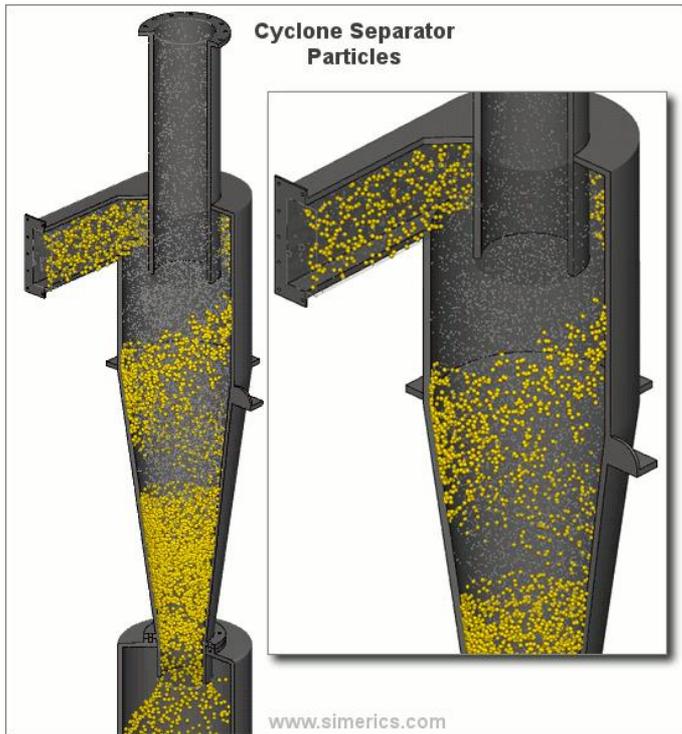


# Operaciones Unitarias 1

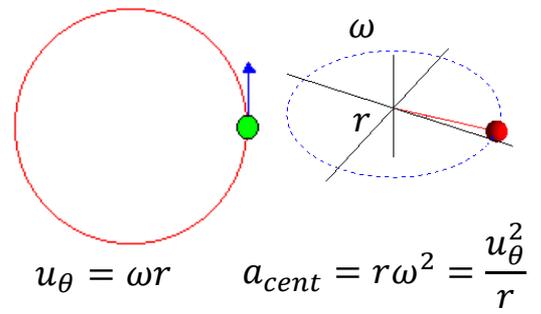


Separación centrífuga sólido - fluido

**Operaciones de separación sólido – fluido; bajo campo centrífugo;** Ciclones e Hidrociclones (pared fija); centrifuga pared móvil

$$\frac{du}{d\theta} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) r \omega^2 - \frac{C_D \rho v_t^2 A_p}{2m_p} \Rightarrow 0 = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) r \omega^2 - \frac{C_D \rho v_t^2 A_p}{2m_p}$$

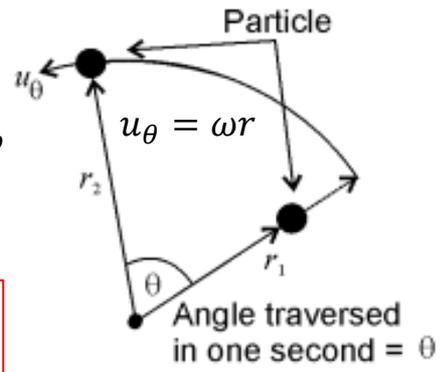
donde  $u_\theta$  es la velocidad tangencial,  $\omega$  es la velocidad angular ( $s^{-1}$ );  $r$  es el radio;  $rpm = 2\pi\omega$ . La "gravedad centrífuga"  $G = a_{cent} = r\omega^2$



Las fuerzas centrífugas y de arrastre se encuentran en direcciones opuestas, en la dirección del radio ; por lo tanto,  $v_t$  está en la dirección de  $r$ .

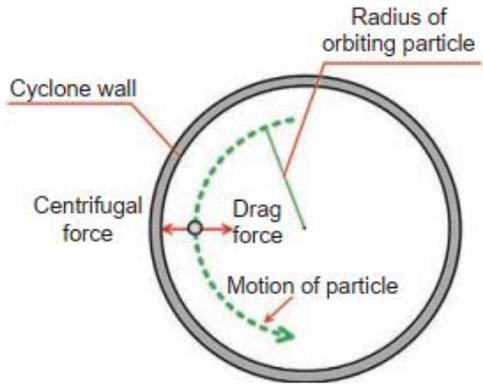
Se considera que la partícula es **esférica**, y el **régimen es de Stokes**, debido a los pequeños  $D_p$

$$m_p = \rho_p \frac{\pi D_p^3}{6} \quad A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad C_D = 24 \frac{\mu}{\rho v_t D_p} \Rightarrow \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) r \omega^2 = \frac{18\mu}{D_p^2 \rho_p} v_{t,r} \Rightarrow (\rho_p - \rho) r \omega^2 = \frac{18\mu}{D_p^2} v_{t,r} \Rightarrow v_{t,r} = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho) r \omega^2}{18\mu}$$



$$(\rho_p - \rho) \frac{u_\theta^2}{r} = \frac{18\mu}{D_p^2} v_{t,r} \Rightarrow D_p^2 = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho)} \left(\frac{r}{u_\theta^2}\right) v_{t,r}$$

$v_{t,r}$  no es constante, depende de su posición radial; a mayor radio, mayor velocidad, por lo que la partícula acelera a lo largo de su trayectoria radial

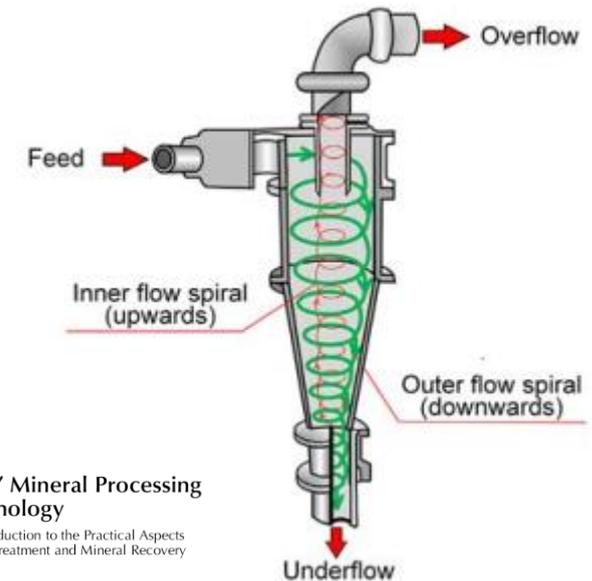
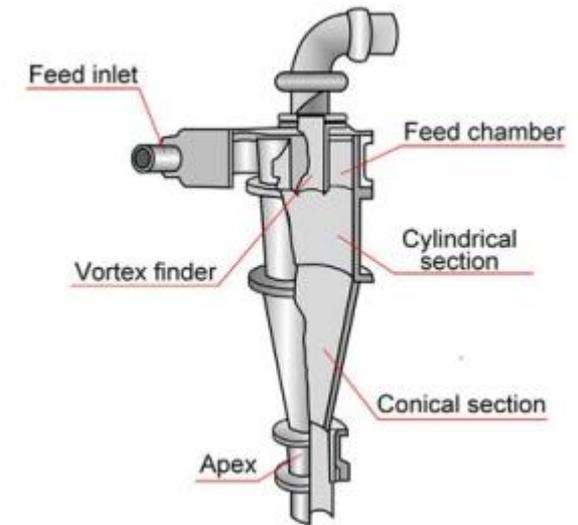


En cada posición  $r$ , corresponde  $u_\theta(r)$ ; en los radios menores estarán las partículas pequeñas; en los radios mayores estarán las partículas grandes.

