

## Ciclones

Uno de los métodos más antiguos y más usados para separar polvo en suspensión en un gas (generalmente aire) es el CICLÓN.

Son de buena eficiencia si las partículas no son muy pequeñas, son de bajo costo de instalación y de operación y además, la posibilidad de regulación les permite una utilización bastante variedad en la recuperación de polvos industriales siempre que las fracciones debajo de los diez micrones sean tan solo un pequeño porcentaje del total.

Los ciclones utilizados en la salida de los altos hornos tienen una capacidad de 100.000 m<sup>3</sup> / hora, una temperatura de 250°C y una presión de 300 kg / m<sup>2</sup>. La caída de presión suele ser de 100 kg / m<sup>2</sup>. Mide entre 20 y 25 m de alto y tiene una sección cilíndrica de 5 a 6 m de diámetro.

Los ciclones son sedimentadores donde se reemplaza la fuerza de gravedad por la fuerza centrífuga. Los ciclones de diámetro grande suelen trabajar con aceleraciones centrífugas de 5 g y los de diámetro pequeño suelen alcanzar aceleraciones de 2500 g.

Los ciclones también se utilizan para separar gotas de líquido en suspensión en un gas y partículas sólidas en suspensión en un líquido. En este último caso se llaman hidrociclones.

Los ciclones para separar sólidos o líquidas de gases trabajan con partículas de entre 5 a 200 micrones, en el caso de partículas de diámetro menor a 5 micrones el rendimiento de la separación es bajo y para el caso de diámetro de partículas superiores a 200 micrones es conveniente utilizar una cámara de sedimentación por que la abrasión es menor.

Cuando hay aglomeración de partículas o alta concentración de polvos, pueden separarse partículas de menor tamaño obteniéndose un rendimiento de hasta el 98% debido a las aglomeraciones.

Si bien los distintos ciclones tienen características propias, el que se ilustra en la figura es el tipo de ciclón más común.

No tiene partes móviles, está formado por un cilindro vertical con el fondo cónico, una entrada tangencial en la parte superior y una salida para el polvo en el fondo cónico. El conducto de salida (Chimenea), se prolonga dentro del cilindro para impedir cortocircuito entre el aire de entrada y el de salida.

La trayectoria de los gases es un torbellino descendente es espiral, adyacente a la pared, el cual trata de alcanzar el fondo del cono, pero a cierta altura cambia ascendiendo en espiral de menor diámetro en el centro del cuerpo. Esta espiral es concéntrica con la descendente y gira en el mismo sentido, finalmente el gas sale, todavía girando, a través de la chimenea.

La aceleración centrífuga de las partículas suspendidas depende del radio del camino seguido por el gas y es dada por la siguiente ecuación empírica.

Donde :  $r$  es el radio,  $K_1$  y  $n$  son constantes y  $n$  varía entre 2 y 2,4.

Esta ecuación nos indica que la eficiencia de un ciclón depende del radio seguido por las partículas. Las partículas gruesas, por la fuerza centrífuga, pasan a través del torbellino exterior, radialmente, hacia la pared del ciclón y caen hacia la salida del polvo que está en la parte inferior del cono. Las más pequeñas que no tienen tiempo de alcanzar la pared, son detenidas por el gas y acompañan a la salida. Aunque la posibilidad

de separación de una partícula crece con el diámetro de la misma, la suerte de una partícula depende también de su posición en la sección de la corriente gaseosa, de manera que la separación de acuerdo con el tamaño no es muy definida.

Cuando los gases penetran en el ciclón ( lo hacen tangencialmente) su velocidad puntual sufre una redistribución de manera que su componente tangencial aumenta cuando disminuye el radio:

Donde: r es el radio, K y n son constantes. En las paredes se acerca a cero, adquiere un valor máximo a cierto radio y luego disminuye rápidamente a menor radio. N varía de 0.5 a 0.7 en una porción considerable del radio del ciclón.

La entrada de los gases al ciclón es, generalmente, rectangular y su velocidad varía entre 6 y 21m/ s.

### **Caída de presión**

Los estudios realizados han despreciado el efecto de la compresión del gas a la entrada y la expansión del mismo a la salida, de allí que las ecuaciones encontradas sean solo aproximadas.

Las pérdidas de presión dependen de las formas del mismo y son independientes del volumen.

