

Diagrama de flujo de un sistema de molienda y clasificación:

- Molino 13' x 20'8"**: Recibe alimentación (Alimento) y tiene una descarga (D) que se dirige a un ciclón de clasificación.
- Ciclón D20**: Recibe la descarga (D) del molino de 13' x 20'8" y tiene una descarga (U) que se dirige a un molino de bolas más pequeño.
- Molino 12' x 13'**: Recibe la descarga (U) del ciclón y tiene una descarga (O) que se dirige a un alimentador.
- Alimentador**: Recibe la descarga (O) del molino de 12' x 13' y la alimenta al molino de 13' x 20'8".

Diagrama de flujo de nodos (Nodo 1 y Nodo 2):

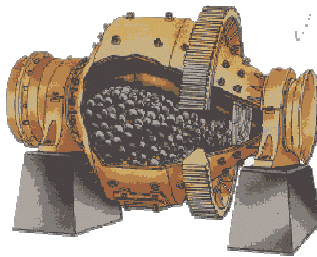
- Nodo 1**: Recibe la alimentación (Alimento) y tiene una descarga (D) que se dirige al molino de 13' x 20'8".
- Nodo 2**: Recibe la descarga (U) del ciclón y tiene una descarga (O) que se dirige al alimentador.

Relaciones de flujo:

- $A = 1$
- $D = \alpha + 1$
- $R = \alpha$
- $U = D$
- $O = 1$

Donde:

- A = Descarga de molino 13' x 20'8" = 1
- D = Descarga de molino 12' x 13' = $\alpha + 1$
- R = Alimentación Compuesta = α
- O = Overflow del Ciclón D20 = 1
- U = Underflow del Ciclón D20 = α



ANTONIO CÉSAR BRAVO GÁLVEZ
Ingeniero Metalurgista CIP: 66587
acbravog@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

A fin de superar la crisis en que se encuentra la mayoría del Sector Minero en el Perú, debido a la disminución gradual de la ley de cabeza de los principales valores metálicos (Obstáculos impuestos por la naturaleza misma de las reservas de minerales remanentes), al bajo precio de los concentrados (Bajas cotizaciones de los metales en el mercado mundial, deprimidas condiciones de mercado), y a los costos de producción altos. Esto nos conlleva a nosotros los profesionales a realizar trabajos técnicos y/o de investigación sobre todo para ***bajar los costos de producción***, mejorando los niveles de eficiencia en las diferentes secciones de una Planta Concentradora

La correcta ***medición de la eficiencia*** es un paso necesario para obtener la mejor forma de producir, lo que en buena cuenta significa la máxima producción posible para un gasto dado o el mínimo gasto (esfuerzo) para producir una cantidad dada del producto que se desea, dicha medición se logra al realizar la ***evaluación técnica integral*** de las áreas que comprende la planta concentradora, en esta oportunidad se trata de proporcionar pautas necesarias para realizar la evaluación técnica del circuito molienda – clasificación por ser esta una de las mas importantes, en la cual los costos son altos

Para realizar la evaluación es necesario recurrir a ***modelos matemáticos*** conocidos, que consiste en un sistema de ecuaciones algebraicas o diferenciales que representan cuantitativamente el proceso o algunos aspectos del proceso. Un modelo matemático incluye ***variables*** que son aquellas que asumen más de un valor durante el rango de validez del modelo; y ***parámetros*** son aquellos que no cambian o no pueden cambiar su valor durante el rango de validez del modelo matemático o físico de un proceso determinado

Es decir, al realizar la evaluación se determina las variables de mayor y menor influencia en el proceso dado, entonces conociendo esto se puede determinar los parámetros óptimos, para ello es necesario optimizar dicho proceso, lo que en buena forma ***optimizar*** significa determinar el conjunto de valores de las variables independientes, considerando las restricciones propias del proceso en estudio, tales que estas den un rendimiento óptimo, es decir, maximicen o minimicen la función respuesta (variables dependientes). Rendimientos expresados en máximo tonelaje tratado (TMH/hr), menor costo de energía, mayor grado de liberación, mayor eficiencia de los equipos, mínimo costo de capital, entre otros.

RESUMEN

El presente trabajo radica en proporcionar pautas necesarias para realizar una evaluación técnica integral de un circuito en operación de molienda – clasificación de una planta concentradora, tomando como ejemplo la planta concentradora de la Empresa Minera Yauliyacu S.A. Realizando la evaluación determinamos las variables de mayor y menor influencia, de esta manera se establece los parámetros óptimos en dicha sección, con el objetivo de incrementar el porcentaje de malla –200 en el producto de la molienda, y de esta manera mejorar la recuperación de los valores metálicos, pero siempre manteniendo el tonelaje de tratamiento, el cual determina la capacidad de la planta

Primeramente se indica los pasos necesarios para la obtención de datos, indicando que datos deben ser tomados y de que manera, sobre todo para evitar errores y obtener resultados que no reflejan la realidad simplemente por errores de muestreo, no obstante que el análisis granulométrico y los cálculos realizados pueden ser buenos

La evaluación en los molinos consiste en determinar el F80 y P80 de las muestras obtenidas de la alimentación y producto de los molinos, para determinar el índice de trabajo y consumo de energía. Los resultados del análisis granulométrico se necesario ajustar a una función conocida como en este caso a Gates Gaudin Schumann

La evaluación en los ciclones consiste en determinar los valores de carga circulante, flujos de entrada y salida del ciclón, D50, eficiencia de finos, gruesos y total de la clasificación. La carga circulante determinada por densidades (por balance de líquido) debe ser muy aproximada a la hallada por mallas (por balance de sólidos). Para calcular el D50, se debe determinar el %Eo y %Eu; % de partición del overflow y underflow. Conociendo el D50, se determina las eficiencias de finos, gruesos y total

El balance de materiales consiste en mostrar en una tabla los datos obtenidos como: Densidad de pulpa, % sólidos, gravedad específica y con estos datos determinar; los tonelajes de sólidos TMS/h y agua TH₂O/h en los diferentes puntos conociendo la carga circulante, y se sabe que $C_c = U/O$ en peso y que el peso de rebose es igual al alimento fresco se determina los tonelajes, el agua que se agrega en la entrada, descarga de los molinos, y en el cajón de la bomba se determina por diferencia de TH₂O/h en la salida y entrada de dicho punto, siempre se debe tener un equilibrio entrada = salida

