

Separación Magnética y Electrostática

El Método Magnético

INTRODUCCIÓN

La existencia de los fenómenos magnéticos y electrostáticos es el algo que el hombre ya conocía desde los tiempos del filósofo y matemático griego Tales de Mileto, quién vivió alrededor del año 600 a.C. Tales de Mileto sabía de la existencia de unos minerales con propiedades magnéticas conocidos como calamita o piedra imán (en inglés, “*lodestone*”). Tales también era consciente de que al frotar una piel de animal con una barra de ámbar, la piel (o la barra de ámbar) era capaz de atraer diminutas partículas no-conductoras debido a la carga electrostática adquirida por la superficie.

Sin embargo, el primer registro histórico que se tiene, sobre una separación magnética de mineral, data de una patente de 1792 realizada por el inglés William Fularton que describe como concentrar el mineral de hierro. Por otro lado, en 1886, el estadounidense F.R. Carpenter presentaría una patente para la concentración de mineral a través del método electrostático.

El empleo de los separadores magnéticos se ha extendido más allá de un simple uso para la eliminación de piezas metálicas desprendidas de los equipos situados en etapas primarias o anteriores. Así, los últimos desarrollos tecnológicos ha permitido la aparición de separadores magnéticos industriales de alta intensidad y de alto gradiente ofreciendo intensidades de campo de hasta 6 Teslas, T, (60000 gauss). Además, el desarrollo de imanes de tierras raras y de superconductores ha abierto nuevos mercados para el uso de esta tecnología de concentración.

El método de separación electrostática sigue siendo todavía la técnica más económica y adecuada para el procesado de los depósitos de arenas ricos en minerales pesados como la *ilmenita*, el *rutilo*, el *leucoxene* (compuesto principalmente por *rutilo* o *anatasa*, óxidos de Fe-Ti), el *circón*, y el *granate*. Destacar que debido a una mayor conciencia medioambiental se están

El método de separación magnética y electrostática

suministrando unidades para el procesado de materiales secundarios, como es el empleo de técnicas electrostáticas para separar el plástico del metal en las plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos.

Por último, señalar que los separadores triboelectrostáticos se están empleando para separar sustancias no conductoras, tanto en la industria mineral como en la industria del reciclado de plásticos.

TEORÍA DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Los separadores magnéticos aprovechan la diferencia que los minerales presentan respecto a sus propiedades magnéticas. De este modo, se emplean para separar los minerales (Tabla 1) y obtener diferentes productos clasificados según su importancia comercial y de uso industrial. De esta forma, los separadores podrán emplearse para separar un producto magnético de alto valor de otro considerado como ganga que sería eliminado como estéril (por ejemplo, separar la magnetita del cuarzo). O bien, separar un mineral magnético de otros minerales no magnéticos (por ejemplo, obtener wolframita o magnetita a partir de minerales de estaño (casiterita)).

En general, se puede decir que todas las sustancias se ven afectadas al ser sometidas a la acción de un campo magnético, sin embargo, algunas sustancias presentarán un efecto demasiado débil como para ser detectado.

Todos los materiales se pueden clasificar atendiendo a sus propiedades magnéticas. Así tenemos:

Los minerales "*paramagnéticos*" que son atraídos hasta los puntos de mayor intensidad magnética y a lo largo de las líneas de fuerza magnética. Los minerales de este grupo pueden ser concentrados con el uso de separadores magnéticos de alta intensidad (conocidos en inglés como "*HIMS*"). Ejemplos de este tipo de minerales: ilmenita (FeTiO_3), rutilo (TiO_2), wolframita ($(\text{Fe, Mn})\text{WO}_4$), monazita (tierra rara), siderita (FeCO_3), pirrotina (FeS), cromita (FeCr_2O_4), hematita (Fe_2O_3), y minerales de manganeso).

Intensidad magnética requerida (Teslas)	Mineral
0.05 – 0.50	Fuerte magnéticos: magnetita, franklinita, leucita, pirrotita
0.50 – 1.00	Moderadamente magnéticos: ilmenita, biotita, granate, wolframita
1.00 – 1.80	Débilmente magnéticos: hematita, columbita, limonita, pirolusita, rodocrosita, siderita, manganita
1.80 – 2.30	Pobrementemente magnéticos: rutilo, rodonita, dolomita, tantalita, cerusita, epidota, monacita, fergusonita, zircón, ceragirita, argentita, pirita, esfalerita, molibdenita, bornita, sheelita

Tabla 1. Intensidad magnética requerida en la separación magnética de diferentes minerales.

Los minerales “*diamagnéticos*” que serán repelidos a lo largo de las líneas de fuerza magnética hasta aquellos puntos donde el campo magnético presenta su menor intensidad de campo. Estas sustancias no pueden ser concentradas magnéticamente.

Los minerales “*ferromagnéticos*” se pueden considerar como una categoría especial de los materiales paramagnéticos. Presentan muy altas susceptibilidades magnéticas dentro de un campo de fuerzas magnéticas, y conservan cierto magnetismo (magnetismo remanente) una vez que han sido puestos fuera del alcance del campo magnético. Este tipo de sustancias pueden concentrarse con el uso de separadores magnéticos de baja intensidad (conocidos en inglés como “*LIMS*”). El principal mineral ferromagnético que se concentra magnéticamente es la magnetita (Fe_3O_4), aunque la hematita (Fe_2O_3) y la siderita (FeCO_3) se les puede someter a procesos de tostación para convertirlos en magnetita y a partir de ahí obtener una buena separación.

Fuerza magnética. Densidad de flujo magnético

Dentro de un electroimán, una carga en movimiento establecerá un campo magnético en el espacio que la rodea, y además, el campo magnético ejercerá una fuerza magnética sobre cualquier carga eléctrica moviéndose a través de él. De

El método de separación magnética y electrostática

hecho, todo fenómeno magnético surge a partir de fuerzas actuando entre cargas eléctricas en movimiento. Así, la densidad de flujo magnético B , en un punto P , como resultado de un elemento de corriente I , de longitud dL , viene expresado por la ley de Ampere como:

$$dB = K \cdot I \cdot \left(\frac{dL \cdot \sin \theta}{r^2} \right) \quad (1.1)$$

Siendo, B , densidad de flujo magnético, en tesla; K , es una constante de proporcionalidad; I , es la cantidad de corriente eléctrica, en amperios; L , es la longitud del conductor, en metros; θ , es el ángulo entre el elemento de corriente y el vector radio hacia el punto P ; y r , es la distancia a P , en metros.

La densidad del flujo magnético o inducción magnética, B , o fuerza por unidad de polo magnético, se define como el número de líneas de flujo magnético por unidad de área perpendicular a dichas líneas. La unidad del flujo magnético es el weber. La unidad de la densidad de flujo magnético B , es el *tesla* (T), o webers/m².

Los mayores valores de inducción magnética que se pueden generar en laboratorio alcanzan los 50 – 60 teslas.

Los separadores industriales con superconductores de alta intensidad alcanzan campos magnéticos del orden de 5 teslas; y un separador de tambor de baja intensidad en húmedo para la concentración de mineral de hierro presentará campos magnéticos en su superficie de 0.1 teslas. Aunque, hay que señalar que la fuerza magnética que actúa sobre las partículas minerales va a depender no sólo del valor del campo magnético B , sino también del gradiente del campo magnético, dB/dz .

Magnetización

La fuerza magnetizante que induce las líneas de fuerza a través del mineral es llamada intensidad de campo (H), o campo magnético aplicado, y por convención tiene unidades de amperio por metro ($1 \text{ A m}^{-1} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}$).

De esta forma un mineral puede ser magnetizado simplemente al colocarlo cerca de un imán permanente o haciendo pasar una corriente a través de una bobina que se encontraría enrollándolo.

El estado magnético de un mineral puede ser definido: (1) estableciendo la magnetización que presentan todos los puntos dentro de dicha sustancia, (2) definiendo la intensidad de los polos magnéticos, o (3) definiendo la magnitud de las corrientes para una superficie equivalente.

La ley de Coulomb para imanes es igual que la establecida para las cargas eléctricas, así tenemos:

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_o} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1.2)$$

Donde

F = fuerza, en Newtons.

μ_o = permeabilidad del vacío ($4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb A}^{-1} \text{ m}^{-1}$).

m_1, m_2 = intensidad de polo, en amperios por metro.

r = distancia, en metros.

La *magnetización* o *intensidad de magnetización*, M (A/m) es el momento magnético total de los dipolos por unidad de volumen, o la intensidad de polo (m) por unidad de área (A):

$$M = \frac{m}{A} \quad (1.3)$$

La intensidad de magnetización M de un material indica la magnetización inducida en dicho material cuando se encuentra bajo los efectos de un campo magnetizante, H . Dicha magnetización se sumará y resultará en un campo total B :

El método de separación magnética y electrostática

$$B = \mu_o(H + M) \quad (1.4)$$

La constante de proporcionalidad, μ_o , es la permeabilidad en el espacio libre (vacío), y tiene un valor de $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb A}^{-1} \text{ m}^{-1}$. En condiciones reales de vacío, M valdrá cero, y es extremadamente bajo en aire, por lo que la ecuación anterior (1.4) se convertirá en:

$$B = \mu_o H \quad (1.5)$$

Así el valor de la intensidad de campo es virtualmente el mismo que el valor de la densidad del flujo magnético, por lo que a raíz de esto, el término de la intensidad del campo magnético es empleado escasamente. No obstante, cuando se están tratando con campos magnéticos sobre materiales ferromagnéticos que concentran las líneas del flujo magnético, el valor de la densidad del flujo magnético (B) será mucho mayor que la intensidad del campo magnético aplicado (H) por lo que se debe indicar claramente a que término se está refiriendo.

Kelly y Spottiswood (1990) indican que el campo magnético aplicado (H) se puede expresar en función ya sea de la intensidad del campo magnético con unidades de amperes por metro (A/m), o de la densidad de flujo magnético en teslas (T). (La relación es $1 \text{ A/m} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$). La magnetización (M) se expresará normalmente en amperes por metro (A/m), mientras que la inducción magnética se expresa en teslas. Por la expresión (1.4), es obvio que H , M y B pueden expresarse todas ya sea en amperes por metro o en teslas, pero para que la ecuación sea válida, todas deben expresarse en las mismas unidades.

Susceptibilidad magnética, k

Es el cociente entre la intensidad de magnetización (M) producida en el mineral y el campo magnético que ha dado lugar a dicha magnetización (H)

$$k = \frac{M}{H} \quad (1.6)$$

Combinando las expresiones (1.4) y (1.6) se tiene:

$$B = \mu_o H(1 + k) \quad (1.7)$$

O también,

$$B = \mu_r \cdot \mu_o H \quad (1.8)$$

Siendo, $\mu_r = 1 + k$, conocido como *permeabilidad magnética relativa* y adimensional.

La permeabilidad magnética relativa de los materiales magnéticos es ligeramente menor de uno, y la de los materiales paramagnéticos es ligeramente mayor de uno. Para el caso de las sustancias ferromagnéticas, la permeabilidad relativa es muy alta (por ejemplo, para el hierro con un 0.2% de impurezas la permeabilidad relativa será de 5000).

La Fig. 1 muestra la representación gráfica de la magnetización inducida (M) frente la intensidad del campo magnético aplicado (H). La gráfica muestra las relaciones lineales entre M y H para la hematita y el cuarzo, donde la pendiente representa la susceptibilidad magnética (k); así se tendrá un valor de 0.01 para la hematita y un valor de alrededor de -0.001 para el cuarzo.

Destacar aquí que en algunos libros técnicos el valor de la susceptibilidad magnética se presenta en unidades cegesimales (c.g.s) por lo que para pasarlas a unidades del sistema internacional (S.I) habrá que multiplicarlas por 4π . Además, se la denomina susceptibilidad volúmica del objeto; siendo adimensional.

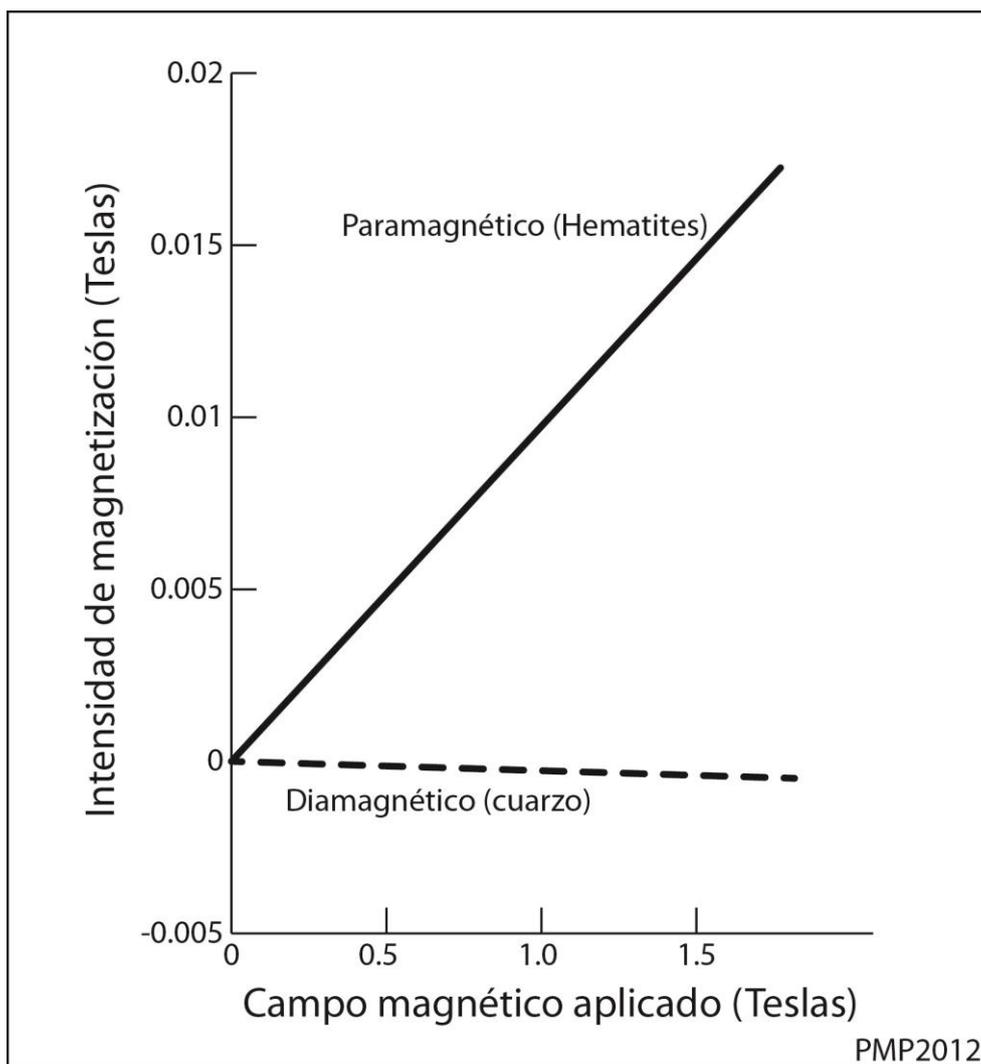


Fig. 1. Representación de la magnetización para un material paramagnético (hematita) y otro diamagnético (cuarzo) (modificado de Wills and Napier-Munn, 2006).

El valor de la susceptibilidad magnética de un material ferromagnético es dependiente del campo magnético aplicado. Así, la susceptibilidad disminuirá a medida que la intensidad de campo aumenta cuando el material va alcanzando la saturación. La Fig. 2 es una representación gráfica del comportamiento magnético de la magnetita según la variación de la intensidad de magnetización (M) y del campo magnético aplicado (intensidad de campo magnetizante, H). Cuando el valor del campo aplicado llega a 1 T la susceptibilidad magnética (la pendiente) vale 0.35, y la saturación se produce a los 1.5 T.

Algunos separadores magnéticos de alta intensidad emplean núcleos y bastidores de hierro para alcanzar intensidades y concentraciones apropiadas de flujo magnético.

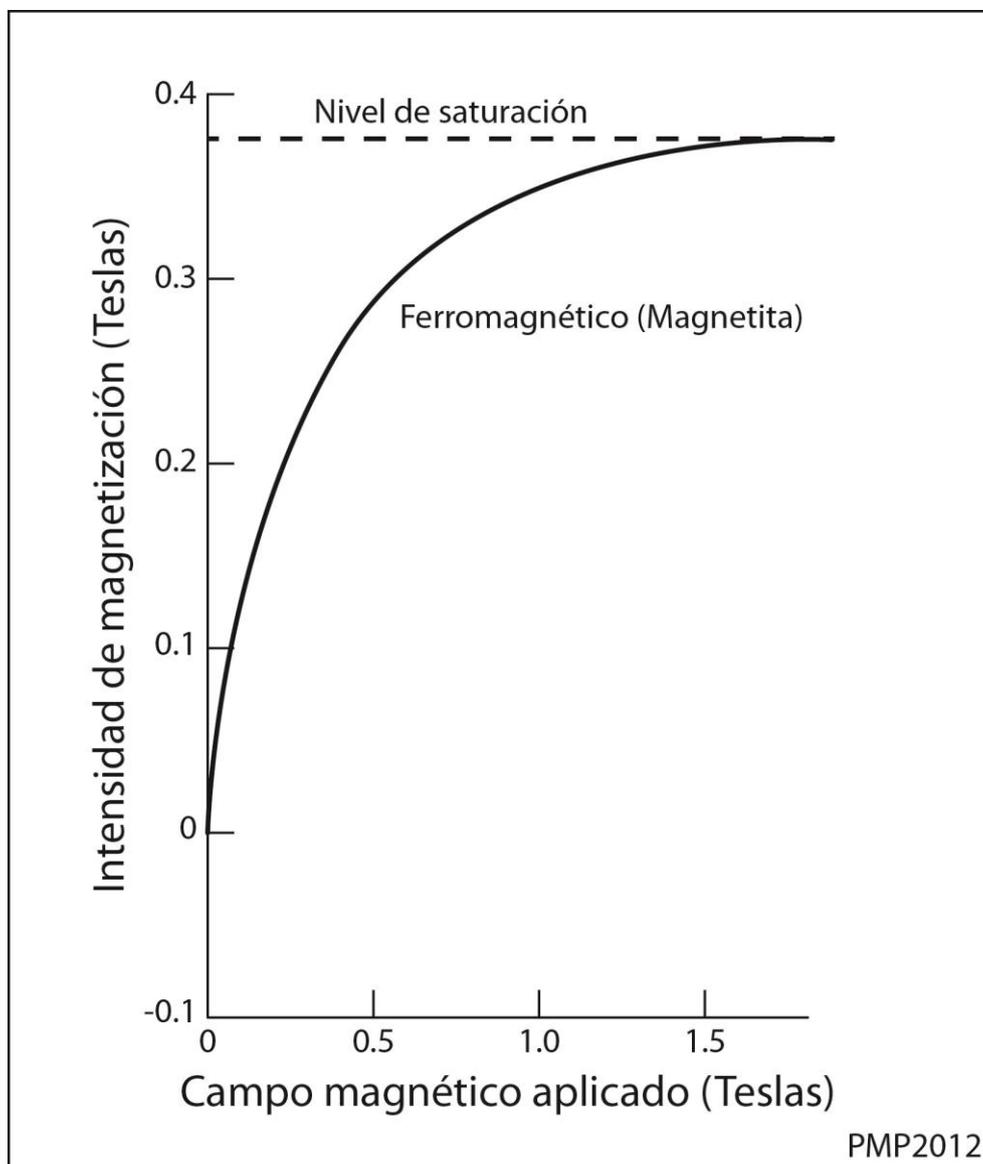


Fig. 2. Curva de magnetización para un material ferromagnético (magnetita) (modificado de Wills y Napier-Munn, 2006).

El hierro saturará en un campo de 2-2.5 T, y como consecuencia de una relación ferromagnética no-lineal (La ecuación (1.6) es lineal) entre la intensidad magnetizante (H) y la intensidad de magnetización (M), serán necesarios aplicar cientos de amperios de corriente en las bobinas inductoras (en inglés, “energising coils”).

El método de separación magnética y electrostática

La capacidad de un imán para elevar una partícula mineral de una superficie no es sólo función del valor de la intensidad de campo magnetizante sino también del valor de su gradiente, como ya se ha comentado anteriormente. Como regla general, los minerales paramagnéticos presentan valores de susceptibilidad magnética más altos que el medio que los rodea (agua o aire); por lo tanto, las líneas de flujo magnético creadas por un campo externo tenderán a concentrarse en torno a dichos minerales. Además, cuanto mayor es la susceptibilidad de un mineral, mayor será la concentración del campo en él y como consecuencia mayor será la atracción del gradiente para llevar la partícula hacia zonas de intensidad de campo creciente.

Los minerales diamagnéticos presentarán una susceptibilidad inferior que el medio que los rodea y por consiguiente en ellos se producirá una separación de las líneas de flujo provocando una repulsión de dichos minerales por la acción del gradiente, llevándolos hacia zonas de menor intensidad de campo.

La fuerza magnética, F

La expresión que da la fuerza, F , que se ejerce sobre una partícula de mineral situada dentro de un campo de intensidad magnetizante, H , y con un gradiente de dH/dl será de la forma:

$$F \propto H \cdot \frac{dH}{dl} \quad (1.9)$$

En Kelly y Spottiswood (1990) se expone el desarrollo de obtención de las expresiones de la fuerza que se genera en una matriz de bolas de acero, en una matriz de alambres finos y en la superficie de un tambor separador. Aquí sólo se presentan las expresiones finales obtenidas para coordenadas radiales (Fig. 3).

Fuerza en una matriz esférica

Se considera una esfera aislada de diámetro d_0 en un campo magnético aplicado H . La esfera desarrollará una magnetización uniforme M en este campo magnético aplicado. Las partículas que serán atraídas a esta esfera serán partículas paramagnéticas, de manera que la magnetización será pequeña y por lo tanto la inducción magnética será aproximadamente igual al valor del campo magnético

aplicado, ver la expresión (1.4). La fuerza tenderá a desplazar las partículas paramagnéticas hacia la posición más próxima de $\theta = 0$ ó $\theta = \pi$ de la esfera (Fig. 3). Es en estos puntos extremos donde se desarrollan las fuerzas magnéticas máximas, $F_{m,r}$.

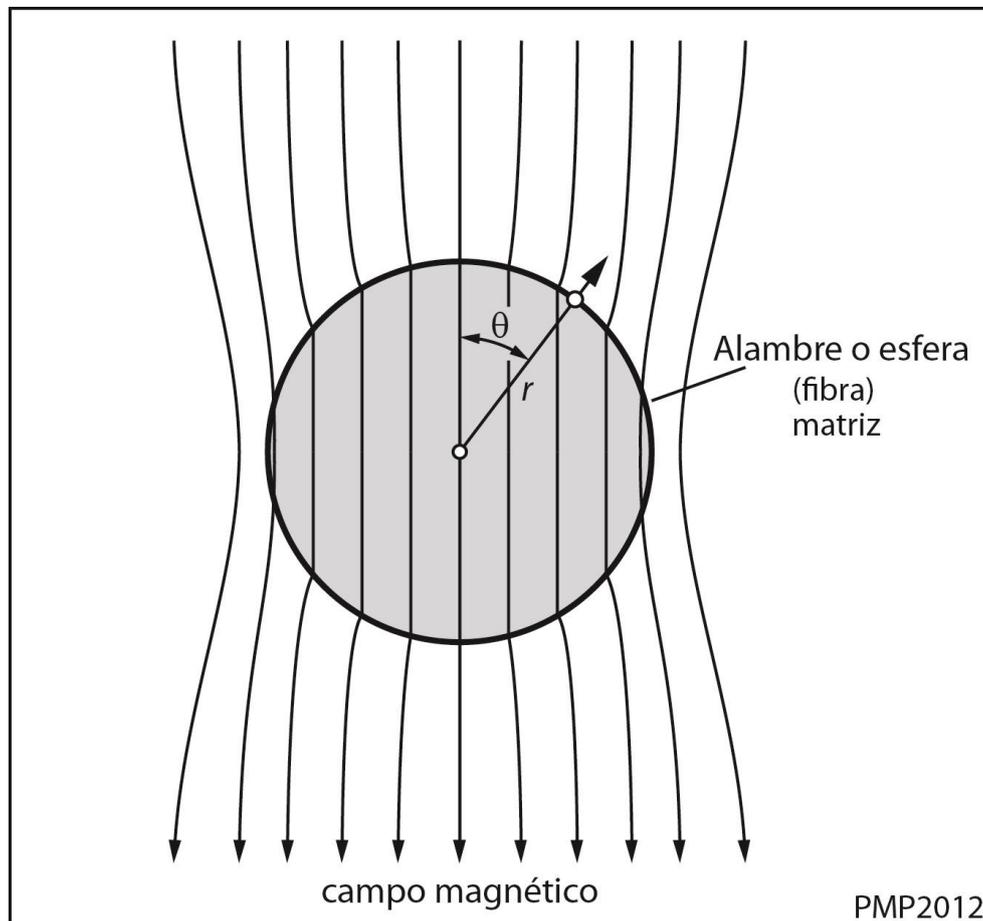


Fig. 3. Campo magnético uniforme sobre un alambre de material ferromagnético.

Esta fuerza máxima estaría dirigida hacia el centro de la esfera (o alambre) que forma la matriz del separador y la expresión que da su valor es:

$$F_{m,r} = \frac{8\pi^2}{3} d_p^3 (k_p - k_m) \frac{M}{d_o} \left(H + \frac{8\pi}{3} M \right) \quad (1.10)$$

Donde,

d_p = diámetro de la partícula paramagnética.

k_p = susceptibilidad de la partícula paramagnética.

k_m = susceptibilidad del medio que porta a la partícula.

Fuerza sobre la superficie de una matriz cilíndrica

Para el caso de un alambre fabricado con material ferromagnético y situado bajo la acción de un campo magnético aplicado H , la fuerza magnética que actuará sobre una partícula paramagnética (o ferromagnética), será proporcional al cuadrado del diámetro, d_p , de ésta (Fig. 4).

Según Kelly y Spottiswood (1990) esta fuerza magnética desarrollada en la superficie de una alambre (matriz) será máxima cuando el diámetro de la partícula a separar sea 0.37 veces el diámetro del alambre, D_w , y si la partícula está alejada de la superficie del alambre, el tamaño de la partícula sobre la cual se ejerce la fuerza máxima es inversamente proporcional a la distancia al centro del alambre que forma la matriz del separador.

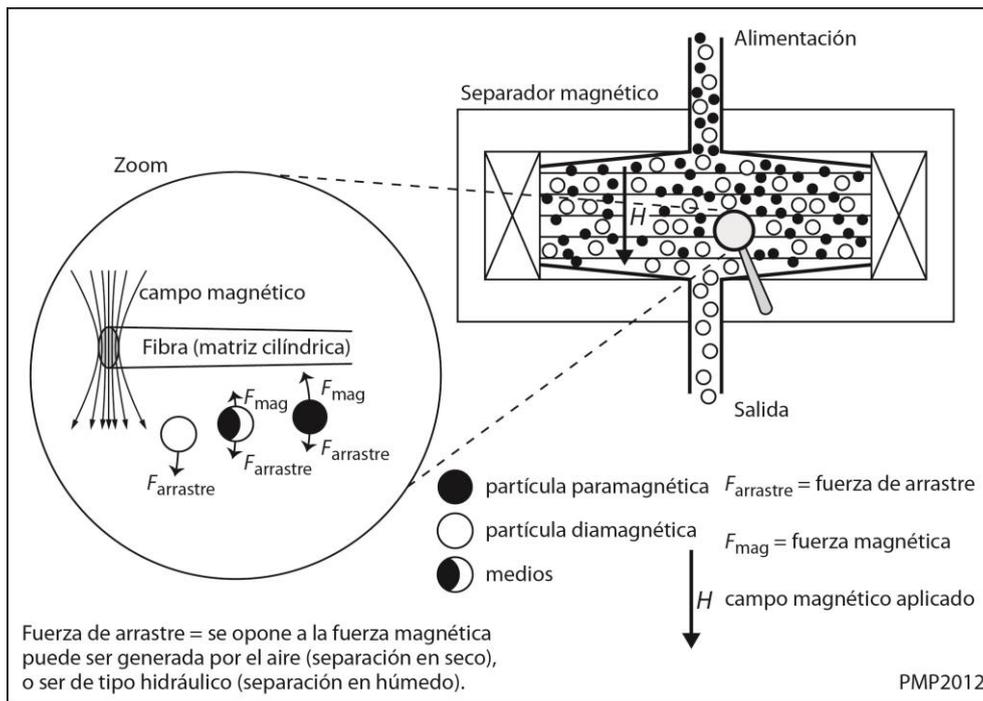


Fig. 4. Fuerza magnética desarrollada sobre partículas paramagnéticas en una matriz de fibras cilíndricas (modificado de Metso Minerals, 2010).

Así la expresión de la fuerza magnética máxima que opera sobre una partícula paramagnética cuando el diámetro de ésta, d_p , es igual a un tercio del

diámetro de la fibra cilíndrica, D_w , que estará fabricada con material ferromagnético, será igual a:

$$F_{m,\max} = 0.46(k_s - k_m)H^2d_p^2 \quad (1.11)$$

Fuerza sobre la superficie de un tambor separador

Cuando se calcula la fuerza magnética que se desarrolla en la superficie de un tambor separador (Fig. 5 y Fig. 6), se encuentra que esta fuerza será de sentido radial hacia el centro del mismo (o sea que $F_{m,\theta} = 0$), expresada en su forma general como:

$$F_{m,r} = -32\pi^2 \frac{H}{\theta_d \cdot R} \cdot e^{\frac{2\pi(r-R)}{\theta_d}} \quad (1.12)$$

Siendo:

R = radio del tambor.

r = distancia radial al centro del tambor.

θ_d = separación angular entre los polos magnéticos.

H = Intensidad del campo magnético aplicado en la superficie del tambor.

En la superficie del tambor la ecuación anterior se reduce a:

$$F_{m,r} = -32\pi^2 \frac{H}{\theta_d R} \quad (1.13)$$

Siendo independiente del tamaño de partícula.

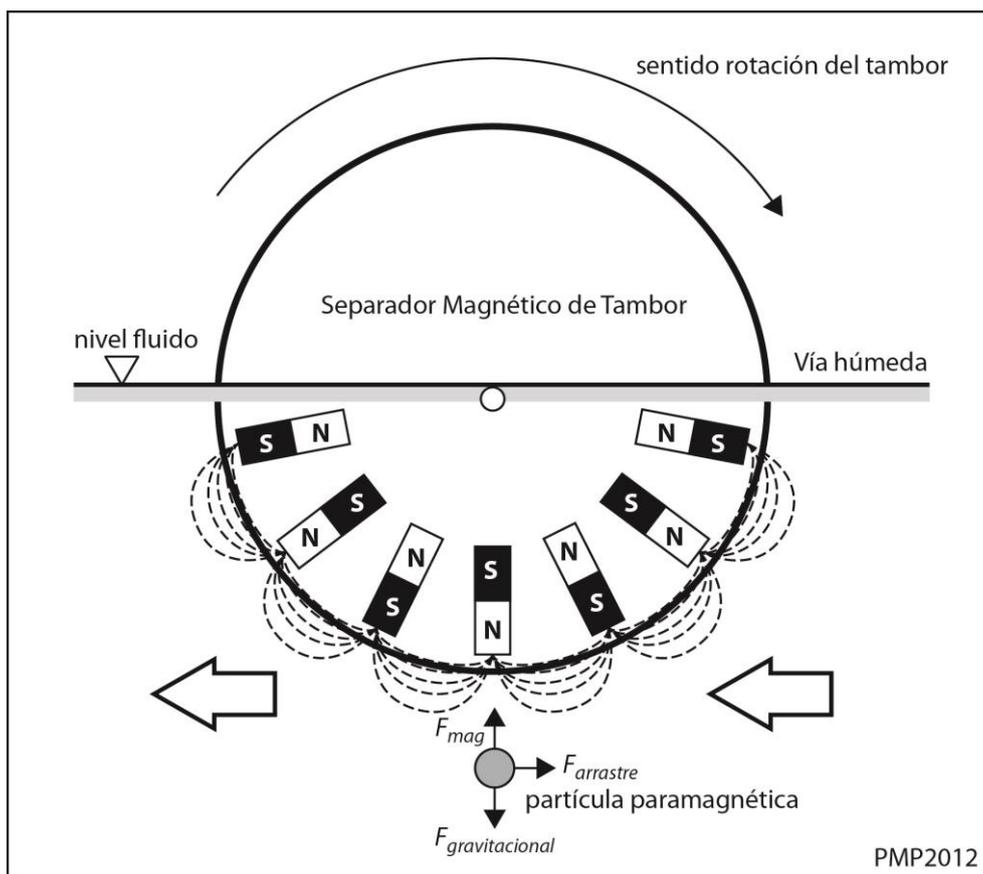


Fig. 5. Fuerza magnética desarrollada sobre una partícula paramagnética (o ferromagnética) empleando un separador magnético de tambor por vía húmeda.