## Hidrociclones y Ciclones de Flujo Inverso (FI)

Consiste en un recipiente de forma cónica, abierto en su *apex* (*underflow*), unido a una sección cilíndrica, que tiene una entrada de alimentación tangencial. En la parte superior hay un ducto de *overflow* montado axialmente. El ducto se extiende en el cuerpo del ciclón por una sección corta y extraíble conocido como el *vortex finder* (captador de vortice). Esta sección obliga a la alimentación a viajar hacia abajo, evitando el cortocircuito con el *overflow*.

La alimentación se introduce a través de la entrada tangencial, con un movimiento de remolino. Las partículas en el patrón de flujo están sujetas a una fuerza centrífuga que actúa hacia afuera y una de arrastre que actúa hacia adentro. El balance de estas fuerzas determina distintas  $v_{t,r}$  separándose según el tamaño, densidad y forma. Las partículas con mayor  $v_{t,r}$  se mueven hacia la pared del y migran hacia el apex; las partículas de menor  $v_{t,r}$  se mueven a lo largo del eje y escurren hacia arriba a través del *vortex finder* hasta el overflow



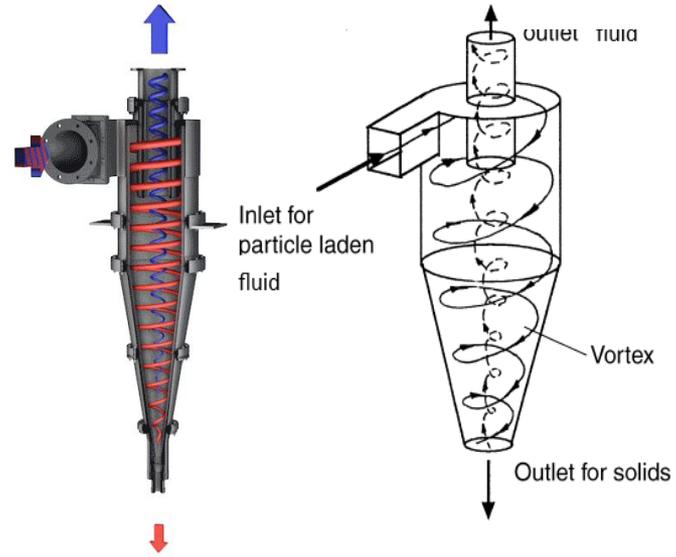
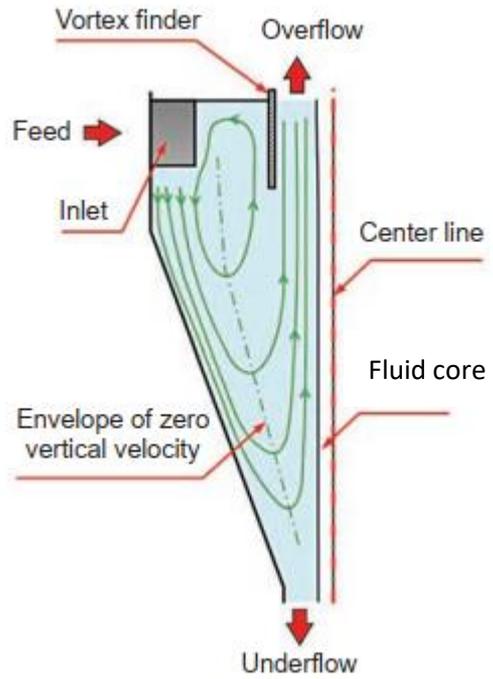
Wills' Mineral Processing  
Technology  
An Introduction to the Practical Aspects  
of Ore Treatment and Mineral Recovery

# Operaciones de separación sólido – fluido; Separación fluido- sólido Hidrociclones y Ciclones de flujo inverso (FI)

La existencia de una región externa de flujo descendente y una región interna de flujo ascendente implican una trayectoria (*envelope*) en la que no hay velocidad vertical. Las partículas ubicadas fuera de ésta, por la mayor fuerza centrífuga, salen por el underflow, mientras que las partículas barridas hacia el centro por la mayor fuerza de arrastre salen en el overflow. Las partículas que se encuentran en la *envelope* son manejadas por fuerzas centrífugas y de arrastre iguales y tienen la misma probabilidad de salir por el underflow o el overflow. El fenómeno está asociado al diámetro de corte.

El patrón de flujo es inverso: Las partículas se mueven radialmente hacia afuera, y de fluido hacia adentro. La gravedad tiene poco efecto en el funcionamiento del equipo

La velocidad tangencial inicial,  $u_{\theta}$ , está determinada por la velocidad de ingreso del sistema fluido + sólido, relacionada al caudal



Wills' Mineral Processing Technology  
An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery

**Operaciones de separación sólido – fluido; Separación fluido- sólido (FI) Diámetro crítico**

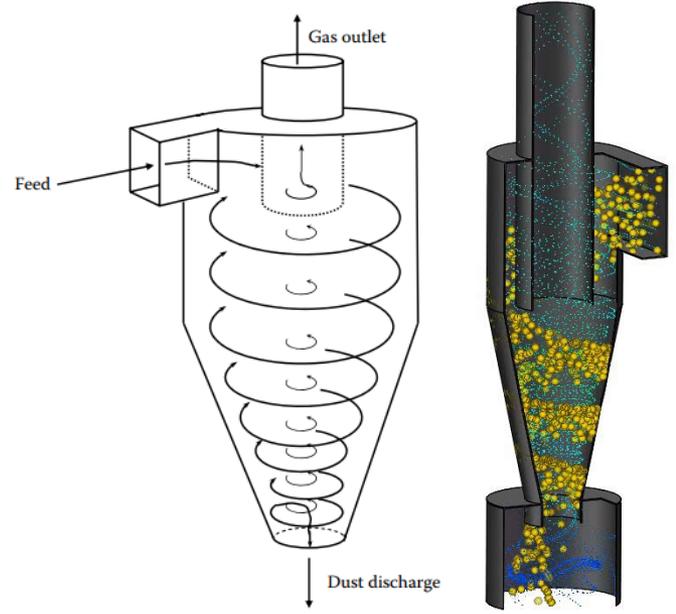
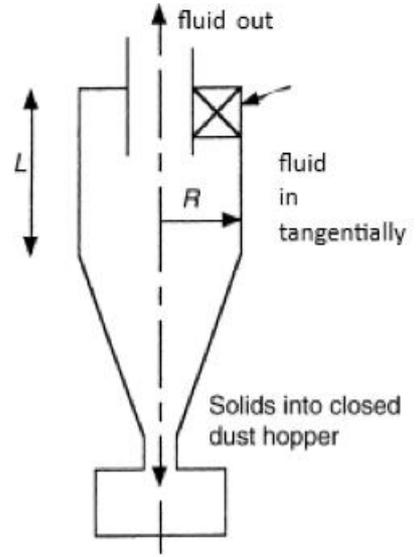
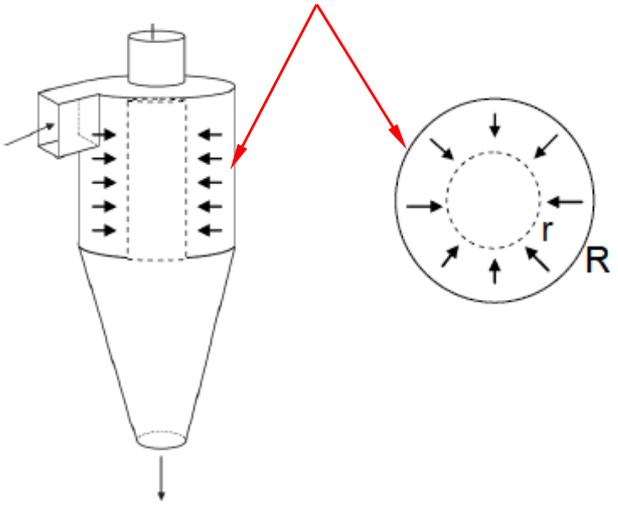
Para conocer qué partículas pueden ser colectadas, se deben expresar las velocidades tangenciales y radiales en la posición  $r$  en función de variables conocidas:

El principio de conservación del momento angular asegura que  $u_{\theta}r = U_{\theta}R$ . Debido a las fuerzas de fricción, se ha encontrado experimentalmente, para un vortex confinado, que se cumple  $u_{\theta}r^n = U_{\theta}R^n$ , con  $n \sim 0,5$  Entonces  $u_{\theta}r^{0,5} = U_{\theta}R^{0,5}$

caudal de fluido hacia el centro del ciclón

$$Q = 2\pi r L v_{t,r} = 2\pi R L v_{t,R} \rightarrow v_{t,R} = v_{t,r} \left(\frac{r}{R}\right)$$

El caudal de fluido hacia el centro del ciclón debe cumplir que sea idéntico en las posiciones  $r$  y  $R$ ; ( $r < R$ ):



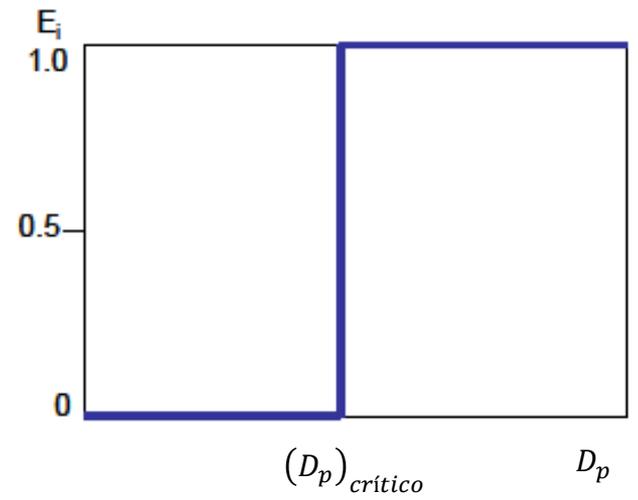
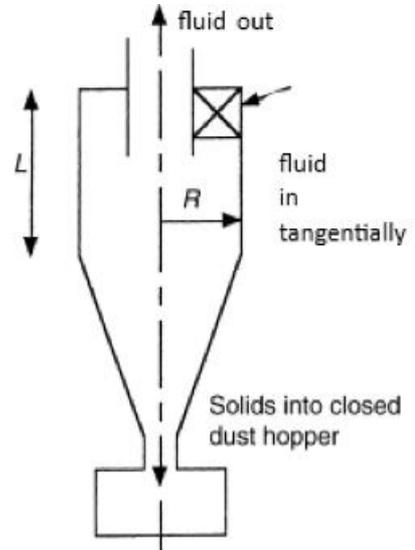
**Operaciones de separación sólido – fluido; Separación fluido- sólido (FI) Diámetro crítico**

$$u_{\theta}r^{1/2} = U_{\theta}R^{1/2} \quad v_{t,R} = v_{t,r} \left(\frac{r}{R}\right) \quad D_p^2 = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho)} \left(\frac{r}{u_{\theta}^2}\right) v_{t,r} \Rightarrow D_p^2 = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho)} \left(\frac{v_{t,R}}{U_{\theta}^2}\right) r$$

Si se **asume** que las partículas que pueden ser colectadas son las que están próximas a  $r=R$ , resulta:

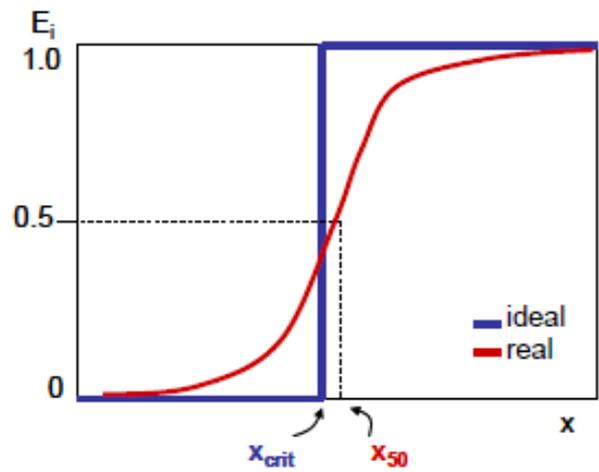
$$(D_p^2)_{crítico} = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho)} \left(\frac{v_{t,R}}{U_{\theta}^2}\right) R$$

$(D_p)_{crítico}$  representa el tamaño crítico; si las partículas son más pequeñas no serán colectadas y serán arrastradas por el fluido, en caso contrario se colectarán por el fondo del ciclón. Si la operación del ciclón cumpliera con todas las hipótesis realizadas, la eficiencia por clase debería ser para, todas las partículas menores que  $(D_p)_{crítico}$ , **0** y para aquellas de diámetro mayor a  $(D_p)_{crítico}$ , **1**

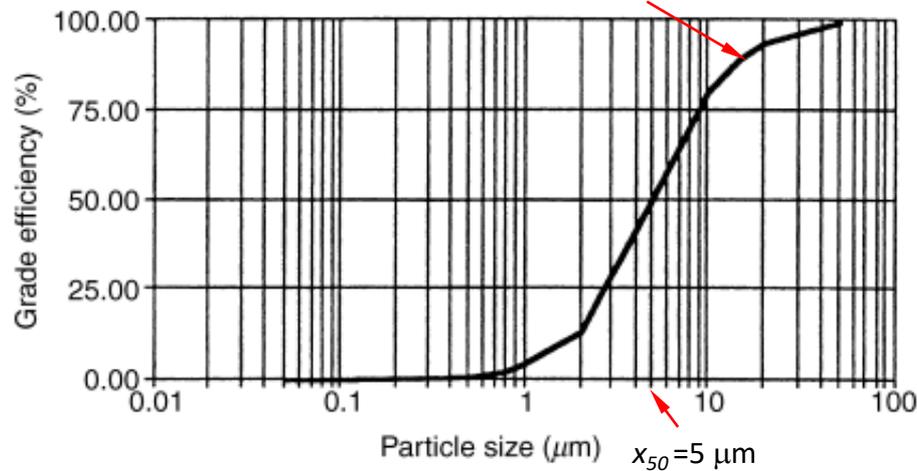
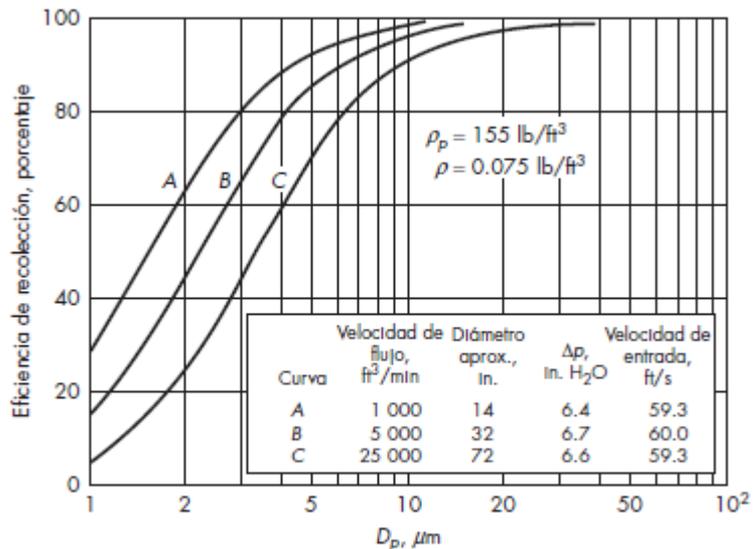