Se suelen expresar las pérdidas de presión por el número de carga de velocidad referidas al área de entrada al ciclo.

La carga de velocidad en la entrada es:

Donde : H son centímetros de agua,  $\rho$  es la densidad del gas en kg / m<sup>3</sup>, VTG es la velocidad tangencial media del gas en la entrada en m / s .

Las pérdidas por rozamiento varían entre 1 y 20 cargas de velocidad en la entrada.

Shepherd y Lapple investigando ciclones del tipo general como el presentado en la figura, obtuvieron la siguiente expresión empírica

Donde:

Esta expresión es válida para ciclones de las siguientes proporciones :

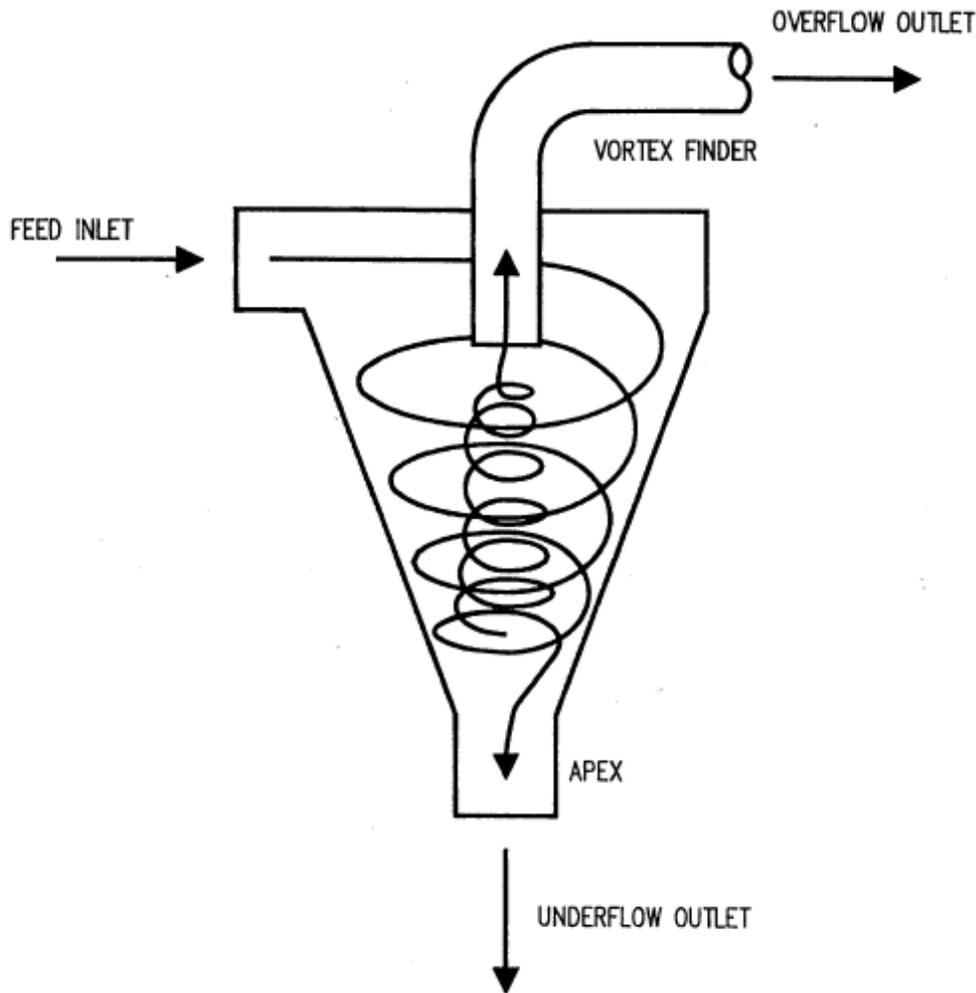
$$B_c / D_e = 1/12 \text{ a } 1/14$$

$$H_c / D_c = 1/4 \text{ a } 1/2$$

$$D_e / D_c = 1/4 \text{ a } 1/2$$

K varia según la geometría de la entrada de 16 hasta 7.5.

