
DISEÑO ÓPTIMO DE CICLONES¹

Carlos Alberto Echeverri Londoño*

Recibido: 06/04/2005

Aceptado: 22/08/2006

RESUMEN

Este artículo presenta los criterios generales para el diseño de ciclones en el control de partículas e introduce el concepto de velocidad de saltación como parámetro que controla el funcionamiento adecuado del ciclón.

Palabras clave: control de partículas, ciclones, equipos de control.

ABSTRACT

This article presents the general criteria for the cyclones design in the particle control and introduces the concept of speed of saltación like parameter that controls the suitable operation of the cyclone.

Key words: Particle control, cyclones, control equipment.

1 Este artículo está publicado en internet en la siguiente dirección: www.mailxmail.com/curso/vida/ciclones/capitulo8.htm

* Ingeniero Químico, Magíster en Ingeniería Ambiental. Profesor Universidad de Medellín. E-mail: cecheverri@udem.edu.co

INTRODUCCIÓN

El equipo de recolección de polvo que se usa con mayor frecuencia es el ciclón. Los ciclones remueven el material particulado de la corriente gaseosa, basándose en el principio de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga. La figura 1 muestra el movimiento de las partículas mayores hacia las paredes del ciclón debido a la fuerza centrífuga.

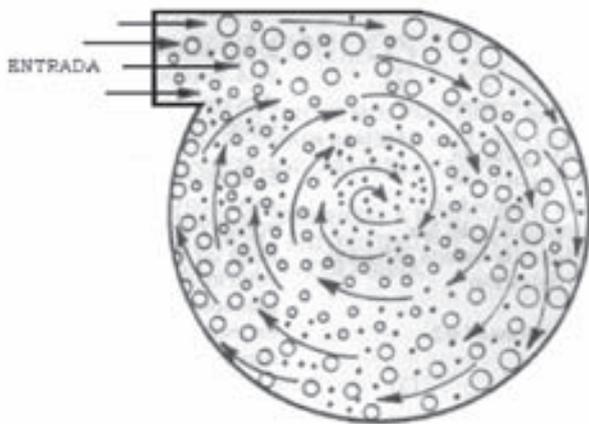


Figura 1. Mecanismos de colección de partículas en un ciclón

El ciclón es esencialmente una cámara de sedimentación en que la aceleración gravitacional se sustituye con la aceleración centrífuga.

Los ciclones constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de operación como de la inversión. Estos son básicamente construcciones simples que no cuentan con partes móviles, lo cual facilita las operaciones de mantenimiento; pueden ser hechos de una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas (que ascienden incluso a 1000 °C) y presiones de operación.

Los ciclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5 μm ; aunque partículas muchos más pequeñas, en ciertos casos, pueden ser separadas.

Los ciclones presentan eficiencias mayores que la cámara de sedimentación gravitacional, y eficiencias menores que los filtros de talegas, lavadores y precipitadores electrostáticos.

La fuerza centrífuga generada por los giros del gas dentro del ciclón puede ser mucho mayor que la fuerza gravitacional, ya que la fuerza centrífuga varía en magnitud dependiendo de la velocidad de giro del gas y del radio de giro.

Teóricamente el aumento de la velocidad de entrada al ciclón implicaría un aumento de la fuerza centrífuga y, por lo tanto, un aumento de la eficiencia; sin embargo, velocidades de entrada muy altas generan la resuspensión de material particulado de las paredes internas del ciclón, lo cual disminuye la eficiencia del ciclón; adicionalmente, aumentar la velocidad de entrada implica mayor consumo de energía.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En un ciclón, la trayectoria del gas comprende un doble vórtice, en donde el gas dibuja una espiral descendente en el lado externo, y ascendente, en el lado interno. Las figuras 2 y 3 ilustran dichos vórtices.

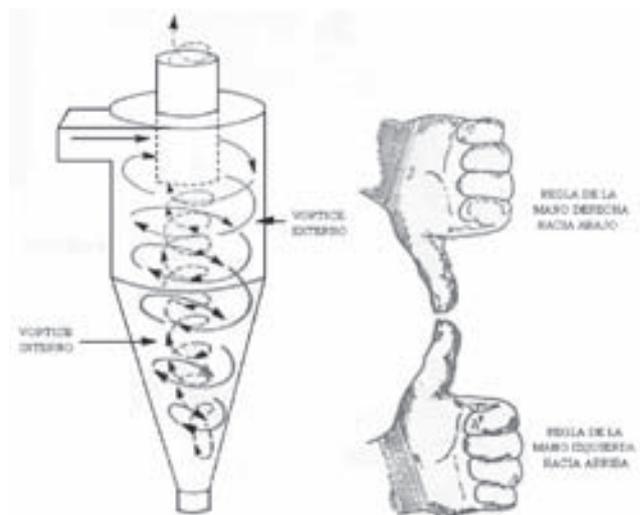


Figura 2. Vórtices en el ciclón

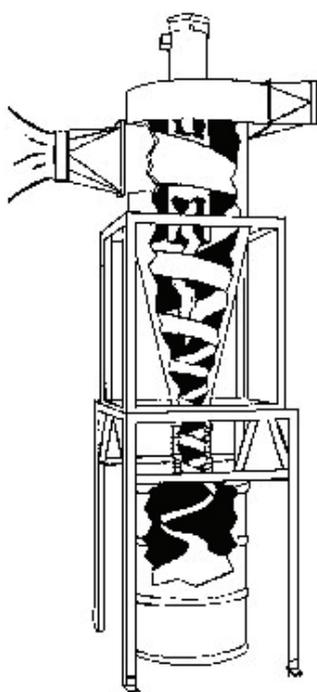


Figura 3. Vórtices en el ciclón

En un ciclón, el gas entra en la cámara superior tangencialmente y desciende en espirales hasta el ápice de la sección cónica; luego, asciende en un segundo espiral, con diámetro más pequeño, y sale por la parte superior a través de un ducto vertical centrado. Los sólidos se mueven radialmente hacia las paredes, se deslizan por las paredes, y son recogidos en la parte inferior.

El diseño apropiado de la sección cónica del ciclón obliga al cambio de dirección del vórtice descendente; el vórtice ascendente tiene un radio menor, lo que aumenta las velocidades tangenciales; en el cono se presenta la mayor colección de partículas, especialmente de las partículas pequeñas al reducirse el radio de giro.

