

# **MANEJO MULTI-SOFTWARE PARA EL DISEÑO AVANZADO DE INSTALACIONES DE BENEFICIO Y CONCENTRACIÓN DE MINERALES**

## **Bloque 1. SIMULACIÓN PARA EL BENEFICIO DE MINERALES**

1.1 Introducción a la modelización de plantas de tratamiento de minerales

1.2 Datos de partida y características del material producido

1.3 Parámetros de los equipos y esquemas de simulación

## **Bloque 2. SOFTWARE Y PAQUETES DE SIMULACIÓN**

2.1 Modelización de plantas de tratamiento de minerales

2.2 Programas de simulación

## **Bloque 3. CASOS PRÁCTICOS**

3.1 Circuitos de trituración

3.2 Circuitos de molienda

3.3 Circuitos de concentración y flotación

## **Bloque 1. SIMULACIÓN PARA EL BENEFICIO DE MINERALES**

### **1.1 Introducción a la modelización de plantas de tratamiento de minerales**

La simulación del proceso de tratamiento de una planta de concentración y beneficio de minerales requiere de un conocimiento previo del funcionamiento de los equipos y unidades situadas de forma armónica en las diferentes fases del circuito que recorre el mineral.

El material extraído de una mina o cantera está generalmente compuesto de una mezcla de diferentes especies minerales, algunos de los cuales constituyen el objeto de la explotación.

El resto de minerales sin valor inmediato que se encuentran dentro del yacimiento (por ej. cuarzo, calcita, arcilla, feldespato, dolomita, etc.), así como parte del material de la roca encajante que lo limitan, forman la fracción de estériles.

La mezcla de sustancias minerales valiosas y estériles, en diversas proporciones, tienen que ser tratadas para separar aquello que no sirve. Para ello, se recurre a las operaciones de preparación (trituration, molienda, clasificación), concentración y acondicionamiento, que permiten obtener productos de alto valor demandados por la industria.

Para que funcione adecuadamente cualquiera de los métodos de separación y concentración, es importante que las partículas minerales tengan un grado de liberación apropiada, este objetivo se obtiene en las etapas de trituración y molienda.

Para poder separar es preciso antes liberar las diferentes especies (que cada grano sea solo de una) que forman el material todo-uno entregado por la explotación a la planta.

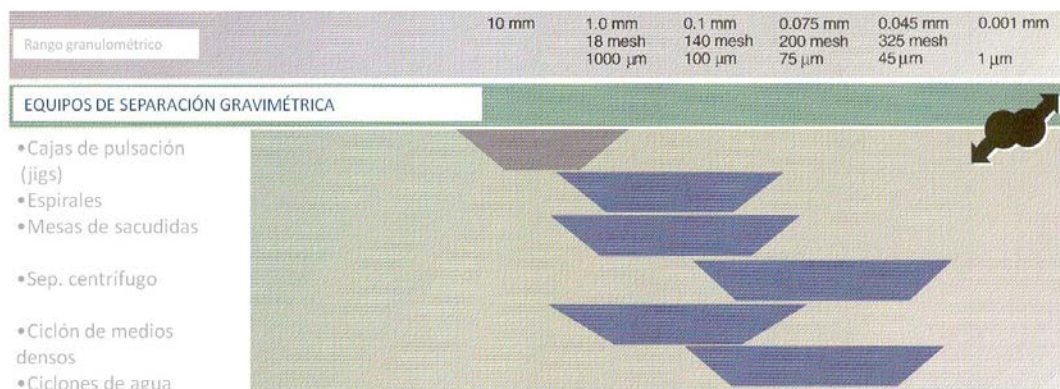
La liberación se consigue mediante operaciones de reducción de tamaño que, en cualquier caso, deben resultar económicas dentro del proceso completo de tratamiento. Debido a ello, dicha liberación, porcentaje en peso de la sustancia liberada con respecto al total de la misma, debe ser económica y por lo tanto no absoluta.

Para separar se hace uso de las propiedades que diferencian unas especies de otras. Si hay varias especies, a veces, se separan dos o más agrupadas de las otras mediante una propiedad y luego se diferencian entre sí mediante otras propiedades.