OBJETIVOS

- ⇒ Dar pautas necesarias para realizar la evaluación técnica del circuito de molienda – clasificación, teniendo en cuenta un orden flexible
- ⇒ Mostrar que modelos matemáticos deben utilizarse para la obtención de los resultados, modelos muy fácil de emplear y de entender
- ⇒ Hacer ver la importancia que tiene el análisis granulométrico, que función de distribución utilizar, maneras de determinar el F80, P80, carga circulante, D50, eficiencia de clasificación y balance de materiales en el circuito

EVALUACIÓN DE CIRCUITOS INDUSTRIALES DE MOLIENDA-CLASIFICACIÓN

Para realizar la evaluación de un circuito de molienda y clasificación, se procede de la siguiente manera: (el orden no es riguroso)

1. Determinar el circuito a evaluar, luego graficar el Flowsheet; indicar todos los equipos que conforman dicho circuito, como molinos, ciclones, bombas y equipos auxiliares, en dicho grafico indicar el sentido de los flujos y puntos de adición de agua
2. Determinar y fijar previamente los puntos de muestreo; alimentos y descargas de los molinos, entradas y salidas de los ciclones (feed, overflow y underflow). Si ocurre un cambio de dilución en un producto, se debe muestrear antes y después del ingreso de agua a fin de establecer la variación del porcentaje de sólidos de la pulpa
3. Fijados los puntos de muestreo realizar cortes cuidadosos en cada punto considerando que luego del muestreo se debe realizar el análisis granulométrico, y la determinación de las gravedades específicas de la muestra, puede ser por el método de la fiola
4. Para realizar el análisis granulométrico, la muestra debe ser homogenizada y cuarteada, dicho análisis granulométrico, debe realizarse por lo menos con 8 mallas de una serie conocida, lo importante es conocer la abertura de la malla en micrones
5. En cada corte del muestreo medir las densidades en los diferentes puntos para determinar el % de sólidos para el balance de flujos. También el % de sólidos puede ser determinada pesando la cantidad de pulpa que fue extraída, filtrando y secando, pesando el sólido seco se determina dicho valor, dividiendo el peso seco con el peso de la pulpa inicial, con dicho dato determinar la densidad y comparar
6. Durante la realización del muestreo tomar los amperajes de los molinos y bombas en operación, también es necesario conocer las características del motor eléctrico tales como: voltaje, cos ϕ , HP y Amperaje nominal
7. Es necesario obtener las características de los molinos; diámetro, longitud y RPM normal. Medir la altura de bolas o barras para determinar el % de bolas o barras ocupada en el interior del molino. De misma manera obtener información de los ciclones tales como: diámetro del ciclón, ápex y vóltex, presión de entrada PSI
8. Una vez obtenidos estos datos proceder a realizar los cálculos respectivos utilizando los modelos matemáticos que muestran posteriormente

A. EVALUACIÓN EN LOS MOLINOS

Las muestras obtenidas de la alimentación y producto de los molinos, filtrar y secar, mediante cuarteos sucesivos obtener muestras de 500 a 800 gramos. Cuando en la muestra contiene partículas mayores de $\frac{1}{2}$ " tomar muestras de 5 a 8 kilos dependiendo del tamaño máximo, esto sobre todo ocurre en la alimentación fresca al circuito. También dicha muestra hacer secar para determinar el % de humedad; con dichas muestras realizar el análisis granulométrico con las mallas disponibles

Obtenidos los pesos de las muestras en las diferentes mallas, elaborar una tabla que contenga como dato: malla, abertura en micrones, % peso y % peso acumulado pasante Ac(-). Con esta data se calcula el F80 y P80; graficando en papel semilogaritmico, los valores de las aberturas y el Ac(-), si se desea determinar en forma analítica se debe recurrir a la interpolación o extrapolación según sea el caso

Otro método es ajustando dichas datos a una función conocida como son de Gates Gaudin Schumann y Rosin Rammler, que a continuación se muestra

GATES GAUDIN SCHUMANN (G-G-S)

$$Y = 100 * \left(\frac{x}{K} \right)^m$$

Donde : Y = % Ac(-), % de acumulado pasante
 x = Tamaño de las partículas en cada fracción
 k = Tamaño máximo de partícula en la distribución μ
 m = Pendiente de la recta

Tomando Log e igualando a una recta

$$\underbrace{\log Y}_{Y} = \underbrace{\log \frac{100}{k^m}}_b + \underbrace{m \log X}_{m X}$$

Tamaño medio $M = \frac{m}{m+1} * k$

$$m = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} = \text{Pendiente}$$

Varianza $\sigma = \frac{m k^2}{(m+2) * (k+1)^2}$

$$b = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} = \log \frac{100}{k^m}$$

$$x = D_{80} = m \sqrt[m]{\frac{Y}{100}} * k$$

$$k = \sqrt[m]{\frac{100}{\text{antilog } b}} = \sqrt[m]{\frac{10^{10}}{10^b}} = \sqrt[m]{\frac{2-b}{10}}$$

$$r = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(N \sum x^2 - (\sum x)^2) * (N \sum y^2 - (\sum y)^2)}} = \text{Factor de correlación}$$

N = Numero de datos (Mallas)

ROSIN RAMMLER (R-R)

$$Y = 100 * (1 - e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^m})$$

Donde : Y = % Ac(-), % de acumulado pasante
 x = Tamaño de las partículas en cada fracción
 k = Tamaño medio de x, en μ
 m = Constante para cada tipo de mineral
 Gx = % acumulado retenido, Ac(+)

$$Gx = 100 * e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^m}$$

$$\ln \frac{Gx}{100} = -\left(\frac{x}{k}\right)^m * \ln e$$

$$\underbrace{\log \ln (100 / Gx)}_Y = \underbrace{m \log X}_m X - \underbrace{\log k^m}_b$$

$$- \ln \frac{Gx}{100} = \left(\frac{x}{k}\right)^m$$

$$b = - \log k^m$$

$$k = \sqrt[m]{\text{antilog } (-b)}$$

$$\ln \frac{100}{Gx} = \left(\frac{x}{k}\right)^m \quad \text{Tomando log}$$

$$X = \sqrt[m]{\frac{\ln \frac{100}{Gx}}{Gx}} * k$$

$$\log \ln \frac{100}{Gx} = m \log \left(\frac{x}{k}\right)$$

$$D_{80} = \sqrt[m]{\frac{\ln \frac{100}{20}}{20}} * k$$

Los valores de m, b, r, σ y tamaño medio se determina con los modelos matemáticos anteriores

