

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE RECURSOS MINERALES



TEMA 9: PROCESOS DE CONCENTRACIÓN GRAVIMETRÍA



9

CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

INDICE

- 1. Introducción
- 2. Principios de la sedimentación de partículas
- 3. Operaciones de separación gravimétrica
- 4. Referencias para consulta

1. Introducción.



Es la concentración más antigua (Obtención de oro en Egipto año 3000 AC).

Este método no se puede aplicar a todos los minerales.

Hay que determinarlo a través de un criterio de concentración (*concentration criterion*):

$$C.C.$$
 (criterio concentración) = $\frac{\rho_{\text{pesado}} - \rho_{\text{líquido}}}{\rho_{\text{ligero}} - \rho_{\text{líquido}}}$

Donde:

 ρ = Densidad o gravedad específica (SG en inglés)

En base al valor del criterio de concentración se puede determinar si a un determinado mineral se le puede aplicar la concentración gravimétrica:



(Fuente: www.ttms999.com)



(Cortesía: Holman-Wilfley)

1. Introducción.



La siguiente tabla facilita el C.C. para algunos minerales que comúnmente se separan con gravimetría:

Mineral	Fluido empleado	CC
Gold (Oro)	Water (Agua)	10.3
Gold (Oro)	Air (Aire)	6.8
Cassiterite (Casiterita)	Water (Agua)	3.5
Coal (Carbón)	Water (Agua)	3.4
Hematite (Hematites)	Water (Agua)	2.5

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

La tabla siguiente se puede adoptar como guía para establecer cuándo se es previsible aplicar concentración gravimétrica:

Criterio de concentración (C.C.)	Idoneidad de la separación gravimétrica		
CC > 2.5	Hasta las 75 micras, fácil separación		
1.75 < CC < 2.5	Hasta las 150 micras, posible separación		
1.5 < CC < 1.75	Hasta los 1.7 mm, posible separación		
1.25 < CC < 1.5	Hasta los 6.35 mm, posible separación		
CC < 1.25	Separación gravimétrica imposible	MP2021	

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

1. Introducción.



El grado de posibilidad de separar por gravimetría un mineral también se puede establecer por la siguiente gráfica descrita por Burt (Gupta and Yan, 2016):



⁽Fuente: Gupta and Yan, 2016)

Los dos criterios de concentración anteriores sirven como una primera aproximación ya que también influye la forma de las partículas.



Velocidad de sedimentación (v_T) – Condiciones turbulentas de Newton

La separación gravimétrica se basa de la velocidad terminal de sedimentación de las partículas dentro del fluido:

Se empleará la ley de Newton para partículas gruesas (>2000 micras):

$$v_{T} = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_{S} - \rho_{F}) \cdot d}{3 \cdot C_{D} \cdot \rho_{F}}} \text{ (resistencia turbulenta)}$$
$$v_{T} = \sqrt{\frac{3 \cdot g \cdot (\rho_{S} - \rho_{F}) \cdot d}{\rho_{F}}} \text{ (resistencia turbulenta)}$$

Siendo:

 v_{T} = velocidad terminal

 $\rho_{\rm S}$ = densidad del sólido

 $\rho_{\rm F}$ = densidad del fluido

d = diámetro de la partícula

 C_D = coeficiente de arrastre

La ecuación de Newton se aplica para números de Reynolds superiores a 1000.



Velocidad de sedimentación (v_T) – Condiciones laminares de Stokes

La separación gravimétrica se basa de la velocidad terminal de sedimentación de las partículas dentro del fluido:

Se empleará la ley de Stokes para partículas finas (< 100 micras):

$$v_{\tau} = \frac{g \cdot (\rho_{s} - \rho_{F}) \cdot d^{2}}{18 \cdot \mu} (\text{resistencia viscosa})$$

Siendo:

 v_{T} = velocidad terminal ρ_{S} = densidad del sólido ρ_{F} = densidad del fluido d = diámetro de la partícula μ = viscosidad del fluido

La ecuación de Stokes se aplica a condiciones ideales donde el número de Reynolds será inferior a 1.



Velocidad de sedimentación (v_T) – Condiciones laminares de Stokes

El rango de validez para las condiciones de Stokes puede ser obtenido con la representación de la siguiente ecuación (Número de Reynolds, Re_P):

$$C_{D} = \frac{24}{\text{Re}_{P}} = \frac{24 \cdot \mu}{v_{T} \cdot d \cdot \rho_{F}} \Longrightarrow \text{Re}_{P} = \frac{v_{T} \cdot d \cdot \rho_{F}}{\mu}$$

Siendo:

 $Re_P = N$ úmero de Reynolds

 v_{τ} = velocidad terminal

 ρ_F = densidad del fluido

d = diámetro de la partícula

 μ = viscosidad del fluido

Si se representa la ecuación anterior C_D vs. Re_P se puede observar que la pendiente -1 de la recta corresponde a condiciones laminares de Stokes ($Re_P < 1.0$).

