósfera con menor contenido en oxígeno.

- **Combustión por etapas, mediante un sistema de ciclones y pre calcinador.**

Reducción no catalítica-selectiva, esta técnica utiliza amoníaco ó sustancias similares, como reductor, a fin de transformar los óxidos de nitrógeno en nitrógeno atmosférico. Esta técnica tiene asociado el riesgo de emisiones ó derrames de los productos utilizados para la reducción de los óxidos de nitrógeno. Actualmente esta técnica se encuentra en fase de desarrollo.

- **Control de emisiones de SO<sub>x</sub>**

La concentración de oxígeno en el horno, es un parámetro crítico en las emisiones de óxidos de azufre. Al contrario de lo ocurrido con los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), una atmósfera oxidante favorece la minimización de emisiones de éstos compuestos.

La adición de absorbente en hornos de vía seca, es una medida adicional para el control de emisiones de  $\text{SO}_x$ .

El material absorbente (cal viva, cal apagada ó cenizas volantes con alto contenido de cal) es inyectado al gas de salida del horno, ó bien se añade cal al crudo entrante en el precalentador.

Este procedimiento es muy costoso, por lo que sólo será recomendable en el caso de ser insuficiente la implantación de medidas primarias para el control de  $\text{SO}_2$ , como la disminución de la temperatura de llama, el aumento de contenido en  $\text{O}_2$  y el control de la estabilidad en el funcionamiento del horno.

- **Control de emisiones de partículas.**

En la minimización de emisiones de partículas, las MTD's se diferencian según el tipo de foco que las produce, se distinguen las siguientes:

- **Emisiones de fuentes difusas.**

La contaminación generada por fuentes difusas, está ligado a las labores de manipulación y almacenamiento de materias primas, clínker y combustible. Unas prácticas adecuadas en estos procesos, y un correcto mantenimiento, reducen significativamente la dispersión de partículas. Algunas de estas actuaciones dirigidas a controlar estas emisiones se detallan a continuación:

- Cerramiento total ó parcial de las instalaciones que alberguen acopios de sustancias pulverulentas.
- Sistemas de inyección de agua y supresores químicos de polvo en los acopios de material almacenado.
- Construcción de barreras que reduzcan la acción del viento sobre zonas de manipulación de materiales.

- Pavimentación y limpieza de instalaciones y viales.
- Instalación de dispositivos automáticos de control de la contaminación difusa.
- Sistemas fijos ó móviles, de aspiración y desempolvamiento de instalaciones de carga de cemento a granel.
- Ventilación y recogida de partículas en filtros de mangas.
- Almacenamiento del cemento en silos, con sistema de manipulación automática. Estos equipos, disponen de filtros, en los que quedan retenidas las partículas liberadas en operaciones de carga y descarga.
- Emisiones de fuentes puntuales.

La liberación de partículas de forma localizada, se asocia a tres focos principales: la chimenea del horno, los equipos de enfriamiento del clínker y los molinos de cemento. En todos ellos, se pueden minimizar las emisiones con sistemas de captación de partículas de alta eficacia: Precipitadores electrostáticos: estos captadores generan un campo electrostático que carga las partículas positivamente. Éstas son atraídas y retenidas por las placas que se sitúan dentro del precipitador, con carga negativa. La limpieza periódica de las placas es necesaria para asegurar el buen funcionamiento del equipo. Para mantener la eficacia del precipitador, es conveniente evitar las subidas bruscas en la concentración de CO.

Filtros de mangas: poseen una membrana, de tejido permeable para los gases, e impermeable para la fracción sólida. Las partículas que son retenidas, forman una torta que dificultará el paso del aire a medida que aumenta su grosor, por este motivo, periódicamente, se debe retirar mediante agitación, vibración, aire comprimido ó flujo de gas inverso. El equipo está dotado de detectores automáticos, que se activarán en caso de rotura de una manga. Los tejidos que componen el filtro, deben ser adecuados para las condiciones de presión y temperatura del gas.

- **Productos**

El uso de subproductos ó residuos como materias primas y combustibles reduce el consumo de otros recursos naturales necesarios para su producción. Además, el

proceso de fabricación de cemento, permite la incorporación al producto, de materiales de desecho como las partículas recogidas en los filtros.

El almacenamiento del producto acabado se realiza en silos. Estos equipos, pueden almacenar uno ó varios tipos de cemento en su interior.

En la actualidad, existen distintos tipos de silos para el almacenamiento óptimo de cemento, los más utilizados son los siguientes:

- Silo de celda única con tolva de descarga
- Silo de celda única con cono central
- Silo multicelular
- Silo domo con cono central
- **Residuos**

El proceso de fabricación de cemento genera una baja cantidad de residuos. Esto se debe en parte, a la posibilidad de reintroducir algunos de ellos, como materias primas, como por ejemplo, las partículas recogidas en los filtros son enviadas al inicio del proceso debido a la similitud de su composición con la de las materias entrantes.

La mayoría de los residuos peligrosos generados, se asocian a las operaciones de mantenimiento de las instalaciones. Principalmente, hay que destacar la generación de grasas, aceites y material contaminado con hidrocarburos, que van a superar el 90% de los residuos peligrosos generados.

Dado el carácter de la actividad, eventualmente, bajo condiciones extraordinarias de reparación ó avería, se generan otros residuos peligrosos no habituales, como tierras contaminadas con hidrocarburos, PCB's de la eliminación de equipos de transformación contaminados, ó amianto en operaciones de demolición de antiguas instalaciones.

El Inventario Europeo de emisiones contaminantes EPER (European Pollution Emission Register) mencionado por la Directiva IPPC 96/61 en su artículo 19 y desarrollado por la Decisión de la Comisión Europea 2000/497/CE, obliga a notificar una serie de contaminantes específicos generados por las instalaciones afectadas por la IPPC 96/61.

# Capítulo I: Marco teórico sobre el tratamiento de sólidos en forma de partículas de la industria en general

En el caso de las instalaciones para la fabricación de cemento, contempladas en el grupo 3.1. de la IPPC 96/61, se identifican a modo orientativo, los siguientes contaminantes potencialmente generados, de los cuales se deberá enviar la información para su registro en el caso de que estas emisiones superen los límites indicados para cada contaminante.

- Emisiones a la atmósfera: Si su industria está afectada por la IPPC 96/61 y genera anualmente una cantidad superior a alguno de los contaminantes reseñados deberá de realizar una declaración para el inventario Europeo de emisiones EPER.

| Tabla 1.4 Evaluación de los riesgos ambientales en la producción de cemento |                                    |                                 |                                             |            |            |           |        |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|------------|------------|-----------|--------|-------|
| No                                                                          | Actividad                          | Aspecto                         | Impacto                                     | Evaluación |            |           |        |       |
|                                                                             |                                    |                                 |                                             | Severidad  | Frecuencia | C. Normas | Efecto | Total |
| 1                                                                           | 2                                  | 3                               | 4                                           | 5          | 6          | 7         | 8      | 9     |
| MATERIAS PRIMAS                                                             |                                    |                                 |                                             |            |            |           |        |       |
| 1                                                                           | Descarga de combustible            | Derrame de diesel por accidente | Contaminación de área                       | 1          | 0          | 0         | 0      | 1     |
| 2                                                                           | Descarga de combustible sólido     | Derrame de combustible sólido   | Contaminación del área del molino de carbón | 2          | 1          | 0         | 0      | 3     |
| 3                                                                           | Transporte de material por bandas  | derrame de material             | contaminación del aire con polvo            | 1          | 3          | 0         | 0      | 4     |
| 4                                                                           | Trituración de las materias primas | ruido                           | contaminación sónica                        | 3          | 3          | 2         | 1      | 9     |
| 5                                                                           | Secado de las materias primas      | emisión de polvo                | contaminación del aire con polvo            | 1          | 2          | 0         | 1      | 4     |
| DOSIFICACIÓN DE CRUDOS                                                      |                                    |                                 |                                             |            |            |           |        |       |
| 6                                                                           | Dosificación de materias primas    | emisión de polvo                | contaminación del aire con polvo            | 1          | 2          | 0         | 1      | 4     |
| 7                                                                           | Molienda de crudo                  | emisión de polvo                | contaminación del aire con polvo            | 1          | 2          | 0         | 1      | 4     |

# Capítulo I: Marco teórico sobre el tratamiento de sólidos en forma de partículas de la industria en general

|                    |                              |                         |                                  |   |   |   |   |   |
|--------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---|---|---|---|---|
| 8                  |                              | ruido                   | contaminación sónica             | 3 | 3 | 2 | 1 | 9 |
| 9                  | Transporte de harina a silos | emisión de polvo        | contaminación del aire con polvo | 1 | 2 | 0 | 1 | 4 |
| <b>PIROPROCESO</b> |                              |                         |                                  |   |   |   |   |   |
| 10                 | Precalentador                | emisión de polvo        | contaminación del aire con polvo | 1 | 4 | 0 | 2 | 7 |
| 11                 |                              | consumo de combustible  | emisión de COx, NOx              | 1 | 4 | 0 | 2 | 7 |
| 12                 |                              | descarbonatación        | emisión de COx                   | 3 | 4 | 0 | 1 | 8 |
| 13                 |                              | consumo de electricidad | consumo de combustible           | 1 | 4 | 0 | 0 | 5 |
| 14                 | Horno                        | consumo de combustible  | emisión de COx, NOx              | 2 | 2 | 0 | 2 | 6 |

|                                                 |                                |                         |                                               |   |   |   |   |   |
|-------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|---|---|---|---|---|
| 15                                              |                                | consumo de electricidad | consumo de combustible                        | 1 | 2 | 0 | 0 | 3 |
| 16                                              | Enfriador                      | consumo de electricidad | consumo de combustible                        | 1 | 4 | 0 | 0 | 5 |
| 17                                              |                                | derrames de clinker     | Contaminación del área                        | 1 | 2 | 3 | 1 | 7 |
| ALMACENAMIENTO DE CLINKER                       |                                |                         |                                               |   |   |   |   |   |
| 18                                              | Elevador de cangilones         | derrames de clinker     | Contaminación del área                        | 2 | 2 | 2 | 1 | 7 |
| 19                                              | Descarga de clinker a camiones | derrames de clinker     | Contaminación del área                        | 1 | 2 | 2 | 1 | 6 |
| 20                                              |                                | emisión de polvo        | contaminación del aire con polvo              | 1 | 2 | 0 | 1 | 4 |
| MOLINO DE CEMENTO                               |                                |                         |                                               |   |   |   |   |   |
| 21                                              | Molienda de cemento            | emisión de polvo        | contaminación atmosférica                     | 2 | 3 | 2 | 1 | 8 |
| 22                                              |                                | derrames de cemento     | contaminación del área                        | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| 23                                              | Descarga de cemento a granel   | derrames de cemento     | Contaminación del área                        | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| 24                                              |                                | emisión de polvo        | contaminación del aire con polvo              | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| TRANSPORTE DE PRODUCTO TERMINADO Y COMBUSTIBLES |                                |                         |                                               |   |   |   |   |   |
| 25                                              | transporte de clinker          | derrames de clinker     | Contaminación de la carretera hasta el puerto | 1 | 1 | 0 | 3 | 5 |
| 26                                              |                                | emisión de polvo        | contaminación del aire con polvo              | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 |

# Capítulo I: Marco teórico sobre el tratamiento de sólidos en forma de partículas de la industria en general

|        |                                                  |                                |                                               |   |   |   |   |   |
|--------|--------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|---|---|---|---|---|
| 27     | transporte de combustible desde el puerto a CCSA | derrames de combustible sólido | Contaminación de la carretera desde el puerto | 2 | 1 | 0 | 3 | 6 |
| 28     |                                                  | emisión de polvo de petcoke    | contaminación del aire con polvo de petcoke   | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| PUERTO |                                                  |                                |                                               |   |   |   |   |   |
| 29     | descarga de petcoke y carga de clinker           | derrames de clinker            | Contaminación de la zona de embarque          | 1 | 1 | 0 | 3 | 5 |

|                     |                                |                                                            |                                                                    |   |   |   |   |   |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|
| 30                  |                                | emisión de polvo                                           | contaminación del aire con polvo<br>zona de embarque               | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| 31                  |                                | derrames de combustible sólido                             | Contaminación de la zona de<br>embarque                            | 1 | 1 | 0 | 3 | 5 |
| 32                  |                                | emisión de polvo de petcoke                                | contaminación del aire con polvo de<br>petcoke la zona de embarque | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
|                     |                                |                                                            |                                                                    |   |   |   |   |   |
| LAGUNA DE OXIDACIÓN |                                |                                                            |                                                                    |   |   |   |   |   |
| 33                  | tratamiento de<br>residuales   | vertido de contaminantes                                   | contaminación de la cuenca caonao                                  | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| ALMACEN DE CARBÓN   |                                |                                                            |                                                                    |   |   |   |   |   |
| 34                  | trasiego de<br>combustible     | emisión de polvo de petcoke                                | contaminación atmosférica                                          | 2 | 3 | 0 | 2 | 7 |
| 35                  |                                | derrames de combustibles                                   | contaminación del terreno aledaño                                  | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| 36                  |                                | derrames de combustible sólido en aguas de<br>escorrentías | contaminación de las aguas de<br>escorrentías                      | 1 | 1 | 2 | 2 | 6 |
| MANTENIMIENTOS      |                                |                                                            |                                                                    |   |   |   |   |   |
| 37                  | ejecución de<br>mantenimientos | generación de desechos sólidos peligrosos                  | contaminación del terreno aledaño                                  | 3 | 2 | 0 | 0 | 5 |
| 38                  |                                | generación de desechos líquidos peligrosos                 | contaminación de las aguas de<br>escorrentías                      | 3 | 2 | 0 | 0 | 5 |
|                     | LABORATORIO                    |                                                            |                                                                    |   |   |   |   |   |
| 39                  | Análisis de<br>Laboratorio     | generación de ruido                                        | contaminación sónica                                               | 2 | 2 | 0 | 0 | 4 |
|                     |                                | emisión de vapores corrosivos                              | contaminación del aire                                             | 3 | 1 | 0 | 0 | 4 |
|                     |                                | emanaciones de polvo                                       |                                                                    | 2 | 1 | 0 | 0 | 3 |

# Capítulo I: Marco teórico sobre el tratamiento de sólidos en forma de partículas de la industria en general

|  |                                                                                                  |                                   |   |   |   |   |   |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|---|
|  | consumo de agua y electricidad.                                                                  | consumo de combustible            | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 |
|  | generación de desechos sólidos (probeta de muestras, materias primas, Harina, Clinker y cemento) | contaminación del terreno aledaño | 1 | 2 | 0 | 0 | 3 |
|  | generación de desechos peligrosos (combustible, lubricantes y etilenglicol)                      | contaminación del terreno aledaño | 2 | 1 | 0 | 0 | 3 |

|          |                                   |                                                                             |                                                     |   |   |   |   |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---|---|---|---|
|          | Emisión de radiaciones ionizantes | aumento de la tasa de dosis ambiental                                       | 1                                                   | 0 | 0 | 0 | 1 |
|          | Generación de desechos líquidos   | contaminación de los efluentes líquidos a la laguna                         | 1                                                   | 1 | 0 | 0 | 2 |
| OFICINAS |                                   |                                                                             |                                                     |   |   |   |   |
| 40       | trabajo de oficinas               | consumo de agua y electricidad.                                             | consumo de combustible                              | 2 | 1 | 0 | 3 |
|          |                                   | generación de desechos peligrosos (cartuchos de fotocopiadoras, impresoras) | contaminación del terreno aledaño                   | 1 | 1 | 0 | 2 |
|          |                                   | Generación de desechos líquidos                                             | contaminación de los efluentes líquidos a la laguna | 1 | 1 | 0 | 2 |

## • Protección del medio ambiente

Actualmente en el mundo se está dando una gran importancia a los problemas de salud y duración de vida de la población, de la protección de la naturaleza contra las salidas de gases y polvos nocivos a la atmósfera y del aprovechamiento racional de recursos naturales.

Según los datos disponibles, la distribución en % de polvo y anhídrido sulfurosos botados a la atmósfera por las estaciones termoeléctricas y distintas industrias es aproximadamente es la siguiente:

| Tabla 1. 2 Contaminación ambiental de las diferentes industrias.<br>(Gordon G.M., Peisájov L.L. 1981) |       |                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------|
| Rama de la industria                                                                                  | Polvo | SO <sub>2</sub> |
| Centrales termoeléctricas                                                                             | 42,5  | 58,6            |
| Siderurgia                                                                                            | 25,6  | 17,6            |
| Metalurgia de metales no ferrosos                                                                     | 2,8   | 18,5            |
| Industria de materiales de construcción                                                               | 27,4  | -               |
| Industria química y de destilación de petróleo                                                        | 1,7   | 5,3             |

Además del polvo y SO<sub>2</sub>, las fábricas de metalurgia de metales no ferrosos contaminan la atmósfera con otras impurezas gaseosas: fluoruro de hidrógeno, cloro y cloruro de hidrógeno, etc.

Es interesante la información de los EE.UU. sobre las descargas de polvo y gases a la atmósfera en 1970. Estas descargas (millones de t/año) alcanzaron en total 172,8, entre ellos: 86,6 de óxido carbónico (67,3 de transporte automóvil); 30,3 de anhídrido sulfuroso (14,0 de centrales termoeléctricas); 16,6 de óxido de nitrógeno (7,0 de transporte automóvil); 14,6 de polvo (8,6 de industrias y procesos tecnológicos). Las pérdidas económicas totales fueron de 15 mil millones de dólares. (Gordon G.M., Peisájov L.L. 1981)

El problema de aumentar la eficiencia del aprovechamiento complejo de materia prima en la metalurgia de metales no ferrosos tiene un gran valor para la economía mundial y está directamente relacionada con la captación de polvo y gases.

Las direcciones fundamentales en el desarrollo de la captación de polvo y gases en la metalurgia de metales no ferrosos son las siguientes: equipamiento de todos los agregados metalúrgicos que botan polvo y gases con captadores de polvo y gases efectivos; hermetización de los transportadores, de los grupos de preparación de carga y otros mecanismos con evacuación de los gases de ventilación polvorientos para la purificación fina; una amplia utilización de oxígeno en los procesos pirometalúrgicos a fin de reducir los volúmenes de gases descargados y elevar la concentración del dióxido de azufre para su uso posterior; aprovechamiento de los componentes gaseosos de los gases para recibir productos útiles (ácido sulfúrico del anhídrido sulfuroso, etc.).

### **Índices técnico-económicos de las instalaciones de captación de polvo.**

#### **1.4.1 Gastos de los diferentes sistemas captadores de polvo.**

La importancia económica de la captación de polvo consiste no solamente en el aprovechamiento de los componentes valiosos del polvo y de las impurezas gaseosas. El efecto mucho más económico se logra evitando el perjuicio causado por los polvos y

gases, que se votan a la atmósfera, a la naturaleza (bosques, áreas verdes), a la agricultura, a la fauna y, en alto grado a la salud humana.

La magnitud de los gastos por la purificación de gases depende de muchos factores: tecnología de la captación de polvo y la construcción de equipos, particularidades del proceso metalúrgico, consumo de energía eléctrica y materiales.

Según los datos de V.N.Leksin y A.G.Tókareva (Gordon y Peisajov, 1981). En los gastos totales para purificar los gases, la amortización y el mantenimiento de medios fundamentales asciende a un valor del 20 al 40%; a la energía y los materiales (tela de filtro, etc.) les corresponde del 20 al 30%; el mantenimiento técnico del 10 al 20%.

Los gastos del trabajo en el total de los gastos no sobrepasan un 10%, como regla, y esta cifra tiende a disminuirse.

(Strauss W, 1996) y otros reunieron los índices técnico-económicos del trabajo de las instalaciones de captación de polvo en una serie de fábricas de plomo y de zinc. Se muestra que para los gastos tanto para la captación de 1t de polvo, como para la purificación de una unidad volumétrica de gases (generalmente 1000 m<sup>3</sup>) varían ampliamente para distintas fábricas de la misma industria y depende de toda una serie de factores, inclusive en los casos de utilizar el mismo método (por ejemplo, electro filtros).