Los valores de m y b son determinados utilizando la regresión lineal simple, para ello se recurre a la función conocida índice(estimación.lineal) de la hoja de calculo Excel

Al utilizar las funciones de distribución, la correlación debe ser mayor de 0.9 en caso contrario descartar dicha función, a continuación se muestra los resultados de las funciones del alimento y producto del molino 12'x 13'

COMPARACIONES

	Interp.	G.G.S	R.R.	Molino 12'x 13'
F 80 =	1 109	1 232	3 170	
P 80 =	569	803	554	
R r =	1.95	1.54	5.73	
Alimento:				
G.G.S			R.R.	
$\%Ac(-) = 100 \left(\frac{x}{1\ 792} \right)^{0.5953}$				
r = 0.9902		$Y = 100 * (1 - e)^{-\left(\frac{x}{827}\right)^{0.3543}}$		
		r = 0.5980		
Producto:				
G.G.S			R.R.	
$\%Ac(-) = 100 \left(\frac{x}{1\ 301} \right)^{0.4621}$				
r = 0.9736		$Y = 100 * (1 - e)^{-\left(\frac{x}{317}\right)^{0.8556}}$		
		r = 0.9985		

Se distingue que la función de G.G.S se ajusta mejor, y los valores de F80 y P80 son muy cercanos a los determinados en forma gráfica. Entonces los valores de la función R.R son descartados. Los demás valores exhibidos en el Anexos No 01 y 02 son determinados utilizando los siguientes modelos matemáticos

1. Velocidad Critica, rpm	$V_c = 76,63 / \sqrt{D}$
2. % de velocidad critica, %	$\%V_c = \{RPM (Normal) / V_c\} * 100$
3. Velocidad Periférica, pies/min	$V_p = V_c \cdot \pi \cdot D$
4. Consumo de energía, Kw. - h / TMS	$W = (\sqrt{3} * I * V * \cos \phi) / (1000 * TMS)$
5. Índice de trabajo, Kw. - hr. / TMS	$W_i = W / (10 / \sqrt{P_{80}}) - (10 / \sqrt{F_{80}})$
6. Tonelaje máximo a tratar, TMS	$Ton. Max. = (0,746 * HP instalado) / W$
7. Eficiencia del motor	$Ef. Motor = (TMS Prac. / TMS Máx) * 100$

Donde:	RPM(Normal) :	Velocidad de operación
	D :	Ø Interior del molino, Pies
	Pi :	Constante 3.141592654

B. EVALUACIÓN EN LOS CICLONES

Consiste en determinar los valores de carga circulante, flujos de entrada y salida del ciclón, D50, eficiencia de finos, gruesos y total de la clasificación

Con las densidades de pulpa del alimento, finos y gruesos del clasificador, se determina la carga circulante por densidades. Esta carga circulante por balance de liquido debe ser muy aproximada a la hallada por mallas, que es un balance de sólidos. Esta diferencia mínima debe ser ajustada por pequeños ajustes y variaciones en la densidad del alimento al ciclón (siempre este flujo es diluido en la bomba) hasta que ambas cargas circulantes coincidan y se aplique en el balance de flujos del circuito

Jr@ mínimo es un ajuste estadístico de datos para que en todas las mallas se obtenga la misma carga circulante. Se debe dar prioridad a un buen muestreo y análisis granulométrico; no al ajuste de datos que cubre errores de muestreo y procedimiento. Si por ejemplo la carga circulante por mallas es 160% y el Jr mínimo indica una diferencia de +/- 10 a 20% el trabajo será aceptado, caso contrario debe ser rechazado y comenzar un nuevo muestreo, los resultados de los cálculos se muestra en el anexo No 05

Para calcular el valor de D50 simple (Utilizar valores sin corregir), determinar el %Eo y %Eu; % de partición del overflow y underflow. Para ello se puede emplear varios métodos que emplean % en peso, % acumulado, o relacionando carga circulante & D50, lo importante es que deben arrojar valores muy cercanos, en caso contrario eliminar el mas disperso. Estos valores se muestran en el anexo No 03. El D50 calculado es determinado utilizando la función de Rosin Rammler, ver anexo No 04

Conociendo el D50, se determina las eficiencias de finos, gruesos y total, graficando las curvas respectivas y cortando el valor del D50 se obtiene los valores de Ya, Yf y Yg, tal como se muestra a continuación (Utilizar el valor de D50 simple)

Ya : 50.00 %	Yf : 72.97 %	Yg : 35.72 %
EFICIENCIA DE FINOS (Ef) : $Ef = Yf * (Ya - Yg) / Ya * (Yf - Yg)$		Ef = 0.5596
EFICIENCIA DE GRUESOS (Eg) : $Eg = (100 - Yg) * (Ya - Yf) / (100 - Ya) * (Yg - Yf)$		Eg = 0.7927
<p>DONDE Ya % Acumulado pasante del alimento (feed) al ciclón, para una abertura igual al D50 Yf % Acumulado pasante del overflow (finos) del ciclón, para una abertura igual al D50 Yg % Acumulado pasante del underflow (gruesos) del ciclón, para una abertura igual al D50</p>		
EFICIENCIA TOTAL DE CLASIFICACIÓN (Et) = Ef * Eg * 100		Et = 44.36 %

C. BALANCE DE MATERIALES EN EL CIRCUITO

El balance de materiales consiste en rellenar la siguiente tabla

D.p	G.e	%Sol	TH ₂ O/h
m-200	TMS/h	M ³ /h	G.P.M

La gravedad específica (G.e) es determinada en laboratorio por el método de la fiola, como se muestra es diferente en los distintos puntos, sobretodo en el ciclón