A partir de Re_{P} >1000 la gráfica adopta una línea asintótica horizontal donde el coeficiente de resistencia (C_D) es independiente del número de Reynolds, y a esta región se la llama la región de régimen turbulento.



Velocidad de sedimentación (v_T) – Región intermedia

Sin embargo, la mayor parte de los tamaños que se manejan en la concentración de minerales se encuentran entre 100 micras y 3 mm.

Esta región de transición ($1.0 < \text{Re}_P < 1000$) no cumple el régimen de Stokes ni el régimen de Newton.

No obstante, se puede aplicar la siguiente ecuación de Newton para estimar la velocidad terminal de sedimentación de las partículas que caen en esta región intermedia:

$$v_{\tau} = \sqrt{\frac{3 \cdot g \cdot (\rho_{s} - \rho_{F}) \cdot d}{\rho_{F}}} \text{ (resistencia turbulenta)}$$

Será un procedimiento de ensayo y error hasta obtener la velocidad terminal final

Se propone un ejemplo donde se indica cómo llevar a cabo este procedimiento.



Velocidad de sedimentación (v_T) – Región intermedia

Otra opción es representar la siguiente expresión (Subba Rao, 2016):

$$\log C_{D} = -2 \cdot \log \operatorname{Re}_{P} + \log \left(\frac{4 \cdot g \cdot d^{3} \cdot \rho_{F} \cdot (\rho_{S} - \rho_{F})}{3 \cdot \mu^{2}} \right)$$

Para ello se toma $Re_P = 1$, obteniéndose que C_D es igual a:

$$C_{D} = \frac{4 \cdot g \cdot d^{3} \cdot \rho_{F} \cdot (\rho_{S} - \rho_{F})}{3 \cdot \mu^{2}}$$

Una vez calculado el valor de C_D se representa una línea recta con el valor calculado de C_D y para $\text{Re}_P = 1$ con pendiente -2.

La línea recta cortará a la gráfica C_D vs. Re_P en un punto que nos dará la velocidad terminal de sedimentación para la partícula estudiada.

Se propone un ejemplo para resolverse con este procedimiento.



Formulación de Dietrich

Hace uso de dos parámetros adimensionales, W^* y D^* , siendo sus expresiones:

$$W^* = \frac{v_T^3 \cdot \rho_F^2}{\left(\rho_{\rm S} - \rho_F\right) \cdot \mathbf{g} \cdot \mu}$$

$$D^* = \frac{\left(\rho_{\rm S} - \rho_{\rm F}\right) \cdot \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{d}_{\rm N}^3 \cdot \rho_{\rm F}}{\mu^2}$$

Siendo:

d_N = diámetro nominal del área mayor proyectada

Una partícula de forma irregular sedimentará bajo una orientación cuya área proyectada sobre la horizontal será la que se toma para la obtención del diámetro nominal.



Formulación de Dietrich

Los parámetros W* y D*, están relacionados según la expresión:

$$W^* = R_3 \cdot 10^{R_1 + R_2}$$

Donde:

 $R_{1} = -3.76715 + 1.92944 \cdot \log D^{*} - 0.09815 \cdot \left(\log D^{*}\right)^{2} - 0.00575 \cdot \left(\log D^{*}\right)^{3} + 0.00056 \cdot \left(\log D^{*}\right)^{4}$

$$R_{2} = \left(0.65 - \left(\frac{CSF}{2.83} \cdot \tanh(\log D^{*} - 4.6)\right)\right)^{\left(1 + \frac{3.5 - P}{2.5}\right)}$$

$$CSF = \frac{d_{MIN}}{\sqrt{d_{MAX} \cdot d_{MEDIO}}} (Factor de forma Corey)$$

- P = factor de redondez de las partículas
- P = 6(partículas redondeadas)
- P = 2 3(partículas angulosas)



Formulación de Jiménez y Madsen

Simplifica la aproximación de Dietrich definiendo los parámetros adimensionales:

$$V^* = \frac{v_T}{\sqrt{\left(\frac{\rho_S - \rho_F}{\rho_F}\right) \cdot g \cdot d}}$$

$$\mathbf{S}^* = \frac{\mathbf{d} \cdot \rho_F}{\mathbf{4} \cdot \mu} \cdot \sqrt{\frac{\left(\rho_{\mathbf{S}} - \rho_F\right) \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{d}}{\rho_F}}$$

La regresión linear entre $1/V^*$ y $1/S^*$ da la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{V^*} = A + \frac{B}{S^*}$$

En la tabla adjunta se facilitan algunos valores de A y B para partículas con factor de forma Corey igual a 0.7.



