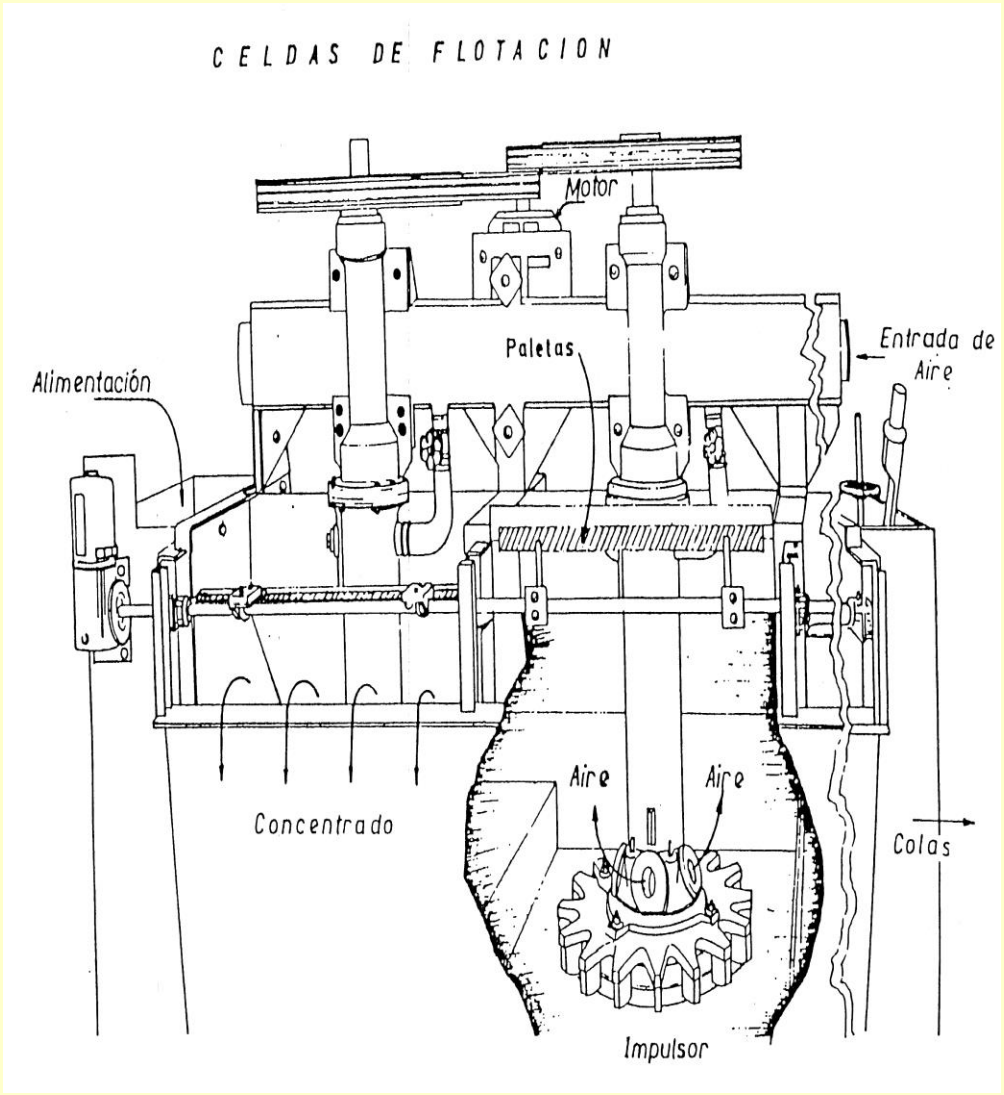


PROCESAMIENTO DE MINERALES

CELDAS DE FLOTACIÓN

CELDAS DE FLOTACION



- Son los equipos en los cuales se realiza la flotación de minerales.
- El objetivo fundamental es separar en forma satisfactoria de una cabeza de mineral, un concentrado y un producto de relave.

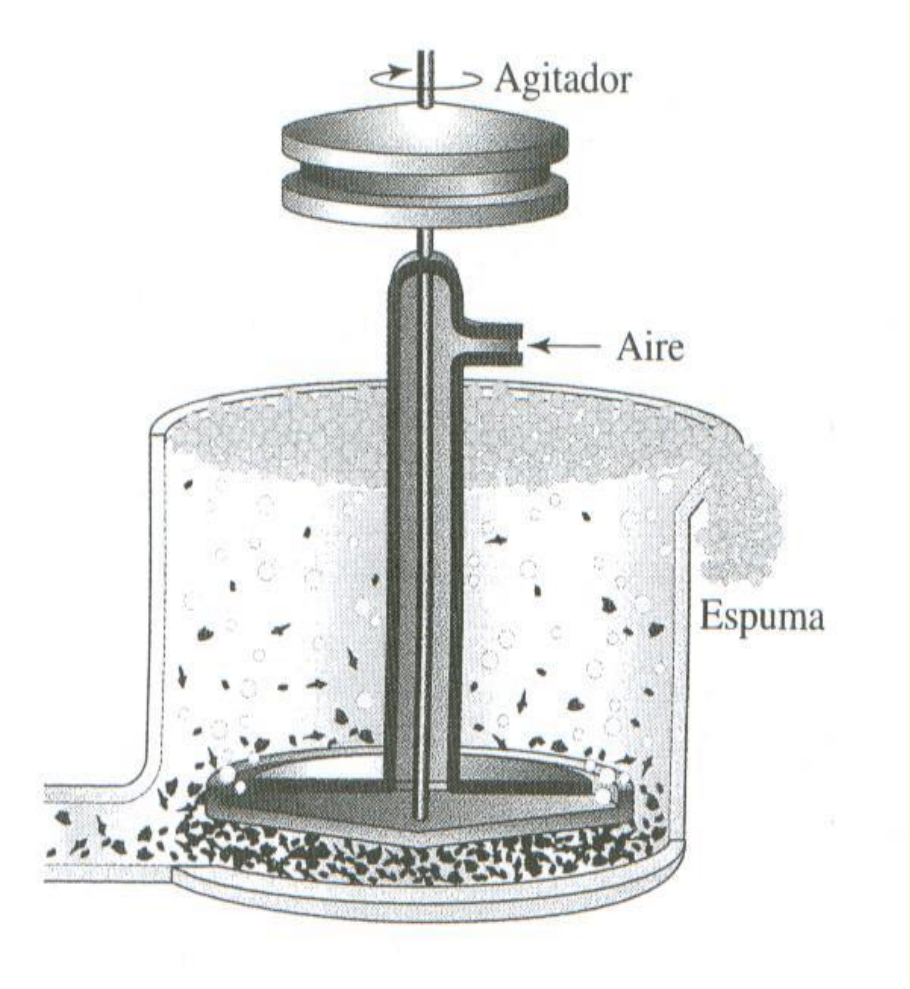
OBJETIVOS DE LAS CELDAS DE FLOTACION



- Separar en forma satisfactoria de una cabeza de mineral, un concentrado y un producto de relave
- Mantener en suspensión las partículas de la pulpa que ingresa a la celda de flotación evitando la segregación de los sólidos por el tamaño o por la densidad.

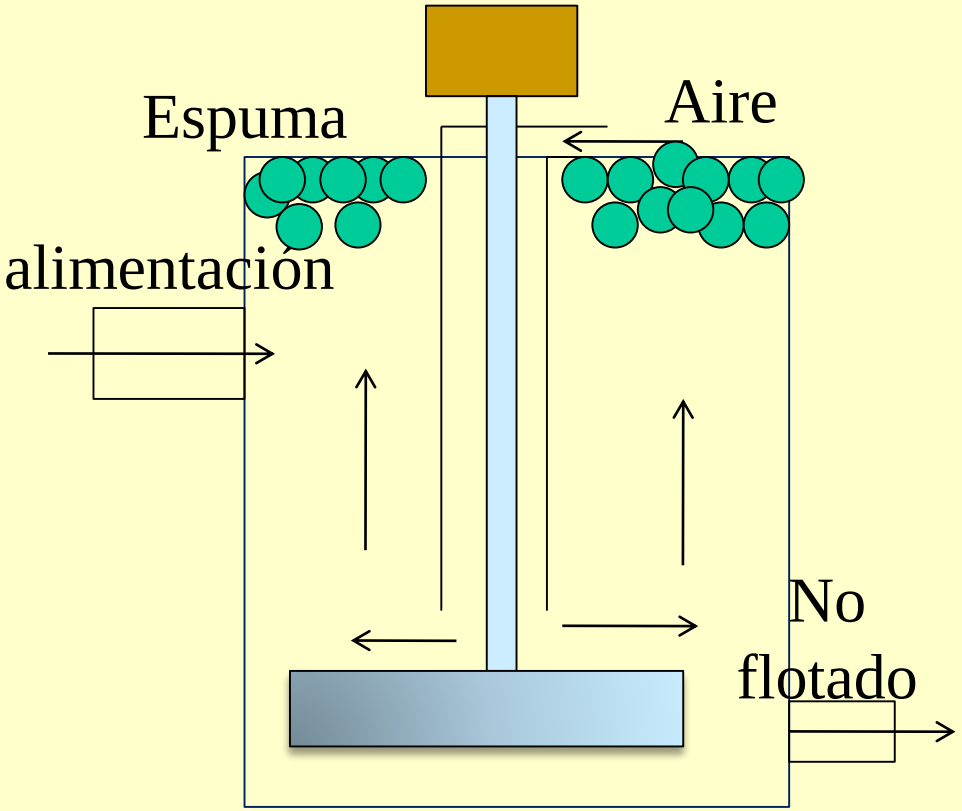
OBJETIVOS DE LAS CELDAS DE FLOTACION

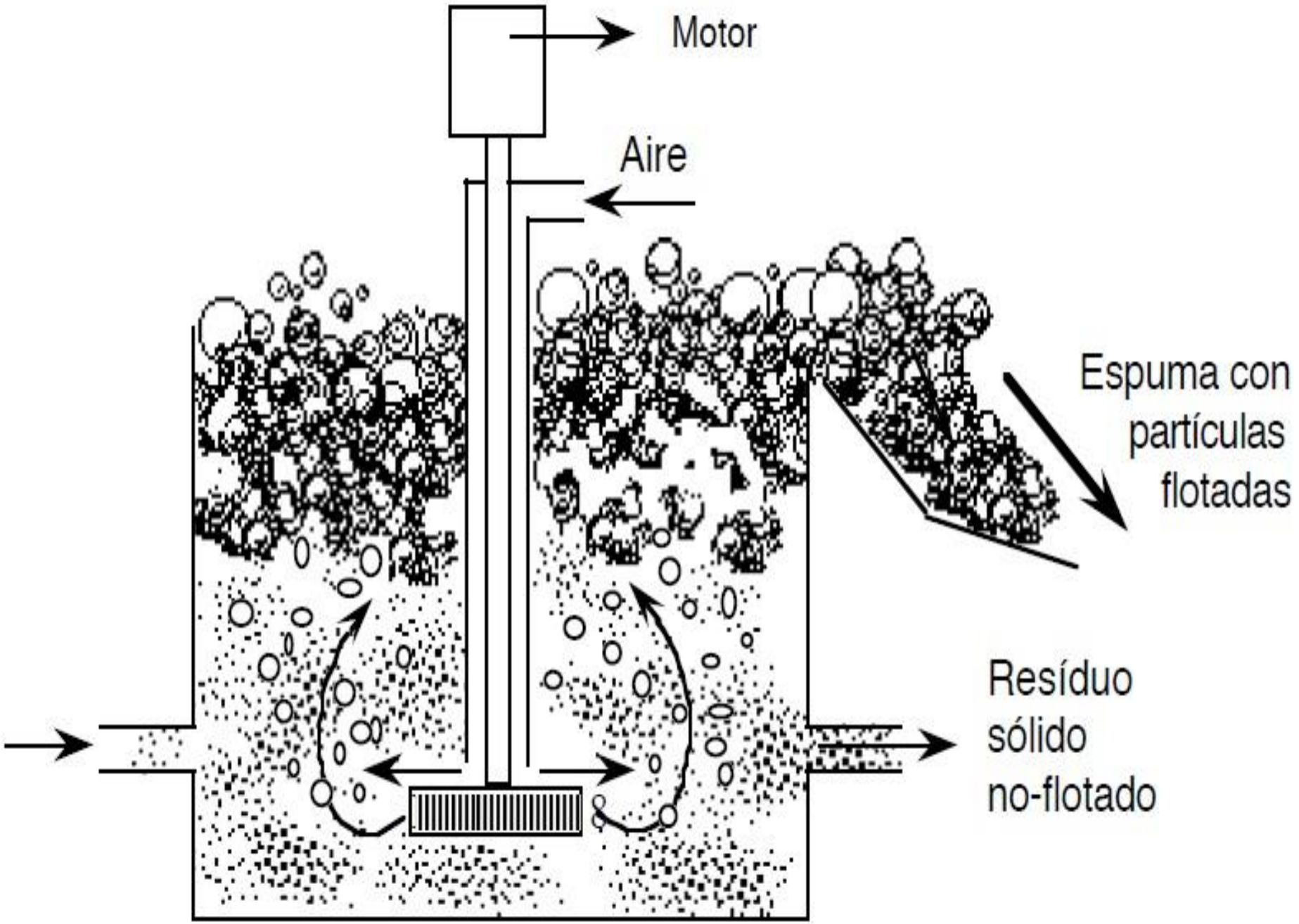
- Formar y diseminar pequeñas burbujas de aire por toda la celda; los volúmenes de aire requeridos dependerán del peso de material alimentado.