Por ello, y con el fin último de generar fuerzas de atracción lo suficientemente potentes como para elevar las partículas minerales y poder separarlas de las que se consideran no magnéticas, se diseñan los circuitos magnéticos. Estos circuitos se centrarán en favorecer cualquiera de los siguientes supuestos: (a) generar un campo magnético de gran intensidad magnetizante, (b) instalar equipos que establezcan un importante gradiente magnético, o (c) una combinación de los dos puntos anteriores.

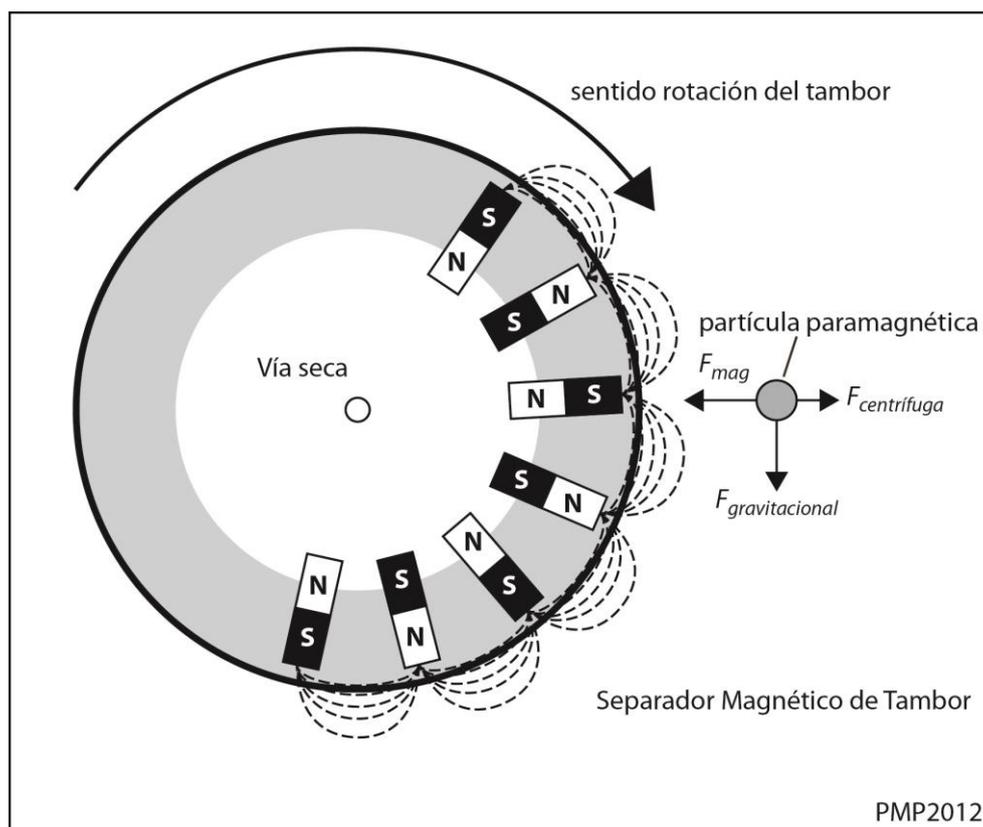


Fig. 6. Fuerza magnética desarrollada sobre una partícula paramagnética (o ferromagnética) empleando un separador magnético de tambor por vía seca.

ASPECTOS DE DISEÑO DE UN SEPARADOR MAGNÉTICO

Existen ciertos elementos en el diseño que serán comunes a todos los separadores, independientemente que éstos sean de baja o alta intensidad, o trabajen en condiciones de pulpa (vía húmeda) o en seco (vía seca). Uno de los aspectos principales a tener en cuenta, y que ya ha sido mencionado en los apartados anteriores, es el establecimiento de un campo de alta intensidad el cual presentará un gradiente pronunciado de la intensidad del campo.

En la parte izquierda de la Fig. 7 se muestra el flujo magnético establecido para un campo magnético uniforme. Bajo estas circunstancias las partículas magnéticas se reorientarán según este campo magnético pero no se desplazarán a lo largo de las líneas del flujo.

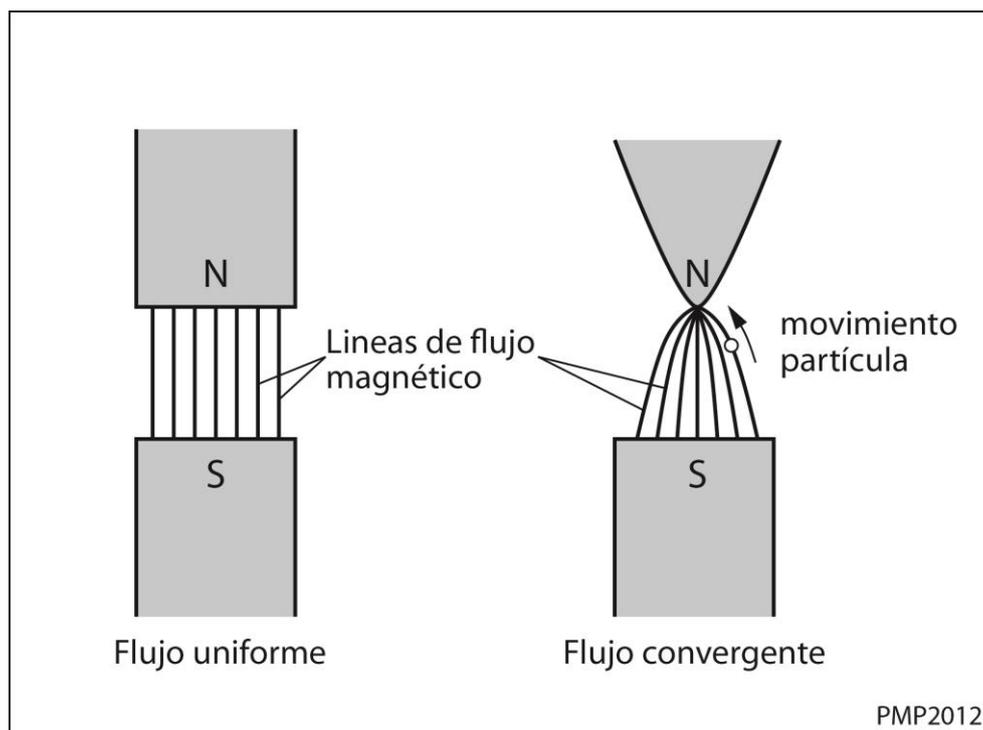


Fig. 7. Campo magnético de un flujo uniforme (izquierda) y de un flujo convergente (derecha).

En la parte derecha de la Fig. 7 se muestra un campo magnético convergente a través de la fabricación de un polo magnético con forma puntiaguda sobre otro con forma plana. Bajo estas condiciones una partícula magnética no sólo se orientará según las líneas del campo sino que será transportada hacia el punto de alta intensidad situado en el polo superior, donde se concentran las líneas del flujo magnético. Por ello, se dice que se ha conseguido crear un gradiente en el espacio existente entre los dos polos magnéticos.

Otro método de diseño para crear gradientes entre polos magnéticos opuestos es la colocación de placas o láminas no magnéticas (ver Fig. 8).

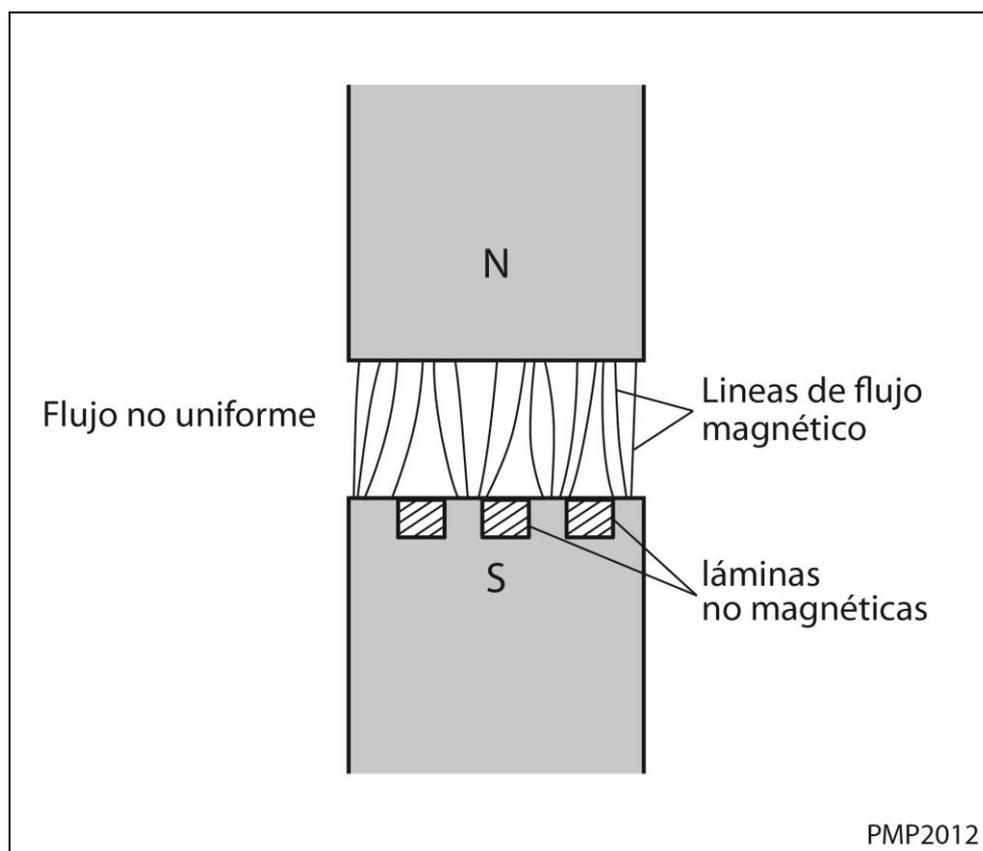


Fig. 8. Polo con láminas no magnéticas insertadas para la creación de un gradiente de campo magnético.

Otro factor a tener en cuenta durante el diseño de los separadores es prever la capacidad de regulación de la intensidad del campo según el tipo de minerales que se va a procesar. Con los separadores electromagnéticos esto es posible actuando simplemente sobre la intensidad de la corriente eléctrica que circulará por los bobinados. En equipos con imanes permanentes esta regulación se conseguirá a través de la modificación del inter-espaciado de los polos magnéticos.

Los separadores magnéticos de uso industrial controlan la velocidad de flujo de entrada de las partículas no permitiendo que ésta sea por caída libre como medio principal de alimentación. Se emplearán cintas transportadoras o tambores dotados con imanes permanentes para transportar el material a través del campo.

Un problema que deben ser capaces de evitar los separadores magnéticos es la formación de *flóculos magnéticos* o *amalgamaciones* los cuales son apiñamientos de partículas minerales pequeñas (minerales magnéticos de alta susceptibilidad) pudiendo atrapar entre ellas otras partículas de ganga (mineral no magnético). La

El método de separación magnética y electrostática

formación de los flóculos se producirá cuando entran pequeñas partículas de alta susceptibilidad que afectarán al campo que forman las líneas del flujo magnético, en el sentido de que se convertirán en puntos importantes de concentración de las mismas, y por ello, generándose microzonas de alta intensidad que actuarán como imanes, a partir de ahí estas partículas tenderán a atraerse entre ellas y agruparse formando dichas amalgamaciones magnéticas indeseables. Estas agrupaciones de flóculos son capaces de obstruir el espacio entre los polos magnéticos, al crear puentes entre ellos, y disminuir la eficiencia de los separadores.

La floculación es un problema importante en separaciones magnética por vía seca que trabajan con minerales de tamaño muy fino. Esta floculación se podría minimizar alimentando los tambores a través de una lámina mineral monocapa pero esta opción en la práctica es impensable ya que significa una reducción importante de la capacidad de la máquina.

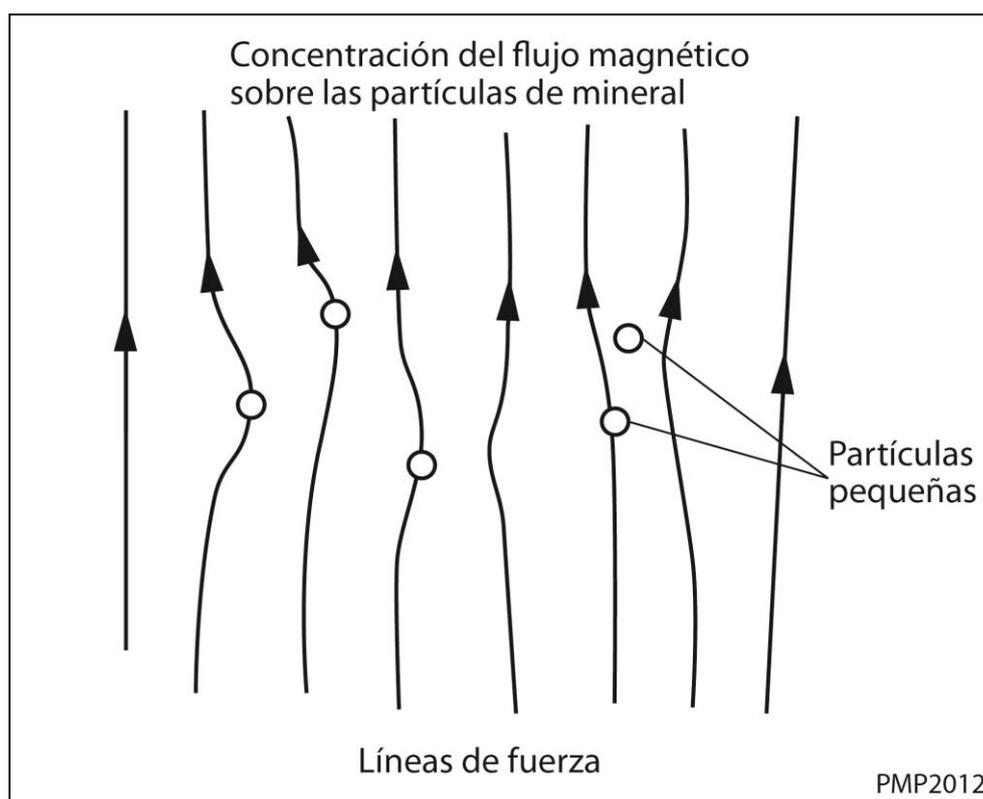


Fig. 9. Concentración de líneas de flujo sobre partículas pequeñas de alta susceptibilidad (modificado de Wills y Napier-Munn, 2006).

El fenómeno de la floculación se reduce al colocar en los tambores los imanes permanentes en una disposición que permite la inversión de la polaridad

(Fig. 5 y Fig. 6) lo que obligará a las partículas a girar 180° entre un polo y el siguiente. Estos giros bruscos favorecen la liberación de las partículas no magnéticas atrapadas en los flóculos. Un inconveniente de disponer los imanes con dicha orientación es la fuga de líneas de flujo entre un imán y el adyacente lo que debilitará el campo magnético aplicado.

Los separadores están diseñados para evitar que las partículas magnéticas atraídas a los imanes entren en contacto directo con ellos, puesto que esto crearía problemas posteriores de liberación. Es por ello, que la mayoría de los separadores atraen las partículas magnéticas a estos polos magnéticos pero quedan adheridas a la banda no magnética de un transportador en continuo movimiento. Este transportador desplazará las partículas adheridas fuera de la influencia del campo magnético aplicado causando que se despeguen por gravedad. Estas partículas caerán y serán recogidas por otros sistemas de transporte continuo.

Las partículas no magnéticas (o ganga) no presentarán problema alguno ya que caerán por gravedad a las cintas transportadoras de la fracción no magnética. De esta manera, estas partículas serán retiradas del circuito para su eliminación final.

En cuando a los medios (partículas que presentan mena y ganga sin liberar completamente) serán separados de las partículas magnéticas limpias por medio de campos magnéticos más intensos.

TIPOS DE SEPARADORES MAGNÉTICOS

En la industria del procesamiento de minerales los imanes se emplean para retirar del flujo cualquier elemento metálico que pudiera dañar los equipos como machacadoras, molinos, etc. (Fig. 10). Otro uso que se les da es el de unidades separadoras y concentradoras de minerales según sus características de susceptibilidad magnética.

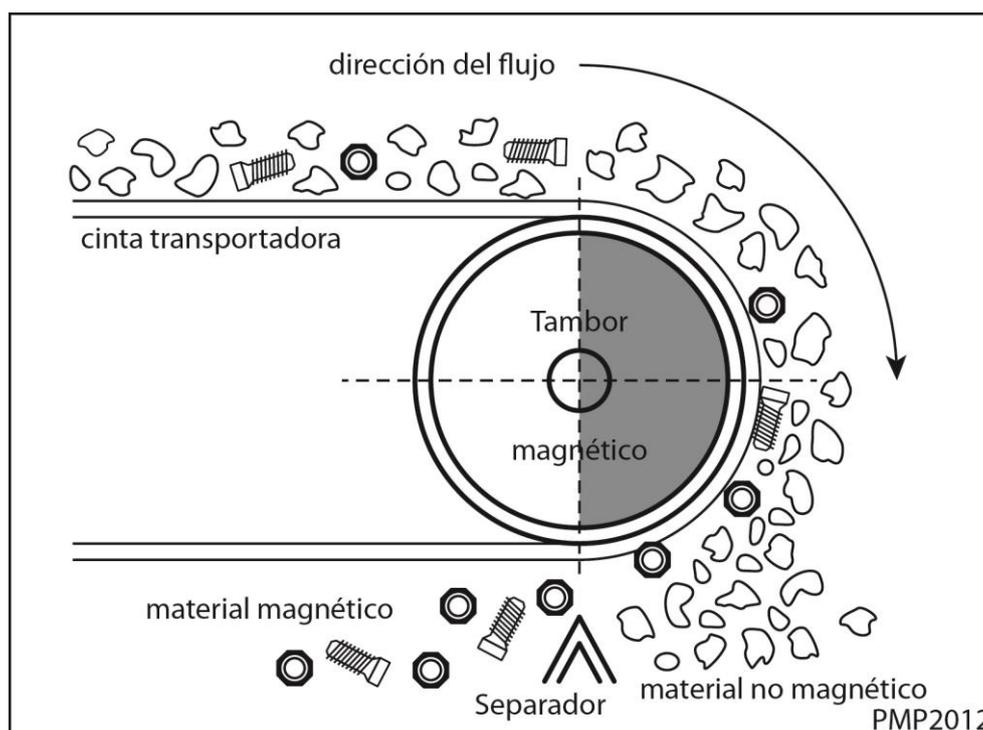


Fig. 10. Tambor magnético para la retirada de elementos metálicos (modificado de Fuerstenau y Han, 2003).

Separadores Magnéticos de Baja Intensidad

Los separadores magnéticos de baja intensidad o *LIMS* (como se les conoce por sus siglas en inglés de “*Low Intensity Magnetic Separators*”) se suelen instalar para tratar materiales ferromagnéticos (p.e.: hierro) y minerales altamente paramagnéticos. Al hacer esto se mejora el rendimiento de los electroimanes o imanes permanentes que tendrán que separar materiales débilmente magnéticos.

Los separadores de baja intensidad pueden trabajar por vía húmeda (mineral en suspensión acuosa o lodo) o vía seca (partículas secas).

Los separadores *LIMS* tienen densidades de flujo de hasta 3000 Gauss (1000 Gauss = 100 miliTeslas = 0.1 Teslas) en la zona de separación (aprox. 50 mm de la superficie del tambor magnético).

En la Fig. 10 se presenta un equipo para la retirada de elementos metálicos y así proteger las unidades de procesamiento situadas agua abajo. Estas unidades eliminarán elementos procedentes de roturas o desgastes (dientes de excavadoras,

trozos de barrenas, material procedente de escombros, etc.) que se hayan colado en la circulación y que suponen un peligro para las unidades.

Los equipos anteriores pueden estar compuestos por imanes permanentes instalados en placas colgadas, bandas transversales, rejillas, filtros, tambores, etc.

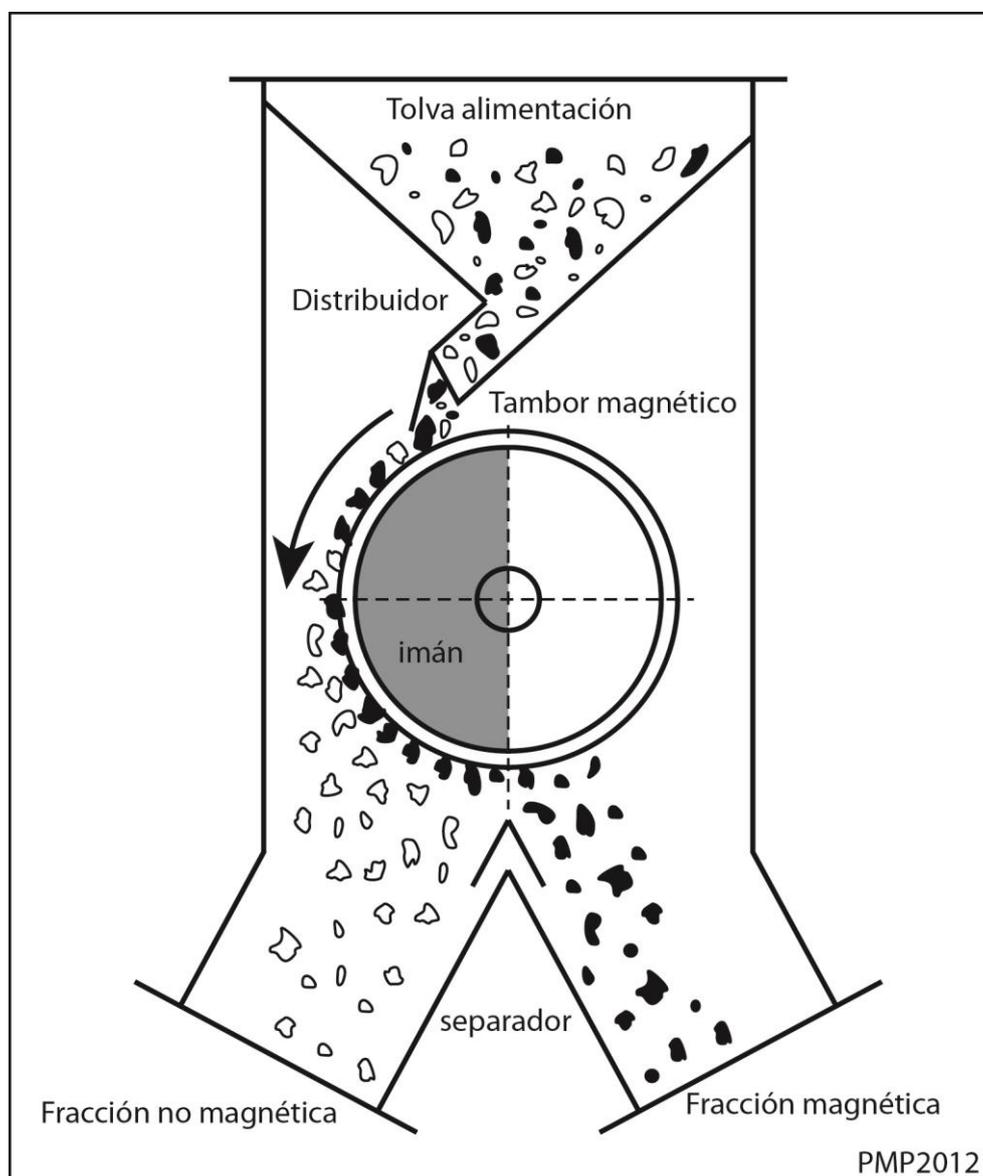


Fig. 11. Tambor dotado con un imán permanente para la retirada de la fracción magnética (modificado de Fuerstenau y Han, 2003).

La Fig. 11 representa un equipo magnético trabajando por vía seca (en inglés, "Dry LIMS") que se emplea para una separación primaria de gruesos. Donde estas partículas se caracterizarán por ser vigorosamente magnéticas. Así, se emplearán para la recuperación de partículas de magnetita calcinada, de hierro

El método de separación magnética y electrostática

contenido en las escorias de los altos hornos y hornos de acero, separación de las cenizas de pirita reducida, tratamiento de las escorias de acero, separación de los materiales no magnéticos de la chatarra de acero. Se requerirá que el material sea liberado a un tamaño grueso.

Otra disposición de los equipos por vía seca para la separación de los minerales magnéticos de la ganga es la que se presenta en la Fig. 12 donde la fracción magnética es pasada por dos tambores para mejorar la recuperación de los minerales magnéticos y realizar una limpieza más eficiente.

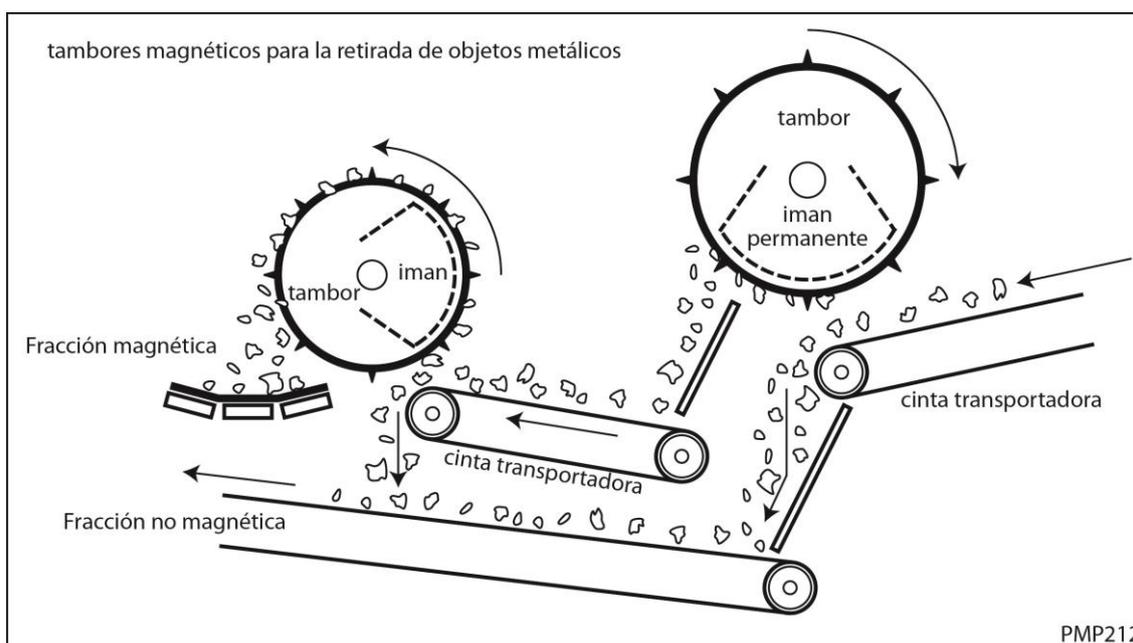


Fig. 12. Disposición de tambores con imanes permanentes por vía seca y en varias etapas (modificado de Fuerstenau y Han, 2003).

Separadores magnéticos de tambor

Dentro de los separadores de tambor de baja intensidad se encuentran los separadores que trabajan en húmedo y que han sido de empleo muy extendido en la industria para la concentración de las partículas finas de mineral de hierro durante décadas (Imagen 1); también se emplean para la limpieza y recuperación de las partículas de magnetita o de ferrosilicio empleadas como medio en el proceso de separación por medios densos (en inglés, "DMS") muy común en la industria de la limpieza de los carbones.

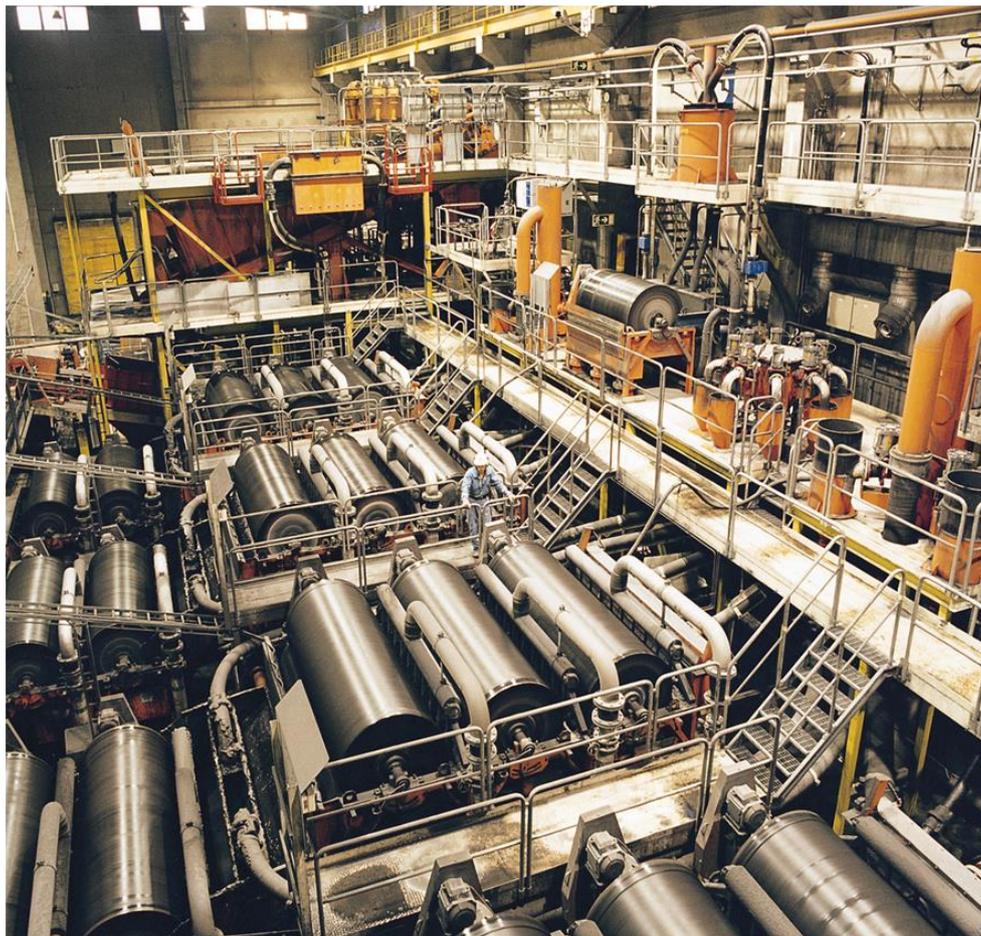


Imagen 1. Bancos formados por 164 separadores magnéticos húmedos de tambor de baja intensidad modelo WS1200 en la compañía LKAB Kiruna (Suecia) (cortesía Metso Minerals).

