



Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Balances de Materiales

Magín Eduardo Torres Rubilar

MI42C - Análisis de Sistemas Particulados

Otoño 2008

Introducción

- ¿Por qué es importante caracterizar los flujos en el procesamiento de minerales?
- ✓ Permite dimensionar equipos y realizar el diseño del proceso
- ✓ Permite evaluar la eficiencia de la operación
- ✓ Permite realizar la contabilidad metalúrgica o conciliación de tonelajes y ley para el cierre de mes

Introducción

- **Principios Físicos**

- ✓ Transferencia de Cantidad de Movimiento

Leyes de Galileo y Newton

- ✓ Transferencia de Energía

Primera y segunda ley de la termodinámica (Carnot y Clausius)

- ✓ Transferencia de Masa

Ley de conservación de la materia (Lavoisier)

Introducción

- **Ecuaciones de Balance**

- ✓ Steady State (Estado estacionario o régimen permanente)

$$\frac{d}{dt} \phi_i = 0 = \phi_i^{in} - \phi_i^{out} + B_i - D_i$$

- ✓ Régimen Transiente

$$\frac{d}{dt} \phi_i(t) = \phi_i^{in}(t) - \phi_i^{out}(t) + B_i - D_i$$

- ✓ Batch

$$\phi_i^{in} + B_i = \phi_i^{out}(t) + D_i$$

Introducción

- **Ejemplo: llenado de un estanque en régimen transiente**

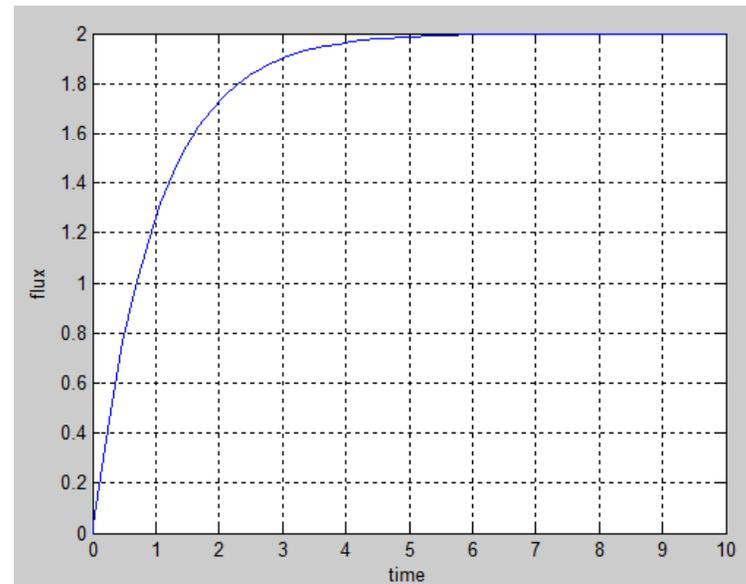
- ✓ Ecuaciones de Balance

$$\frac{d}{dt}m(t) = m_{in} - \alpha \cdot m(t)$$

- ✓ Condiciones Particulares

$$m_{in} = 2 \text{ tph}$$

$$\alpha = 1$$



El *Régimen Permanente* corresponde a un caso particular del *Régimen Transiente*, cuando la solución se evalúa en $t = \infty$

Introducción

- Para realizar balances, es importante caracterizar los flujos de mineral en cada punto de la planta. Un buen muestreo otorga mayor fidelidad a los datos obtenidos, puesto que dicha información será utilizada para tomar decisiones importantes en el diseño y la producción.
- Puesto que las operaciones de muestreo y los equipos que realizan tal trabajo requieren de un capital elevado (tanto económico como humano), en las plantas se caracterizan sólo algunos flujos.
- Para la estimación de las propiedades del resto de los flujos existen relaciones matemáticas basadas en la física y química.