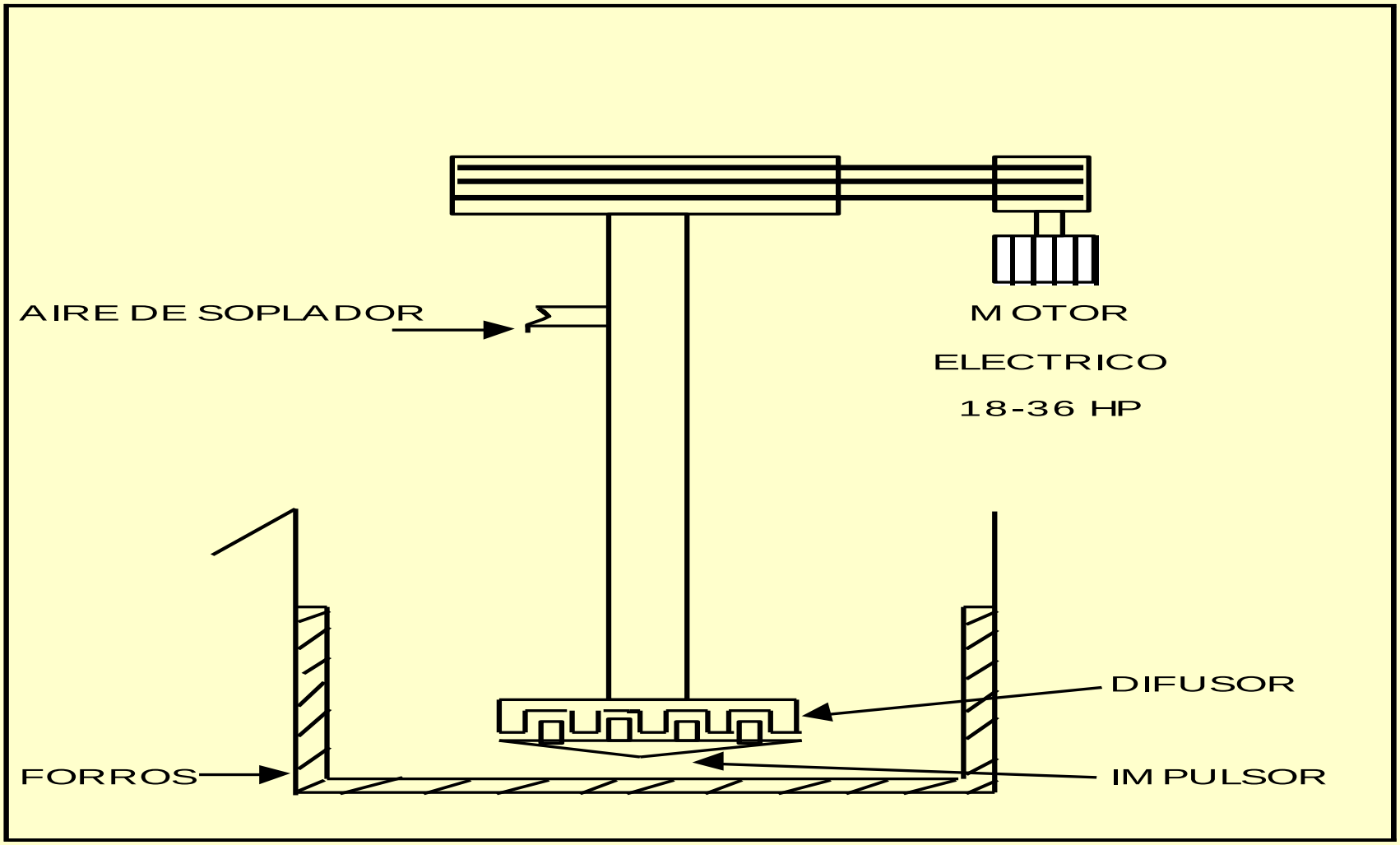
OBJETIVOS DE LAS CELDAS DE FLOTACION

- Promover los choques entre partículas minerales y las burbujas de aire con el fin de que el conjunto mineral-burbuja formado tenga una baja densidad y pueda elevarse desde la pulpa a la zona de espuma.

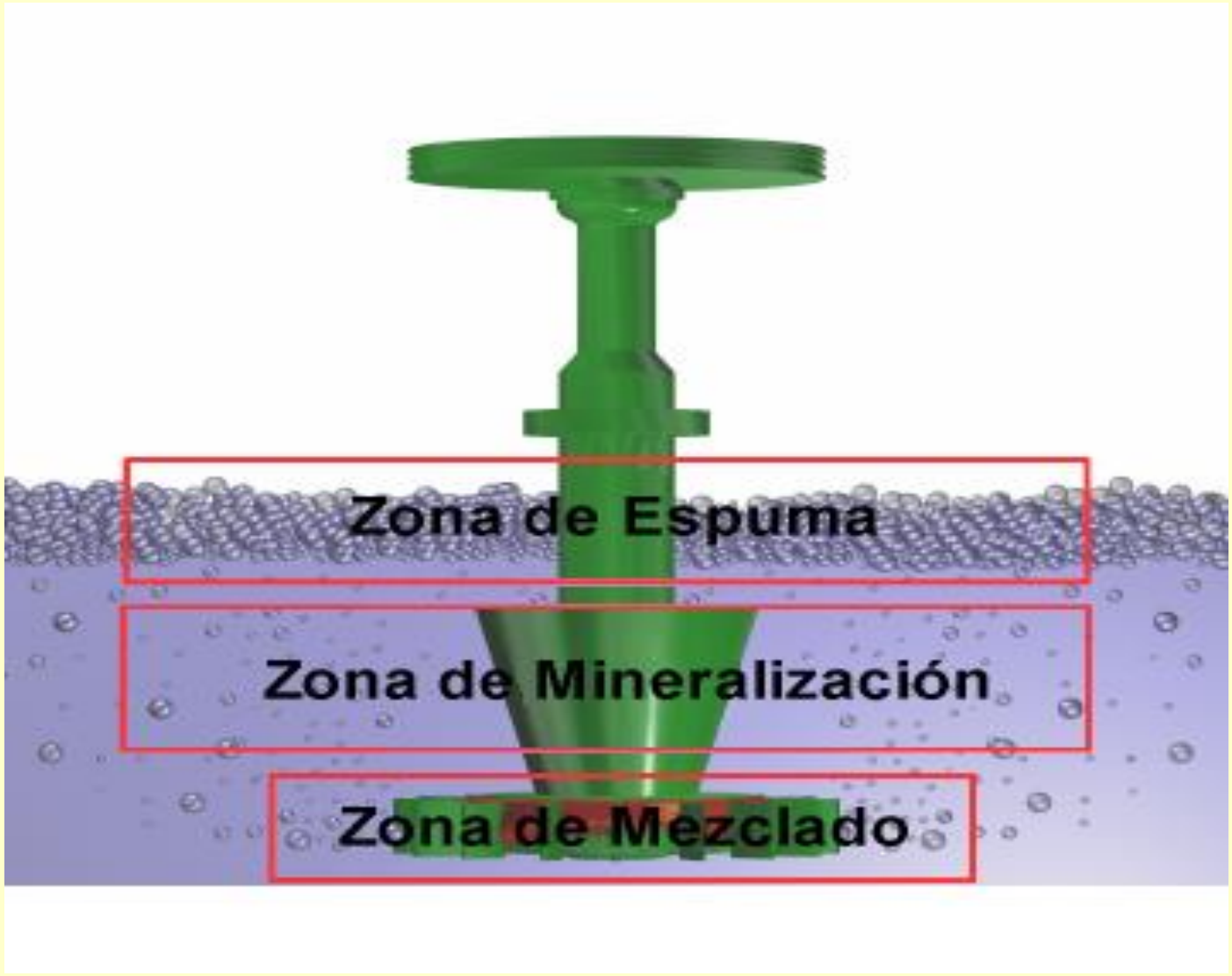



Motor
Aire
Espuma con
partículas
flotadas
Resíduo
sólido
no-flotado

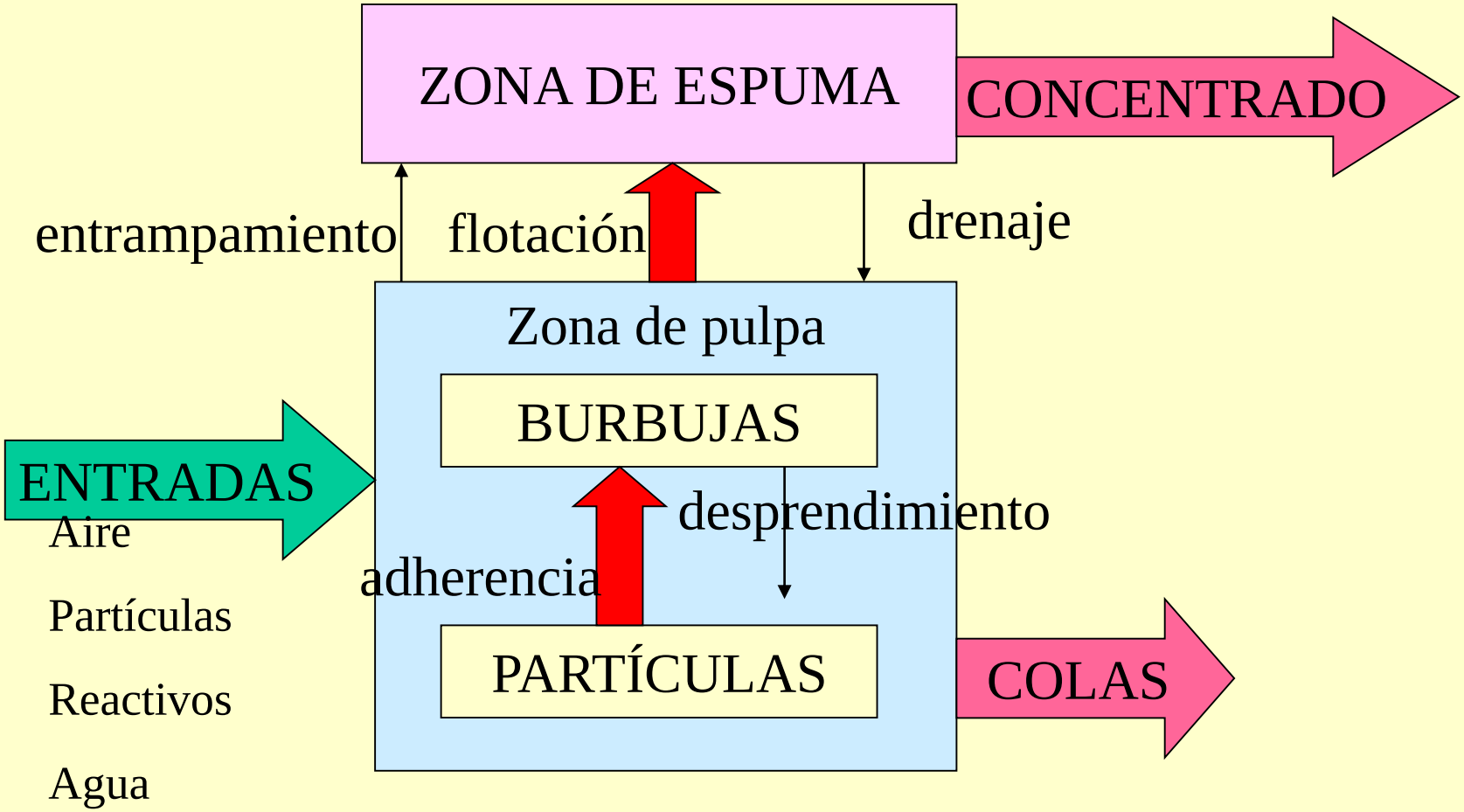
PARTES DE UNA CELDA CONVENCIONAL



ZONAS DE LA CELDA DE FLOTACIÓN



CELDA DE FLOTACIÓN



EFICIENCIA DE UNA CELDA DE FLOTACIÓN

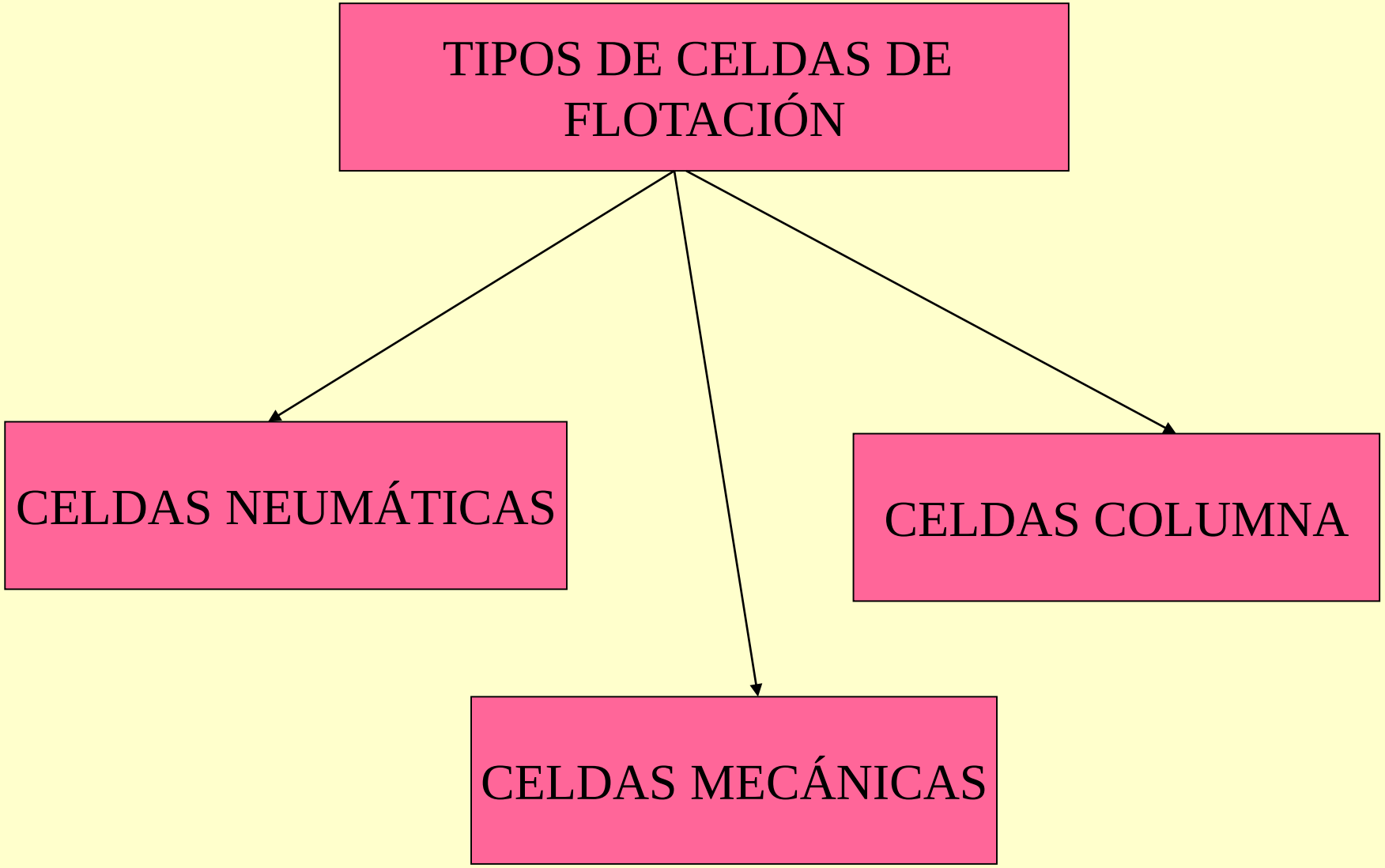
- **La eficiencia de una celda de flotación se determina por los siguientes aspectos :**
- **1. Tonelaje que se puede tratar por unidad de volumen.**
- **2. Calidad de los productos obtenidos y recuperaciones.**
- **3. Consumo de energía eléctrica, reactivos, espumantes y otros reactivos, con el fin de obtener los resultados óptimos.**
- **4. Gastos de operación y mantención por tonelada de mineral tratado.**