Formulación de Jiménez y Madsen

Simplifica la aproximación de Dietrich definiendo los parámetros adimensionales:

$$V^* = \frac{v_T}{\sqrt{\left(\frac{\rho_{\rm S} - \rho_{\rm F}}{\rho_{\rm F}}\right) \cdot g \cdot d}}$$

$$\mathbf{S}^* = \frac{\boldsymbol{d} \cdot \boldsymbol{\rho}_{\mathsf{F}}}{4 \cdot \boldsymbol{\mu}} \cdot \sqrt{\frac{\left(\boldsymbol{\rho}_{\mathsf{S}} - \boldsymbol{\rho}_{\mathsf{F}}\right) \cdot \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{d}}{\boldsymbol{\rho}_{\mathsf{F}}}}$$

Siendo el coeficiente de arrastre, C_D:

$$C_D = \frac{1}{3} \cdot \left(A + \sqrt{A^2 + \frac{16 \cdot B}{\text{Re}_P}} \right)^2$$

Donde Re_P es el número de Reynolds para dicha partícula.

Ejercicio - Ejemplo



Velocidad de sedimentación (v_T) – Conclusiones

Si se consideran partículas esféricas de cuarzo dentro de un baño acuoso.

La ley de Stokes se aplicará hasta un tamaño máximo de 110 micras.

La ley de Newton se aplicará hasta tamaños mínimos de 3.5 mm.

Para el rango de tamaños entre 110 micras y 3.5 mm, ninguna de las dos leyes describe bien las condiciones de asentamiento.

Por otro lado, dicho rango de tamaños es el que interesa en concentración gravimétrica.

Para intentar solucionar ese punto, hay diferentes investigadores que han estudiado ese rango.

Entre ellos destacan los estudios de Dietrich y Jiménez y Madsen (Gupta and Yan, 2016).



Velocidad asentamiento vs. Tiempo (50 micras)

2. Principios de asentamiento de las partículas

Efecto del tamaño en la separación gravimétrica

El éxito de la concentración gravimétrica dependerá de:

La diferencia entre las velocidades terminales de sedimentación de las diferentes partículas.

Que a muy corta distancia viajada, las partículas tengan la posibilidad de alcanzar su velocidad de sedimentación terminal.

El tiempo que cada partícula necesita para alcanzar la velocidad de sedimentación terminal y el desplazamiento necesitado para alcanzarla.

En las gráficas adjuntas se puede observar para condiciones laminares (Stokes) y condiciones turbulentas (Newton) el tiempo necesario para alcanzar la velocidad terminal para diferentes tamaños de partícula.



Efecto del tamaño en la separación gravimétrica

Se observa que las partículas muy pequeñas alcanzan la velocidad terminal mucho antes que las partículas más gruesas (0.001 y 0.4 s).

Si las partículas no alcanzan sus velocidades terminales, las distancias de separación entre ellas se ve reducida (concentración complicada).

La siguiente tabla resume lo obtenido con la gráficas, donde se puede observar que la distancia de separación se incrementa para tamaños grandes con un criterio de concentración alto:

Tamaño partícula (mm)	Criterio Concentración (C.C.)	Diferencia entre velocidad terminal (m/s)	Distancia separación (mm)	Tiempo necesario para alcanzar velocidad terminal partículas pesadas (s)	Distancia alcanzada después de 1 s (mm)
0.050	1.10	0.0002	0.0009	0.0018	0.24
	1.25	0.0006	0.0036	0.0025	0.60
	1.50	0.0012	0.0050	0.0025	1.17
	1.75	0.0018	0.0064	0.0025	1.75
	2.50	0.0035	0.0195	0.0040	3.49
6.35	1.10	0.028	8.80	0.32	27.6
	1.25	0.068	21.60	0.32	67.6
	1.50	0.127	54.60	0.34	127.3
	1.75	0.182	88.20	0.36	182.3
	2.50	0.329	177.00	0.40	329.2

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)



Equipos gravimétricos

Las operaciones gravimétricas se basan en fomentar que las partículas sean situadas en capas de partículas densas y partículas ligeras.

Los mecanismos para llegar a conseguir esa distancia entre partículas es el que define a los diferentes equipos y técnicas gravimétricas disponibles:

Pulsadoras (Jigs): Genera ciclos de expansión y contracción de las partículas de mineral por medio de pulsos de un fluido.

Mesas de sacudidas: Hace uso de un movimiento cíclico horizontal sobre la pulpa mineral para provocar un fluidizado de la mezcla provocando su estratificación.

Lámina fluyente: Provoca la sedimentación por gravedad de las partículas a través de flujos de pulpa que se introducen en canales inclinados.



(Cortesía: McNally – Metso Minerals)



(Cortesía: Holman-Wilfley)



Pulsadoras o Jigs

Lleva a cabo la estratificación de las partículas a través de ciclos de pulsación de una corriente vertical de fluido.