Así, el precio de coste de purificación de 1000 m<sup>3</sup> de gases de los hornos de cuba de fusión en las fábricas de plomo (purificación fina en los filtros de manga) de 17 a 34 kop., de los hornos de calcinación de las fábricas de zinc (purificación fina en electro filtros) de 10 a 25 kop. , y de los hornos rotatorios de las fábricas de zinc (purificación fina en filtros de mangas) de 33 a 61 kop.

Las inversiones básicas y el valor de fondos fundamentales para la captación de polvo dependen, en lo fundamental, del precio y la cantidad de captadores de polvo que se determinan por los volúmenes de gases a purificar y el grado de captación de polvo.

Por más alto que debe ser el grado de captación de polvos muy finos ( $0-5\mu\text{m}$ ), son más grandes las inversiones básicas y los gastos de explotación por una unidad de captación de polvo.

A continuación se muestran los datos que demuestran la correlación entre la eficacia de la captación de polvos muy finos ( $0-5\mu\text{m}$ ) y las inversiones básicas y los gastos de explotación (en unidades convencionales; se toman por una unidad los gastos para un ciclón ordinario):

| <b>Tabla 1. Gastos de los diferentes sistemas de captación de polvo en dependencia de la eficacia de la captación. (Fuente: Gordon G.M., Peisájov L.L. 1981)</b> |                               |                                               |                            |                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| <b>Captador de polvo</b>                                                                                                                                         | <b>Grado de Captación (%)</b> | <b>Pérdida de Presión (mm H<sub>2</sub>O)</b> | <b>Inversiones básicas</b> | <b>Gastos de explotación</b> |
| Ciclón de eficiencia media                                                                                                                                       | 27                            | 95                                            | 1                          | 1                            |
| Ciclón de eficiencia elevada                                                                                                                                     | 73                            | 125                                           | 1,9                        | 1,43                         |
| Electrofiltro seco                                                                                                                                               | 92                            | 15                                            | 9,1                        | 1,90                         |
| Filtro de manga                                                                                                                                                  | 99,9                          | 125                                           | 5,15                       | 4,10                         |
| Captador de polvo rápido (tubo Venturi)                                                                                                                          | 99,6                          | 560                                           | 4,55                       | 6,60                         |

Los requerimientos crecientes a la purificación de gases conlleva un aumento de la parte de los equipos costosos para la captación de polvo, pero el costo de los polvos finos captados adicionalmente no justifica los gastos incrementados desproporcionalmente. No obstante, a escala de la economía nacional esto se recompensa por la reducción de las pérdidas económicas debidas a la contaminación de la atmósfera con salidas de polvo y por el aprovechamiento más racional del producto de purificación fina el cual tiene mejor calidad en comparación con el producto de depuración gruesa.

#### **1.4.2 Importancia económica de la captación del anhídrido sulfuroso y utilización del azufre contenido en los gases.**

Las fábricas de metalurgia de metales no ferrosos tienen disponible una gran cantidad de materia prima que contiene azufre en forma de gases tecnológicos de escape. Actualmente un 50% de azufre se contiene en gases como dióxido de azufre de concentración más del 3,5% (gases fuertes). El resto de azufre se contiene en gases débiles (del 0,1 al 3,5% de anhídrido sulfuroso). Los gases fuertes pueden ser utilizados directamente para obtener el ácido sulfúrico. Su precio de coste es menor que el del ácido obtenido de piritas y de azufre elemental.

Si tomamos como una unidad el precio de coste de 1t de ácido sulfúrico (monohidrato) recibido de los gases tecnológicos en las fábricas de cobre por métodos de contacto, resulta que el precio de coste del ácido a base de piritas es mayor 1,4 veces y a base de azufre elemental 1,6.

Las fuentes fundamentales de los gases débiles son las fábricas de cobre donde se usan hornos de reverberos, las fábricas de níquel, etc.

Puesto que el aprovechamiento directo de los gases débiles para producir el ácido sulfúrico (u otros productos químicos) es técnicamente difícil y no es económico, los botan por las chimeneas lo que afecta el estado de la atmósfera.

Se presta gran atención a los problemas de utilización del anhídrido sulfuroso de los gases metalúrgicos de industria de metales no ferrosos y su aplicación para recibir productos valiosos (ácido sulfúrico, azufre elemental, dióxido de azufre líquido, etc.), así como para disminuir la contaminación atmosférica.

El grado de aprovechamiento del azufre se aumenta mediante toda una serie de medidas, incluyendo la utilización de nuevas tecnologías de metalurgia de metales no ferrosos.

### **1.5 Conclusiones Parciales del Capítulo I**

1. Se realizó una amplia búsqueda bibliográfica sobre las propiedades de los sistemas de partículas tales como: tamaño, forma, dispersidad y contenido del polvo en los gases.
2. Se investigó en la literatura las particularidades de la formación de polvos y gases polvorientos en los procesos industriales más comunes,
3. Se investigaron en la literatura los riesgos medioambientales por la presencia del polvo en los procesos industriales y la necesidad de su minimización.
4. Finalmente se investigaron algunos Índices técnico-económicos de las instalaciones de captación de polvo y su importancia económica.



# *Capítulo 2*

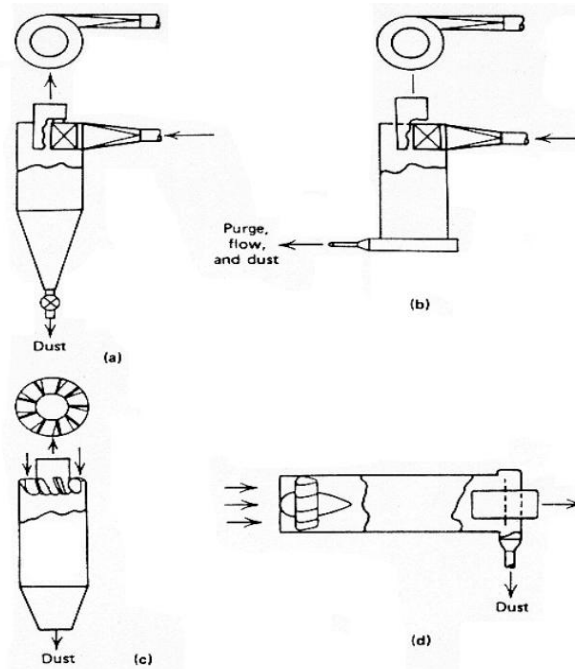
## Capítulo II Los ciclones simples y ciclones tipo batería como sistemas de captación de partículas sólidas.

### 2.1 Descripción de los ciclones.

Los ciclones son equipos mecánicos estacionarios, ampliamente utilizados en la industria, que permiten la separación de partículas de un sólido o de un líquido que se encuentran suspendidas en un gas portador, mediante la fuerza centrífuga. En tanto, los hidrociclones son equipos que permiten la separación de líquidos de distintas densidades, o de partículas sólidas que se encuentran en suspensión en algún líquido.

Los ciclones son equipos muy sencillos, que al no poseer partes móviles son de fácil mantenimiento. Tienen la desventaja de ser poco versátiles, ya que no se adaptan a cambios de las condiciones de operación, por lo cual son poco flexibles a los cambios de concentración de polvos, caudal de gas y distribución de tamaños de partículas.

El principio de funcionamiento de un ciclón se basa en la separación de las partículas mediante la fuerza centrífuga (del orden de cientos de g), lo que lo hace más efectivo que las cámaras de sedimentación, además ocupan un espacio mucho menor. En la Figura 2.1 se muestra distintos tipos de ciclones.



**Figura 2.1 Distintos tipos de ciclones simples**

En los ciclones el gas entra en el tope en forma tangencial (Figuras 2.1.a y b) o axial (Figuras 2.1.c y d). La descarga de los sólidos puede ser periférica (Figuras 2.1 b) y d)) o axial (Figuras. 2.1 a).y c)).

De acuerdo a las distintas combinaciones de entrada del gas se distinguen entonces:

- (a)- Entrada tangencial y descarga axial (Figura 2.1a).
- (b)- Entrada tangencial y descarga periférica (Figura 2.1 b).
- (c)- Entrada y descarga axiales (Figura 2.1c).
- (d)- Entrada axial y descarga periférica (Figura 2.1d)

Los ciclones de entrada de gas axial funcionan de manera similar que los de entrada tangencial, solo que en la entrada del gas (entrada anular) tienen dispuestos unos álabes fijos que le imprimen un movimiento en espiral al gas sucio que entra al ciclón. Los ciclones axiales tienen diámetros menores que los tangenciales (25 a 305 mm), debido a esto tienen alta eficiencia, pero baja capacidad

Los ciclones de entrada tangencial y descarga axial representan el ciclón tradicional y, aunque se pueden construir con diámetros más grandes, lo más frecuente es que éstos se encuentren entre los 600 y los 915 mm.

En los ciclones con entrada tangencial y descarga periférica, el gas sufre un retroceso en el interior del equipo al igual que ocurre en un ciclón convencional. Sin embargo, presenta el inconveniente de que el polvo no es eliminado en su totalidad de la corriente gaseosa, aunque sí se produce una concentración del mismo.

Por otra parte, los ciclones de entrada axial y salida periférica proporcionan un flujo directo que es muy adecuado para conectarlos a fuentes de gran volumen, donde los cambios en la dirección del gas podrían ser un inconveniente.

El principio de funcionamiento tanto de los ciclones axiales como los tangenciales es el mismo. Los más usados son los ciclones de entrada de gas tangencial y salida del sólido axial, por lo cual nos limitaremos al estudio de estos.

Las partes principales son: la entrada de gas sucio, conectada tangencialmente en la parte superior del cuerpo cilíndrico o barril del ciclón. El barril cumple la función de imprimir al gas un movimiento en espiral descendente. Conectado al barril hay un cono

invertido que cumple la función de conducir el polvo separado hacia el tubo de descarga, de longitud variable, también denominado cola o pierna del ciclón.

En la base del cono invertido se produce la inversión del flujo de gas, de modo que el gas comienza allí una espiral en forma ascendente, concéntrica a la espiral descendente, saliendo el gas limpio por el conducto superior de salida.

Los polvos separados son descargados en la pierna del ciclón. En la cola del ciclón puede existir o no una válvula de charnela que se abre solamente por el peso de los sólidos acumulados en la pierna del ciclón, produciendo de esta manera la descarga automática de los polvos.

Los ciclones pueden operar a altas temperaturas. La temperatura máxima depende del material de construcción del ciclón. Para ciclones construidos en acero al carbono la máxima temperatura de operación es de 800 °C. En cuanto a la presión, lo importante es la diferencia de presión a la cual está sometido el ciclón. Si es un ciclón interno, por ejemplo en un lecho fluidizado que opera a altas presiones, la diferencia de presión interna y externa del ciclón es nula, por lo cual no deben tenerse consideraciones de resistencia en su diseño. En cambio si se trata de un ciclón externo que procesa gas sucio a alta presión, tendrá una presión interna mucho mayor que la externa, lo cual deberá tenerse en cuenta en el diseño del mismo. La fricción de las partículas sólidas erosionan severamente las paredes interiores del ciclón. Para disminuir el deterioro del mismo suele colocarse mallas del tipo hexagonal que se recubren con cemento.

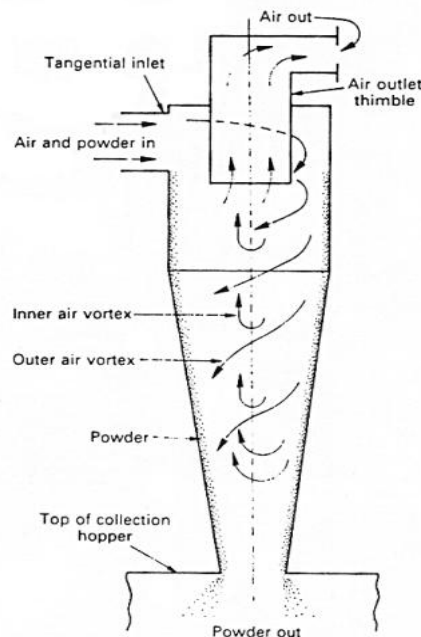
## **2.2 Principio de Funcionamiento de los ciclones.**

El gas ingresa por el conducto de entrada del ciclón a una velocidad  $V_i$  (velocidad de entrada al ciclón). Este conducto se halla ubicado en forma tangencial al barril o cuerpo del ciclón. Entra al barril y comienza el movimiento en espiral descendente. El cambio de dirección genera un campo centrífugo equivalente a cientos de veces el campo gravitacional terrestre. (Cientos de veces  $g$ ). Las partículas transportadas por el gas debido a su inercia, se mueven alejándose del centro de rotación o “eje del ciclón”, por acción de las líneas de fuerza del campo centrífugo, alcanzando las paredes internas del barril del ciclón, donde pierden cantidad de movimiento y se deslizan por la pared del barril hacia el cono y desde allí a la pierna del ciclón.

El gas en su movimiento descendente va despojándose de las partículas sólidas y al llegar a la base del cono, invierte el flujo, siguiendo una espiral ascendente ya libre prácticamente de partículas (gas limpio). El movimiento del gas en el interior del ciclón consiste en una trayectoria de doble hélice. Inicialmente realiza una espiral hacia abajo, acercándose gradualmente a la parte central del separador, y a continuación se eleva y lo abandona a través de una salida central situada en la parte superior. Esta doble espiral es la que se denomina flujo ciclónico. Las partículas más grandes y más densas son forzadas hacia las paredes del ciclón, dejando atrás las partículas.

Una vez que el gas penetra tangencialmente en el equipo se distinguen dos zonas de características distintas de movimiento: En la zona próxima a la entrada del gas y en aquella más exterior del cilindro predomina la velocidad tangencial, la velocidad radial es centrípeta y la axial de sentido descendente. La presión es relativamente alta.

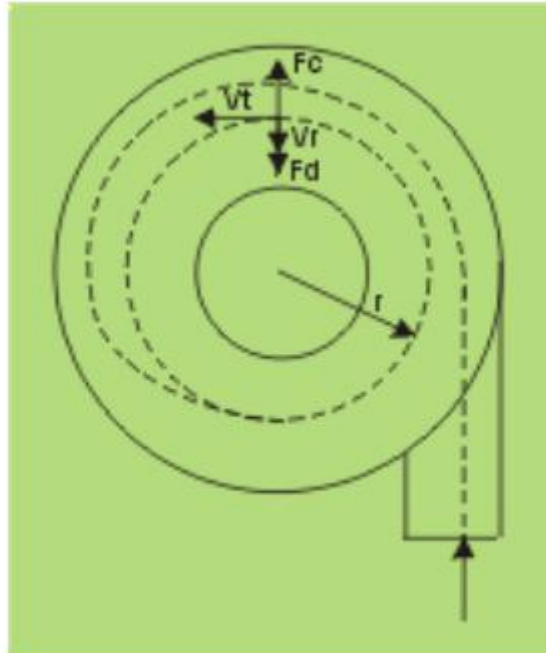
En la zona más interior del cilindro, correspondiente al núcleo del ciclón y con un diámetro aproximadamente igual a 0,4 veces el del conducto de salida del gas, el flujo es altamente turbulento y la presión baja. Se da el predominio de la velocidad axial con sentido ascendente. En la Figura 2.2 se ilustran estos movimientos.



**Figura 2.2 Diferentes movimientos del gas en el interior del ciclón**

Estas dos zonas se encuentran separadas por el llamado cilindro ideal de Stairmand.

Por tanto, cualquier partícula se encuentra sometida a dos fuerzas opuestas en la dirección radial, la fuerza centrífuga y la de rozamiento. Ambas fuerzas son función del radio de rotación y del tamaño de la partícula, por esta razón las partículas de tamaños distintos tienden a girar en órbitas de radios distintos



**Figura 2.4 Cilindro ideal de Stairmand**

Como la fuerza dirigida hacia el exterior que actúa sobre la partícula aumenta con la componente tangencial de la velocidad, y la fuerza dirigida hacia el interior aumenta con la componente radial, el separador se debe diseñar de manera que la velocidad tangencial sea lo más grande posible mientras que la velocidad radial debe ser lo más pequeña posible.

Donde:

- $F_c$ : fuerza centrífuga
- $F_d$ : fuerza de rozamiento
- $V_t$ : velocidad tangencial
- $V_r$ : velocidad radial
- $r$ : radio de la órbita

Existe una órbita de diámetro  $0,4 D_e$  (Siendo  $D_e$  el diámetro del cilindro concéntrico de salida de los gases), conocida como cilindro ideal de Stairmand, que separa la zona en la cual las partículas van a ser capturadas de aquella en la que las partículas sólidas escapan junto con el gas. Si la partícula sigue una trayectoria cuya órbita se encuentra dentro del cilindro de Stairmand y con una componente axial ascendente, la partícula abandonará el ciclón sin ser retenida. Si en caso contrario la órbita es exterior a este diámetro  $0,4 D_e$ , entonces la componente axial será descendente y la partícula acabará depositándose en el fondo del ciclón. Luego del ingreso el gas con las partículas suspendidas forma una espiral descendente axial, por la cual descienden los sólidos. Y una espiral ascendente que alcanza el tubo de descarga por el tope, en la cual sale el gas limpio. El aire entra cargado de polvo recorre un camino en espiral alrededor y hacia abajo del cuerpo cilíndrico del ciclón. La fuerza centrífuga desarrollada en el vértice tiende a desplazar radialmente las partículas hacia la pared, de forma que aquellas que alcanzan la pared deslizan hacia abajo dentro del cono y se recogen. El gas al llegar al cono invierte su dirección iniciando su carrera ascendente en forma de espiral alrededor del eje del ciclón hasta alcanzar el tubo de salida de gas limpio, en la parte superior del ciclón.

El ciclón es entonces esencialmente un dispositivo de sedimentación en el que una intensa fuerza centrífuga (de alrededor de cientos de g), que actúa radialmente, es la que se utiliza en vez de una fuerza gravitacional relativamente débil dirigida verticalmente, como ocurre por ejemplo en las cámaras de sedimentación. Los ciclones pueden separar partículas de polvo del orden de 10 micrómetros (10 a la menos 6 metros). Este flujo de doble espiral descendente-ascendente constituye el llamado fenómeno ciclónico, y su descripción desde el punto de vista matemático es muy complejo, por lo cual el diseño del ciclón se basa generalmente en la experiencia, es decir es de naturaleza empírica.

La eficiencia de un ciclón es de mucha importancia. Relaciona la cantidad de sólidos descargados por la pierna del ciclón, respecto a los alimentados. También es importante la pérdida de carga del ciclón. La pérdida de carga es la suma de varios

factores. Los ciclones pueden ser sometidos a altas temperaturas, dependiendo del material de construcción. Si es acero al carbono o acero inoxidable, puede operarse hasta temperaturas de 800 °C

La aceleración centrífuga en los ciclones es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad de entrada del ciclón inversamente proporcional al radio del ciclón.

$$a_c = \frac{v_i^2}{r_c} \quad (2.1)$$

Dónde  $a_c$  es la aceleración centrífuga,  $v_i$  velocidad de entrada del ciclón y  $r_c$  es el radio del ciclón. Cuando no es posible aumentar más la velocidad del gas, conviene disminuir el diámetro del ciclón, de modo de aumentar la eficiencia.

### **2.3 Ventajas y desventajas del uso de los ciclones.**

#### **Ventajas:**

Las ventajas más importantes del uso de los ciclones son:

- bajo costo de inversión
- costo de mantenimiento bajo (no tiene partes móviles)
- permite la separación en condiciones drásticas de temperatura y presión.
- Caída de presión constante.
- Puede ser construido de variados materiales (cerámica, aleaciones, aceros, hierro fundido, aluminio, plásticos)
- Puede separar tanto partículas sólidas como líquidas, a veces ambas la vez, dependiendo del diseño propio del ciclón

#### **Desventajas:**

- Baja eficiencia para partículas de tamaño menor que el diámetro de corte, cuando operan en condiciones de bajas cargas de sólido.
- Usualmente la caída de presión es mayor que otros tipos de separadores (por ejemplo que el filtro de cartucho (bag))
- Sujeto a erosión o ensuciamiento, si los sólidos procesados son abrasivos o pastosos.