**Operaciones de separación sólido – fluido; Separación fluido- sólido (FI) cut size**

El punto de corte (*cut size*), se define como el tamaño por el cual el 50% de las partículas en la alimentación aparece en el *underflow*; esto es, verifica una eficiencia de separación del 50%. Es un tamaño equiprobable. Corresponde al tamaño partículas que tienen la misma probabilidad de ir en el *underflow* o en el *overflow*. El *cut size* se denomina  $x_{50}$



**Processing of Particulate Solids**  
 p261  
 Jonathan Seville  
 Professor of Chemical Engineering  
 School of Chemical Engineering  
 University of Birmingham, UK



$$\epsilon\% = \frac{(x/x_{50})^2}{[1 + (x/x_{50})^2]}$$

Parámetros característicos

Velocidad característica se basa en la sección transversal del cuerpo cilíndrico del ciclón:  $v_{cy} = \frac{4Qv}{\pi D_{cy}^2}$

Caída de presión El flujo rotacional en el vórtice forzado dentro del cuerpo del ciclón da lugar a un gradiente de presión radial. Este gradiente de presión, combinado con las pérdidas de presión por fricción en la entrada y salida del gas y las pérdidas debidas a los cambios en la dirección del flujo, conforman la caída de presión total. Esta caída de presión, medida entre la entrada y la salida del gas, es proporcional al cuadrado del caudal de gas a través del ciclón. Un coeficiente de resistencia, el número de Euler,  $Eu$ , relaciona la caída de presión del ciclón con la velocidad característica.

$$Eu = \frac{2\Delta P}{\rho_f v_{cy}^2}$$

Su valor es prácticamente constante para una geometría de ciclón determinada, independientemente del diámetro del cuerpo del ciclón. El rango de presión recomendado entre 500 – 1500 Pa.

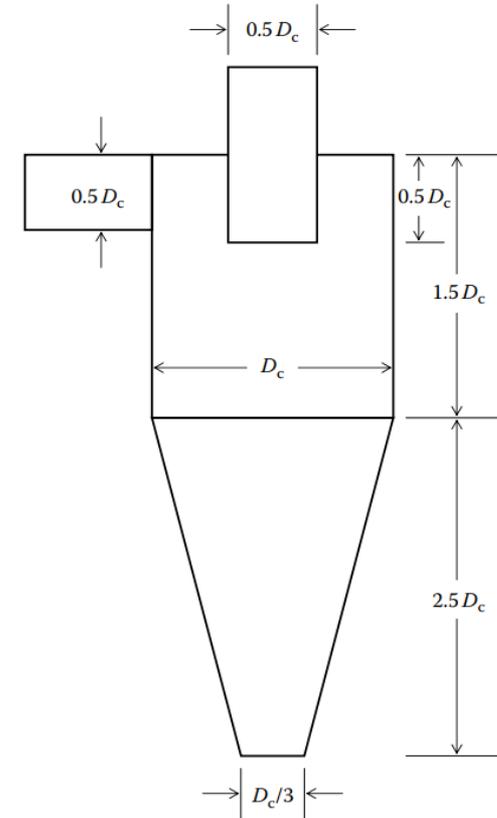
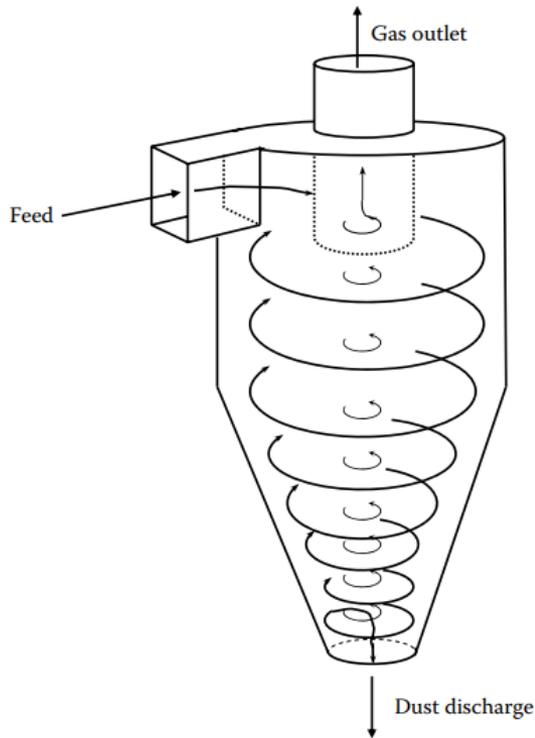
Número de Stokes el escalado de los ciclones se basa en este número adimensional el cual caracteriza el comportamiento de una familia de geoméricamente similares ciclones. La primera ecuación corresponde a Hidrociclones; la segunda a ciclones

$$Stk_{50} = \frac{x_{50}^2 (\rho_p - \rho) v_{cy}}{18\mu D_{cy}}$$

$$Stk_{50} = \frac{x_{50}^2 \rho_p v_{cy}}{18\mu D_{cy}}$$

A escala industrial el número de Stokes y el de Euler son independientes del número de Reynold. Para suspensiones de concentración inferior a  $5 \text{ g.m}^{-3}$ , estos números son constantes para una geometría de ciclón determinada.

## Operaciones de separación sólido – fluido; Separación gas - sólido Ciclones de flujo inverso. diseños específicos

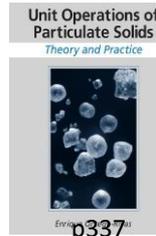
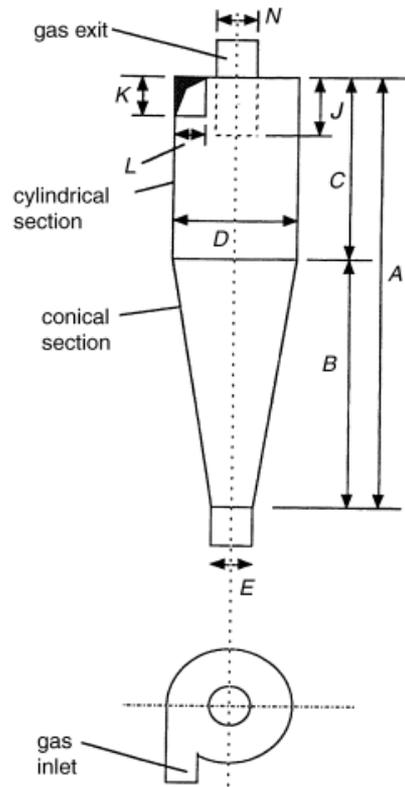


Los diámetros varían de menos de 0,05 m a 10 m, las concentraciones de alimentación cubren valores de  $0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a aproximadamente  $50 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; las velocidades de entrada de gas pueden ser del orden de  $15 \text{ a } 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Existen ciertas relaciones entre las dimensiones de los ciclones que deben observarse para un rendimiento eficiente del ciclón, que generalmente están relacionadas con su diámetro. El diseño normalizado más utilizado es de "Stairmand". Los cálculos pueden llevarse a cabo por medio de relaciones adimensionales.