Para las toneladas por hora (TMS/h) de sólido, si se conoce la carga circulante, y se sabe que la carga circulante es igual Underflow/Overflow en peso y que el equilibrio del peso de rebose es igual al alimento fresco (determinado en la balanza de la faja), teniendo estas igualdades se completa este dato en todos los puntos del circuito

Porcentaje de sólidos y densidad de pulpa son datos, con estos y el peso de sólidos se calcula M³/h y TH₂O/h, el agua que se agrega en la entrada, descarga de los molinos, y en el cajón de la bomba se determina por diferencia de TH₂O/h en la salida y entrada de dicho punto. La densidad de alimentación al ciclón fue ajustada teniendo en cuenta la carga circulante promedio por balance líquido y sólido, los resultados se muestra en la primera tabla del Anexo No 03, y en el gráfico del Anexo No 06

Al final se dispone de un circuito balanceado de flujos muy útil para determinar la capacidad de bombeo de pulpas y datos tan importantes como el que al dividir el peso de agua en las arenas entre el peso de agua en el alimento al ciclón se determina el Bypass o cortocircuito que viene a ser la fracción de partículas del alimento que por su tamaño deberían pasar al rebose pero fueron arrastradas hacia las arenas por acción del agua. Para la realización del balance se utilizan los siguientes modelos matemáticos

$$\begin{aligned} \Rightarrow \% S (\text{Mol. Primario}) &= 100 - \% \text{H}_2\text{O faja } 06 & \textbf{Donde:} \\ \% S &= \% \text{ de sólidos} \\ \Rightarrow \% S &= \frac{G_e * (D_p - 1)}{D_p (G_e - 1)} * 100 & D_p = \text{Densidad de pulpa, Kg/lt} \\ & & G_e = \text{Gravedad específica} \\ \Rightarrow \text{TM H}_2\text{O} / \text{h} &= \text{TMS/h} * (100 - \%S) / \% S & \text{TM H}_2\text{O} / \text{h} = \text{Toneladas de agua por hora} \\ \Rightarrow Q (\text{m}^3/\text{h}) &= (\text{TMS/h} + \text{TMH}_2\text{O} / \text{h}) / D_p & \text{TMS/h} = \text{Toneladas secas del mineral por hora} \\ \Rightarrow Q (\text{m}^3/\text{h}) &= (\text{TMS/h} / G_e) + \text{TMH}_2\text{O/h} & (100 - \%S) = \% \text{ de agua en el punto dado} \\ \Rightarrow Q (\text{GPM}) &= 4.4033 * Q (\text{m}^3/\text{h}) & Q = \text{Caudal de la pulpa m}^3/\text{h} \\ & & \text{TMS/h} + \text{TMH}_2\text{O} / \text{h} = \text{Peso de la pulpa} \\ & & (\text{TMS/h} / G_e) = \text{Volumen de sólido, m}^3/\text{h} \\ & & \text{TMH}_2\text{O/h} = \text{Volumen del agua, m}^3/\text{h} \\ \Rightarrow \frac{\text{TMH}_2\text{O} / \text{h}}{\text{TMS} / \text{h}} &= \frac{(100 - \% S)}{\% S} = D (\text{Dilución de pulpa}) & \Rightarrow \text{Dilución} = \text{Líquido} / \text{Sólido} \\ & & \\ \textbf{Carga Circulante Cc:} & & \text{Despejando se tiene} \\ \Rightarrow C_c \text{ Mallas} &= (f - o) / (u - f) & \Rightarrow D_f = (D_o + C_c * D_u) / (C_c + 1) \\ \Rightarrow C_c \text{ Dilución} &= (D_o - D_f) / (D_f - D_u) & \Rightarrow \text{TMH}_2\text{O} / \text{h} = D_f * \text{TMS} / \text{h} \\ \Rightarrow Q (\text{m}^3/\text{h}) &= (\text{TMS/h} / G_e) + \text{TMH}_2\text{O/h} & D_f, D_o, D_u = \text{Dilución en el alimento,} \\ & & \text{Overflow y underflow} \\ \textbf{Dp, se calcula con:} & & \\ \Rightarrow D_p &= (\text{TMS/h} + \text{TMH}_2\text{O}) / Q (\text{m}^3/\text{h}) & \Rightarrow \% S = 100 * \text{Peso mineral} / (\text{Peso mineral} + \text{Peso H}_2\text{O}) \\ \Rightarrow D_p &= \frac{100 * G_e}{100 G_e - \%S (G_e - 1)} & \Rightarrow D_p = \frac{\text{Peso pulpa}}{\text{Volumen Pulpa}} = \frac{\text{TMS} + \text{TMH}_2\text{O}}{\text{TMS}/G_e + \text{TMH}_2\text{O}} \end{aligned}$$

Los datos disponibles deben ser utilizados para mejorar la eficiencia del proceso en:

- ✓ Aumentar la capacidad de la planta para una granulometría dada
- ✓ Reducir el tamaño de partículas para una capacidad determinada
- ✓ Reducir el consumo de energía de los molinos

El objetivo en las plantas de procesamiento de minerales es conseguir los niveles óptimos operacionales, principalmente en los circuitos de molienda y clasificación. Para hallar estos niveles óptimos existen dos alternativas, la **primera** es realizar una campaña experimental en la misma planta, eventualmente este método producirá una mejor performance, sin embargo durante la campaña (que dura un periodo corto o largo de tiempo), la producción de la planta sufrirá pérdidas cuando la combinación de las condiciones sean malas. La **segunda** alternativa está basada en la simulación con modelos matemáticos que reflejan en gran medida los efectos de las condiciones operacionales

CONCLUSIONES

La evaluación técnica nos permite obtener datos de un circuito en operación, realizando calculas numéricos con esta data determinamos los niveles de eficiencia de las principales variables que afectan al proceso, de los equipos que se encuentran involucrados, nos hace ver en que condiciones están operando. Al analizar los resultados obtenidos determinamos si estos son los adecuados. Si no son los adecuados seleccionamos las variables de mayor influencia para su posterior optimización utilizando una técnica adecuada