## **2.4 Elevación de la eficiencia de separación del ciclón.**

Si lo que se quiere es aumentar la eficiencia de separación del ciclón se aconseja tomar alguna de las siguientes acciones:

- Reducir el diámetro del ciclón,
- Reducir el diámetro del conducto de salida del gas
- Reducir el ángulo del cono,
- Incrementar la longitud del cuerpo.
- El incremento de la caída de presión puede resultar en: Un incremento en la eficiencia de separación

Si lo que se quiere es aumentar la capacidad del ciclón entonces :

- Incrementar el diámetro del ciclón,
- Reducir el diámetro del conducto de salida del gas
- Incrementar el diámetro de entrada
- Incrementar la longitud del cuerpo

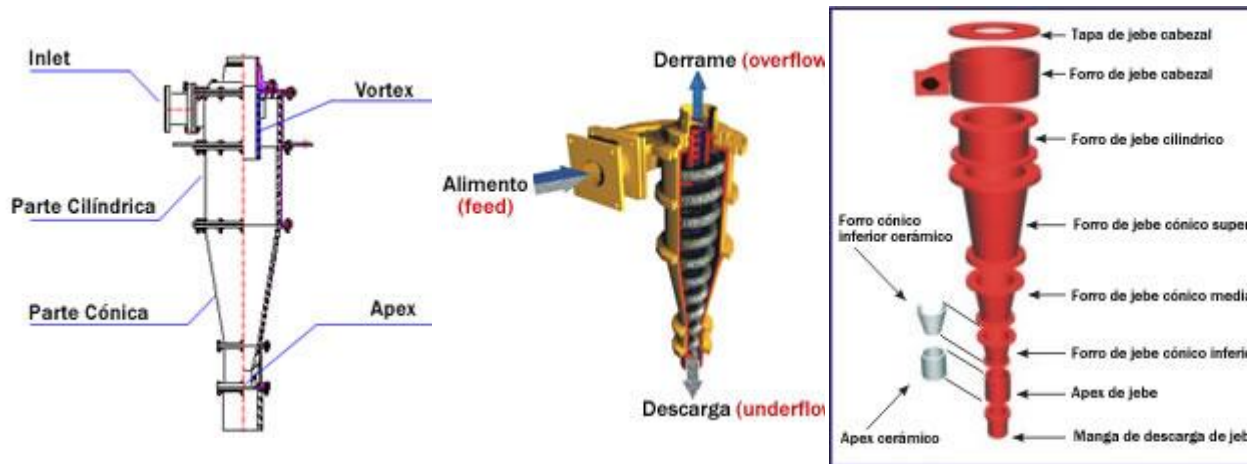
Una manera de mejorar la eficiencia de un ciclón, cuando por ejemplo se trabaja con partículas de tamaño menores de 10  $\mu\text{m}$ , es colocar dos ciclones de manera secuencial, el primero de mayor tamaño, el primero puede separar partículas de gran tamaño y el segundo para partículas de tamaño menor

## **2.5 Hidrociclones.**

Los hidrociclones conocidos también por ciclones, forman una clase importante de equipos destinados principalmente a la separación de suspensiones sólido – líquido. La primera patente del hidrociclón data de 1891, sin embargo, su utilización industrial recién tuvo inicio después de la segunda guerra mundial en la industria de procesamiento de minerales. Desde entonces, vienen siendo usados industrialmente, de manera diversificada en las industrias química, metalúrgica, petroquímica, textil, y otros.

Los hidrociclones fueron originalmente diseñados para promover la separación sólido-líquido, sin embargo, actualmente son también utilizados para separación de sólido –

sólido, líquido – líquido y/o gas – líquido. La industria minera es el principal usuario de los hidrociclones, siendo aplicado en clasificación de líquidos, espesamiento, ordenamiento de partículas por densidad ó tamaño y lavado de sólidos.



**Figura 2.5 Esquemas de algunos hidrociclones.**

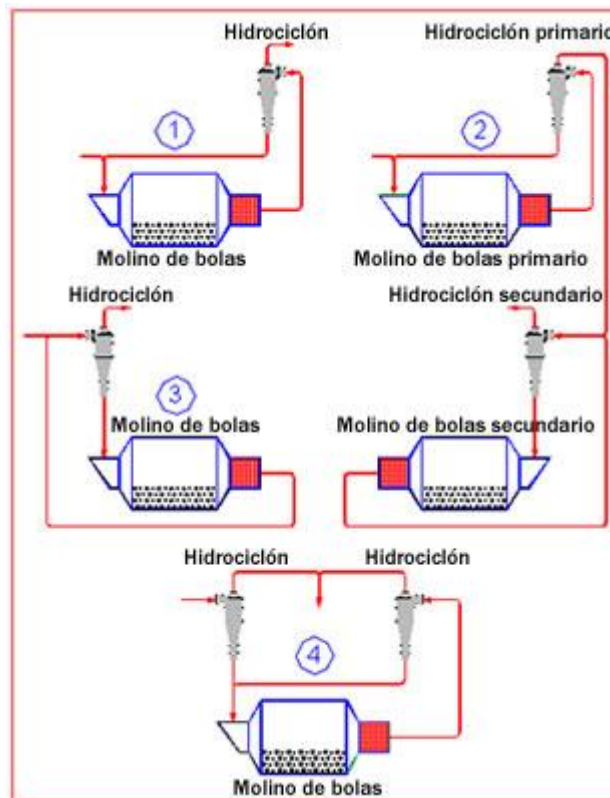
El hidrociclón igual que los ciclones ordinarios consiste de una parte inferior cónica seguida por una cámara cilíndrica, en la cual existe una entrada tangencial para la suspensión de la alimentación (Feed). La parte superior del hidrociclón presenta un tubo para la salida de la suspensión diluida (overflow) y en la parte inferior existe un orificio de salida de la suspensión concentrada (underflow). El ducto de alimentación se denomina (inlet), el tubo de salida de la suspensión diluida se denomina (vortex), y el orificio de salida del concentrado se denomina (ápex), tal como se puede observar en los esquemas de la Figura 2.5.:

La suspensión es bombeada bajo presión, y entrando al hidrociclón a través del tubo de alimentación se genera un movimiento de tipo espiral descendente debido a la forma del equipo y la acción de la fuerza de gravedad. A razón de este movimiento se produce una zona de muy baja presión a lo largo del eje del equipo, por lo que se desarrolla un núcleo de aire en ese lugar. A medida que la sección transversal disminuye en la parte cónica, se superpone una corriente interior que genera un flujo neto ascendente también de tipo espiral a lo largo del eje central del equipo, lo que permite que el flujo encuentre en su camino al vortex que actúa como rebalse.

Las partículas en el seno del fluido se ven afectadas en el sentido radial por dos fuerzas opositoras: una hacia la periferia del equipo debido a la aceleración centrífuga y la otra hacia el interior del equipo debido al arrastre que se mueve a través del hidrociclón. Consecuentemente, la mayor parte de las partículas finas abandonarán el equipo a través del vortex, y el resto de las partículas, mayoritariamente los gruesos, saldrán a través del apex. En la figura central se puede observar la trayectoria de flujos dentro del hidrociclón.

Básicamente los cuatro parámetros independientes que permiten variar las condiciones de operación son: la densidad de la mezcla, la caída de presión en la alimentación, el diámetro del vortex y el diámetro del apex. El tamaño de corte y la eficiencia de la separación son controlados mediante el ajuste de estos parámetros.

El diámetro del hidrociclón puede variar desde una pulgada hasta dimensiones que pueden alcanzar las 70 pulgadas. Hidrociclones de mayor diámetro producen separaciones gruesas e hidrociclones de menor diámetro producen separaciones finas.



**Figura 2.6 Aplicación de los Hidrociclones en los circuitos de molienda cerrada.**

Los hidrociclones tienen mayor aplicación en el circuito de molienda cerrado, que pueden presentar como en los casos de la siguiente figura. El objetivo de la clasificación es hacer más eficiente el proceso de molienda y asegurar que el producto de la operación esté bajo un determinado tamaño, recirculando al molino las partículas más gruesas.

## **2.6 Formas, materiales, tamaños y distintos tipos de ciclones.**

También estos sencillos aparatos han evolucionado y hoy día se construyen en variadas formas y tamaños, ni ellos pueden escapar a la sociedad de consumo.



**Figura 2.7 Ciclones de diferentes formas y materiales**

Las diferentes necesidades han obligado a los investigadores y constructores a desarrollar equipos que en ocasiones guardan poco parecido con la imagen de un ciclón estándar convencional. Por ello parece necesario intentar clasificarlos, detallando sus diferencias constructivas y campos de aplicación

De acuerdo a su geometría podrían clasificarse en dos grandes grupos: Cónicos y Cilíndricos. Dentro del primer grupo se incluirían los cónicos de cono pronunciado y los

de cono tendido. El segundo grupo recogería los cilíndricos de fondo plano y descarga periférico, y los cilíndricos con descarga central.

Cabría mencionar también dos tipos de ciclones relativamente nuevos: El ciclón – criba y el ciclón aireado (Air-Sparged Cyclone). Estos equipos, aun recibiendo el nombre de ciclones, se alejan, en su aplicación, de aquellos.

### **1. Ciclones Cónicos.**

Como anteriormente se mencionó los ciclones cónicos, o convencionales, podrían subclasificarse de acuerdo al ángulo de su parte cónica en:

- **De cono pronunciado, convencionales.**

Este grupo recogería los ciclones con ángulo menor de  $20^\circ$ , caracterizados por un cuerpo relativamente largo debido a su conicidad. Este tipo de diseño se acompaña con partes cilíndricas de gran longitud (mayor que una vez el diámetro), y toberas de alimentación y rebose de pequeñas dimensiones, para aumentar el tiempo de residencia. Esto, debido a la gran altura libre de vórtice, (distancia entre el borde inferior de la tobera de rebose y el vértice de la parte cónica), y su influencia inversamente proporcional al tamaño de corte, los hace los más adecuados para clasificaciones finas, como se requiere en operaciones de clarificación y espesado. En general, solamente los ciclones de pequeño y medio diámetro, hasta 250 mm, se construyen con conicidad pronunciada.

Suelen operar a presiones medias, entre 150 y 400 kPa, obteniendo tamaños de corte entre 2 micrómetros y 30 micrómetros. Es este tipo el más difundido, especialmente en el tratamiento de minerales industriales donde a menudo se requieren clasificaciones más finas (Figura 2.8).



**Figura 2.8 Instalación Industrial para el tratamiento de minerales con una batería periférica de ciclones de cono pronunciado.**

- **De cono tendido.**

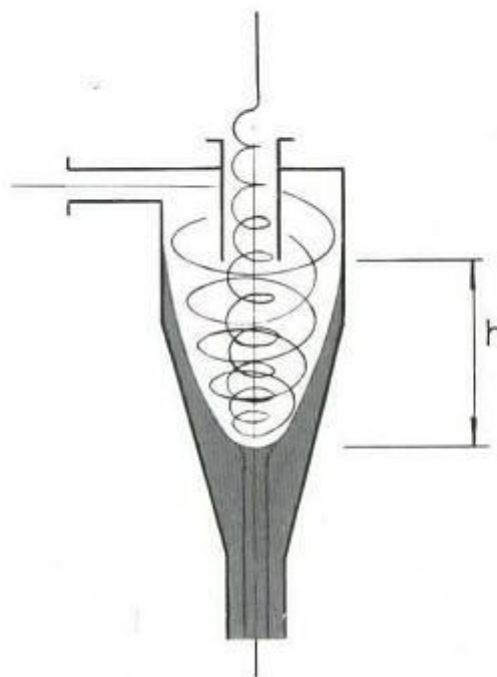
Los ciclones de cono tendido o ángulo, mayor de  $20^\circ$ , son usados principalmente para clasificar tanto por tamaño como por densidad (clasificación selectiva). El ángulo de su parte cónica varía entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ , aunque excepcionalmente pueden encontrarse ciclones de hasta  $60^\circ$ . Se construyen en diámetros comprendidos entre 250 mm y 1250 mm, aunque algunos fabricantes construyen modelos de hasta 2 000 mm.



**Figura 2.9 Ciclón de cono tendido ( $\varnothing$  750 mm) en una clasificadora de arena.**

Como es lógico al disminuir el tiempo de residencia de la pulpa en el interior del ciclón, por su menor longitud, aumenta el tamaño de separación. Ello trae como consecuencia que estos ciclones no alcancen una elevada recuperación de sólidos, (referida a la descarga), pero si presentan una mejor selectividad, utilizándose mucho en procesos de clasificación. La presión de operación suele ser menor a 150 kPa, aunque nunca menor de 20 kPa pues sino no se consigue una columna central de vacío estable. Generalmente se operan entre 30 kPa y 100 kPa y pueden alcanzar cortes entre 30 micrómetros y 150 micrómetros. Ha podido observarse en unidades de laboratorio, construidas en materiales transparentes, la formación de una "cama" de sólidos en la parte baja del cono que permanece en movimiento a lo largo del núcleo central, lo cual da lugar a un efecto de reclasificación, explicándose él por qué de la mejor selectividad de estos ciclones de cono ancho.

Una aplicación muy conocida de este tipo de ciclones es el lavado de carbón con los llamados "ciclones de agua", "water-only cyclones", y los ciclones operando en medio denso, bien para tratamiento de minerales pesados o en lavado de carbón.



**Figura 2.10 Sección de un ciclón de cono ancho.**

- **Ciclones cilíndricos**

Podrían incluirse dentro de la clasificación anterior, como ciclones de cono tendido, pero debido a que exteriormente no se aprecia nada más que su cuerpo cilíndrico por su ángulo de  $180^\circ$ , es decir fondo perpendicular a la pared lateral, y también porque su campo de aplicación difiere notablemente de aquellos, merecen un tratamiento diferenciado. No suponen realmente una nueva teoría, pues ya a principios de siglo pueden encontrarse las primeras aplicaciones de este tipo de ciclones.

Consisten, básicamente en un ciclón convencional del cual se ha eliminado su zona cónica, remplazándola por una parte cilíndrica de similar longitud. El fondo del ciclón es plano y la extracción del producto grueso se realiza tangencialmente por la zona baja de la pared cilíndrica.

Como quiera que este diseño provoca una descarga muy diluida, debido al corto circuito, (partículas finas en suspensión acompañando a la descarga) la eficiencia de separación se reduce.

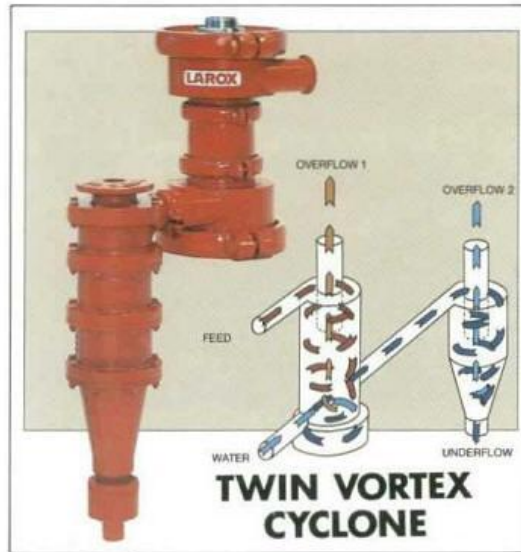
Hace unos 30 años que uno de los principales fabricantes de ciclones KREBS, comercializó un tipo de ciclón, conocidos como EE que basándose en este diseño de descarga tangencial, conectó dos unidades. Una primera de gran diámetro y pared cilíndrica y una segunda convencional, cónica de menor diámetro. Este diseño no tuvo mucha aceptación al menos a escala industrial, quizás debido a los elevados desgastes que podrían esperarse en la zona de transición debido a la alta concentración de sólidos (Figura 2.11)).



**Figura 2.11 Ciclón cilíndrico KREBS de dos etapas**

Recientemente, hace unos 3 años (finales de la década pasada), esta "vieja idea" reapareció en el mercado con la variante de introducir una inyección de agua, en la cámara de conexión entre los dos hidrociclones. De este modo el agua actúa diluyendo la alimentación al segundo ciclón, mejorando así la eficacia de separación.

En resumen, este nuevo diseño, llevado actualmente a la práctica por la firma LAROX bajo el nombre de Twin Vortex Cyclone presenta las ventajas de una doble etapa de clasificación, pero sin la necesidad de una bomba intermedia (Figura 2.12)).



**Figura 2.12 Ciclón cilíndrico LAROX tipo Twin Vortex**

Este tipo de ciclón debería presentar ventajas operativas en procesos de tratamiento de minerales industriales, donde se opera normalmente a bajas concentraciones de sólidos.

- **Cilíndricos con descarga central y fondo plano**

Difiere este diseño del anterior en que la descarga se realiza de modo convencional, es decir, a través de un orificio central (Figura 2.13)).



**Figura 2.13 Ciclón cilíndrico AKW ( $\Phi 200$  mm) tipo fondo plano)**

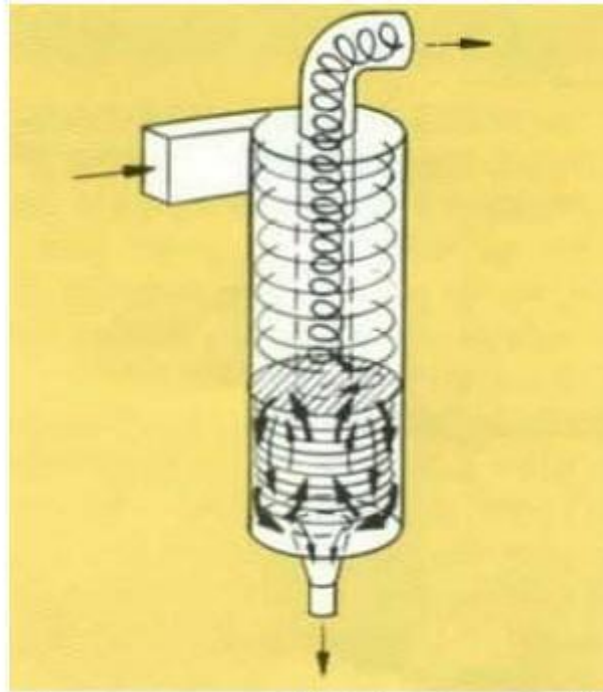
Con el fin de ampliar el campo de trabajo de los ciclones hacia tamaños de corte mayores, por encima de las 150 micras surgió, basándose en la cama de sólidos que se crea en los ciclones de cono obtuso, el desarrollo de los llamados ciclones de fondo plano, mejor llamados por su inventor el Prof. Dr. Helmut Trawinski de Amberger

Kaolinwerke GmbH Ciclones CBC (Circulating Bed Cyclone) o (Circulating Bed Classifier), ciclones de lecho circulante o clasificadores del lecho circulante. Se explicaba anteriormente que el lecho "fluido" creado en la zona inferior de los ciclones de cono ancho, no es un lecho estacionario, sino que está dotado de un movimiento de convección alrededor del núcleo central, lo cual favorece la reclasificación de partículas, ligeras o de pequeño tamaño, mal clasificadas, que en su movimiento constante son en algún momento arrastradas por el torbellino interior o principal, siendo finalmente evacuadas con el rebose superior.

Este principio no puede ser aprovechado en un ciclón cónico, porque un aumento de la altura del lecho provocaría rápidamente la obstrucción de la boquilla de descarga, debido a la fricción de las partículas con la pared cónica (efecto silo), pero si puede ser desarrollado, alejando la pared del orificio de descarga, para lo cual se elimina la zona cónica, prolongando al mismo tiempo la zona cilíndrica y "cerrando" el ciclón con un fondo horizontal o casi, con un ángulo comprendido entre  $160^{\circ}$ - $180^{\circ}$ .