Cada propiedad da lugar a un método:

- Por tamaños (tamaño natural o provocado)
- Gravimétrico (densidad)

La gravimetría consiste en la separación sólido-sólido utilizando la diferencia entre las gravedades específicas de los minerales. Se utiliza especialmente en la concentración de minerales de oro, estaño, tungsteno, plata, plomo y otros.



- Óptico (color, forma, brillo, etc.)
- Flotación (químico-física superficial)

La flotación se basa en la diferencia entre las propiedades superficiales de las partículas. Es el método más importante de concentración y tiene aplicación en la obtención de concentrados de sulfuros fundamentalmente, de carbonatos, silicatos, óxidos, fosfatos y carbones.

- Lixiviación (solubilidad en disolventes)
- Magnético (susceptibilidad magnética)

El magnetismo es un método de concentración que utiliza la diferencia entre las susceptibilidades magnéticas de los minerales, es decir de la capacidad que tienen de magnetizarse al ser sometidos a un campo magnético externo.

- Eléctrico (conductividad y cte. dieléctrica)

La electrostática se aplica a casos específicos de minerales que pueden ser separados debido a sus propiedades conductoras de electricidad.

El desaguado constituye un conjunto de operaciones de separación sólido-líquido (sedimentación o espesamiento, filtración y secado) que se realizan con la finalidad de eliminar el agua de las pulpas de concentración y relaves originados durante la concentración.

Las operaciones de almacenamiento y transporte de minerales sólidos, pulpas y relaves se realizan mediante tolvas, silos, cintas transportadoras, bombas, tuberías, reguladores, etc. constituyen las etapas intermedias, de alimentación y regulación.

## 1.2 Datos de partida y características del material producido

El diseño de un proceso de tratamiento requiere la comprensión y aplicación de las operaciones mineralúrgicas integradas en una instalación de beneficio, de forma que exista una coherencia y efectividad para la consecución de los objetivos previstos.

El desarrollo de un anteproyecto industrial de tratamiento minero se encuentra definido por una serie de datos de partida reales que permiten seleccionar, dimensionar y ensamblar adecuadamente todos los elementos necesarios para obtener un concentrado o producto de calidad vendible. De tal forma, que el funcionamiento global del conjunto de la planta sea desde el punto de vista técnico, económico, energético y ambiental lo más eficiente posible.

El problema se debe afrontar como si se tratase de una empresa de ingeniería que desarrolla un proyecto para un cliente con su valoración económica. Para ello, se debe disponer o recopilar una serie de datos de laboratorio y gabinete, tal como se recoge de forma detallada pero no exhaustiva en los cuadros siguientes.

Cuantos más datos se disponga sobre la instalación objeto del proyecto, más exacta será la simulación y más cerca nos encontraremos de alcanzar el óptimo del proceso de beneficio del material tratado.

### DATOS MINERALÓGICOS Y QUÍMICOS

- Tipo de roca
- Minerales a beneficiar
- Minerales al estéril
- Densidades reales (t/m<sup>3</sup>)
- Leyes medias (%/ppm)

## DATOS DE OFICINA TÉCNICA

- Capacidad de la planta (t/año)
- Tamaño máximo (mm)
- Capacidad maquinaria de transporte (t)
- Horas/día de marcha de la trituración. Factor de utilización (%)
- Horas/día de marcha de la molienda y lavado. Factor de utilización (%)
- Oscilación prevista de la cantidad de alimentación a planta por turno (%)
- Oscilación prevista en leyes en la alimentación a planta por turno (%)
- Índices de Abrasión (Ai)

## DATOS DE LABORATORIO DE CONCENTRACIÓN

- Índices de Bond
- Tamaños de liberación (mm/ $\mu$ m)
- ¿Mineral apto para molienda autógena primaria/secundaria?
- Consumo de pebbles (kg/t)
- Curva de lavabilidad
- Recuperación y pureza (separación electrostática, magnética, flotación, etc.)
- Flotación: esquema/etapas de flotación (%sol. en peso, tiempos de acondicionamiento, desbaste, barrido y afinos), ¿es necesario deslamado previo?