Los separadores húmedos que se ilustran en las siguientes figuras (Fig. 13; Fig. 14; Fig. 15; y Fig. 16) son los más comunes. Emplearán normalmente imanes permanentes del tipo AlNiCo o de cerámica con ferrita de bario o estroncio. El empleo de electroimanes se presenta cuando se requieren intensidades relativamente altas.

Estos equipos consisten en un tambor no-magnético rotatorio que dispone en su interior de tres a seis imanes estáticos con polaridades alternas (Fig. 20). Los separadores de tambor de igual sentido de la corriente y de la rotación (en inglés, “*Wet LIMS - Concurrent*”), como el mostrado en la Fig. 13, llevan el concentrado hacia adelante obligándole a pasar a través de un espacio estrecho que hace que el concentrado sea comprimido y desaguado antes de dejar el separador. Este diseño es muy efectivo para producir concentrados magnéticos extremadamente limpios a

El método de separación magnética y electrostática

partir de partículas relativamente gruesas, siendo su uso muy extendido entre los sistemas de recuperación del medio en procesos DMS.

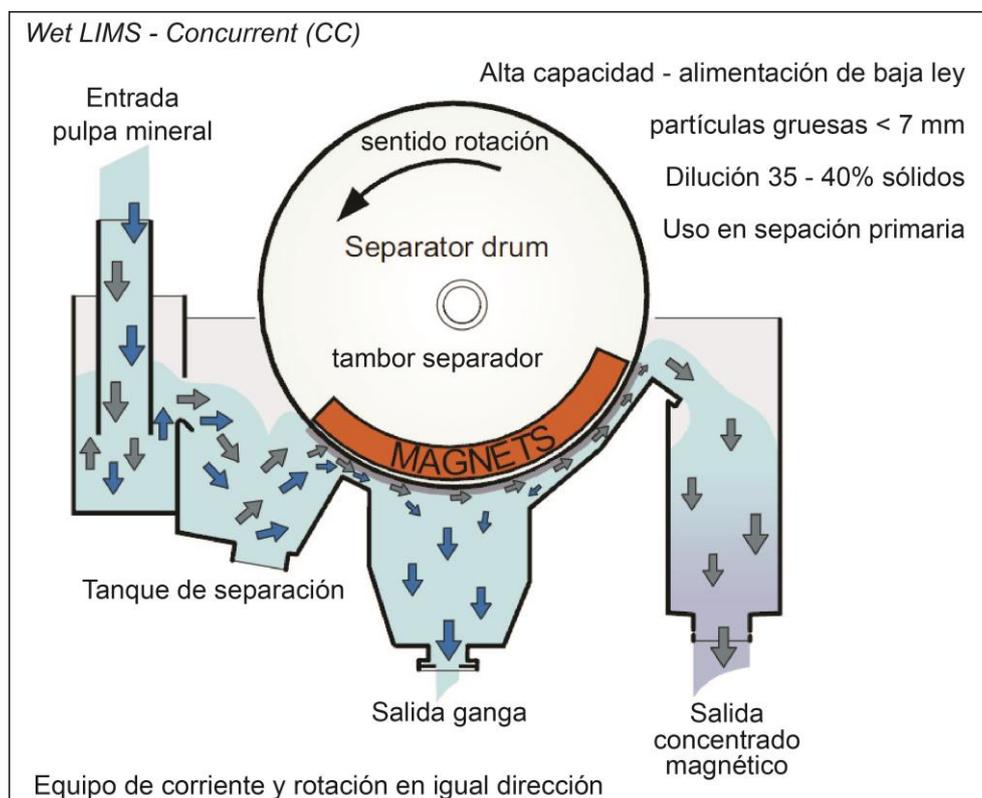


Fig. 13. Sección de un separador de imanes permanentes para proceso en húmedo de corriente y rotación de igual dirección (modificado de Metso Minerals, 2010).

La Fig. 14 y Fig. 15 muestran dos equipos denominados de rotación inversa (en inglés, "*Wet SLIM – counter-rotation type*") donde la alimentación fluye en dirección opuesta al sentido de la rotación del tambor. Este tipo de tambores se emplea para separaciones de desbaste que no requieren aún un concentrado extremadamente limpio sino evitar que el material magnético sea perdido en las colas. Además estos equipos pueden manejar pulpas con un alto porcentaje en sólidos (Imagen 2).

La Fig. 16 muestra dos tambores de contracorriente (en inglés, "*Wet SLIM - counter-current*") en los cuales las colas son obligadas a desplazarse en dirección opuesta al sentido de giro del tambor. Estas colas se descargan a través de unos vertederos para estériles. Este tipo de separadores se diseñan para operaciones de concentración final tratando partículas finas con tamaños inferiores a las 250 micras.

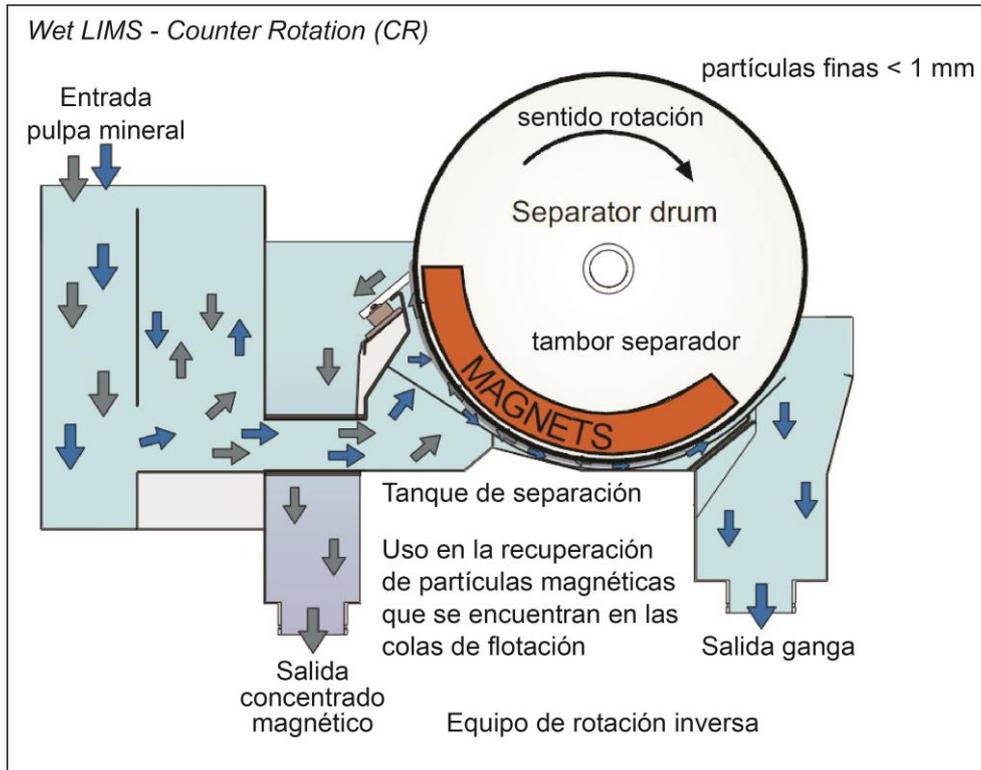


Fig. 14. Sección de un separador de imanes permanentes para proceso en húmedo de rotación inversa para el tratamiento de colas de flotación (modificado de Metso Minerals, 2010).

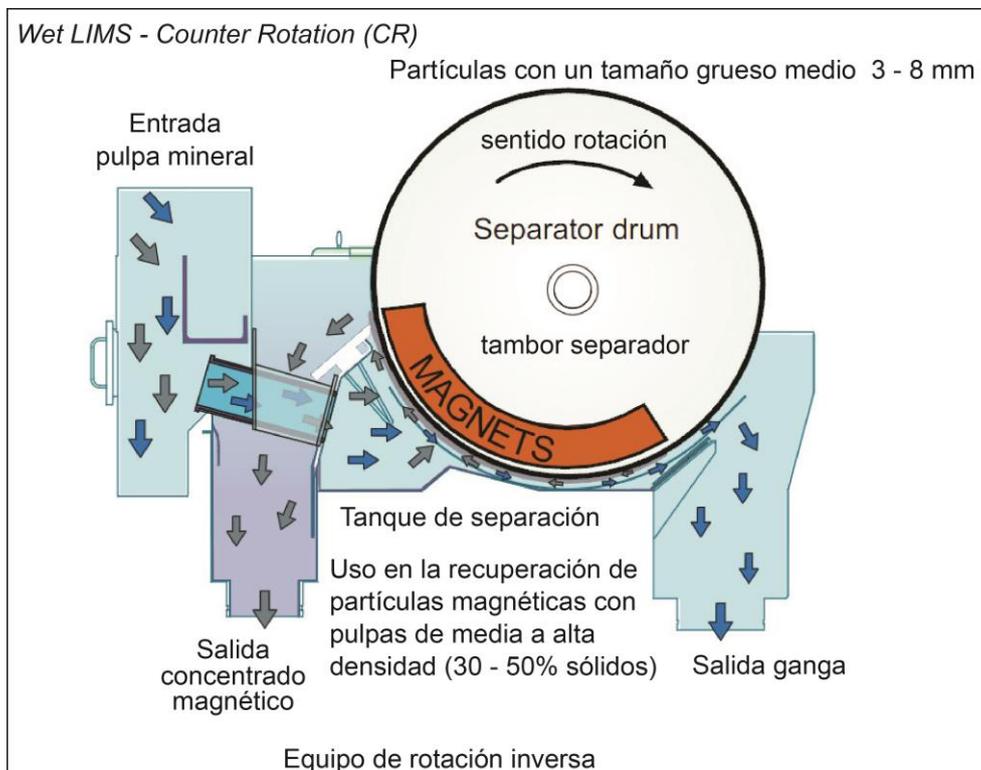


Fig. 15. Sección de un separador de imanes permanentes para proceso en húmedo de rotación inversa para el tratamiento de lodo mineral de alta densidad (modificado de Metso Minerals, 2010).

El método de separación magnética y electrostática



Imagen 2. Descarga del concentrado en un equipo LIMS WS1230 CR de rotación inversa (cortesía de Metso Minerals).

Los separadores de tambor se emplean para tratar minerales de taconita, caracterizados por su baja ley, que pueden contener entre un 40-50% de hierro, principalmente bajo la forma de magnetita, aunque también puede aparecer hematita diseminada dentro de bandeados de sílice. Esto requerirá una molienda muy fina para producir partículas de hierro liberadas que dará lugar a un concentrado que debe ser sometido a procesos de peletizado antes de enviarse a los hornos.

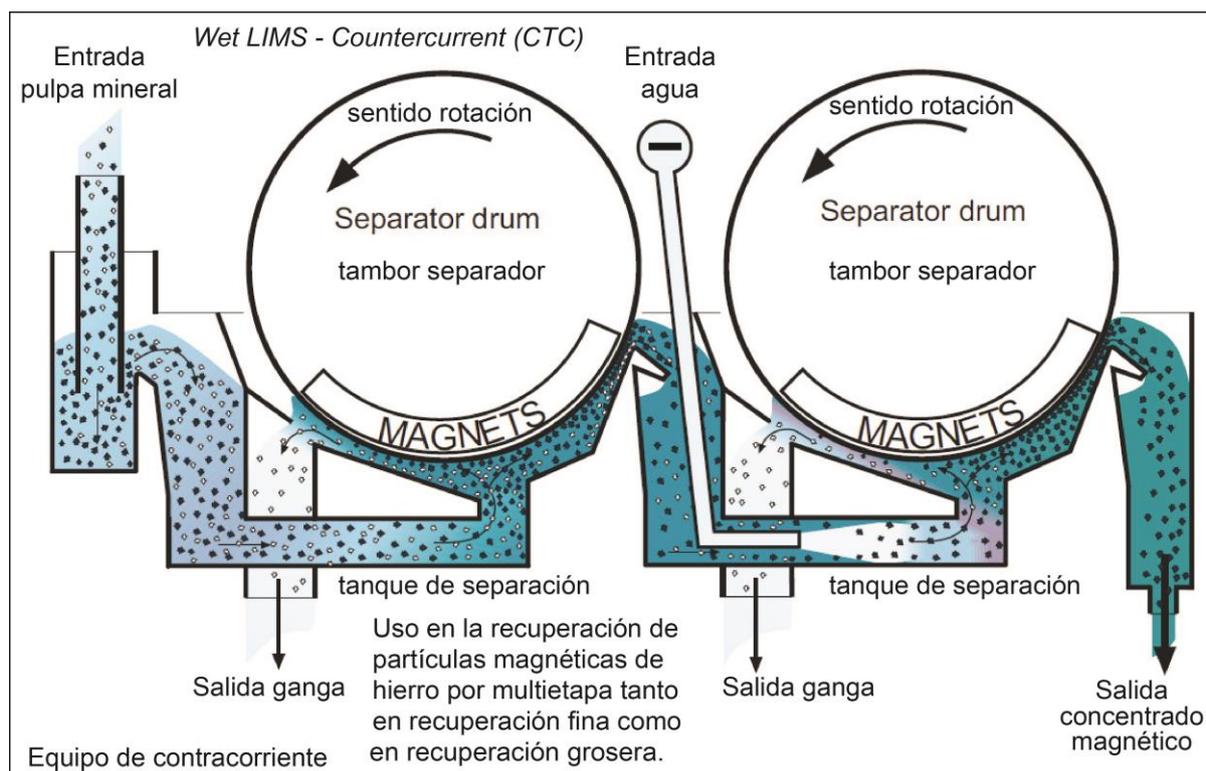


Fig. 16. Sección de dos separadores para proceso en húmedo de contracorriente (modificado de Metso Minerals, 2010).

En la Fig. 17 se presenta el diagrama de flujo típico para la obtención de concentrado mineral, el cual es sucesivamente molido para obtener tamaños de partícula cada vez más finos. Generalmente, la primera molienda es llevada a cabo mediante molinos autógenos, o por molinos de barras, seguido por una etapa de separación magnética mediante tambores de baja intensidad. El concentrado magnético es sometido otra vez a molienda y vuelto a tratar mediante separadores magnéticos de tambor. A veces, este concentrado puede volverse a moler y ser sometido a una tercera etapa de separación magnética. Por otro lado, las colas obtenidas en cada etapa de separación magnética pueden ser eliminadas directamente a través de su vertido a los depósitos de estériles o bien se las hace pasar por baterías de espirales o conos para recuperar aún más las partículas de hematita.

Según Wills and Napier-Munn (2006) en la planta de Palabora, los estériles procedentes de la flotación del cobre son deslamados para a continuación las partículas superiores a 105 micras ser tratadas por separadores magnéticos SALA que recuperan el 95% de la magnetita con una ley del 62% en hierro.

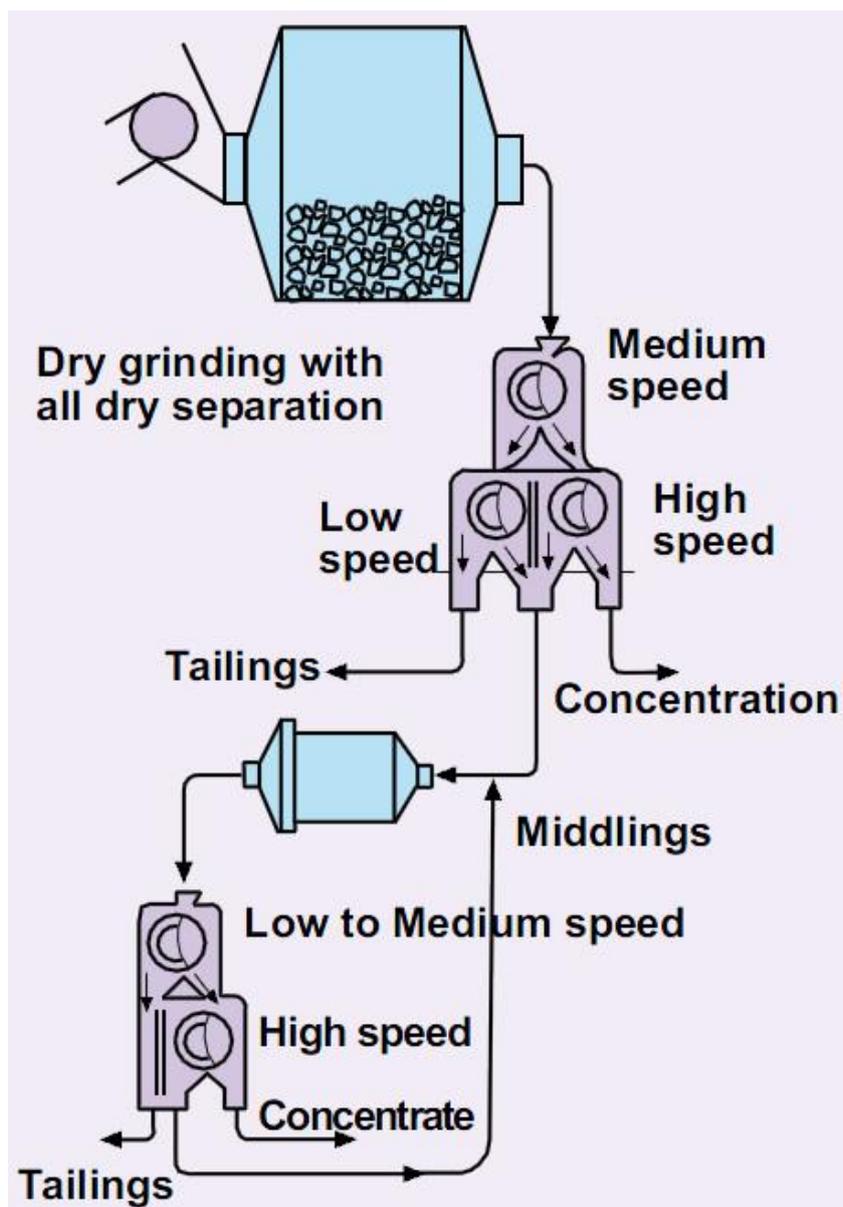


Fig. 17. Diagrama de flujo para la obtención de concentrado de hierro con tambores magnéticos (cortesía Metso Minerals).

Volviendo a comentar acerca de la disposición de los imanes, éstos se disponen de forma simétrica con respecto al yugo magnético, disponiéndose las polaridades alternas (Fig. 18) lo que mejora la agitación en la superficie del tambor y elimina los fenómenos de atrapamiento de las partículas no-magnéticas. En las siguientes figuras e imágenes (Fig. 19; Fig. 20; Imagen 3; Imagen 4; e Imagen 5) se puede observar la disposición de estos imanes permanentes y el tambor instalado dentro del bastidor.

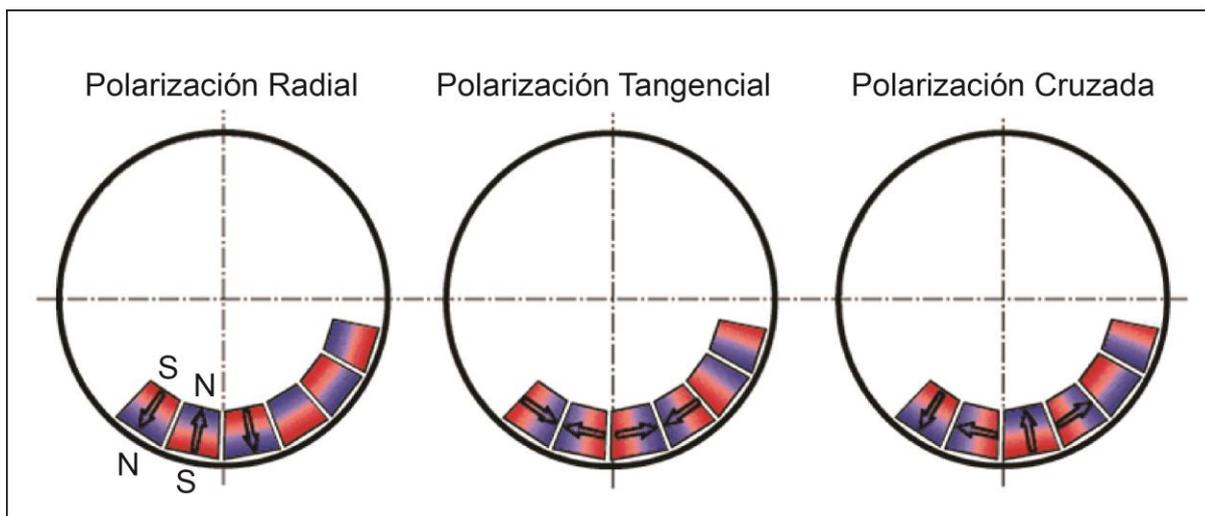


Fig. 18. Diferentes tipos de disposición de la polarización de los imanes (modificado de Metso Minerals, 2010).

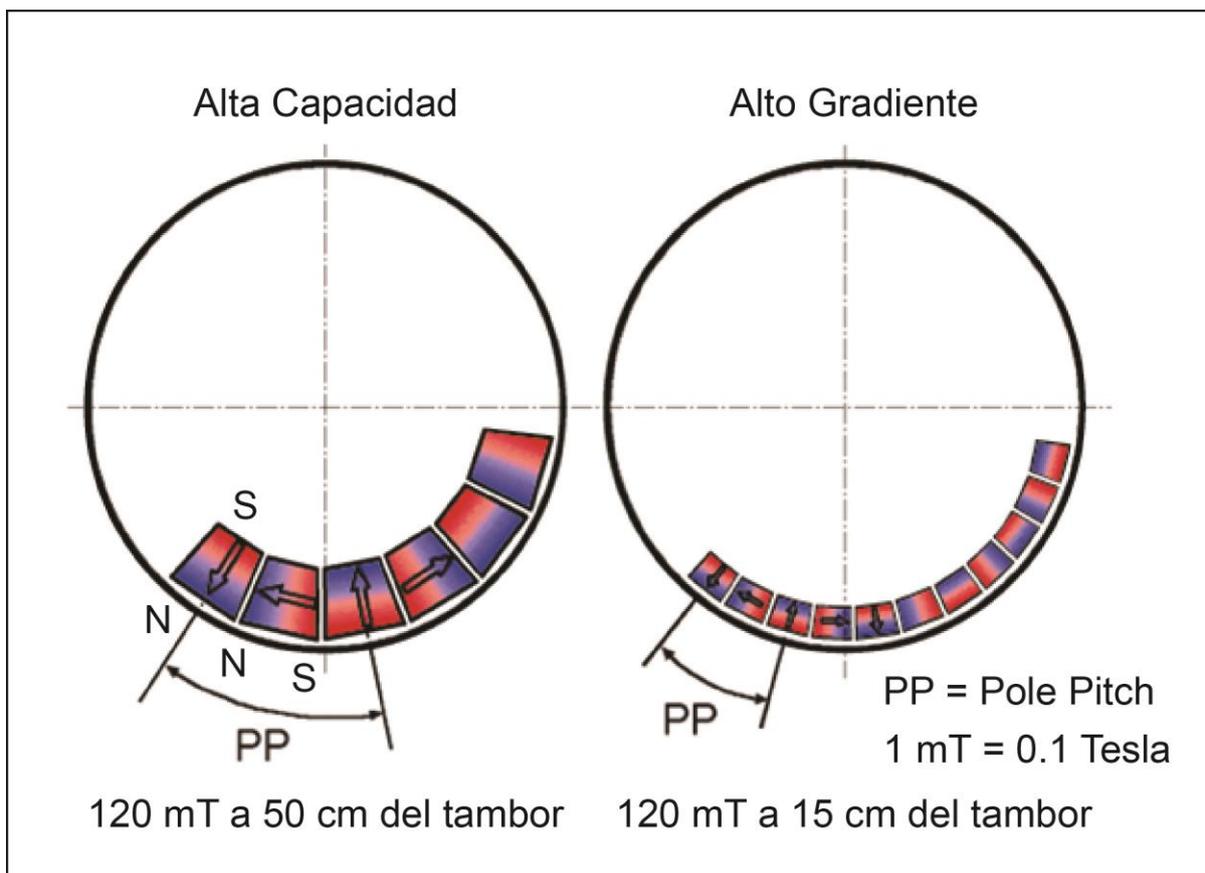


Fig. 19. Tambor de alta capacidad y tambor de alto gradiente (modificado de Metso Minerals, 2010).

El método de separación magnética y electrostática

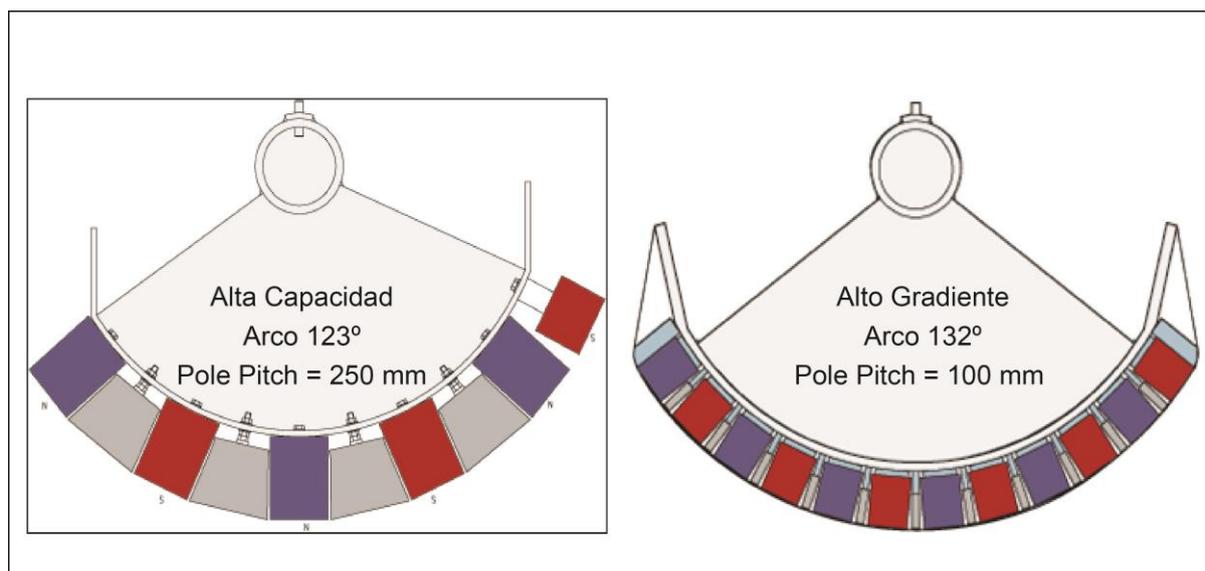


Fig. 20. Disposición de los imanes según la intensidad del campo magnético requerida (modificado de Metso Minerals, 2010).

Históricamente, la forma de especificar un tambor magnético para proceso en húmedo ha sido indicar el valor de la intensidad del campo magnético (miliTeslas) que alcanzará a una distancia de 50 mm de la superficie del tambor.

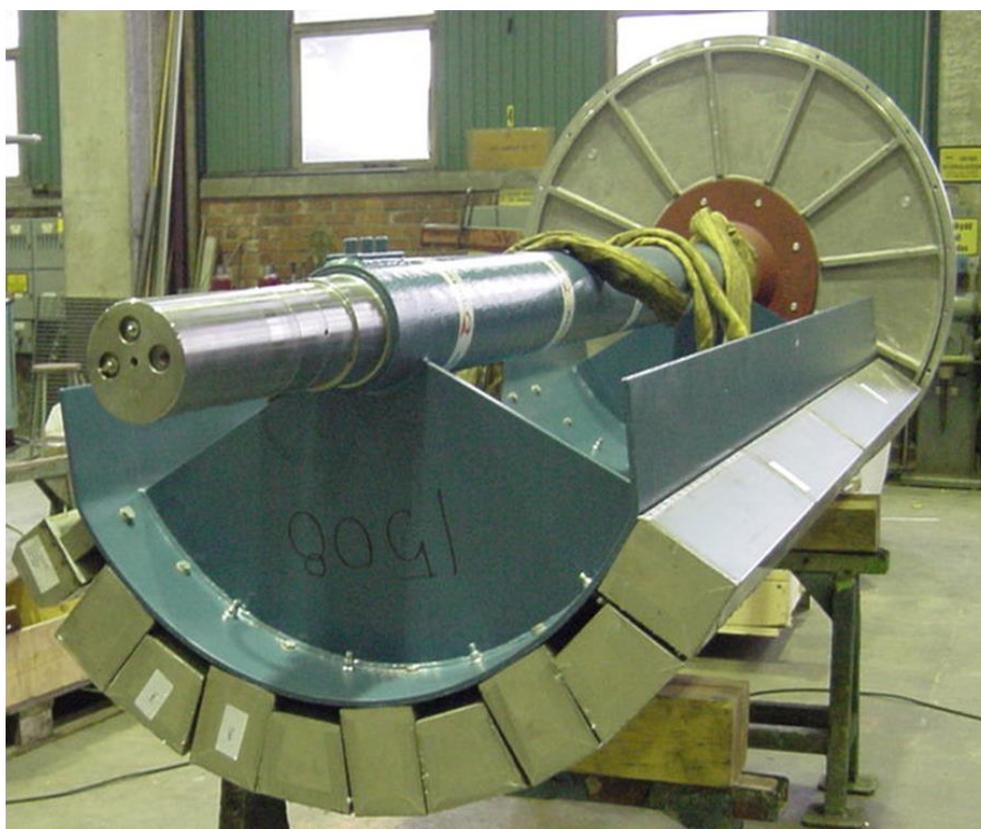


Imagen 3. Imanes permanentes para un equipo LIMS de alta capacidad magnética (cortesía Metso Minerals).

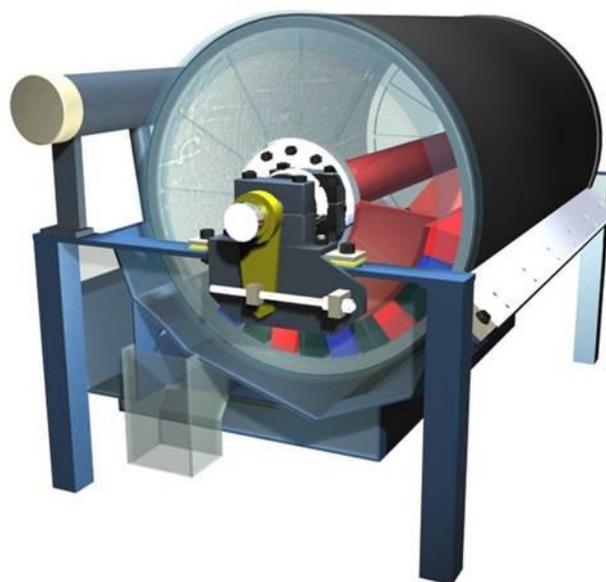


Imagen 4. Equipo *Wet LIMS* (cortesía Metso Minerals).



Imagen 5. Equipo *Wet LIMS WS1230DM* de Metso Minerals (cortesía Metso Minerals).