- ⇒ En un circuito de molienda – clasificación, generalmente estandarizar las variables de operación significa tener las densidades de pulpa estables. Para ello la alimentación del mineral debe ser constante(con características físicas y químicas similares), la dosis de agua adecuada según el requerimiento normal, el equipo en buen estado y el renuevo de bolas en cantidad y calidad adecuada. Pero las características del mineral alimentado al circuito no simple son constantes, esto hace que los demás parámetros varíen
- ⇒ La eficiencia de la molienda – clasificación depende en gran medida de: La distribución de tamaño en la alimentación, Volumen de carga moledora y su distribución en tamaño, Cambios en las características del mineral, Distribución de tamaño de los productos del molino y Eficiencia de la clasificación
- ⇒ La clasificación es una operación primordial, principalmente cuando el producto tiene especificaciones estrictas de tamaño. El objetivo de la operación de clasificación en el circuito cerrado es hacer más eficiente el proceso de molienda y asegurar que el producto de la operación este bajo un determinado tamaño recirculando hacia el molino las partículas de mayor tamaño

BIBLIOGRAFÍA

1. **ATRES HIDALGO FERNANDO y SOTO FLORES JOE.** Curso Taller Técnicas Matemáticas Aplicadas al Balance de Materia. Arequipa 1998.
2. **LYNCH A. J.** Circuitos de Trituración y Molienda de Minerales. Universidad Queensland, Brisbane Quid. Australia. Editorial Rocas y Minerales 1980 Arturo Soria 166 Madrid – 33.
3. **G. KELLY ERROL. J. SPOTTISWOOD DAVID.** Introducción al Procesamiento de Minerales. Editorial Noruega Limusa. 1992.
4. **SEPULVEDA E. JAIME, GUTIERREZ R. LEONEL.** Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras mediante Técnicas de Modelación Matemática. Centro de Investigación Minera Metalúrgica. Chile 1992.
5. **MANZANEDA CABALA JOSE.** Procesamiento de Minerales. Nueva Edición Ediciones UNI. Lima – Perú 2001.

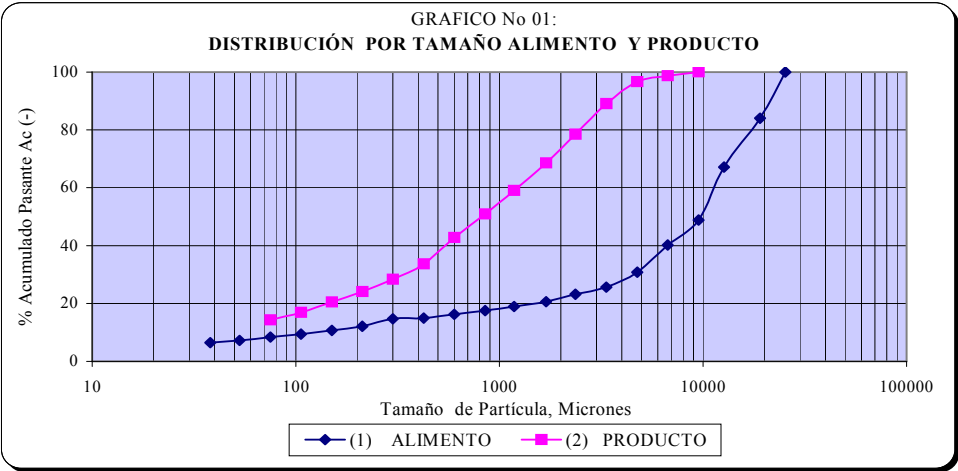
ANEXO No 01

MOLINO DE BARRAS NORBERG 13' x 20' 8"

Diámetro, pies	13.0	Velocidad critica	21.25
Longitud, pies	20.8	Velocidad periférica, pies/min	868.00
RPM Normal	13.0	% Velocidad Critica	61.36
Lift Angle, (°)	25.0	Radio de reducción	13.96
% de humedad	3.5	Consumo de Energia, Kw-h/TMS	4.10
Alimento, TMS/hr	167.0	Índice de trabajo, Kw-h/TMS	19.80
HP, Motor	1500.0	Tonelaje máximo tratar	272.70
Voltaje del motor, voltios	4150.0	Eficiencia del motor eléctrico	59.10
Factor de potencia, Cos Ø	0.8	% Nivel de barras	30.00
Amperaje, Motor nominal	140.00	Amperaje, práctico	115.00

TABLA N° 01

Mesh	Micrones μ	Mid-Size	(1) ALIMENTO			(2) PRODUCTO		
			% Peso	% Ac(-)	% Ac(-) g			
1.05	25400	21997	0.00	100.00	100.00			
0.742	19050	15554	16.01	83.99	60.51			
0.525	12700	10984	16.79	67.20	52.12			
0.371	9500	7978	18.33	48.87	46.83			
3	6700	5641	8.61	40.26	41.18			
4	4750	3989	9.49	30.77	36.28	0.00	100.00	100.00
6	3350	2812	5.16	25.61	31.90	1.26	98.74	119.49
8	2360	2003	2.35	23.26	28.04	2.04	96.70	101.74
10	1700	1416	2.63	20.63	24.85	7.66	89.04	87.51
14	1180	1001	1.71	18.92	21.72	10.60	78.44	74.01
20	850	714	1.33	17.59	19.25	9.84	68.60	63.66
28	600	505	1.36	16.23	16.93	9.52	59.08	54.25
35	425	357	1.33	14.90	14.92	8.14	50.94	46.31
48	300	252	0.16	14.74	13.12	8.22	42.72	39.46
65	212	178	2.66	12.08	11.54	9.08	33.64	33.65
100	150	126	1.39	10.69	10.16	5.24	28.40	28.71
150	106	89	1.24	9.45	8.94	4.32	24.08	24.48
200	75	63	1.08	8.37	7.87	3.58	20.50	20.88
270	53	45	1.12	7.25	6.93	3.64	16.86	17.81
400	38	32	0.78	6.47	6.13	2.58	14.28	15.28
-400	27		6.47			14.28		
TMS/hr	161.16		F80	17 437	40 659	P80	1 249	1 398