Con la disposición normal en la cual la entrada rectangular termina en los elementos exteriores del ciclón se vio que k vale 16. Si se extiende el lado interior del conducto de entrada hasta mas allá de la pared del cilindro del ciclón, hasta penetrar en el espacio anular a media distancia de la pared para formar una aleta de entrada, se reduce la pérdida por rozamiento en mas del 50% y k resulta igual a 7.5



### Rendimiento de la separación

Se llama **diámetro de la partícula mínima** ( $D_p \text{ min}$ ) al diámetro de las partículas de las cuales el ciclón retiene el 100%.

Se llama **diámetro de corte** ( $D_c$ ) al diámetro de las partículas de las cuales el ciclón retiene el 50% en masa.

**Rendimiento de la separación** para un determinado tamaño de partículas es la fracción en masa de partículas de ese tamaño que es retenida por el ciclón.

Rendimiento de la separación  $\eta = \frac{M_{\text{Retenida}}}{M_{\text{Total}}}$

Para el cálculo de  $D_p \text{ min}$ ,  $D_c$  y Rendimiento de la separación haremos las siguientes consideraciones:

Se presupone que para cada tipo de ciclón, el gas da un definido número de vueltas dentro del mismo en la espiral descendente.

Éste número de vueltas puede considerarse como una medida aproximada de la eficacia de un tipo dado de ciclón (es un valor experimental).

Las partículas, supuestas esféricas, se mueven en régimen laminar (fórmula de Stokes) y alcanzan la velocidad Terminal apenas entran al ciclón.

La velocidad tangencial es independiente del radio e igual a la velocidad media de entrada al ciclón (suele adoptarse 15 m/seg).

La ecuación de Stokes nos da la **velocidad terminal**:

$$V_t = \frac{a_x \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D_p^2}{18 \cdot \mu}$$

Donde:  $a_x$

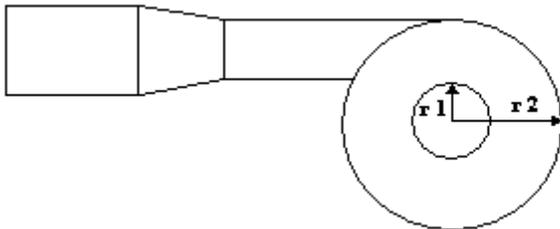
es la aceleración debida a la fuerza externa. Aquí es la aceleración centrífuga, o sea :  $a_x = \frac{V_{tg}^2}{r}$

$D_p \text{ min}$  = diámetro de las partículas que el ciclón retiene en un 100%.

$D_c$  = diámetro de las partículas que el ciclón retiene en un 50% en masa.

Por lo que la ecuación teórica a aplicar será:

$$V_t = \frac{V_{tg}^2 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D_p^2}{18 \cdot r \cdot \mu}$$



Como el radio de cada partícula varía a medida que la partícula se desplaza, la  $V_t$  no es constante, por lo que debemos integrar.

Las partículas que están en las peores condiciones son las que entran al ciclón con un radio  $r_1$  y para sedimentar deben recorrer un camino  $r_2 - r_1$  antes que el gas ascienda para dejar el ciclón.

Velocidad Terminal será :

$$V_t = \frac{V_{tg}^2 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D_p^2}{18 \cdot r \cdot \mu} = \frac{dr}{d\theta}$$

$$d\theta = \frac{18 \cdot \mu \cdot r \cdot dr}{V_{tg}^2 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D_p^2}$$

Hay un diámetro de partícula que es totalmente eliminado ( $D_p \text{ min}$ ) en un tiempo de retención  $\theta_r$ , luego:

$$d\theta = \frac{18 \cdot \mu}{V_{tg}^2 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D_{p,\min}^2} \cdot r \cdot dr$$

$$\theta_r = \frac{18 \cdot \mu}{V_{tg}^2 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D_{p,\min}^2} \cdot \left( \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right)$$

Luego: 
$$\theta_r = \frac{9 \cdot \mu}{V_{tg}^2 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D_{p,\min}^2} \cdot (r_2^2 - r_1^2)$$

tiempo de retención

Por otro lado, el camino recorrido por el gas en el ciclón:

$$L = 2\pi \cdot \frac{r_2 - r_1}{2} \cdot N$$

Donde 
$$2\pi \cdot \frac{r_2 - r_1}{2}$$

es la diferencia media recorrida en cada vuelta del torbellino, y N el número de vueltas.