FAMILIAS DE CICLONES

Los ciclones son un dispositivo de control de material particulado bastante estudiado, el diseño de un ciclón se basa normalmente en familias de ciclones que tienen proporciones definidas.

Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son: ciclones de alta eficiencia, ciclones convencionales y ciclones de alta capacidad.

Los márgenes de la eficiencia de remoción para los ciclones están con frecuencia basados en las tres familias de ciclones, es decir, convencional, alta eficiencia y alta capacidad. La tabla 1 presenta el intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones.

Tabla 1. Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones

Familia de ciclones	Eficiencia de remoción (%)		
	PST	PM10	PM2.5
Convencionales	70 - 90	30 - 90	0 - 40
Alta eficiencia	80 - 99	60 - 95	20 - 70
Alta capacidad	80 - 99	10 - 40	0 - 10

Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de $5 \mu\text{m}$ con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada.

Los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de $20 \mu\text{m}$, aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Se ha reportado que los multiciclones han alcanzado eficiencias de recolección de 80 a 95 % para partículas de $5 \mu\text{m}$.

Las tablas 2 a 4 presentan un resumen de las características de las principales familias de ciclones de entrada tangencial. La figura 4 identifica las principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial. El diámetro del ciclón identifica la dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones simplemente son una proporción del diámetro del ciclón.

Tabla 2. Características de los ciclones de alta eficiencia

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/Dc	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	698.65	585.71
Número cabezas de velocidad	NH	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N	5.5	6.0	5.5

Tabla 3. Características de los ciclones convencionales

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón			
		Lapple	Swift	Peterson-Whitby	Zenz
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.5	0.583	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.25	0.25	0.208	0.25
Altura de salida	S/Dc	0.625	0.6	0.583	0.75
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.5	0.5	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	2.0	1.75	1.333	2.0
Altura parte cónica	z/Dc	2.0	2.0	1.837	2.0
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.75	3.17	4.0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.25	0.4	0.5	0.25
Factor de configuración	G	402.88	381.79	342.29	425.41
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	8.0	7.76	8.0
Número de vórtices	N	6.0	5.5	3.9	6.0

Tabla 4. Características de los ciclones de alta capacidad.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón	
		Stairmand	Swift
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1.0	1.0
Altura de entrada	a/D_c	0.75	0.8
Ancho de entrada	b/D_c	0.375	0.35
Altura de salida	S/D_c	0.875	0.85
Diámetro de salida	D_s/D_c	0.75	0.75
Altura parte cilíndrica	h/D_c	1.5	1.7
Altura parte cónica	z/D_c	2.5	2.0
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0	3.7
Diámetro salida partículas	B/D_c	0.375	0.4
Factor de configuración	G	29.79	30.48
Número cabezas de velocidad	NH	8.0	7.96
Número de vórtices	N	3.7	3.4

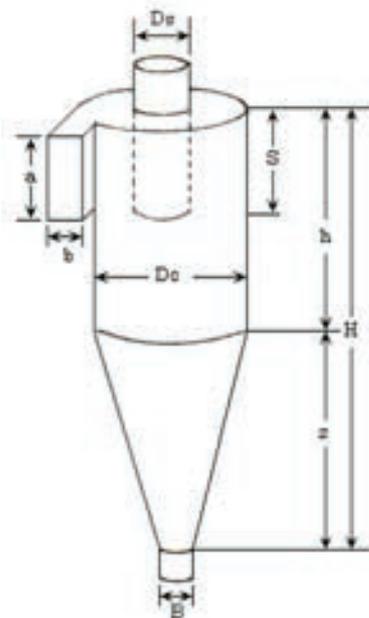


Figura 4. Dimensiones del ciclón

CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE COLECCIÓN

No existe un método teórico sencillo que permita el cálculo de la eficiencia (definido como el porcentaje de la masa de partículas entrante que es separado en el ciclón) de forma exacta. Esto es, en parte, debido a que, en la práctica, partículas

pequeñas que teóricamente deberían salir con el gas, debido a la aglomeración y al barrido y choque con partículas mayores, serán capturadas; mientras, partículas grandes que deberían ser retenidas rebotarán contra las paredes o serán capturadas por turbulencias, escapándose del ciclón.

Existen numerosas teorías sobre el cálculo de la eficiencia teórica de los ciclones, las cuales relacionan la eficiencia de colección y el tamaño de las partículas.

La figura 5 presenta una comparación gráfica de los resultados experimentales con las predicciones teóricas de eficiencia de colección en función del tamaño de las partículas.

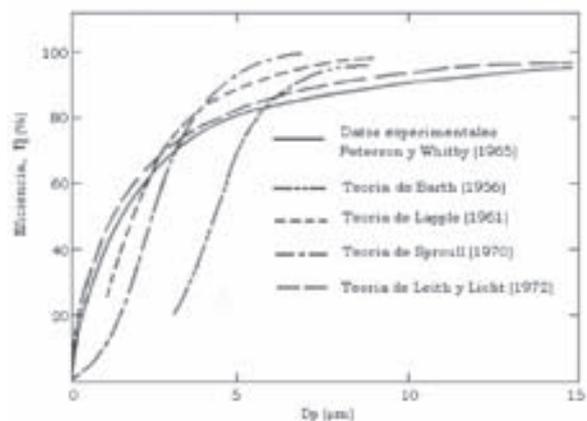


Figura 5. Eficiencia de colección del ciclón

La teoría de Leith y Licht es la que mejor se adapta al comportamiento experimental. Esta teoría predice las eficiencias de colección de material particulado, basándose en las propiedades físicas del material particulado y el gas de arrastre, y en las relaciones entre proporciones del ciclón.

La eficiencia fraccional por tamaño de partículas se calcula con la ecuación 1.

$$\eta_i = 1 - e^{-2 \times \left(\frac{G \times T_i \times Q \times (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}}} \quad (1)$$

En la cual:

η_i = Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño.

G = Factor de configuración del ciclón.

T_i = Tiempo de relajación para cada partícula, s.

Q = Caudal de gas, m³/s.