Durante los ciclos en los que la pulsación cesa, se permitirá a las partículas sedimentar bajo la influencia de la gravedad.

En la siguiente figura se representa un ciclo completo de una pulsadora que favorece los periodos de expansión y contracción de la cama de material.



Cama en reposo







Sedimentación obstaculizada (contracción)



(Fuente: Gupta and Yan, 2016)



Pulsadoras o Jigs

Los ciclos varían entre 50 y 300 cpm.

En el inicio de la sedimentación inicial, las partículas descenderán con una aceleración, antes de alcanzar la velocidad terminal, dada por:

$$a_{P} = g \cdot \frac{\rho_{S} - \rho_{F}}{\rho_{S}}$$

Aceleración inicial: Durante los primeros milisegundos, la sedimentación de las partículas estará será influenciada por la densidad y no tanto su tamaño.

Resultado: se favorece la separación entre las partículas densas de las ligeras.

El mantenimiento de las condiciones de aceleración se mantiene con ciclos muy cortos y de alta frecuencia para evitar que las partículas alcancen la velocidad terminal.

No obstante, también es preferible proporcionar una alimentación bien calibrada para permitir ciclos más largos ya que el comportamiento de estratificación de los tamaños gruesos mejora.



Pulsadoras o Jigs

Con ciclos de pulsación y compactación más largos, las partículas alcanzan la velocidad terminal (a=0).

La separación y posterior estratificación estará gobernada por la influencia de la densidad y el tamaño de las partículas.

Un pulso fuerte hará que las partículas finas y ligeras alejarlas de las densas, pero a la vez permitiendo la sedimentación de las más densas.





Pulsadoras o Jigs

Durante la sedimentación obstaculizada (*hindered settling*), la separación es más evidente sobre las partículas gruesas, donde el efecto de la densidad, tamaño y forma es evidente.

Durante la fase de avance intersticial o percolación (*consolidation trickling*), las partículas finas densas son las únicas que avanzan por los huecos que forman las gruesas.

De lo anterior se deduce que la determinación de la frecuencia de los ciclos y el control de los eventos son críticos para una correcta separación.





Pulsadoras o Jigs

El periodo de pulsación que se determinará viene dado por la siguiente expresión:

$$T = 2 \cdot t = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Siendo:

T = Periodo de la pulsación o tiempo para un ciclo completo

t = Duración del impulso (stroke: mitad del ciclo)

L = Distancia entre el punto de pivote y el centro de oscilación

Si la anterior expresión no se siguiera se podrían generar tensiones en las paredes de la pulsadora y una disminución de su eficiencia.



Pulsadoras o Jigs

La longitud del golpe de pulsación (stroke) se puede calcular a través de:

 $\nu = \frac{N \cdot a \cdot \pi}{60}$

Siendo:

v = Velocidad del agua para suspender la cama de mineral

N = Número de impulsos (strokes) por minuto

a = Amplitud de los impulsos

La siguiente tabla muestra algunos datos de operación para diferentes tipos de pulsadoras.

Pulsadora	Tamaño partícula (mm)	Amplitud (mm)	Frecuencia (Hz)
Baum	5-200	30-40	30-60
Batac	0.5-100	30-60	40-60
Diaphram	0.25-25	20-30	125-150
Diaphram	0.2–10	10-15	150-200

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)



Tipos de pulsadoras

El empleo de las pulsadoras es fundamentalmente para la limpieza del carbón.

Aunque también se le conocen aplicaciones con otros minerales como la recuperación de oro aluvial.

La pulsadora dispondrá de una cuba (*hutch*) llena de agua con una rejilla o criba colocada en la parte superior.

La descarga de los pesados puede seguir dos métodos: a través de la criba por la parte inferior de la cuba o sobre la criba lateralmente.

El tanque de la pulsadora se divide en dos zonas, la cuba con el agua y la zona donde se genera el pulso del fluido.



(Fuente: Wills and Finch, 2017)



Tipos de pulsadoras

El empleo de las pulsadoras es fundamentalmente para la limpieza del carbón.

Aunque también se le conocen aplicaciones con otros minerales como la recuperación de oro aluvial.

La pulsadora dispondrá de una cuba (*hutch*) llena de agua con una rejilla o criba colocada en la parte superior.

La descarga de los pesados puede seguir dos métodos: a través de la criba por la parte inferior de la cuba o sobre la criba lateralmente.

El tanque de la pulsadora se divide en dos zonas, la cuba con el agua y la zona donde se genera el pulso del fluido.



(Fuente: Wills and Finch, 2017)

(Partículas finas pesadas)



Tipos de pulsadoras

El empleo de las pulsadoras es fundamentalmente para la limpieza del carbón.