De allí que el tiempo de detención en la suspensión en el ciclón será:

$$\theta_d = \frac{2\pi \cdot (r_2 - r_1)}{V_{tg}}$$

tiempo de detención

Para que la partícula considerada sea totalmente retenida en el ciclón es necesario que:

$$\theta_r < \theta_d$$

Luego, en el caso límite:  $\theta_r = \theta_d$

O sea: 
$$\frac{2\pi \cdot (r_2 - r_1)}{V_{tg}} = \frac{9 \cdot \mu}{V_{tg}^2 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D_{p,\min}^2} \cdot (r_2^2 - r_1^2)$$

donde  $(r_2^2 - r_1^2) = (r_2 - r_1) \cdot (r_2 + r_1)$

Luego: 
$$\frac{2\pi \cdot (r_2 - r_1)}{V_{tg}} = \frac{9 \cdot \mu}{V_{tg}^2 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D_{p,\min}^2} \cdot (r_2 - r_1) \cdot (r_2 + r_1)$$

Finalmente:  $D_{p,\min} =$

$$\sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot (r_2 - r_1)}{\pi \cdot N \cdot V_{tg} \cdot (\rho_p - \rho)}}$$

Si en lugar de considerar la sección total del flujo comprendido entre M2 y M1, considerándose sólo la parte correspondiente a una sección entre M2 y rx, donde rx es mayor r1, la partícula que sería totalmente eliminada

sería de un diámetro  $D_x$  menor que  $D_{p \min}$ ; en ese caso:

$$D_x = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu (r_2 - r_x)}{\pi \cdot N V_{tg} (\rho_p - \rho)}}$$

$$\text{Resulta } \frac{D_x}{D_{p \min}} = \frac{\sqrt{(r_2 - r_x)}}{\sqrt{(r_2 - r_1)}} = \sqrt{\frac{r_2 - r_x}{r_2 - r_1}}$$

$$\frac{D_x}{D_{p \min}} = \frac{r_2 - r_x}{r_2 - r_1}$$

$$\therefore \frac{D_x^2}{D_{p \min}^2} = \frac{r_2 - r_x}{r_2 - r_1}$$

(1)

Suponiendo una distribución uniforme de las partículas en la suspensión gaseosa, la masa de un determinado tamaño  $D_x$  que trata el ciclón en la unidad de tiempo:

$$M_{D_x} = Q \cdot C_{D_x} = B \cdot H \cdot V_{tg} \cdot C_{D_x} = (r_2 - r_1) \cdot H \cdot V_{tg} \cdot C_{D_x}$$

Donde:  $B \cdot H$  = Sección de entrada =  $(r_2 - r_1) \cdot H$

$V_{tg}$  = velocidad tangencial a la entrada

$C_{D_x}$  = concentración en masa de sólido de tamaño  $D_x$  por unidad de volumen de suspensión.

$Q$  = caudal

La masa de dicho tamaño retenido por el ciclón es:  $M_{D_x} = (r_2 - r_x) \cdot H \cdot V_{tg} \cdot C_{D_x}$

De acuerdo con la definición de rendimiento de la separación para un dado tamaño, éste será igual a:

$$\eta = \frac{M_{D_x}}{M_{D_x}} = \frac{r_2 - r_x}{r_2 - r_1}$$

Teniendo en cuenta la expresión (1) resulta:  $\eta = \frac{D_x^2}{D_{p \min}^2} \cdot 100$

(2)

Cuando el  $D_x$  es el diámetro de corte ( $D_c$ ) el rendimiento es del 50% (0.5), entonces:

$$(3) \quad \eta = \frac{D_x^2}{D_{p \min}^2} = 0.5 = \frac{1}{2}$$

$$D_c^2 = \frac{D_{p \min}^2}{2}$$

$$\text{Luego: } D_c = \frac{D_{\rho \min}}{\sqrt{2}} = D_c = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot (r_2 - r_1)}{2\pi \cdot N \cdot V_{tg} (\rho_p - \rho)}}$$

Si en (3) despejamos  $D_{\rho \min}$   
tenemos  $D_{\rho \min}^2 = 2D_c^2$

$$\text{Reemplazando en (2) resulta: } \eta = \frac{D_x^2}{2D_c^2} = \frac{1}{2} \frac{D_x}{D_c}^2$$

$$\log \eta = \log \frac{1}{2} + 2 \log \frac{D_x}{D_c}$$

la cual es una ecuación de una recta

Representando en coordenadas logarítmicas:

Cuando  $D_x / D_c = 1$ , resulta:  $\eta = 0,5$

La recta gruesa de la figura da el rendimiento teórico de la separación para cada tamaño.