El lecho fluido creado en el fondo del ciclón actúa como un "colchón", amortiguando las variaciones en la alimentación, tanto en caudal como en concentración de sólidos. Este efecto es de sumo interés, especialmente en circuitos cerrados de molienda donde existen variaciones frecuentes de la concentración de sólidos en la alimentación, debido a los cambios de dureza del mineral y otras variables. Una disminución de la concentración de alimentación es seguida de una disminución de la concentración en la descarga, lo que provoca automáticamente una pérdida de partículas finas con el producto grueso (corto-circuito o by-pass).

Contrariamente a lo que podría pensarse la tendencia a la obstrucción de la descarga, por aumentos en el tonelaje de sólidos, es menor en ese tipo de ciclones que en los convencionales, resultando extraño, llegar a la obstrucción total, lo que es bastante usual en circuitos de molienda, con las terribles consecuencias que esto trae para los circuitos de flotación posteriores que reciben el producto del rebose de los ciclones. La responsabilidad de esta "resistencia" al bloqueo debemos buscarla en los flujos de convección existentes en el lecho de sólidos que lo mantienen en rotación (Figura 2.14).



**Figura 2.14 Corrientes internas en un ciclón CBC**

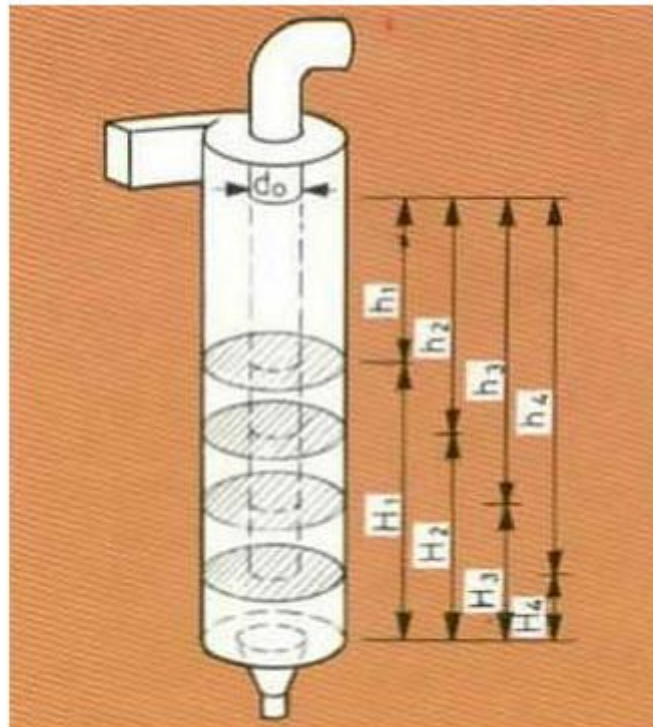
Este fenómeno puede ser observado cuando agitamos con una cucharilla una taza de café, conteniendo algunos sólidos. La velocidad de rotación, debido a la fricción, se reduce en el fondo de la taza, mucho más que en la superficie superior del líquido, (al igual que sucede en un ciclón fondo plano)

En el caso del CBC la rotación de la superficie superior del lecho es generada por la rotación de la suspensión existente sobre él mismo. Se crean así mayores fuerzas centrífugas en la zona superior del lecho que en la zona inferior en contacto con el fondo y esto origina una corriente de convección, con sentido arriba-abajo, a lo largo de la pared cilíndrica, y con sentido abajo-arriba en la zona central. Esta última corriente provoca una disminución de la carga en dicha zona central, descargando el orificio de la boquilla y evitando el bloqueo.

Las dos corrientes de convección provocan finalmente un flujo radial de la mezcla, transportando los sólidos en el fondo plano, desde la pared cilíndrica hasta el orificio de descarga, haciendo innecesario la existencia de un fondo cónico para ayudar a la extracción.

Adicionalmente estos flujos provocan un enriquecimiento de la fracción gruesa o pesada, ya que muchas de las partículas finas o ligeras son arrastradas

"graciosamente" por el torbellino principal al rebose. Este fenómeno puede ser utilizado también para enriquecimiento de minerales (clasificación selectiva). El nivel o altura del lecho sólido determina el tamaño de separación, ya que lógicamente provoca un cambio en la altura libre de vórtice (Figura 2.15).



**Figura 2.15 Variación de la altura libre del vórtice en el ciclón CBC**

La superficie hipotética, dada por el diámetro de la tobera de rebose  $-D_o-$  y la altura libre de vórtice  $-h_i-$ , podría asumirse como la superficie de clasificación, y esto explicaría él por qué el tamaño de corte es inversamente proporcional a esta altura libre  $-h-$ , tal y como refleja la ecuación siguiente:

$$d_{50c} \cong \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{(\rho_s - \rho_l)}} \cdot \sqrt{\frac{D_e \cdot D_o}{D \cdot h}} \cdot \frac{\sqrt{D}}{\sqrt[4]{P}}$$

donde:

- $\eta$  = viscosidad
- $\rho_s - \rho_l$  = peso específico de sólido y líquido respectivamente
- $D_e, D_o$  = diámetros de entrada y rebose respectivamente
- $D$  = diámetro del ciclón
- $P$  = pérdida de presión

Variando la longitud de la parte cilíndrica del ciclón, mediante la adición o sustracción de tramos cilíndricos o bien variando la altura del lecho fluido creado mediante el empleo de boquillas de diferentes diámetros, es posible modificar el tamaño de corte del ciclón (Figura 2.16).

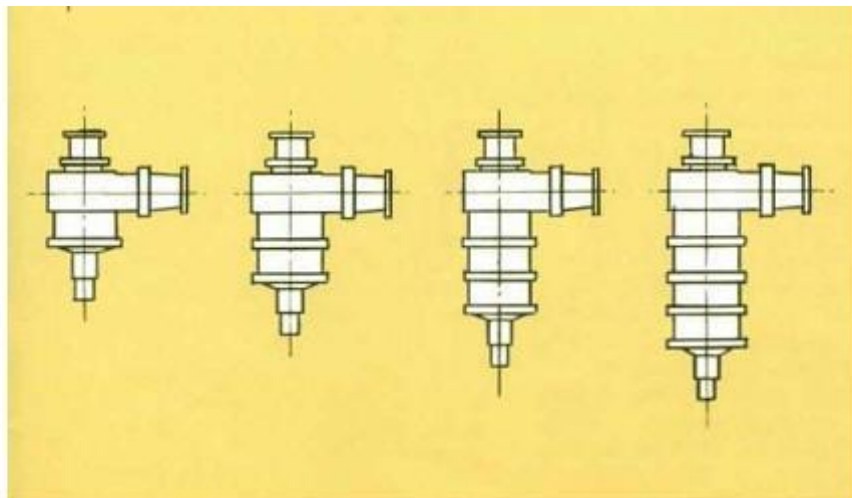


Figura 2.16 Ciclones CBC con diferentes longitudes de la parte cilíndrica

Numerosas pruebas de laboratorio, así como valiosa información obtenida del gran número de ciclones CBC hoy en funcionamiento, permiten establecer una relación entre el tamaño de corte alcanzado con ciclones cónicos y CBC de igual diámetro (Figura 2.17)

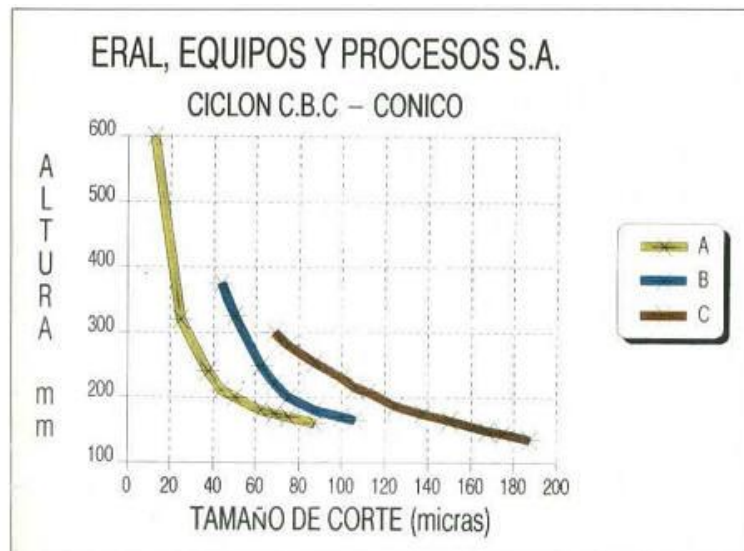


Fig. 11 - Tamaños de corte en ciclones CBC frente a convencionales.

**Figura 2.17 Tamaño de corte en Ciclones CBC frente a los convencionales.**

Podría generalizarse diciendo que la relación entre el tamaño de corte ( $d_{50}$ ) obtenido en un ciclón CBC (del mismo diámetro y longitud), y el obtenido en un ciclón convencional de aproximadamente  $20^\circ$ , es de 2,5. Variando el número de cuerpos cilíndricos en el CBC pueden alcanzarse relaciones entre 1 y 2,5.

Lo hasta ahora aquí expuesto resulta de enorme interés si consideramos que ello permite expandir el rango de operación de los ciclones, en cuanto al tamaño de separación, hasta más de 500 micras.

A modo de ejemplo un hidrociclón de 200 mm de diámetro puede alcanzar cortes entre 15 micras y 200 micras según se utilice configuración cónica o CBC, por supuesto a diferentes presiones y con diferentes toberas de alimentación y rebose. No es tan sólo ésta la única ventaja de los hidrociclones CBC frente a los cónicos, además también la selectividad o eficacia de separación es más elevada en este tipo de ciclones.

De todo es conocido que la separación en un hidrociclón se lleva a cabo en la corriente interior ascendente, también llamada torbellino secundario. Resulta fácil entender que en un ciclón CBC dicha corriente está muy separada de la corriente primaria descendente o torbellino primario. La corriente primaria se introduce en el lecho fluido para formar la corriente secundaria ascendente sin apenas disturbar la formación de ésta, por lo que el flujo del rebose es más estable y no transporta accidentalmente partículas extrañas. La granulometría del producto fino o ligero resulta así más uniforme. Adicionalmente, la tercera corriente de convención que se crea efectúa un post-deslamado de la fracción gruesa que forma el lecho fluido.

Todo esto combinado, conduce a unos valores de imperfección más bajos, es decir a una mayor eficiencia de separación.

Sería conveniente destacar dos aplicaciones muy interesantes de estos hidrociclones de fondo plano CBC. La primera en circuitos cerrados de molienda a alta densidad y la segunda en circuitos de concentración gravimétrica. En ambos casos y por razones distintas este tipo de ciclón ha aportado valiosas soluciones a viejos problemas.

- **Circuitos cerrados de molienda a alta densidad.**

La tendencia actual, como consecuencia de la caída del precio de los metales, ha sido y es aumentar la capacidad de tratamiento de las plantas de concentración existentes, bien para compensar las pérdidas de ley en los minerales brutos o bien para disminuir los cortes operativos en base a un mayor tonelaje producido con los mismos equipos. La primera vía para aumentar el tonelaje de los circuitos de molienda, sin aumentar los equipos de molienda, (de costo elevadísimo, en algunos casos más del 50 % de la inversión de una planta), es aumentar el tamaño del producto de entrada a flotación. Esto se logra fácilmente modificando el tamaño de corte en los ciclones, y el modo más sencillo de hacerlo sin cambiar ni los ciclones ni las bombas instaladas es aumentar la concentración de sólidos en la alimentación a los mismos.

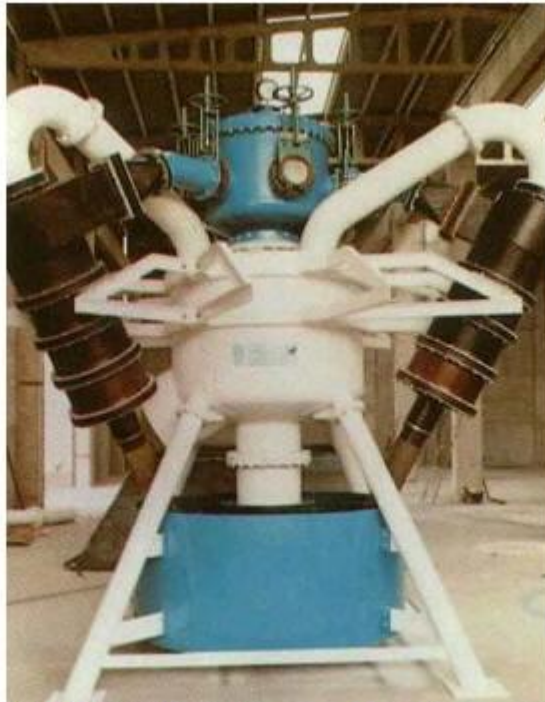
De este modo, efectivamente el objetivo se consigue, pero la eficiencia de clasificación se ve reducida como consecuencia de la clasificación obstaculizada que tiene lugar en el interior del hidrociclón (en otras palabras la lucha a muerte de tantas partículas entre sí, en el interior del ciclón, para conseguir un espacio en que sobrevivir).

El camino más razonable, desde el punto de vista técnico, sería cambiar los ciclones por otros de mayor diámetro, que puedan alcanzar el corte deseado (más grueso) en condiciones óptimas. Lamentablemente, en la mayoría de los casos, esto no es posible pues obligaría a manejar mayores volúmenes de mezcla, que irían finalmente al circuito de flotación y el tiempo de residencia se reduciría notablemente con la consiguiente pérdida en la recuperación.

Por otro lado, emplear ciclones de mayores dimensiones significaría en muchos casos disponer de tan sólo una o dos unidades en operación y esto restaría flexibilidad al circuito frente a variaciones de tonelaje, pues no podría variarse el número de ciclones en operación. A este respecto diríamos que el mínimo número recomendable de unidades en operación en circuitos con grandes variaciones debería estar entre 4 y 6.

Frente a todos estos problemas el ciclón CBC aporta una gran solución. Como se ha expuesto, un ciclón de fondo plano puede alcanzar cortes mayores, hasta casi 3 veces que otro convencional de su mismo diámetro, es decir, manteniendo sin variación el caudal unitario de tratamiento. Además, su menor imperfección (menor corto-circuito) y menor tendencia al bloqueo lo convierten en una herramienta valiosísima para este tipo de circuitos de molienda.

Son numerosos en la actualidad los hidrociclones CBC actualmente en funcionamiento en esta aplicación concreta (Fig. 12).



**Figura 2.18 Ciclones CBC (Ø 500 mm) para circuitos cerrados de molienda de cobre.**

- **Circuitos de concentración gravimétrica.**

Los equipos de concentración gravimétrica, generalmente sencillos en su funcionamiento, requieren por norma una alimentación lo más uniforme posible, tanto en tonelaje como en concentración de sólidos. Este requisito, por otro lado común a la mayoría de los equipos de tratamiento, es más importante, si cabe, en aquellos de concentración gravimétrica, como: Jigs, Mesas de sacudidas, Espirales y Conos Concentradores.

Además, estos equipos requieren una alimentación sin lamas o partículas ultrafinas que, aumentando la viscosidad del medio líquido en que van suspendidos los sólidos, dificultan el proceso de separación. Ambas necesidades pueden ser resueltas al mismo tiempo mediante el empleo de los ciclones CBC.

Llevando a cabo la alimentación al equipo de concentración, espirales: Jigs, etc., a través de ciclones CBC se consigue, al mismo tiempo que el deslamado o clasificación necesaria, una alimentación estable, gracias a la descarga uniforme de estos equipos (Fig.13).



**Figura 2.19 Batería de ciclones CBC ( $\varnothing$  400 mm) en circuito gravimétrico de estaño.**

Como se mencionó, el lecho fluido creado en el fondo plano actúa como un "colchón" que amortigua las variaciones en la concentración de alimentación al mismo tiempo que permite mantener prácticamente constante el tamaño de corte. Por otro lado, como también se mencionaba, se crea una clasificación selectiva de los diferentes minerales existentes en la alimentación de modo que se alcanza un considerable enriquecimiento del producto descargado como grueso o pesado, lo cual favorece el proceso de concentración posterior.

No debe olvidarse que en ocasiones un ciclón CBC puede ser un medio sencillo de preconcentrar minerales pesados (p. ej. Oro, Estaño, Diamantes, etc.) o bien minerales carboníferos.

- **Otros tipos de ciclones.**

Existen otros tipos de ciclones que aun recibiendo este nombre, son notablemente distintos en cuanto a su aplicación práctica. Estos serán descritos a continuación:

- **Hidrocución Criba.**

Este equipo, mejor llamado criba centrífuga, es básicamente un ciclón de gran diámetro (500 mm – 1 000 mm) con sus paredes perforadas (Figura 2.20)



**Figura 2.20 Criba centrífuga ZS 600 o Ciclón Criba**

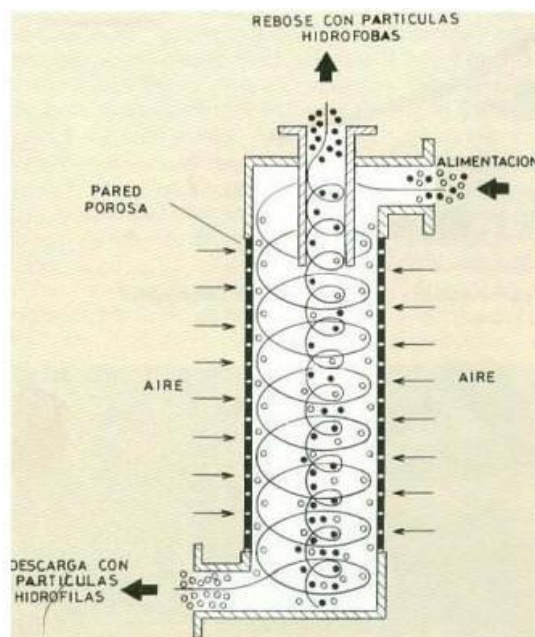
Se emplea para clasificación por tamaños en vía húmeda con un rango de aplicación entre 0,2 mm y 2,0 mm, cubriendo el espacio de separación de sólidos existente entre los ciclones y cribas convencionales, también ocupado por los hidroclasificadores. La pulpa con los sólidos en suspensión entra tangencialmente a la parte cilíndrica, formando una lámina fluida pegada a la pared. Durante su recorrido las partículas finas atraviesan la pared a través de las aberturas rectangulares de la misma, junto con la mayoría del líquido soporte. Finalmente el producto grueso, exento de líquido, cae por la parte cónica, donde termina su proceso de escurrido (Figura 2.21).



**Figura 2.21 Vista interior de la Criba Centrífuga ZS 1000**

- **Ciclón Aireado.**

El ciclón aireado (Air-Sparged Cyclone) consiste en un ciclón cilíndrico cuyo cuerpo está construido en un material cerámico poroso. La circulación de la pulpa a alta velocidad crea un vacío en la pared, provocando la entrada desde el exterior, de pequeñas burbujas de aire menores a 0,5 mm, a través de la pared porosa. Las partículas hidrófobas son transportadas en una fase espumosa por la corriente central ascendente, saliendo a través de la tobera de rebose (vortex) mientras que las hidrófilas, transportadas por la corriente descendente, son descargadas a través de la boquilla (Figura 2.22).



**Figura 2.22 Esquema del funcionamiento de un Ciclón- Aireado.**

Este nuevo tipo de ciclón se está empleando con bastante éxito en procesos de flotación para recuperación de metales y lavado de carbón, con mayor eficiencia que las tecnologías convencionales.