# Operaciones de separación sólido – fluido; Separación gas - sólido

## Ciclones de flujo inverso. Dimensionamiento



HE – high efficiency Stairmand cyclone

$$Stk_{50} = 1.4 \times 10^{-4}$$

$$Eu = 320$$

<https://youtu.be/DlzGJecEi4E?si=MVklzHMgYYFykT2->

Un sistema de tratamiento de polvo

HR – high flowrate Stairmand cyclone

$$Stk_{50} = 6 \times 10^{-3}$$

$$Eu = 46$$

<https://youtu.be/LwGXu4e6T1A?si=1qvMR0Q4PsD0nBGU>

Como trabaja un ciclón

Dimension relative to diameter D

Cyclone type	A	B	C	E	J	L	K	N
Stairmand, H.E.	4.0	2.5	1.5	0.375	0.5	0.2	0.5	0.5
Stairmand, H.R.	4.0	2.5	1.5	0.575	0.875	0.375	0.75	0.75

Los diseños de ciclones de flujo inverso se pueden dividir en dos grupos estándar principales:

**Stairmand HE:** diseños de alta eficiencia: brindan altas recuperaciones y se caracterizan por orificios de entrada y salida de gas relativamente pequeños

**Stairmand HR:** diseños de alto flujo: presentan eficiencias totales más bajas, pero ofrecen baja resistencia al flujo, por lo que una unidad de un tamaño determinado proporcionará una capacidad de gas mucho mayor que un diseño de alta eficiencia del mismo diámetro de cuerpo. Los ciclones de alta velocidad tienen grandes entradas y salidas de gas y, por lo general, son más cortos.

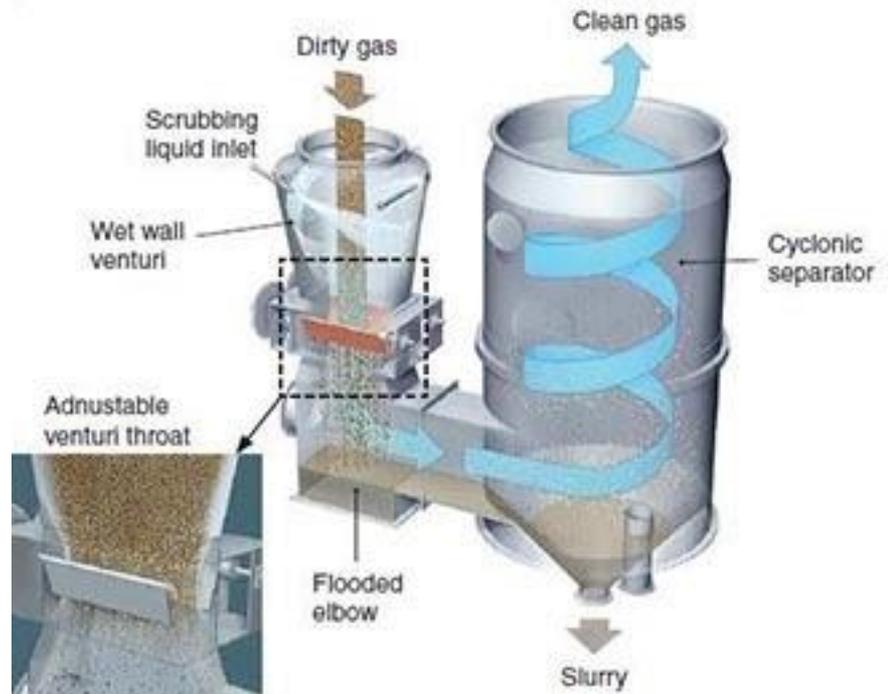
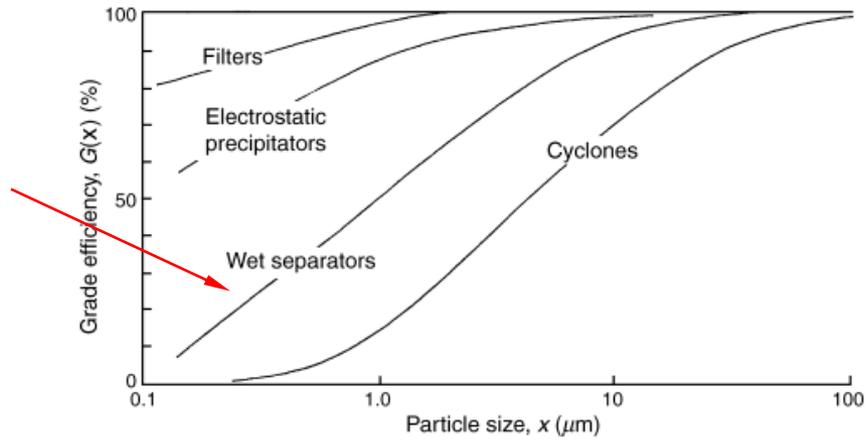
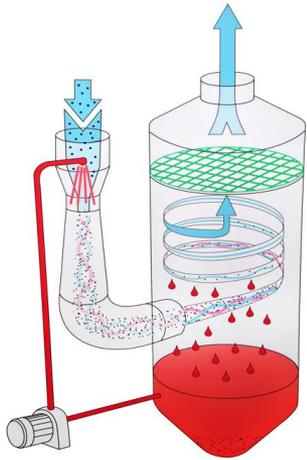
<https://youtu.be/AoaddH8VAB4?si=5qtyUtPIGcchxy-o>

Ciclón con recirculación

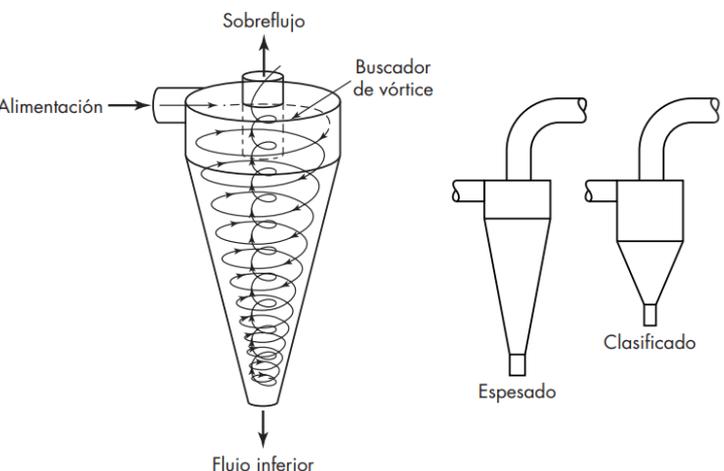
<https://youtu.be/BrGXXurZers>

cyclone

# Operaciones de separación sólido – fluido; Separación gas - sólido. *Scrubber*



# Operaciones de separación sólido – fluido; Separación líquido- sólido (FI) diseños específicos

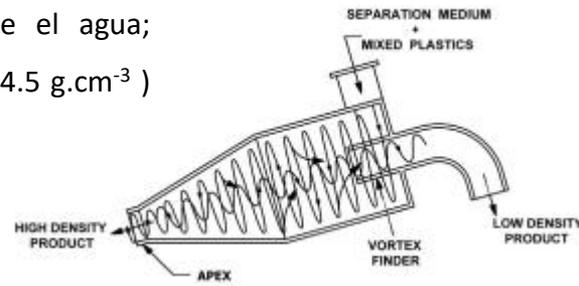


DMS hydrocyclon separa partículas con diferentes fracciones de densidad utilizando un medio con una densidad intermedia a la de las dos fracciones.