Aunque también se le conocen aplicaciones con otros minerales como la recuperación de oro aluvial.

La pulsadora dispondrá de una cuba ^(Cortesía: McNally – Metso Minerals) (*hutch*) llena de agua con una rejilla o criba colocada en la parte superior.

La descarga de los pesados puede seguir dos métodos: a través de la criba por la parte inferior de la cuba o sobre la criba lateralmente.

El tanque de la pulsadora se divide en dos zonas, la cuba con el agua y la zona donde se genera el pulso del fluido.





(Fuente: Wills and Finch, 2017)



Tipos de pulsadoras

Sobre la criba se suele colocar una cama de partículas calibradas pesadas (ragging).

Su función será la de impedir el paso de las partículas ligeras a través de la criba.

El "ragging" podrán ser bolas de plomo (oro) o acero (casiterita), fragmentos calibrados de feldespato (carbón) o hematites (casiterita y blenda).

En pulsadoras con grandes tanques, dispondrán de varios compartimentos donde el ragging se mantiene gracias a la instalación de laterales.

A través de la criba de cada compartimento se obtendrá un producto con diferente ley y recuperación.



Métodos de extracción de pesados a través de la criba



Ragging (bolas de plomo)

(Fuente: www.engineeringclicks.com)



Tipos de pulsadoras

Para tamaños de alimentación superiores a la abertura de la criba, la descarga de los densos se lleva lateralmente sobre la criba.

Se emplean sensores para controlar el espesor de los densos sobre la criba que actúan sobre la abertura de descarga.

En la limpieza de carbones, la fracción ligera será el carbón y la densa será el estéril.

En la concentración de minerales, la fracción densa será el mineral que interesa y la fracción ligera será el estéril.

Alimentación Ligeros Densos (Cortesía: Allmineral) Pulsación provocada por aire Descarga depósitos Entrada de aire Válvula de control Válvula de mariposa Alimentación Ligeros Piso Entrada aire para generar pulsación Columna de descarga Hutch Pesados medios Hutch Discharge Valve Pesados Pulsadora Apic (Tenova Delkor) (Cortesía: Tenova Delkor)

Pulsadora Alljig (tipo BAUM)



Pulsación

La pulsación del fluido (agua o aire) a través de la cama de mineral se genera por medio de diafragmas elásticos, pistones o cámaras de aire a presión.

Los modelos BAUM y BATAC son pulsadoras extensivamente utilizadas en el procesado de carbones empleando cámaras de aire a presión.

Los equipos actuales emplean sistemas de ajuste automático de las pulsaciones en base al espesor de la cama de mineral.

Cada compartimento puede ser regulado de forma independiente.



Pulsadora Batac (MBE Coal and Mineral Technology GmbH) (Cortesía: MBE CMT)



(Cortesía: MBE CMT)



Pulsación



Sistema de control de descarga (Pulsadora BATAC)

(Cortesía: MBE Coal and Minerals Technology GmbH)



Pulsadoras tipo Inline Pressure Jig (IPJ)

Emplean el principio de la pulsación pero a través de una cámara presurizada (200 kPa).

La criba es móvil y circular (cama de mineral).

La cámara presurizada está llena completamente de pulpa mineral y agua.

Un brazo mecánico movido hidráulicamente actuará sobre la criba produciendo las pulsaciones.

Se caracteriza por alcanzar capacidades de hasta 110 t/h.

Procesa tamaños de alimentación de hasta 30 mm.





Pulsadoras tipo Inline Pressure Jig (IPJ)

Emplean el principio de la pulsación pero a través de una cámara presurizada (200 kPa).

La criba es móvil y circular (cama de mineral).

La cámara presurizada está llena completamente de pulpa mineral y agua.

Un brazo mecánico movido hidráulicamente actuará sobre la criba produciendo las pulsaciones.

Se caracteriza por alcanzar capacidades de hasta 110 t/h.

Procesa tamaños de alimentación de hasta 30 mm.

(Cortesía: Gekko Systems)

Inline Pressure Jig (Gekko Systems)





Pulsadoras Centrífugas

Fueron introducidas por Kelsey en 1990, incorporando una fuerza centrífuga a la pulsación.

La pulsadora centrífuga Kelsey aplica una acción centrífuga de hasta 40 veces la aceleración gravitatoria.

Permite llegar a separaciones de tamaños de partícula de hasta 40 micras.

La Kelsey utiliza el diseño Harz que divide la pulsadora en dos partes:

La parte superior del ragging formada por las partículas pesadas.

Y la cámara de la pulsadora llena de agua y pulsada por un diafragma movido mecánicamente.

La cuba y la criba se encuentran en una disposición de 90° y girando respecto de la vertical.