## DECANTACIÓN Y FILTRACIÓN

- Decantación de lamas/estériles: curva de decantación
- Filtración de concentrados (rendimiento):  $\text{kg/m}^2/\text{h}$
- Desmuestre (puntos de recogida de muestras)

La calidad se puede definir como la capacidad de una empresa para satisfacer regularmente las necesidades de sus clientes al mínimo coste posible. Es posible medir la calidad de un producto o servicio comparando las características que realmente posee con las que ha solicitado el cliente.

Así, por ejemplo, los materiales y los productos de construcción que se incorporen a las estructuras (hormigón, cemento, áridos, acero corrugado, armaduras elaboradas, sistemas de pretensado, elementos prefabricados, etc.) deben presentar las características suficientes para que se cumplan las exigencias exigidas por la normativa, para lo que deberá comprobarse su conformidad de acuerdo con los criterios establecidos.

En los áridos las propiedades físicas y mecánicas son fundamentales. Para su determinación se realizan ensayos de granulometría, equivalente de arena, azul de metileno, índice de lajas, coeficiente de forma, resistencia a la fragmentación, densidad de partículas y absorción de agua, coeficiente de pulimento acelerado (carreteras), etc.

Los áridos tienen un precio muy bajo si se comparan con otras materias primas minerales. Debido al coste repercutido del transporte, su precio va a limitar la distancia a los puntos de consumo.

La diversidad de usos y aplicaciones de los áridos para la construcción hacen que sea necesario obtener y almacenar en la planta de tratamiento diversos productos vendibles tales como zahorras, grava, gravilla, arena, finos para mortero, filler o micronizado. Se define como zahorra al material granular, de granulometría continua, utilizado como capa de firme. La zahorra artificial está constituida por partículas total o parcialmente

trituradas, en la proporción mínima que se especifique en cada caso. Mientras que la zahorra natural es el material formado básicamente por partículas no trituradas.

El porcentaje de finos para los áridos es trascendental en las arenas para hormigón (0-4 mm), pero no lo es tanto para las arenas para morteros (0-2 mm) y tiene poca importancia en las gravas (20-40 mm) y en las gravillas (4-20).

La planta debe tener una gran flexibilidad para poder fabricar dentro de algunos de esos productos más de una granulometría. La diversidad de productos hace que haya numerosos acopios unos sobre el suelo y otros en tolvas o silos que dan un aspecto característico a las plantas de áridos.

Existen además otras peculiaridades/especificaciones que son características de los productos, consumos, instalaciones, marcha, etc. Los consumos tanto de energía como de acero son mucho menores en los áridos, lo que es coherente con su bajo precio de venta.

En la carga y expedición de los productos el transporte de los áridos vendibles se hace por camión. La carga de los materiales gruesos se realiza desde los montones sobre el suelo (stock pile), mediante máquina cargadora o cintas transportadoras, mientras que con los materiales finos se realiza desde tolvas o silos de almacenamiento. La planta se debe diseñar con espacios suficientes para la circulación y emplazamiento de esa maquinaria.

En las sustancias minerales el control más importante es el análisis químico para determinar los contenidos en la sustancia útil (ley) y en elementos nocivos. En general no suelen determinarse las características físicas o mecánicas salvo en minerales de hierro, carbones, caolines y otras arcillas especiales.

El rendimiento también llamado recuperación es el porcentaje del elemento, mineral o sustancia de que se trate que pasa a un producto determinado (concentrado, mixto, o estéril), del total contenido en la muestra sometida a separación. Por su parte, la ley es el contenido en la sustancia que tiene cada producto, expresado como porcentaje (%).

Los compradores normalmente tienen una fórmula de compra, con una ley mínima aceptable y un límite máximo de impurezas tolerable. El productor debe al menos conseguir esa ley mínima y unas impurezas inferiores al límite tolerable para evitar penalizaciones respecto al precio de venta.

Existe una relación inversa entre la recuperación (cantidad) de una sustancia mineral y su ley (calidad), por lo que resulta necesario estudiar si la mayor calidad del producto, con mayor precio, compensa la pérdida de rendimiento.