D_c = Diámetro del ciclón, m.

n = Exponente del vórtice del ciclón

El parámetro G esta relacionado con las proporciones del ciclón y T_i agrupa características del material particulado y del gas de arrastre.

La eficiencia total se calcula realizando la sumatoria del producto de las eficiencias fraccionales por la masa fraccional.

$$\eta_T = \sum \eta_i \times m_i \quad (2)$$

En la cual:

η_T = Eficiencia total

η_i = Eficiencia fraccional

m_i = Porcentaje másico, %.

Para utilizar las ecuaciones 1 y 2 se debe estar seguro de que el ciclón no presenta resuspensión, ya que el valor real de la eficiencia sería mucho menor al estimado por estas ecuaciones. La ecuación 1

es la eficiencia “al vacío” o sin carga de partículas y se debe corregir con la ecuación 23 cuando la concentración de partículas es mayor de 2 g/m³ a condiciones de referencia.

FACTOR DE CONFIGURACIÓN “G”

El factor de configuración resulta de relacionar algunas proporciones normalizadas por el diámetro del ciclón; la ecuación 3 nos presenta el factor de configuración.

$$G = \frac{8K_c}{(K_a \times K_b)^2} \quad (3)$$

En la cual:

K_c = Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón

K_a = Relación entre la altura de la entrada y el diámetro del ciclón (a/ D_c).

K_b = Relación entre al ancho de la entrada y el diámetro del ciclón (b/ D_c).

El factor de configuración G es común para cada familia de ciclones; las tablas 2 a 4 presentan el valor de G para las principales familias.

El factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón (K_c) se calcula con la ecuación 4.

$$K_c = \frac{\left(V_{sc} + \frac{V_R}{2} \right)}{D_c^3} \quad (4)$$

En la cual:

V_{sc} = Volumen evaluado sobre la salida del ciclón, m³.

V_R = Volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón (m³), siempre que se cumpla la siguiente condición:

$$L < H - S \quad (5)$$

En la cual:

L = Longitud natural del ciclón, m.

H = Altura total del ciclón, m.

S = Altura de la salida, m.

La longitud natural del ciclón corresponde a longitud necesaria para iniciar el vórtice ascendente, tomada desde la altura superior del ciclón; se puede calcular con la ecuación 6. La longitud natural del ciclón L es común para cada familia de ciclones.

$$L = 2.3 \times D_s \times \sqrt[3]{\frac{D_c^2}{a \times b}} \quad (6)$$

El volumen evaluado sobre la salida del ciclón (V_{sc}) se evalúa con la ecuación 7.

$$V_{sc} = \frac{\pi}{4} \times \left(S - \frac{a}{2} \right) \times (D_c^2 - D_s^2) \quad (7)$$

El volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural (V_R) se calcula con:

$$V_R = \frac{\pi}{4} \times D_c^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times D_c^2 \times (L + S - h) \times$$

$$\left[1 + \frac{K_L}{D_c} + \left(\frac{K_L}{D_c} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times D_s^2 \times L \quad (8)$$

En la cual K_L se denomina el factor de dimensiones lineales y se calcula con la ecuación 9.

$$K_L = D_c - (D_c - B) \times \left[\frac{S + L - h}{z} \right] \quad (9)$$

TIEMPO DE RELAJACIÓN “ T_i ”

El tiempo de relajación es el tiempo necesario para que una partícula alcance la velocidad terminal de caída; se evalúa con la ecuación 10.

$$T_i = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18\mu} \quad (10)$$

En la cual:

ρ_p = Densidad de la partícula, kg/m^3 .

D_{pi} = Diámetro de la partícula, m.

μ = Viscosidad del gas, kg/ms .

EXPONENTE DEL VÓRTICE “n”

El exponente del vórtice resulta de relacionar la velocidad tangencial y el radio de giro de un movimiento en forma de vórtice. Los análisis teóricos revelan que n debe ser igual a 1.0 en ausencia de fricción de pared (vórtice libre). No obstante, las mediciones reales señalan que n puede variar de 0.5 a 0.7 de acuerdo con el tamaño del ciclón y la temperatura; una ecuación empírica muy utilizada es la ecuación 11.

$$n = 1 - (1 - 0.67 \times D_c^{0.14}) \times \left[\frac{T}{283} \right]^{0.3} \quad (11)$$

En la cual:

n = Exponente del vórtice (valor adimensional).

D_c = Diámetro del ciclón, m.

T = Temperatura del gas, K.

NÚMERO DE GIROS

Otro modelo para estimar la eficiencia de remoción de partículas en los ciclones es la que se basa en el número de giros o vórtices externos que presenta la corriente gaseosa en el interior del ciclón. El número de giros o vórtices puede ser estimado de las dimensiones del ciclón, debido a que estos dependen de la altura de cada uno de los vórtices y la longitud del ciclón:

$$N = \frac{1}{a} \times \left[h + \frac{z}{2} \right] \quad (12)$$

El número de vórtices es común para cada familia de ciclones. Las tablas 2 a 4 presentan los valores de N para las principales familias de ciclones.

Asumiendo un flujo mezclado, la expresión que relaciona la eficiencia de remoción con los parámetros del ciclón y las condiciones de operación es:

$$\eta_i = 1 - e^{\left[\frac{-\pi \times N \times \rho_p \times D_p^2 \times V_i}{9 \times \mu \times b} \right]} \quad (13)$$

En la cual:

η_i = Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño.

Este modelo indica la fuerte dependencia que tiene la eficiencia con el diámetro de las partículas, el número de giros o vórtices y la velocidad de entrada.

Sin embargo, el modelo predice un valor finito para el diámetro de la partícula, arriba del cual la eficiencia de colección es 100% (tamaño crítico), mientras la evidencia experimental muestra que la eficiencia se aproxima asintóticamente con el incremento del diámetro de la partícula. El diámetro crítico de la partícula está dado por:

$$D_{p\text{critico}} = \sqrt{\frac{9 \times \mu \times b}{\pi \times N \times \rho_p \times V_i}} \quad (14)$$

La eficiencia obtenida por cualquiera de estos métodos (ecuaciones 1 y 13) es la eficiencia “al vacío”, es decir, la que se obtendría separando partículas aisladas. En la práctica, la interacción entre partículas hace que la eficiencia aumente con la concentración de partículas. Por lo tanto, las ecuaciones 1 y 13 son válidas solamente para concentraciones de partículas que se encuentran por debajo de 2.0 g/m^3 , medidos a condiciones de referencia. La eficiencia “corregida” puede obtenerse de la ecuación 22.