CELDA DE FLOTACIÓN DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

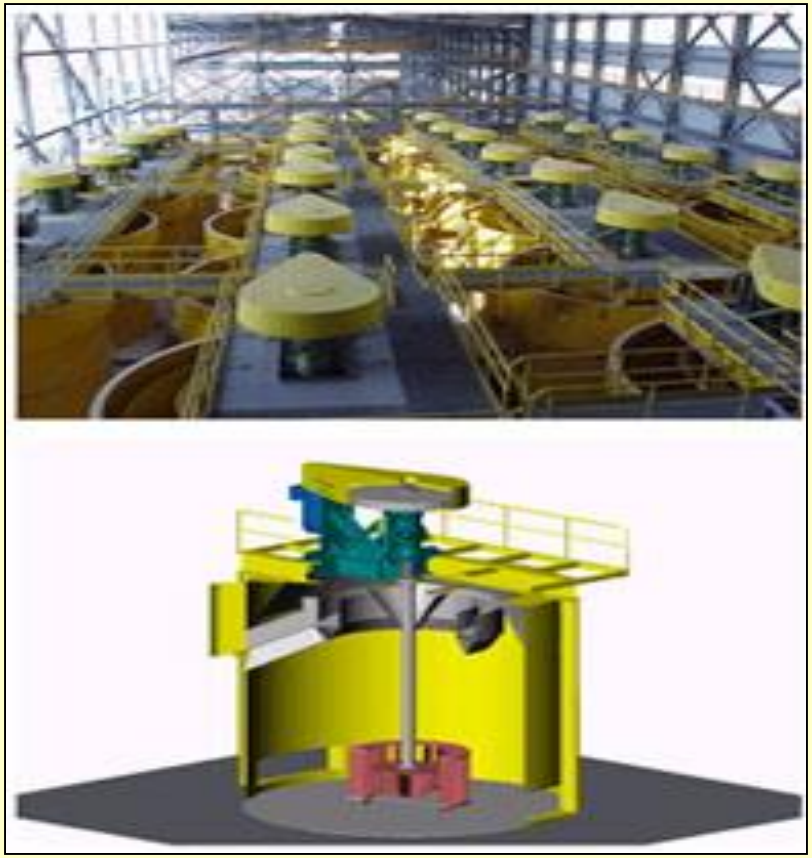


Detalles de la Máquina de Flotación de Laboratorio Denver D-12


TIPOS DE CELDAS DE FLOTACIÓN
CELDAS NEUMÁTICAS
CELDAS MECÁNICAS
CELDAS COLUMNA

CELDAS MECANICAS

- Se caracterizan por tener un agitador mecánico que mantiene la pulpa en suspensión y dispersa el aire dentro de ella.



CELDAS MECANICAS



- El ingreso de aire para las celdas mecánicas puede realizarse por insuflación forzada o por la acción succionadora del impulsor.
- La velocidad del impulsor puede ser regulada.

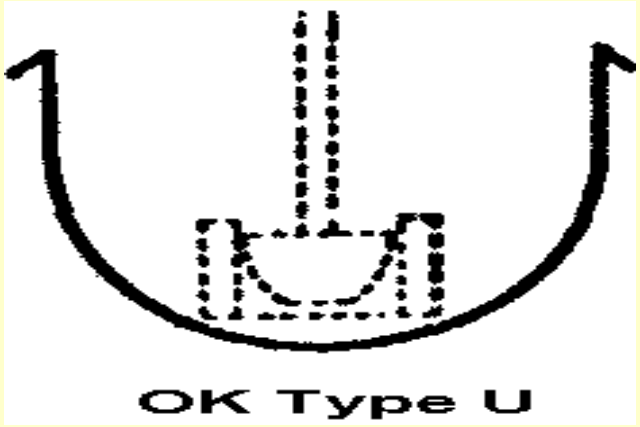
CELDAS DE FLOTACIÓN MECÁNICAS

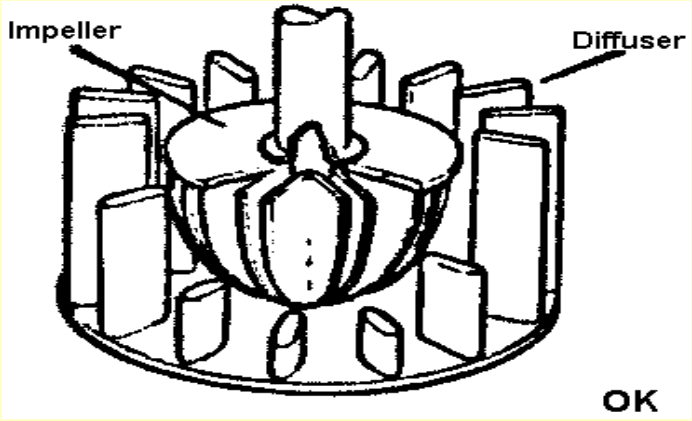
- **Las celdas de flotación mecánicas tienen tres zonas típicas : una zona de alta turbulencia a nivel del mecanismo de agitación, una zona intermedia de relativa calma, y una zona superior.**
- **La zona de agitación es aquella donde se produce la adhesión partícula-burbuja. En esta zona deben existir condiciones hidrodinámicas y físicoquímicas que favorezcan este contacto.**



CELDAS DE FLOTACIÓN MECÁNICAS

- **La zona intermedia se caracteriza por ser una zona de relativa calma, lo que favorece la migración de las burbujas hacia la superficie de la celda.**
- **La zona superior corresponde a la fase acuosa, formada por burbujas. La espuma descarga por rebalse natural, o con ayuda de paletas mecánicas. Cuando la turbulencia en la interfase pulpa - espuma es alta se produce contaminación del concentrado debido al arrastre significativo de pulpa hacia la espuma.**

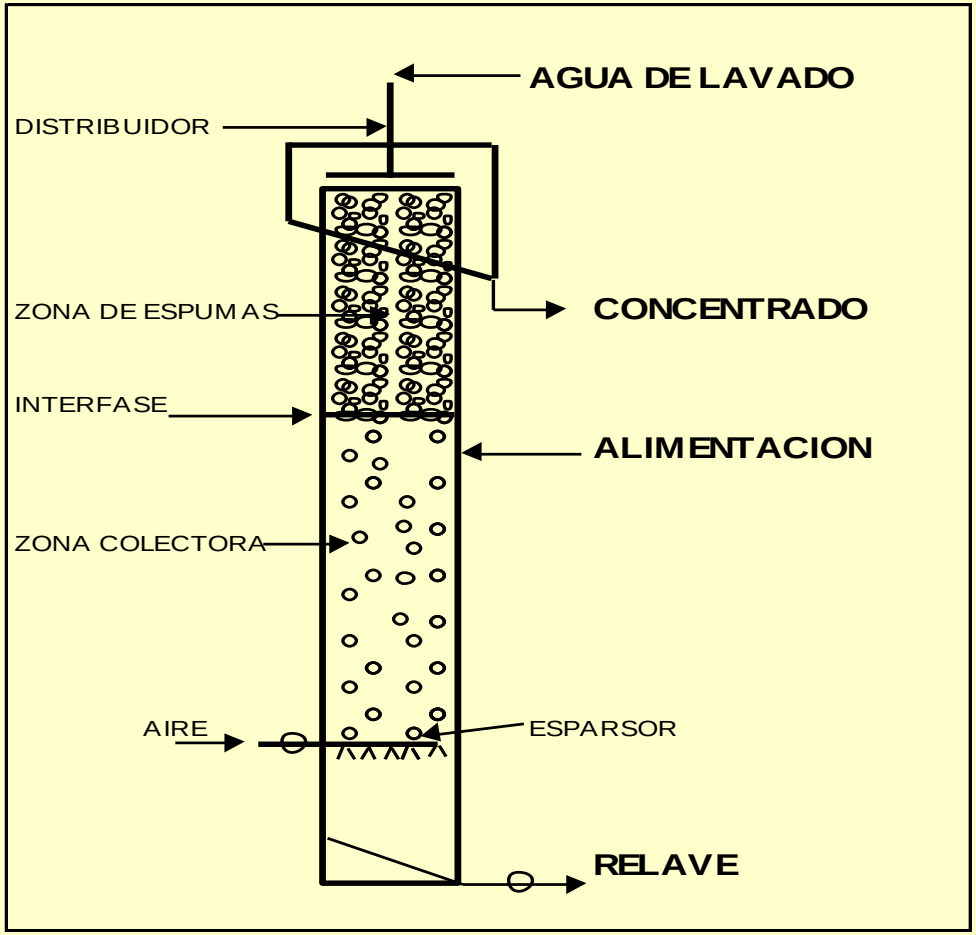




CELDA COLUMNA

- Son máquinas de flotación que no tienen impulsor mecánico.
- La pulpa es agitada por aire comprimido.
- Son tanques rectangulares con tubería de difusión de aire instalados en el fondo de la celda.

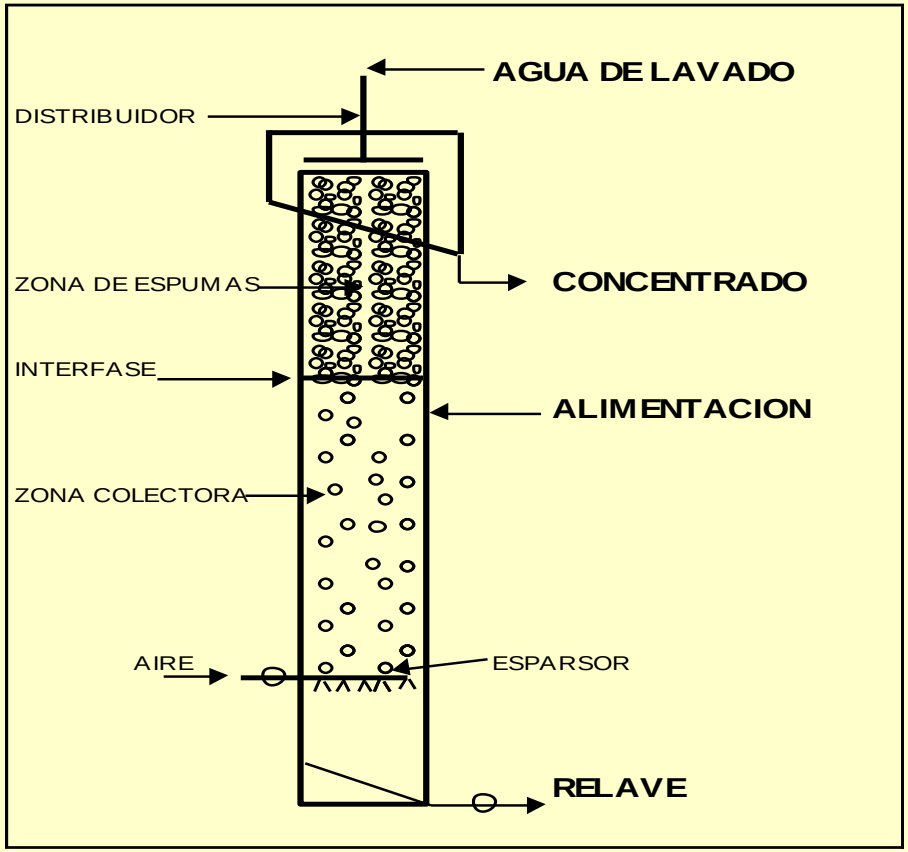
PARTES DE UNA CELDA COLUMNA



CELDA COLUMNA

- Las partículas de mineral hidrofóbicas son adheridas a las burbujas, las cuales ascienden y son movidas como concentrado.

PARTES DE UNA CELDA COLUMNA



CELDA COLUMNA

- La pulpa de alimentación entra a una corta distancia de la parte superior de la celda. La pulpa dentro encuentra una corriente de aire ascendente y una corriente descendente del agua de lavado.