El rendimiento es muy importante para el productor porque con los mismos gastos de extracción o compra y tratamiento obtiene más producto a vender. Como consecuencia, resulta necesario analizar la combinación de ley (por encima del límite) y rendimiento más interesante para la estrategia económica de la empresa.

### 1.3 Parámetros de los equipos y esquemas de simulación

El flowchart o diagrama de flujo es la representación gráfica y esquemática del conjunto de operaciones unitarias desarrolladas en los equipos de una planta de tratamiento unidos mediante las respectivas corrientes de material.

La elaboración de diagramas de flujo es una parte importante y vital del diseño de procesos, donde su elección correcta resulta crucial para el éxito técnico y financiero del proyecto de tratamiento de minerales.

No existe ningún sistema normalizado para la representación de esquemas de plantas de tratamiento de minerales, tanto en lo que se refiere a metodología como a los símbolos correspondientes a las distintas máquinas.

Las distintas formas de representación de esquemas se pueden clasificar dentro de los siguientes grupos:

- Sistema pictográfico:

Constituye la etapa siguiente en cuanto a simplificación, a los planos de conjunto. Es una representación muy completa en la que para dar mayor claridad al circuito éste se desarrolla de modo que no haya interferencias que puedan dar lugar a confusión.

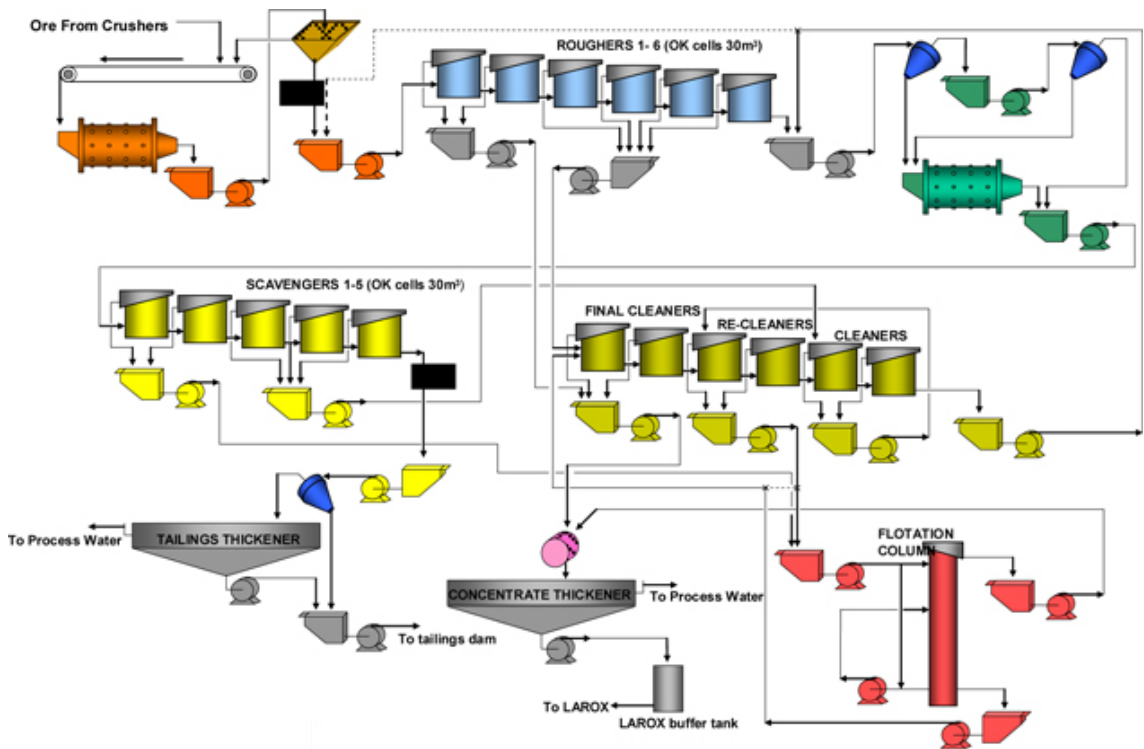
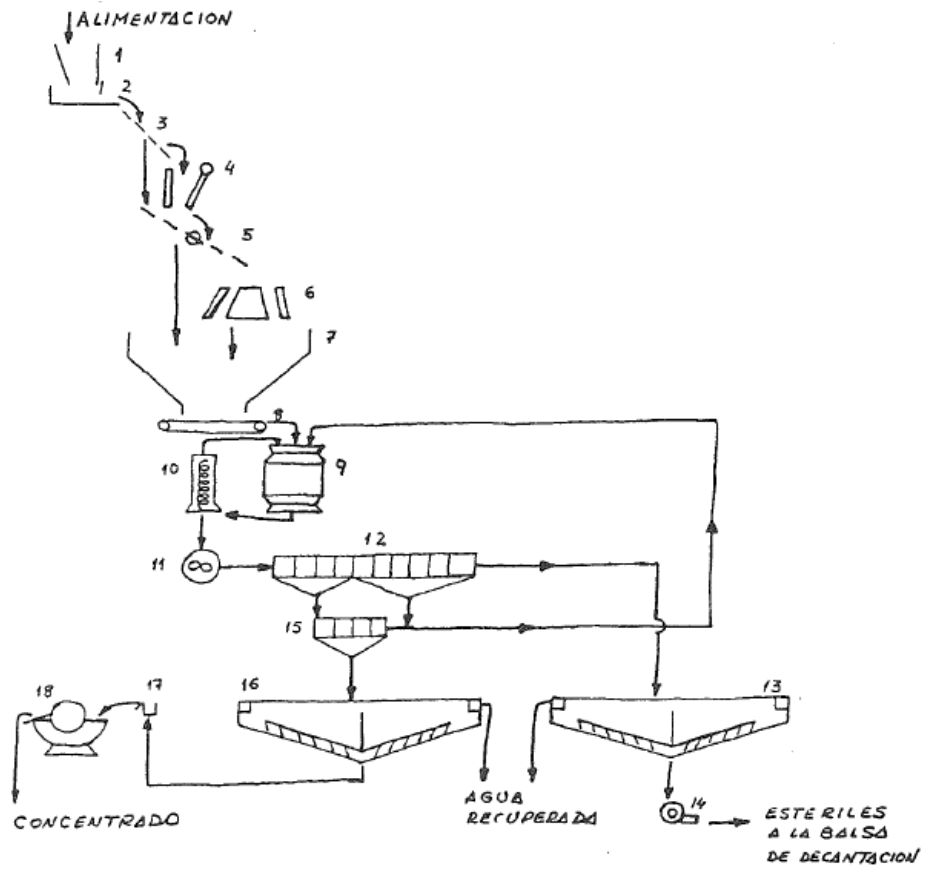
Se representan tanto los aparatos de preparación y concentración como los de manipulación, transporte, y elementos de almacenaje del todo-uno, concentrado, estériles, etc.

La representación de los aparatos es muy completa y se basa en su aspecto externo, de modo que sean fácilmente identificables incluso por personas inexpertas en la preparación de minerales.

El recorrido de los minerales entre las diversas máquinas se indica por medio de flechas.

La mayor ventaja de este sistema de representación es la facilidad y rapidez con que se capta el circuito.

Los inconvenientes son requerir el trabajo de un diseñador o programa para su realización, requiere bastante tiempo para su realización, y necesita mucho espacio.