La eficiencia de colección de los ciclones varía en función del tamaño de la partícula y del diseño del ciclón. La eficiencia de ciclones generalmente, aumenta con:

- El tamaño de partícula y/o la densidad.
- La velocidad en el conducto de entrada.
- La longitud del cuerpo del ciclón.
- El número de revoluciones del gas en el ciclón.
- La proporción del diámetro del cuerpo del ciclón al diámetro del conducto de salida del gas.
- La concentración de las partículas.
- El pulimento de la superficie de la pared interior del ciclón.

La eficiencia del ciclón disminuirá con los aumentos en:

- La viscosidad del gas.
- El diámetro del cuerpo.
- El diámetro de la salida del gas.
- El área del conducto de entrada del gas.
- La densidad del gas.

Un factor común que contribuye a la disminución de eficiencias de control en los ciclones es el escape de aire en el conducto de salida del polvo.

VELOCIDAD DE SALTACIÓN

En los ciclones, la velocidad de entrada es un parámetro fundamental; velocidades muy bajas permiten la sedimentación de partículas y neutralizan el efecto de la fuerza centrífuga generando disminución en la eficiencia de colección; velocidades muy altas pueden resuspender partículas previamente colectadas, disminuyendo también la eficiencia. La experiencia indica que la velocidad

de entrada al ciclón debe situarse en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s.

Kalen y Zenz propusieron la existencia de una “velocidad de saltación” en el ciclón para explicar por qué la eficiencia de colección algunas veces descendía con incrementos en la velocidad de entrada. De lo anterior se puede observar que lo ideal es trabajar con velocidades de entrada lo suficientemente altas para aprovechar el efecto de la aceleración centrífuga, sin sobrepasar la velocidad que implica resuspensión del material ya colectado. La correlación semiempírica para la velocidad de saltación es:

$$V_s = \frac{4.913 \times W \times K_b^{0.4} \times D_C^{0.067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - K_b}} \quad (15)$$

En la cual:

V_s = Velocidad de saltación, m/s.

V_i = Velocidad de entrada del gas en el ciclón, m/s.

W = Velocidad equivalente, m/s.

La velocidad equivalente se evalúa a través de la siguiente ecuación.

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\rho_p - \rho)}{3 \times \rho^2}} \quad (16)$$

En la cual:

ρ_p = Densidad de la partícula, kg/m³.

ρ = Densidad del gas portador, kg/m³.

μ = Viscosidad del gas portador, kg/ms.

Por lo tanto, la velocidad de saltación es función de las propiedades de las partículas y del fluido, así como de las dimensiones del ciclón.

Kalen y Zenz desarrollaron correlaciones experimentales entre la relación velocidad de entrada/velocidad de saltación y la eficiencia del ciclón, encontrando lo siguiente:

- La máxima eficiencia de colección ocurre cuando la velocidad de entrada es 1.25 veces la velocidad de saltación.
- Cuando la velocidad de entrada es mayor a 1.35 veces la velocidad de saltación, se produce resuspensión del material ya capturado.

ESTIMATIVA DE LA CAÍDA DE PRESIÓN

La caída de presión es un parámetro importante debido a que relaciona directamente los costos de operación. La caída de presión en un ciclón puede deberse a las pérdidas a la entrada y salida, y pérdidas de energía cinética y fricción en el ciclón.

Las eficiencias de remoción en un ciclón se pueden aumentar al incrementar las velocidades de entrada, pero esto también incrementa las caídas de presión. A mayor pérdida de presión aumentan los requerimientos de potencia en el ventilador y, por lo tanto, mayor consumo de energía. Existen diferentes ecuaciones para calcular la pérdida de presión en un ciclón.

Las pérdidas de presión menores a 2488.16 pascales (10 in H₂O) son generalmente aceptadas.

Una de las ecuaciones para calcular la pérdida de presión en un ciclón es la desarrollada por Shepherd y Lapple.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times V_i^2 \times N_H \quad (17)$$

En la cual:

ΔP = Caída de presión en el ciclón, Pa.

ρ = Densidad del gas portador, kg/m³.

V_i = Velocidad de entrada del gas en el ciclón, m/s.

N_H = Número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón.

El número de cabezas de velocidad a la entrada del ciclón se puede hallar con la siguiente ecuación:

$$N_H = K \times \frac{a \times b}{D_s^2} \quad (18)$$

En la cual:

K = Constante, toma el valor de 16 para entrada tangencial.

El valor de N_H es común para cada familia de ciclones; las tablas 2 a 4 presentan los valores para cada familia de ciclones.

La pérdida de presión en un ciclón depende del cuadrado de la velocidad de entrada, por lo tanto, a mayor velocidad de entrada mayor pérdida de presión; lo anterior implica en la práctica el sacrificar un poco de eficiencia para disminuir los requerimientos de energía.

Aunque otras ecuaciones han sido formuladas a partir de consideraciones teóricas, se ha encontrado que generalmente no son tan precisas como la ecuación de Shepherd y Lapple, la cual es considerada como la más útil para calcular la caída de presión.

VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO

A menudo es necesario evaluar el funcionamiento de los ciclones cuando operan en condiciones fuera de diseño. La eficiencia de un determinado ciclón varía con las condiciones de trabajo. A continuación se presentan algunas expresiones que permiten predecir de forma aproximada dicha variación.

VARIACIÓN DEL CAUDAL: implica evidentemente un cambio en la velocidad de entrada al ciclón. Si no se dispone de datos experimentales, para variaciones poco importantes del caudal, la nueva eficiencia puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^{0.5} \quad (19)$$

VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL GAS: el cambio en la eficiencia debido a cambios en la viscosidad del gas puede estimarse mediante la expresión:

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[\frac{\mu_1}{\mu_2} \right]^{0.5} \quad (20)$$

Las variaciones en la viscosidad se deben principalmente a cambios de temperatura, ya que los cambios de presión no afectan de manera significativa la viscosidad.

Un incremento en la temperatura del gas tiene dos efectos principales: se incrementa tanto el caudal de gas como su viscosidad. Por lo tanto, el efecto total, es el producto de los efectos individuales.