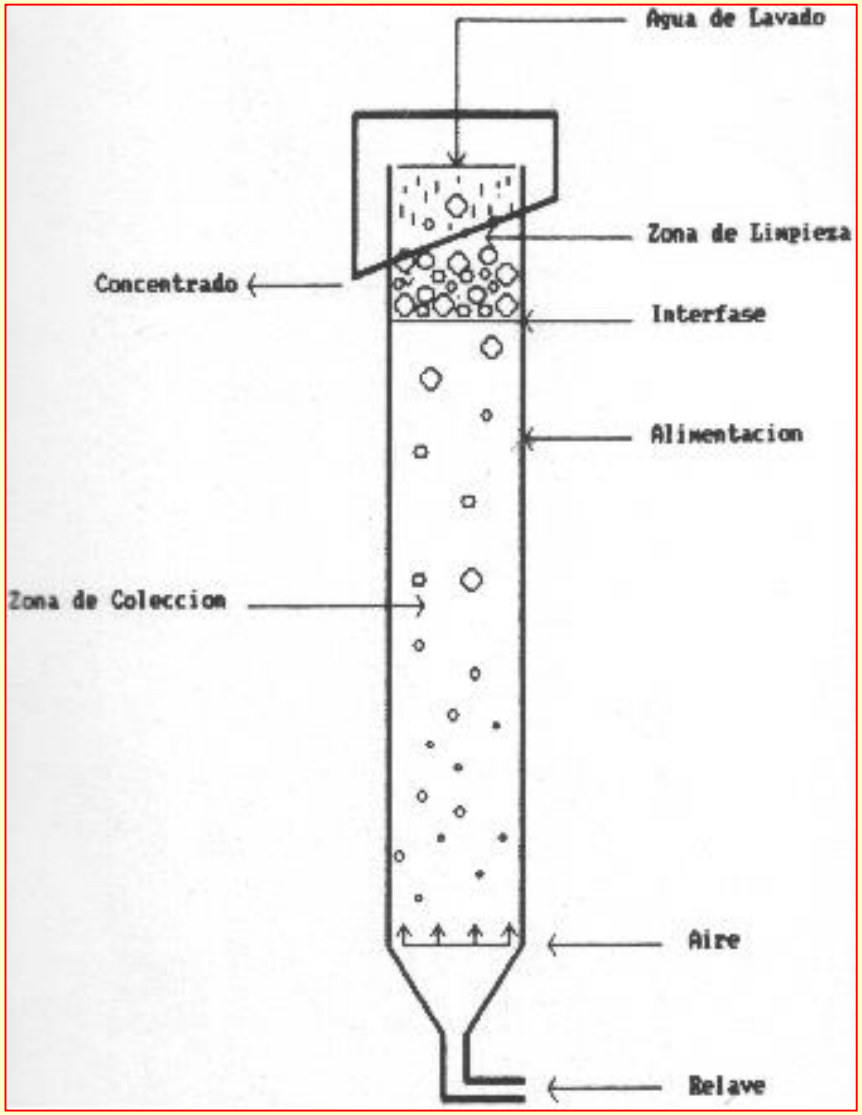
COLUMNAS DE FLOTACIÓN

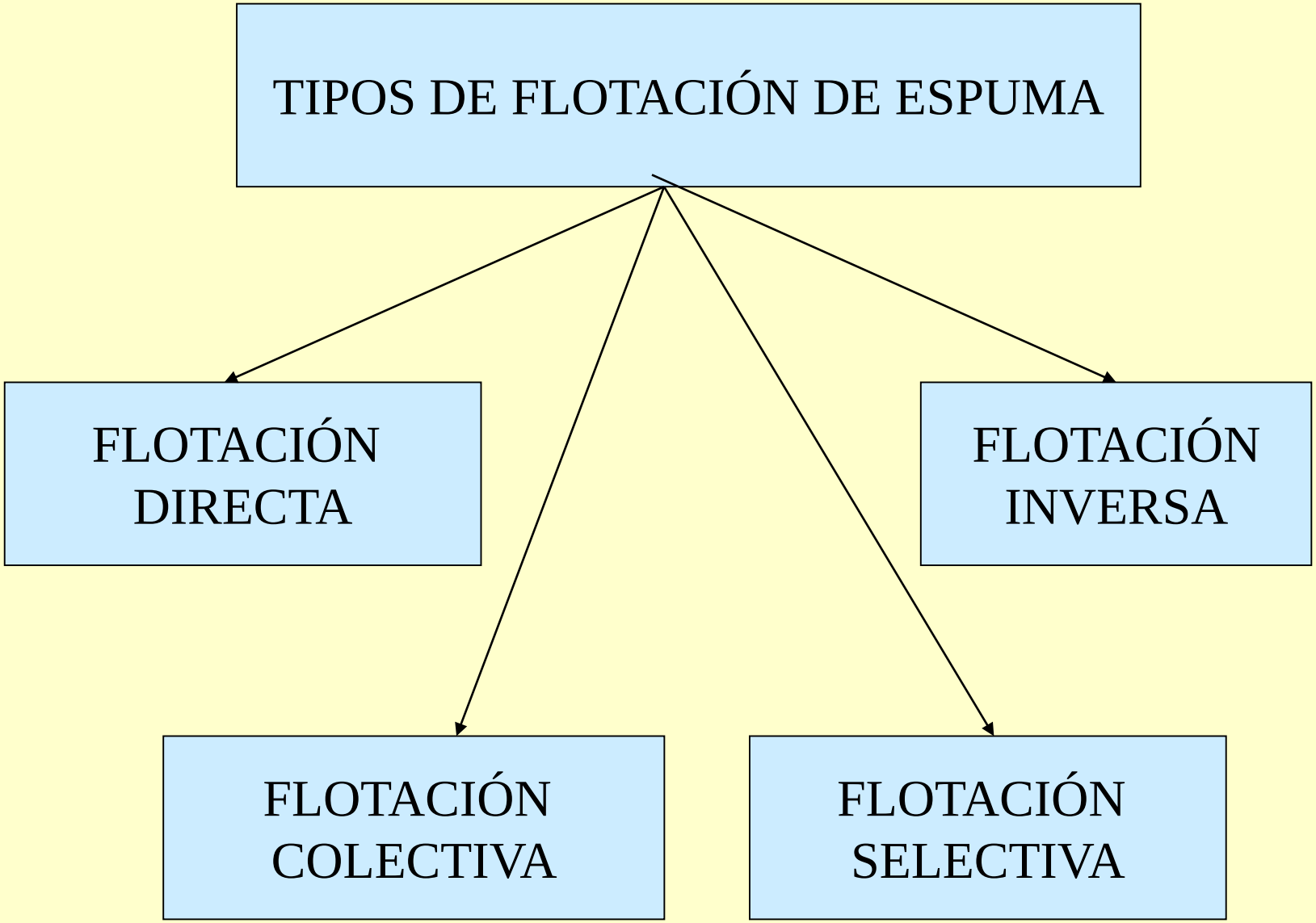
Las ventajas de las columnas se pueden resumir en los siguientes puntos : a) mejores leyes; b) menor costo de operación; c) menor costo de capital; y d) control superior.



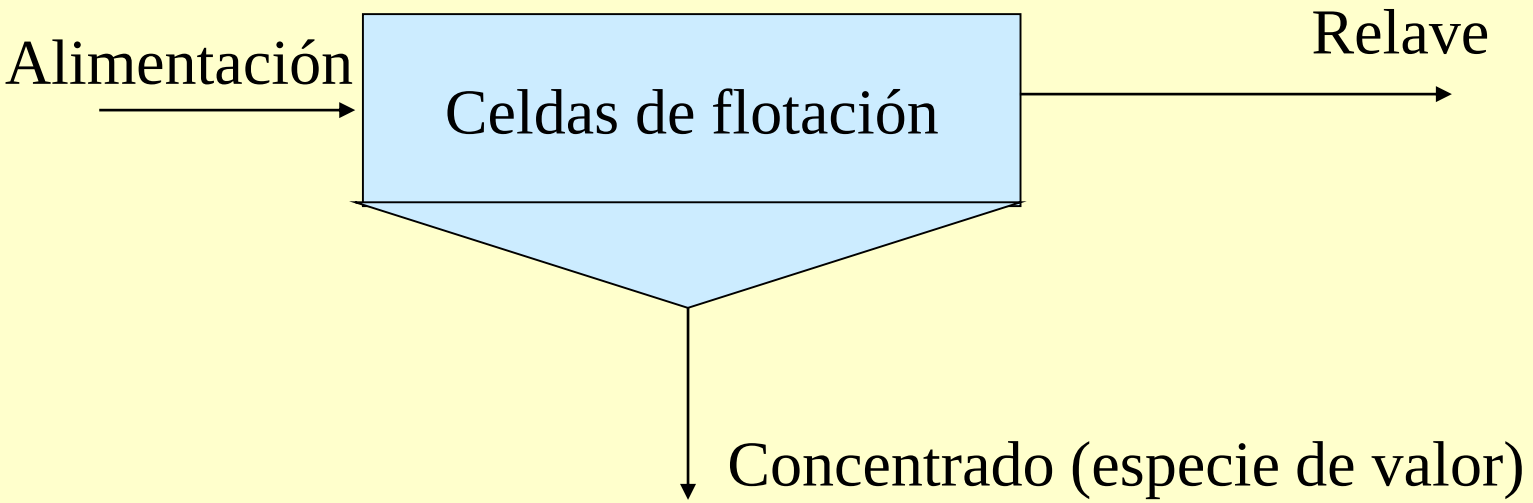
COLUMNAS DE FLOTACIÓN

- **La capacidad de las columnas de producir concentrados de ley superior con recuperaciones similares deriva de la mejora que se consigue en la selectividad combinada con el lavado de espuma, que remueve la ganga arrastrada que generalmente está asociada con la pulpa de alimentación. En la limpieza de cobre , por ejemplo, se han reportado mejoras de ley de 2-4 %.**



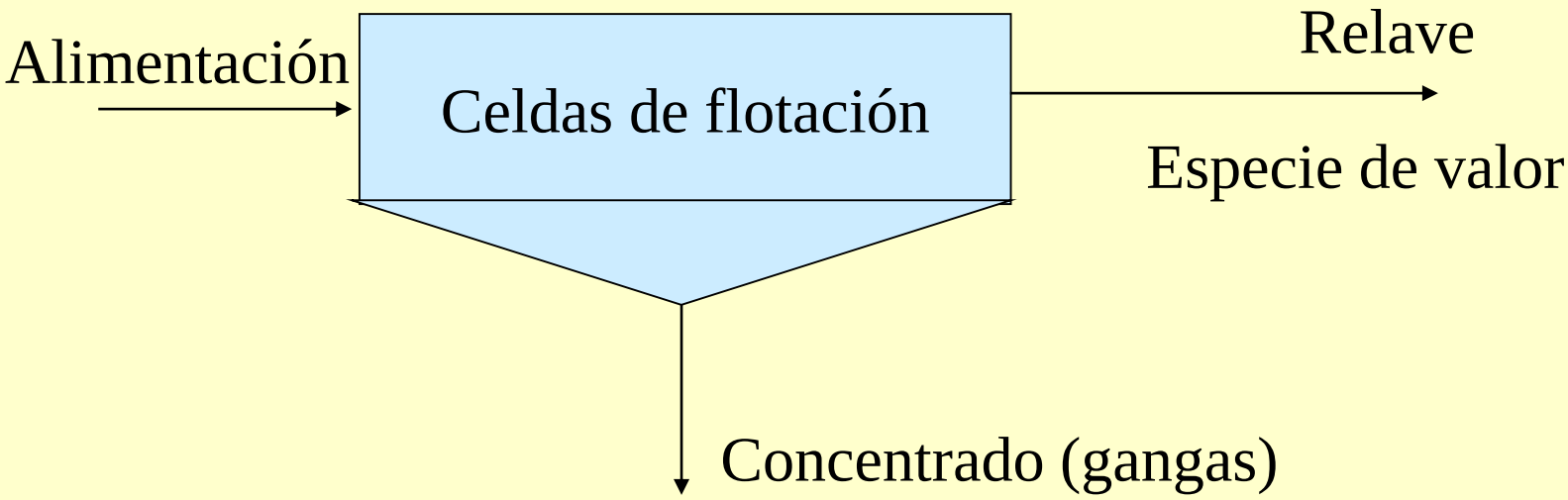

TIPOS DE FLOTACIÓN DE ESPUMA
FLOTACIÓN DIRECTA
FLOTACIÓN INVERSA
FLOTACIÓN COLECTIVA
FLOTACIÓN SELECTIVA

FLOTACIÓN DIRECTA



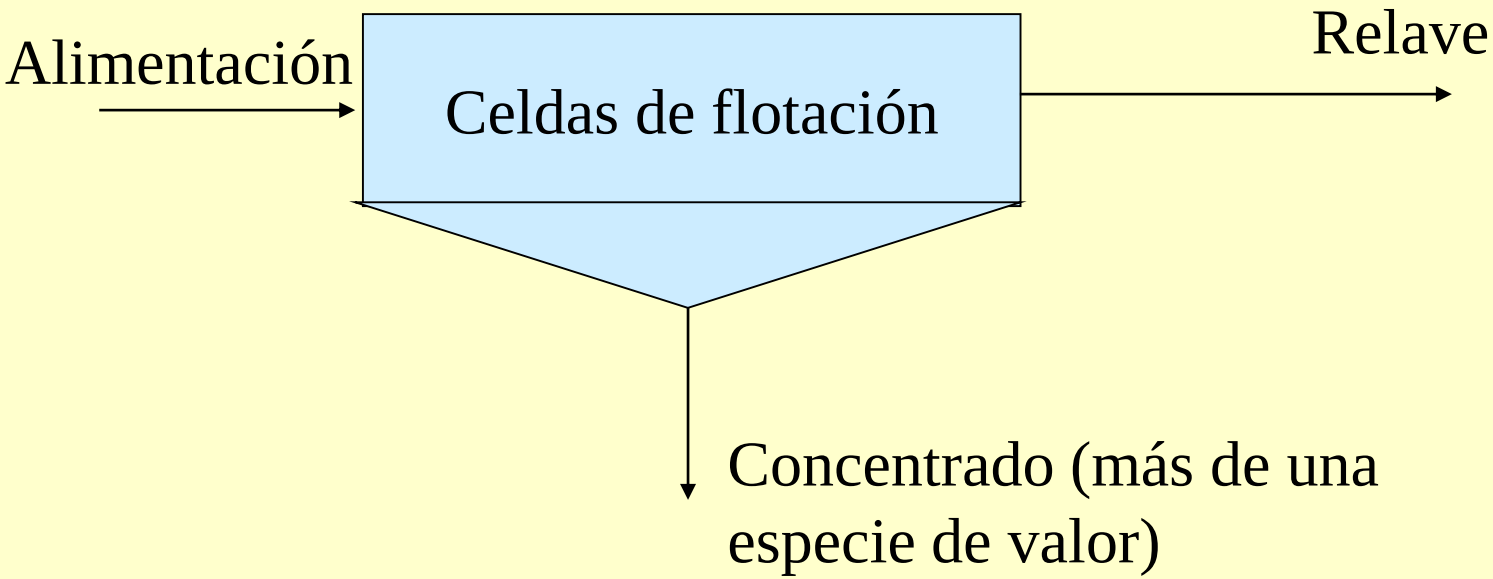
- Es aquella en la que el mineral valioso sale en la espuma y la ganga se queda en el no flotante.

FLOTACIÓN INVERSA



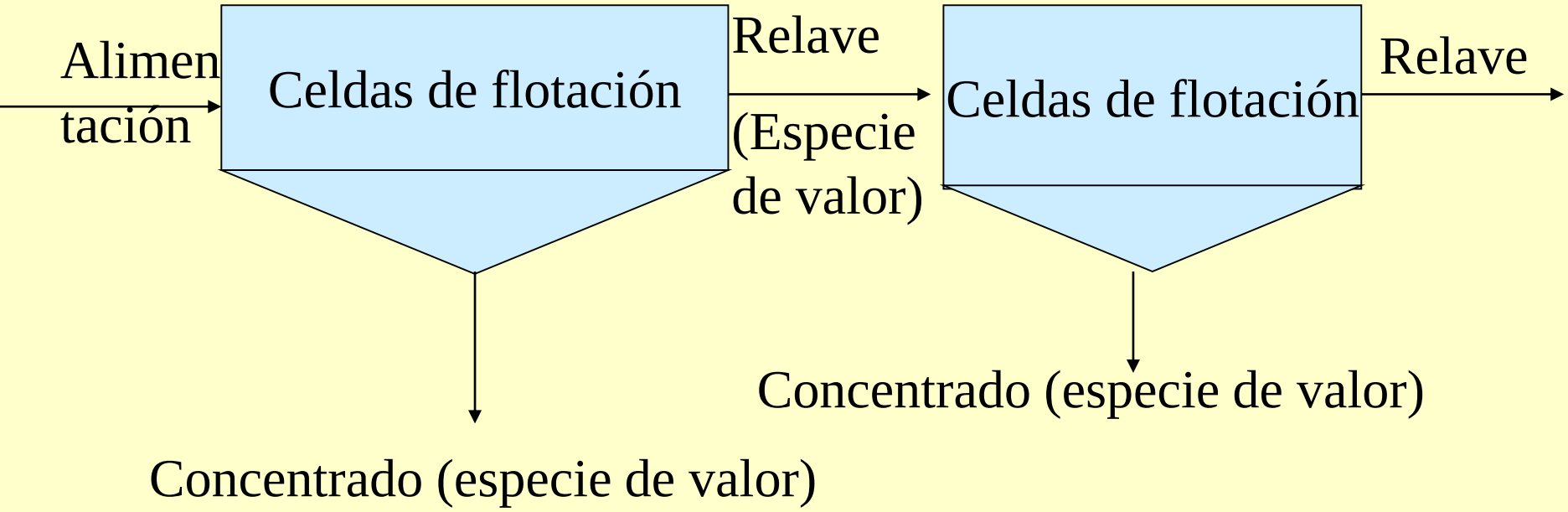
- En este tipo de flotación el mineral valioso se queda como no flotante y la ganga es la que flota.