Representaciones pictográficas

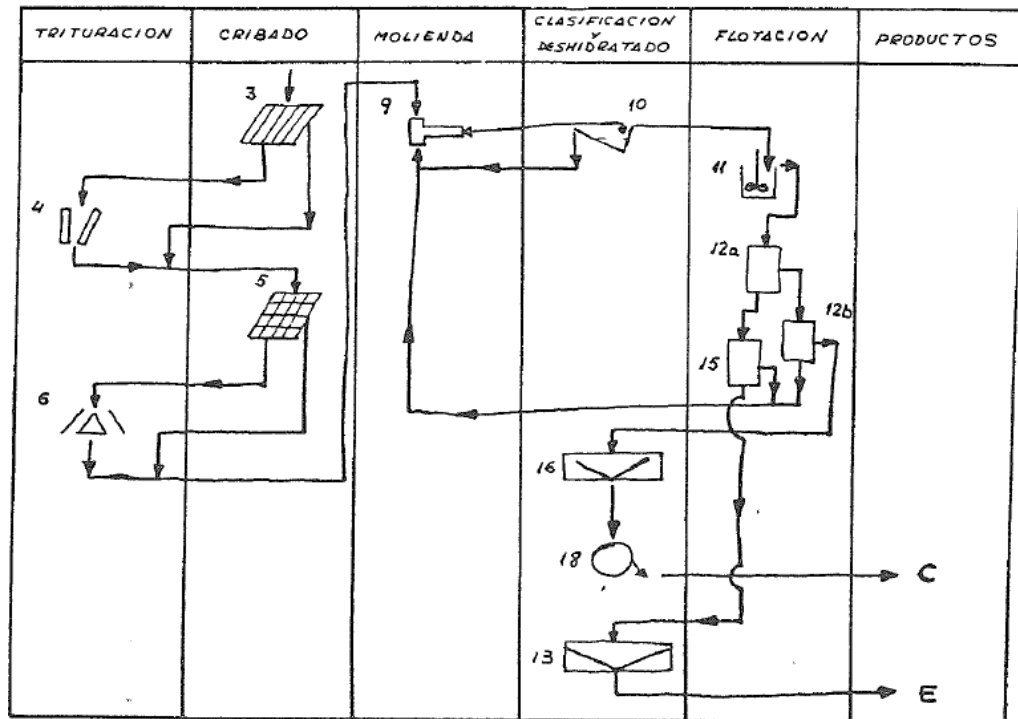
- Sistema ideográfico:

En este sistema se representan solamente los aparatos de preparación, concentración y separación sólido-líquido, prescindiéndose de los de transporte y manipulación, que en la mayoría de los casos dependen solamente de la disposición espacial de las máquinas en la instalación. Tampoco se representan los dispositivos de almacenamiento, incluso los del mineral.

Los aparatos se representan por símbolos muy simplificados que intentan tener alguna semejanza con aquellos. La representación se realiza situando los aparatos en varias columnas en cuyo encabezamiento figura el proceso u operación, por ej. Trituración, cribado, molienda, clasificación y deshidratado, concentración (gravimetría, flotación, etc.) y productos finales.

El o los flujos de materiales se representan por líneas que unen los distintos aparatos según su secuencia.

Este sistema tiene la ventaja de que permite identificar fácilmente el número de etapas de cada uno de los procesos. Presenta como inconveniente el entrecruzamiento de las líneas que representan la circulación del mineral y estéril, ya que la disposición de los aparatos no corresponde con la secuencia de los flujos.



*Representación ideográfica de los procesos de tratamiento*

- Sistema taquigráfico:

Los aparatos se representan por símbolos muy simplificados que pretende recoger alguna característica externa, si bien esto no es siempre posible. Los estériles y concentrados se representan respectivamente por (#) y (•), y los mixtos por (●).

No se representan los elementos de transporte y si las tolvas y dispositivos de almacenamiento de mineral. Cada máquina se designa por un número que se coloca encima de su símbolo y a la izquierda.

El caudal principal va de izquierda a derecha del dibujo y comprende, el producto completo en los aparatos de almacenamiento o conminución. El rechazo en las cribas, los gruesos o arenas en los aparatos de clasificación o deslamado, el producto espesado en los aparatos de separación sólido-líquido. La corriente residual de cualquier operación que no caiga dentro de una de las expuestas anteriormente.