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^{0.5} \left[\frac{\mu_1}{\mu_2} \right]^{0.5} \quad (21)$$

VARIACIÓN EN LA DENSIDAD DEL GAS: el cambio en la eficiencia debido a cambios en la densidad del gas puede estimarse mediante la expresión:

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[\frac{\rho_p - \rho_2}{\rho_p - \rho_1} \right]^{0.5} \quad (22)$$

VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS: si aumenta la concentración de partículas crecerá la eficiencia de captación; de forma aproximada:

$$\frac{100-\eta_1}{100-\eta_2} = \left[\frac{C_2}{C_1} \right]^{0.182} \quad (23)$$

Esta ecuación es necesaria para corregir la eficiencia estimada con las ecuaciones 1 y 13 cuando la concentración de partículas sea superior a 2.0 g/m³ medido a condiciones de referencia. En este caso η_1 será la eficiencia hallada con las ecuaciones 1 ó 13 y C_1 toma el valor de 2.0 g/m³, y η_2 será la nueva eficiencia para una concentración de partículas C_2 a condiciones de referencia mayor de 2.0 g/m³.

DISEÑO DE CICLONES

Los ciclones se diseñan habitualmente de tal modo que se satisfagan ciertas limitaciones bien definidas de caída de presión. Para instalaciones ordinarias que operan más o menos a la presión atmosférica, las limitaciones del ventilador dictaminan, casi siempre, una caída de presión máxima permisible correspondiente a una velocidad de entrada al ciclón dentro del intervalo de 15.2 a 27.4 m/s. Por consiguiente, los ciclones se suelen diseñar para una velocidad de entrada de 22 m/s, aunque no es necesario apearse estrictamente a este valor.

En la separación de partículas, la eficiencia de recolección puede cambiar sólo en una cantidad relativamente pequeña mediante una variación en las condiciones operacionales. El factor de diseño primario que se utiliza para controlar la eficiencia de recolección es el diámetro del ciclón. Un ciclón de diámetro más pequeño que funciona a una caída de presión fija alcanza la eficiencia más alta. Sin embargo, los ciclones de diámetro pequeño requieren varias unidades en paralelo para lograr una capacidad especificada. En tales casos, los ciclones individuales descargan el polvo en una tolva receptora común (figura 6). El diseño final implica llegar a un término medio entre la eficiencia de recolección y la complejidad del equipo. Se acostumbra diseñar un solo ciclón para una capacidad particular, recurriendo a varias unidades en paralelo sólo cuando la eficiencia de recolección prevista es inadecuada para una sola unidad.

Los ciclones en serie se justifican en aquellos casos en que el polvo tiene las siguientes propiedades:

- Cuando tiene una distribución amplia de tamaños, incluyendo una porción importante de partículas más finas que 15 μm , en cuyo caso se utiliza un solo ciclón de diámetro grande para recoger la fracción de partículas gruesas y reducir la carga para una unidad con un diámetro más pequeño.
- Cuando tiene una tendencia marcada a floccularse en el equipo que precede a los ciclones, al igual que en estos mismos.

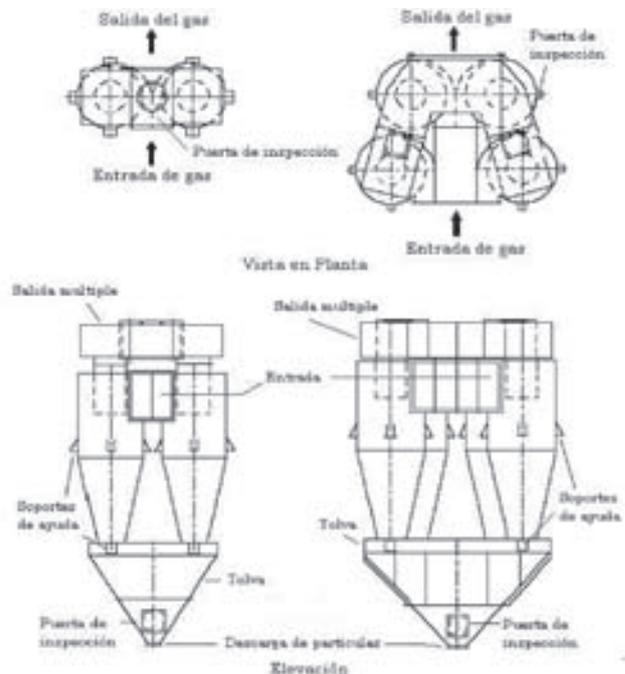


Figura 6. Multiciclones

Cuando se reduce el diámetro del ducto de salida del gas se incrementa tanto la eficiencia de recolección como la caída de presión. Al aumentar la longitud del ciclón, casi siempre se observa un incremento en la eficiencia de recolección.

Un ciclón operará bien, si el receptor de polvo es hermético. Es probable que la causa individual más importante para un funcionamiento deficiente del ciclón sea la fuga de aire hacia la salida de polvo del mismo. Una fuga ligera de aire en este

punto provocará una reducción muy notable en la eficiencia de recolección, sobre todo, cuando se trata de polvos finos.

En la parte inferior del cono se coloca generalmente una tolva para recibir el material particulado colectado; la tolva debe tener el volumen suficiente que evite la apertura frecuente del dispositivo de descarga, ya que la entrada de aire por la parte inferior del ciclón puede generar resuspensión de material colectado.

Para la extracción continua del polvo recolectado se acostumbra usar una válvula rotatoria de estrella, una válvula de doble cierre, compuertas deslizantes manuales, tornillos sin fin y válvulas de contrapeso. En la figura 7 se observan algunos de estos dispositivos.