Estos sistemas también han demostrado su efectividad en los siguientes campos: secadores farmacéuticos, química fina, procesamiento de minerales, nanopartículas, procesos de calcinación, recuperación catalítica y procesos de separación a alta temperatura. Para la recuperación de productos sensibles, los ciclones son equipos insustituibles porque pueden capturar el polvo directamente, evitando la captación de polvo en los filtros y evitando la contaminación provocada por las bolsas de los filtros de mangas, la contaminación cruzada de productos y la degradación del producto con la temperatura. Los ciclones y sistemas de separación permiten prescindir de filtros de mangas en los procesos más exigentes para evitar emisiones a la atmósfera y al mismo tiempo evitan las pérdidas de producto.

**Principales ventajas:**

- Alta eficiencia en la separación aire-producto.
- Elevadas condiciones de sanidad y limpieza.
- Bajo coste de mantenimiento.
- Sin restricciones de temperatura.
- Sin pérdidas de producto.
- Adecuado para productos sensibles y delicados.
- Evitan la contaminación atmosférica y degradación del producto.
- Reduce el coste económico del proceso.
- **Hurricane Cyclones.**

Un conjunto completamente nuevo de geometría del ciclón. Los ciclones numéricamente optimizados Hurricane demuestran una eficacia impresionante en la captura de polvos respirables con un MVD inferior a  $5\mu\text{m}$ . La geometría del Hurricane maximiza la recogida de polvo para cada aplicación diferente, y reduce al mínimo la recirculación y la caída de presión, alcanzando niveles razonables. Un solo Hurricane es más eficiente que cualquier otro ciclón tradicional de alta eficiencia conocido y disponible en el mercado, considerando la misma caída de presión.

Los Hurricane han demostrado eficacia en la sustitución de los ciclones tradicionales de alta eficiencia y reparación de filtro de mangas para cumplimentar la reglamentación de los límites de emisión de productos químicos y polvo en las aplicaciones alimentarias. ( $< 30\text{mg/Nm}^3$ ).

- **ReCyclone Systems –Recirculación Mecánica y Electrostática.**

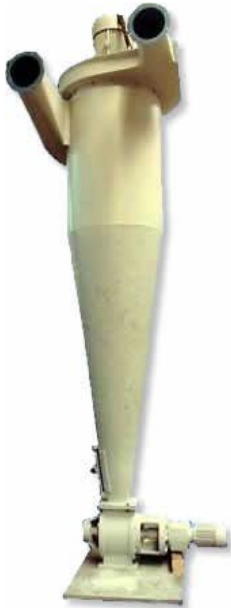
El Recyclone está compuesto por un Hurricane y un separador de partículas (con recirculador mecánico o electrostático), situado sobre el ciclón. El objetivo principal de la recirculación es reintroducir las partículas finas no capturadas en el ciclón, después de que ellas hayan sido llevadas a las paredes exteriores del recirculador por fuerzas centrífugas o eléctricas.

Mientras que este flujo de gas tangencial es enriquecido en las partículas, el flujo axial de gases de escape es prácticamente invisible, comparables a los filtros de mangas. La eficiencia aumenta debido a la recirculación y la aglomeración de partículas muy pequeñas con las más grandes, procedente directamente del proceso, alcanzando el 99% para muchos polvos finos y asegurando el cumplimiento de los límites de emisión.

- **Ciclones y sistemas de separación aire-producto**

Advanced Cyclone Systems se dedica exclusivamente al desarrollo de los más eficientes sistemas de separación aire-producto mediante ciclones, con la misión de lograr la máxima captación de partículas a través de una continua inversión en innovación e I+D.

**Hurricane & ReCyclone Systems contradicen la tradicional idea que los ciclones son** ineficientes colectores de polvo, estos sistemas de separación mediante ciclón



Gran cantidad de empresas se enfrenta con problemas de captación, eliminación o recuperación de polvos o partículas en suspensión en corrientes de aire o gases generados en sus procesos industriales. Estos problemas suelen ser generalmente de tres tipos:

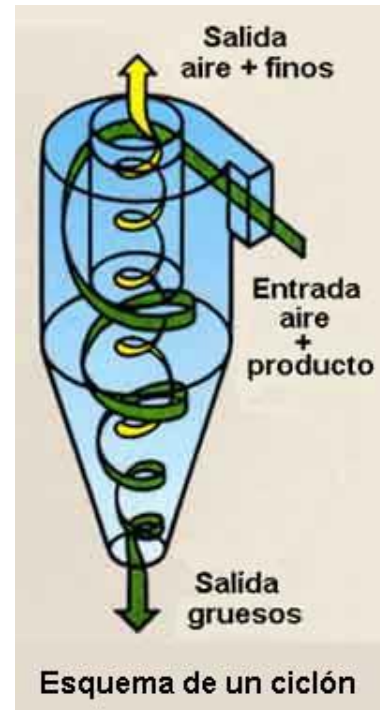
1. Separación del polvo arrastrado por corriente de aire o gases en equipos de transporte neumático, instalaciones de molienda, secaderos por pulverización, etc.
2. Captación o depuración de las materias en suspensión a efectos de:
  - Evitar la contaminación atmosférica.
  - Proceder a su recuperación por su naturaleza valiosa.
3. Recogida de cenizas volantes en calderas alimentadas con combustibles sólidos. (Centrales térmicas, fábricas de cementos, fundiciones, instalaciones de sinterización, ventilación industrial, recirculación de catalizadores en torres de "Craking", etc.).

Los ciclones GRUBER se caracterizan por su gran eficiencia para dar solución a los problemas citados.

pueden alcanzar el rendimiento de filtros de mangas en los más exigentes.

- **Ciclones de alta eficiencia AC**

En líneas generales el funcionamiento de un ciclón se basa en que el aire o la corriente gaseosa, entremezclada con el producto en suspensión, al entrar tangencialmente en el ciclón es sometida a un movimiento circular en el que las partículas más gruesas son obligadas, por el efecto de las fuerzas centrífugas creadas, a proyectarse contra las paredes y desprenderse hacia la salida inferior de descarga. El aire o los gases depurados salen por la parte superior del eje vertical, prácticamente libres de partículas. (Algunas partículas ultrafinas o de muy bajo peso específico pueden ser arrastradas por la corriente de aire ascendente). Aunque existen fórmulas para el cálculo de ciclones bajo condiciones de funcionamiento ideales, en la práctica es inviable aplicar ecuaciones teóricas debido a la complejidad del flujo de fluidos con partículas en suspensión y alto grado de turbulencia. Sin embargo pueden deducirse varias conclusiones prácticas por la interpretación cualitativa de mediciones aerodinámicas, mediante ecuaciones aproximadas del movimiento de fluidos.





Las eficiencias así obtenidas son extraordinarias y permiten garantizar el grado de selectividad para cada tamaño de partículas.

GRUBER y Hermanos han suministrado centenares de unidades para las aplicaciones industriales más diversas. Todas ellas funcionan a entera satisfacción del cliente y siempre se han alcanzado las garantías estipuladas.

## **2.7 Conclusiones Parciales del Capítulo II.**

1. Los ciclones son aparatos sencillos sin partes en movimiento capaces de realizar la separación de partículas: solido – gas, solido - líquido e incluso sólido – sólido con buena efectividad y un campo de aplicaciones muy diverso que abarca prácticamente a todas las industrias.
2. En el capítulo se han expuesto los últimos avances en ciclones e hidrociclones que como se ve aportan soluciones adecuadas a los problemas actuales.
3. Los procesos de separación sólido-líquido son procesos dinámicos y, como tales reclaman una tecnología también dinámica.
4. Nuevas ideas y mejoras de otras hoy en uso, surgen cada día, ensanchando el campo de aplicación de estos sencillos aparatos.
5. La llegada de nuevos materiales constructivos, polímeros, cerámicas y aleaciones especiales, con mejores características de resistencia a la abrasión y corrosión, principales enemigos, de los ciclones permiten llevar a la práctica proyectos que hace años tuvieron que ser desechados..

6. La electrónica y la informática también se están introduciendo rápidamente, para permitir un mejor control, muy especialmente en la regulación de los flujos de descarga, y control de la presión de operación.
7. Con estas cualidades, no cabe la menor duda que se abre un futuro optimista para nuevas tecnologías de aplicación de los ciclones.
8. Las aplicaciones de los ciclones incluyen cualquier ámbito de separación para productos pulverulentos de alto valor, condiciones de trabajo críticas, y donde el uso de filtros de mangas debe ser evitado por razones económicas y técnicas.



# *Capítulo 3*

## Capítulo III Cálculo de los ciclones ordinarios y ciclones tipo batería.

### 3.1 Los ciclones como captadores de polvo. Principio de funcionamiento en la captación de polvos.

Los ciclones representan tal vez el tipo más difundido de los captadores de partículas sólidas. Durante decenas de años los utilizaban para separar de la corriente de gas las partículas sólidas y líquidas. En los ciclones de construcción más perfecta se puede captar bastante bien las partículas de  $5\ \mu\text{m}$  o más (Lund, 1998). Como se ha señalado anteriormente, la captación de polvo en ciclones se basa en la inercia de movimiento de las partículas (fuerza centrífuga).

La tubuladura de entrada del gas con polvo en el ciclón, en general, de forma rectangular, se sitúa sin falta según la tangente a la circunferencia de la parte cilíndrica superior del ciclón. Los gases salen del aparato por un tubo redondo situado en la parte superior orientado a lo largo del eje del ciclón.

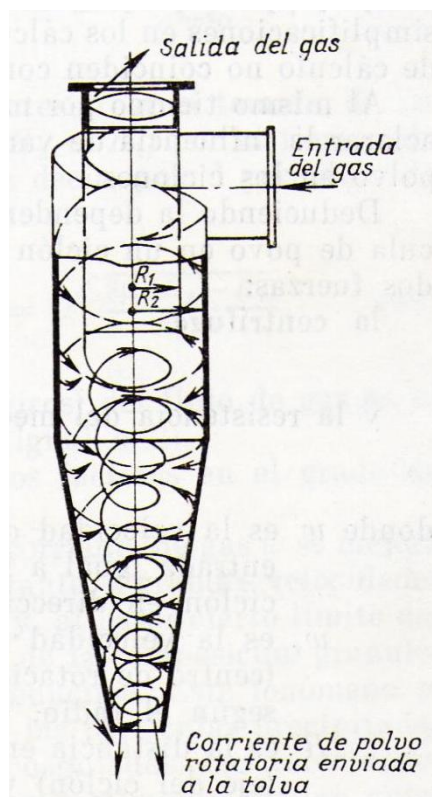


Figura 3.1. Esquema de movimiento del gas con polvo en el ciclón:

----- torbellino exterior      \_\_\_\_\_ torbellino interior.

### *Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería*

Al entrar en el ciclón los gases fluyen de arriba hacia abajo, girando, al principio, en el espacio anular entre la superficie cilíndrica exterior del ciclón y el tubo central de salida y luego en el cuerpo del ciclón, formando un torbellino rotatorio exterior.

Por lo tanto se desarrollan las fuerzas centrífugas gracias a las cuales las partículas de polvo suspendidas en la corriente de gas rotatoria son empujadas hacia las paredes del cuerpo de ciclón tanto de su parte cilíndrica, como cónica. Al acercarse al cono, el flujo de gas se retorna hacia el tubo de salida, formando un torbellino rotatorio interior.

Las partículas de polvo que alcanzan las paredes del ciclón se mueven junto con los gases para abajo y de ahí se evacuan del ciclón por una tubuladura inferior de salida del polvo.

El movimiento de las partículas de polvo hacia la tubuladura se debe no solamente a la fuerza de la gravedad, sino en primer lugar, a que la corriente de gas no sólo gira acerca de las paredes de las partes cilíndricas y cónicas, sino se mueve a lo largo del eje del ciclón hacia el vértice del cono, arrastrando consigo en este movimiento a las partículas.

Por esta razón se puede situar el ciclón no solamente el cono abajo, sino en dirección inclinada, horizontal y hasta el cono arriba, echando el gas de abajo por arriba en espiral.

#### **3.2 Influencia de diferentes factores en la captación de polvo en los ciclones.**

La complejidad del proceso de captación de polvo en los ciclones no permite calcular su construcción y su eficiencia de explotación únicamente a base de la elaboración teórica. Esto se explica por lo complejo que es el proceso aerodinámico lo que provoca una serie de simplificaciones en los cálculos teóricos, debido a los cuales los datos de cálculo no coinciden siempre con los obtenidos en la práctica (Kousov P. 1971) Sin embargo, por medio de los razonamientos teóricos se puede aclarar la influencia de varios factores en el proceso de captación de polvo en los ciclones.

Deduciendo la dependencia teórica del movimiento de una partícula de polvo en un ciclón hacia las paredes exteriores, se identifican dos fuerzas:

La fuerza centrífuga

$$P_c = m \cdot \omega^2 / R \quad (3.1)$$

y la resistencia del medio

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

$$P = 3\pi \cdot w_r \cdot d\mu \quad (3.2)$$

Donde:  $w$  es la velocidad de la corriente de gas en el conducto de entrada igual a la velocidad de gas y de las partículas en el ciclón en dirección tangencial en m/s;

$W_r$  es la velocidad de movimiento de una partícula del eje (centro de rotación) a la pared exterior del ciclón, o sea, según el radio, m/s;

$R$  es la distancia entre el centro de rotación del flujo de gas (eje de ciclón) y la partícula en un instante dado, m;

$m$  es la masa de una partícula, considerada como una esfera, igual a:

$$m = \pi \cdot d^3 \cdot \rho / 6, \text{ kg} \quad (3.3)$$

$d$  es el diámetro de partícula, m;

$\rho$  es la densidad de la partícula, kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$  es la viscosidad del gas en, N·s/m<sup>2</sup>.

A la entrada del ciclón  $w_r = 0$ , pero a medida de que avance la corriente de gas,  $w_r$  incrementa y al cabo de una centésima de segundo llega a ser tan grande que las fuerzas  $P_c$  y  $P$  se igualan, es decir,  $mw^2/R = 3\pi w_r d\mu$  y el movimiento posterior de las partículas en dirección radial será por inercia con una velocidad permanente

$$w_r = \frac{mw^2}{R3\pi d\mu} = \frac{d^2 w^2 \rho}{18R\mu}. \quad (3.4)$$

El recorrido más largo en dirección radial lo realizara aquella partícula que estaba al lado del tubo interior (de salida) en el momento de entrar en el ciclón. Este recorrido es igual a  $R_2 - R_1$ . El tiempo necesario para este recorrido es:

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{w_r} \text{ seg.} \quad (3.5)$$

Observemos que en la expresión (3.1) el valor de  $R$  es variable y se puede tomar en general, como un promedio de  $(R_2 + R_1)/2$ .

Introduciendo en la formula (3.5) el valor de  $w_r$  de la expresión (3.4), tendremos

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{w_r} = \frac{18(R_2 - R_1)(R_2 + R_1)\mu}{2w^2 d^2 \rho} = \frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{a^2 w^2 \rho}. \quad (3.6)$$

Según esta misma fórmula se puede determinar el tamaño de las partículas menores que recorren la ruta  $(R_2 - R_1)$  por el tiempo de recorrido del ciclón por el flujo de gas, es decir, por el período  $\tau$  de permanencia de la partícula en el ciclón:

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{\rho\omega^2\tau}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{2\pi\rho\omega Rn}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2 - R_1)}{\pi\rho n\omega}} \quad (3.7)$$

Donde:  $n$  es el número de revoluciones (giros) del flujo de gas en el ciclón (generalmente se toma igual a 2).

Examinemos la influencia de distintos factores en el grado de captación de polvo en el ciclón (Gordon y Peisájov, 1981):

1. Con el aumento de velocidad de la corriente de gas  $\omega$  se mejora la captación de polvo en el ciclón. No obstante, a grandes velocidades disminuye el incremento del rendimiento y, al pasar cierto límite dependiente de la construcción del ciclón y de la composición granulométrica del polvo a captar, empieza a reducirse. Este fenómeno se provoca por los torbellinos que levantan las partículas precipitadas y por la desintegración de las pelotas ya coaguladas. Las velocidades más eficientes a la entrada en el ciclón generalmente oscilan entre 20 - 25 m/s, pero no menos de 15 m/s.
2. Las partículas grandes se precipitan más rápidamente. El aumento de su densidad ( $\rho$ ) también acelera su captación.
3. Al acortar  $R_2 - R_1$ , se reduce el recorrido de la partícula, por consiguiente, se facilita la precipitación. Sin embargo, si  $R_2 - R_1$  es muy pequeño, es posible el atasco de la tubuladura de entrada por polvo. Hay que tener en cuenta, cuando el polvo tiene tendencia a la aglutinación, se pega a las paredes ó cuando la concentración de polvo en el flujo de gas es muy alta.

Si la magnitud  $R_2 - R_1$  es constante, pero crecen los valores absolutos de  $R_2$  y  $R_1$ , crece la suma  $R_2 + R_1$  y se hace más lenta la precipitación de polvo. De ahí se deduce que el aumento de diámetro del ciclón afecta su rendimiento. A fin de obtener una alta eficiencia de la captación de polvo es conveniente utilizar los ciclones de pequeño diámetro, pero esto conduce al aumento considerable de la velocidad, lo que es inadmisibles en algunos casos, o a la necesidad de enviar el gas a través de varios ciclones instalados en paralelo. Es recomendable montar los ciclones de  $\Phi$  800 – 1000 mm como máximo agrupándolo de tal manera que en un grupo haya no más de 8 en caso de su situación rectangular y no más de 14 en caso de la circular.

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

4. La viscosidad del gas aumenta al subir la temperatura lo que disminuye la eficiencia de captación de polvo en el ciclón.

Anteriormente ha sido indicado que los cálculos teóricos presentados están relacionados con toda una serie de simplificaciones y suposiciones. Por ejemplo:

- No se toma en consideración la influencia del movimiento vortiginoso desordenado del flujo de gas giratorio lo que altera una precipitación normal de polvo.

- Se acepta que las partículas de polvo esféricas no se cambian y no se coagulan en el proceso de sedimentación; al alcanzar las paredes del ciclón

- Se admite que el polvo se distribuye uniformemente por la sección de la tubuladura de entrada, etc.

Al examinar los procesos en el ciclón hay que tener en cuenta lo siguiente. Las partículas pequeñas de polvo en uno u otro grado coagulan en el aerosol antes de entrar el gas en el ciclón y en el mismo ciclón lo que conlleva el aumento de sus dimensiones, pero la disminución de su densidad. En el ciclón tiene lugar la formación de grandes agregados, pero relativamente ligeros y muy débilmente ligados. Además, a grandes velocidades de gas las fuerzas de acción del flujo de gas pueden ser tan grandes que los agregados coagulados se desintegrarán. Este fenómeno provoca la disminución del grado de captación de polvo en el ciclón.

#### 3.3 Cálculo de la caída de presión en los ciclones.

- La pérdida de carga del ciclón depende de la velocidad de entrada al ciclón. Es en realidad la suma de varios términos:
  - ❖ Pérdida de presión a la entrada del ciclón
  - ❖ Pérdida debida a la aceleración de los sólidos
  - ❖ Pérdidas en el barril
  - ❖ Pérdidas por el flujo reverso (cuando cambia hacia la espiral ascendente)
  - ❖ Pérdidas por contracción en el conducto de salida.

Pueden expresarse en función de la velocidad a la entrada del ciclón

$$\Delta P_{\text{ciclón}} = N_H \rho v_i^2 \quad (3.8)$$

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

Donde:

$$N_H = K \frac{\frac{D_c D_e}{2}}{\left(\frac{D_c}{2}\right)^2} = K/2 \quad (3.9)$$

K es 16 para ciclones normales y 7.5 para ciclones de gran envoltura

Analizando el funcionamiento de los ciclones hay que tener en consideración su resistencia hidráulica a la marcha de la corriente de gas  $\Delta p$ , N/m<sup>2</sup> (mm H<sub>2</sub>O) que se determina por la fórmula:

$$\Delta p = \zeta' \frac{w_e^2 \rho}{2g} = \zeta' \frac{w_e^2 \rho}{2 \cdot 9,81}, \quad (3.10)$$

Donde:  $\rho$  es la densidad del medio gaseoso (en las condiciones de trabajo), kg/m<sup>3</sup>;

$w_e$  es la velocidad de gas en la tubuladura de entrada, m/s;

$\zeta'$  es el coeficiente de la resistencia hidráulica.