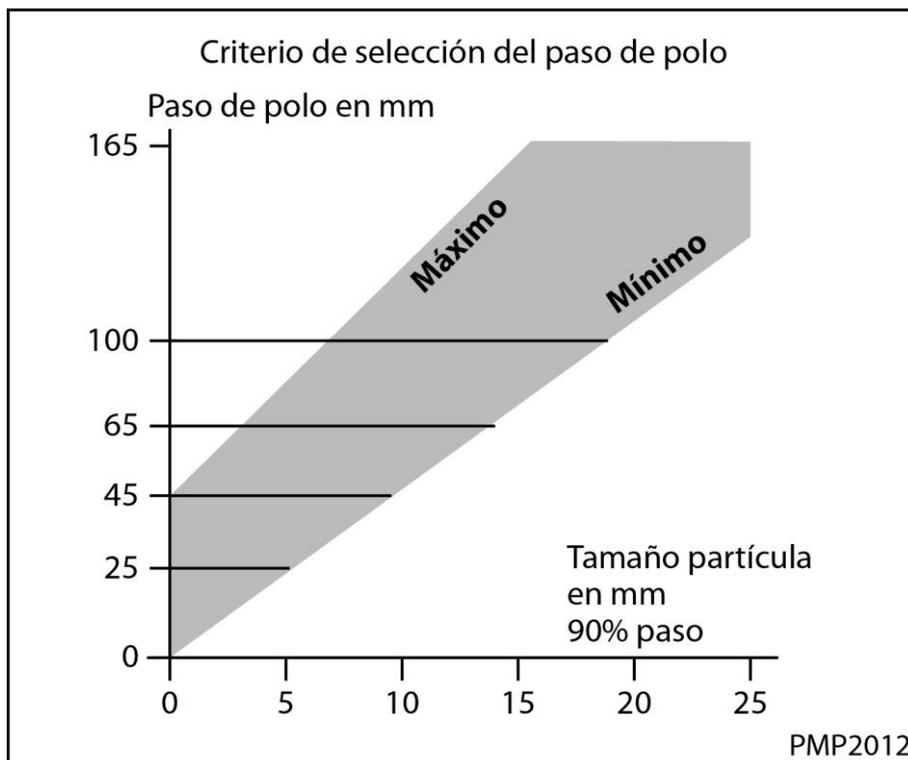


Fig. 21. Gráfica para seleccionar el paso de polo según el tamaño de partícula (modificado de Metso Minerals, 2008).

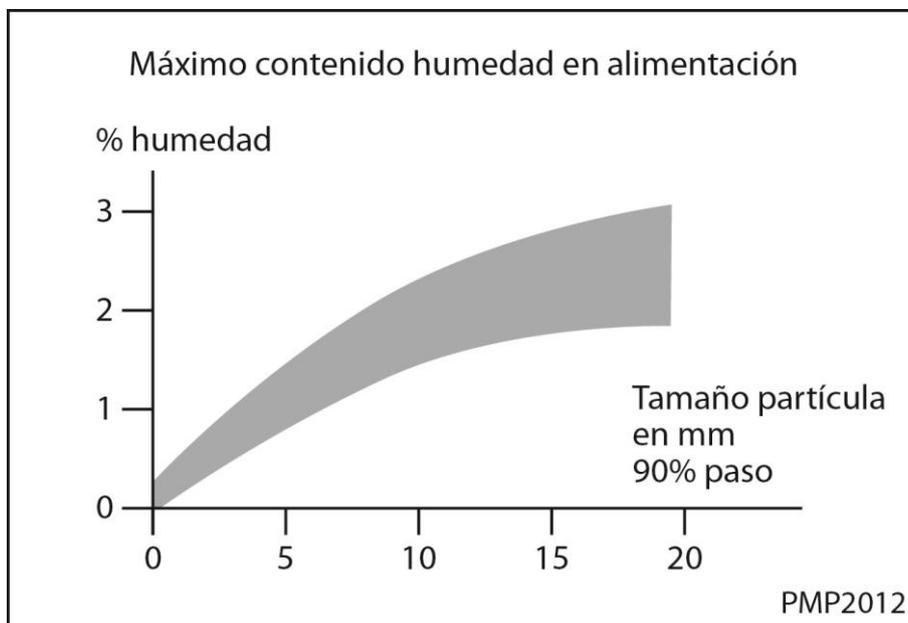


Fig. 22. Gráfica para establecer el máximo contenido de humedad permisible en la alimentación a un separador de tambor (modificado de Metso Minerals, 2008).

La Fig. 21 y Fig. 22 son interesantes para la determinación tanto del paso de polo (en inglés, "pole pitch") que hay que establecer entre los imanes permanentes

como el porcentaje máximo de humedad permitida en la alimentación que va a un separador magnético de baja intensidad tipo tambor (Metso Minerals, 2008).

Separadores Magnéticos de Banda Cruzada (tipo Wetherill)

El separador de banda cruzada tipo *Wetherill* es un separador de polos (Fig. 23 y Fig. 24) en el que se desarrollo un gradiente de campo magnético creciente para favorecer el fraccionamiento de las partículas minerales con susceptibilidades magnéticas decrecientes (Taggart, 1956).

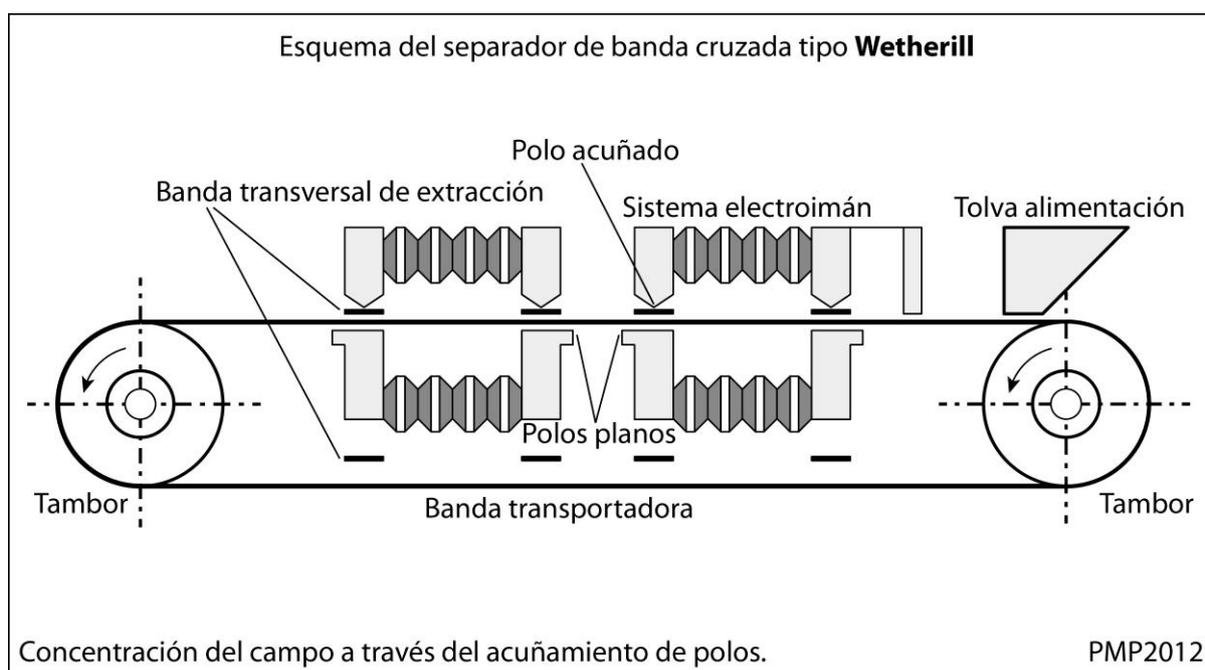


Fig. 23. Esquema simplificado de un separador magnético de banda cruzada (modificado de Blazy, 1977).

Para ello, los polos del sistema magnético están enfrentados, acabado uno en filo (el otro en forma plana) para favorecer la concentración del flujo magnético en él y crear un gradiente magnético que consiga la elevación de las partículas magnéticas, la cuales quedarán adheridas a la banda transversal que las transportará fuera de la acción del campo magnético donde se desprenderán por gravedad de la cinta cruzada.

El polo inferior es fijo y el superior es móvil. Los polos presentarán una polaridad opuesta (Taggart, 1956). El sistema electroimán es de tipo herradura construido por bobinados de hilo conductor por los que se hace pasar una corriente

El método de separación magnética y electrostática

eléctrica que crea el campo magnético que establece la polaridad e intensidad en los polos.

Este tipo de equipos se ha utilizado durante muchos años en la industria de las arenas minerales para la recuperación de la ilmenita contenida en el concentrado de minerales pesados (casiterita, rutilo, zircón, etc.).

Actualmente, han sido reemplazados por separadores magnéticos de rodillos fabricados con sustancias pertenecientes al grupo de las tierras raras (neodimio), o como se conocen por su traducción del inglés: *separadores magnéticos de tierra rara* ("rare-earth magnetic separator"). Estos últimos equipos se comentan un poco más adelante.

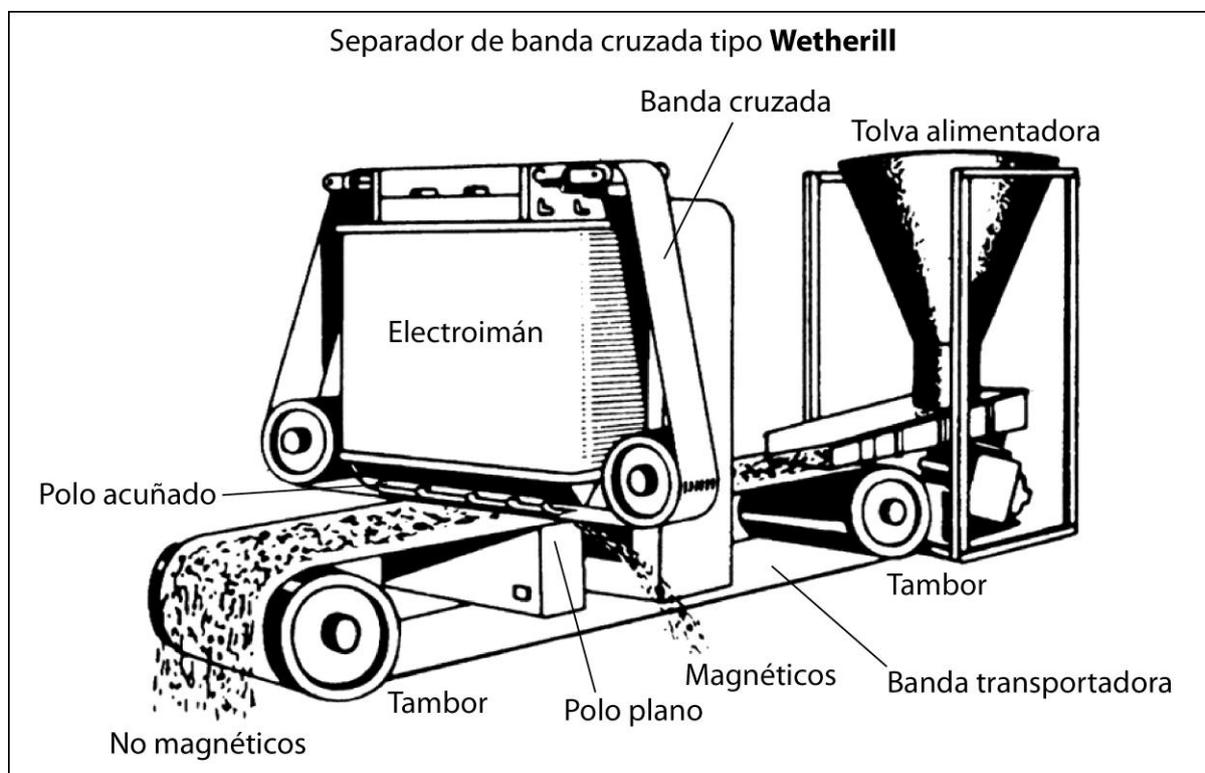


Fig. 24. Separador magnético de banda cruzada (modificado de Wills and Napier-Munn, 2006).

Separador de Discos

Este tipo de separadores se identifican por los discos que hay dispuestos encima de una banda transportadora. El espacio de separación entre el disco y la banda es decreciente hacia el extremo de los no magnéticos con el fin de conseguir

un fraccionamiento del producto entre las partículas magnéticas en base a su diferente susceptibilidad (Taggart, 1956).

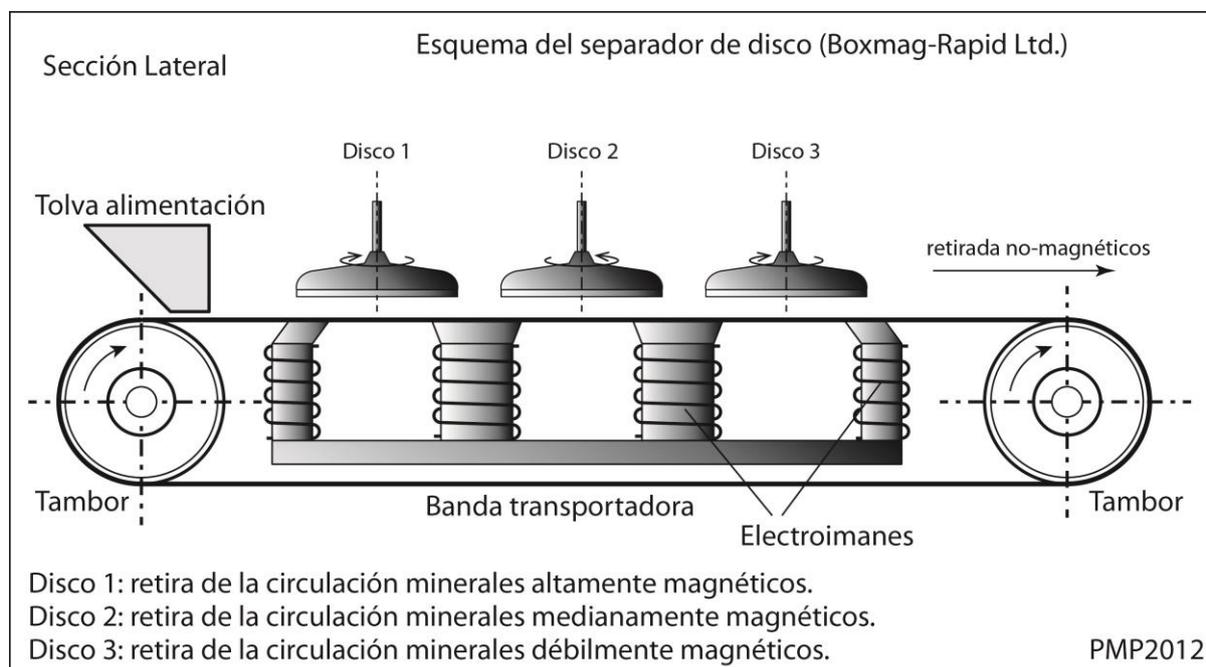


Fig. 25. Esquema simplificado de un separador magnético de discos (modificado de Blazy, 1977).

Estos discos giratorios tienen forma de plato invertido, creando un borde, o filo, que favorece la concentración del flujo magnético en él y, como consecuencia, un incremento de la intensidad de la fuerza magnética que elevará las partículas magnéticas (Taggart, 1956). Por otro lado, durante el giro de estos discos un punto cualquiera perteneciente a uno de ellos pasará por áreas de intensidad magnética diferente. Esto será debido a los sistemas electroimanes colocados en la parte inferior sobre los que pasa dicho punto de forma periódica.

Esta disposición magnética permitirá la separación en diferentes fracciones según sus características magnéticas. Aquellas altamente magnéticas serán retiradas pronto, mientras que las partículas consideradas como débilmente magnéticas se extraerán en el último disco. Para esta extracción, se aprovechará la fuerza centrífuga y la fuerza gravitatoria. Además, esto sucederá cuando esta parte del disco se aleja de la zona de influencia del campo magnético durante su giro (donde el magnetismo inducido es cero). Zona que se encontrará fuera de la banda transportadora (Fig. 26).

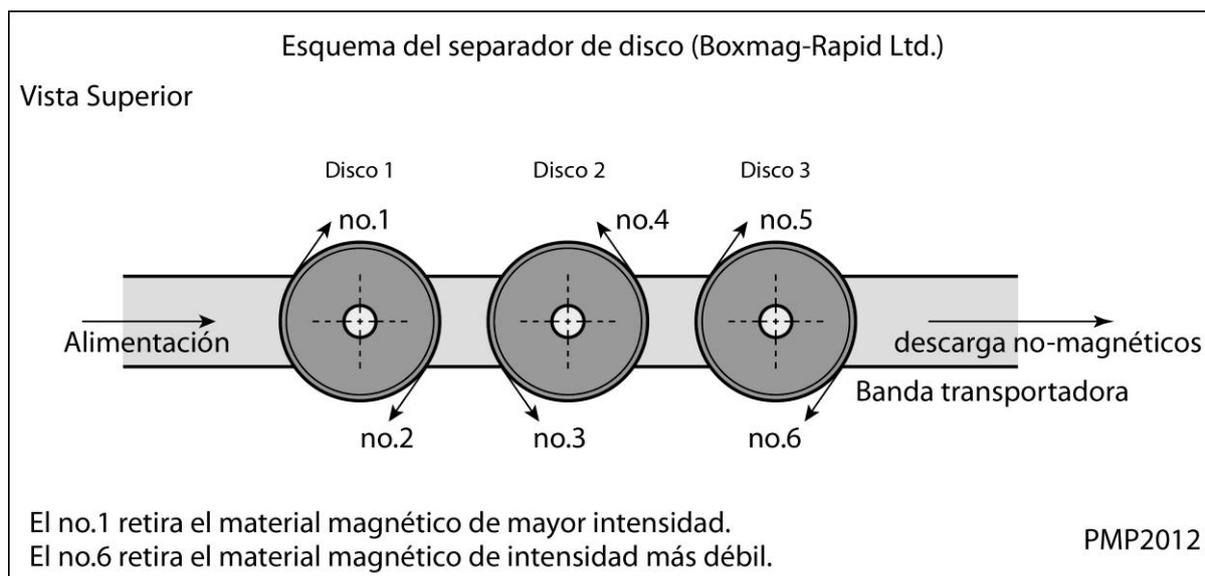


Fig. 26. Vista esquemática superior de un separador magnético de discos (modificado de Blazy, 1977).

Al igual que se ha comentado con los equipos de banda cruzada, estos equipos han sido desplazados por los separadores magnéticos de tierras raras.

Separador magnético de tierras raras (tipo rodillo)

Este tipo de separadores trabajan en vía seca se caracterizan por un rodillo formado por laminaciones alternas de material magnético y no magnético (Fig. 8), o bien una superficie metálica antidesgaste que encierra imanes permanentes fijos fabricados de una aleación de neodimio-hierro-boro (NdFeB).

La introducción de estas nuevas aleaciones magnéticas incorporando algún elemento tierra rara, ha permitido a los separadores trabajar con intensidades magnéticas mayores, lo que posibilita la aplicación a menas que presentan minerales levemente magnéticos. Así, se pueden emplear en la retirada de minerales que son débilmente magnéticos y contaminan sustancias no magnéticas como la arena silícea, el talco o el caolín.

Sobre estos rodillos se hace pasar una cinta transportadora de grosor fino sobre la cual se adhieren las partículas magnéticas y que serán liberadas cuando se aleje la banda de la posición de los imanes o del campo magnético (Imagen 6).

Este tipo de equipos pone especial cuidado en la forma en que se alimenta el rodillo para que las partículas se distribuyan uniformemente a lo largo de la generatriz del rodillo. Posibilitando que todas las partículas sean sometidas al campo magnético con la misma velocidad horizontal. La velocidad del rodillo se puede ajustar para permitir una separación fina de los productos magnéticos.

Son equipos ideales para obtener un producto limpio de materiales débilmente magnéticos o diamagnéticos como granate, ilmenita y hematita.

Equipos separadores de este tipo son el *MagForce Rare-Earth Industrial Magnetic Separator* de Carpcó (Outotec).



Imagen 6. Separador magnético de tierras raras (cortesía de Outotec).

Separadores Magnéticos de Alta Intensidad

Cuando hay concentrar minerales paramagnético que son débilmente magnéticos, su separación se hace complicado a través del empleo de campos magnéticos que sean de baja intensidad. Sólo cuando estas intensidades son de 2 Teslas o superior, la separación se conseguirá de forma fiable.

El método de separación magnética y electrostática

Hoy en día podemos encontrar separadores magnéticos de alta intensidad trabajando en vía húmeda o en vía seca, pero hasta 1960 este tipo de equipos sólo procesaba mineral en condiciones secas (Wills and Napier-Munn, 2006). Otro grupo de equipos separadores trabajando por vía húmeda y que se comercializan actualmente se apoyan en el uso de altos gradientes magnéticos para generar altas fuerzas magnéticas de atracción sobre las partículas. Estos equipos vienen a solucionar los problemas que tienen los separadores de alta intensidad para crear fuerzas magnéticas mayores al estar limitados a intensidades magnéticas máximas de 2-2.5 Teslas (rango de saturación del hierro).

Separador magnético de rodillo inducido

Este equipo está muy extendido trabajando por vía seca. Es un separador que aplica un campo magnético que desarrolla flujos magnéticos de intensidad superior a los 2 Teslas. Esto se debe a la disposición y la geometría que presentan los polos magnéticos (Fig. 27) y que persigue la concentración de flujos para incrementar el gradiente en la superficie del rodillo y atraer partículas que son débilmente magnéticas.

Para ello, el rodillo inducido, estará fabricado por laminaciones cilíndricas que alternan entre material magnético (láminas de acero fosfatado) y no magnético (acero inoxidable), y donde cada tipo de laminación varía en forma y diámetro originando una superficie de perfil aserrado que favorecerá a la concentración del flujo magnético en estos inter-espacios entre laminaciones. Esta laminación se coloca entre polos especialmente diseñado con formas especiales pertenecientes a sistemas electroimanes. Un sistema electroimán emplea vueltas de cable de cobre o de aluminio alrededor de un núcleo de hierro que lo imantará a través de la aplicación de una corriente eléctrica que pasa por el bobinado. Estos electroimanes inducirán regiones muy locales con altas intensidades magnéticas y de fuerte gradiente generándose campos de 2.2 Teslas en dichos espacios o separaciones laminares (Carpco bulletin 8951). De este modo, las partículas magnéticas serán atrapadas por el rodillo inducido hasta ser llevadas fuera de la influencia del campo magnético en donde serán depositadas sobre recipientes adecuados (Fig. 27).

El espacio entre el rodillo y el polo acabado en cuña es ajustable, y cuando el equipo dispone de varios rodillos en cascada, esta separación va disminuyendo

para ir promoviendo el fraccionamiento de las partículas magnéticas según susceptibilidad decreciente. Se colocan bajo los rodillos chapas formando cuñas (*splitters*) que actúan como zonas de corte entre las diferentes corrientes de material

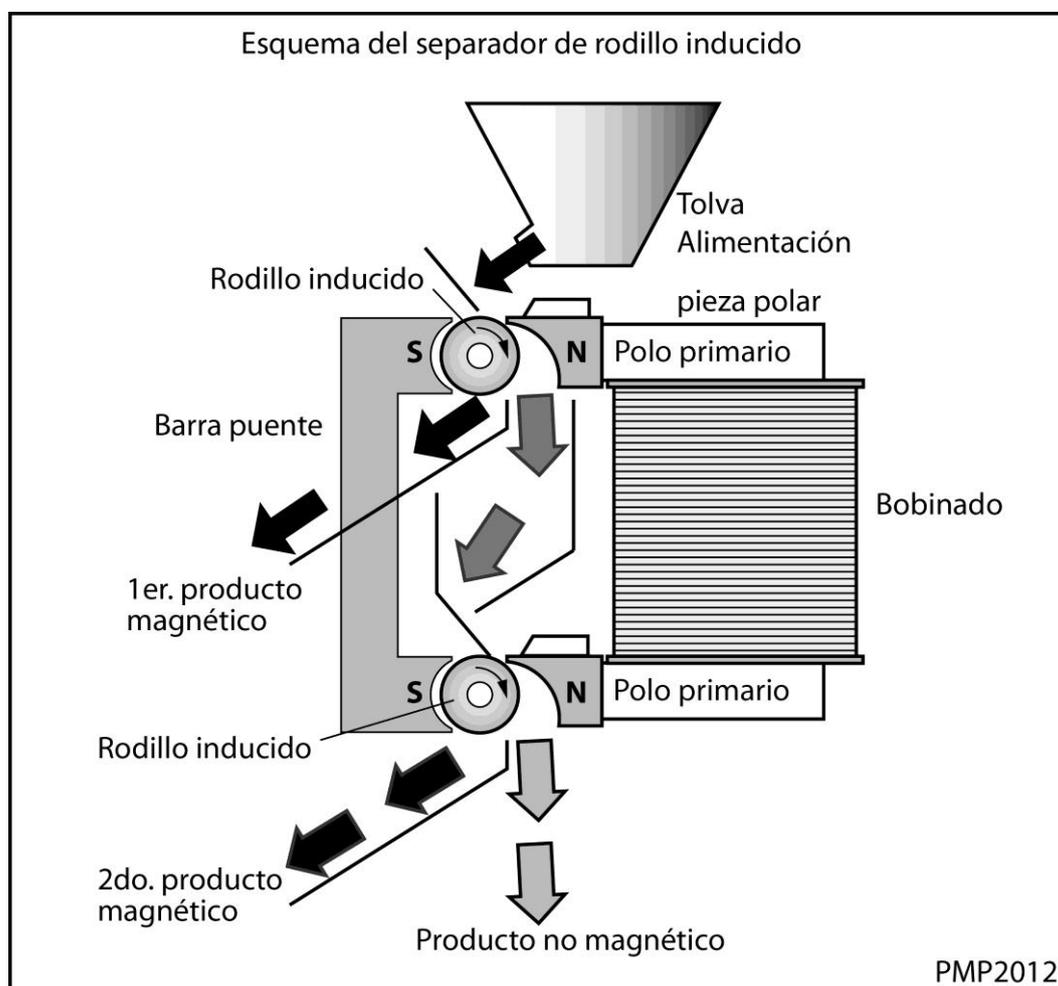


Fig. 27. Esquema simplificado de un separador magnético de rodillo inducido.

Este tipo de separadores trabaja en seco y además requerirá que las partículas no sobrepasen un determinado tamaño mínimo (75 micras) ya que minerales con estos diámetros reducirán la efectividad de estos equipos debido al efecto que sobre la trayectoria de las partículas puede tener el establecimiento de corrientes de aire, la adhesión partícula-partícula o adhesión partícula-rodillo.

Estos equipos se recomiendan para la concentración magnética de cromita, granate u otros abrasivos, minerales de hierro (hematita, siderita, limonita), kimberlita, monazita, tantalita, columbita, minerales de tungsteno, minerales de

El método de separación magnética y electrostática

titanio (ilmenita, leucoxeno); o bien, la limpieza de impurezas magnéticas de ciertas sustancias no magnéticas (caliza, manganeso, mica, rutilo, zircón, arenas silíceas, bauxita, barita, casiterita, feldespato, apatito, etc.).

También, estos equipos están siendo desplazados por los separadores magnéticos de tierras raras.

Separadores magnéticos por vía húmeda

Existen en el mercado diferentes modelos de separadores magnéticos de alta intensidad trabajando principalmente por vía húmeda (WHIMS Jones, Readings WHIMS, Krupp-Sol 24/14, Boxmag-Rapid SHW1). Todos ellos trabajan en continuo a través de un sistema giratorio tipo carrusel. La diferencia entre uno y otro es el sistema que compone la matriz ferromagnética sobre la cual se recolectan las partículas minerales. Esta matriz ferromagnética se presenta en diferentes diseños: placas acanaladas (separadores tipo carrusel), de bolas de aceros (separadores tipo cartucho), de lana de acero (separadores tipo cartucho) o de láminas de metal expandido (separadores tipo carrusel) (Fig. 28).

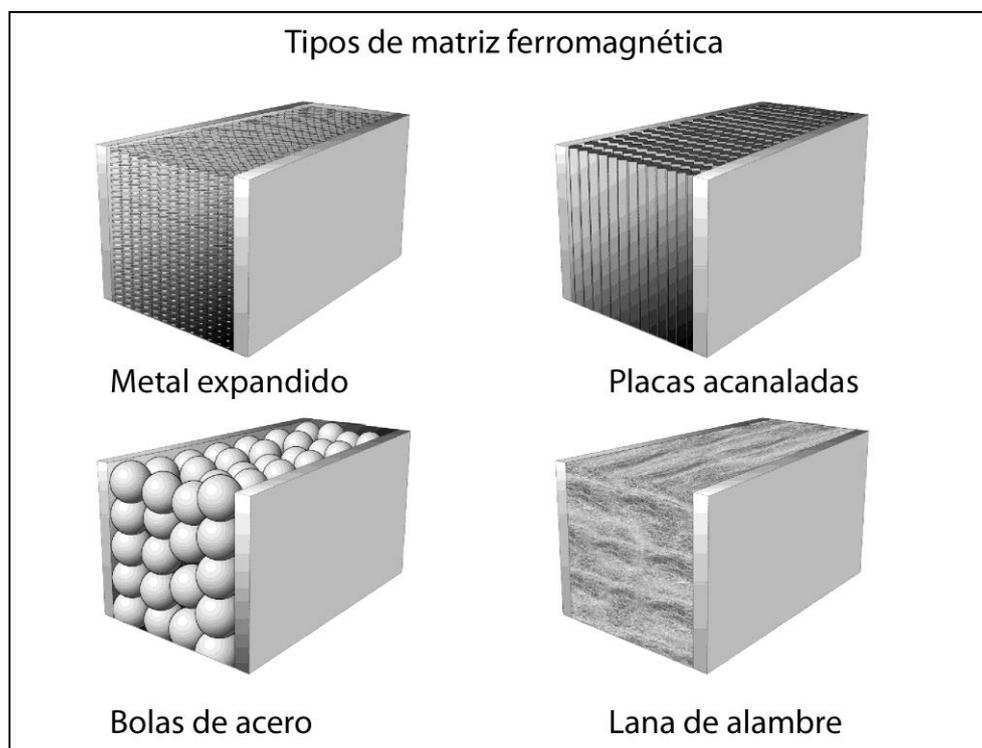


Fig. 28. Tipos de matriz empleados en los separadores magnéticos de alta intensidad trabajando por vía húmeda (cortesía Metso Minerals).

La aplicación principal de estos equipos es la obtención limpia de impurezas de hematita, ilmenita, cromita, manganeso, apatito, kianita, wolframita, sienita, arena silíceas, mica y en la separación de azufre pirítico del carbón. Además hay otras aplicaciones en la industria química como la purificación de agua y otros líquidos por filtración magnética.

La separación magnética ha tenido su mayor avance en la aparición de los separadores magnéticos de alta intensidad trabajando en continuo y por vía húmeda. Este hito tecnológico ha posibilitado el beneficio de grandes masas de menas débilmente magnéticas, principalmente menas de hierro, con alta recuperación, inclusive en las fracciones ultra-finas (menores de 200 mallas). Todos estos equipos se caracterizan por presentar una bobina electromagnética que actúa como fuente de campo magnético, un anillo circular o disco que girará entre los polos creados por las bobinas disponiendo de una matriz que favorece la concentración del flujo magnético en puntos donde las partículas magnéticas de adherirán, un dispositivo para la alimentación de la pulpa mineral y agua de lavado pudiendo aplicarse en varios puntos del disco, y dispositivos colectores para los diferentes productos originados en la separación (Fig. 29).

Las principales aplicaciones de estos equipos son:

Producción de un concentrado magnético (hematita, pirrotina, siderita, ilmenita, menas de cromo, manganeso, tungsteno, cinc, níquel, tantalio/niobio, molibdeno, etc.).

Obtención de un producto no magnético más limpio al retirarle las impurezas débilmente magnéticas (arenas silíceas, apatito, arcilla, talco, caolín, feldespato, carbón, barita, grafito, bauxita, casiterita, etc.).