(Cortesía: Kelsey Jig)





Operación de las pulsadoras

Taggart da una estimación del consumo de potencia para una pulsadora:

$$P = 7310.16 \cdot A \cdot \sqrt{d}$$
 (vatios)

Siendo:

P: Potencia en vatios

A: Área de la criba en m²

d: Tamaño de alimentación en m

Además, algunas variables y su efecto en los resultados operacionales de las pulsadoras son:

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

Variable	Valor	Efecto sobre el resultado de la pulsadora
Densidad de las bolas (ragging)	Se incrementa	Reduce el flujo de la fracción pesada
Tamaño de las bolas (ragging)	Se incrementa	Incrementa el flujo de la fracción pesada
Espesor de las bolas (ragging)	Se incrementa	Reduce el flujo de la fracción pesada
Contaminación (ragging)	Se incrementa	Reduce el flujo de la fracción pesada
Tamaño alimentación	De 50 micras a 20 mm	Rango normal en la separación de minerales
Tamaño alimentación	De 0.5 mm a 200 mm	Rango normal en la limpieza de carbones
Capacidad	De 17 a 25 t/h/m2	Normal para la concentración de estaño
Capacidad	De 30 a 60 t/h/m2	Normal para la limpieza de carbones
% sólidos	De 30 a 50%	Condiciones normales de operación
Agua en la cuba (hutch)	Se incrementa	Incrementa el ratio de enriquecimiento (ley)
Agua en la cuba (hutch)	Se incrementa	Incrementa la recuperación al máximo



Mesas de sacudidas

Han cambiado muy poco desde que aparecieron al comienzo del siglo XIX.

Los equipos actuales permiten hasta tres piso o tableros para incrementar la producción.

Se usan normalmente en etapas de limpieza debido a su baja capacidad de tratamiento.

Consiste en un tablero ligeramente inclinado al que se le imprime un movimiento cíclico de avance y retroceso perpendicular a la pendiente.

Disposición triple de mesas de sacudidas





Mesas de sacudidas

Presentan unos listones o largueros denominados "riffles".

Los listones empiezan con alturas que pueden llegar a los 10 mm y finalizar en los 2 mm.

El movimiento horizontal se caracteriza por un avance lento y un retorno rápido.

Su uso se encuentra, al igual que cualquier equipo de separación gravimétrica, en la industria del carbón, minerales pesados y la industria del reciclado.



(Fuente: Gupta and Yan, 2016)



Mesas de sacudidas

Capacidades típicas son 2 t/h con un contenido del 40% de sólidos.

Rango de tamaños de 1.65 x 0.074 mm (minerales) y 6.7 x 0.15 mm (carbones).

Se emplean para la recuperación de oro, estaño, partículas metálicas pesadas, carbones y reciclado.

Algunos suministradores conocidos son Deister Concentrator LCC, Holman-Wilfely o Gemeni.



Mesas de sacudidas. Variables de operación

En la siguiente tabla se indica algunas de las variables de operación y su efecto sobre los resultados obtenidos:

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

Variable	Valor	Efecto
Forma tablero	Diagonal	Incremento capacidad Incremento ley Flujo menor de medios Separación de tamaños más finos
Listones	Tablero parcial Tablero completo	Trabajos de limpieza Tratamiento aliment. sin clasificar Trabajos de desbaste Tratamiento aliment, clasificado
Capacidad alimentación	2 t/h 0.5 t/h	Para tamaños tipo arena 1.5 mm Para tamaños tipo limo -150 micras
Velocidad y sacudidas	15 t/h 260–300 sacudidas/min 12–25 mm	Para minerales gruesos
	280-320 sacudidas/min 8-20 mm 260-285 sacudidas/min	Para minerales finos Para carbón
	20-35 mm	
Pendiente (longitud) e inclinación (transversal)	11-25 mm/m 20-25 mm/m	Para tamaños arena gruesa
	9–15 mm/m 15–30 mm/m	Para tamaños arena media
	2–9 mm/m 8–20 mm/m	Para tamaños arena fina
	1–7 mm/m 4–12 mm/m	Limos
Ratio agua/sólidos	20-25% (masa) 33-40% (masa)	Separación de minerales Separación de carbones



Mesas de sacudidas. Ajustes de operación

En la siguiente tabla se indica los ajustes a aplicar según el tipo de trabajo:

Tipo de trabajo (duty) Condiciones de operación (settings) Roughing (Desbaste) Increase water flow (Incrementar el flujo de agua) Increase feed rate (Incrementar el ratio de alimentación) Increase tilt (Incrementar la pendiente del tablero) Increase stroke (Incrementar la carrera de la sacudida) Use fully riffled deck (Tablero completo de listones) Cleaning (Limpieza) Decrease water flow (Reducir el flujo de agua) Decrease feed rate (Reducir el ratio de alimentación) Decrease tilt (Reducir la pendiente del tablero) Decrease stroke (Reducir la carrera de la sacudida) Use partially riffled deck (Tablero parcial de listones) Fine feed (Alimentación con tamaño fino) Decrease water flow (Reducir el flujo de agua) Decrease feed rate (Reducir el ratio de alimentación) Increase speed (Incrementar la velocidad) Decrease stroke (Reducir la carrera de la sacudida) Use low profile riffles (Emplear listones bajos) Coarse feed (Alimentación con tamaño grueso) Increase water flow (Incrementar el flujo de agua) Increase feed rate (Incrementar el ratio de alimentación) Decrease speed (Reducir la velocidad) Increase stroke (Incrementar la carrera de la sacudida) Use high profile riffles (Emplear listones altos) PMP2021

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)



Concentradores de lámina fluyente

Consiste en utilizar una lámina fluyente para llevar a cabo los fenómenos de sedimentación y separación.

Una lámina de agua circulando sobre una superficie lisa, y en pendiente, presentará un gradiente de velocidades parabólico.

Las partículas alcanzarán posiciones diferentes sobre la superficie del fondo, dependiendo de la velocidad de sedimentación (densidad y tamaño).

Las partículas situadas en el fondo, serán desplazadas en función de su tamaño.

Las partículas planas presentan más dificultades de separación.



Trayectoria de las partículas dentro de una lámina fluyente



Tipos de fuerza sobre una partícula sumergida en régimen laminar





Canales

Los canales es la implementación más simple del principio de separación de la lámina fluyente.

Consisten en canalones inclinados abiertos en sus extremos y alimentados por sólidos y agua.

La separación de las partículas se producirá sobre la superficie inclinada del canalón (segregación sobre los largueros).

Los canalones, inicialmente eran de madera y actualmente pueden ser de materiales plásticos o metálicos con longitudes de hasta 100 metros.







Canales

Actualmente, los canales pueden disponer de diferentes diseños de obstáculos (largueros, rejillas, hidráulicos).

Para recuperación de oro, se fabrican con tamaños de 5 x 12 metros.

El control de la separación se lleva a cabo sobre la pendiente del canalón, el espesor de la lámina de agua, la rugosidad del fondo y la diferencia de densidad de las partículas.

Es un proceso discontinuo que obligará a parar para realizar la extracción del material acumulado en el fondo del canal.



(Fuente: MSI Gold Mining Equipment)



(Fuente: Pinterest)



Espirales tipo Humphreys

Aparecieron en 1943 en Oregón (EEUU) para separar las arenas ricas en cromo.

La separación se produce como resultado de un patrón generado de flujo.

El diseño del canalón o bandeja de la espiral influye en la forma de la separación.

Las partículas ligeras son transportadas por el agua hacia la zona externa.



(Cortesía: Multotec)





Espirales tipo Humphreys

Se emplean aberturas o divisores (splitters) para extraer las partículas pesadas que circulan por la zona interior.

Se emplean para la concentración de minerales ricos en cromo, hierro o arenas extraídas de depósitos tipo placer.

Se fabrican en fibra de vidrio a la que se le proyecta una capa de poliuretano.

Algunos fabricantes son Mineral Technologies, Multotec, Outotec (Metso) y FLSmidth (Krebs spirals).

(Cortesía: Multotec)



(Cortesía: Multotec)





Espirales tipo Humphreys

Se presentan en módulos de 12 o 48 columnas, pudiendo ser espirales simples, dobles o triples.

Pueden llegar a procesar 150 t/h.

Suelen alcanzar un ratio de concentración de 3:1 (fracción pesada/ley alimentación).

Se requerirá repetir el tratamiento sobre los minerales.

Un contenido superior al 5% de tamaños tipo limo (-45 micras) en la alimentación afecta a la eficiencia de la separación.

En la siguiente tabla se presentan algunas variables de operación y su efecto en el resultado.

(Fuente: Gupta and Yan, 2016)

Variable	Valor	Efecto en la operación de la espiral
Tamaño alimentación	0.075–3 mm	Tamaño óptimo para carbón
	0.045-0.85 mm	Rango de tamaño para minerales
Capacidad	1–5 t/h	Capacidad de diseño
% Sólidos en	20-30% sólidos (peso)	Menos para arenas finas
alimentación	Hasta un 50% (peso)	Para alimentación gruesa
Contraction (Contraction (Contr	Alto % sólidos Bajo % sólidos	Alta recuperación mineral de baja ley Alta ley del concentrado
Posición separadores	Dependerá del tipo de alimentación y las	
(splitters)	condiciones de trabajo	PMP2021



Cono Reichert

Fue desarrollado en Australia en los 60 para tratar arenas ricas en minerales pesados.

Sigue el principio de concentración de lámina fluyente de los canales.