FLOTACIÓN COLECTIVA (BULK)



- Es el caso de que todos los minerales valiosos y de un solo tipo mineralógico salen en el concentrado

FLOTACIÓN DIFERENCIAL (SELECTIVA)



- En este caso sólo flota un mineral a la vez en cada etapa.

DEFINICIONES

PULPA

Es una suspensión de sólidos en líquido. En la industria metalúrgica, el líquido por lo general es el agua.

$$\%S = \frac{masa.sólidos.en.pulpa}{(masa.sólidos.en.pulpa + masa.líquido)} x100$$

GRADO O LEY

Se refiere a la concentración de un mineral en un determinado flujo y se expresa en porcentaje.

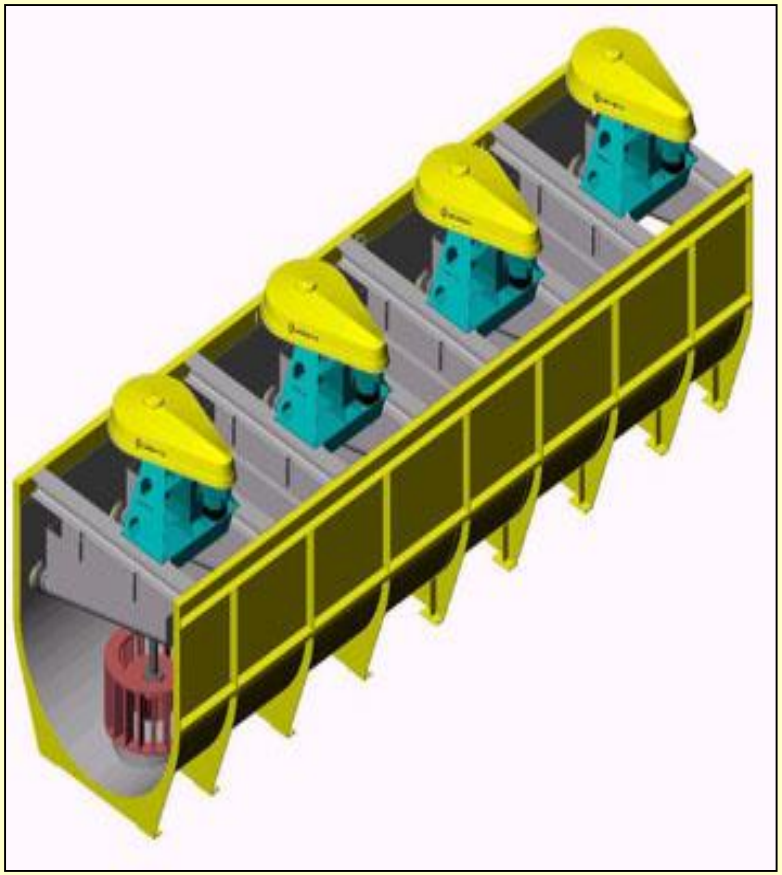
$$Ley = \frac{masa.\min eral.en.un.flujo}{(masa.de.\min eral + masa.ganga).en.un.flujo} x100$$

RECUPERACIÓN

Describe la cantidad de mineral o metal de interés que está presente en el concentrado en relación a la cantidad presente en la alimentación.

$$\text{Re}cuperacion = \frac{masa.\min eral.en.el.concentrado}{masa.de.\min eral.en.a\lim entación} x100$$

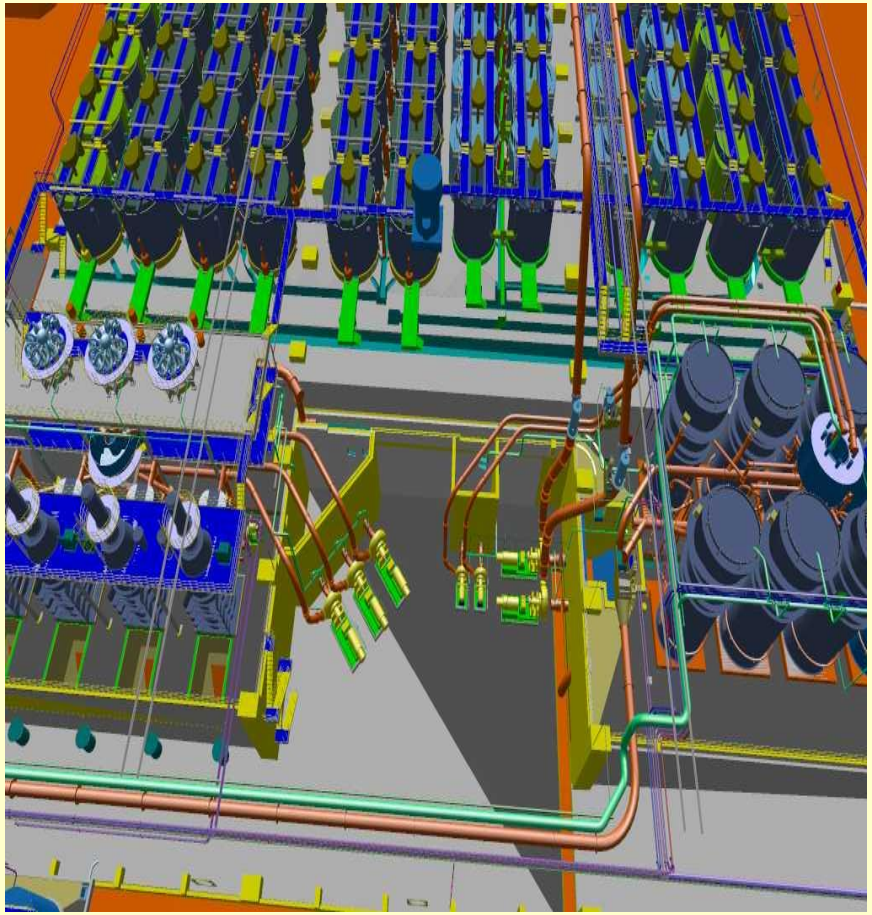
CIRCUITOS DE FLOTACION



- La flotación es llevada a cabo en una operación continua en series o banco de celdas.
- Esto incrementa el tiempo de flotación, permitiendo una oportunidad amplia para que ocurra la unión partícula-burbuja.

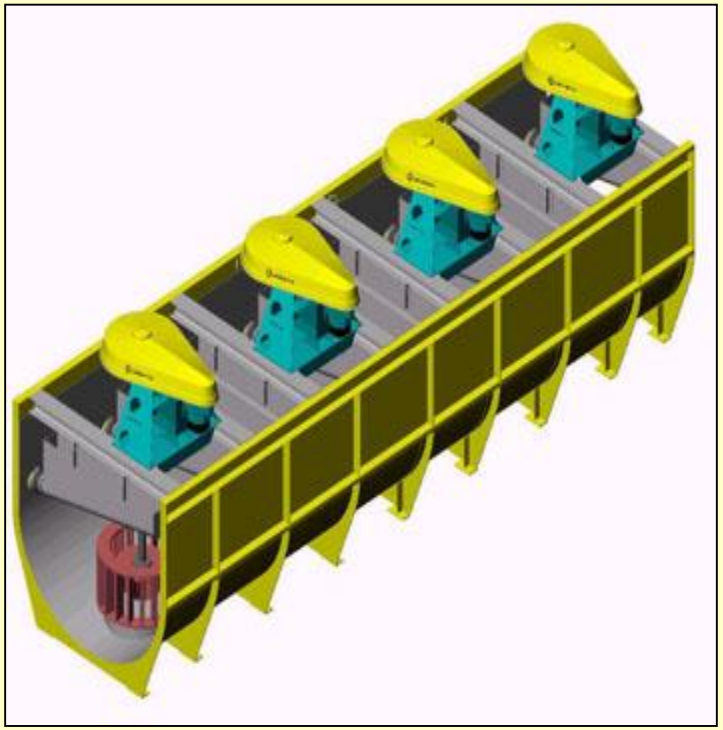
CIRCUITOS DE FLOTACION

- El tiempo de residencia de las partículas en el banco de celdas varía de 5 a 15 minutos.
- La velocidad a la cual las partículas flotan dependerá de la composición de las partículas, la densidad de la pulpa, el tamaño de partícula y el grado de turbulencia en la celda.



CIRCUITOS DE FLOTACION

- La pulpa ingresa a la primera celda del banco y entrega parte de su mineral valioso en forma de espuma.
- Esta espuma pasa la segunda celda, de donde es sacada más espuma mineralizadas y así sucesivamente hasta la última celda del banco.



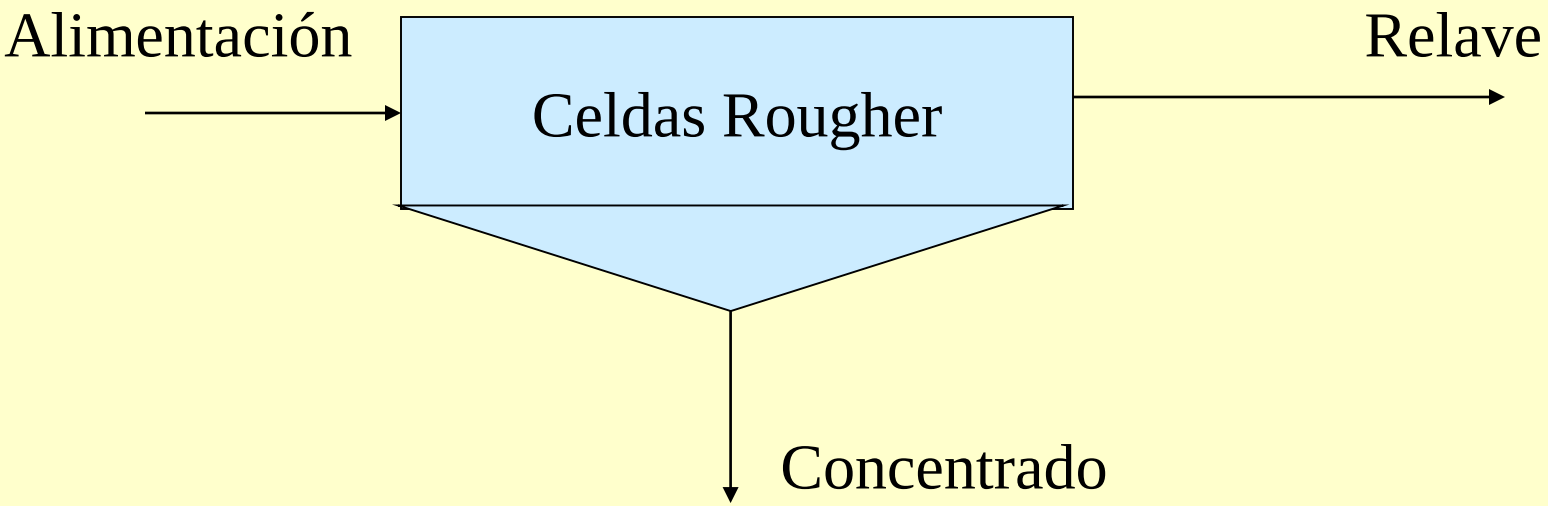
ETAPA ROUGHER

- Es aquella que recupera una alta proporción de las partículas valiosas aún a costa de la selectividad utilizando mayores concentraciones de reactivos colectores, velocidades altas de agitación y baja altura de la zona de espumas.





ETAPA ROUGHER



- El concentrado rougher no es un producto final y deberá pasar a las etapas de limpieza para obtener concentrados de alta ley aún a costa de una baja recuperación.

ETAPA LIMPIEZA

- El concentrado recuperado de las celdas rougher a menudo requieren reflotar en una o más etapas de flotación llamadas de limpieza.
- En esta etapa las condiciones de flotación son más suaves con una reducida densidad de pulpa y bajas concentraciones de reactivos para reducir la espuma y permitir un alto grado de partículas floten.



ETAPA LIMPIEZA

- Se alimenta del concentrado rougher.
- El concentrado de la etapa de limpieza se puede utilizar o lavar adicionalmente.
- El relave de la etapa de limpieza es retornado con o sin molienda al circuito rougher.

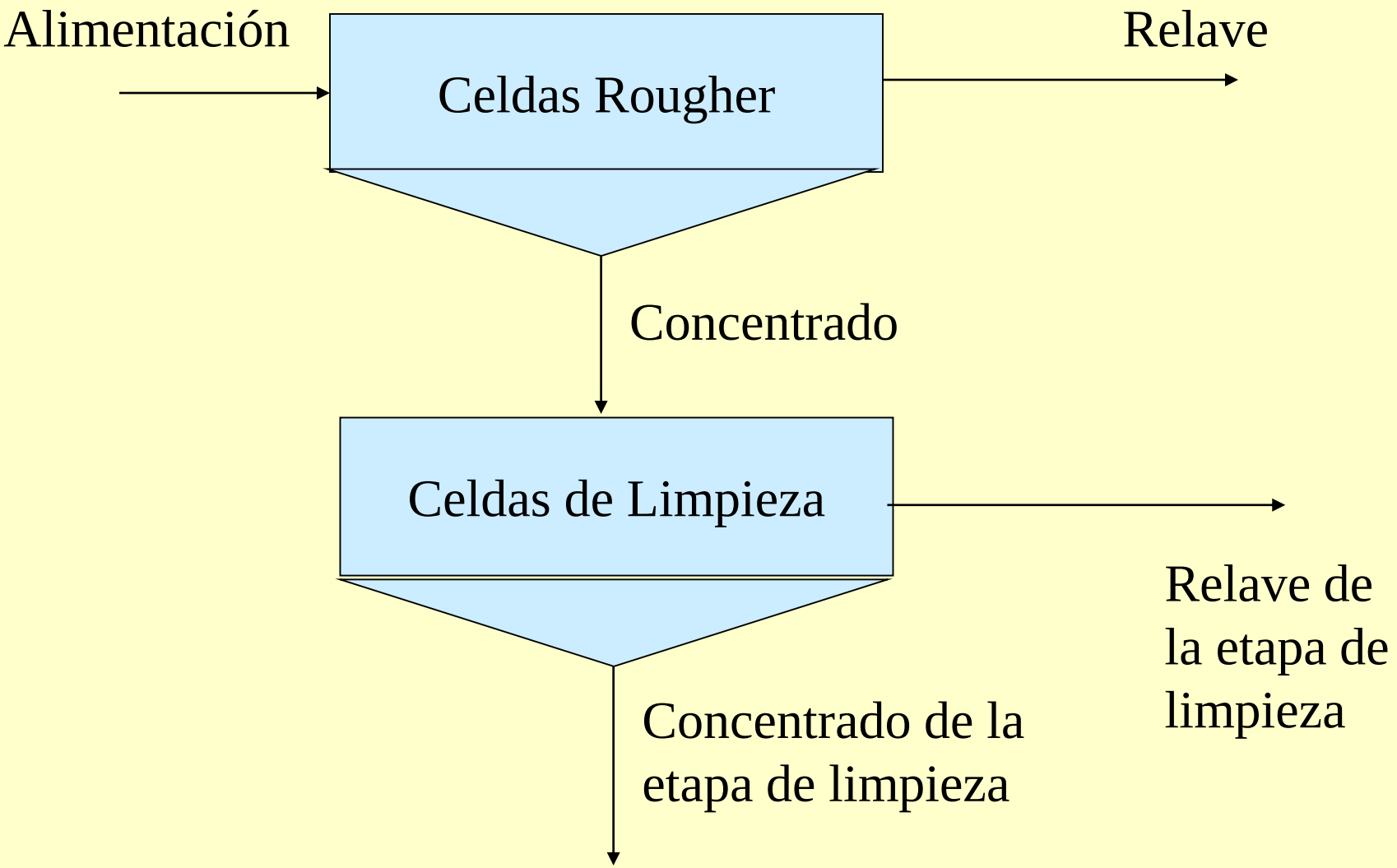


ETAPA LIMPIEZA

- Para maximizar la ley que proviene de las celdas de limpieza los tiempos de residencia son cortos.
- Para celdas rougher y scavenger pueden tomar 10 minutos y para celdas de limpieza 3 minutos.