Pre-concentración para un tratamiento adicional por un proceso diferente (minerales de uranio, oro, platino, cromo, manganeso, hierro, escorias, residuos, etc.).

Recuperación de minerales de características magnéticas opuestas contenidos en las arenas (ilmenita, granate, cromita y monacita como magnéticos y rutilo, leucoxeno y zircón como no magnéticos).

El método de separación magnética y electrostática

Recuperación de partículas finas en menas de hierro (hematita especular, itabirito, taconita y limonita).

Separador magnético WHIMS Jones

Este equipo actualmente comercializado por MBE Coal and Minerals Technology GmbH (antes Humboldt-Wedag GmbH) consiste en un robusto bastidor fabricado de acero estructural. Los bloques-imanés con forma de yugos se encuentran soldados a este bastidor, con los sistemas de electroimanes protegidos y refrigerados por aire (Fig. 29; Imagen 7). Estas unidades se conocen por sus siglas WHIMS (del inglés, "*Wet High Intensity Magnetic Separator*").

La separación de los minerales se lleva a cabo en los módulos de separación que se sitúan en la periferia de los discos giratorios. Estos discos rotatorios se presentan en tándem uno encima de otro con todos los sistemas duplicados. La pulpa mineral se vierte por gravedad a través de un sistema de alimentación formado por un sistema tubería-canalón perfectamente ajustado a la parte superior de los módulos para que la pulpa entre perfectamente sin reboses entre las placas acanaladas. Estas acanaladuras favorecen la creación de concentraciones de líneas de flujo magnético en sus bordes incrementándose la intensidad del campo magnético y los efectos de atracción de las partículas (ver ASPECTOS DE DISEÑO DE UN SEPARADOR MAGNÉTICO).

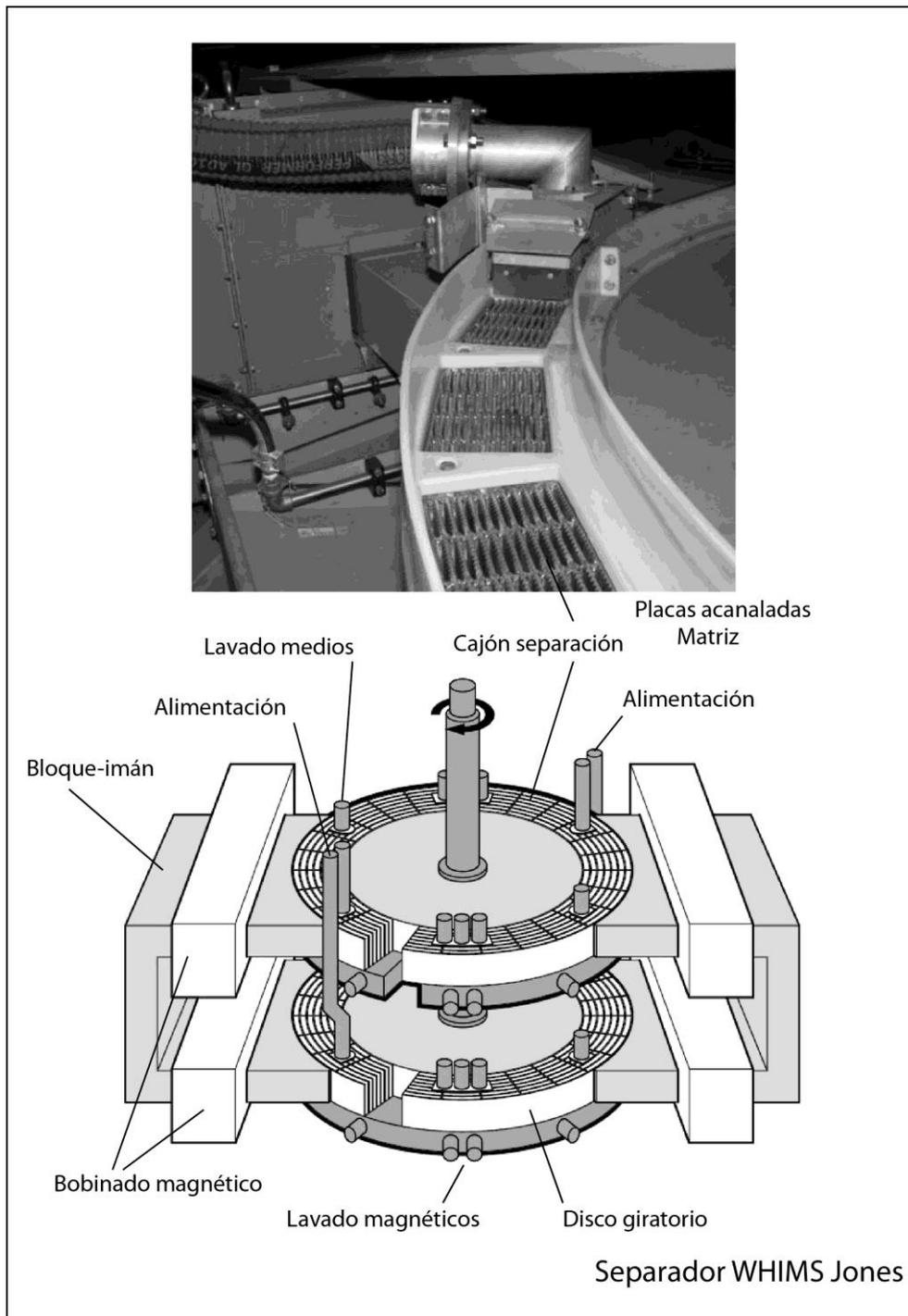


Fig. 29. Vista esquemática del separador WHIMS Jones y sistema de alimentación (cortesía MBE Coal and Minerals Technology GmbH).

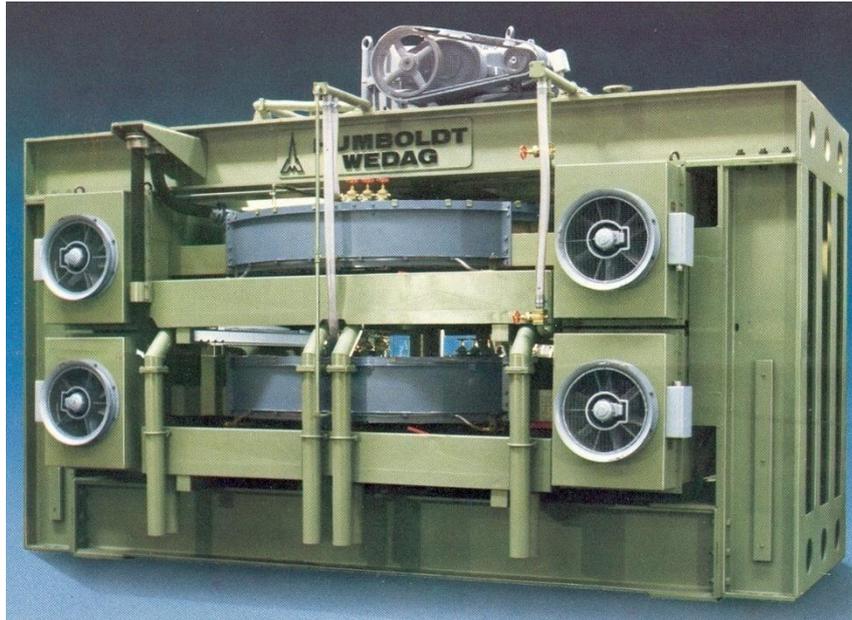


Imagen 7. Separador WHISM Jones (cortesía MBE Coal and Minerals Technology GmbH).

La alimentación es continua ya que el equipo hace que el disco vaya rotando de forma que continuamente se enfrentan nuevos cajones de placas al sistema de alimentación para que por ellos pase la pulpa mineral reteniendo las partículas débilmente magnéticas en los filos de las acanaladuras en forma de cuña. Las partículas no magnéticas no se verán afectadas por la presencia del campo magnético y será retiradas por la parte inferior del equipo donde serán depositadas en un colector. El cajón con la matriz de placas es sometido a un lavado de agua antes de salir del campo magnético, donde aquellas partículas no magnéticas que han podido quedar retenidas con las magnéticas son recuperadas por medio de un lavado con agua a una presión baja que las conduce a los recipientes para medios situados en la parte inferior del equipo.

Cuando en su giro la matriz de placas ranuradas alcanza el punto medio situado entre los dos polos magnéticos, las partículas débilmente magnéticas dejan de estar sometidas al efecto de un campo magnético al ser su valor cero. Entonces, en este punto, los módulos formados por estas placas se verán sometidos a chorros de agua de lavado de altas presiones (hasta 5 bares de presión) para conseguir el fácil desprendimiento y recuperación de todas las partículas débilmente magnéticas que estaban adheridas a la matriz ferromagnética.

Estos equipos pueden crear intensidades de campo magnético de hasta 2 Teslas. Por otro lado, la generación de un campo magnético de 1.5 Teslas supone un consumo eléctrico de 16 kW en cada polo (aunque hay unidades grandes de 120 kW de potencia eléctrica requerida). En cuanto al consumo de agua será aproximadamente de 4t por cada tonelada de partículas minerales tratadas.

El separador magnético WHIMS Jones puede recuperar partículas débilmente magnéticas con diámetros inferiores a 2 mm, dependiendo de la aplicación. Una unidad puede dar una capacidad de tratamiento de 220 t/h. En el caso de partículas muy finas con tendencia a producir floculación se puede añadir un agente dispersante a la pulpa de alimentación.

Separadores Magnéticos de Alto Gradiente

Como ya se ha comentado, los equipos de alta intensidad magnética aprovechan las propiedades ferromagnéticas del hierro para generar altas densidades de flujo magnético (campo **B**) cuyos campos serán centenares de veces superiores al valor del campo aplicado de intensidad magnetizante (campo **H**). Se ha visto, que los fenómenos de separación tienen lugar en los espacios que separan las placas de los módulos de separación. La desventaja de este tipo de sistemas es que el volumen de hierro que se necesita instalar es muy superior al volumen ocupado por el aire que ocupa los espacios entre placas donde la separación tiene lugar.

Esto significa la fabricación de equipos de alta intensidad muy pesados con un alto contenido de hierro y que puede suponer que el equipo supere las 200 toneladas de hierro para conseguir los flujos magnéticos necesarios lo que se traduce en elevados costos de inversión y de instalación.

Por otro lado, el hierro satura alrededor de 2-2.5 Teslas, por lo que tendrán muy poco valor aquellos circuitos convencionales de hierro para la generación de campos inducidos superiores a 2 Teslas (**B**). De forma que la generación de tales campos inducidos se hará a través de la generación de altos campos de magnetización (**H**) producidos por solenoides que requerirán ser enfriados y con un consumo de energía muy elevado.

El método de separación magnética y electrostática

Por ello, una alternativa a este tipo de sistemas de separación de alta intensidad son los separadores de alto gradiente magnético. Estos separadores incrementan la fuerza magnética de atracción sobre las partículas por medio de incrementar el gradiente del campo magnético inducido ($d\mathbf{B}/dx$). Para ello utilizan circuitos solenoidales que generan un campo magnético inducido y uniforme que actúa sobre una matriz ferromagnética a la cual envuelven estos circuitos solenoidales. Volver a mencionar que los separadores de alta intensidad lo que favorecen son la generación de campos magnéticos inducidos convergentes dentro del espacio entre las placas. Pues bien, esta matriz que ha sido mencionada anteriormente, forma el núcleo del separador y es donde se produce la separación real. Estas matrices ferromagnéticas (Fig. 28) supone sólo el 10% del volumen total ocupado en el espacio de separación lo que significa una importante reducción de acero.

Dentro de la matriz se generan polos magnéticos secundarios que producen campos magnéticos inducidos de 2 Teslas pero es importante destacar que cada polo secundario genera en su vecindad gradientes de hasta 14 Teslas/mm. Por lo que se va a poder disponer de innumerables puntos de alto gradiente en los numerosos espacios que forma la matriz. Estos equipos se ven obligados a crear espacios muy pequeños entre los polos secundarios para que los altos gradientes se puedan alcanzar requiriendo así espacios inferiores a los 2 mm.

Estos separadores magnéticos, puesto que condicionan fuertemente a que la alimentación contenga partículas muy finas, se convierten en ideales para la eliminación de la pirita contenida en el carbón cuando ésta no se puede separar por otros medios (gravimetría o flotación) y así reducir las emisiones contaminantes por sulfuros de las centrales térmicas, otra aplicación es la industria del caolín para eliminar diminutas impurezas de hierro.

Algunas conocidas unidades de separación actualmente trabajando en la industria de concentración magnética de minerales son el equipo HGMS tipo carrusel de Metso Minerals, el equipo Slon HGMS de Outeq, o el HMGF de Metso Minerals. A continuación se describen los equipos suministrados por Metso Minerals.

Separador magnético HGMS tipo carrusel de Metso Minerals

El equipo que se describe aquí es fabricado por la compañía de equipos para procesos mineros Metso Minerals. Este equipo es de tipo carrusel puesto que trabaja en continuo y por vía húmeda. Es un equipo pensado para tratar pulpas minerales con un contenido en partículas magnéticas superior al 4% en peso (máximo un 35% de sólidos en peso). Estas unidades se conocen por sus siglas HGMS (del inglés, “*High Gradient Magnetic Separator*”).

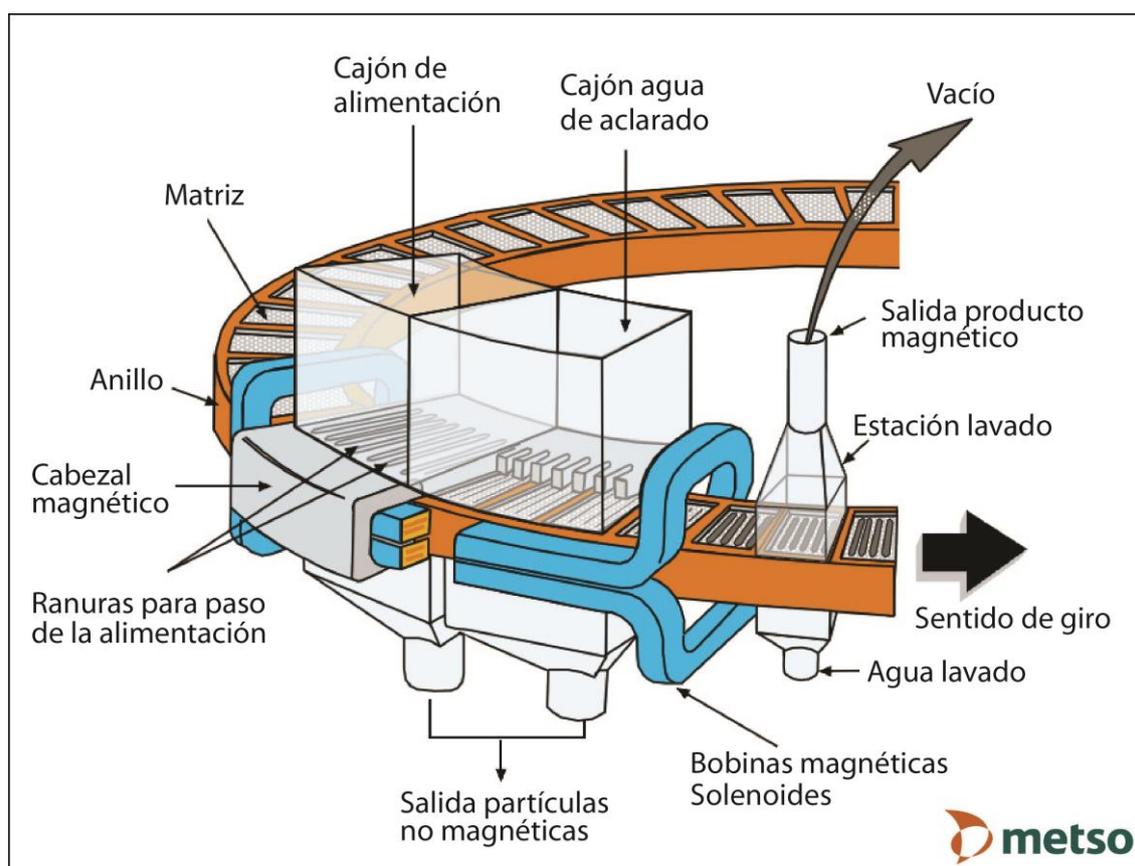


Fig. 30. Vista esquemática de los principales elementos del separador magnético de alto gradiente (HGMS) tipo carrusel de Metso Minerals (cortesía Metso Minerals).

En la Fig. 30 se señalan algunas de las principales partes que caracterizan a este tipo de separadores. En dicha figura destaca el diseño especial de las dos bobinas magnéticas (bobina magnética superior e inferior) que forman un solenoide magnético que rodea al anillo. Este solenoide formado por el bobinado eléctrico está protegido por una carcasa metálica que puede incrementar su tamaño en caso de que se necesite mayor intensidad de magnetización sin llegar a la saturación. Por

El método de separación magnética y electrostática

otro lado el anillo giratorio contiene la matriz ferromagnética que bajo la influencia del campo magnético generado por el solenoide creará innumerables puntos de alto gradiente magnético. A través del cajón de alimentación entrará la pulpa mineral que pasará a través de una serie de ranuras fabricadas con acero magnético y de ahí a la matriz del anillo giratorio. En esta última región las partículas magnéticas serán adheridas a la matriz por las fuerzas magnéticas de atracción donde permanecerán hasta que el anillo gire y saque esta región fuera de la influencia del campo magnético. Al mismo tiempo, las partículas no magnéticas descenderán por gravedad atravesando la matriz sin verse afectadas por los campos magnéticos inducidos y, donde la introducción de un chorro de agua de aclarado ayudará aún más a retirar estas partículas no magnéticas hacia la parte inferior del equipo donde serán recogidas y extraídas de la circulación (Fig. 31).

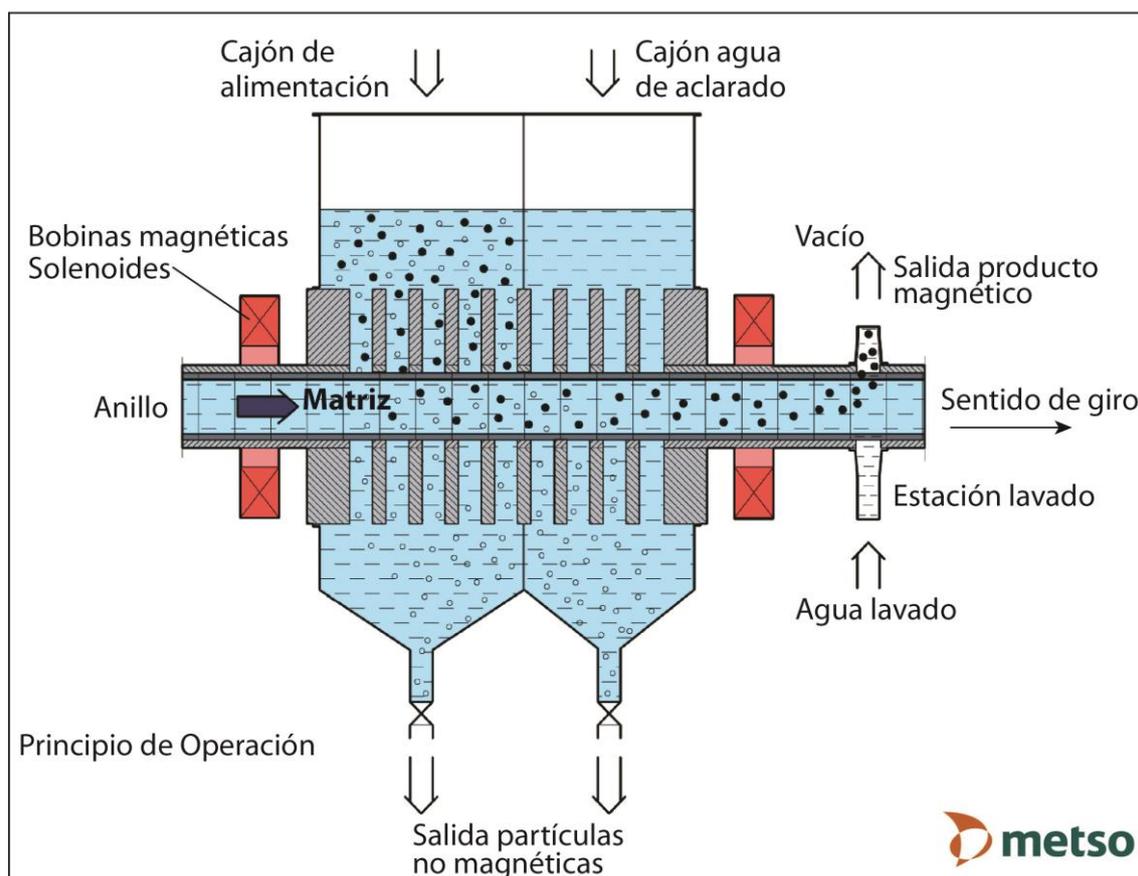


Fig. 31. Principio de operación del separador magnético tipo carrusel de Metso Minerals (cortesía Metso Minerals).

A continuación, cuando la matriz ferromagnética, cargada de partículas magnéticas adheridas, sale de la influencia de los campos magnéticos se la somete

a un chorro ascendente de agua a presión (estación de lavado) que retirará el producto magnético, también ayudado por un sistema de vacío que favorecerá su ascenso. Así, dejando la matriz limpia de partículas magnéticas y lista para otro ciclo de cargado cuando pase por el siguiente cabezal magnético.

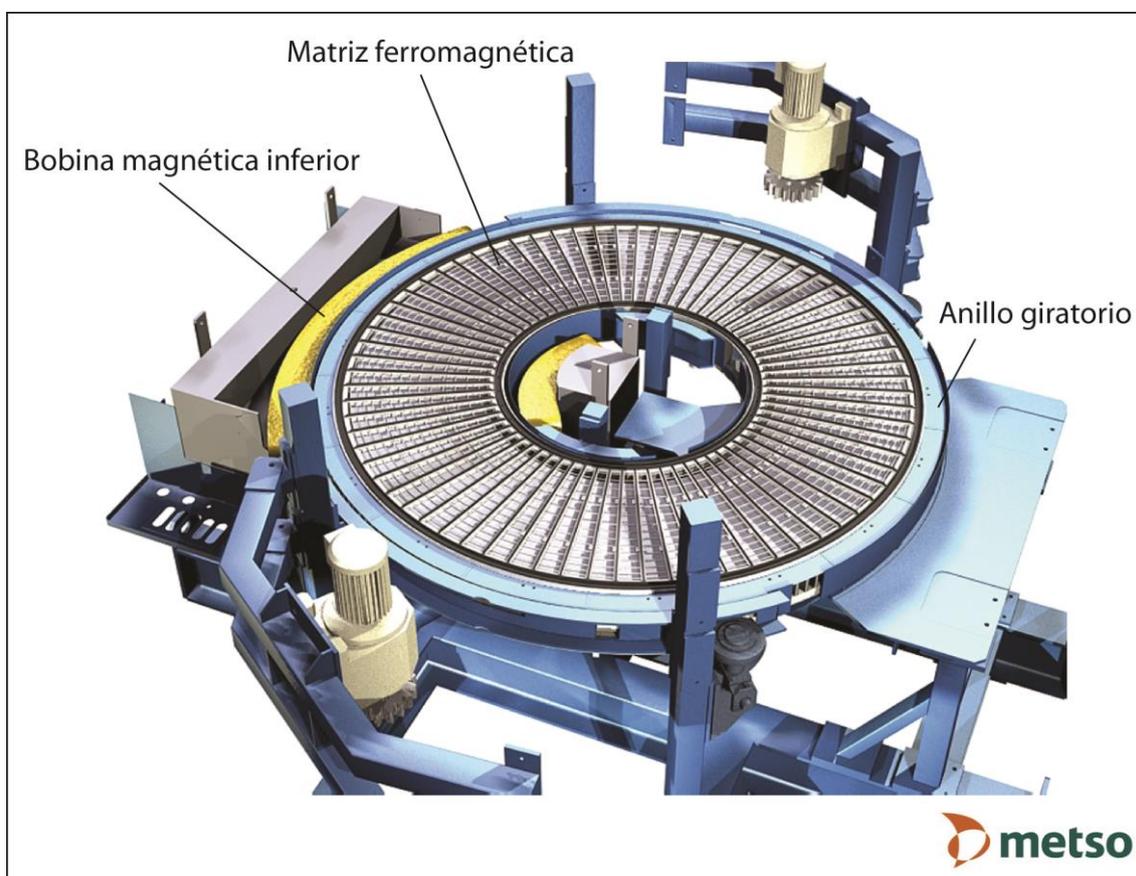


Fig. 32. Ensamblado del anillo giratorio y de la bobina magnética inferior (cortesía Metso Minerals).

El tipo de matriz seleccionada dependerá del tamaño de partícula que va en la alimentación. Generalmente esta matriz estará formada por varias capas de metal expandido que pueden variarse en función del tipo de alimentación (Imagen 8).

Por otro lado estos equipos pueden suministrarse con uno, dos y tres cabezales magnéticos (350 cm de diámetro). Con intensidades de campos magnéticos de 0.5, 1, 1.5 y 2 Teslas.

El tipo de aplicaciones para las que se propone este tipo de unidades son:

Concentración de minerales paramagnéticos (óxidos): cromita, hematita, ilmenita, magnetita y wolframita; tratamiento de minerales del grupo de las tierras

El método de separación magnética y electrostática

raras; tratamiento de minerales industriales, limpieza de carbones (desulfuración y eliminación de cenizas); separación de minerales de base metal: Cu-Mo, Cu-Pb, Zn-Pb.



Imagen 8. Equipo HGMS modelo 350-5-5-5 con dos cabezas magnéticas y detalle del anillo giratorio con la matriz ferromagnética (cortesía Metso Minerals).

Aplicación	Intensidad Campo Magnético (Teslas)	Carga de la Matriz (g/cm ³)	Velocidad Flujo Alimentación (mm/s)
Hematita	0.3 – 0.7	0.3 - 0.65	180 – 250
Ilmenita	0.5 – 0.7	0.3 - 0.45	180 – 200
Cromita	0.5 – 0.7	0.3 - 0.5	150 – 200
Mineral Manganeseo	1.0 – 1.5	0.3 - 0.5	100 – 200
Apatito	0.7 – 1.5	0.3	100 – 150
Kyanita	1.5	0.3	100 – 150

Wolframita	1.0	0.3	100 – 150
Sienita	1.2 – 1.5	0.3	60 – 90
Arena silícea	1.5	0.3 – 1.0	60 – 90
Mica	0.8 – 1.0	0.3 - 0.8	60 - 90

Tabla 2. Rangos de operación típicos para algunas de las sustancias procesadas con el separador magnético HGMS de carrusel de Metso Minerals (Fuente: Metso Minerals).

En la Tabla 2 se señala los rangos de operación de las principales variables para el separador magnético de carrusel de Metso Minerals tratando diferentes sustancias. Estos valores se deben tomar como orientativos y a modo de ejemplo.

Separador magnético HGMF cíclico de Metso Minerals

Es una adaptación tecnológica del mismo principio físico que rige la separación magnética basada en el alto gradiente magnético comentado anteriormente. Por lo que está pensado para tratar sustancias débilmente magnéticas que requieren la aplicación de intensidades de campo superiores a 2 Teslas. Una de sus diferencias es que trabaja de forma cíclica.

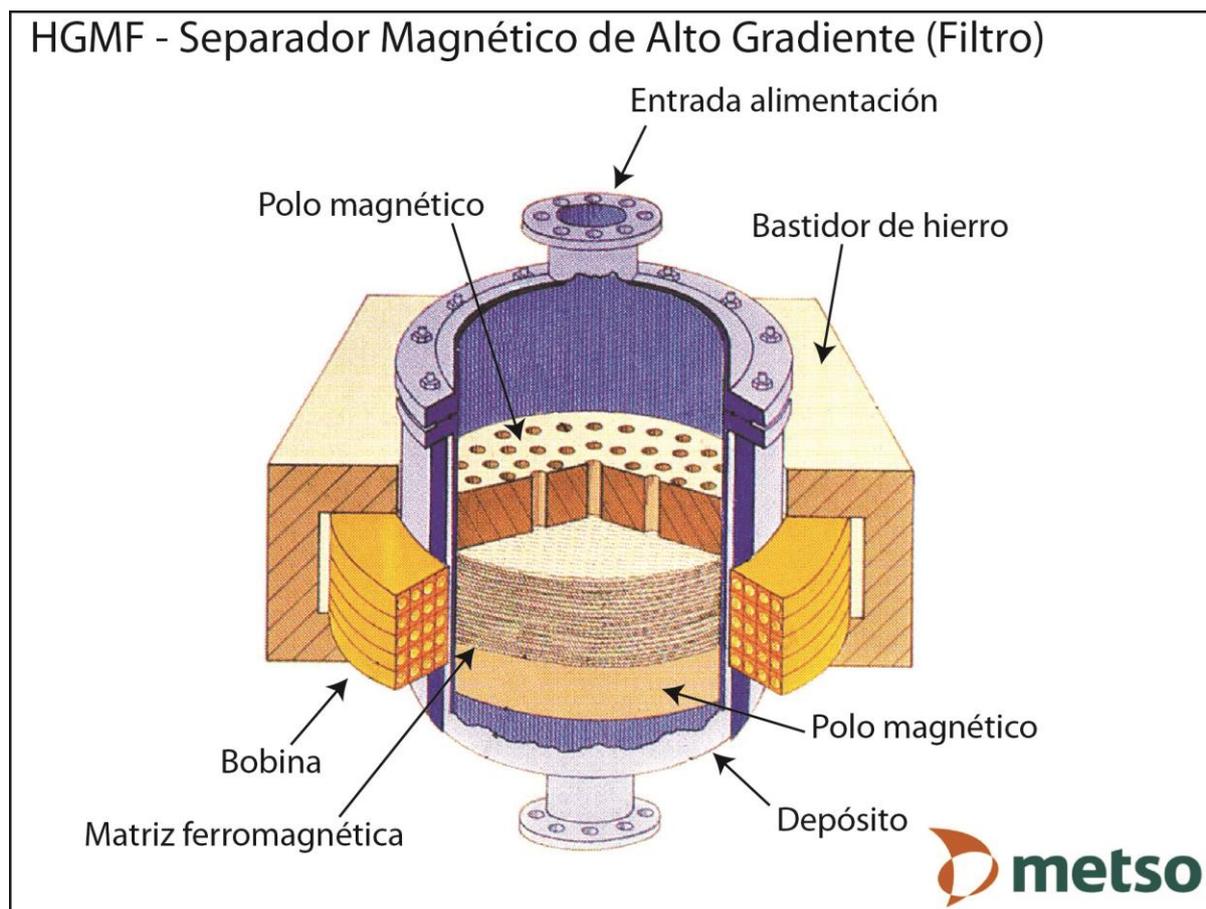


Fig. 33. Separador magnético de alto gradiente para trabajos cíclicos y por vía húmeda (cortesía Metso Minerals).

Se le conoce por sus siglas en inglés HGMF (*High Gradient Magnetic Filter*). Son unidades recomendadas para tratar alimentaciones que contienen un porcentaje en peso de mineral débilmente magnético inferior al 4%. La unidad de separación consiste básicamente en un recipiente o depósito metálico que contiene un cartucho cilíndrico que en su parte central estará ocupado por una matriz fabricada de lana o fibra ferromagnética. En los extremos de este cartucho y cerrando la matriz se encuentran dos piezas metálicas que trabajarán como polos magnéticos durante la operación de separación. Estos polos se generan como consecuencia de la corriente eléctrica que se hace circular dentro del bobinado eléctrico que rodea al depósito y que se encuentra protegido por un bastidor metálico en forma de yugo (Fig. 33).