Definiciones

- **Pulpas y flujos de Mineral**

- ✓ Estática

Masa (t, kg) y volumen (l, m³)

$$M_T = M_S + M_L$$

$$V_T = V_S + V_L$$

- ✓ En Movimiento (flujo)

Masa (tph, kg/h) y volumen (l/s, m³/h)

$$G_T = G_S + G_L$$

$$Q_T = Q_S + Q_L$$

Definiciones

- **Densidad de sólido, líquido y pulpa**

- ✓ Estática (t/m^3)

$$\rho_{S,L,T} = \frac{M_{S,L,T}}{V_{S,L,T}}$$

- ✓ En Movimiento (flujo)

$$\rho_{S,L,T} = \frac{G_{S,L,T}}{Q_{S,L,T}}$$

Definiciones

- Densidad específica

$$\gamma_{S,L,T} = \rho_{S,L,T} \cdot g$$

- Gravedad específica

$$\Gamma_S = \frac{\rho_S}{\rho_L}$$

- ✓ Se hunde si $\Gamma_S > 1$, flota si $\Gamma_S < 1$

Definiciones

▪ Concentración de sólidos

✓ En volumen

$$C_V = \frac{V_S}{V_T} = \frac{Q_S}{Q_T}$$

✓ En Peso

$$C_P = \frac{M_S}{M_T} = \frac{G_S}{G_T}$$

✓ Dilución o humedad en base seca

$$D = \frac{M_L}{M_S} = \frac{G_L}{G_S}$$

✓ Humedad en base húmeda (%)

$$H = 100 \frac{G_L}{G_T}$$

Definiciones

- Concentración de sólidos en función de las densidades

$$C_P = \frac{\rho_S (\rho_L - \rho_T)}{\rho_T (\rho_L - \rho_S)}$$

- Densidad conjunta

$$\rho_{S,L,T} = \frac{\sum_i G_i^{S,L,T}}{\sum_i Q_i^{S,L,T}}$$

- Densidad de la pulpa

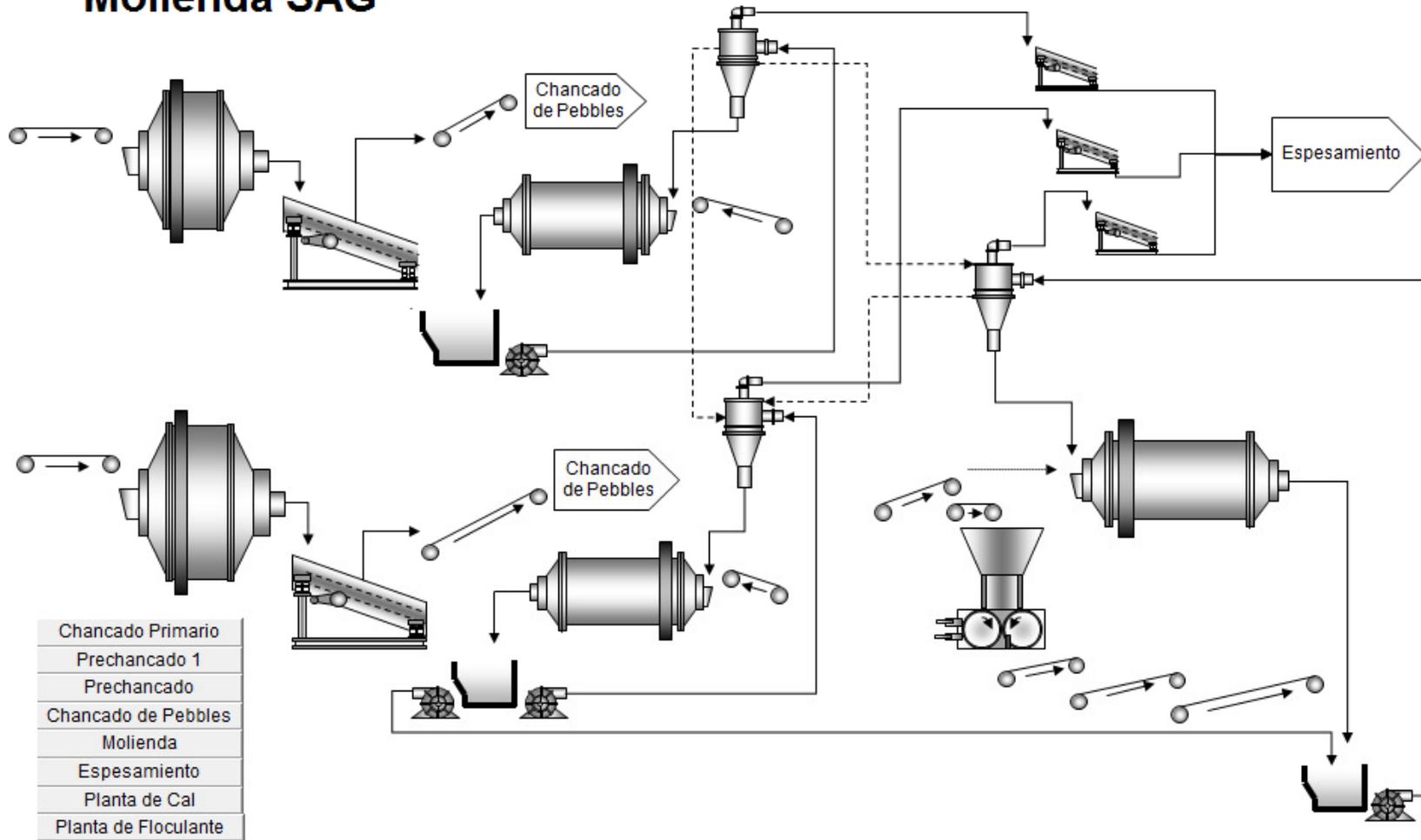
$$\rho_T = \frac{\rho_S \rho_L}{C_P \rho_L + (1 - C_P) \rho_S}$$