En la práctica la recta se transforma en una curva como vemos en la figura siguiente (que es en coordenadas doble logarítmicas )

- Recta teórica
- Recta experiment

N suele ser aproximadamente 4, pero puede llegar a 10. Si se usa aleta de entrada, rearrastre es apreciable y N puede reducirse a 2 para una velocidad tangencial de 15 m/ seg a la entrada de aire a presión atmosférica.

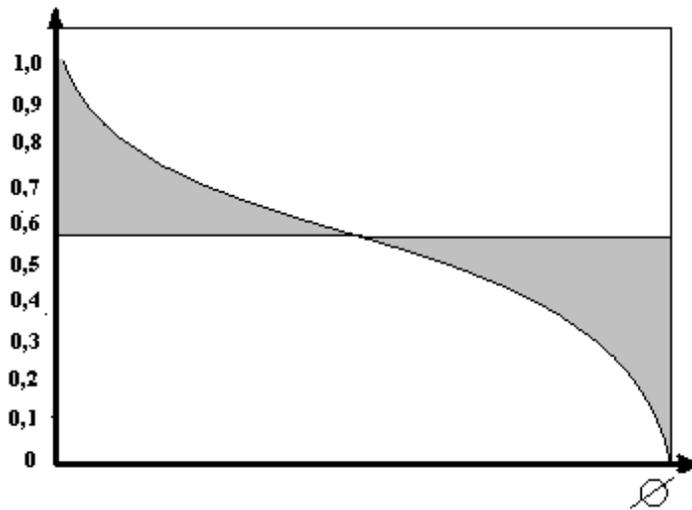
La figura vista de el rendimiento de la separación para un dado tamaño de partícula, pero los polvos o nieblas contienen partículas de variados tamaños. De allí que el rendimiento para cada tamaño prorratedos de acuerdo con la fracción de cada tamaño en la fase dispersa total.

Si se conoce la distribución de tamaños de las partículas (curva acumulativa) puede calcularse gráficamente el rendimiento total de la separación transportando los valores de  $\eta$  y de  $\Phi$

correspondientes al mismo tamaño de partículas, como ordenadas, y abscisas respectivamente, sobre papel gráfico aritmético como en la figura que sigue.

$\Phi$

es la masa acumulada para cada tamaño:



Se traza la ordenada media (que delimita las 2 partes sombreadas iguales) ella da el rendimiento total de la separación.

La ecuación del diámetro de corte tiene en cuenta la temperatura de trabajo por medio de la viscosidad, lo que significa que a una velocidad de entrada, un aumento de la temperatura (aumento de la viscosidad del gas) conduce a un tamaño de corte mayor, correspondiente a un rendimiento menor.

### **Factores para el diseño de un ciclón**

Se diseña para una determinada caída de presión. Trabajando aproximadamente a la presión atmosférica, se proyecta para una caída de presión que da una velocidad de entrada de entre 16 y 12 m/seg (normalmente 15 m/seg ).

De acuerdo al  $D_p$  min y con la ecuación del mismo se calcula  $D_c$  y con esta dimensión se obtienen las demás de acuerdo a las proporciones de las distintas partes del ciclón. Se utiliza para el tipo general de ciclón,  $N= 4$

Trabajando con una caída de presión fija, el aparato de menor diámetro tiene mejor rendimiento, porque la fuerza centrífuga es mayor, por eso suelen utilizarse los multiciclones (varios ciclones de pequeño diámetro en paralelo) pero el equipo es más complejo.

Suele proyectarse un solo ciclón para una determinada capacidad y solamente si el rendimiento de la separación es malo recién se recurre a varios en paralelo. El diseño final implica una transacción entre el rendimiento de la separación y la complejidad del equipo.

El multiciclón es construido con cuerpos de diámetro desde 5 a 30 cm.