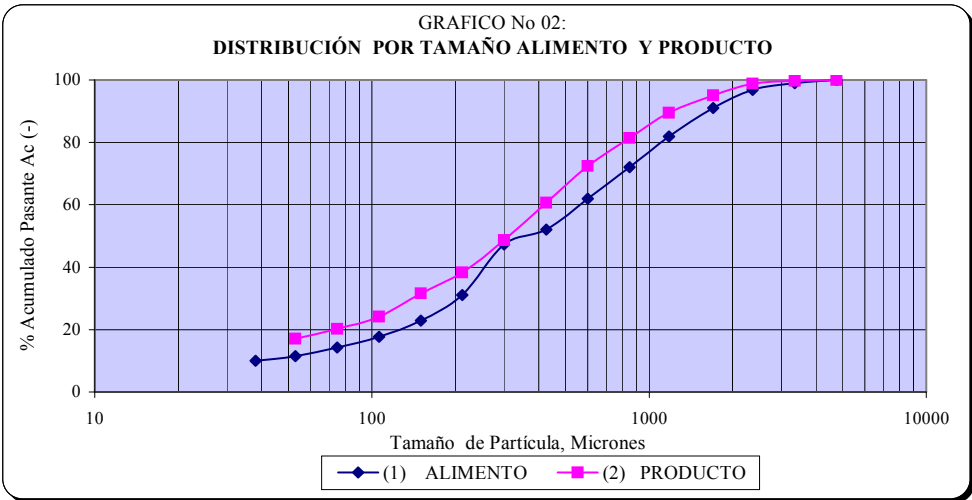
ANEXO No 02

MOLINO DE BOLAS NORBERG 12' x 13'

Diámetro, pies	12.0	Velocidad critica	22.12
Longitud, pies	13.0	Velocidad periférica, pies/min	833.95
RPM Normal	16.1	% Velocidad Critica	72.78
Lift Angle, (°)	25.0	Radio de reducción	1.95
		Consumo de Energía, Kw-h/TMS	2.82
Alimento, TMH/hr	247.7	Índice de trabajo, Kw-h/TMS	23.75
HP, Motor	1500.0	Tonelaje máximo tratar	396.61
Voltaje del motor, voltios	4160.0	Eficiencia del motor eléctrico	62.46
Factor de potencia, Cos Ø	1.0	% Nivel de barras	30.00
Amperaje, Motor nominal	140.00	Amperaje, práctico	100.00

TABLA N° 02

Mesh	Micrones μ	Mid-Size	(1) ALIMENTO			(2) PRODUCTO		
			% Peso	% Ac(-)	% Ac(-) g	% Peso	% Ac(-)	% Ac(-)g
4	4750	3989	0.00	100.00	100.00			
6	3350	2812	1.07	98.93	145.11	0.00	100.00	100.00
8	2360	2003	2.07	96.87	117.79	0.24	99.76	131.69
10	1700	1416	5.87	91.00	96.90	0.95	98.81	113.17
14	1180	1001	9.03	81.97	77.97	3.71	95.10	95.60
20	850	714	9.87	72.10	64.14	5.65	89.45	82.15
28	600	505	10.10	62.00	52.13	8.01	81.44	69.93
35	425	357	9.90	52.10	42.45	9.03	72.41	59.63
48	300	252	4.87	47.23	34.50	11.73	60.68	50.77
65	212	178	16.10	31.13	28.06	11.96	48.72	43.24
100	150	126	8.23	22.90	22.84	10.36	38.36	36.85
150	106	89	5.20	17.70	18.57	6.78	31.58	31.39
200	75	63	3.40	14.30	15.12	7.39	24.19	26.75
270	53	45	2.73	11.57	12.29	4.01	20.18	22.78
400	38	29	1.63	9.93	10.08	3.11	17.07	19.54
-400			9.93			17.07		
TMS/hr	247.72		F80	1 109	1 232	P80	569	803



ANEXO No 03

BALANCE y D₅₀ DE LOS CICLONES PRIMARIOS D20

	DESCRIPCIÓN	Densidad pulpa	G.e Sólidos	% Sólidos	TMS/h Sólidos	TH ₂ O/h Agua	Dilución	M ³ /h Pulpa	G.P.M Pulpa
1	Alimento 13'x 20'8"	Kg/lit	2.85	96.50	161.16	5.85	----	62.39	274.72
	H ₂ O Agregada	----	----	----	----	26.26	----	26.26	115.64
2	Descarga 13'x20'8"	2.180	2.85	83.39	161.16	32.11	----	88.65	390.36
	H ₂ O Agregada	----	----	----	----	20.77	----	20.77	91.45
2A	Desc. 13'x20' + H ₂ O	1.956	2.85	75.30	161.16	52.87	----	109.42	481.81
3	Descarga 12' x 13'	2.130	3.50	74.27	247.72	85.81	----	156.59	689.50
4	Alimento ciclón *	2.030	3.12	74.67	408.87	138.68	----	269.73	1187.71
	H ₂ O B. Ash	2.040	----	----	----	25.69	----	25.69	113.13
4A	Alimento ciclón (r)	1.940	3.12	71.33	408.87	164.38	0.402	295.43	1300.85
5	Underflow ciclón	2.320	3.50	79.66	247.72	63.27	0.255	134.05	590.25
	H ₂ O agregada	----	----	----	----	22.54	----	22.54	99.25
6	Overflow ciclón	1.680	2.93	61.45	161.16	101.11	0.627	156.11	687.39

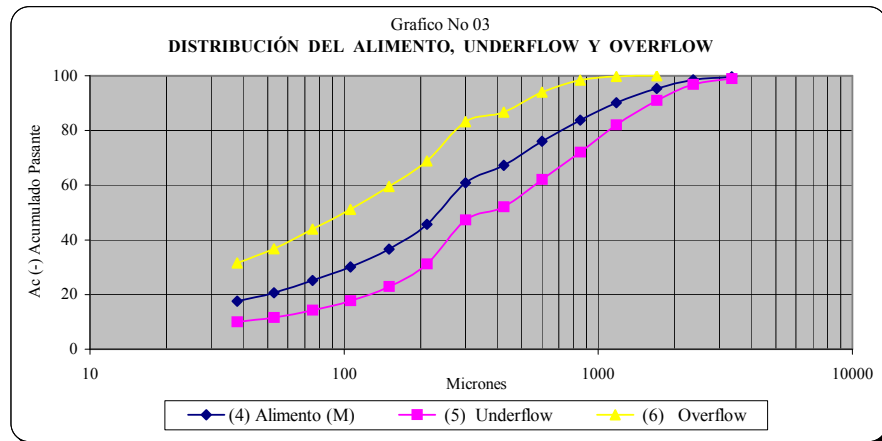
Total de agua agregada = 95.26 m³/h

Cc. Dilución = 1.54

Cc. Mallas = **1.537** Prom.

