

Modelo Matemático en la Simulación de Procesos de Flotación

Ing. Constancio Navarro Salazar

Consultor independiente

Ing. Federico G. Tito Patzi

Entrenador de Planta y Desarrollo; E. M. San Cristobal
fedetito@hotmail.com

Resumen

Se ha desarrollado un modelo, representado por un sistema de ecuaciones algebraicas que consiste en simular un proceso de flotación continua (Planta Piloto o Industrial) en base a pruebas metalúrgicas de flotación a nivel de laboratorio. Este modelo se puede aplicar con bastante confiabilidad para evaluar técnica y económicamente proyectos iniciales de la pequeña y mediana minería, donde los recursos económicos son escasos como para realizar un estudio sistemático de cinco etapas que requiere normalmente implementar un proyecto minero-metalúrgico.

En un test de flotación a nivel de laboratorio, fuera del concentrado y colas finales, se obtienen otros productos secundarios, tales como "cola primera limpieza", "cola segunda limpieza", "tercera", etc., de acuerdo al número de etapas de flotaciones limpieza. Estos productos en la práctica o procesos continuos, constituyen cargas que recirculan al circuito obteniéndose sólo al final un concentrado y una cola.

Para simular un proceso de flotación de minerales, en base a pruebas de laboratorio con "n" productos secundarios, se forman "n" ecuaciones lineales, con "n" incógnitas. Con ayuda de las técnicas computacionales tales como las hojas electrónicas (Excel, Qpro, etc.), se puede elaborar un programa con los respectivos modelos matemáticos planteados.

Palabras Clave: Flotación, modelo matemático, simulación.

Abstracts

A model supported on a system of algebraic equations was developed to simulate a continuous flotation process (pilot or industrial plant). This model is based on laboratory metallurgical tests and it can be applied with reliability to evaluate technically and economically initial projects from the small and medium mining industry where the economical resources are minimal to run a systematic study of the five stages, which are normally required to settle a mining-metallurgical project.

During a laboratory flotation test, besides the concentrate and the final tails, it is obtained another secondary products like "first cleaning tail", "second cleaning tail", "third", etc., depending on the number of the cleaning flotation stages. These products of continuous processes are charges that recycle to the circuit in order to obtain at the end, a single concentrate and a single tail.

To simulate a mineral flotation process based on laboratory tests with "n" secondary products, it is possible to form "n" linear equations with "n" unknown quantities and with the aid of some computer techniques like Excel, Qpro, etc.; it contributes to write a program taking into account the proposed mathematical models.

Key Works: Flotation, mathematical model, simulation.

Resumo

Neste trabalho é desenvolvido um modelo, representado por um sistema de equações algébricas, para simular um processo de flotação contínua (planta piloto ou industrial) com base em ensaios metalúrgicos de flotação realizados em laboratório. Este modelo pode ser aplicado com suficiente confiabilidade na avaliação técnica e econômica de projetos iniciais de pequeno e mediano porte, onde os recursos econômicos são escassos como para realizar um estudo sistemático de cinco etapas, como o requerido normalmente para implementar um projeto minero-metalúrgico.

Em um teste de flotação em nível de laboratório, além do concentrado e as colas finais, são obtidos outros produtos secundários, tais como a “cola primeira limpeza”, a “cola segunda limpeza”, a “terceira”, etc., de acordo com o número de etapas de flotações limpeza. Estes produtos, na prática ou em processos contínuos, constituem cargas que recirculam no circuito, obtendo-se somente ao final um concentrado e uma cola.

Para simular um processo de flotação de minerais com base em testes de laboratório com “n” produtos secundários, são formadas “n” equações lineares com “n” incógnitas. Com a ajuda de ferramentas computacionais, tais como as planilhas eletrônicas (Excel, Qpro, etc.), pode ser elaborado um programa com os modelos matemáticos apresentados.

Palavras-chave: Flotação, modelo matemático, simulação.

1. Introducción

A objeto de tener un conocimiento cabal de un determinado proceso de flotación, en la práctica es necesario llevar a cabo una investigación científica. La investigación puede ser de dos tipos: investigación básica e investigación aplicada.

Durante las pruebas de flotación de minerales a nivel de laboratorio, fuera de los productos que se obtienen (concentrado y cola), a menudo se obtienen otros productos secundarios denominados “colas de flotación primera limpieza”, “segunda”, “tercera”, etc., esto de acuerdo al número de etapas de flotaciones limpieza.

En un circuito continuo de flotación, tales como planta piloto e industrial, estos productos secundarios constituyen cargas recirculantes; es decir, que vuelven al circuito, obteniéndose al final un concentrado y una cola.

Para minimizar en el balance metalúrgico, la influencia de estos, se suele usar técnicas como:

- Pruebas tipo batch a nivel laboratorio
- Pruebas cerradas en cadena o simulación continua a escala laboratorio
- Pruebas entrelazadas
- Pruebas Look test
- Pruebas en Planta Piloto
- Pruebas industriales por campañas
- Procesamiento industrial del mineral

Llevar a cabo las etapas anteriores para ejecutar un proyecto requiere de fuertes gastos y un largo periodo de tiempo por lo que esta investigación propone un método capaz de sim-

plificar y/o eliminar alguna(s) de las fases anteriores, en este caso con sólo resultados de pruebas batch, se puede plantear modelos matemáticos que puedan predecir resultados con perfectas coincidencias en la práctica, que obtendrán cuando se concentre industrialmente el mineral.