Density Medium Separation (DMS) Hidrociclón

DMS utiliza fluidos más densos que el agua; ejemplo: suspensiones de magnetita ( $4.5 \text{ g.cm}^{-3}$ ) o ferro silicio en agua; ( $6.8 \text{ g.cm}^{-3}$ ).



El fluido denso ingresa tangencialmente y se crea un vórtice. Cualquier partícula con una densidad más alta que el medio estará sujeta a mayores fuerzas centrífugas y será arrastrado hacia el borde exterior del vórtice, mientras que la de menor densidad permanecerá en el centro del vórtice. Las diferentes partículas se eliminan a través de líneas de descarga separadas.



Preconcentración de espodumeno

[https://youtu.be/Kdfl-pntUXw?si=od\\_lwpwBxgFOPkF](https://youtu.be/Kdfl-pntUXw?si=od_lwpwBxgFOPkF)  
Hidrociclones METSO

Determine el diámetro y altura de un ciclón Stairmand HE requerido para la separación de partículas de sólido de densidad  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  transportados en una corriente de aire a temperatura y presión ambiente. El caudal necesario a tratar es de  $2 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  y la caída de presión es la recomendada para este tipo de separador. El rango de tamaños es  $12 - 32 \text{ }\mu\text{m}$

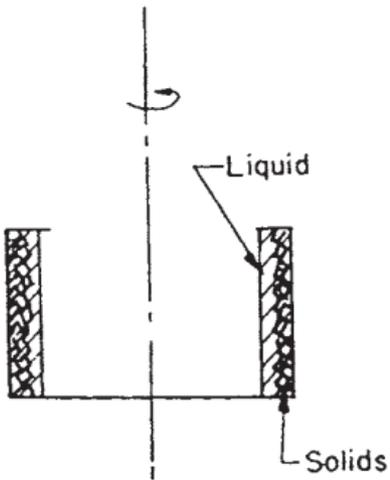


[jlz\\_TSP\\_ciclon\\_StHE](#)

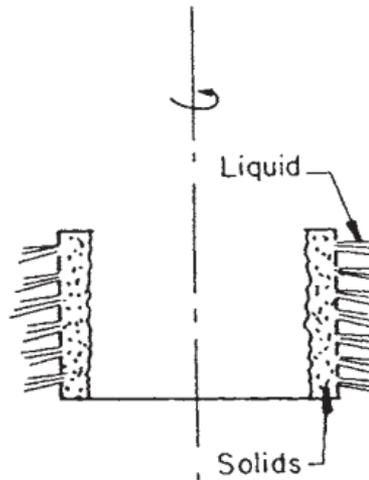
## Operaciones de separación sólido – fluido; Separación centrífuga de pared móvil, centrifugas

La centrifugación presenta aplicaciones variadas y diversas en diferentes industrias de procesamiento. La condición básica es que siempre que exista una diferencia de densidad significativa entre sólido y líquido. Las aplicaciones más comunes de la centrifugación en las industrias de procesamiento son: (a) separaciones líquido-líquido, (b) clarificación centrífuga, (c) sedimentación centrífuga y (d) filtración centrífuga.

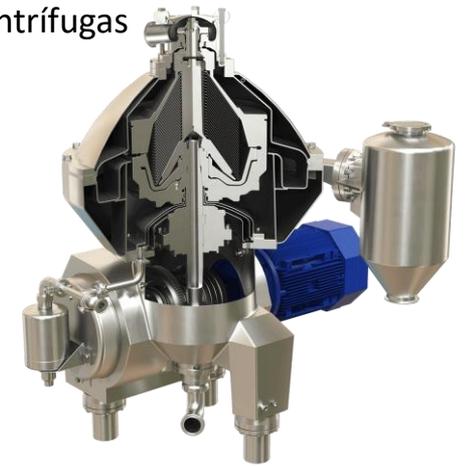
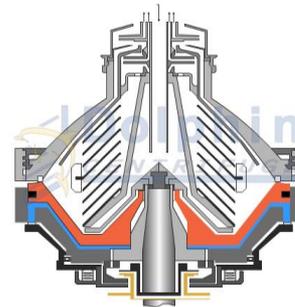
De interés particular son b), c) y d), basada en los conceptos de interacción fluido-partícula o de la dinámica de partículas sumergidas en fluidos.



Sedimentación centrífuga



Filtración centrífuga



Disc Stack Centrifuge

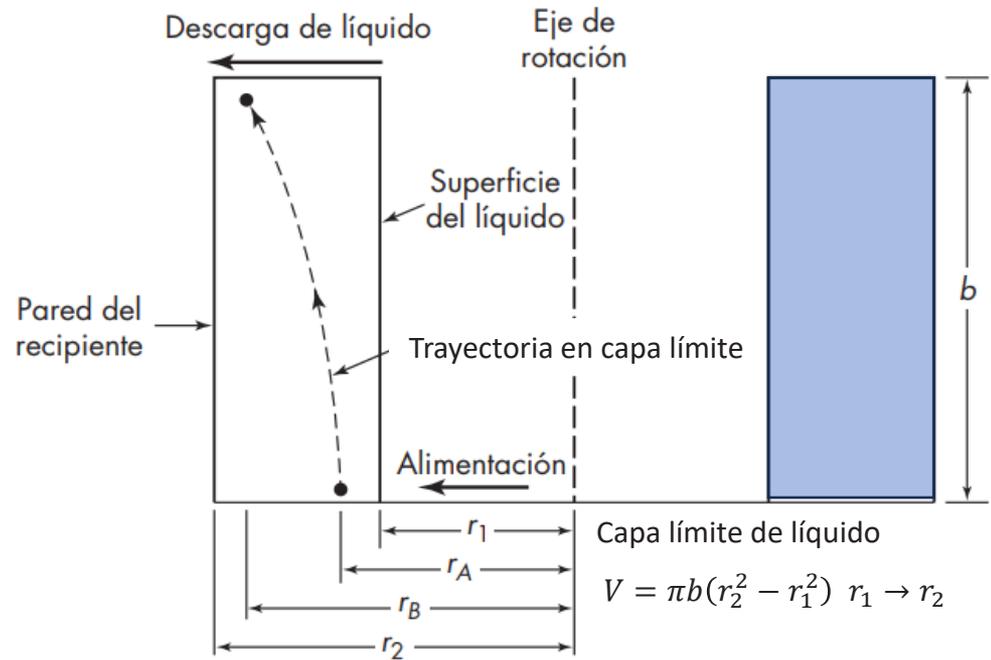


RINA Serie 500 Riera Nadeu  
Centrifugas filtrantes continuas

## Separación centrífuga de pared móvil, sedimentación centrífuga

En la sedimentación centrífuga, una partícula de un tamaño determinado se separa del líquido si dispone de tiempo suficiente para que la partícula alcance la pared del recipiente. Se supone que en todo momento la partícula se está moviendo radialmente con su velocidad terminal.

Una determinada partícula comienza a sedimentar en el fondo del recipiente a una cierta posición en el líquido, es decir, a una distancia  $r_A$  del eje de rotación. Su tiempo de sedimentación está limitado por el tiempo de residencia del líquido en el recipiente.