ETAPA LIMPIEZA



ETAPA SCAVENGER

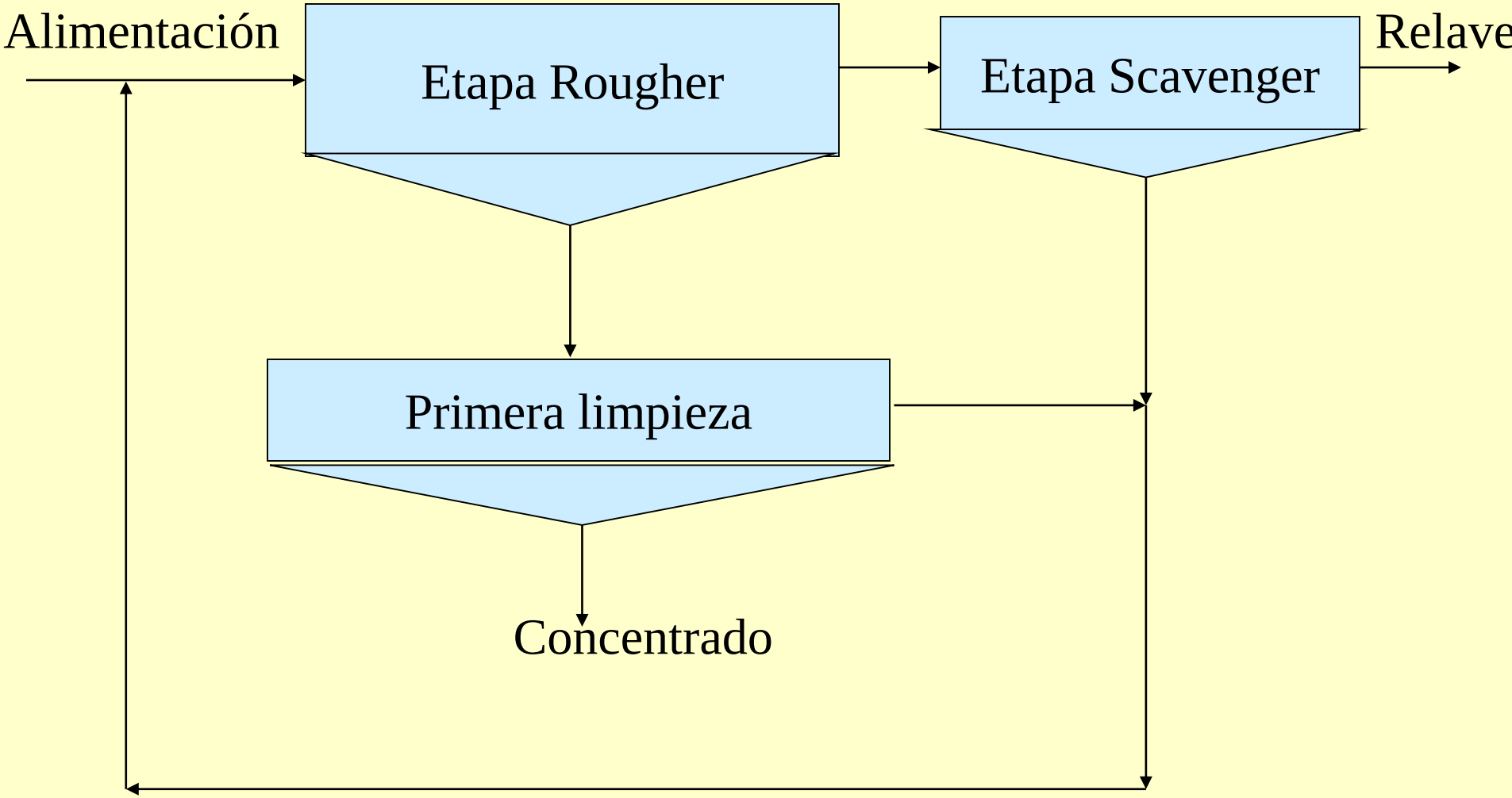
- Es aquella que se recupera la mayor cantidad de valioso posible.
- Su relave será el descarte final mientras que su concentrado deberá retornar a la etapa rougher para incrementar su ley.



ETAPA SCAVENGER

- Se utiliza altas dosis de reactivos y tiempo de flotación más largos para hacer que flote todo el material de interés posible y maximizar la recuperación.