TABLA N° 03

MALLA TYLER	Abert μ	Abert Prom	(4) Alimento (M)		(5) Underflow		(6) Overflow		C. Circ U/O
			% Peso	% Ac(-)	% Peso	% Ac(-)	% Peso	% Ac(-)	
4	4750	3989	0.00	100.00	0.00	100.00			
6	3350	2812	0.35	99.65	1.07	98.93			
8	2360	2003	1.05	98.60	2.07	96.87			
10	1700	1416	3.22	95.38	5.87	91.00	0.00	100.00	1.055
14	1180	1001	5.26	90.12	9.03	81.97	0.32	99.68	1.173
20	850	714	6.35	83.77	9.87	72.10	1.27	98.41	1.254
28	600	505	7.68	76.09	10.10	62.00	4.40	94.01	1.272
35	425	357	8.78	67.31	9.90	52.10	7.27	86.74	1.277
48	300	252	6.40	60.91	4.87	47.23	3.47	83.27	1.635
65	212	178	15.25	45.66	16.10	31.13	14.40	68.87	1.598
100	150	126	8.99	36.67	8.23	22.90	9.37	59.50	1.658
150	106	89	6.61	30.06	5.20	17.70	8.40	51.10	1.702
200	75	63	4.94	25.12	3.40	14.30	7.17	43.93	1.738
270	53	45	4.52	20.60	2.73	11.57	7.23	36.70	1.782
400	38	32	2.98	17.62	1.63	9.93	5.10	31.60	1.819
-400			17.62		9.93		31.60		
		Total	100.00		100.0		100.00	Prom.	1.537



COMPARACION DE D₅₀

D₅₀ Micrones

Plitt

Método 1	Método 2	R.R	Prom.	D ₅₀ & Cc	
				G.G.S	R.R
106.43	99.37	100.70	102.17	184.0	151.0

99.91 = D₅₀ Experimental (Real)

130.18 = D₅₀ c Corregido

133.83 = D₅₀ cc Calculado

ANEXO No 04

CALCULO DE LA CURVA PARTICIÓN, D₅₀ y EFICIENCIA

TABLA N° 05

No	Malla	Abertura X (um)	Hidrociclón D-20"			Proporción a Descarga Pp.	Eficiencia Real Eo (x)	Eficiencia Real Eu (x)	Eficiencia Corregida Ec	Eficiencia Calculada Ecc
			Alimento f	Underflow u	Overflow o					
1	4	4750								
2	6	3350	0.35	1.07	0.00	0.328	0.00	189.81	194.94	99.10
3	8	2360	1.05	2.07	0.00	0.508	0.00	122.59	123.88	97.82
4	10	1700	3.22	5.87	0.00	0.549	0.00	113.47	114.24	95.71
5	14	1180	5.26	9.03	0.32	0.567	2.63	106.96	107.36	92.06
6	20	850	6.35	9.87	1.27	0.591	8.18	96.77	96.59	87.55
7	28	600	7.68	10.10	4.40	0.575	24.32	81.91	80.87	81.61
8	35	425	8.78	9.90	7.27	0.574	35.26	70.23	68.53	74.82
9	48	300	6.40	4.87	3.47	2.098	-59.52	47.36	44.36	67.40
10	65	212	15.25	16.10	14.40	0.500	47.21	65.75	63.80	59.81
11	100	150	8.99	8.23	9.37	0.334	69.38	57.04	54.59	52.38
12	150	106	6.61	5.20	8.40	0.559	55.99	49.00	46.08	45.30
13	200	75	4.94	3.40	7.17	0.592	59.29	42.87	39.60	38.80
14	270	53	4.52	2.73	7.23	0.603	63.56	37.66	34.10	32.92
15	400	38	2.98	1.63	5.10	0.612	66.48	34.14	30.38	27.93
16	-400	27	17.62	9.93	31.60	0.645	63.62	35.11	31.41	23.39
			100.00	100.00	100.00	0.642				

Constante de corrección de Eficiencia: Constante 0.054 = Const U/O = 1.651
 U/F = 0.623
 O/F = 0.377

Cálculo del By-pass " $\frac{\text{H}_2\text{O en underflow}}{\text{H}_2\text{O en Alimentación.}}$ = $P = \frac{\%Sf (1 - \%Su)}{\%Su (1 - \%Sf)} \times \frac{U}{F}$ 0.4081

%Sf = 71.33
 %Su = 79.66
 %So = 61.45

Interpolando

99.91	= D50	Experimental (Real)	F =	427.26
130.18	= D50 c	Corregido	O =	161.16
133.83	= D50 cc	Calculado	U =	266.10