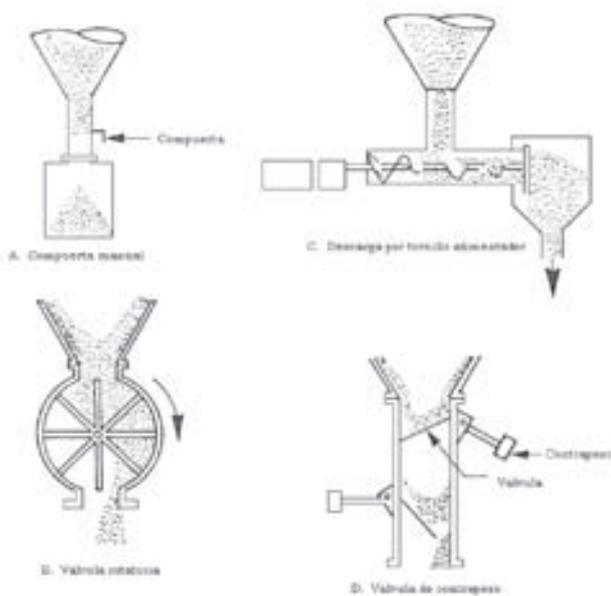


Figura 7. Sistemas de descarga en un ciclón

En cualquier caso, es esencial proporcionar la suficiente capacidad de descarga y recepción para evitar que el material recogido se acumule dentro del ciclón.

Las siguientes son algunas de las características que debe cumplir la corriente de emisión para utilizar ciclones:

- a) Caudal de aire: los caudales típicos de gas para unidades de un solo ciclón son de 0.5 a 12 m³/s a condiciones de referencia. Los caudales en la parte alta de este intervalo y mayores (hasta aproximadamente 50 m³/s) utilizan multiciclones. Hay ciclones que se emplean en aplicaciones especializadas, las cuales tienen flujos desde 0.0005 hasta 30 m³/s.
- b) Temperatura: las temperaturas del gas de entrada están limitadas únicamente por los materiales de construcción de los ciclones y han sido operados a temperaturas tan altas como 540°C.
- c) Concentración de partículas: las concentraciones típicas de partículas en el gas van de 2.0 a 230 g/m³ a condiciones de referencia. En aplicaciones especializadas, estas cargas pueden ser tan altas como 16.000 g/m³ y tan bajas como 1.0 g/m³.

El procedimiento general de diseño es el siguiente:

- Seleccionar el tipo de ciclón, dependiendo del funcionamiento o necesidades requeridas.
- Obtener un estimativo de la distribución de tamaño de las partículas en la corriente gaseosa a ser tratada.
- Calcular el diámetro del ciclón para una velocidad de entrada de 22 m/s (opcional), y determinar las otras dimensiones del ciclón con las relaciones establecidas para las familias de ciclones con base en el diámetro (tablas 2 a 4).
- Estimar el número de ciclones necesarios para trabajar en paralelo.
- Calcular la eficiencia del ciclón y, si se requiere, seleccionar otro tipo de ciclón.
- Calcular la caída de presión del ciclón y, si se requiere, seleccionar otro tipo de ciclón.

- Calcular el costo del sistema y optimizar para hacer el mejor uso de la caída de presión disponible o, si se requiere, para dar el más bajo costo de operación.

Los ciclones generalmente tienen como parámetros de diseño el diámetro del ciclón, la caída de presión y la velocidad de entrada y velocidad de saltación (tabla 5):

Tabla 5. Parámetros de diseño para los ciclones e entrada tangencial

Parámetro	Valor
Diámetro del ciclón (D_C)	< 1.0 m
Caída de presión	< 2488.16 Pa
Relación de velocidades (V_i/V_S)	< 1.35
Velocidad de entrada	15.2 - 27.4 m/s

Ejemplo 1. Diseñar un ciclón para separar sólidos de una corriente gaseosa. La densidad de la partícula es de 1500 kg/m^3 y el gas es aire a $450 \text{ }^\circ\text{C}$. El caudal de la corriente es $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$, y la operación es a una presión de 85.3 kPa . La concentración de las partículas es de 2.0 g/m^3 y, según las normas de emisión, se requiere una eficiencia de separación del 80%. La distribución de tamaño de las partículas en la corriente gaseosa es la siguiente (tabla 6):

Tabla 6. Distribución de tamaño de las partículas

Tamaño (μm)	% másico
5 - 10	45
10 - 30	25
30 - 50	15
50 - 70	10
70 - 100	5

Desarrollo: el procedimiento general de diseño es el siguiente:

- Selección del tipo de ciclón: como el 45% de las partículas está por debajo de $10 \mu\text{m}$, se requiere un ciclón de alta eficiencia. Por lo tanto, seleccionamos un ciclón de la familia de ciclones de alta eficiencia (tabla 2). Seleccionamos un ciclón Stairmand.

- Cálculo del diámetro del ciclón: para calcular el diámetro del ciclón se selecciona una velocidad de entrada que está en el intervalo de 15.2 a 27.4 m/s. Para este caso seleccionamos una velocidad de entrada de 22 m/s. Con este valor se puede determinar el diámetro del ciclón y las otras dimensiones con base en las relaciones establecidas para las familias de ciclones (tabla 2).

Área del ducto de entrada:

$$\text{Área} = \frac{Q}{V_i} = \frac{3.2}{22} = 0.145 \text{ m}^2$$

Área del ducto de entrada = $a \times b$

Para un ciclón Stairmand (Tabla 2):

Altura de entrada al ciclón (a): $a = 0.5 D_C$

Ancho de entrada al ciclón (b): $b = 0.2 D_C$
 $a \times b = 0.5 D_C \times 0.2 D_C = 0.145 \text{ m}^2$

Entonces: $D_C = \sqrt[2]{\frac{0.145}{0.5 \times 0.2}} = 1.21 \text{ m}$

Las otras dimensiones se hallan con base en las proporciones propuestas:

Altura de entrada al ciclón (a): $a = 0.5 D_C$
 $a = 0.5 \times 1.21 = 0.60 \text{ m}$

Ancho de entrada al ciclón (b): $b = 0.2 D_C$
 $b = 0.2 \times 1.21 = 0.24 \text{ m}$

Altura de salida del ciclón (S): $S = 0.5 D_C$
 $S = 0.5 \times 1.21 = 0.60 \text{ m}$

Diámetro de salida del ciclón (D_s): $D_s = 0.5 D_C$
 $D_s = 0.5 \times 1.21 = 0.60 \text{ m}$

Altura parte cilíndrica del ciclón (h): $h = 1.5 D_C$
 $h = 1.5 \times 1.21 = 1.81 \text{ m}$

Altura total del ciclón (H): $H = 4.0 D_C$
 $H = 4.0 \times 1.21 = 4.84 \text{ m}$

Altura parte cónica del ciclón (z): $z = 2.5 D_C$
 $z = 2.5 \times 1.21 = 3.02 \text{ m}$

Diámetro salida del polvo (B): $B = 0.375 D_c$
 $B = 0.375 \times 1.21 = 0.45 \text{ m}$

- Estimación del número de ciclones necesarios para trabajar en paralelo: aunque $D_c > 1.0 \text{ m}$, solo se requiere un ciclón simple, ya que el valor del diámetro del ciclón está relativamente cercano a 1.0 m . Este parámetro de diseño es una recomendación, mas no una imposición en el momento de diseñar.