Alimentación
Etapa Rougher
Etapa Scavenger
Relave
Primera limpieza
Concentrado

FLEXIBILIDAD DE LOS CIRCUITOS DE FLOTACIÓN

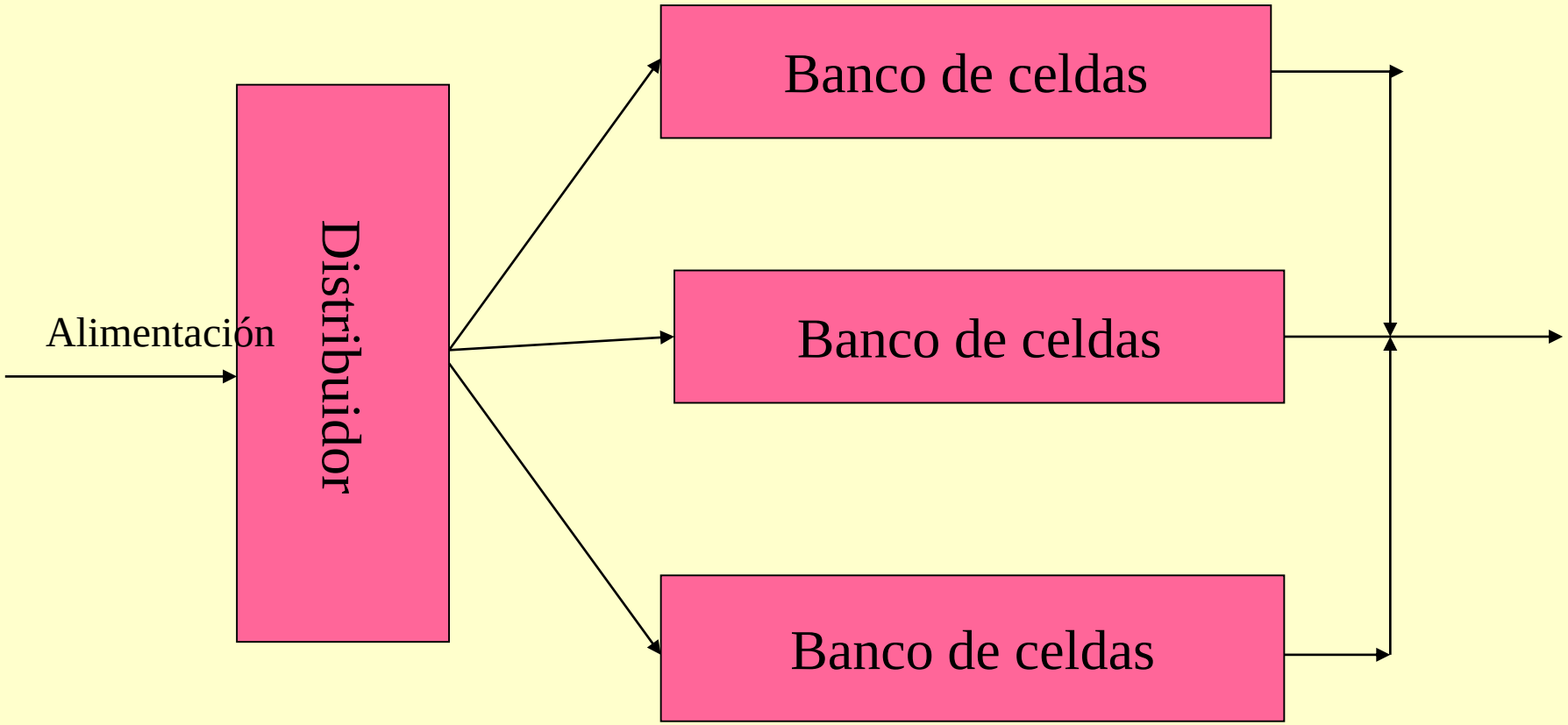


DIAGRAMA DE FLUJO DEL CIRCUITO DE MOLIENDA - FLOTACION UNITARIA

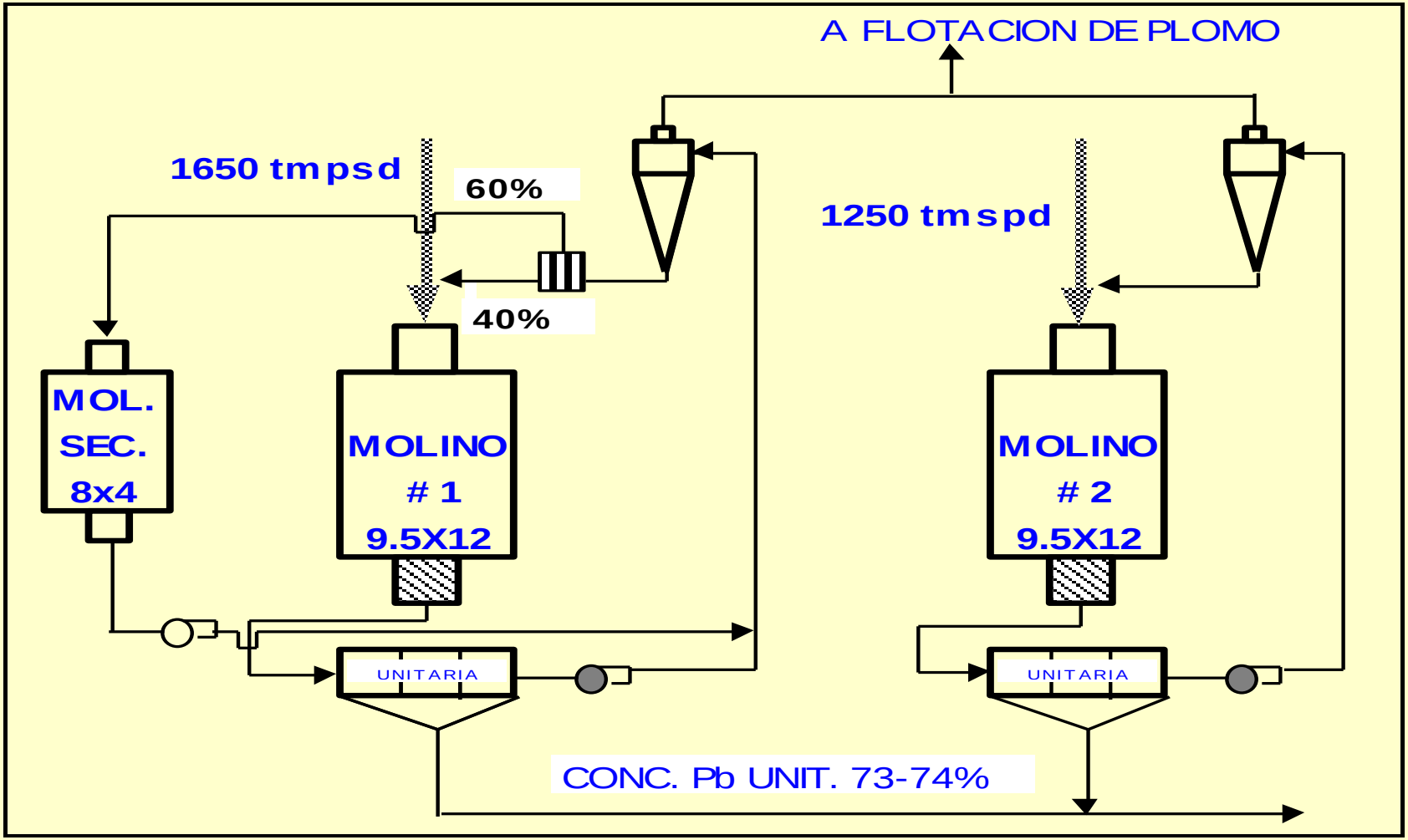


DIAGRAMA DE FLUJO DEL CIRCUITO DE FLOTACION DE PLOMO PLANTA MILPO

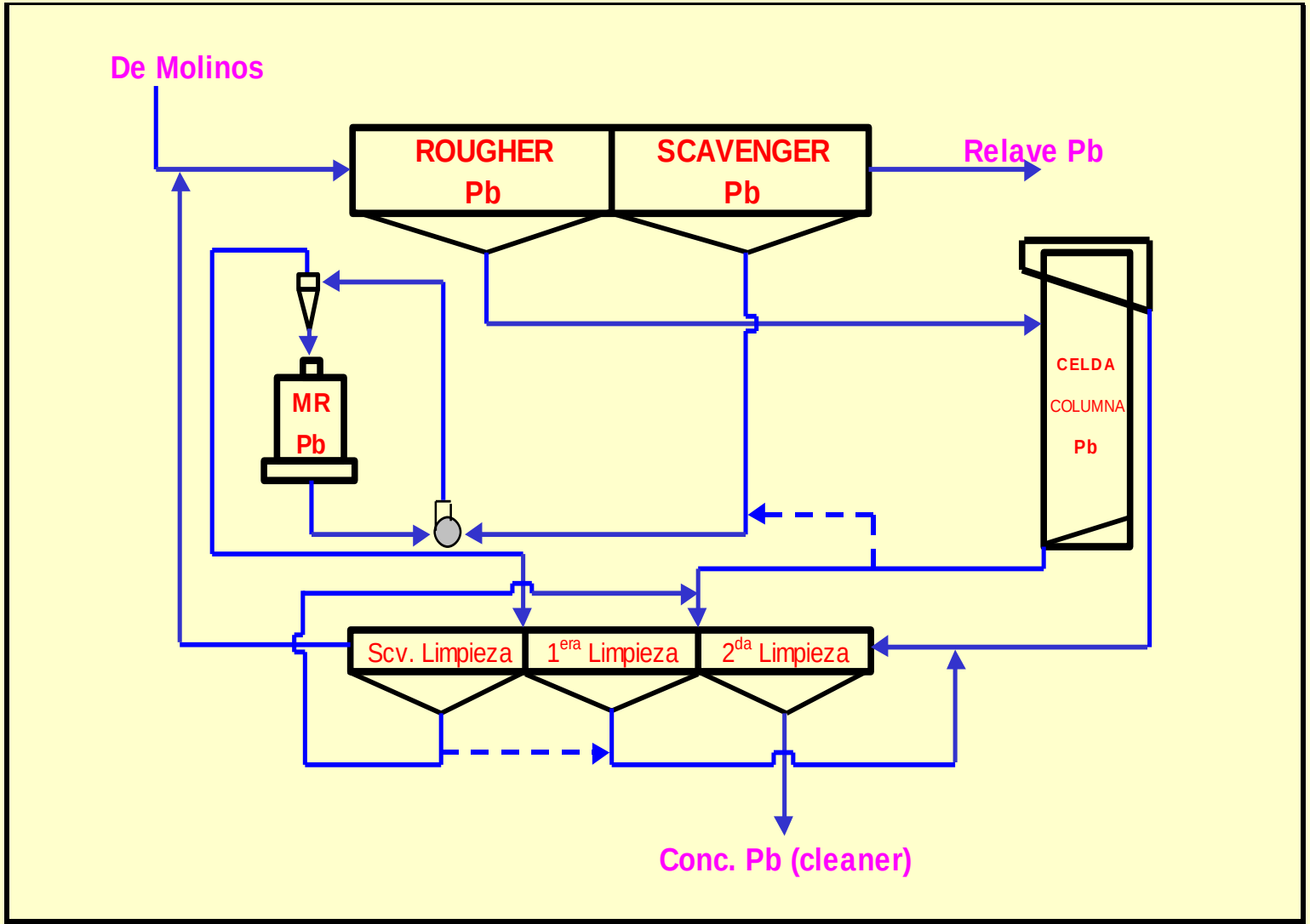
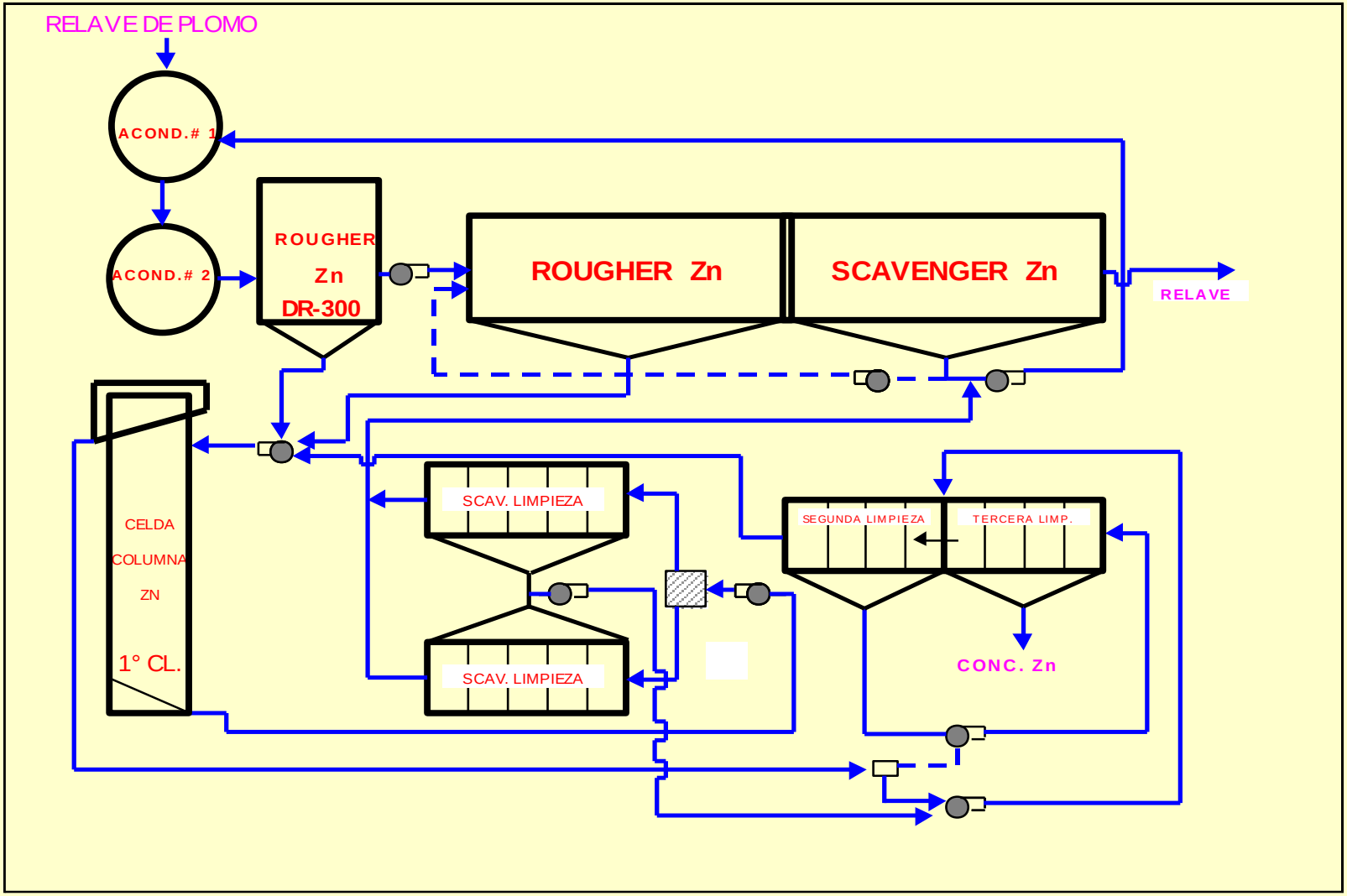
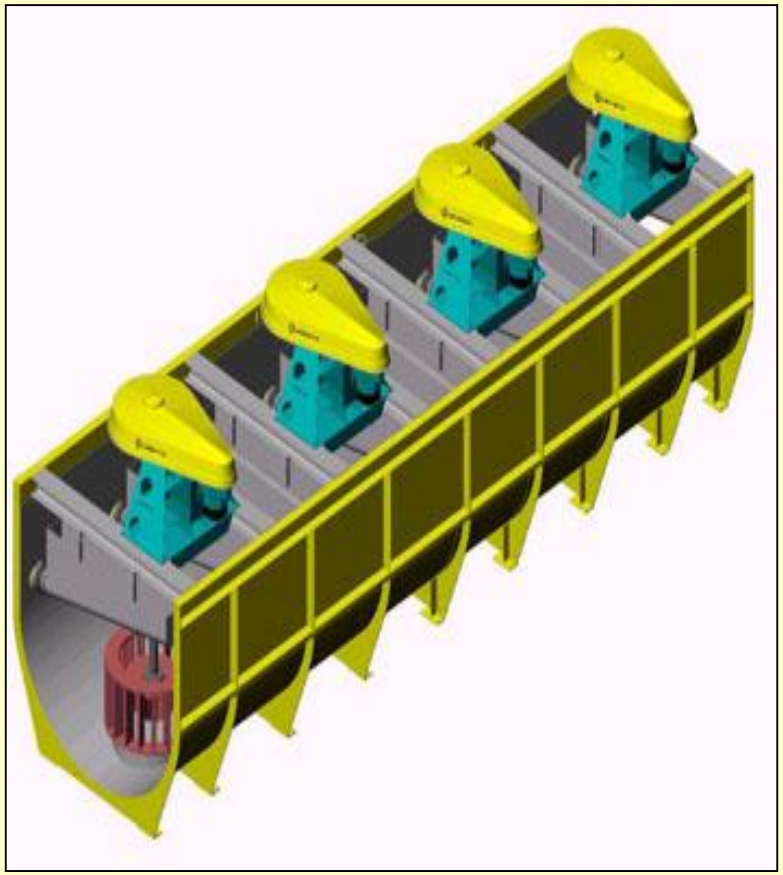


DIAGRAMA DE FLUJO DEL CIRCUITO DE FLOTACION DE ZINC

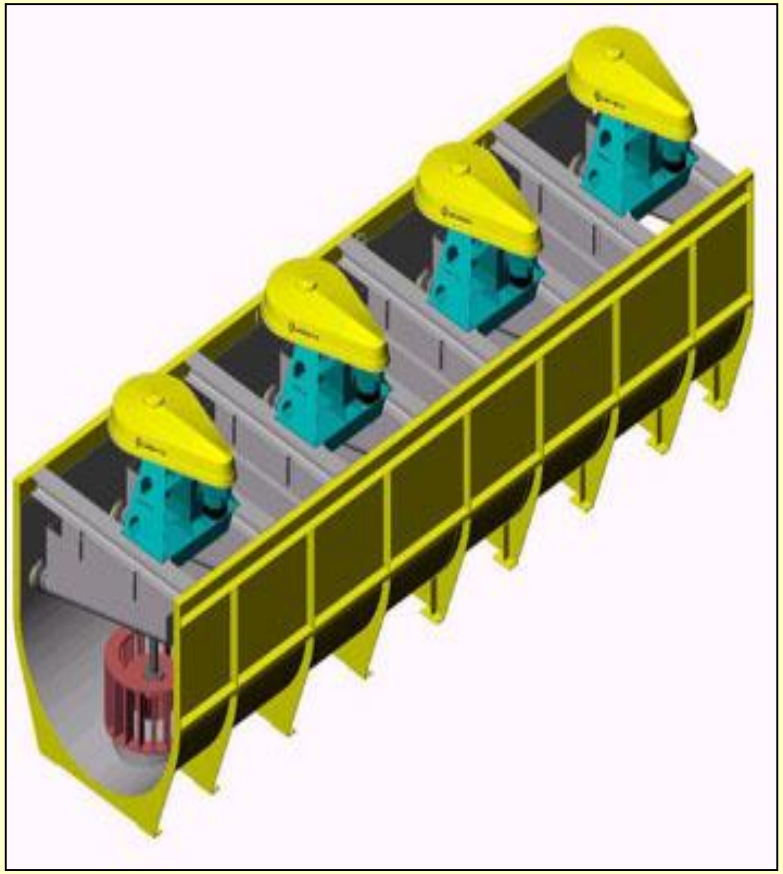


CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DECIRCUITOS DE FLOTACION



- El número y tamaño de celdas es determinado por una serie de factores pero principalmente el tonelaje de material a manejar a través del circuito.

CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DECIRCUITOS DE FLOTACION



- El tamaño de las celdas dependerá del flujo de pulpa, el número de módulos paralelos en la sección de flotación, el número de celdas en cada fila y el tiempo de residencia.
- Consideraciones económicas favorecen celdas grandes de 250 m^3 a 300 m^3.

DIMENSIONAMIENTO DE CELDAS

- Determinación del caudal de pulpa Q que se alimentará al banco de celdas.
- Sabiendo el tiempo de flotación en la planta.
- Escoger la celda a utilizar y saber su volumen efectivo.

$$Número.celdas = \frac{(tiempo.flotación.planta)(Q)}{(volumen.efectivo.celda)}$$

EJEMPLO

- Para un circuito rougher de flotación de cobre se tiene una alimentación de 10000 t/dia. La gravedad específica de los sólidos es 3, el % de sólidos en la pulpa alimentada es de 35 y el tiempo de residencia en planta es de 12 minutos. Estimar el número de celdas necesarias si se utiliza una celda OK8 que tiene un volumen efectivo de 1 m^3.

DIMENSIONAMIENTO DE CELDAS

$$Sólidos.a\lim entados = \frac{10000}{24} = 416.6t/h$$

$$Agua.a\lim entada = \frac{\left[\frac{10000}{0.35} - 10000\right]}{24} = 773.8t/h$$

DIMENSIONAMIENTO DE CELDAS

$$Caudal.pulpa.Q = \frac{416.6}{3x60} + \frac{773.8}{1x60} = 15.2 m^3 / \min\ uto$$

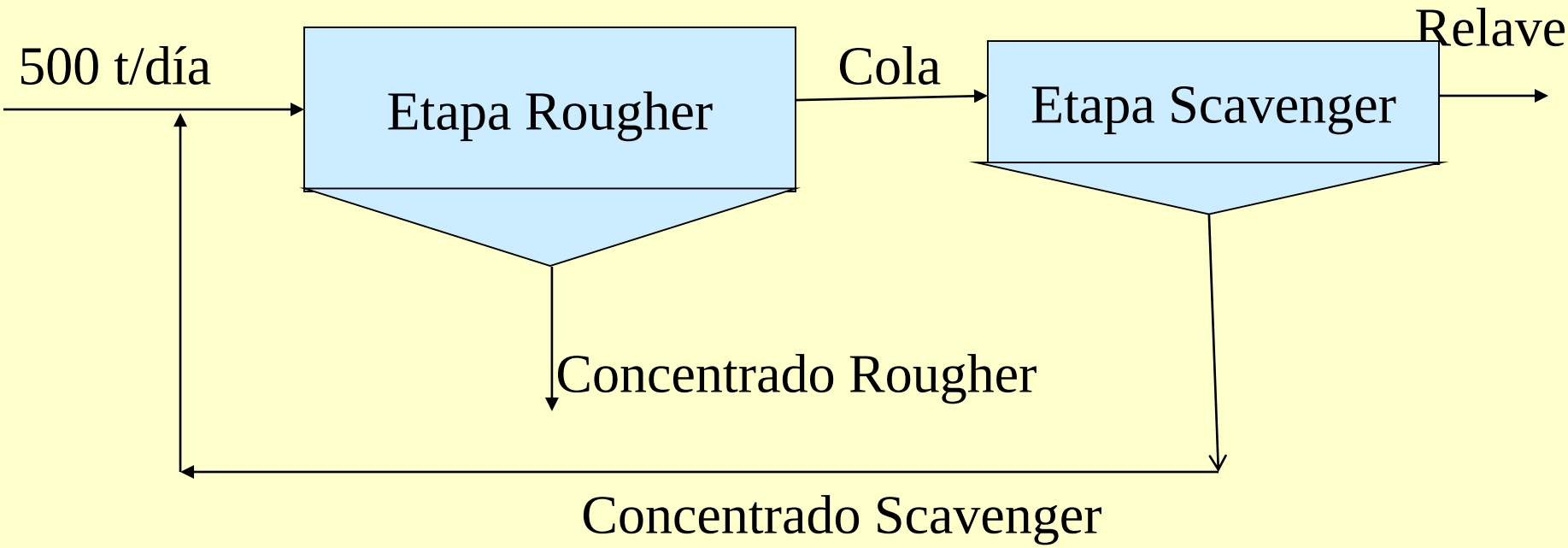
$$Número.celdas = \frac{(tiempo.flotación.planta)(Q)}{(volumen.efectivo.celda)}$$