Al final de este tiempo, suponer que la partícula se encuentra en la posición  $r_B$ . Si  $r_B < r_2$ , continuará con el líquido. Si  $r_B = r_2$ , se deposita en la pared del recipiente y se separa del líquido.

$$\frac{du}{d\theta} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) r \omega^2 - \frac{C_D \rho v_t^2 A_p}{2m_p} \Rightarrow 0 = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) r \omega^2 - \frac{C_D \rho v_t^2 A_p}{2m_p} \Rightarrow (\rho_p - \rho) \omega^2 r = \frac{18\mu}{D_p^2} v_{t,r} \Rightarrow$$

Régimen de Stokes

$$v_{t,r} = \frac{dr}{d\theta} = \frac{\omega^2 r (\rho_p - \rho) D_p^2}{18\mu} \Rightarrow d\theta = \frac{18\mu}{\omega^2 (\rho_p - \rho) D_p^2} \frac{dr}{r}$$

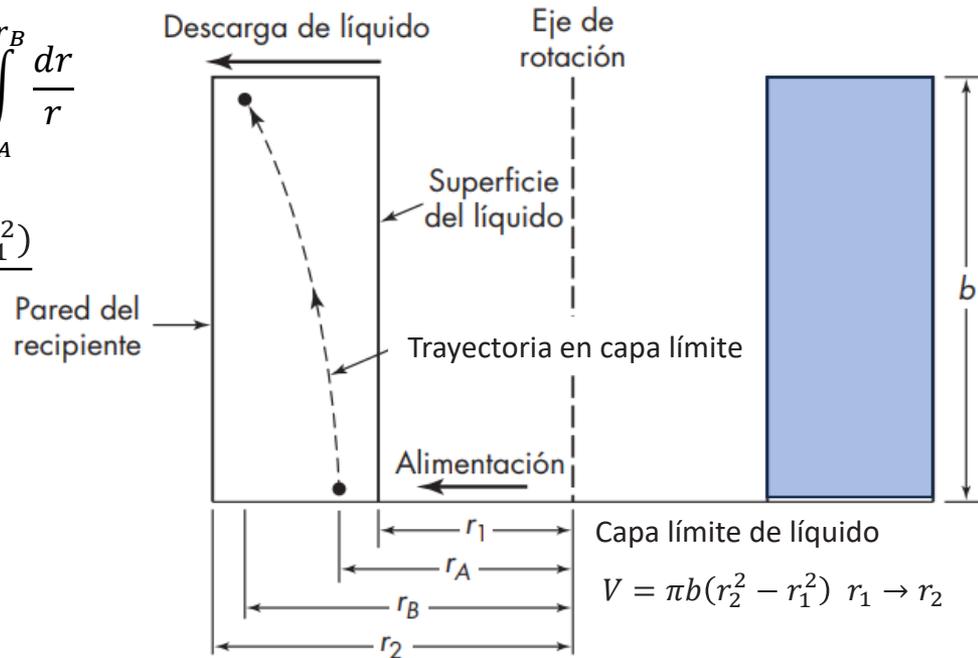
## Separación centrífuga de pared móvil, sedimentación centrífuga

$$d\theta = \frac{18\mu}{\omega^2(\rho_p - \rho)D_p^2} \frac{dr}{r} \Rightarrow \int_0^{t_R} d\theta = \frac{18\mu}{\omega^2(\rho_p - \rho)D_p^2} \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r}$$

$$t_R = \frac{18\mu}{\omega^2(\rho_p - \rho)D_p^2} \ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right) \quad t_A = \frac{V}{Q_v} = \frac{\pi b(r_2^2 - r_1^2)}{Q_v}$$

$$t_T = t_R = t_A \rightarrow \frac{18\mu}{\omega^2(\rho_p - \rho)D_p^2} \ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right) = \frac{\pi b(r_2^2 - r_1^2)}{Q_v}$$

$$Q_v = \pi b \omega^2 \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho)}{18\mu} \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{\ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right)}$$



El **cut size** se define como el diámetro de la partícula  $D_{pc}$  que alcanza la mitad de la distancia entre  $r_1$  y  $r_2$ . Una partícula de diámetro  $D_{pc}$  se desplaza una distancia  $(r_1 + r_2)/2$  durante el tiempo de sedimentación disponible. Si se desea separar partícula  $D_{pc}$  es necesario que alcance, en el tiempo disponible  $t_c$ , la pared del recipiente, por lo que  $r_B = r_2$  y  $r_A = (r_1 + r_2)/2$

## Separación centrífuga de pared móvil, sedimentación centrífuga, el factor $\Sigma_{cent}$

$$Q_{vc} = \pi b \omega^2 \frac{D_{pc}^2 (\rho_p - \rho)}{18\mu} \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{\ln\left(2 \frac{r_2}{(r_1 + r_2)}\right)}$$

En  $Q_{vc}$ , la mayor parte de las partículas con diámetros mayores que  $D_{pc}$  serán eliminadas por la centrífuga y la mayoría de las partículas con diámetros inferiores permanecerán en el líquido.

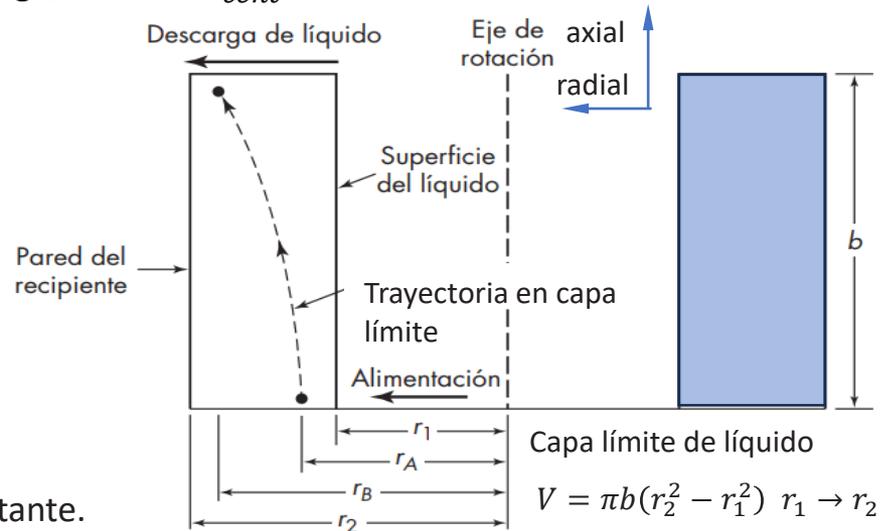
Para  $r_1 \rightarrow r_2$ ,  $v_t = \frac{\omega^2 r_2 (\rho_p - \rho) D_p^2}{18\mu}$  puede ser considerada constante.

Si  $s = r_2 - r_1$ , el espesor de la capa líquida, entonces  $v_{t,c} = \frac{s}{2t_c}$  y  $t_c = \frac{V}{Q_{vc}}$

$$v_{t,c} = \frac{s}{2t_c} = \frac{s Q_{vc}}{2V} \rightarrow Q_{vc} = \frac{2V}{s} v_{t,c} = \frac{2V \omega^2 r_2 (\rho_p - \rho) D_p^2}{s 18\mu}$$

En Régimen de Stokes y campo gravitatorio,  $v_{tg} = \frac{(\rho_p - \rho) g D_p^2}{18\mu}$  ecuación de Stokes

$$Q_{vc} = 2 \frac{V \omega^2 r_2 (\rho_p - \rho) g D_{pc}^2}{s g 18\mu} = 2 \frac{V \omega^2 r_2}{s g} v_{t,c,g} = 2 v_{t,c,g} \Sigma_{cent} \quad \Sigma_{cent} = \frac{V \omega^2 r_2}{s g} \frac{m^3}{s^2} \cdot \frac{s^2}{m} = m^2$$



donde  $\Sigma_{cent}$ , sigma o factor de capacidad o factor de escala, es una característica de la centrífuga y  $v_{tg}$  es la velocidad terminal de sedimentación de las partículas para las condiciones de sedimentación por gravedad (1 G). Físicamente,  $\Sigma_{cent}$  es el área de la sección transversal de un tanque de sedimentación por gravedad de la misma capacidad de separación que la centrífuga.