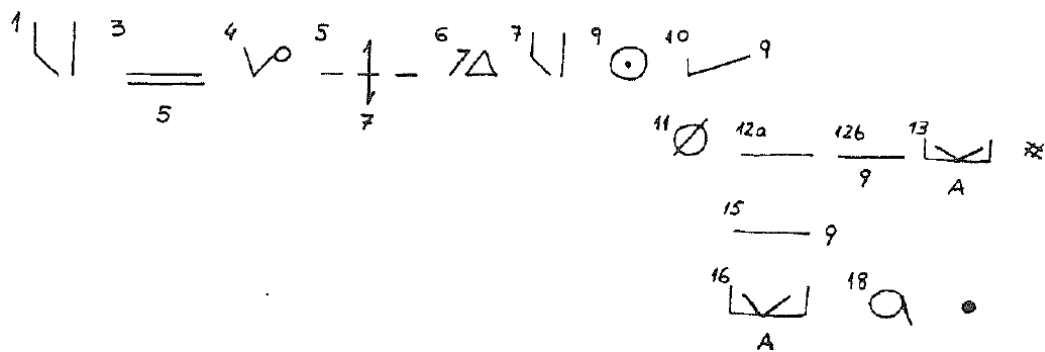
Esta línea principal, que no se representa con ningún trazo o dibujo continúa hasta que acaba en un estéril o en un circuito cerrado.

En las máquinas que dan dos productos además del flujo principal, habrá otro flujo vertical hacia abajo que irá hacia un símbolo situado inmediatamente debajo del cual arranca otra línea de corriente hacia la derecha.

Se denomina fase a una máquina, parte de una máquina o conjunto de máquinas que dan dos productos. Cada dispositivo de separación comprende por lo menos una fase y en general cualquier dispositivo que de n productos comprende n-1 fases.

En el caso de varias máquinas en paralelo sólo se representa una, que se puede acompañar del número que indique la cantidad de máquinas. En el caso de un circuito cerrado se indicará a la derecha del símbolo el número correspondiente a la máquina a la que se retorna el flujo.

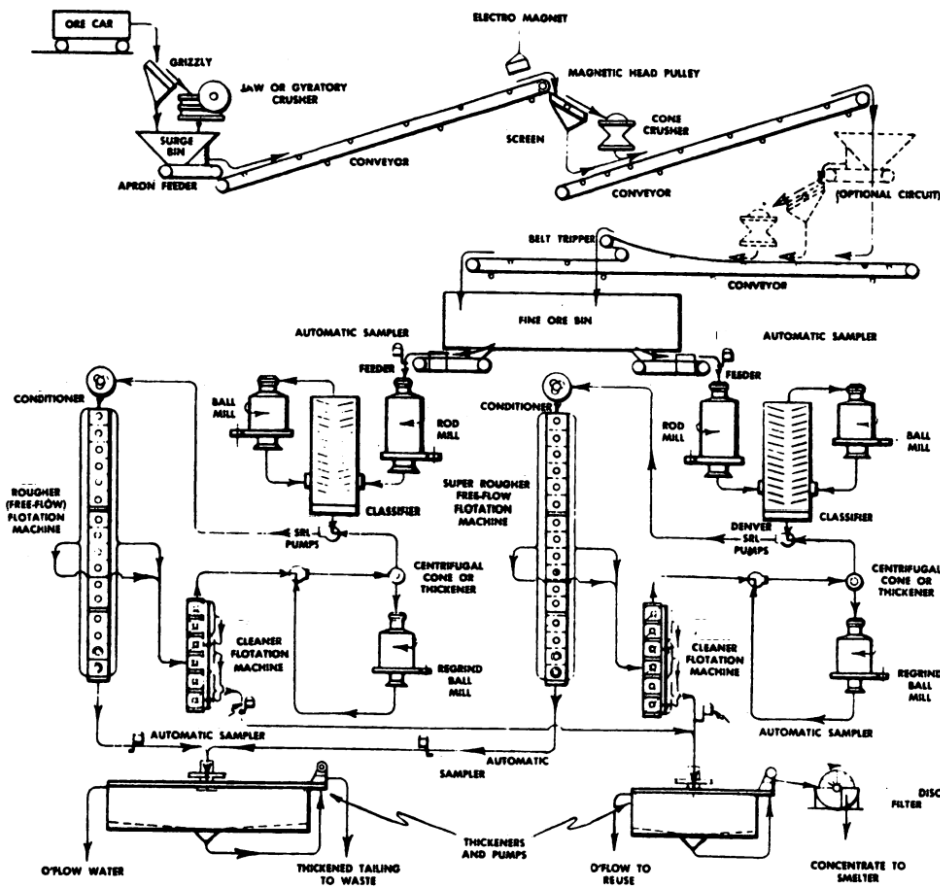
Las ventajas de este tipo de representación son rapidez y sencillez para su realización. No hace falta flechas o líneas para indicar los flujos. El inconveniente principal es que hay aparatos en los que la representación de los flujos es contraria a la realidad (por ej. espesadores y ciclones). No es apto para personas no habituadas a este sistema de representación.