Frecuentemente el valor de la resistencia hidráulica del ciclón, N/m<sup>2</sup>, se determina como la función de la velocidad de gas convencional relativa al área de toda la sección de cilindro del ciclón  $w_{conv}$ :

$$\Delta p = \zeta \frac{w_{conv}^2 \rho}{2}. \quad (3.11)$$

A continuación están indicados los valores de coeficientes de resistencia hidráulica para algunos tipos de ciclones:

| <b>Tabla 3.1 Coeficiente de resistencia hidráulica para algunos tipos de ciclones</b> |                               |                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| Tipo de ciclón:(diámetro, mm)                                                         | Sin voluta:<br>$\zeta'/\zeta$ | Con voluta en el tubo de escape:<br>$\zeta'/\zeta$ |
| TsN-11 (450)                                                                          | 6,1/250                       | 5,2/210                                            |
| TsN-15 (450)                                                                          | 7,6/160                       | 6,7/140                                            |
| TsN-15u (450)                                                                         | 8,2/170                       | 7,5/160                                            |
| TsN-24 (450)                                                                          | 10,9/80                       | 12,5/90                                            |
| SIOT                                                                                  | 6,0/--                        | 4,2/--                                             |
| VTsNIIOT (370)                                                                        | 9,3/--                        | 10,4/--                                            |
| LIOT (700)                                                                            | 4,2/460                       | 3,7/411                                            |
| SDK-TsN-33 (450)                                                                      | 20,3/600                      | 31,3/980                                           |
| SK-TsN-34 (450)                                                                       | 24,9/1270                     | 30,3/1540                                          |

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

#### Ejemplo de cálculo de las pérdidas hidráulicas en un ciclón.

El cálculo se ilustrará para el ciclón TsN-11 con voluta y cuerpo cilíndrico de diámetro igual a  $D = 0,5$  m. Por el ciclón pasan  $3\,000\text{ m}^3$  de gas en 1 hora; su densidad es de  $0,6\text{ kg/m}^3$ . Se calculará primero la velocidad  $w_{\text{conv}}$  referida al área de la sección transversal del cuerpo cilíndrico del ciclón:

$$w_{\text{conv}} = \frac{3000}{(\pi/4) \cdot D^2 \cdot 3600} = 4,26 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.12)$$

De la Tabla 3.1 se tiene que el coeficiente de resistencia hidráulica  $\zeta$  para el ciclón TsN-11 con voluta, si el diámetro es igual a  $0,5$  m. es:  $\zeta = 210$ .

La caída de presión en el ciclón es, según la expresión (3.9):

$$\Delta p = 210 \frac{4,26^2 \cdot 0,6}{2} = 1145 \text{ N/m}^2 (115 \text{ mm H}_2\text{O}) \quad (3.13)$$

El coeficiente de resistencia hidráulica en algunos ciclones varía en dependencia de los valores de  $D$  y contenido de polvo en gas  $z$ . En la Tabla 3.2 aparecen los valores de los coeficientes de corrección para  $\Delta p$ . Para ciclones de diámetro  $0,5$  m el coeficiente de corrección para el diámetro en este caso es igual a  $1,0$ . No es necesario modificar el resultado, para otro diámetro entre  $0,2$  m y  $0,5$  m sería necesario interpolar entre los valores de la Tabla 3.2. En el caso de la instalación de los ciclones en baterías el coeficiente de resistencia hidráulica aumenta en un  $10\%$ .

**Tabla 3.2 Coeficientes de corrección en el caso de variación de  $D$  y  $z$**

| Ciclón    | Coeficiente para          |     |                                                             |      |
|-----------|---------------------------|-----|-------------------------------------------------------------|------|
|           | el diámetro del ciclón, m |     | el contenido de polvo en gas a la entrada, g/m <sup>3</sup> |      |
|           | 0,2                       | 0,5 | 10                                                          | 120  |
| TsN-11    | 0,95                      | 1,0 | 0,96                                                        | 0,87 |
| TsN-15    | 0,9                       | 1,0 | 0,93                                                        | 0,87 |
| TsN-24    | 0,9                       | 1,0 | —                                                           | —    |
| SDK-33    | 1,0                       | 1,0 | 0,81                                                        | 0,76 |
| SK-TsN-34 | 1,0                       | 1,0 | 0,98                                                        | 0,91 |

### 3.4 Cálculo del diámetro de partícula mínima retenida.

La aceleración centrífuga en los ciclones es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad de entrada del ciclón inversamente proporcional al radio del ciclón.

$$a_c = \frac{v_i^2}{r_c} \quad (3.14)$$

Donde  $a_c$  es la aceleración centrífuga,  $v_i$  velocidad de entrada del ciclón y  $r_c$  es el radio del ciclón. Cuando no es posible aumentar más la velocidad del gas, conviene disminuir el diámetro del ciclón, de modo de aumentar la eficiencia.

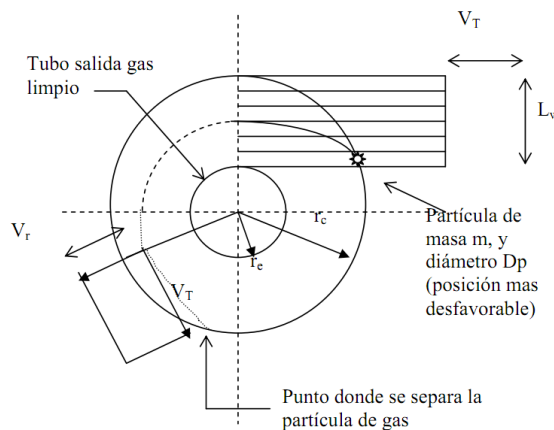


Figura 3.2 trayectoria de una partícula.

- **Trayectoria de una partícula:**

$V_T$ : velocidad de entrada del gas y las partículas de polvo, tangente a las líneas de flujo

$V_R$ : Velocidad de deriva de una partícula de polvo (dirección radial)

$r_c$ : radio del barril del ciclón

$r_e$ : radio del tubo de salida del gas limpio

$L_w$ : ancho del canal rectangular de entrada del gas sucio (ancho de la boca de entrada al ciclón). Cualquier partícula se encuentra sometida a dos fuerzas opuestas en la dirección radial, la fuerza centrífuga y la de rozamiento. Ambas fuerzas son función del radio de rotación y del tamaño de partícula, por esta razón las partículas de distinto tamaño tienden a girar en órbitas de radios distintos.

- **Bases para el cálculo del diámetro mínimo de partículas retenidas**

- La corriente de polvo y gas que entra al ciclón forma una espiral rígida descendente.

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

- La espiral rígida se desplaza con una velocidad tangencial  $V_T$  igual a la velocidad de entrada al ciclón
- El ancho de la espiral rígida descendente es igual al ancho del canal de entrada al ciclón  $L_w$
- Las partículas de polvo se desplazan a la misma velocidad que el gas  $V_T$
- Por acción del campo centrífugo las partículas de polvo se alejan del centro de rotación siguiendo la dirección radial durante su trayectoria descendente.
- El desplazamiento de las partículas hacia la pared del ciclón se realiza a una velocidad definida por la ley de Stokes para el campo centrífugo y se lo conoce como velocidad de deriva.
- Se considera que una partícula se ha separado cuando alcanza la pared interior del barril del ciclón.
- Para que la partícula alcance la pared interior del barril del ciclón el tiempo que tarda debe ser menor que el que tarda en recorrer la espiral descendente.
- Se supone que la aceleración centrífuga es constante y no cambia con el radio del ciclón
- El diámetro de partícula calculado por este método se denomina diámetro mínimo retenido.

#### • Cálculo del diámetro mínimo de partícula retenida.

El gas ingresa con una velocidad tangencial  $V_T$  por lo que la velocidad angular es:

$$\omega = \frac{V_T}{r_c} \quad (3.15)$$

La aceleración centrífuga es:

$$a_c = \frac{v_t^2}{r_c} \quad (3.16)$$

La velocidad de deriva  $V_R$

Según Stokes:

$$v_r = a_c \frac{(\rho_s - \rho) d_p^2}{18\mu} = \frac{v_T^2 (\rho_s - \rho) d_p^2}{r_c 18\mu} \quad (3.17)$$

El tiempo para alcanzar la pared interna del ciclón

$$\theta_R = \frac{L_w}{v_R} = \frac{L_w 18\mu r_c}{v_T^2 (\rho_s - \rho) d_p^2} \quad (3.18)$$

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

La distancia recorrida por la partícula a lo largo de la espiral L

$$L = 2\pi r_c N_s \quad (3.19)$$

Dónde  $N_s$  es el número de espirales que recorre.

El tiempo necesario para recorrer la espiral es:

$$\theta_R^* = \frac{L}{v_T} = \frac{2\pi r_c N_s}{v_T} \quad (3.20)$$

La condición necesaria para que la partícula se separe es:

$$\theta_R^* \geq \theta_R \quad (3.21)$$

$$\frac{2\pi r_c N_s}{v_T} = \frac{L_w 18 \mu r_c}{v_T^2 (\rho_s - \rho) d_p^2} \quad (3.22)$$

$$d_{pmin} = \sqrt{\frac{L_w 18 \mu r_c v_T}{2\pi r_c N_s v_T^2 (\rho_s - \rho)}} \quad (3.23)$$

$$d_{pmin} = \sqrt{\frac{9 \mu L_w}{\pi N_s v_T (\rho_s - \rho)}} \quad (3.24)$$

El número de  $N_s$  espiras puede obtenerse de un gráfico en función de la velocidad de entrada al ciclón o adoptarse un valor de 5.

Las partículas con diámetro igual o mayor que  $d_{pmin}$  se separan con un 100 % de eficiencia. Las partículas con diámetro menor que  $d_{pmin}$  se separarán con una eficiencia menor.

Diámetro de corte: diámetro de partícula que se separa con un 50 % de eficiencia

$$d_{pcorte} = \sqrt{\frac{9 \mu L_w}{2\pi N_s v_T (\rho_s - \rho)}} \quad (3.25)$$

De un gráfico puede calcularse la eficiencia de separación de las distintas fracciones de partículas, en función del diámetro de partícula / diámetro de corte:

$$\eta_i = \frac{\left(\frac{d_{pi}}{d_{pcorte}}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_{pi}}{d_{pcorte}}\right)^2} \quad (3.26)$$

El gráfico responde a esa ecuación.

$\eta_i$  = eficiencia fraccional de las partículas de tamaño  $d_{pi}$  la eficiencia global será:

$$\eta_{global} = \sum W_i \eta_i \quad (3.27)$$

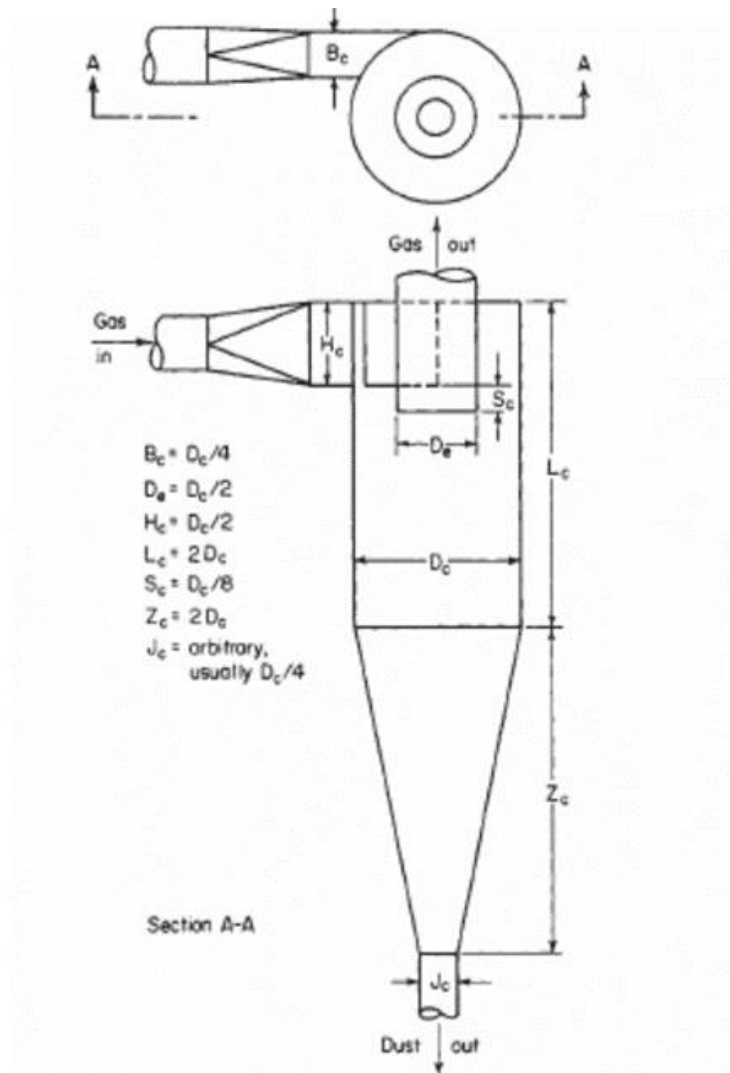
Donde  $w_i$  es la fracción másica de partículas de diámetro  $d_{pi}$  y  $\sum W_i = 1$

### 3.5 Metodología de cálculo de las dimensiones exteriores de los ciclones.

Los parámetros claves de un ciclón son su eficiencia y su pérdida de carga: Estos parámetros son gobernados por sus dimensiones, es decir el diámetro del ciclón y

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

longitudes de los canales de flujo. El diámetro del ciclón influencia fuertemente la eficiencia de colección. Los ciclones de diámetro pequeño (20 cm a 60 cm) proveen una muy buena eficiencia de colección. En un ciclón convencional o estándar al determinar el diámetro del ciclón quedan todas las demás longitudes determinadas. En la Figura 2 se presenta un ciclón convencional o estándar. Las dimensiones características están relacionadas mediante proporciones al diámetro del barril o cuerpo.



**Figura 3.3 Proporciones de un ciclón estándar**

$D_c$ : diámetro del cuerpo del ciclón

$D_g$ : diámetro del conducto de salida del gas limpio, es la mitad del diámetro del ciclón

$L_c$  : longitud o altura del barril o cuerpo cilíndrico.

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

Zc: longitud del cono del ciclón

Hc: altura del conducto de entrada rectangular.

Lw: ancho del conducto de entrada tangencial

Jc: diámetro de la pierna del ciclón o conducto de salida.

Puede dimensionarse estipulando el tamaño de partícula que quiere ser separada. Si se quiere retener la totalidad de las partículas de radio  $d_p$  podemos dimensionar el ciclón para un tamaño 10 veces menor, de manera de tener la seguridad que la eficiencia de separación sea del 100 % para el tamaño de partícula que queremos separar.

Tomamos entonces  $dp_{min} = dp/10$

$$d_{p_{min}} = \frac{d_p}{10} = \sqrt{\frac{9\mu L_w}{\pi N_s v_T (\rho_s - \rho)}} \quad (3.28)$$

$$d_{p_{min}} = \frac{d_p}{10} = \sqrt{\frac{9\mu L_w}{\pi N_s \frac{Q}{L_w h_w} (\rho_s - \rho)}} \quad (3.29)$$

Como

$$L_w = \frac{d_c}{2}$$

Y

$$h_c = \frac{d_c}{4}$$

Reemplazando:

$$\frac{d_p}{10} = \sqrt{\frac{9\mu d_c^3}{\pi N_s Q 8 (\rho_s - \rho)}} \quad (3.30)$$

Ecuación de la cual puede despejarse  $d_c$ , diámetro del ciclón y una vez obtenido el diámetro se calculan por las proporciones recomendadas las distintas dimensiones del ciclón.

#### 3.6 Determinación de la eficiencia de los ciclones.

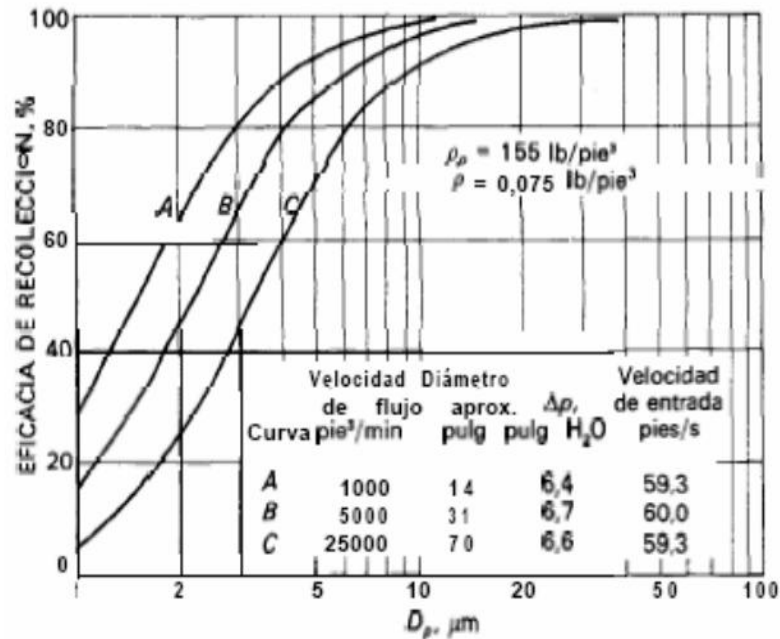
- **Criterio de Kalen y Zenz:**

De acuerdo a Kalen y Zenz, la máxima eficiencia del ciclón se da cuando la velocidad de entrada al ciclón es 1.25 de la velocidad de arrastre. Por otra parte la velocidad de entrada al ciclón no debe ser mayor de 1.36 la velocidad de arrastre, porque si no se produce re-arrastre, es decir que las partículas se van con la espiral ascendente, por lo cual la eficiencia del ciclón disminuye.

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

$$v_s = 4.9114w \left[ \frac{B_c}{1 - \frac{B_c}{D_c}} \right]^{\frac{1}{3}} (B_c)^{\frac{1}{15}} (v_i)^{\frac{2}{3}} \quad (3.31)$$

$$w = \left[ \frac{4g\mu(\rho_s - \rho)}{3\rho^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.32)$$



**Figura 3.4 Influencia del diámetro del ciclón en la capacidad y en la eficiencia.**

En la Figura 3.4 se observa la eficiencia de tres ciclones de distinto diámetro, con velocidad de entrada similar en los tres. Vemos que al aumentar el diámetro, aumenta la capacidad pero disminuye la eficiencia. La pérdida de carga es similar porque la velocidad es la misma para los tres ciclones.

Por otra parte, la eficacia global es una función de la distribución de tamaños de las partículas y no se puede predecir a partir del tamaño medio. La eficacia de separación de un ciclón aumenta con la densidad de las partículas y disminuye al aumentar la temperatura del gas debido al aumento de la viscosidad del gas. Los ciclones también se utilizan ampliamente para separar sólidos de líquidos, especialmente con fines de clarificación.

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

#### Criterio semiempírico:

Entre los distintos métodos de cálculos teóricos el más verídico consiste en generalizar y aplicar los índices obtenidos durante las pruebas de ciclones a escala industrial o en el banco. De este modo para una serie de ciclones de diversos tipos fueron recibidos los datos sobre el grado de captación de diferentes fracciones de polvo y el coeficiente de resistencia hidráulica.

Estos datos aparecen en las normas editadas por las organizaciones de proyección y científico-técnicas. Por ejemplo, el cálculo de la eficiencia del ciclón considerando su construcción, tipo y dimensiones, así como los parámetros de aerosoles, está señalado en las Instrucciones para el diseño de ciclones A6-52. A base de estos materiales fueron confeccionados los nomogramas que fueron modificados un poco por los autores y que facilitan estos cálculos considerablemente.