Por otro lado, algunos autores recomiendan que para caudales entre 0.5 y $12 \text{ m}^3/\text{s}$ a condiciones de referencia se utilice un solo ciclón.

- Cálculo de la eficiencia del ciclón: para calcular la eficiencia del ciclón se requiere calcular primero si hay o no resuspensión, ya que de presentarse resuspensión en el ciclón, la ecuación de Leith y Licht estaría sobrestimando la eficiencia del ciclón.

Para hallar la relación de velocidades se requiere primero estimar la velocidad equivalente y luego la velocidad de saltación.

- Velocidad equivalente (ecuación 16):

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times g \times \mu \times (\rho_p - \rho)}{3 \times \rho^2}}$$

Suponiendo que la corriente gaseosa es aire, éstas son las propiedades del aire a $450 \text{ }^\circ\text{C}$ y 85.3 kPa :

$$\rho = 0.411 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 3.57 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$$

$$W = \sqrt[3]{\frac{4 \times 9.8 \times 3.57 \times 10^{-5} \times (1500 - 0.411)}{3 \times 0.411^2}} = 1.61 \text{ m/s}$$

- Velocidad de saltación (ecuación 15):

$$V_s = \frac{4.913 \times W \times K_b^{0.4} \times D_c^{0.067} \times \sqrt[3]{V_i^2}}{\sqrt[3]{1 - K_b}}$$

$$V_s = \frac{4.913 \times 1.61 \times 0.2^{0.4} \times 1.21^{0.067} \times \sqrt[3]{22^2}}{\sqrt[3]{1 - 0.2}} = 35.55 \text{ m/s}$$

- Relación entre velocidades:

$$\frac{V_i}{V_s} = \frac{22}{35.55} = 0.62$$

Como $\frac{V_i}{V_s} < 1.35$, No hay resuspensión del material particulado

Como ya estamos seguros de que no hay resuspensión de las partículas, procedemos a calcular la eficiencia del ciclón. Para ello se necesita determinar el factor de configuración (ecuación 3), el tiempo de relajación (ecuación 10) y el exponente de vórtice (ecuación 11).

Cuando tenemos un ciclón de una familia de ciclones estandarizados, el factor de configuración G es común para cada familia de ciclones y puede leerse de las tablas 1 a 3. Aunque tenemos un ciclón Stairmand que tiene un factor de configuración de 551.22 , se hará todo el procedimiento necesario para hallarlo.

- Volumen del ciclón evaluado sobre la salida (ecuación 7):

$$V_{SC} = \frac{\pi}{4} \times \left(S - \frac{a}{2} \right) \times (D_c^2 - D_s^2)$$

$$V_{SC} = \frac{\pi}{4} \times \left(0.60 - \frac{0.60}{2} \right) \times (1.21^2 - 0.60^2) = 0.258 \text{ m}^3$$

- Longitud natural del ciclón (ecuación 6):

$$L = 2.3 \times D_s \times \sqrt[3]{\frac{D_c^2}{a \times b}}$$

$$L = 2.3 \times 0.6 \times \sqrt[3]{\frac{1.21^2}{0.6 \times 0.24}} = 2.99 \text{ m}$$

Condición: $L < H - S$

$$2.99 \text{ m} < 4.84 \text{ m} - 0.60 \text{ m}$$

$$2.99 \text{ m} < 4.24 \text{ m}$$

Ya que cumple la condición, calculamos el volumen evaluado sobre la longitud natural del ciclón

- Factor de dimensiones lineales (ecuación 9):

$$K_L = D_C - (D_C - B) \times \left[\frac{S + L - h}{z} \right]$$

$$K_L = 1.21 - (1.21 - 0.45) \times \left[\frac{0.60 + 2.99 - 1.81}{3.02} \right] = 0.76 \text{ m}$$

- Volumen del ciclón evaluado sobre la longitud natural (ecuación 8):

$$V_R = \frac{\pi}{4} \times D_C^2 \times (h - S) + \frac{\pi}{12} \times D_C^2 \times (L + S - h) \times \left[1 + \frac{K_L}{D_C} + \left(\frac{K_L}{D_C} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times D_S^2 \times L$$

$$V_R = \frac{\pi}{4} \times 1.21^2 \times (1.81 - 0.60) + \frac{\pi}{12} \times 1.21^2 \times (2.99 + 0.60 - 1.81) \times \left[1 + \frac{0.76}{1.21} + \left(\frac{0.76}{1.21} \right)^2 \right] - \frac{\pi}{4} \times 0.60^2 \times 2.99 = 1.90 \text{ m}^3$$

- Factor dimensional de las proporciones volumétricas del ciclón (ecuación 4):
- Exponente de vórtice (ecuación 11):

$$K_C = \frac{\left(V_{SC} + \frac{V_R}{2} \right)}{D_C^3}$$

$$K_C = \frac{\left(0.258 + \frac{1.90}{2} \right)}{1.21^3} = 0.689 \text{ m}^3$$

$$n = 1 - \left(1 - 0.67 \times D_C^{0.14} \right) \left[\frac{T}{283} \right]^{0.3}$$

$$n = 1 - \left(1 - 0.67 \times 1.21^{0.14} \right) \left[\frac{723}{283} \right]^{0.3} = 0.586$$

- Relación entre la altura de entrada y el diámetro del ciclón:

$$K_a = \frac{a}{D_C} = \frac{0.60}{1.21} = 0.5$$

- Relación entre la base de entrada y el diámetro del ciclón:

$$K_b = \frac{b}{D_C} = \frac{0.24}{1.21} = 0.2$$

- Factor de configuración (ecuación 3):

$$G = \frac{8K_C}{(K_a \times K_b)^2}$$

$$G = \frac{8 \times 0.689}{(0.5 \times 0.2)^2} = 551.22$$

- Tiempo de relajación (ecuación 10):

$$T_i = \frac{\rho_p \times D_{pi}^2}{18\mu}$$

Para una partícula con $D_{pi} = 7.5 \mu\text{m}$ ($7.5 \times 10^{-7} \text{ m}$), tenemos:

$$T_i = \frac{1500 \times (7.5^{-7})^2}{18 \times 3.57^{-5}} = 1.30^{-4} \text{ s}$$

Los tiempos de relajación para los demás tamaños de partículas se reportan en la tabla 7.