Se fabrican en fibra de vídrio con diámetros entre 2 y 3.5 m y montados en estructuras de hasta 6 metros de altura.

Se emplean para el tratamiento de arenas aluviales y de placeres para la recuperación de oro, estaño y otros minerales pesados.

(Fuente: Shutterstock)





Cono Reichert

Su capacidad se mueve entre 40 y 300 t/h.

Contenido de partículas en la alimentación entre el 55 y el 70%.

Los tamaños de alimentación pueden ir de las 30 micras a los 3 mm.

Las mayores eficiencias se dan en el rango de tamaños de entre 100 y 600 micras.

La eficiencia es relativamente baja por lo que los minerales necesitan varias pasadas (multietapas).







Separadores centrífugos. Introducción

Aparecieron en 1980.

Hacen uso de las ventajas combinadas de la lámina fluyente y de la acción centrífuga.

Pueden recuperar concentrados con un tamaño de partícula de hasta 6 micras.

Actualmente, se agrupan según el eje de rotación:

Concentradores de eje vertical: Falcon, iCON, Knelson, y Gekko inline spinner.

Concentradores de eje horizontal: Multigravity separator (MGS).



(Cortesía: Knelson - FLSmidth)



(Cortesía: Axsia Mozley)



Separadores centrífugos de eje vertical

Llevan años empleándose en el tratamiento de las arenas aluviales metalíferas.

Pueden encontrarse unidades instaladas en plantas flotantes de dragado y tratamiento de arenas aluviales.

Se componen de un tazón troncocónico de un diámetro superior a 91 cm y que gira a más de 400 rpm.

Cortesía: Falcon Concentrators)



Se generan en el interior acciones gravitatorias de 60 g's.

La pared interna el tazón está dotada de un estriado (riffles) que retendrá el avance de las partículas pesadas.

Las partículas ligeras se recogerán por la parte superior y las pesadas por la inferior.



Separadores centrífugos de eje vertical

Las unidades actuales operan de forma ininterrumpida.

Se avanzado en el diseño de los resaltes o anillos internos.

Su empleo está muy extendido en la recuperación de oro aluvial y arenas ricas de minerales metálicos pesados.

Otras aplicaciones son la recuperación de partículas finas de carbón y el tratamiento de residuos de estériles mineros.

Equipos comerciales tenemos: Knelson (FLSmidth), iCON, Falcon (Sepro Mineral Systems), y Gekko Inline Spinner (Gekko).



(Cortesía: Sepro Mineral Systems) Concentrador en continuo Falcon



Separadores centrífugos de eje vertical

Las unidades actuales operan de forma ininterrumpida.

Se avanzado en el diseño de los resaltes o anillos internos.

Su empleo está muy extendido en la recuperación de oro aluvial y arenas ricas de minerales metálicos pesados.

Otras aplicaciones son la recuperación de partículas finas de carbón y el tratamiento de residuos de estériles mineros.

Equipos comerciales tenemos: Knelson (FLSmidth), iCON, Falcon (Sepro Mineral Systems), y Gekko Inline Spinner (Gekko).



(Cortesía: Knelson (FLSmidth))





Separadores centrífugos de eje horizontal

Se caracterizan por un tambor giratorio inclinado entre 0° y 9° con una velocidad de 100 – 280 rpm.

Generan fuerzas centrífugas de 15 g's.

El tambor está dotado por barras longitudinales equipadas con rascadores (scrappers).

Los rascadores raspan ligeramente la superficie recogiendo las partículas pesadas y llevándolas a la salida de concentrado.

Se añade agua de limpieza para favorecer el transporte de los ligeros hasta su salida (salida de ganga).



(Cortesía: Salter Cyclones)





Separadores centrífugos de eje horizontal

Los tambores se les somete a una vibración de entre 4 y 6 cps.

Mozley suministra modelos de varios tamaños.

Desde tamaños de laboratorio hasta el modelo MeGaSep de 9600 x 2000 mm.

(Cortesía: Axsia Mozley)





Multy-gravity separator (MGS)

PMP2021

(Fuente: SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook, 2019)



Referencias para consulta:



euitc

Universidad Politécnica de Cartager

Ejercicios Resueltos de Tecnología Mineralúrgica



Pedro Martínez Pagán Dr. Ingeniero de Minas rai





Minerals and Coal Process Calculations

D.V. Subba Rao





EUROPEAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

OCW UPCT TECNOLOGÍA MINERALÚRGICA, 2ª ed. (2020) URL: https://ocw.bib.upct.es/course/view.php?id=178





SME **MINERAL PROCESSING & EXTRACTIVE METALLURGY** HANDBOOK

VOLUME ONE & TWO

MANAGING EDITOR: ROBERT C. DUNNE EDITORS: 5. KOMAR KAWATRA & COURTNEY & YOUNG

SME