*Representación taquigráfica*

Los parámetros más importantes que definen el dimensionamiento de un equipo dentro de un diagrama de proceso están afectados por su utilización, flujos instantáneos, cargas circulares, parámetros del mineral como dureza, granulometría, tasas de espesamiento y filtrado.

Para obtener el producto final, una planta concentradora pasa por una serie de procesos como la conminución (trituración y molienda), flotación, espesamiento y filtrado.



Flowchart de un proceso de concentración de Cu

En cada una de las etapas de una planta de tratamiento se usan una serie de máquinas distintas.

- Trituración/chancado: Permite la reducción del tamaño del material todo-uno extraído en el frente de explotación. En este proceso se usan máquinas como trituradoras o chancadoras, cintas transportadoras o fajas, tolvas y cribas o zarandas.

- Molienda: La salida del material triturado (chancado) pasa al circuito de molinos, hidrociclones y bombas, donde es reducido hasta obtener partículas de tamaño en micras.
- Flotación: El material molido pasa a los acondicionadores donde se le agregan los reactivos que permitan la separación de los minerales.
- Espesado y filtrado: La pulpa obtenida en el proceso anterior es separada en los decantadores de una parte importante de su contenido en agua (que es reutilizada), retirando el excedente líquido en el proceso de filtrado.

Los modelos de fragmentación son herramientas fundamentales en el procesamiento de minerales, ya que permiten predecir y controlar la distribución granulométrica resultante de procesos como la trituración y la molienda. Estos modelos se basan en principios matemáticos que consideran el balance de masas por tamaños y las tasas de generación y desaparición de partículas en diferentes rangos granulométricos.

El balance de población es una metodología ampliamente utilizada para modelar procesos de fragmentación. Este enfoque considera que la población de partículas de un sistema cambia debido a dos procesos principales:

Nacimiento (Generación): Aparición de nuevas partículas en ciertos tamaños debido a la fragmentación de partículas más grandes.

Muerte (Fragmentación): Desaparición de partículas de ciertos tamaños al romperse en fragmentos más pequeños.

Mediante ecuaciones que describen estos procesos, el balance de población permite predecir la distribución de tamaños de partículas en función del tiempo y las condiciones operativas del proceso. Este enfoque es especialmente útil en operaciones de molienda y trituración, donde la comprensión de la dinámica de fragmentación es esencial para optimizar la eficiencia del proceso.

La capacidad de las trituradoras se calcula utilizando la fórmula de Giesecking, donde se aplican unos coeficientes de corrección:

$$Q_c = 60K_0K_1K_2K_3K_4K_5K_6K_7T \frac{R}{R-1} LD_m \left( C_{ss} + \frac{T}{2} \right) N_C$$

La potencia absorbida en la conminución se calcula por la fórmula de Bond o Magdalinovic:

$$P = 10BW_i Q \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

$$P = \frac{A}{P_{80}^n} 10W_i Q \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

La potencia consumida por un molino como función de sus condiciones de operación.

$$W_{st} = 4.879D^{0.3} (3.2 - 3T_c) V_r \left[ 1 - \frac{0.1}{2^{9-10V_r}} \right] + \epsilon_s \frac{1.102}{50.8} (D_b - 12.5D)$$

Para un clasificador Plitt consideró que la curva de partición de un hidrociclón corresponde a una fórmula de Rosin-Rammler:

$$Y_c(d) = 1 - e^{-0.693 \left( \frac{d}{d_{50c}} \right)^m}$$

La imperfección de la curva de partición corregida está dada por:

$$I = \frac{(d_{75c} - d_{25c})}{2d_{50c}}$$