- Eficiencia fraccional por intervalos de tamaño:

Como la concentración de las partículas es de 2 g/m^3 , la ecuación 1 se puede utilizar sin tener que corregirla con la ecuación 22.

$$\eta_i = 1 - e \left[-2 \times \left(\frac{G \times T_i \times Q \times (n+1)}{D_c^3} \right)^{\frac{0.5}{(n+1)}} \right]$$

Para una partícula con $D_{pi} = 7.5 \mu\text{m}$ (7.5×10^{-7} m), tenemos:

$$\eta_i = 1 - e \left[-2 \times \left(\frac{551.22 \times 1.30^{-4} \times 3.2 \times (0.586+1)}{1.21^3} \right)^{\frac{0.5}{(0.586+1)}} \right] = 0.705$$

Las eficiencias fraccionales por intervalos de tamaño para los demás tamaños de partículas se reportan en la tabla 6.

- Eficiencia total (ecuación 2):

$$\eta_T = \sum \eta_i \times m_i$$

La eficiencia total se reporta en la tabla 7.

Tabla 7. Cálculo de la eficiencia para el ejemplo 1

Tamaño (μm)	m_i	D_p (μm)	D_p (m)	T_i (s)	n_i	$n_i \times m_i$
5	10	45	7.5×10^{-6}	1.3×10^{-4}	0.705	31.7
10	30	25	2.0×10^{-5}	9.3×10^{-4}	0.896	22.4
30	50	15	4.0×10^{-5}	3.7×10^{-3}	0.970	14.6
50	70	10	6.0×10^{-5}	8.4×10^{-3}	0.989	9.9
70	100	5	8.5×10^{-5}	1.7×10^{-2}	0.996	5.0
Eficiencia total						83.6

- Calcular la caída de presión del ciclón y si se requiere, seleccionar otro tipo de ciclón.
- Número de cabezas de velocidad (ecuación 18):

$$N_H = K \times \frac{a \times b}{D_s^2}$$

$$N_H = 16 \times \frac{0.6 \times 0.24}{0.6^2} = 6.4$$

- Caída de presión (ecuación 17):

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times V_i^2 \times N_H$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times 0.411 \times 22^2 \times 6.4 = 635.8 \text{ Pa}$$

RECIRCULACIÓN DEL GAS

La recirculación del gas de una parte de los gases de salida permite incrementar la eficiencia de captación de un ciclón; sin embargo, el aumento de caudal del gas en el interior del aparato implica un mayor tamaño del mismo y una mayor pérdida de presión. La recirculación puede ser, por lo tanto, interesante en determinados casos en los que sea importante aumentar la eficiencia (para prescindir de una segunda etapa de captación, por ejemplo) o bien cuando quiere mantenerse una determinada velocidad de operación pese a una variación del caudal a tratar (mayor flexibilidad).

El efecto de la recirculación puede calcularse con algunas de las ecuaciones anteriores (1, 19 y con la 22), así como con la ecuación 24:

$$Q_e = (1+r) \times Q \tag{24}$$

La eficiencia global de la corriente puede calcularse, para cada intervalo de tamaño, a partir de η_i :

$$\frac{E_i}{\eta_i} = \frac{1+r}{1+r \times \eta_i} \tag{25}$$

En la cual:

E_i = Eficiencia fraccional global del ciclón por intervalos de tamaños.

La eficiencia total sería:

$$E = \sum E_i \times m_i \tag{26}$$

VENTAJAS DE LOS CICLONES

Las ventajas de los ciclones incluyen las siguientes:

- a) Bajos costos de capital.

- b) Falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación.
- c) Caída de presión relativamente baja, comparada con la cantidad de partículas removidas.
- d) Las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción.
- e) Colección y disposición en seco.
- f) Requisitos espaciales relativamente pequeños.

DESVENTAJAS DE LOS CICLONES

Las desventajas de los ciclones incluyen las siguientes:

- a) Eficiencias de recolección de partículas suspendidas totales relativamente bajas, particularmente para partículas menores de 10 μm .
- b) No pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes.
- c) Las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión.

BIBLIOGRAFÍA

- AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION. 1999. Air pollution engineering manual. Van Nostrand Reinhold. New York.
- BENÍTEZ, J. 1993. Process engineering and design for air pollution control. Prentice Hall. New Jersey.
- CASAL, J. & MARTÍNEZ-BENET, J. 1989. Cálculo y diseño de ciclones. En: Ingeniería Química. Madrid.
- COOPER, D. & ALLEY, F. 2002. Air pollution control. New Jersey: Waveland Press.
- CORBITT, R. 1990. Standards handbook of environmental engineering. Mc Graw-Hill. New York.
- DE NEVERS, N. 1997 Ingeniería de control de la contaminación del aire. Mc Graw-Hill. México.
- FOX, D., TURNER, D. & BOUBEL, R. 1994. Fundamentals of air pollution. Academic Press. San Diego.
- PÉREZ, F., RAMÍREZ, D. & RAMÍREZ, J. 1994. Diseño óptimo de colectores ciclónicos. Revista Ainsa. Numero 26, Medellín.
- PERRY, R. & CHILTON, C. 1986. Manual del Ingeniero Químico. vol. 5, McGraw-Hill. México, D. F.
- ROBERTS ALLEY & ASSOCIATES, INC. 2001. Manual de control de la calidad del aire. Mc Graw-Hill. México.
- SINNOTT, R. 1983. Chemical engineering, an introduction to chemical engineering design. Pergamon press. vol. 6, USA.
- WARK, K. & WARNER, C. 1996. Contaminación del aire. Limusa. México.