Metso Minerals ofrece diferentes tamaños de unidades donde las dimensiones de este cartucho pueden suministrarse con diámetros que van desde

los 10 cm hasta los 305 cm, con alturas de matriz entre los 15 y los 50 cm. Según el equipo, se crearán campos magnéticos comprendidos entre los 0.3 y los 2 Teslas.

De forma similar al equipo HGMS tipo carrusel de Metso Minerals, las aplicaciones pasan por el beneficio de caolín, eliminación de partículas ferrosas contenidas en arenas silíceas, feldespatos y barita, eliminación del contenido de cenizas y de pirita en carbones, mejora de la calidad final de los fosfatos.

En la Fig. 34 y Fig. 35 se representa esquemáticamente al separador HGMF de Metso Minerals mostrando las diferentes fases de trabajo que completan su ciclo de trabajo y que viene a durar unos 7.5 minutos.

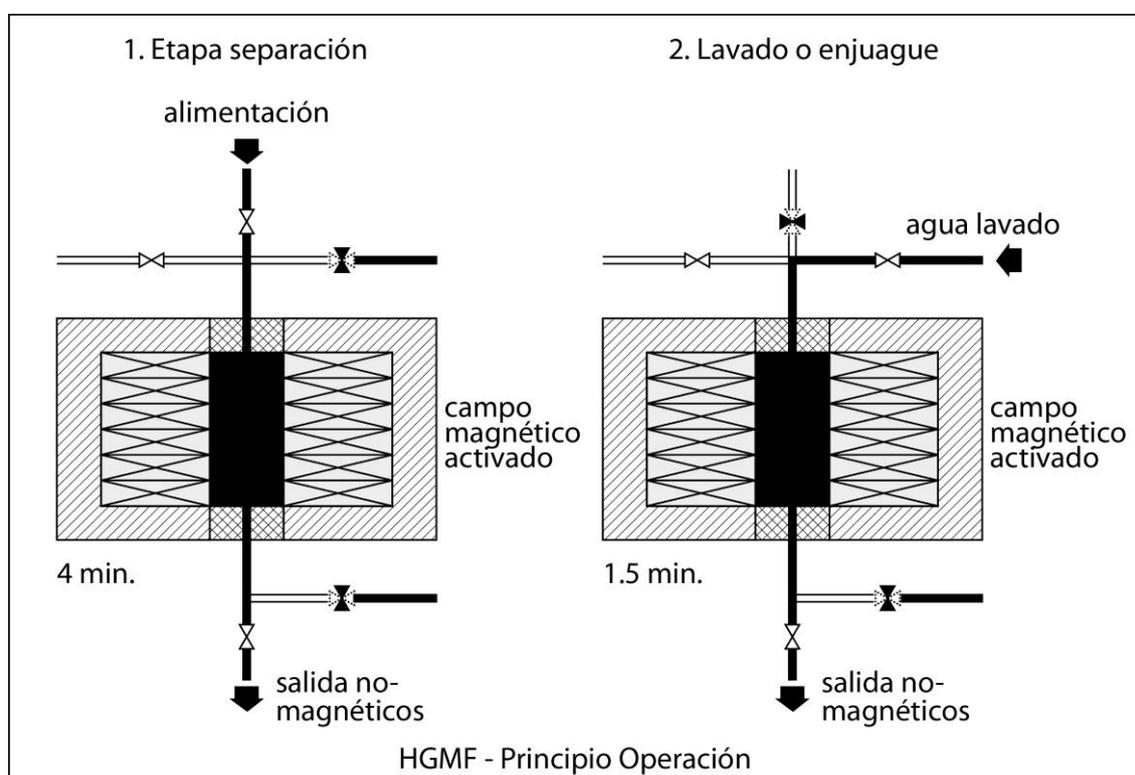


Fig. 34. Etapas 1 y 2 de operación del HGMF cíclico de Metso Minerals.

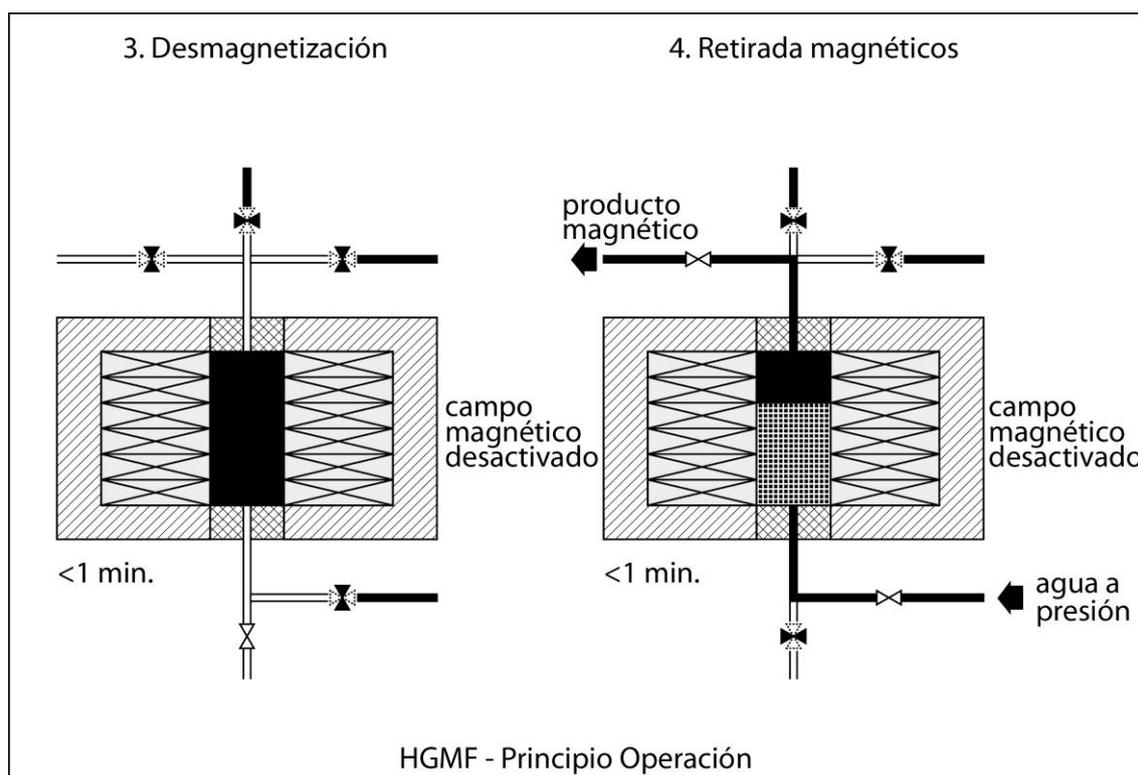


Fig. 35. Etapas 3 y 4 de operación del HGMF cíclico de Metso Minerals.

Separador magnético SLon VPHGMS de Outotec

El separador SLon VPHGMS (del inglés, “Vertical Pulsating High Gradient Magnetic Separator”) de Outokumpu Technology, Inc., es una unidad similar a las de tipo carrusel, comentadas anteriormente, sin embargo, se diferencia en que el carrusel que alberga la matriz está en disposición vertical, además la matriz en lugar de utilizar placas de acero acanaladas utiliza barras en una disposición matricial para mejorar la intensidad del gradiente magnético. Este tipo de equipos cuenta con el avance tecnológico de incorporar la generación de acciones de pulsación que ayudan a mejorar la separación de las partículas magnéticas evitando los fenómenos de atrapamiento de partículas no-magnéticas entre las magnéticas. Una descripción más detallada del equipo y sus aplicaciones industriales se puede encontrar en Sherrell y Dunn (2012).

Separadores Magnéticos Superconductores

Como ya se ha visto, para obtener un elevado campo magnético de hasta 2 Teslas hay que hacer pasar una corriente eléctrica a través de un bobinado, o bien,

emplear imanes permanentes. Sin embargo, ambos sistemas presentan un punto para el cual más allá no se puede incrementar el campo magnético. Así por ejemplo, los equipos que utilizan bobinas, éstas estarán limitadas por la resistencia eléctrica intrínseca que se genera por el enrollamiento y que será un obstáculo a la hora de ofrecer mayores intensidades magnéticas. Por otro lado, los imanes permanentes podrán experimentar sólo ligeras mejoras en la intensidad de campo que generan a través de la modificación de la geometría del imán. Sólo la aparición de nuevas aleaciones o materiales podrán solventar las limitaciones que presentan actualmente estos equipos.

Así, sólo el desarrollo de los imanes superconductores ha permitido alcanzar valores de intensidad magnética de hasta 5 Teslas (6 Teslas empleando equipos de laboratorio o de plantas piloto) en condiciones viables, tanto económicas como técnicas, para emplearse en la industria de la separación de minerales.

Estos equipos superconductores se basan en la implantación de un sistema de enfriamiento criogénico y el uso de aleaciones superconductoras. Se sigue investigando sobre el desarrollo de nuevos materiales candidatos a formar parte de sistemas de imanes más potentes, pero actualmente la aleación más extendida para equipar los separadores es la aleación de niobio-titanio. Este material es adecuado para trabajar a temperaturas de -269° Celsius (4 K). Trabajar a estas temperaturas tan bajas es debido a que estas aleaciones no van a presentar ninguna resistencia al paso de la corriente eléctrica. Esta capacidad, es importante, puesto que una vez que la corriente comienza a circular a través del bobinado fabricado con material superconductor, seguirá circulando sin necesidad de que la bobina se conecte a una fuente de energía eléctrica. Y en estas condiciones el bobinado se convertirá en un imán permanente.

En relación al sistema criogénico, también se está avanzando en el desarrollo de sistemas para operar entre los -253° (20 K) y los -243° Celsius (30 K). Este interés en mejorar el sistema criogénico o los materiales superconductores que trabajen adecuadamente a temperaturas cada vez más altas es importante, puesto que, mantener esas temperaturas tan bajas va a ser la parte más costosa del sistema magnético de separación.

El método de separación magnética y electrostática

Debido a que la capacidad de estas aleaciones de transportar gran cantidad de corriente es limitada, también se está trabajando en conseguir aleaciones de niobio dúctiles para ser intercaladas dentro de una matriz de cobre.

Dentro de los separadores magnéticos superconductores se puede hablar de equipos separadores de alto gradiente (HGMS) y de equipos separadores de gradiente abierto (OGMS). A continuación se describen un separador magnético representativo de cada grupo.

Separador magnético superconductor HGMS Cryofilter de Carpco

Este equipo también se basa en el principio de operación, ya comentado, de los separadores de alto gradiente magnético o HGMS, donde las partículas magnéticas serán retenidas dentro de una matriz fabricada con lana de acero inoxidable situada en un cartucho (“*canister*”) que se encontrará emplazado en el interior del sistema magnético superconductor; pero éste trabajando a una temperatura de -269°C .

El sistema magnético, una vez que es energizado, los extremos del bobinado son desconectados de la unidad dejando al sistema magnético completamente energizado sin necesidad de un suministro adicional de energía eléctrica (estado persistente).

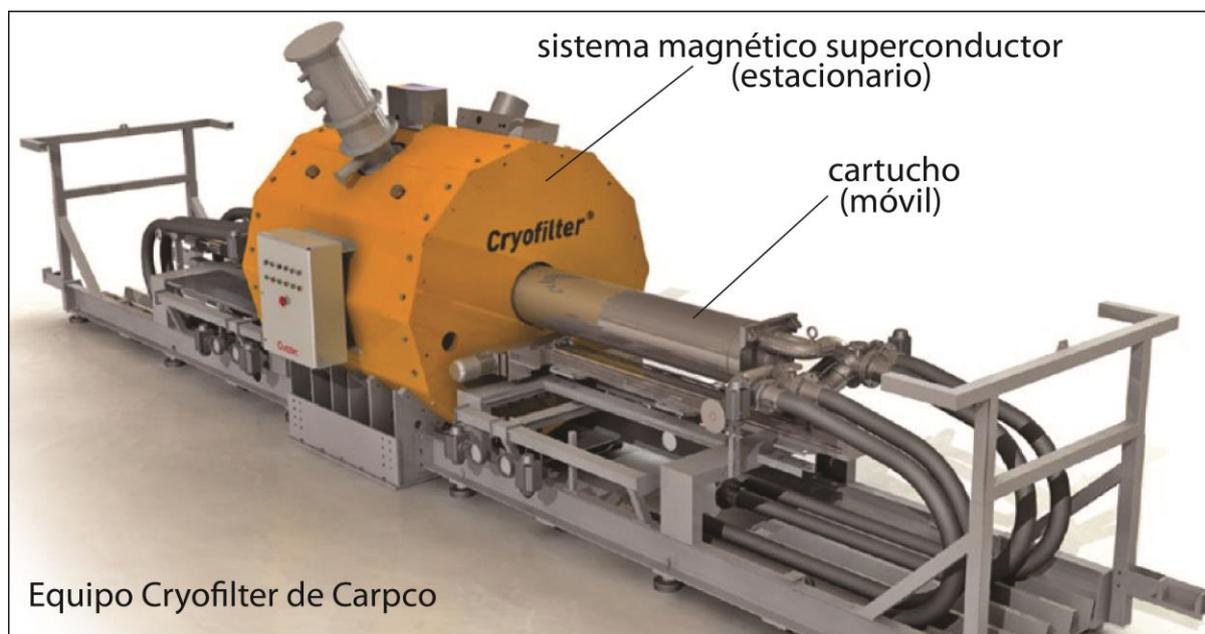


Imagen 9. Principales elementos del equipo Cryofilter de Carpco (cortesía Outokumpu Technology Inc.).

Este separador se basa en un diseño original basado en un cartucho con movimiento cíclico de vaivén que se desliza dentro del sistema magnético superconductor que se encuentra estacionario (Imagen 9).

Esto permite que la unidad esté continuamente suministrando producto limpio formado por partículas magnéticas, alcanzándose una mayor capacidad de producción. De esta forma, en todo momento, una parte del cartucho estará fuera de la influencia del campo magnético, para que la matriz se desmagnetice y así recuperar las partículas magnéticas atrapadas mediante el uso de agua de lavado a presión (Fig. 36).

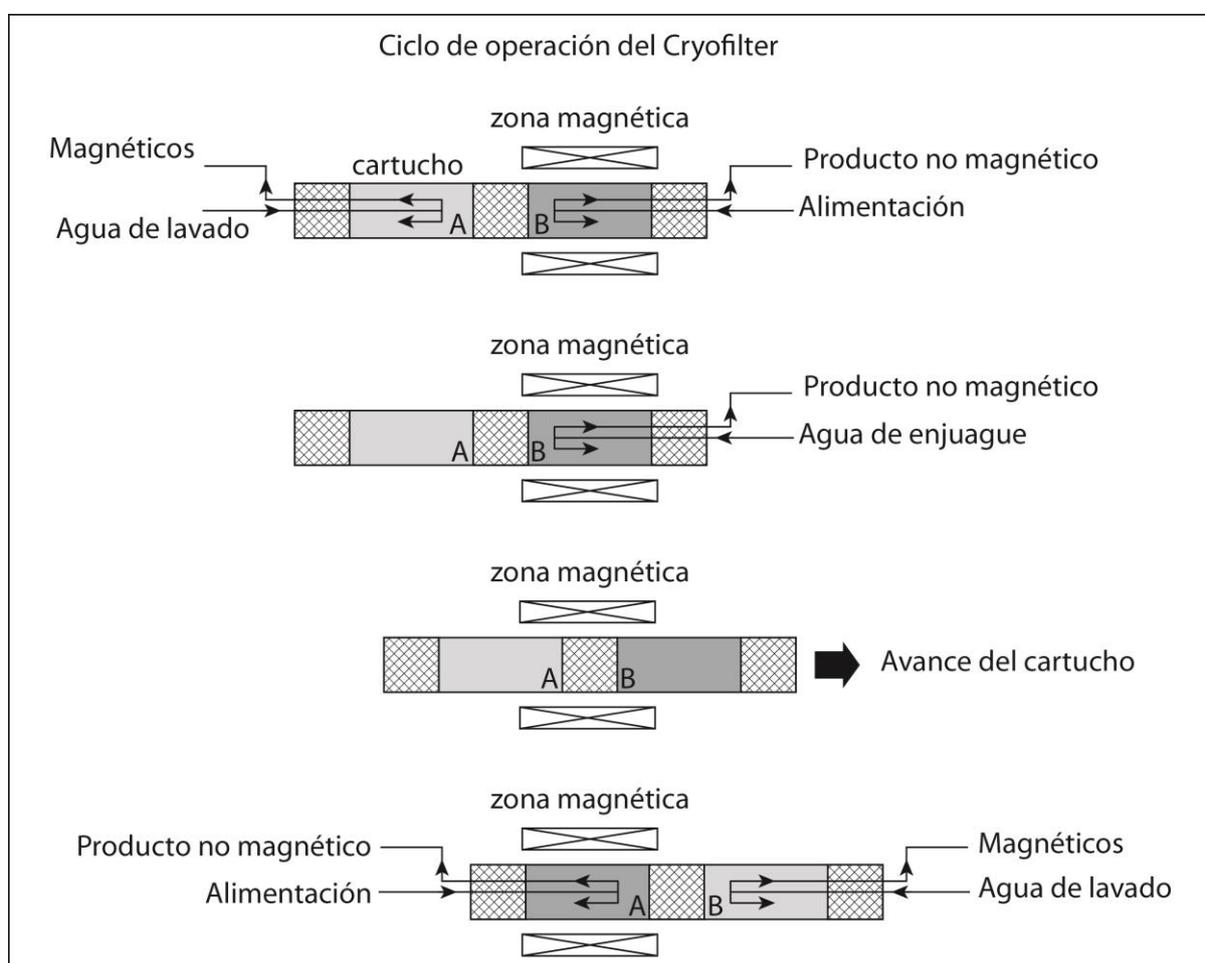


Fig. 36. Ciclo de operación para un equipo Cryofilter de Carpco (cortesía Outokumpu Technology Inc.).

El método de separación magnética y electrostática

Mientras, de forma simultánea, la otra parte del cartucho estará dentro del espacio creado por el imán para que bajo la influencia de los intensos campos magnéticos crear altos gradientes magnéticos que favorezcan la retención de las partículas magnéticas en la matriz de lana y favorecer la eliminación de las partículas no magnéticas con ayuda de agua de aclarado (Fig. 37).

El sistema criogénico consistirá en un circuito cerrado de helio líquido que es enviado a un depósito o acumulador donde se encuentra el imán superconductor que será bañado por el helio. Este sistema criogénico elimina la necesidad de emplear nitrógeno líquido. Además, se emplea un sistema enfriador en circuito cerrado para interceptar cualquier radiación de calor y así reducir la tasa de evaporación del helio y por ende, reducir la pérdida de éste. Esto hace que sólo sea necesario reponer helio líquido de forma muy ocasional.

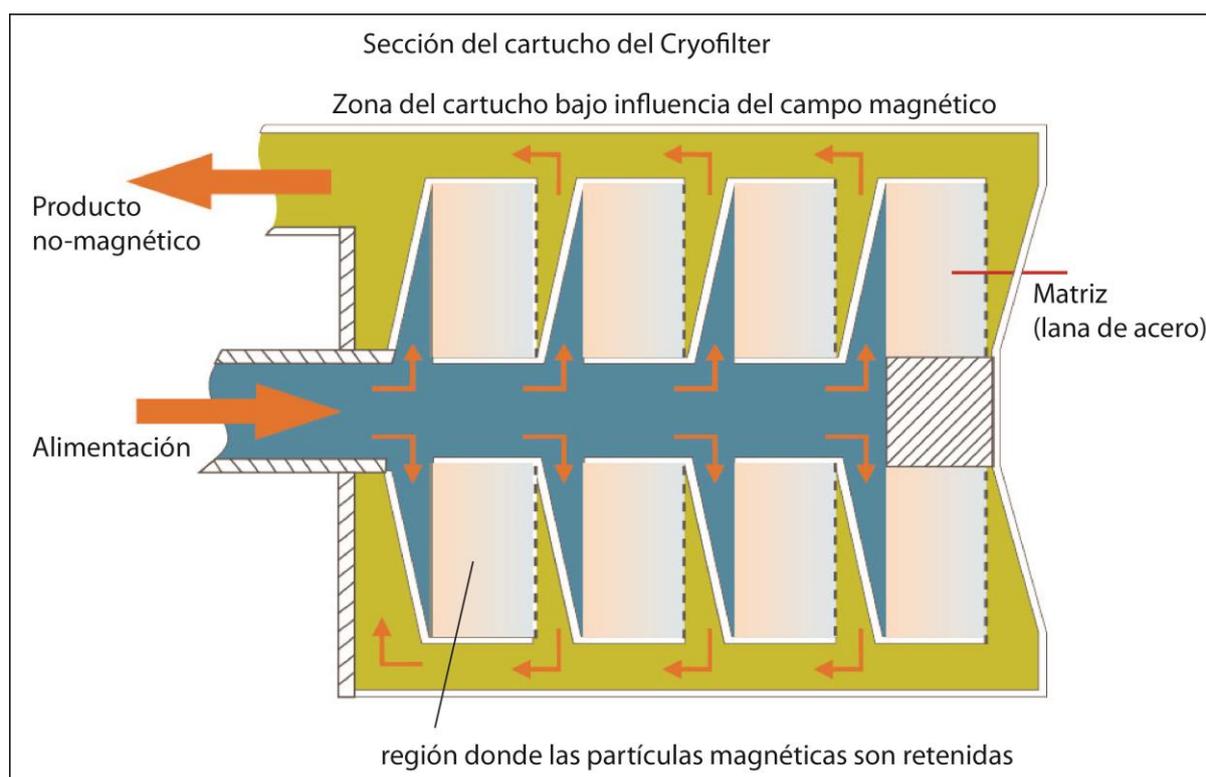


Fig. 37. Sección del cartucho del Cryofilter (cortesía Outokumpu Technology Inc.).

El equipo Cryofilter de Carpco (Outokumpu Technology, Inc.) tiene un uso muy extendido para el procesamiento del caolín.

Separador magnético superconductor de gradiente abierto (OGMS)

En un equipo convencional OGMS (del inglés, “*Open-Gradient Magnetic Separator*”) la estructura del sistema magnético es dispuesta para proporcionar una región en un espacio abierto con un campo altamente divergente (Fig. 38). Así, cualquier partícula paramagnética que pase a través de esta región va a experimentar una fuerza que será directamente proporcional a la intensidad del campo y a la magnitud del gradiente. Sin embargo, un equipo OGMS superconductor va a establecer fuerzas magnéticas más altas y campos magnéticos más profundos que se traduce en mayores volúmenes de separación que los obtenidos en sistemas electromagnéticos convencionales.

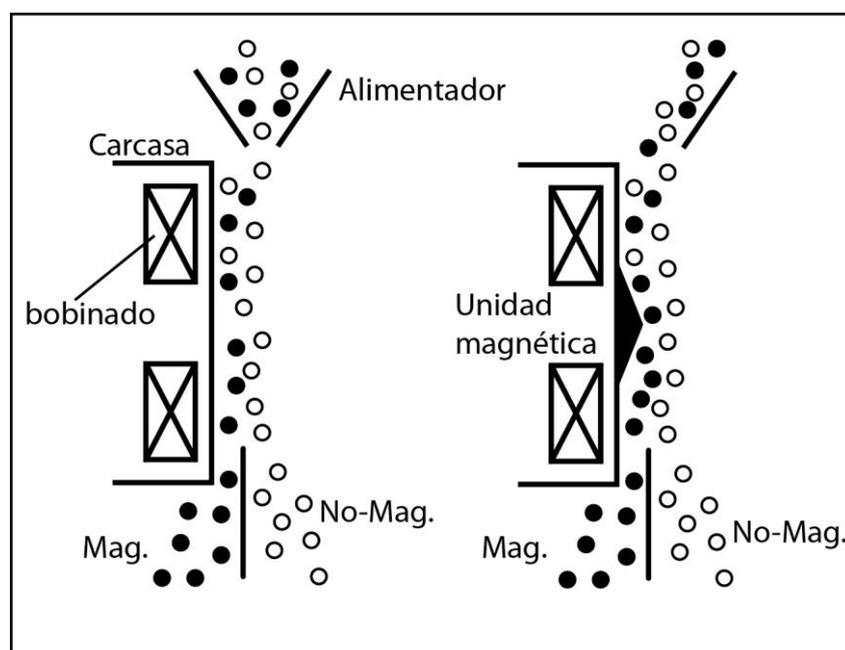


Fig. 38. Esquemas de equipos trabajando en gradiente abierto.

La compañía Carpco (Outokumpu Technology, Inc.) suministra un equipo de separación magnética donde el sistema magnético se dispone inclinado; permitiéndose a la alimentación caer cerca de esta región (Fig. 39). Este equipo puede tratar partículas que van desde los 0.075 mm hasta los 10 mm (bauxita, arenas silíceas, diamantes).

El método de separación magnética y electrostática

El tipo de enrollamiento del bobinado y la geometría global de este sistema lo hacen ideal para un enfriamiento indirecto, lo que lo convierte en un sistema más económico y más simple tecnológicamente. Este equipo posee un campo magnético central de intensidad 4 Teslas (40000 gauss) y genera un gradiente magnético de $200 \text{ T}^2/\text{m}$ ideal para tratar minerales con susceptibilidades magnéticas del orden de los 10^6 emu/g .

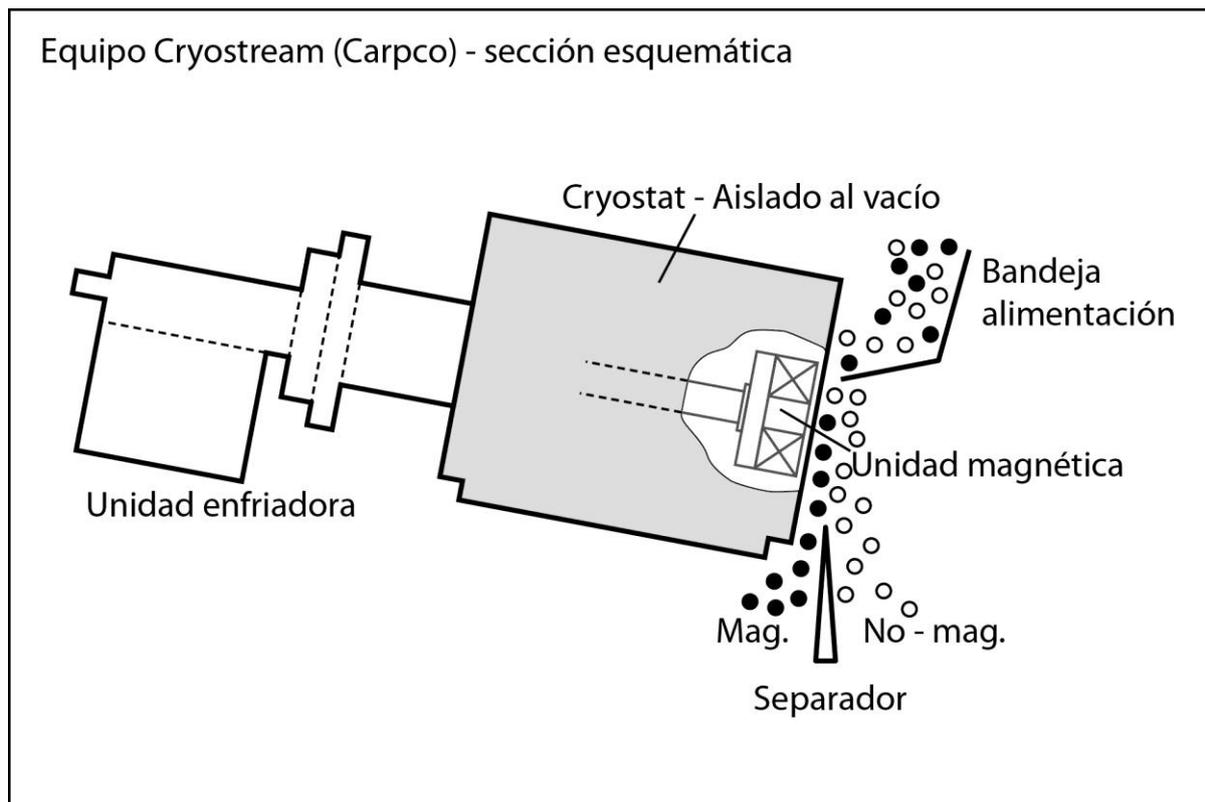


Fig. 39. Sección esquemática del equipo Cryostream de Carpc (cortesía Outokumpu Technology, inc).

El tipo de enrollamiento del bobinado y la geometría global de este sistema lo hacen ideal para un enfriamiento indirecto, lo que lo convierte en un sistema más económico y más simple tecnológicamente. Este equipo posee un campo magnético central de intensidad 4 Teslas (40000 gauss) y genera un gradiente magnético de $200 \text{ T}^2/\text{m}$ ideal para tratar minerales con susceptibilidades magnéticas del orden de los 10^6 emu/g .

Otro equipo OGMS empleando un tambor está siendo comercializado desde finales de los 80s. Aunque la separación se lleva a cabo de una forma similar a la de

un separador magnético de tambor convencional, sin embargo, la densidad del flujo magnético en la superficie de este tambor alcanza intensidades superiores a los 4 Teslas. Esto es debido a la instalación de un sistema magnético superconductor instalado en el interior del tambor (Fig. 40).

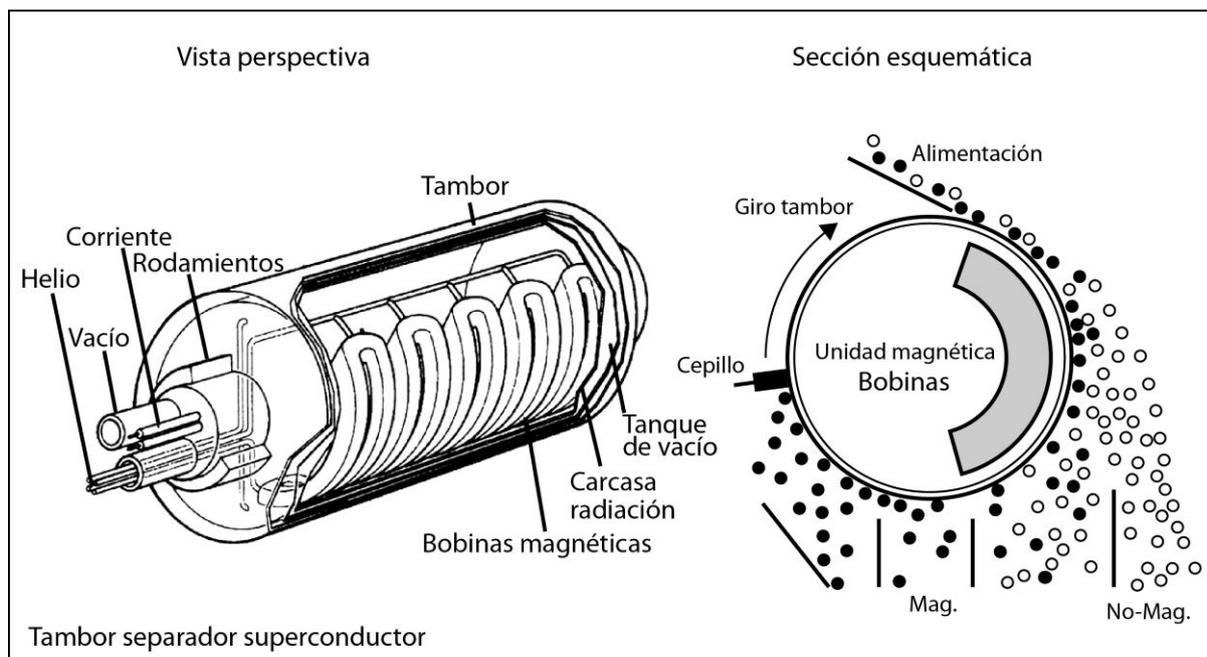


Fig. 40. Separador de tambor superconductor (modificado de Wills y Napier-Munn, 2006).