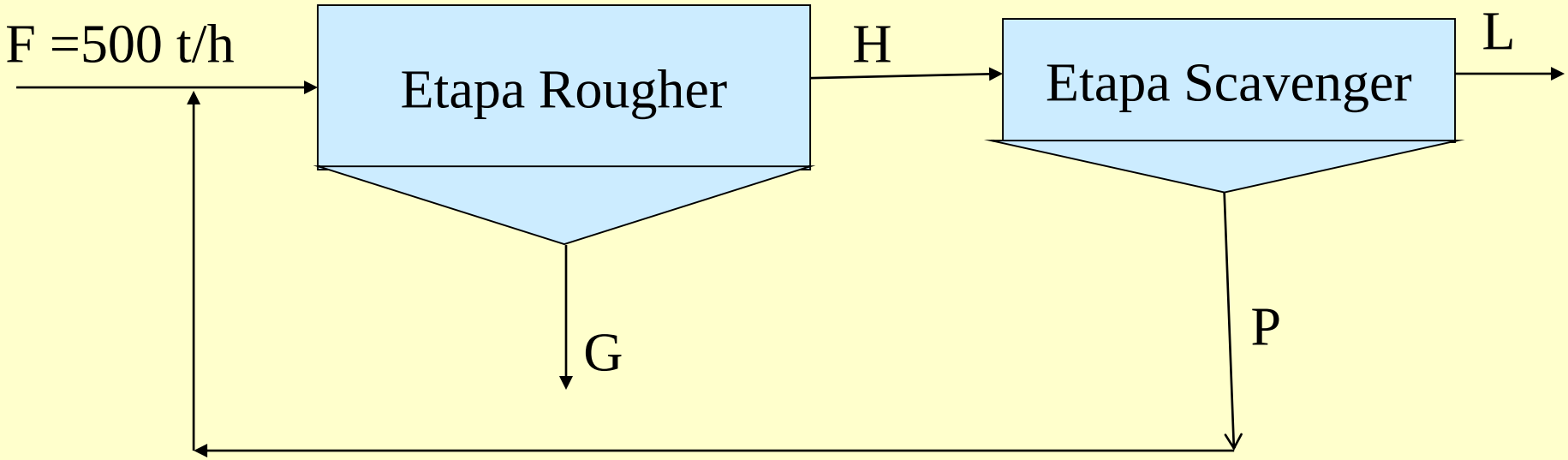
$$Número.celdas = \frac{(12 \min\ utos)(15.2 m^3 / \min)}{(1 m^3)} = 183$$

EJEMPLO

Se va a tratar 500 toneladas de un mineral por día que contiene 10 % de PbS que se desea separar del resto, que se supone que es sílice. El concentrado de las celdas rougher posee una pureza aceptable pero la cola ha de ser tratada nuevamente en celdas scavenger, de las cuales el concentrado es devuelto a las celdas rougher. Los datos proporcionados por el laboratorio indican que la relación de agua a sólidos L/S es de 2 y el tiempo de contacto es de 8 minutos en celdas rougher y que para L/S =4 durante 5 minutos para las celdas scavenger. Las densidades de PbS y SiO_2 son 7.5 y 2.65 g/cm^3 respectivamente. Determinar el número de celdas rougher si el volumen de las celdas Denver es de 1.4 m^3.

	PbS (% en peso)	SiO_2 (% en peso)
Alimentación rougher	10	90
Concentrado rougher	80	20
Cola rougher	2	98
Concentrado scavenger	11	89
Relave	0.5	99.5


500 t/día
Etapa Rougher
Cola
Etapa Scavenger
Relave
Concentrado Rougher
Concentrado Scavenger



Balance total:

$$F = L + G$$

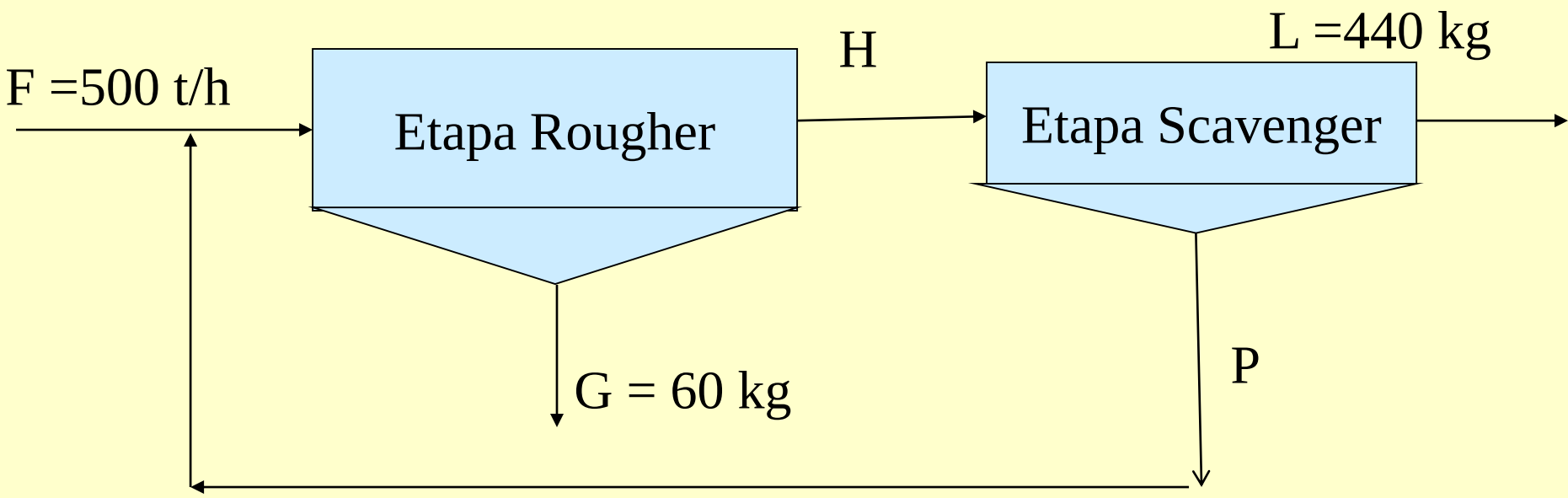
$$500 = L + G$$

Balance de PbS:

$$0.1(500) = 0.8G + 0.005L$$

$$L = 440kg$$

$$G = 60kg$$



Balance Scavenger total: $H = L + P$

$$H = 440 + P$$

Balance de PbS: $0.02H = 0.11P + 0.005L$

$P = 73kg$ $H = 513kg$

PARA CELDAS ROUGHER:

$$F + P = 500 + 73 = 573kg.sólidos$$

$$\frac{\text{líquido}}{\text{sólido}} = 2 = \frac{\text{líquido}}{573kg}$$

$$Líquido.rougher = 1146kg$$

$$\rho_{promedio,rougher} = \frac{573}{\frac{58}{7.5} + \frac{515}{2.65}} = 2.84$$

$$Caudal.pulpa.Q = \frac{573}{2.84x24x60} + \frac{1146}{1x24x60} = 0.94m^3/\min\ uto$$

$$Número.celdas = \frac{(tiempo.flotación.planta)(Q)}{(volumen.efectivo.celda)}$$

$$Número.celdas.rougher = \frac{(8\min\ utos)(0.94m^3/\min)}{(1.4m^3)} = 5$$

FLOTACIÓN CONTINUA

- Si consideramos una operación de una simple celda bajo condiciones de estado estacionario entonces dC/dt = 0.
- De una alimentación continua y constante la celda produce un concentrado y un relave cuyas características no cambian con el tiempo.



FLOTACIÓN CONTINUA

En términos de la recuperación fraccional en una celda simple, asumiendo que todo el mineral es flotable esto es que $R_\infty = 1$, luego:

$$k = \frac{velocidad.flotación}{masa.material.flotable.queda.en.la.celda} = \frac{M_{S(C)}/t}{M_{S(T)}}$$

$$k\lambda = \frac{M_{S(C)}}{M_{S(T)}}$$

λ: Es el tiempo de residencia nominal de la pulpa en la celda.

$M_{S(C)}$: es la masa de sólidos en el concentrado.

$M_{S(T)}$: masa de sólidos en la cola

$$1+k\lambda = 1+\frac{M_{S(C)}}{M_{S(T)}} = \frac{M_{S(T)}+M_{S(C)}}{M_{S(T)}} = \frac{M_{S(F)}}{M_{S(T)}}$$

Donde $M_{S(F)}$ es la masa de sólidos en la alimentación.

Luego la recuperación fraccional en la celda R´ :

$$R' = \frac{M_{S(C)}}{M_{S(F)}} = \frac{M_{S(C)}}{M_{S(T)}}\frac{M_{S(T)}}{M_{S(F)}} = \frac{k\lambda}{1+k\lambda}$$

Para varias celdas en serie, donde el volumen de concentrado recuperado de cada celda es pequeño comparado con el flujo total, luego la recuperación en la primera celda, a partir de la alimentación a la primera celda:

$$R_1' = R_1 = \frac{M_{S(C)}}{M_{S(F)}} = \frac{k\lambda}{1+k\lambda}$$

La recuperación fraccional en la segunda celda a partir de la alimentación a aquella celda está dada por:

$$R_2' = \frac{M_{S(C)2}}{M_{S(T)1}} = \frac{k\lambda}{1+k\lambda}$$

La recuperación a partir de la celda 2 en términos de la alimentación original a la celda 1 se tendrá:

$$R_2 = \frac{M_{S(C)2}}{M_{S(F)}} = \frac{M_{S(C)2}}{M_{S(T)1}} \frac{M_{S(T)1}}{M_{S(F)}} = \frac{k\lambda}{1+k\lambda}(1-R_1) = R_1(1-R_1)$$

La recuperación total en las N celdas será:

$$R = R_1 + R_1(1-R_1) + R_1(1-R_1)^2 + ... + R_1(1-R_1)^{N-1} = 1-(1-R_1)^N$$

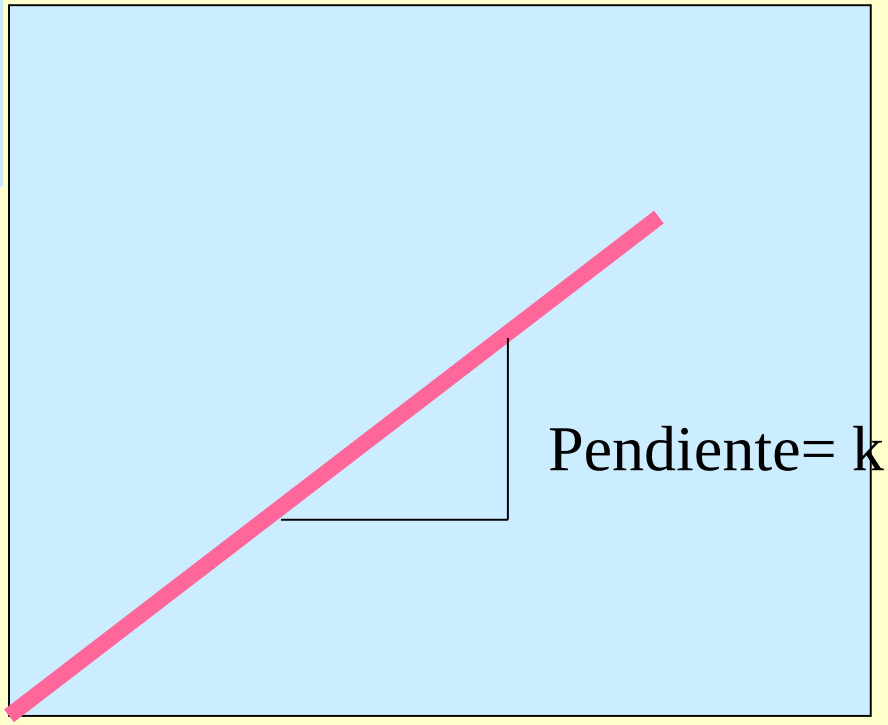
El grado de recuperación R para N celdas para una cinética de primer orden es:

$$R = 1 - (1+k\lambda)^{-N}$$

SIMPLE CELDA

$$\frac{R}{1-R}$$

$$k\lambda = \frac{R}{1-R}$$



EJEMPLO DE APLICACIÓN

Considerar el tratamiento de una mena simple que contiene 5 t/h de pirita y 95 t/h de cuarzo, y la mena es alimentada a un banco de 6 celdas que tiene un tiempo de retención en cada celda de 2 minutos. Si muestreamos la alimentación, el concentrado y los residuos de cualquier celda podemos calcular la recuperación de los 2 minerales en la celda. Si las recuperaciones calculadas son $R_{pirita} = 37.5\%$ y $R_{cuarzo} = 3.8\%$

Sustituyendo la recuperación para la pirita:

$$R_1 = \frac{M_{S(C)}}{M_{S(F)}} = \frac{37.5}{100} = \frac{k\lambda}{1+k\lambda}$$

$$k_{pirita}\lambda = \frac{0.375}{(1-0.375)}$$

$$k_{pirita} = \frac{0.375}{\lambda(1-0.375)} = \frac{0.375}{2(1-0.375)} = 0.30\,\text{min}^{-1}$$

Algo similar se hace con el cuarzo:

$$R_1 = \frac{M_{S(C)}}{M_{S(F)}} = \frac{3.8}{100} = \frac{k\lambda}{1+k\lambda}$$

$$k_{cuarzo} = 0.02\,\text{min}^{-1}$$

$$R = 1 - (1 + k\lambda)^{-N}$$

$$R_{pirita} = 1 - (1 + 0.30x2)^{-6} = 0.9404$$

$$R_{cuarzo} = 1 - (1 + 0.02x2)^{-6} = 0.2097$$

$$Q_{pirita} = Q_{alimentación.pirita} R_{pirita} = 5x0.9404 = 4.7t/h$$

$$Q_{cuarzao} = Q_{alimentación.cuarzo} R_{cuarzo} = 95x0.21 = 19.92t/h$$

$$Grado.concentrado = \frac{M_{pirita}}{M_{alimentación}} x100 = \frac{4.70}{24.62} x100 = 19.1\%$$