CALCULO DE LA CURVA PARTICIÓN

MODELO DE PLITT:

$$Ec = 1 - \exp [-0.6931 (x / d50)^m]$$

Linealizando :

$$\log (-\ln((100-Ec)/100)/0.6931) = m \log (x) - m \log (d50)$$

$$Y = m X + b$$

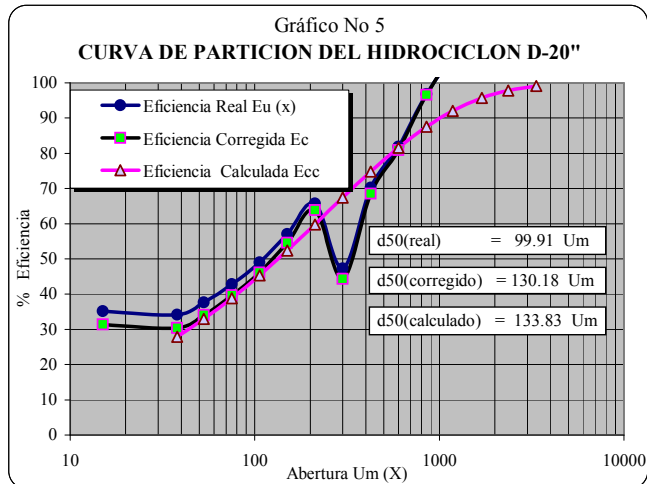
Resultado de la regresión

R Cuadrado 0.8306
 No de Observaciones 10
 Constante -1.2662 = b Intersección eje
 Coeficiente X 0.5954 = m Pendiente
d50(calculado) 133.83 um (Plitt)
m 0.5954

$$b = -m \log (d50) \quad d50 = \text{antilog} (-b/m)$$

TABLA N° 05A

Malla	Abertura X (um)	Y Y = log (-ln Log (abert)	X Log (abert)
4	4750	-	3.6767
6	3350	-	3.5250
8	2360	-	3.3729
10	1700	-	3.2304
14	1180	-	3.0719
20	850	0.6879	2.9294
28	600	0.3778	2.7782
35	425	0.2222	2.6284
48	300	-0.0728	2.4771
65	212	0.1661	2.3263
100	150	0.0565	2.1761
150	106	-0.0500	2.0253
200	75	-0.1381	1.8751
270	53	-0.2206	1.7243
400	38	-0.2820	1.5798
-400		-	



ANEXO No 05

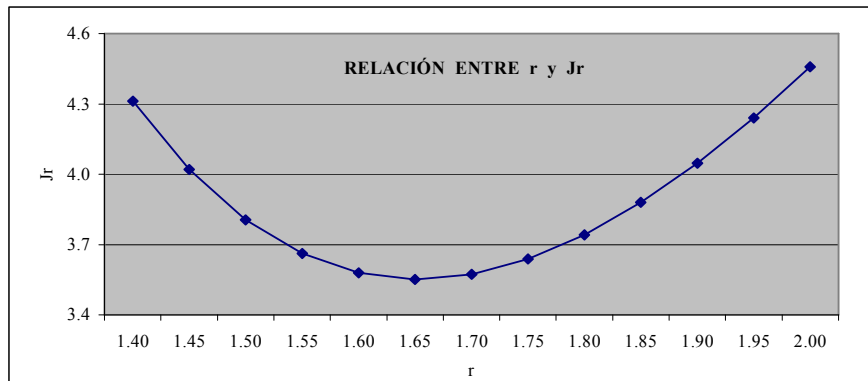
REAJUSTE DE DATOS POR MINIMOS Y CUADRADOS Jr(@)

CALCULO DE LA CARGA CIRCULANTE CON DATOS REALES

Malla Tyler	Abert μ	(4) Alimento (M)		(5) Underflow		(6) Overflow		C. Circ U/O
		% Peso	% Ac(-)	% Peso	% Ac(-)	% Peso	% Ac(-)	
4	3989	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.000
6	2812	0.35	99.65	1.07	98.93	0.00	100.00	0.488
8	2003	1.05	98.60	2.07	96.87	0.00	100.00	0.808
10	1416	3.22	95.38	5.87	91.00	0.00	100.00	1.055
14	1001	5.26	90.12	9.03	81.97	0.32	99.68	1.173
20	714	6.35	83.77	9.87	72.10	1.27	98.41	1.254
28	505	7.68	76.09	10.10	62.00	4.40	94.01	1.272
35	357	8.78	67.31	9.90	52.10	7.27	86.74	1.277
48	252	6.40	60.91	4.87	47.23	3.47	83.27	1.635
65	178	15.25	45.66	16.10	31.13	14.40	68.87	1.598
100	126	8.99	36.67	8.23	22.90	9.37	59.50	1.658
150	89	6.61	30.06	5.20	17.70	8.40	51.10	1.702
200	63	4.94	25.12	3.40	14.30	7.17	43.93	1.738
270	45	4.52	20.60	2.73	11.57	7.23	36.70	1.782
400	32	2.98	17.62	1.63	9.93	5.10	31.60	1.819
-400		17.62		9.93		31.60		
TOTAL		100.00		100.00		100.00		1.651

CALCULO DE LA CARGA CIRCULANTE CON DATOS CORREGIDOS

Malla Tyler	Abert μ	(4) Alimento (M)		(5) Underflow		(6) Overflow		C. Circ U/O
		% Peso	% Ac(-)	% Peso	% Ac(-)	% Peso	% Ac(-)	
4	3989	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0
6	2812	0.56	99.44	0.94	99.06	-0.08	100.08	1.65
8	2003	1.20	98.24	1.97	97.09	-0.06	100.14	1.65
10	1416	3.50	94.74	5.69	91.40	-0.11	100.24	1.65
14	1001	5.58	89.16	8.84	82.56	0.20	100.04	1.65
20	714	6.53	82.63	9.76	72.81	1.20	98.84	1.65
28	505	7.86	74.78	9.99	62.82	4.33	94.51	1.65
35	357	8.86	65.91	9.85	52.97	7.24	87.27	1.65
48	252	5.05	60.86	5.71	47.27	3.98	83.29	1.65
65	178	15.39	45.47	16.02	31.25	14.35	68.94	1.65
100	126	8.78	36.70	8.37	22.88	9.45	59.49	1.65
150	89	6.48	30.22	5.28	17.60	8.45	51.04	1.65
200	63	4.86	25.36	3.45	14.15	7.20	43.84	1.65
270	45	4.46	20.89	2.77	11.38	7.25	36.59	1.65
400	32	2.95	17.94	1.65	9.73	5.11	31.48	1.65
-400		17.94		9.73		31.48		
TOTAL		100.0		100.0		100.0		



ANEXO No 06

BALANCE DE MATERIALES EN LA SECCIÓN MOLIENDA