Balances de Materiales

- Aparte de caracterizar la magnitud de los flujos de agua y mineral, es importante observar los cambios en las propiedades asociadas a la ley, granulometría y densidad del mineral.
- Cada equipo en el *flowsheet* realiza cambios particulares en las propiedades del flujo.

Balances de Materiales

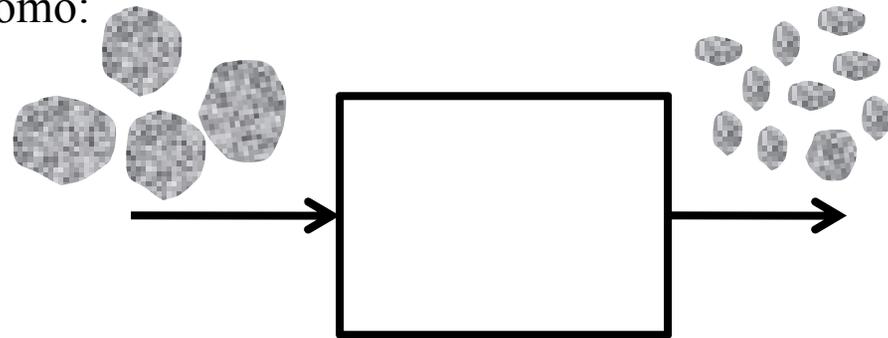
Molienda SAG



Equipos de Molienda

- En los equipos de molienda, tales como chancadores (en seco) y molinos (en húmedo), sólo se realizan cambios en la granulometría del mineral. En un balance es importante estudiar el grado de reducción de tamaño que realiza el proceso de conminución.
- Se define la *Razón de Reducción* como:

$$R_i = \frac{D_i^{in}}{D_i^{out}}$$



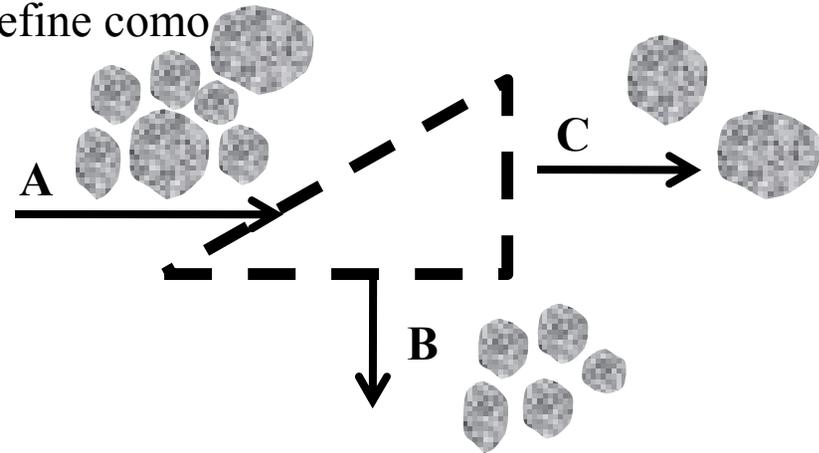
Donde i define un tamaño característico de la distribución (por lo general se utiliza el 80% pasante y se calcula el R_{80})

Equipos de Clasificación

- Los equipos de clasificación, tales como harneros e hidrociclones, actúan sobre un tamaño en particular. Por lo mismo, el cambio se realiza sobre la granulometría. El reparto de flujos de un cierto tamaño se rige bajo una cierta *eficiencia de clasificación* inherente al equipo.

- La *Eficiencia de Clasificación* (%) se define como

$$E = 100 \frac{G_S^B}{G_S^A F_U^A(d^*)}$$

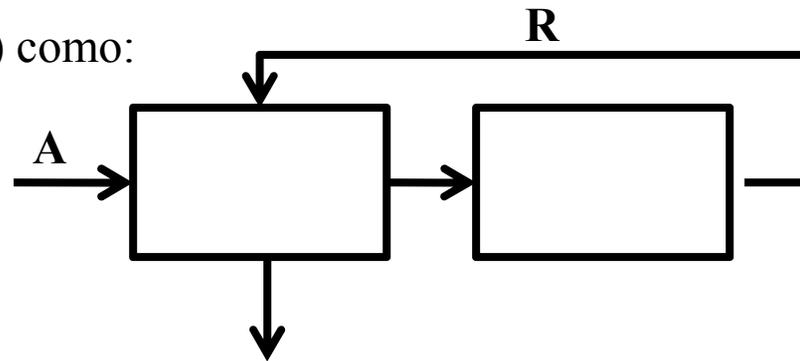


- Donde d^* corresponde al *tamaño de corte* bajo el cual se repartirán los flujos.

Recirculaciones

- En la mayoría de las plantas, se requiere una etapa de repaso de una operación en particular con el fin de llegar a la calidad de producto requerida. En plantas de chancado y molienda, se requieren de recirculaciones para obtener un tamaño en particular. Mientras que en plantas de flotación se requiere *repasar* un cierto concentrado para aumentar la ley del mismo.
- Se define la *Carga Circulante* (%) como:

$$CC = 100 \frac{G_S^R}{G_S^A}$$



Valores típicos de CC en chancado varían desde 50 a 150%, en molienda varía de hasta 400%

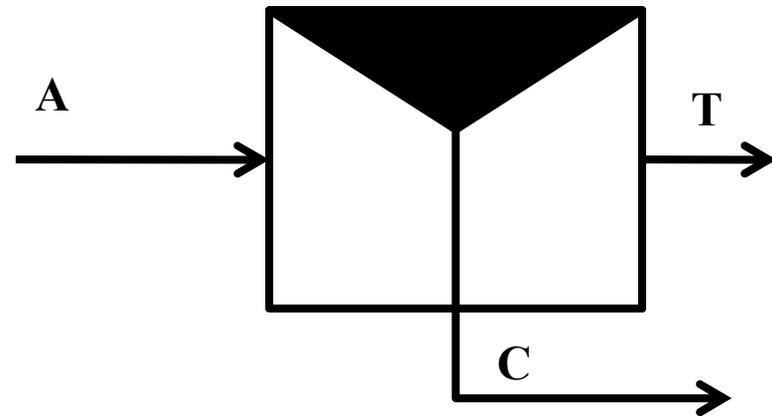
Equipos de Concentración

- En los equipos de concentración por flotación (columnas y celdas). Es importante caracterizar las leyes de **alimentación**, **concentrado (producto)** y **colas (relave)**.
- ✓ Se define la *Recuperación Metalúrgica* (%) como:

$$R = 100 \frac{G_S^C l_C}{G_S^A l_A} = 100 \frac{(l_A - l_T) l_C}{(l_C - l_T) l_A}$$

- ✓ Se define la *Razón de Concentración*

$$K = \frac{G_S^A}{G_S^C} = \frac{(l_C - l_T)}{(l_A - l_T)}$$



Equipos de Concentración

- Se puede definir una recuperación tanto por especie mineralógica como por elemento. La ley corresponde a una concentración de la especie de interés:

$$l_i = 100 \frac{P_i}{P_T}$$

- ✓ Ley de elemento (Cu)

$$l_{Cu/Total} = \frac{M_{Cu}}{M_{Total}}$$

- ✓ Ley de Cu en la Bornita (Cu_5FeS_4)

$$l_{Cu/Bo} = \frac{5 \cdot PA_{Cu}}{5 \cdot PA_{Cu} + PA_{Fe} + 4 \cdot PA_S}$$

Equipos de Concentración

- ✓ La ley de la Bornita en la muestra total, es entonces:

$$l_{Cu/Total} = l_{Cu/Bo} \cdot l_{Bo/Total}$$

$$l_{Bo/Total} = \frac{l_{Cu/Total}}{l_{Cu/Bo}}$$

Balances por finos y por tamaño

- ✓ Balance de finos (leyes)

$$G_S^A \cdot l_i^A = G_S^C \cdot l_i^C + G_S^T \cdot l_i^T$$

- ✓ Balance por tamaños

$$G_S^A \cdot f_i^A = G_S^C \cdot f_i^C + G_S^T \cdot f_i^T$$

Recuperaciones por especie y tamaños

- ✓ Recuperación por especie ($i = Cp, Bo, Pb, Zn, Cu, Au...$)

$$R_i = \frac{G_S^C \cdot l_i^C}{G_S^A \cdot l_i^A}$$

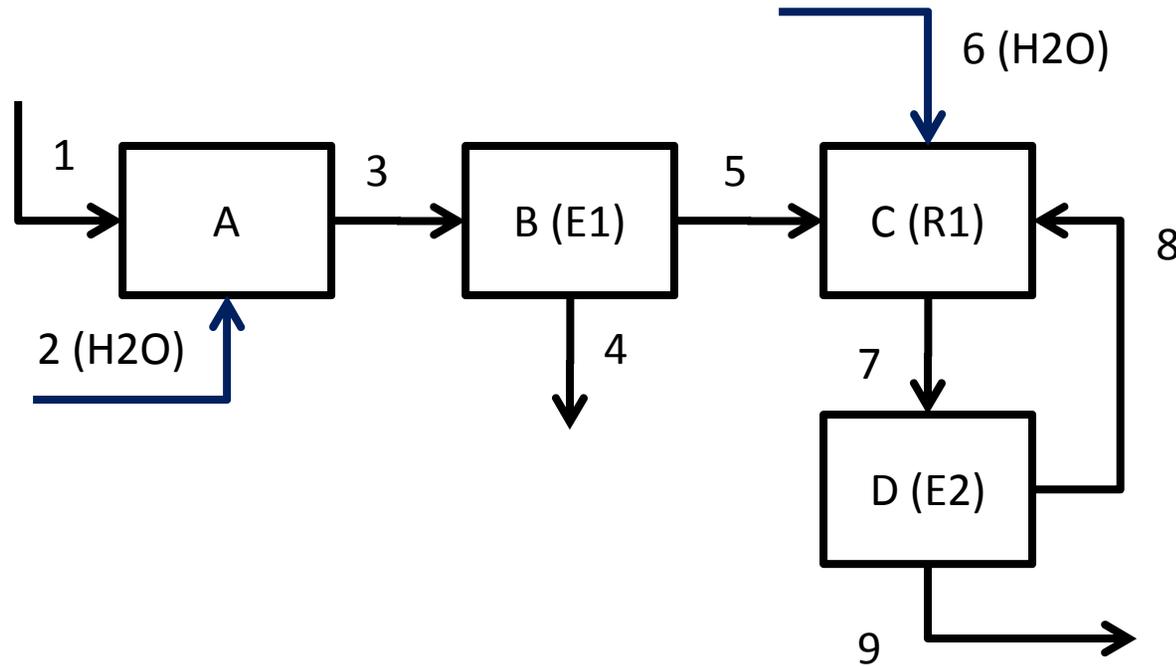
- ✓ Recuperación por tamaños (x_i clase de tamaño i -ésima de la especie j)