A continuación se facilitan dos tablas-resumen sobre las características de intensidad magnética de los principales equipos Carpcó, así como los tamaños de partícula que debe cumplir la alimentación para que los equipos de separación magnética trabajen adecuadamente.

El método de separación magnética y electrostática

Equipos Carpco de Alta Intensidad Magnética (HIMS) - Vía Seca		
		Fuente: Outokumpu Technology, Inc.
Forma de Separación Magnética	Intensidad Campo Magnético (Gauss)	Equipo Carpco
TIERRAS RARAS	5000 - 10000	RARE EARTH DRUM - MAGFORCE
ELECTROIMÁN	0 - 20000	METER MAGNET INDUCED - ROLL
SUPERCONDUCTOR	20000 - 50000	CRYOFLOW - CRYOSTREAM

Fig. 41. Equipos Carpco de separación magnética para vía seca (Outokumpu Technology, Inc.).

Equipos de separación magnética (vía seca/húmeda)						
	Fuente: Outokumpu Technology, Inc.					
Rango del tamaño de partícula en la alimentación	10 mm	1.0 mm	0.1 mm	0.075 mm	0.045 mm	0.001 mm
		18 mallas 1000 µm	140 mallas 100 µm	200 mallas 75 µm	325 mallas 45 µm	1 µm
Imanes superconductores (vía seca)	CRYOSTREAM		CRYOFLOW			
Separador/detector de metales						
Imán de tierras raras de tambor (seco/húmedo)	SECO	SEC/HUMED	HUMED			
Imán de tierras raras de rodillo (vía seca)						
Imán inducido de rodillo (vía seca)						
WHIMS (vía húmeda)						
Superconductor (vía húmeda)	CRYOFILTER					

Fig. 42. Tabla sobre los rangos de tamaño de partícula que aceptan los equipos de separación magnética (Outokumpu Technology, Inc.).

El Método Electroestático

INTRODUCCIÓN

La separación electrostática se empleó por primera vez a finales del siglo XIX para la concentración de oro y sulfuros metálicos (minerales altamente conductores)

y la eliminación de la ganga silíceo (sustancias poco conductoras), ver Fig. 43. A principios del siglo XX apareció el primer separador electrostático de descarga de corona para la separación de la esfalerita de la galena, y cuyo principio de separación de alta tensión se aplica en la actualidad (Kelly y Spottiswood, 1990). Con la aplicación y posterior desarrollo de la separación por flotación se redujo casi por completo la opción electrostática hasta que a partir de 1940 la fuerte demanda de mineral de rutilo como fuente de titanio hizo resurgir nuevamente el desarrollo de estos equipos. El avance tecnológico que se ha alcanzado con esta técnica ha hecho que sea una opción viable de concentración para otros minerales. Así, en la tabla de la Fig. 43 se indica la posibilidad de que una mezcla de minerales situados en diferentes columnas de dicha tabla pueda separarse por uno o una combinación de métodos de alta tensión, magnéticos o de gravedad. Por regla general, la separación electrostática se combina con la separación gravimétrica y la separación magnética para concentrar los minerales sulfurosos entre sí. La separación gravimétrica se emplea para limpiar el mineral de sílice. Si la mezcla de minerales pertenece a una misma columna, el método de separación deberá ser gravimétrico y éste tendrá éxito si la diferencia de densidad específica es superior a 1.0.

El método de separación magnética y electrostática

Densidad específica	No conductores (atraídos por alta tensión)			Conductores (lanzados por alta tensión)			
	Magnéticos	Débilmente magnéticos	No magnéticos	Sumamente magnéticos	Magnéticos	Débilmente magnéticos	No magnéticos
Más de 8.0							Oro Cobre
8.0							
7.5					Ferberita	Wolframita	Galena Casiterita
7.0							
6.5							
6.0			Schelita			Columbita- Tantalita	
5.5							
5.0	Monacita	Basnesita		Magnetita Ilmenita (alto hierro)	Ilmenita	Samarsquita Euxenita	Pirita
4.5	Xenótimo		Circón Barita		Davidita	Hematita	Molibdenita
4.0	Granate Siderita Estauroлита		Corindón Celestita Perovskita Cianita			Cromita	Rutilo Calcopirita Brookita Limonita Diamante
3.5		Epidoto Olivino Apatita Hornblenda Turmalina	Topacio Esfeno Silimanita Fluorita Anhidrita Mica (Moscovita)				
3.0							
2.5		Mica (Biotita)	Berilo Feldspatos Calcita Cuarzo Yeso Crisotilo Azufre				
2.0							Grafito
Menos de 2.0							Fuente: Carpco

Fig. 43. Tabla sobre características de separación de los minerales. Hay que hacer notar que la forma de los granos o su tamaño influyen de forma importante en sus características de separación (Fuente: Carpco – Outokumpu Technology, Inc.).

La aplicabilidad industrial de este método radica en el hecho de que casi todos los minerales muestran algún grado de conductividad. Este método aprovechará la diferencia en la conductividad eléctrica o la carga eléctrica superficial de las especies minerales. En este sentido, cuando las partículas minerales se ven sometidas a la influencia de un campo eléctrico, dependiendo del grado de conductividad que presentan, acumularán una carga cuya cantidad depende de la densidad máxima de carga acumulable que pueden alcanzar las partículas según su naturaleza y de su área superficial (Fuerstenau y Han, 2003). Una vez que se ha conseguido que las partículas minerales adquieran una carga eléctrica superficial se podrán separar por atracción o repulsión electrostática diferencial. A continuación se detallarán los principios y equipos empleados de los diferentes tipos de métodos

electrostáticos: carga de contacto o triboelectrificación, carga por bombardeo de iones y carga por inducción conductiva.

La separación electrostática se emplea en la actualidad fundamentalmente para: la separación del rutilo y la ilmenita del zircón y la monacita procesando los depósitos aluviales y de arenas de playa (depósitos tipo placer de Australia y EEUU); la separación de la casiterita, la columbita y la ilmenita de la ganga (Malasia, Tailandia y Nigeria); la obtención de hematita especular limpia de fósforo y con bajo contenido de sílice (Canadá); y por último, una implantación cada más importante de estas técnicas en la industria del reciclado de metales y plásticos (www.carpco.com; Tilmatine *et al.*, 2009).

TEORÍA DE LA SEPARACIÓN ELECTROSTÁTICA

En cualquier proceso de separación electrostática intervienen tres fases: electrificación o carga superficial de las partículas minerales, separación de las especies minerales en la superficie puesta a tierra (tambor o rodillo), y finalmente, clasificación de las partículas según sus trayectorias de caída.

Tipos de aplicación de carga sobre la superficie de las partículas

Como se ha mencionado anteriormente, las partículas pueden adquirir carga eléctrica por: contacto entre partículas no similares, bombardeo de iones, y por inducción. En la literatura técnica también se pueden encontrar con denominaciones de electrificación por contacto, electrificación por bombardeo de iones y electrificación por inducción conductiva.

Cada una de las anteriores formas de electrificación establecerán una carga superficial sobre las partículas.

Electrificación por contacto o triboelectrificación

La triboelectrificación es un tipo de separación electrostática en la cual dos especies minerales no conductoras se ponen en contacto para favorecer que adquieran cargas eléctricas opuestas sobre su superficie (Fig. 44). Una vez conseguido esto al hacerlas pasar por un campo eléctrico podrán ser separadas.

El método de separación magnética y electrostática

Debido a que el área de contacto entre las partículas es bastante pequeña habrá que diseñar equipos que favorezcan los contactos repetidos entre las partículas antes de entrar al campo eléctrico.

Un buen ejemplo sobre una fuerte electrificación negativa superficial es la que ocurre con el cuarzo cuando éste entra en contacto con los carbonatos y los fosfatos (Fig. 43).

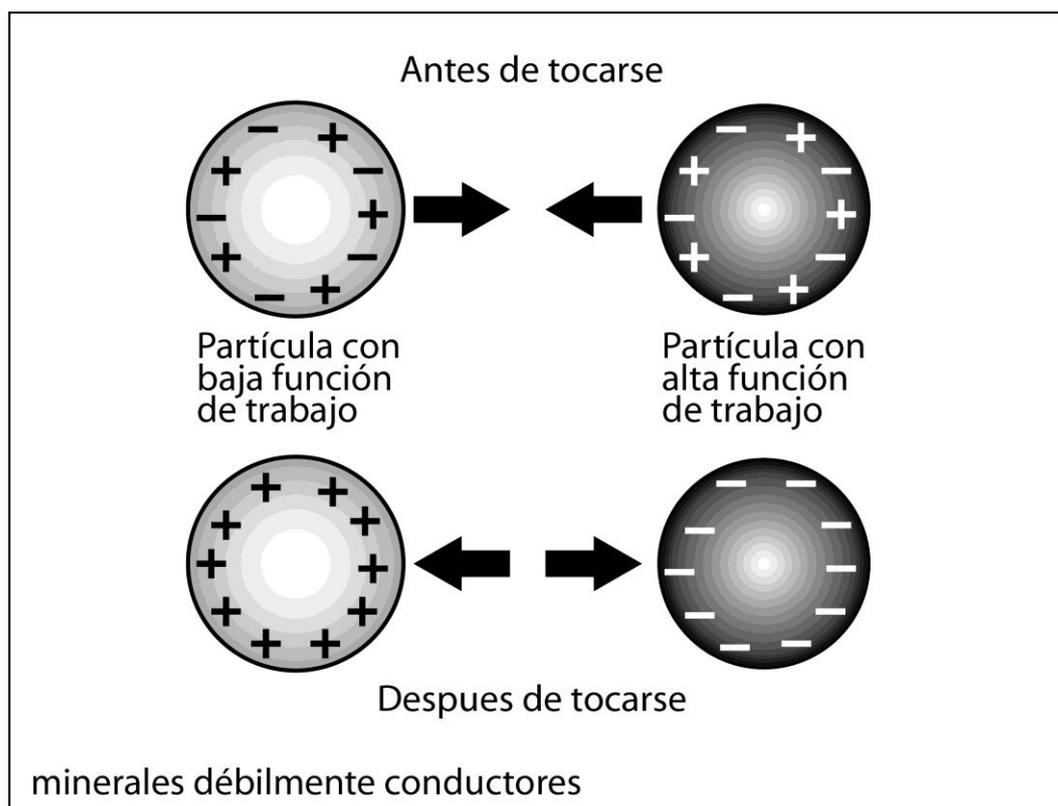


Fig. 44. Electrificación de partículas débilmente conductoras por fenómenos de contacto.

Decir que el fenómeno de superficie que interviene es la función de trabajo, la cual se puede definir como la energía necesaria para quitar electrones de una superficie. La partícula que adquiere carga positiva (pierde electrones) tendrá una función de trabajo inferior que aquella otra que es electrificada negativamente (Fuerstenau y Han, 2003). En Kelly y Spottiswood (1990), se indica que si se juntan y después se separan dos sustancias dieléctricas, aquella que posea la constante dieléctrica más elevada será la que quede cargada positivamente.

Electrificación por bombardeo iónico

Esta técnica de carga superficial se basa en el empleo de gas (aire) como medio conductor de la electricidad. Como se sabe, los metales conducen la electricidad a través del movimiento electrónico; los sólidos no conductores como la mayoría de los óxidos y silicatos, así como las soluciones acuosas, este transporte eléctrico se llevará a cabo mediante el movimiento de iones. Por otro lado, los gases, como el aire, son muy buenos aislantes eléctricos lo que significa que en condiciones normales no habrá electrones ni iones que favorezcan el transporte de la electricidad.

Sin embargo, si se crea un potencial eléctrico muy elevado entre dos electrodos se producirá una ruptura eléctrica del gas situado entre ambos para descargarse. Ahora bien, si a estos electrodos se les da la forma apropiada se podrá generar una descarga en “corona” perfectamente orientada. Esta forma óptima será la de un alambre muy fino y paralelo al tambor.

Se debe aclarar que la técnica de bombardeo iónico no es propiamente un proceso electrostático como tal, ya que la electrificación de los minerales se lleva a cabo por medio de la utilización de iones móviles establecidos por un campo eléctrico generado con un alto voltaje. En los últimos años el término de alta tensión se ha convertido en el nombre aceptado para el proceso que conlleva un bombardeo iónico.

Durante la operación de bombardeo iónico, se hace pasar partículas minerales por la región de descarga en corona, donde éstas serán alcanzadas por los electrones o aniones (si se trata de una corona negativa). Así, una porción de la superficie superior de estas partículas quedará afectada por una gran carga eléctrica negativa.

Sin embargo, cuando el bombardeo iónico cesa la carga se redistribuirá instantáneamente en las partículas conductoras (C), mientras que la redistribución de la carga en las partículas dieléctricas (NC) será muy lenta (Fig. 45).

Todas estas partículas colocadas sobre un tambor, con una superficie metálica puesta a tierra, provocará que las partículas conductoras entreguen rápidamente su carga eléctrica y se queden cargadas positivamente (Fig. 45), compartiendo su carga con la superficie del tambor, y así quedan libres para desprenderse de la superficie del tambor. Por otro lado, las partículas dieléctricas o no conductoras, reorientarán su carga superficial sin despolarizarse provocando que estas partículas queden adheridas al tambor por atracción eléctrica debido a su propia fuerza de imagen, F_i (Fig. 46).

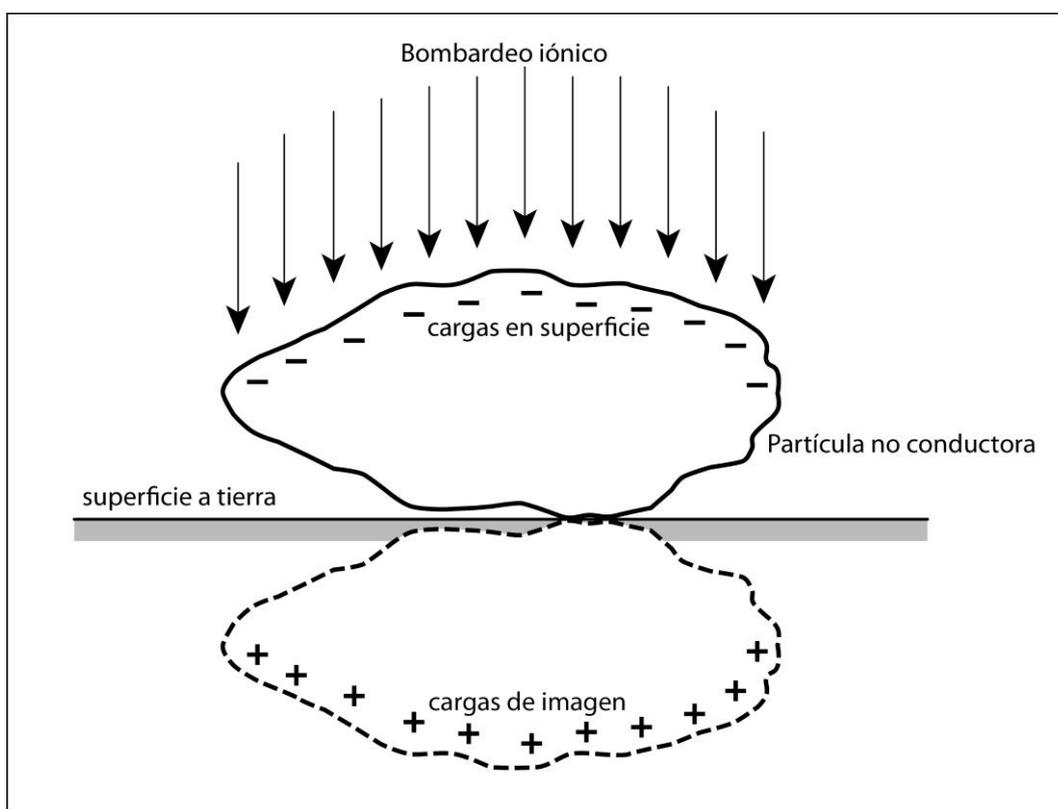


Fig. 46. Partícula dieléctrica atraída a la superficie del tambor por la fuerza de imagen.

Esta fuerza de imagen representa la atracción eléctrica entre la partícula dieléctrica y la superficie del tambor con puesta a tierra que es tratada como una partícula de carga igual y opuesta que se supone que está colocada en una posición

El método de separación magnética y electrostática

de espejo-imagen con respecto a la superficie de tierra (Fig. 46). Esta imagen de fuerza es expresada a través de la ley de Coulomb como:

$$F_i = \frac{1}{K_\epsilon} \times \frac{e^+ \cdot e^-}{r^2} \quad (1.14)$$

Siendo, K_ϵ es la constante dieléctrica; e^- es la carga negativa total sobre la superficie del mineral dieléctrico; e^+ es la carga positiva total imagen; r es la distancia entre las cargas de signo opuesto enfrentadas. La ecuación anterior se puede simplificar, considerando separación electrostática con aire, para quedar como (Fuerstenau y Han, 2003):

$$F_i = 9 \times 10^9 \cdot \frac{e^+ \cdot e^-}{r^2} \quad (1.15)$$

Electrificación por inducción conductiva

Si en presencia de un campo eléctrico se deposita una partícula sobre un conductor con puesta a tierra, en la partícula se desarrollará rápidamente una carga superficial por inducción. Tanto una partícula conductora como dieléctrica adquirirán una polarización superficial. Sin embargo, las partículas conductoras se convertirán en una superficie equipotencial (adquiriendo la polaridad y el potencial del tambor) casi instantáneamente por medio de su contacto con él (Fig. 47). Mientras que una partícula no conductora la cara más alejada del tambor necesitará más tiempo para adquirir esa misma polaridad y potencial. Y por ello, este tipo de partícula dieléctrica permanecerá polarizada (Fig. 48).

Se puede definir en términos prácticos que las partículas conductoras (C) asumirán, en un tiempo muy pequeño, el potencial del tambor, el cual es opuesto al del electrodo activo, y serán por tanto atraídas hacia éste (Fig. 49). Las partículas no conductoras (NC) se encontrarán polarizadas y tenderán con ello, en relación a su orientación polar, a ser adheridas al tambor y ser repelidas por el electrodo. Un separador o cortador, adecuadamente emplazado, puede convertir estas diferencias de trayectorias en una ventaja para llevar a cabo la separación de minerales.

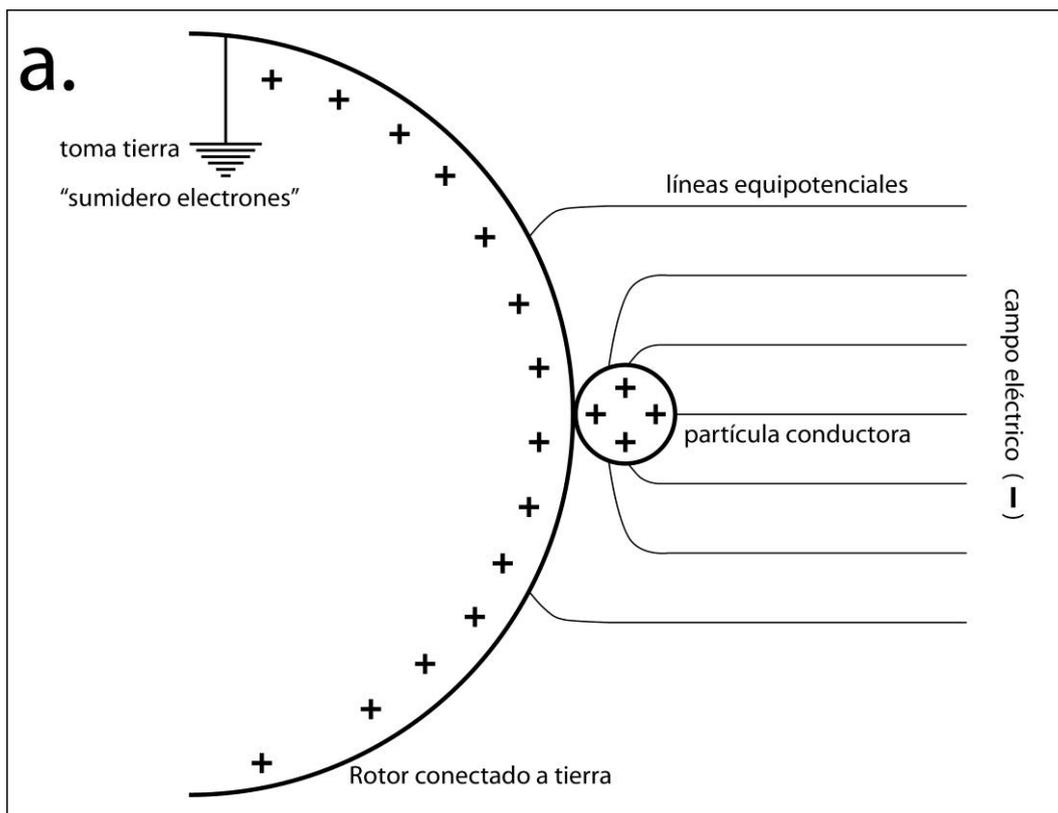


Fig. 47. Electrificación por inducción conductiva de una partícula conductora.

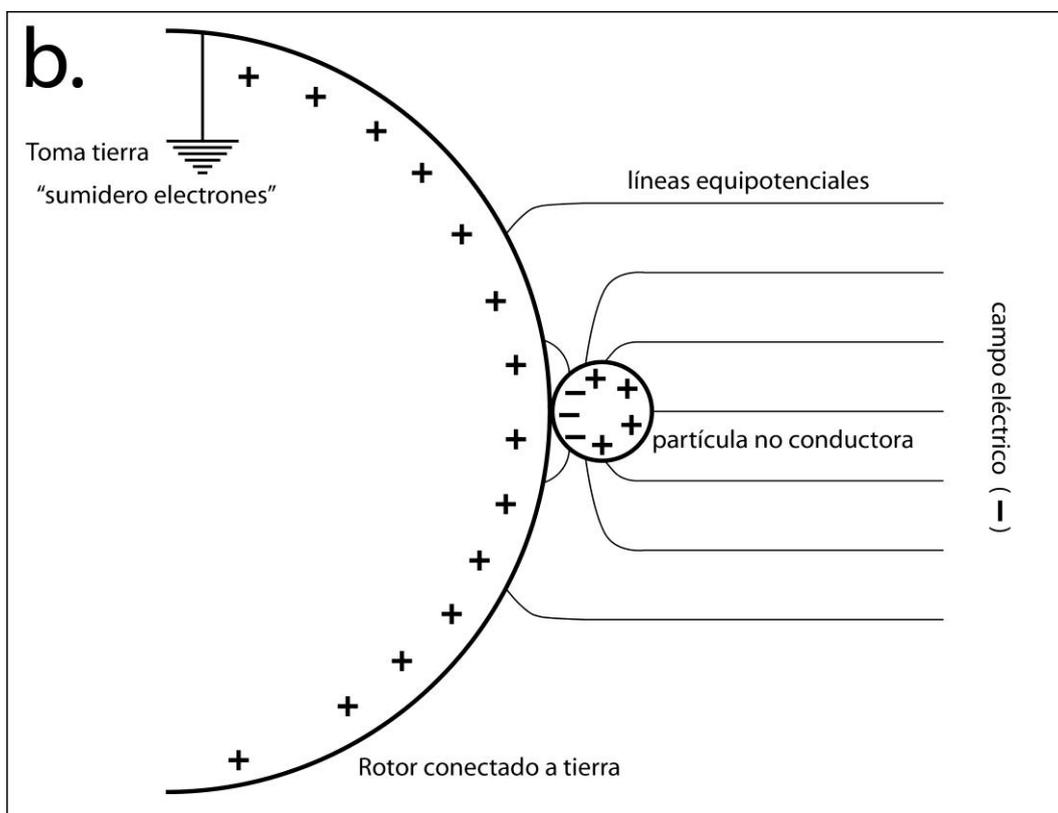


Fig. 48. Electrificación por inducción conductiva de una partícula dieléctrica.

El método de separación magnética y electrostática

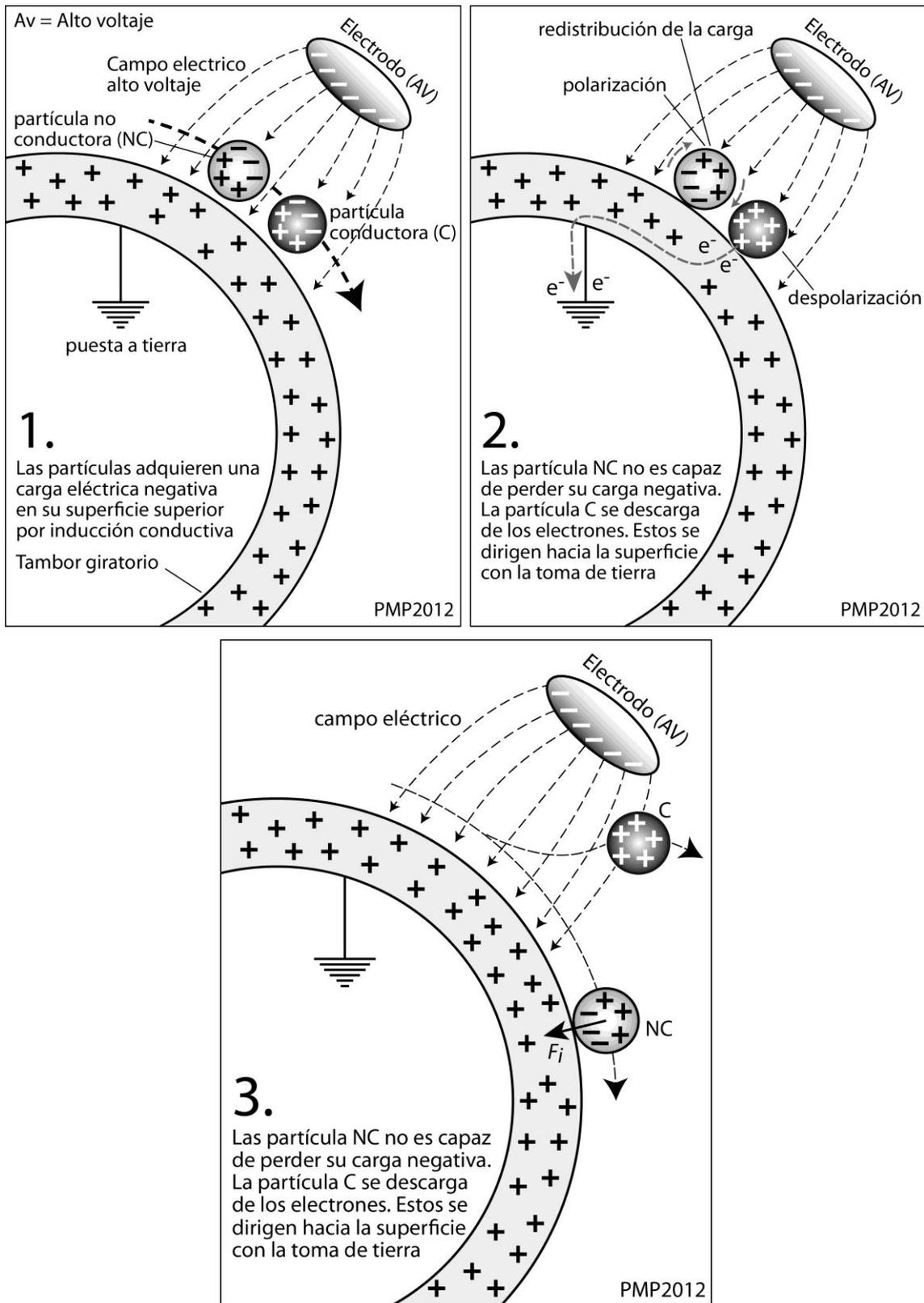


Fig. 49. Principio de funcionamiento del fenómeno de carga por conducción sobre partículas minerales.

Existe un tiempo finito que se requiere para que una partícula se cargue y éste viene expresado por la siguiente expresión (Kelly y Spottiswood, 1990):

$$e^{\pm} = K_{Cp} V \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{K_r \cdot K_{Cp}}\right)} \right) \quad (1.16)$$

Siendo, e^{\pm} la carga eléctrica; K_{Cp} es la capacitancia de la partícula; K_r es la resistencia de la partícula; y V es el potencial eléctrico aplicado. En una partícula conductora cuya conductividad es elevada, la partícula alcanzará rápidamente su carga total ($K_{Cp} \cdot V$), y por ello experimentará una fuerza eléctrica F_e , que viene expresada por:

$$F_e = e^{\pm} \cdot E \quad (1.17)$$

Donde, E es la intensidad del campo eléctrico.

Separación en una superficie puesta a tierra

En un tambor con puesta a tierra, cualquier partícula que se deposite sobre él experimentará una serie de fuerzas que será una combinación de fuerzas eléctricas, centrífugas y de gravedad (Fig. 50). Sobre una partícula, que es supuesta esférica y adherida al tambor, se considera que la fuerza de fricción, F_f , es pequeña y puede despreciarse. El resto de fuerzas que actúan sobre ella serán: la fuerza eléctrica, F_e , que está dirigida en la dirección del campo eléctrico. Sería la fuerza de atracción entre la partícula cargada y el electrodo (Ec.1.17); la fuerza de imagen, F_i , que viene expresada por la ecuación (1.15), convirtiéndose r en el diámetro de la partícula d_v . Sería la fuerza de atracción entre la partícula y el tambor puesto a tierra; la fuerza centrífuga, F_c , debida a la rotación del tambor y que para una partícula de densidad, ρ_s , se expresa como:

$$F_c = \frac{1}{6} \pi d_v^3 \rho_s \omega^2 R \quad (1.18)$$

Donde, ω es la velocidad angular del tambor; R es el radio del tambor.

Por otro lado, la expresión para la fuerza gravitatoria, F_g , será:

$$F_g = \frac{1}{6} \pi d_v^3 \rho_s g \tag{1.19}$$

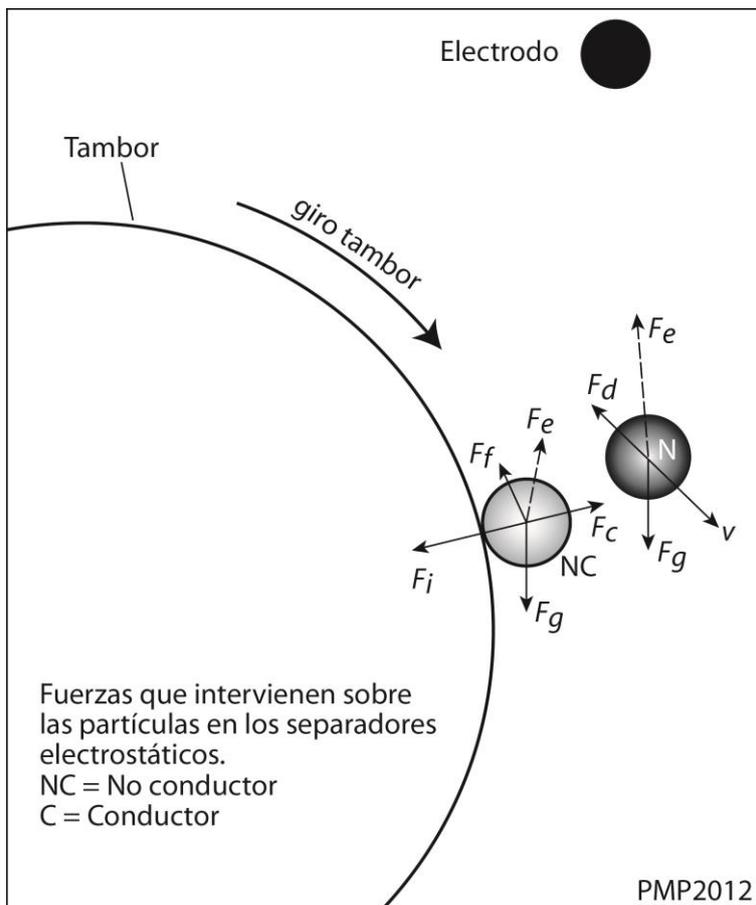


Fig. 50. Tipos de fuerzas que tienen lugar sobre las partículas minerales en una separación electrostática.