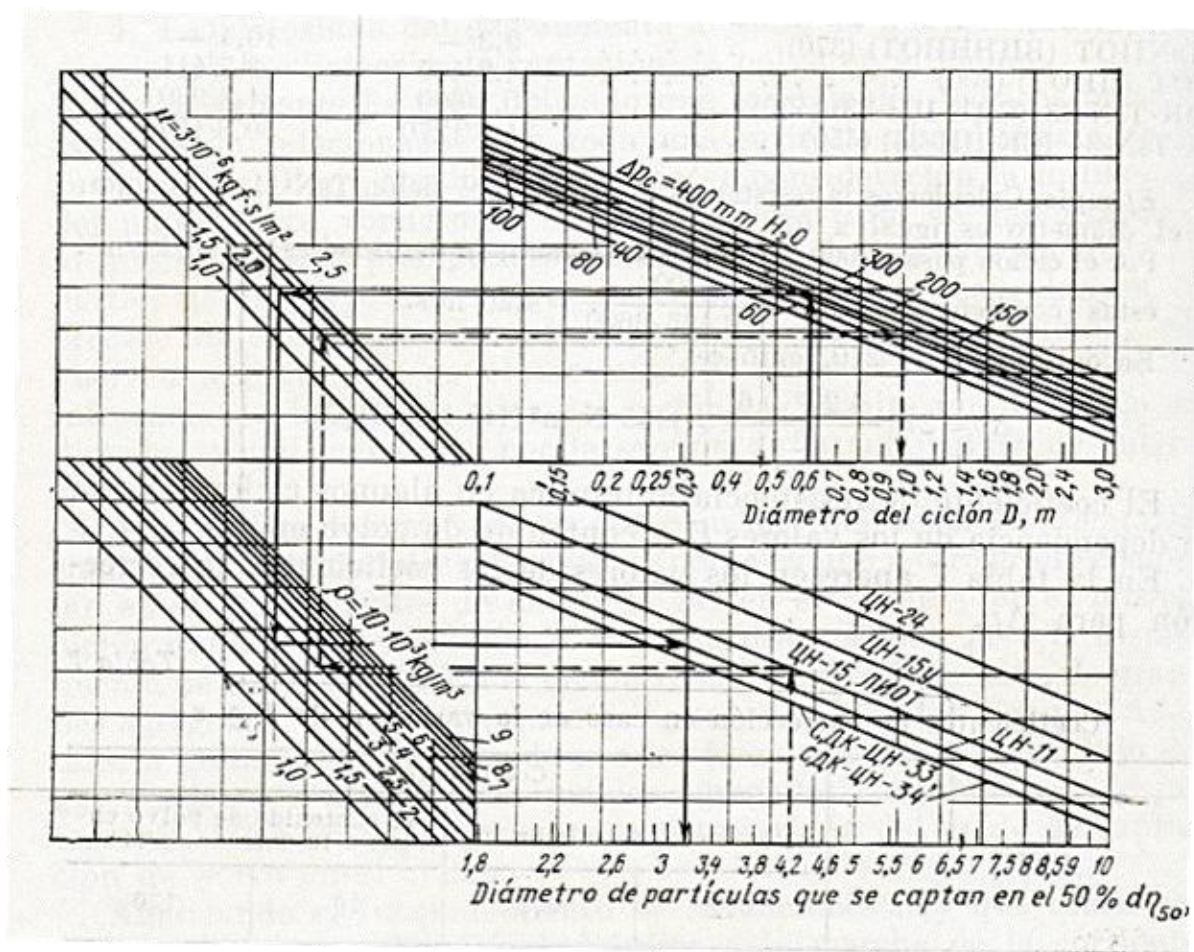


Figura 3.5. Nomograma para la determinación de la dimensión  $d_{\eta 50}$

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

Con el fin de determinar la eficiencia de ciclones es impredecible conocer la resistencia del ciclón elegido, la composición dispersa y densidad del material de partículas de polvo. La composición dispersa debe ser representada con dos magnitudes: el tamaño medio de partícula  $d_{50}$  y el índice de dispersidad de polvo  $\sigma$  que se caracteriza por la relación:

$$\sigma = \frac{d_{15,9}}{d_{50}} = \frac{d_{50}}{d_{84,1}} \quad (3.33)$$

Donde:  $d_{15,9}$ ;  $d_{50}$ ;  $d_{84,1}$  son diámetros de las partículas para las cuales la masa de todas las partículas menores de  $d_{15,9}$ ;  $d_{50}$  y  $d_{84,1}$  es igual respectivamente al 15,9; 50 y 84,1% de la masa total de partículas de polvo;

$d_{50}$  es la dimensión mediana.

Estas magnitudes se encuentran fácilmente al construir la curva de la distribución de partículas de polvo en la red logarítmica normal.

El cálculo de la eficiencia del ciclón está representado por dos nomogramas. Por el nomograma (Figura 3.5) se encuentra la dimensión de las partículas, el 50% de las cuales puede ser captada por el ciclón elegido en las condiciones dadas, y por el nomograma (Figura 3.6) se determina el grado de captación del polvo según su composición dispersa, o sea, de acuerdo con  $d_{50}$  y  $\sigma$ .

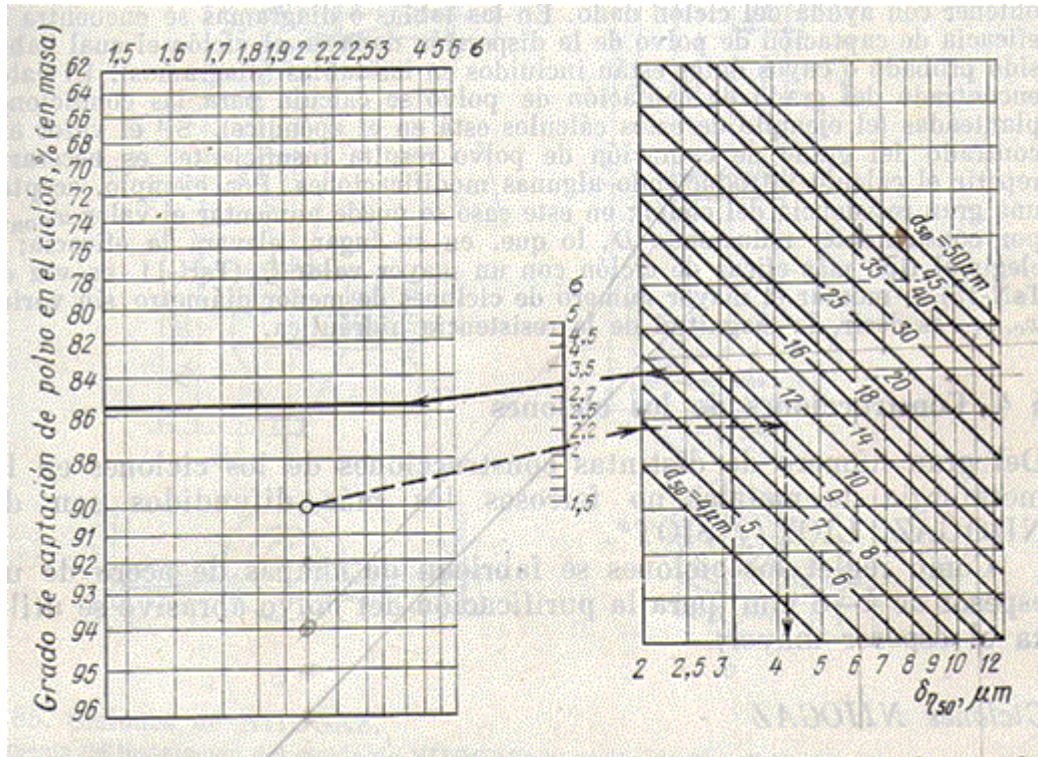
#### Ejemplo de determinación de la eficiencia de la captación de polvo.

Determinar la eficiencia de la captación de polvo en el ciclón TsN-11 con 0,6 m de diámetro, la resistencia hidráulica 100 mm H<sub>2</sub>O, la viscosidad del gas  $18,5 \cdot 10^{-6}$  N·s/m<sup>2</sup>, la densidad del polvo 640 kg/m<sup>3</sup>. La dimensión mediana de las partículas de polvo es de 10 μm,  $\sigma = 3$ .

En el nomograma (Figura 3.5) encontramos el punto correspondiente a  $D = 0,6$  m, de ahí trazamos las flechas verticales y luego horizontales y marcamos  $d_{50} \approx 3,2 \mu\text{m}$ . Este valor lo marcamos en el eje de abscisas del nomograma (fig.84) y a partir del trazamos una vertical hasta su intersección con la línea correspondiente al valor dado  $d_{50} = 10 \mu\text{m}$ , desde el punto de intersección trazamos una horizontal hasta el eje de ordenadas. En la escala vertical suplementaria  $\sigma$  encontramos el punto correspondiente  $\sigma = 3$  y trazamos una línea recta por este punto y la ordenada anterior hasta su intersección con la vertical correspondiente al valor  $\sigma = 3$ . La ordenada de este punto en

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

la escala izquierda señala el grado de captación de polvo en el ciclón, % en masa. En nuestro ejemplo tenemos alrededor del 85,6%.



**Figura 3.6 Nomograma para determinar el grado de captación de polvo en los ciclones:**

$d_{50}$ , tamaño mediano de las partículas iniciales;  $\sigma$ , índice de la polidispersidad

De acuerdo con estos nomogramas puede solucionarse la tarea inversa: encontrar la resistencia hidráulica o el diámetro del ciclón para garantizar el grado de purificación dado.

#### **Ejemplo Tarea Inversa.:**

Determinar el diámetro del ciclón TsN-15 que garantice una captación de polvo al 90%. La dimensión mediana y el índice de dispersidad son:  $d_0 = 10\mu\text{m}$ ;  $\sigma = 2$ ; la densidad del polvo  $\rho = 4\,000\text{ kg/m}^3$ , la viscosidad del gas es de  $20 \cdot 10^{-6}\text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ ; la resistencia del ciclón, 80 mm H<sub>2</sub>O .

En el nomograma (Figura 3.6) encontramos el punto correspondiente al grado de captación del 90% y  $\sigma=2$ . Por este punto y por el  $\sigma=2$  en la vertical suplementaria  $\sigma$  trazamos una línea hasta su intersección con la ordenada de la parte derecha del

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

grafico. Por el punto recibido trazamos una horizontal hasta la intersección en la línea  $d_{50} = 10\mu\text{m}$  y en la abscisa encontramos el valor  $d_{\eta 50} = 4,2\mu\text{m}$ . este valor marcamos en la escala inferior del nomograma (figura 3.5) y trazamos consecutivamente las verticales y horizontales encontramos el diámetro del ciclón  $D = 1\text{m}$ .

La experiencia demuestra que para cada tipo de ciclón la expresión  $\frac{\Delta p}{\rho g}$  tiene su valor óptimo, por ejemplo, para los ciclones de serie TsN está en el intervalo de 50-70 m.

Sabiendo el diámetro del ciclón, según las normas es fácil calcular las demás dimensiones. Si el diámetro recibido es mayor que 800-1000 mm, frecuentemente se instala no uno, sino varios ciclones en paralelo.

Luego se verifica mediante los cálculos que grado de purificación se puede obtener con ayuda del ciclón dado. En las tablas o diagramas se encuentra la eficiencia de captación de polvo de la dispersión dada en el ciclón el cual había sido probado o cuyos datos están incluidos en la tabla (diagrama). El valor encontrado del grado de captación de polvo se calcula por las condiciones planteadas. Si el valor encontrado del grado de captación d polvo resulta insuficiente, es necesario repetir el cálculo introduciendo algunas modificaciones. Por ejemplo, aceptar una gran resistencia del ciclón; en este caso se puede aumentar el valor de  $w_{\text{conv}}$ , por consiguiente, reduciendo  $D$ , lo que, en lugar, elevara la eficiencia elegir el tipo más eficaz de ciclón con un mayor valor  $\zeta$  (TsH-11 en vez de TsN-15), o montar el mayor numero de ciclones de menor diámetro sin variar  $w_{\text{conv}}$ , es decir, la magnitud de la resistencia hidráulica.

#### 3.7 Construcciones típicas de algunos ciclones.

Del gran número de distintas construcciones de ciclones los más difundidos son de NIIOGAZ, LIOT y SIOT.

Como regla, los ciclones se fabrican de chapas de acero de un espesor de 4 - 8 mm (para la purificación del polvo abrasivo se utiliza el espesor mayor).

##### Ciclones NIIOGAZ:

La particularidad característica de los ciclones de este tipo (fig85) consiste en una tubuladura inclinada (en vez de la situada a  $90^\circ$  con respecto al eje vertical del ciclón)

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

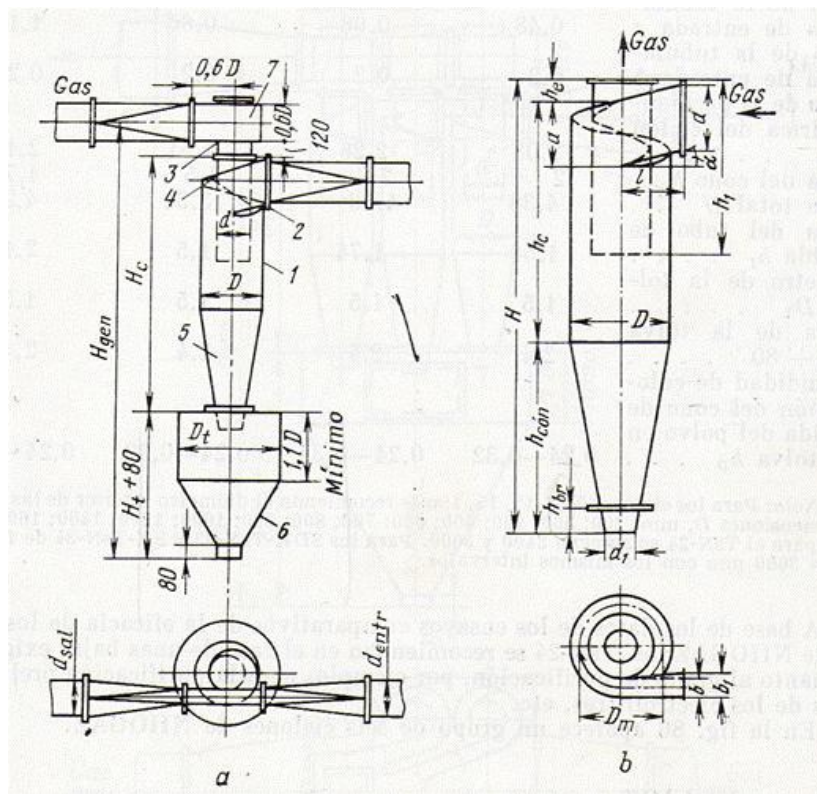
El ciclón se compone de una tubuladura de entrada rectangular 2, una parte cilíndrica del cuerpo 1 una tubuladura de salida 3. En la parte superior cilíndrica esta una etapa 4 doblada en espiral en  $360^\circ$  con el paso igual a la altura de la tubuladura de entrada; la parte inferior del cuerpo 5 tiene forma de cono.

En el tubo de salida se puede montar una voluta 7 que sirve para transformar el movimiento giratorio de los gases en el de avance.

Debajo del ciclón viene instalada una tolva para recolectar el polvo captado (en el caso de un grupo de ciclones hay una sola tolva para todos los ciclones).

Existen 3 tipos de ciclones de NIIOGAZ que se diferencian uno del otro por el ángulo de inclinación de la tubuladura de entrada: el tipo TsN-15 (normal) y el TsN-15u (acortado) tienen el ángulo de inclinación de  $15^\circ$ ; el tipo TsN-24 de productividad elevada (con el menor coeficiente de resistencia hidráulica para la captación del polvo grueso) tiene este ángulo de  $24^\circ$ ; el tipo TsN-11 de eficacia elevada (con el mayor coeficiente de resistencia hidráulica) tiene el ángulo de  $11^\circ$ .

El tipo básico de los ciclones NIIOGAZ es el TsN-15. En este ciclón se garantiza el mayor grado de captación de polvo con el menor coeficiente de resistencia hidráulica.



**Esquema de instalación del ciclón de NIIOGAZ; b, ciclón de tipo TsN -15**

**Figura 3.7 Ciclones de NIIOGAZ.**

A continuación aparecen las dimensiones geométricas de todos los tipos de ciclones NIIOGAZ expresadas en las cuotas del diámetro interior de la parte cilíndrica  $D$ :

| Dimensiones                                                                      | TsN-11    | TsN-15    | TsN-15u   | TsN-24    |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Angulo de inclinación de la tapa y de la tubuladura de entrada $\alpha$ , grados | 11        | 15        | 15        | 24        |
| Diámetro exterior del gasoducto de salida $d$                                    | 0,6       | 0,6       | 0,6       | 0,6       |
| Diámetro interior de la salida de polvo $d_1$                                    | 0,3-0,4   | 0,3-0,4   | 0,3-0,4   | 0,3-0,4   |
| Altura de la tubuladura de entrada $a$                                           | 0,48      | 0,66      | 0,66      | 1,11      |
| Ancho de la tubuladura de entrada $b$                                            | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,2       |
| Altura de la parte cilíndrica del ciclón $h_{cil}$                               | 2,08      | 2,26      | 1,51      | 2,11      |
| Altura del cono $h_{cono}$                                                       | 2         | 2         | 1,5       | 1,75      |
| Altura total $H$                                                                 | 4,38      | 4,56      | 3,31      | 4,26      |
| Altura del tubo de salida $h_1$                                                  | 1,56      | 1,74      | 1,5       | 2,11      |
| Diámetro de la tolva $D_t$                                                       | 1,5       | 1,5       | 1,5       | 1,5       |
| Altura de la tolva $H_t+80$                                                      | 2,4       | 2,4       | 2,4       | 2,4       |
| Profundidad de colocación del cono de salida del polvo en la tolva $h_p$         | 0,24-0,32 | 0,24-0,32 | 0,24-0,32 | 0,24-0,32 |

Nota: para los ciclones TsN-11, 15, 15u se recomienda el diámetro interior de las siguientes dimensiones  $D$ , mm: 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; para el TsN-24 se agregan 2400 y 3000. Para los SDK-TsN-33 y SK-TsN-34 de  $D = 400$  a  $D = 3000$ mm con los mismos intervalos.

A base de los datos de los ensayos comparativos de la eficacia de los ciclones de NIIOGAZ los TsN-24 se recomiendan en el caso de unas bajas exigencias en cuanto al grado de purificación, por ejemplo, para la purificación preliminar antes de los electrofiltros, etc.

En la Figura 3.8 aparece una batería de 6 ciclones de NIIOGAZ.