# Separación centrífuga de pared móvil, sedimentación centrífuga, el factor $\Sigma_{cent}$

**TABLE 18-13 Scale-up Factors for Sedimenting Centrifuges**

Type of centrifuge	Inside diameter, in	Disc diameter, in/number of discs	Speed, r/min	$\Sigma$ value, units of $10^4 \text{ ft}^2$	Recommended scale-up factors <sup>a</sup>
Tubular	1.75	—	23,000	0.32	1†
Tubular	4.125	—	15,000	2.7	21
Tubular	4.90	—	15,000	4.2	33
Disc	—	4.1/33	10,000	1.1	1
Disc	—	9.5/107	6,500	21.5	15
Disc	—	12.4/98	6,250	42.5	30
Disc	—	13.7/132	4,650	39.3	25
Disc	—	19.5/144	4,240	105	73
Scroll conveyor	6	—	6,000	0.27	1
Scroll conveyor	14	—	4,000	1.34	5
Scroll conveyor	14‡	—	4,000	3.0	10
Scroll conveyor	18	—	3,450	3.7	12.0
Scroll conveyor	20	—	3,350	4.0	13.3
Scroll conveyor	25	—	3,000	6.1	22
Scroll conveyor	25	—	2,700	8.6	31

<sup>a</sup>These scale-up factors are relative capacities of centrifuges of the same type but different sizes when performing at the same level of separation achievement (e.g., same degree of clarification). These factors must not be used to compare the capacities of different types of centrifuges.

†Approaches 2.5 at rates below mL/min.

‡Long bowl configuration.

NOTE: To convert inches to millimeters, multiply by 25.4; to convert revolutions per minute to radians per second, multiply by 0.105; and to convert  $10^4$  square feet to square meters, multiply by 929.

Perry, chap 18

<https://youtu.be/CXwdfv1No0M?si=LVAgK3leAIOU0v7>

Disc Stack Centrifuge Hause

<https://youtu.be/1jXexi1p9a4?si=3TanI93jgDYORH6R>

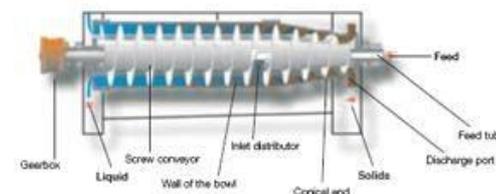
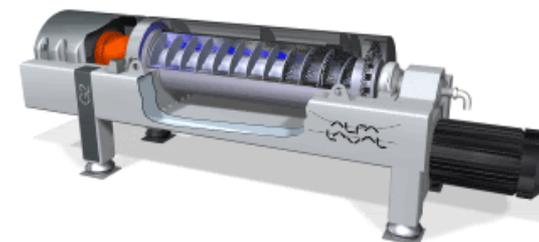
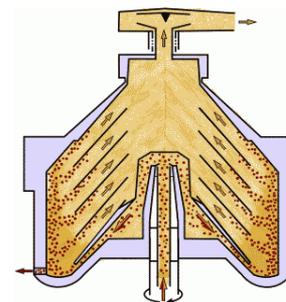
Disc Stack Centrifuge GEA

[https://youtu.be/nlM9lNkiCh0?si=4UKgtTij\\_cGLdJJ-](https://youtu.be/nlM9lNkiCh0?si=4UKgtTij_cGLdJJ-)

Disc Stack Centrifuge Alfa\_laval

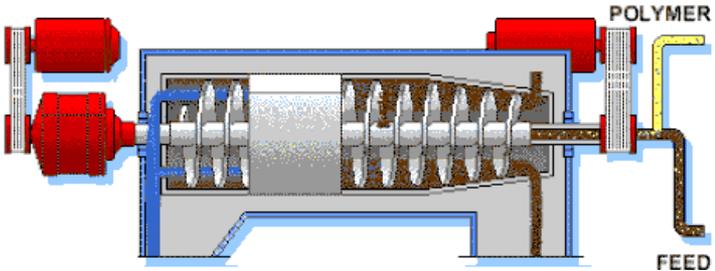
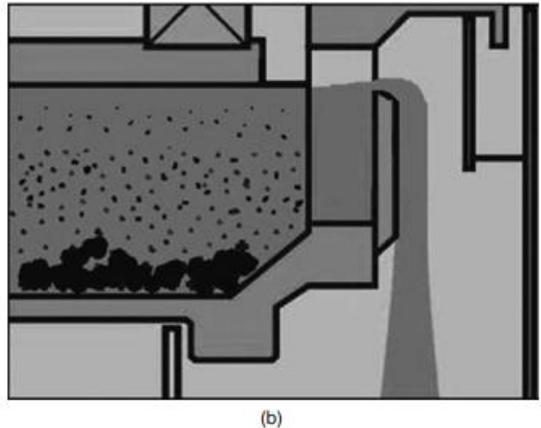
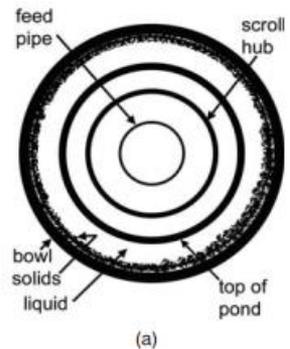
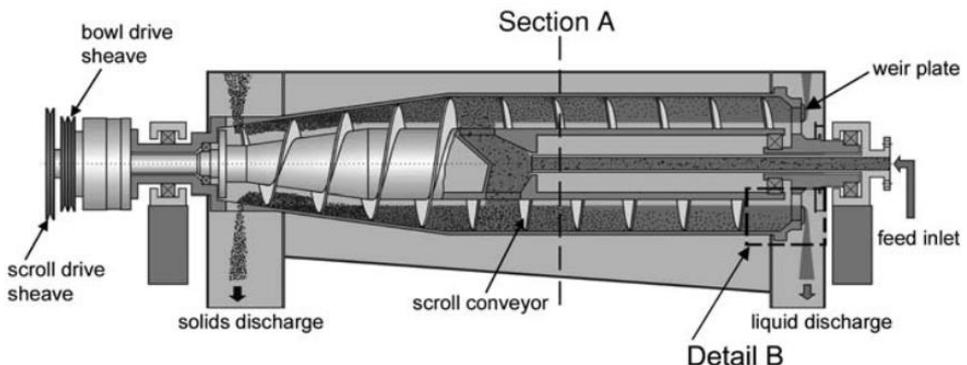


Disc Stack Centrifuge



Scroll or Decanter Centrifuge

# Separación centrífuga de pared móvil, sedimentación centrífuga, *decanter*



<https://youtu.be/OSL-S75UGRo?si=uEdejTEtBcQggGJO>

Como funciona un decanter

<https://youtu.be/BWfVN2OKMsQ?si=YFUU2Z1xM2ZrJt5V>

*Decanter trifásico Flottweg Tricanter*



[jlz\\_TSP\\_centrifuge1](#)

En un ensayo de centrifugación, cristales de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  de densidad  $2110 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y  $5 \mu\text{m}$  de diámetro equivalente, fueron separados de una suspensión acuosa ( $T = 80^\circ\text{C}$ ) a un caudal de  $0,10 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  a) calcular el factor  $\Sigma$  b) Estimar el diámetro de corte para una producción de  $4,3 \text{ tonne}\cdot\text{hr}^{-1}$  Suponer que es aplicable un régimen de Stokes.