Equilibrio de fuerzas

En los separadores de alta tensión, en los que el principal mecanismo que actúa es el bombardeo iónico, las fuerzas que hay que tener en cuenta serán la fuerza de imagen y la fuerza centrífuga (Fig. 50). La relación entre estas dos fuerzas de sentido opuesto dará lo que se denomina el *factor de fijación*:

$$\frac{F_i}{F_c} = \frac{6}{\pi \rho_s K_\epsilon} \cdot \frac{(e^\pm)^2}{d_v^5 \omega^2 R} \tag{1.20}$$

Si el factor de fijación es mayor de 1, la partícula se adhiere al tambor (partícula no conductora). Por el contrario, si el factor de fijación es menor de 1, la partícula se desprenderá del tambor (partícula conductora).

Para el caso de los separadores de inducción conductiva, las fuerzas que intervienen de forma significativa serán la fuerza eléctrica y la fuerza centrífuga (Fig. 50). Aquí definiremos un *factor de elevación* que viene dado por:

$$\frac{F_e}{F_c} = \frac{6 \cdot E \cdot e^{\pm}}{\pi \rho_s \cdot d_v^3 \omega^2 R} \quad (1.21)$$

Este factor indicará la capacidad de una partícula de ser elevada desde la superficie del tambor y ser atraída hacia el electrodo. Si el separador es de tipo de placas, en este caso las fuerzas a tener en cuenta serán la fuerza eléctrica y la de gravedad:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{6 \cdot E \cdot e^{\pm}}{\pi \rho_s \cdot g \cdot d_v^3} \quad (1.22)$$

Separación por trayectorias

Una vez que la partícula se libera del tambor, se supone que su carga eléctrica se mantiene y permanece constante. Las fuerzas que actuarán sobre este tipo de partículas serán la fuerza eléctrica, la fuerza de gravedad y la fuerza de arrastre (Fig. 50). La trayectoria teórica que puede seguir una partícula se puede obtener a través de la integración numérica de las siguientes ecuaciones según las direcciones x e y , y moviéndose a una velocidad, v , en m/s (Kelly y Spottiswood, 1990):

$$F_x = -F_d \frac{v_x}{v} + e^{\pm} E_x \quad (1.23)$$

$$F_y = -F_d \frac{v_y}{v} + e^{\pm} E_y - M \cdot g \quad (1.24)$$

El método de separación magnética y electrostática

TIPOS DE SEPARADORES ELECTROSTÁTICOS

Los equipos industriales de separación electrostática que se comercializan en la actualidad se clasifican según la forma de aplicación de carga sobre la superficie de las partículas, tal y como se ha descrito anteriormente; es decir: equipos basados en el fenómeno de triboelectrificación, equipos basados en el bombardeo de iones y separadores de carga por inducción conductiva.

Los requerimientos para emplearse los separadores electrostáticos serán los siguientes: la alimentación consistirá en un flujo de partículas secas y libres, es decir, sin adherencias entre ellas; la superficie de estas partículas deberá presentarse lo más limpia posible de sustancias inhibidoras de la carga eléctrica; los minerales a separar deberán presentar un contraste importante de conductividad eléctrica entre ellos; el tamaño mínimo de partícula será de 40 micras; y el tamaño máximo será de 0.8 mm.

Equipos por triboelectrificación

Estos equipos están diseñados para favorecer el contacto de las partículas en la zona de alimentación antes de entrar en el área de separación. Por otro lado, en esta zona inicial se incrementa la temperatura hasta los 120°C ya que esto también mejora la ionización superficial de las partículas.

Una vez que las partículas caen por gravedad en la zona de separación se encuentran con la presencia a cada lado del equipo de una serie de barras sub-verticales giratorias que actúan como electrodos de diferente signo (Fig. 51). Así, las partículas cargadas, por fricción, con signo negativo serán atraídas a los electrodos positivos, y viceversa.

Estos equipos son capaces de procesar unas 25 tph de mineral con una alta recuperación (+ 90%) de productos a una alta ley.

Las aplicaciones más comunes son: la eliminación de sílice presente con otros minerales industriales no-conductores tales como: carbonato cálcico, fosfato y talco; la obtención de sílice alta pureza; y la concentración de feldespatos o barita.

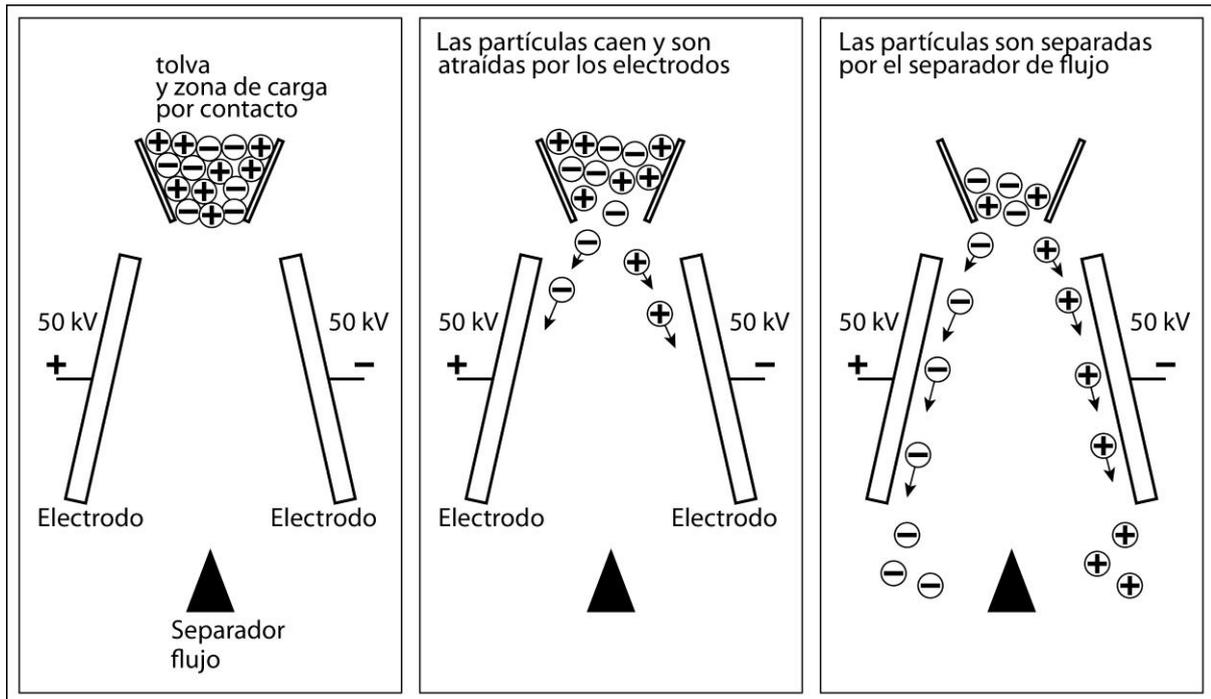


Fig. 51. Esquema del funcionamiento de un separador por triboelectrificación.



Fig. 52. Separador Triboelectrostático V-Stat (Cortesía Outokumpu Technology Inc.).

El método de separación magnética y electrostática

Además, su uso es importante en la industria del reciclado y recuperación de metales y plásticos (PVC, Nylon, PE, etc.).

Grupos internacionales de fabricación y comercialización de estos equipos son Outokumpu Technology con el equipo V-Stat de Carpcó y Roche Mining (Mineral Technology) con sus separadores electrostáticos Carrara.

Equipos por bombardeo de iones

Estos equipos consisten de un tambor conectado a tierra con una velocidad de giro entre 150 y 300 rpm. Su principal elemento es la presencia de un alambre trabajando como electrodo ionizante (Fig. 53) y que creará la descarga de corona. Para ello, será necesario aplicar voltajes de entre 24 y 26 kV.

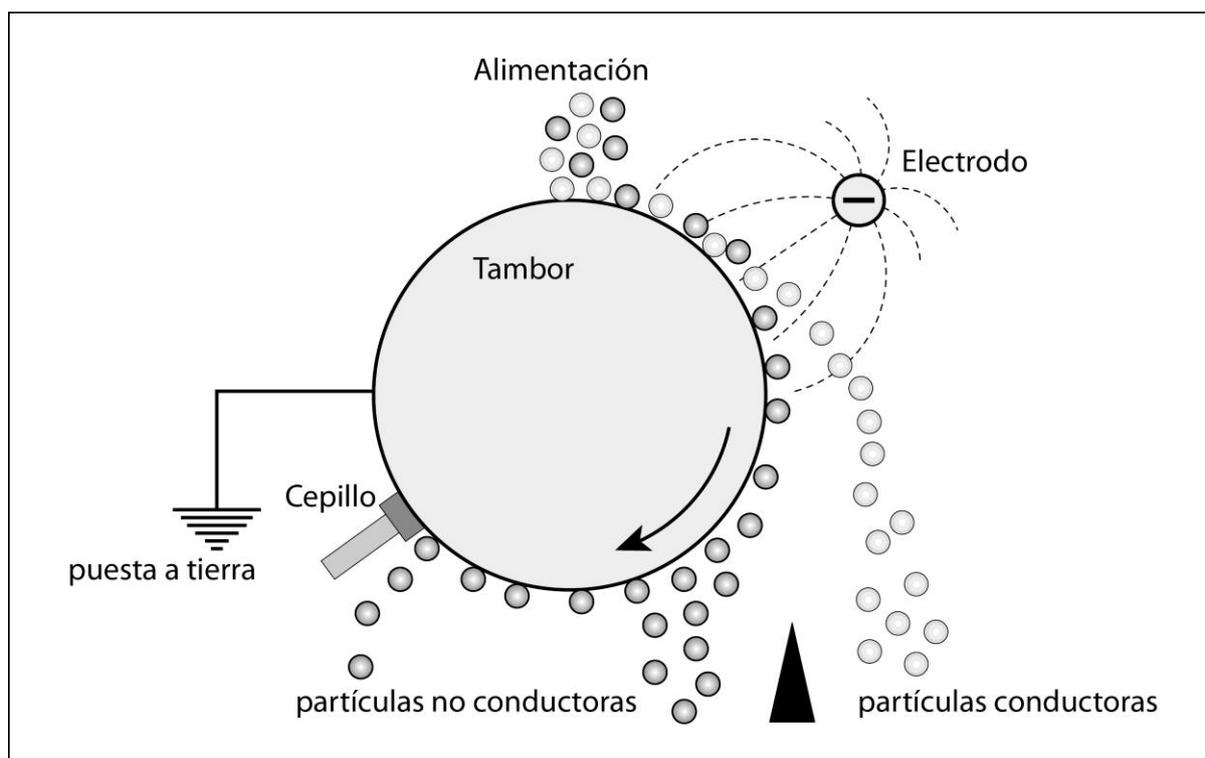


Fig. 53. Principio de operación de un separador electrostático de alta tensión por bombardeo iónico.

Estos equipos pueden ir dotados de un electrodo de placa adicional con el fin de mejorar la separación de las partículas (Fig. 54).



Fig. 54. Vista del rodillo y del electrodo de placa en un equipo Carrara HT Roll Retro-fit (Cortesía Roche Mining).



Fig. 55. Equipo Carrara mk6 HT Roll de varias etapas de separación (Cortesía Roche Mining).

Equipos por inducción conductiva

Estos equipos poseen un electrodo sólido con forma ovalada situado sobre la placa sobre la que fluirá el material. Estos equipos pueden suministrarse con una rejilla colocada al finalizar la placa ciega (Fig. 56).

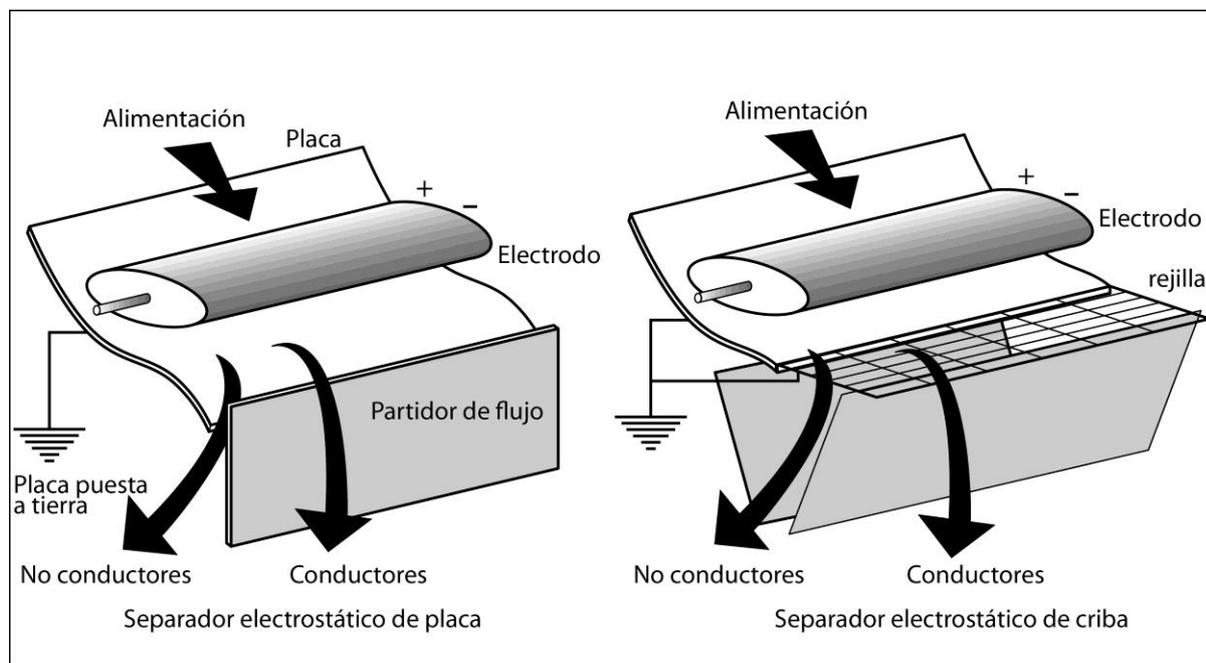


Fig. 56. Principio de operación de los dos tipos de separadores electrostáticos de placa.

La placa estará conectada a tierra para favorecer la despolarización de las partículas conductoras y que sufran la acción de atracción y elevación hacia el electrodo ovalado de signo contrario, como ya se ha descrito anteriormente (Fig. 47). Por otro lado, las partículas no conductoras no sufrirán esa despolarización y quedarán adheridas a la placa de la cual serán retiradas por gravedad siendo recogidas en un recipiente diferente.

Los separadores electrostáticos, generalmente están compuestos por varias etapas de separación para mejorar la recuperación y la ley de las especies minerales y evitar enviar a los residuos partículas beneficiables (Fig. 57).



Fig. 57. Separador electrostático Carrara ES Plate multietapa (cortesía Roche Mining).

CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS Y ELECTROSTÁTICAS DE LOS MINERALES

Las características de separación magnética y electrostática de los minerales mostrados en la siguiente tabla han sido obtenidas en los laboratorios de Outokumpu. La tabla siguiente define la **respuesta magnética** de los minerales clasificándola como (1) ferromagnética: atracción hacia separadores convencionales de imán permanente; (2) paramagnética: atracción hacia la zona magnética de un separador magnético de alta intensidad operando a intensidades comprendidas entre 0.2 y 2.0 Teslas; (3) respuesta diamagnética: no afectadas o repelidas por la fuerza magnética descrita en (2). En cuanto a la **respuesta electrostática** las sustancias se clasificarán en conductoras para aquellas sustancias con una resistividad superficial inferior a 10^{11} ohms que se recogerán como conductores empleando separadores electrostáticos estándar. Por otro lado, minerales con una resistividad superficial superior a 10^{12} ohms serán retirados como no conductores.

El método de separación magnética y electrostática

Fuente: www.carpco.com			Respuesta Magnética			Respuesta Electrostática	
Mineral	Fórmula	Densidad	F	P	NM	C	NC
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$	3.0 - 3.2		X			X
Albita	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	2.6			X		X
Almandina	$\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$	4.3		X			X
Anfíbole	$(\text{Fe,Mg,Ca})_x\text{SiO}_3$	2.9-3.5		X			X
Anatasa	TiO_2	3.9			X	X	
Andalusita	Al_2SiO_5	3.2			X		X
Andradita	$3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_3$	3.8		X		(2) ←	X
Anhidrita	CaSO_4	3.0			X		X
Ankerita	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe})[\text{CO}_3]_2$	2.9-3.1		X			X
Apatito	$(\text{F}_1\text{Cl}_1\text{OH})\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$	3.2			X		X
Aragonito	CaCO_3	3.0			X		X
Arsenopirita	FeAsS	5.9-6.2		X →	(1)	X	
Asbestos	$\text{Mg}_3[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$	2.4-2.5			X		X
Augita	$\text{Ca}(\text{Fe,Mg,Al})[(\text{Si,Al})_2\text{O}_6]$	3.2-3.5		X		X ←	(1)
Azurita	$\text{Cu}_3[\text{CO}_3]_2(\text{OH})_2$	3.8			X		X
Baddeleyita	ZrO_2	5.6			X		X
Barita	BaSO_4	4.5			X		X
Bastnaesita	$(\text{Ce,Ln,F})\text{CO}_3$	5.0		X			X
Bauxita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.6			X		X
Beryl	$\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$	2.7-2.8			X		X
Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{OH,F})_2$	3.0 - 3.1		X			(4)
Bismuto	Bi	9.8			X	X	
Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	1.7			X		X
Bornita	Cu_5FeS_4	4.9-5.0		(1) ←	X	X	
Brannerita	$(\text{UO},\text{TiO},\text{UO}_2)\text{TiO}_3$	4.5-5.4		X		X	
Brookita	TiO_2	4.1			X	X	
Calcita	CaCO_3	2.7			X		X
Carnotita	$\text{K}_2(\text{UO}_2)_2\text{V}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5.0			X	(2) ←	X
Casiterita	SnO_2	7.0			X	X	
Celestita	SrSO_4	4.0			X		X
Cerusita	PbCO_3	6.6			X	(2) ←	X
Calcosita	Cu_2S	5.5-5.8			X	X	
Calcopirita	CuFeS_2	4.1-4.3		(1) ←	X	X	
Clorita	$(\text{Mg,Al,Fe})_{12}[(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16}$	2.6-3.2		X			X
Cromita	$(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$	4.6		X		X	
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2.0-2.3			X		X
Cinabrio	HgS	8.1			X		X
Cobalita	$(\text{Co,Fe})\text{AsS}$	6.0-6.3		X		X	
Colemanita	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	2.4			X		X

(Continua)

Tecnología Mineralúrgica. Técnicas de Separación y Concentración de Minerales

Fuente: www.carpco.com			Respuesta Magnética			Respuesta Electrostática	
Mineral	Fórmula	Densidad	F	P	NM	C	NC
Colofanita	$\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2.6-2.9			X		(3)
Columbita	$(\text{Fe},\text{Mn})(\text{Ta},\text{Nb})_2\text{O}_6$	5.2-8.2		X		X	
Cobre	Cu	8.9			X	X	
Corundum	Al_2O_3	3.9-4.1			X		X
Covelita	CuS	4.7			X	X	
Criolita	Na_3AlF_6	3.0			X	(2)	X
Cuprita	Cu_2O	5.8-6.2			X		X
Diamante natural	C	3.5			X		X
Diamante sintético	C	3.5		X			X
Diopside	$\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	3.3-3.4		X	(1)		X
Dolomía	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	1.8-2.9			X		X
Epidota	$\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	3.4		X			X
Euxenita	$[(\text{Y},\text{Er},\text{Ce},\text{La},\text{U})(\text{Nb},\text{Ti},\text{Ta})_2(\text{O},\text{OH})_6\text{U}_3\text{O}_8]$	4.7-5.2		X		X	
Grupo Feldespato	$(\text{K},\text{Na},\text{Ca}\dots)_x(\text{Al},\text{Si})_3\text{O}_8$	2.6-2.8			X		X
Ferberita	FeWO_4	7.5	(1)	X		X	
Flint	SiO_2	2.6			X		X
Fluorita	CaF_2	3.2			X		X
Franklinita	$(\text{Zn},\text{Mn})\text{Fe}_2\text{O}_4$	5.1-5.2	X			X	
Gahnita	ZnAl_2O_4	4.6			X		X
Galena	PbS	7.5			X	X	
Granate	Silicatos (Ca,Mg,Fe,Mn)	3.4-4.3		X	(1)	(2)	X
Gibsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	2.4			X		X
Goetita	HFeO_2	4.3		X		(2)	X
Oro	Au	15.6-19.3			X	X	
Grafito	C	2.1-2.2			X	X	
Grosularita	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	3.5			X	(2)	X
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.3			X		X
Halita	NaCl	2.5			X	(2)	X
Hematite	Fe_2O_3	5.2		X		X	
Hornblenda	$\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_4(\text{Al},\text{Fe}^{3+})[\text{Si},\text{Al}]_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$	3.1-3.3		X		(2)	X
Huebnerita	MnWO_4	6.7-7.5		X	(1)	X	
Hypersthene	$(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$	3.4		X			X
Ilmenita	FeTiO_3	4.7		X		X	
Ilmenorutilo	$(\text{Nb}_2\text{O}_5, \text{Ta}_2\text{O}_5)_x\text{TiO}_2$	5.1		X		X	
Ilvaita	$\text{CaFe}_2(\text{FeOH})(\text{SiO}_4)_2$	4.0		X		X	(1)
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	2.6			X		X
Kianita	$\text{Al}_2\text{O}_3[\text{SiO}_4]$	3.6-3.7			X		X

(Continua)

El método de separación magnética y electrostática

Fuente: www.carpco.com			Respuesta Magnética			Respuesta Electrostática	
Mineral	Fórmula	Densidad	F	P	NM	C	NC
Lepidolita	$(OH,F)_2KLiAl_2Si_3O_{10}$	2.8-2.9			X		X
Leucoxeno	$FeTiO_3 \rightarrow TiO_2$ producto alteración	3.6-4.3		X \rightarrow (1)		X	
Limonita	$HFeO_2 \cdot nH_2O$	2.2-2.4		X \rightarrow (1)		(2) \leftarrow X	
Magnesita	$MgCO_3$	3.0			X		X
Magnetita	Fe_3O_4	5.2	X			X	
Malaquita	$Cu_2CO_3(OH)_2$	4.0			X		X
Manganita	$MnO(OH)$	4.3		X \rightarrow (1)		X	
Marcasita	FeS_2	4.6-4.9			X	X	
Martita	(ver Hematite)						
Microlina	$KAlSi_3O_8$	2.6			X		X
Microlita	$Ca_2Ta_2O_7$ (ver Pirocloro)	5.5			X		X
Millerita	NiS	5.2-5.6		X		X	
Molibdenita	MoS_2	4.7-5.0			X	X	
Monazita	$(Ce,La,Y,Th)PO_4$	4.9-5.5			X		X
Mollita	$Al_6Si_2O_{13}$	3.2			X		X
Moscovita	$KAl_2[AlSi_3O_{10}][F,OH]_2$	2.8-3.0			X		(4)
Nahcolita	$NaHCO_3$	2.2			X		X
Nefelina Sienita	$(Na,K)(Al,Si)_2O_4$	2.6			X		X
Niccolita	$NiAs$	7.6-7.8		X		X	
Olivino	$(Mg,Fe)_2[Si_2O_6]$	3.3-3.5		X			X
Oropimente	As_2S_3	3.4-3.5			X	X	
Ortoclasa	$K[Al_3Si_3O_8]$	2.5-2.6			X		X
Periclasa	MgO	3.6			X		X
Perosvskita	$CaTiO_3$	4.0			X		X
Petalita	$LiAl(Si_2O_5)_2$	2.4			X		X
Fosfato (pebble)	(ver Collafanita)						
Platino	Pt	14.0-21.5		(1) \leftarrow X		X	
Pirita	FeS_2	5.0		(1) \leftarrow X		X	
Pirocloro	$(Na,Ca...)_2(Nb,Ta...)_2O_6[F,OH]$	4.2-4.4					
Pirolusita	MnO_2	4.7-5.0		(1) \leftarrow X			X
Piropo	$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$	3.5			X	(2) \leftarrow X	
Piroxeno	$(Ca,Mg,Fe,Al)_2Si_2O_6$	3.1-3.6		X \rightarrow (1)		(2) \leftarrow X	
Pirrotita	$Fe_{x-1}S_x$	4.6-4.7	X			X	
(Quartz) Cuarzo	SiO_2	2.7			X		X
Rejalgar	AsS	3.6			X	X	
Rodocrosita	$MnCO_3$	3.7			X	(2) \leftarrow X	
Rodonita	$MnSiO_3$	3.6-3.7			X	(2) \leftarrow X	
Rutilo	TiO_2	4.2-4.3			X	(2)	
Samarsquita	$(Y,Er...)_4[(Nb,Ta)_2O_7]_3$	5.6-5.8	(1) \leftarrow X			X	

(Continua)

Fuente: www.carpco.com			Respuesta Magnética			Respuesta Electroestática	
Mineral	Fórmula	Densidad	F	P	NM	C	NC
Scheelita	CaWO ₄	6.1			X		X
Serpentina	Mg ₆ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	2.5-2.7		X			X
Siderita	FeCO ₃	3.9		X		(2) ←	X
Sillmanita	Al ₂ O ₃ [SiO ₄]	3.2			X		X
(Silver) Plata	Ag	10.1-11.1			X	X	
Smithsonita	ZnCO ₃	4.1-4.5			X		X
Sodalita	Na ₈ [Al ₆ Si ₆ O ₂₄]Cl ₂	2.1-2.3			X		X
Spessarita	Mn ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	4.2			X		X
Sphalerita (Blenda)	ZnS	3.9-4.0		X →	(1)	X →	(1)
Sfena	CaTi[SiO ₄](F,OH)	3.3-3.6			X	(2) ←	X
Spinel	MgAl ₂ O ₄	3.6		(1) ←	X	X	(1)
Spodumena	LiAl(SiO ₃) ₂	3.1-3.2			X		X
Stannita	Cu ₂ FeSnS ₄	4.3-4.5			X	X	
Staurolita	Fe ²⁺ Al ₄ [Si ₄ O ₁₁] ₂ O ₂ (OH) ₂	3.6-3.8		X		(2) ←	X
Stibnita-Antimonita	Sb ₂ S ₃	4.6			X	X	
Struverita	(Ta ₂ O ₅ ,Nb ₂ O ₅) _x TiO ₂	5.1		X		X	
Sulphur (Azufre)	S	2.1			X		X
Silvita	KCl	2.0			X		X
Talco	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2.7-2.8			X		X
Tantalita	(Fe,Mn)(Ta,Nb) ₂ O ₆	5.2-8.2		X		X	
Tapiolita	Fe(Ta,Nb) ₂ O ₆	7.3-7.8		X		X	
Tetraedrita	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	5.0		X		X	
Torianita	ThO ₂	9.7			X		X
Torita	ThSiO ₄	4.5-5.4			X		X
Topacio	Al ₂ SiO ₄ (F,OH) ₂	3.5-3.6			X		X
Turmalina	(Na,Ca)(Mg,Fe ⁺² ,Fe ⁺³ ,Al,Li) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	2.9-3.2		X →	(1)	(1,2) ←	X
Uraninita	UO ₂	11.0		X			X
Vermiculita	Mg ₃ [Al,Si ₃ O ₁₀](OH) ₂ ·nH ₂ O	2.4-2.7			X		X
Wolframita	(Fe,Mn)WO ₄	6.7-7.5		X		X	
Wollastonita	CaSiO ₃	2.8-2.9			X		X
Wulfenita	PbMoO ₄	6.7-7.0			X	X	
Xenotima	YPO ₄	4.4-5.1		X			X
Zeolita	Silicato de Aluminio con Ca y Na	2.0-2.5			X		X
Zincita	ZnO	5.7			X	(1)	X
Zircón	ZrSiO ₄	4.7			X		X

La tabla anterior presenta las siguientes notas:

- (1) Las variaciones de respuesta a la separación magnética y electrostática podrán ocurrir sobre la base de variaciones en la composición interna de los minerales o la presencia de inclusiones.

El método de separación magnética y electrostática

- (2) La respuesta de algunos minerales puede ser variada a través de su exposición a elevadas temperaturas (por ejemplo, el rutilo puede convertirse en conductor a temperaturas superiores a 200°C).
- (3) La carga por fenómeno triboeléctrico se puede emplear para carga de forma selectiva ciertos minerales y ser atraídos así por electrodos con carga opuesta (separación del cuarzo del fosfato (colofanita)).
- (4) La separación de partículas neutras con un significativo factor de forma (mica) se puede conseguir a través del empleo de campos eléctricos no uniformes (dielectroforesis).

Referencias

Blazy, P. 1977. El beneficio de los minerales. Editorial Rocas y Minerales, Madrid, 470 pp.

Carpco bulletin 8951. Meter magnet – High-intensity induced-roll magnetic separation. www.carpco.com.

Carpco bulletin 9621-7KDP. 1996. The cryofilter series. Superconducting high-gradient magnetic separator (HGMS). www.carpco.com.

Fuerstenau, M.C., Han, K.N. 2003. Principles of mineral processing. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 573 pp.

Kelly, E.G., Spottiswood, D.J. 1990. Introducción al procesamiento de minerales. Noriega Editores, Editorial LIMUSA, 530 pp.

Metso Minerals. 2010. Basics in minerals processing. 10th Edition, 430 pp.

Metso Minerals, 2008. Dry low intensity magnetic separation. Drum separators. Technical specification (TS Dry Drum 0201-en), www.metsominerals.com

Sears, W.F., Zemansky, M.W., Young, H.D., Freedman, R.A. 2005. Física universitaria con física moderna. 11^a Ed., Vol.2, Pearson-Addison Wesley, 1008 pp.

Sherrell, I., Dunn, P. 2012. Recent advances in high gradient magnetic separator. In *Separation Technologies for Minerals, Coal, and Earth Resources*, Young, C.A., Luttrell, G.H. (Eds.), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), pp. 241-248.

Svboda, J. 1987. Magnetic methods for the treatment of minerals. In *Developments in Mineral Processing*, Fuerstenau, D.W. (Ed.), Elsevier.

Taggart, A.F. 1956. Handbook of mineral dressing. Ores and industrial minerals. 6th edition (printing), Wiley handbook series, New York, John Wiley and Sons.

El método de separación magnética y electrostática

Tilmatine, A., Medles, K., Bendimerad, S.E., Boukholda, F., Dascalescu, L. 2009. Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures. *Waste Management*, Elsevier, vol. 29, 1, pp. 228-232.

Wills, B.A., Napier-Munn, T.J. 2006. *Wills' Mineral processing technology*. 7th Edition, Elsevier, 444 pp.