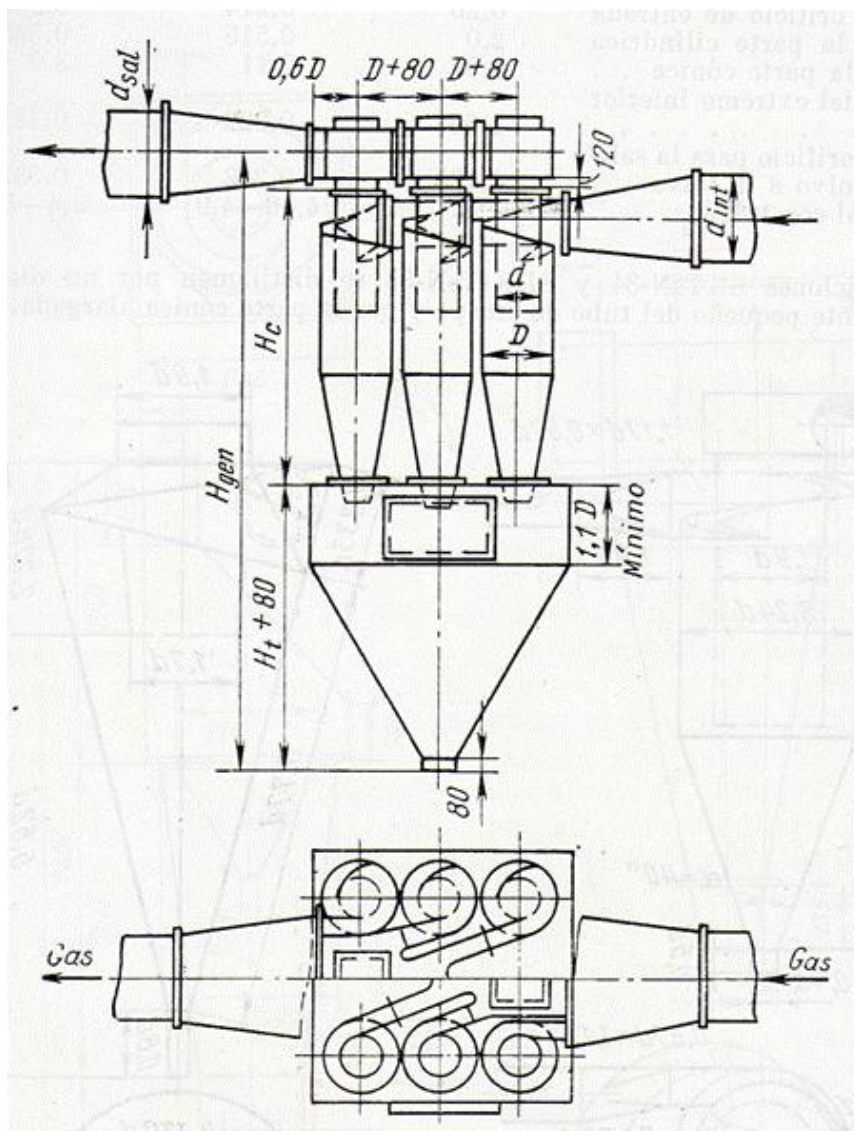


Figura 3.8. Batería de 6 ciclones de NIIOGAZ

#### Ciclones de LIOT:

La propiedad característica de estos ciclones (Figura 3.9) es la parte cilíndrica alargada con el tubo de salida introducido profundamente. Las correlaciones de las dimensiones geométricas para estos ciclones expresadas en las fracciones del diámetro  $d$  del gasoducto a través del cual los gases penetran en el ciclón mediante la tubuladura de entrada, aparecen en la Figura 3.9

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

Actualmente los ciclones de LIOT no se recomiendan para su empleo, pero existen en muchas fábricas.

#### Ciclones de SIOT:

Para los ciclones de SIOT son características la ausencia de la parte cilíndrica y la forma triangular de la tubuladura de entrada (Figura 3.10). por su eficacia no cede al TsN-15.

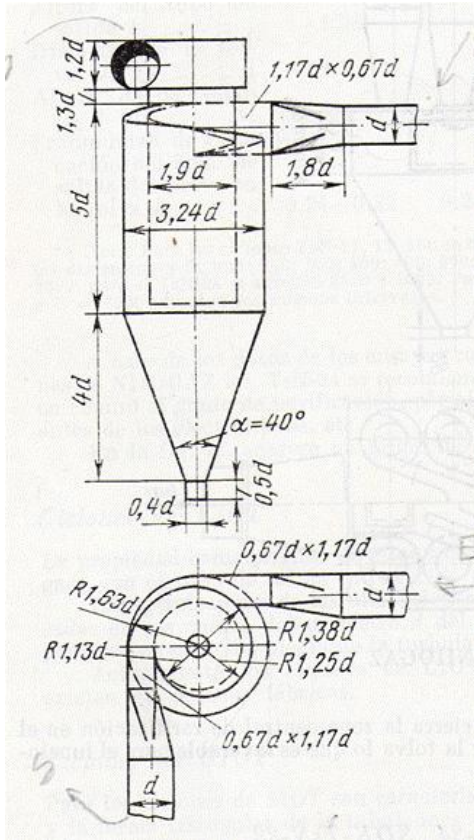


Figura 3.9Ciclón de LIOT

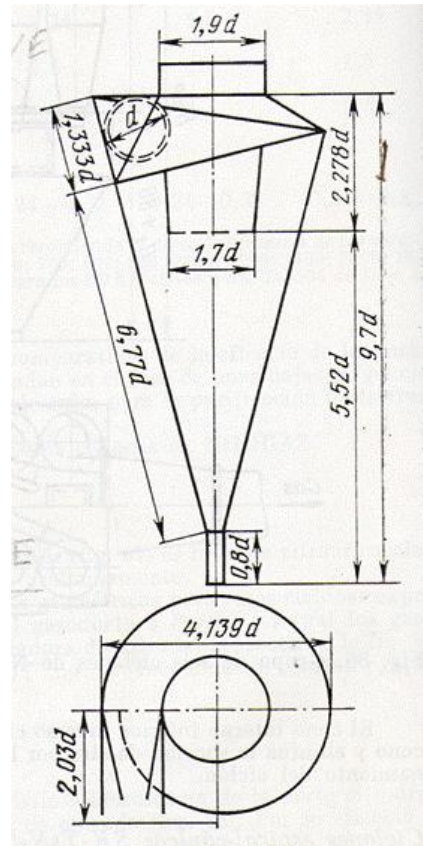


Figura 3.10. Ciclón de SIOT

#### Ciclones de VTsNIIOT:

La parte inferior del ciclón de este tipo tiene forma cónica un poco ensanchada. El polvo concentrado en el gas sale por una ranura periférica. En la tolva de los ciclones de VTsNIIOT la presión siempre es positiva lo que es muy importante. Estos ciclones son muy útiles cuando hay riesgos de la acumulación del polvo en el cono del ciclón. El cono interno inferior inverso cierra la zona central de ratificación en el cono y elimina la succión de aire por la tolva lo que es favorable para el funcionamiento del ciclón.

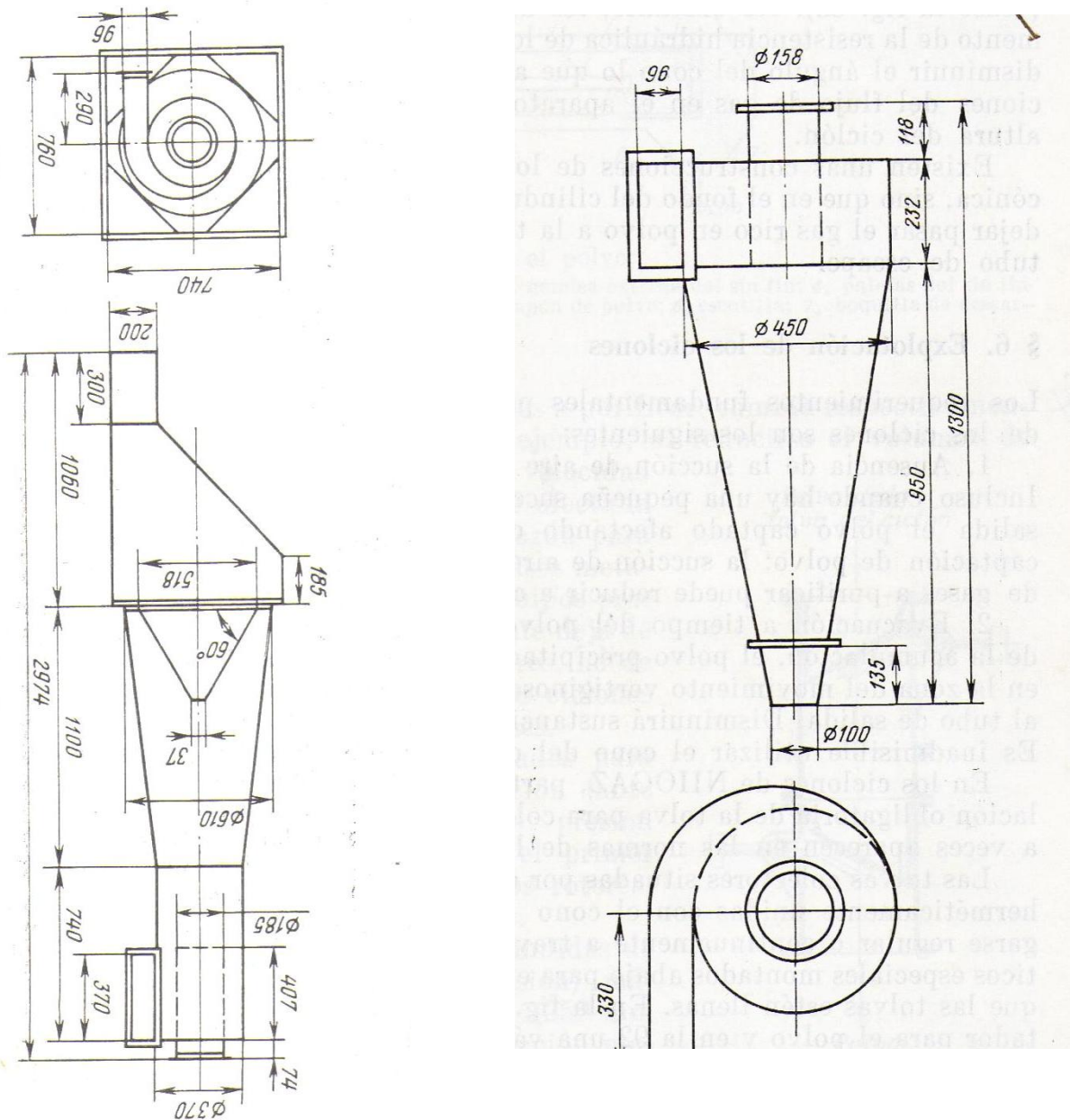
**Ciclones espiral-cónicos SK-TsN-34, SDK-TsN-33, UTs-38 y otros:**

En los ciclones de este tipo la entrada del gas con polvo se realiza por una espiral de Arquímedes (Figura 311). A continuación están indicadas las dimensiones básicas de las fracciones con relación al diámetro D del ciclón:

| <b>Dimensiones</b>                                     | <b>VTsNIOT</b> | <b>SKTsN-34</b> | <b>SDK-TsN-33</b> |
|--------------------------------------------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| Diámetro del tubo de salida                            | 0,5            | 0,35            | 0,337             |
| Altura del orificio de entrada                         | 1,0            | 0,515           | 0,535             |
| Ancho del orificio de entrada                          | 0,26           | 0,214           | 0,265             |
| Altura de la parte cilíndrica                          | 2,0            | 0,515           | 0,535             |
| Altura de la parte cónica                              | 2,97           | 2,11            | 3,0               |
| Diámetro del extremo inferior del cono                 | 1,65           | 0,222           | 0,333             |
| Ancho del orificio para la salida del polvo a la tolva | 0,125          | 0,222           | 0,333             |
| Altura total con tolva                                 | 7,7            | 4,46-4,9        | 5,4-5,8           |

### Capítulo III: Cálculo de los ciclones ordinarios y tipo batería

Los ciclones SKTsN-34 y SDK-TsN-33 se distinguen por un diámetro relativamente pequeño del tubo de escape y por la parte cónica alargada. Estos ciclones tienen una gran resistencia hidráulica, pero al mismo tiempo una alta eficacia de captación. Son convenientes en aquellos casos cuando se requiere un alto grado de purificación de los gases y la resistencia hidráulica no se limita.



**Figura 3.11 Ciclones espiral-cónicos**

### **3.8 Conclusiones Parciales del Capítulo III**

1. Se describen las partes constructivas fundamentales de un ciclón convencional y se da la influencia de los distintos factores en la captación de polvo
2. En el Capítulo se dan además las ecuaciones que permiten calcular las pérdidas hidráulicas en un ciclón
3. Se describen las bases para el cálculo del diámetro mínimo de partícula retenida en un ciclón y las ecuaciones que permiten calcular la partícula mínima separada en el mismo.
4. Seleccionando el diámetro mínimo de la partícula que se desea separar en el ciclón se puede despejar el diámetro del cuerpo del mismo y con este diámetro se pueden obtener las restantes dimensiones del ciclón.
5. Se dan los distintos criterios existentes para calcular la eficiencia de la captación de polvo.
6. Finalmente se dan las proporciones típicas de las distintas partes de los ciclones que pueden ser utilizados como ciclones simples o de batería, para los distintos modelos más comunes empleados en la práctica industrial.

# *Conclusiones Generales*

### Conclusiones Generales

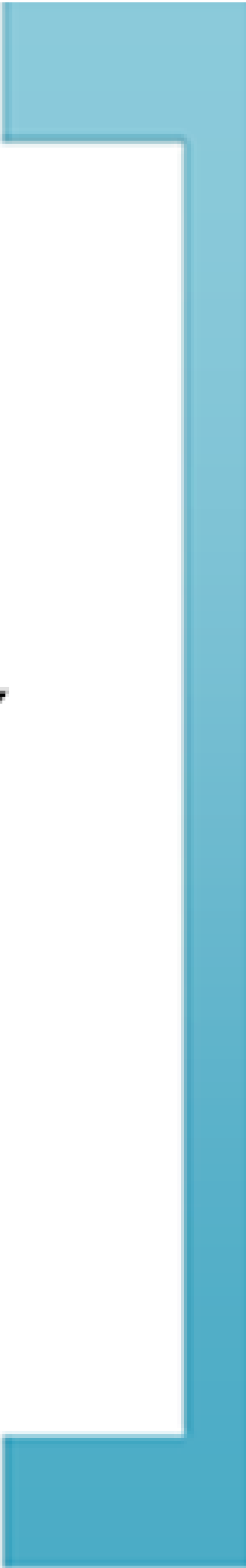
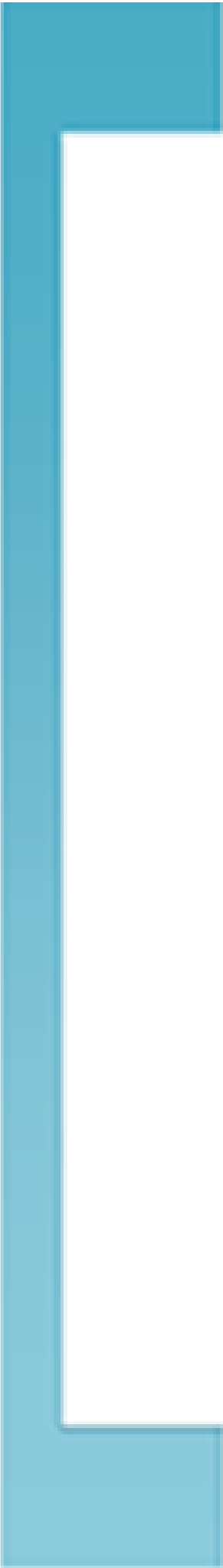
1. Se realizó una amplia revisión bibliográfica para investigar sobre las partículas sólidas las propiedades de los sistemas de partículas tales como tamaño, forma, densidad y dispersidad y contenido del polvo en los gases. La formación de polvos y gases polvorientos en los procesos industriales más comunes.
2. Se realizó una amplia revisión bibliográfica acerca del empleo de los ciclones simples y los ciclones tipo batería, su principio de funcionamiento, sus particularidades constructivas, sus ventajas y desventajas y los aspectos vinculados con su explotación.
3. Se estudiaron las cualidades constructivas de los diferentes tipos de ciclones e hidrociclones descritos en las literaturas, sus diseños más recientes y novedosos, muchos de ellos realmente poco utilizados en la práctica industrial, aunque con muchas posibilidades de empleo en función de los requerimientos prácticos de la industria.
4. Se describen los procedimientos y ecuaciones para calcular el diámetro mínimo de la partícula que se puede separar en un ciclón dado por los diferentes criterios en la literatura. Esto se ilustra con un ejemplo numérico concreto.
5. Se dan las ecuaciones para calcular la caída de presión en un ciclón cualquiera y se ilustra el cálculo también con un ejemplo numérico.
6. Se dan los procedimientos para calcular la efectividad en la separación de partículas en los ciclones.
7. Finalmente se describe como, partiendo del diámetro de la partícula mínima que se desea separar, se puede obtener el diámetro del ciclón y con este todas las restantes dimensiones del mismo sobre la base de las proporciones dadas en la literatura para los distintos tipos de ciclones.

A thick blue L-shaped decorative border is positioned in the corners of the page, forming a frame around the central text.

# *Recomendaciones*

### **Recomendaciones**

1. Se recomienda validar la metodología elaborada utilizando los datos experimentales de algunos de los ciclones existentes en la Industria de la Construcción en Cienfuegos u otra Industria donde se empleen estos aparatos.
2. Aplicar la Metodología elaborada al diseño de algún ciclón industrial.



# *Bibliografia*

**Bibliografía**

- Ciclones NIIOGAZ. (1970) Instrucciones para la proyección, fabricación montaje y explotación. Editorial Yaroslavl. 75 p.
- Directiva IPPC 96/61. (2000) EPER (European Pollution Emission Register). Comisión Europea 2000/497/CE.
- Dubbel. (1980) Manual del Constructor de Maquinas. Barcelona: Labor S.A. 267p.
- Duda W. (1997) Manual Tecnológico del Cemento. Editores Técnicos Asociados S.A. Barcelona España.
- Finnemore E. J; Franzini J.B. (2009) Fluid Mechanics with Engineering Applications. Washington D.C. Mc Graw Hill. 456 p.
- Garcel Puyans, L. (1988) Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa. L. Garcel Puyans, A. Díaz García, G. Suris Conde. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 348 p.
- Gordon G.M., Peisájov L.L. (1981) Captación de polvos y purificación de gases en la metalurgia de metales no ferrosos. Editorial MIR Moscú. 392 p.
- Guervasiev A.P. (1974) Captadores de polvo SIOT. Moscú: Editorial Profizdat, 172 p.
- Incropera, F.P. (1993) Fundamentos de la transferencia de calor y masa. F.P. Incropera, D.P. Dewitt. New York: Editorial John Willei and Sons. 802 p.
- Kousov P. (1971) Bases para el análisis de la composición dispersa de polvos industriales y materiales triturados. Leningrado: Editorial Química. 65 P.
- LAROX, TWIN VORTEX CYCLONE LEAFLEFT (2011). Catálogo Industrial..
- Laschinnski, A. (1983) Construcción de aparatos químicos soldados. Manual del Ingeniero. Moscú: Eneshtorgizdat.
- Lund H. F. (1998) Industrial Pollution Control Handbook. New York: McGraw-Hill Book Co. 657 p.
- Mc Cabe W.L. et al. (1998) Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Madrid. Mc. Graw Hill
- ONUDI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial). (1999). Manual de producción más limpia (p.17). Retrieved from [http://www.unido.org/fileadmin/user\\_media/Services/Environmental\\_Management/CP\\_ToolKit\\_spanish/PR-Introduction/Toolkit.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Environmental_Management/CP_ToolKit_spanish/PR-Introduction/Toolkit.pdf).

- Pavlov, K.F. et. al. (1981) Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. /K.F. Pavlov, P.G. Romankov, A.A. Noskov. Moscú: Editorial MIR. 611 p.
- Peisajov I.L. (1984) Atlas de diagramas y nomogramas de las tecnologías de captación de polvo. Moscú: Editorial Metalurgiya. 187 p.
- Rivkin, S.L. (1984) Propiedades termodinámicas del aire y de los productos de la combustión de los combustibles. /S.L. Rivkin.--Moscú: Editorial Ehnergoatomizdat, 104 p.
- Orr, C., Dalla Valle, J. M. (1999) Fine Particle Measurement, McMillan, New York.
- Pankratz T.M. (2000) Environmental Engineering Dictionary and Directory. Lewis Publishers. New York.
- Perrys' Chemical Engineers's Handbook (1997) New York, Mc Graw Hill.
- Smith, J. C., Y Hattiangadin (1980): Chem. Eng. Communications, 6~105.
- Strauss W. (1996) Industrial Gas Cleaning. Pergamon Press. Oxford, London, 270 p.
- Taylor, D. W. (1988) Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York