$$R_j(x_i) = \frac{G_S^C \cdot l_j^C \cdot f_3^C(x_i)}{G_S^A \cdot l_j^A \cdot f_3^A(x_i)}$$

Existe una recuperación máxima para cierta cada j , que depende principalmente del grado de liberación y por ende de la granulometría. En pórfidos de Cobre principalmente calcopiríticos, se efectúa una molienda a 210 micrones (#65 Ty). Dicho tamaño maximiza la recuperación.

Balances

- ✓ Identificar nodos (equipos) y flujos



Balances

✓ Plantear ecuaciones de balances de masas

$$A \quad G_S^1 - G_S^3 = 0$$

$$B \quad G_S^3 - G_S^4 - G_S^5 = 0$$

$$C \quad G_S^5 + G_S^8 - G_S^7 = 0$$

$$D \quad G_S^7 - G_S^8 - G_S^9 = 0$$

$$\text{General} \quad G_S^1 - G_S^4 - G_S^9 = 0$$

✓ Plantear ecuaciones de balances de agua

$$A \quad G_L^1 + G_L^2 - G_L^2 = 0$$

$$B \quad G_L^3 - G_L^4 - G_L^5 = 0$$

$$C \quad G_L^5 + G_L^6 + G_L^8 - G_S^7 = 0$$

$$D \quad G_L^7 - G_L^8 - G_L^9 = 0$$

$$\text{General} \quad G_L^1 + G_L^2 + G_L^6 - G_L^4 - G_L^9 = 0$$

Balances

✓ Recirculaciones

$$CC_1 = 100 \frac{G_S^8}{G_S^5}$$

✓ Eficiencias

$$E_1 = 100 \frac{G_S^4}{G_S^3 Fu(d_B)}$$

$$E_2 = 100 \frac{G_S^9}{G_S^7 Fu(d_D)}$$

✓ Reducción de tamaño

$$R_1 = \frac{\left(\frac{G_S^5 D_5 + G_S^8 D_8}{G_S^5 + G_S^8} \right)}{D_7}$$

Ejercicio (Fecha de Entrega: Jueves 24/04)

- ✓ Alimentación de 100 tph a una humedad en base húmeda del 3%
- ✓ La granulometría de alimentación sigue una distribución Gaudin-Schuhmann de parámetros $K = 2.54$ cm y $m = 0.5$
- ✓ El tamaño de corte en el equipo B es de 1.27 cm a una eficiencia del 80%
- ✓ El tamaño de corte en el equipo D es de 210 μ m a una eficiencia del 50%
- ✓ El equipo C reduce de tamaño a 36% -210 micrones
- ✓ Calcular agua tal que flujo 3 tenga un $C_p = 30\%$ y que la reducción de tamaño se realice a un $C_p = 60\%$
- ✓ Densidad de Sólido 2.7 t/m³ y flujo de salida (9) a un $C_p = 35\%$