Algunos emplean una entrada tangencial mientras que otros usan un anillo de paletas radiales en la parte superior (y por fuera de la chimenea) para impartir un movimiento de remolino a los gases que entran al cuerpo del ciclón. Este último sistema es una ventaja porque el gas y el polvo son uniformemente distribuidos alrededor de la circunferencia del tubo haciendo fluir el gas a través de un número de pequeñas entradas igualmente espaciadas. Esto permite trabajar con altas concentraciones de polvos y partículas grandes, porque el efecto de abrasión en las paredes de entrada es considerablemente menor, porque la corriente gaseosa es dividida en varios chorros pequeños y su ataque es menor que en el ciclón de una sola entrada tangencial.

Un multiciclón tiene una entrada común para todos los cicloncitos. Lo mismo ocurre con la salida del gas limpio.

El conjunto de pequeños ciclones en paralelo forma un solo cuerpo.

Un diseño común del multiciclón es el siguiente:

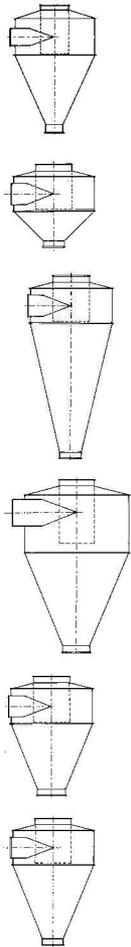
Un ciclón puede funcionar al lado de la aspiración o del lado de la impulsión del ventilador.

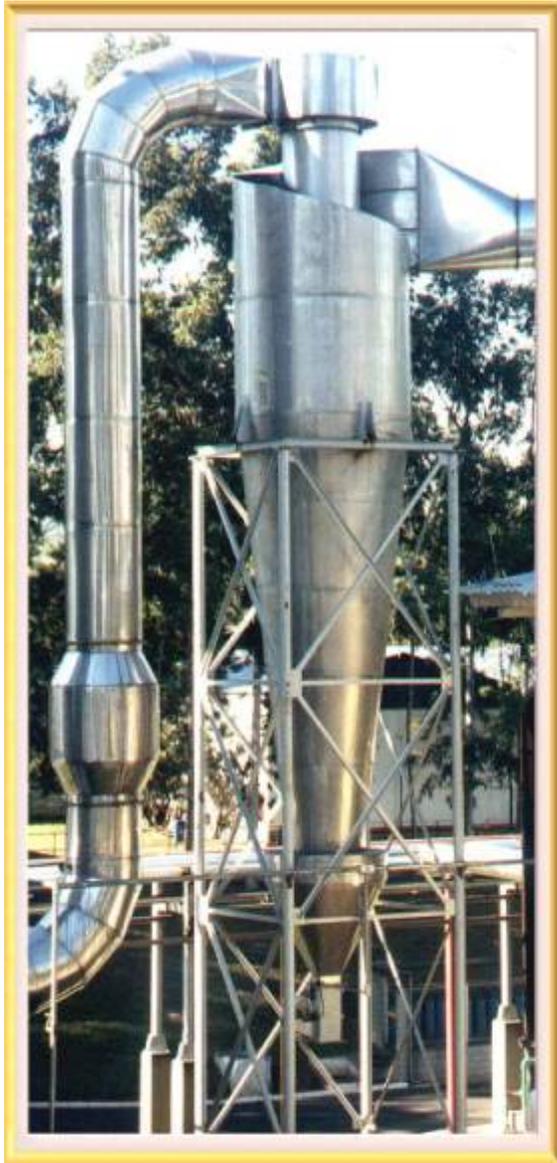
No debe haber infiltración del lado de la salida del polvo. Para un ciclón discontinuo puede usarse un receptor hermético. Para la extracción continua puede emplearse una

válvula rotativa de estrella, una de doble cierre o un transportador de tornillo sin fin (para polvos finos); para los colectores de líquido pulverizado se usa generalmente un tubo de cierre líquido a manera de tubo barométrico.

La capacidad de descarga debe ser lo suficiente para impedir que el material separado se acumule en el cono del ciclón.

### **Algunos modelos de ciclones**





0 1

K: es una constante

Bc: es el ancho de la entrada

Hc: es el alto de la entrada

De: es el diámetro de la chimenea

Fcv: es el número de carga de vel. En la entrada



-  
-  
-