2. Objetivos

El presente trabajo de investigación tiene por objeto dar a conocer modelos matemáticos que nos permitan predecir resultados finales tales como: leyes, recuperaciones y radio de concentración que un mineral reportará cuando sea procesado por flotación a escala piloto o industrial con información obtenida de pruebas batch a nivel laboratorio, método que se puede aplicar a una amplia variedad de minerales y poder evaluarlos técnica y económicamente con un alto nivel de confianza.

3. Conceptos Fundamentales

Un test de flotación a nivel de laboratorio con dos etapas de flotación limpieza (podría ser n limpiezas), se realiza generalmente de acuerdo al flujograma de la figura 1.

Los productos secundarios como “cola primera limpieza” y “cola segunda limpieza”, en la práctica o circuitos continuos, recirculan al circuito; La cola primera limpieza (X_1), recircula a la etapa de flotación primaria, la cola segunda limpieza (X_2), alimenta a la etapa de flotación primera limpieza, y así sucesivamente se puede considerar “n” etapas de flotaciones limpieza.

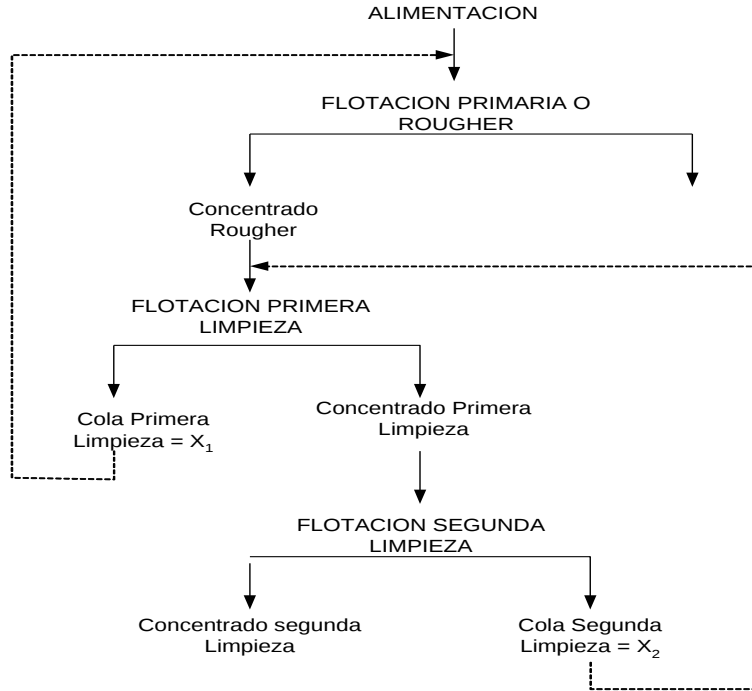


Figura 1. Flujograma de pruebas de laboratorio

El esquema anterior, es una simulación del siguiente circuito continuo, (figura 2).

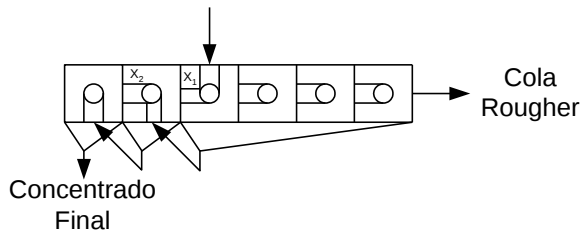


Figura 2. Circuito continuo

Como se observa en este circuito, se tienen como productos finales, un concentrado y una cola, los productos secundarios recirculan al circuito. El producto "cola primera limpieza" recircula a la etapa de flotación rougher mediante el "chupador" X_1 y la "cola segunda limpieza" alimenta a la etapa primera limpieza mediante X_2 .

3.1 Descripción del Modelo

En el presente modelo se pretende encontrar reglas de operación que permitan ajustar el balance metalúrgico para obtener sólo los productos finales.

Para el cálculo del ajuste, es necesario desglosar el balance metalúrgico en balances parciales. Con respecto al flujograma

de la figura 1, se desglosará de acuerdo a las siguientes etapas:

- Flotación primaria o rougher
- Flotación primera limpieza
- Flotación segunda limpieza

El ajuste respectivo, se efectuará empleando como datos el "% peso", "% distribución" de los balances parciales y la ley de cabeza.

Se planteará las ecuaciones requeridas de acuerdo al número de cargas recirculantes.

3.2 Consideraciones Para el Cálculo

Para facilitar el cálculo de ajuste del balance, los datos y resultados se han representado en forma matricial, cuyos elementos para los datos y resultados son los siguientes:

a) Datos

- % peso parcial (a_1b_i)
- % distribución parcial (a_3b_i)
- Ley de alimentación (a_5b_3)

b) Resultados

- % peso ajustado (a_2b_i)
- % distribución ajustada (a_4b_i)
- Ley ajustada (a_6b_i)

Las cargas recirculantes están representadas por X_1 y X_2 .

3.3 Cálculo del % Peso Ajustado

El % peso ajustado, esta representado por las columnas (a_2b_i) y se calcula en base al % peso parcial (a_1b_i).

3.3.1 Flotación Rougher

Según el flujograma, esta etapa recibe la primera carga recirculante (X_1), que es el producto “cola primera limpieza”, haciendo las consideraciones necesarias se tiene:

Productos	% Peso	% Peso ajustado
Concentrado rougher	a_1b_1	$a_2b_1 = a_1b_1 * (100+X_1)/100$
Cola rougher	a_1b_2	$a_2b_2 = a_1b_2 * (100+X_1)/100$
Alimentación	a_1b_3	$a_2b_3 = 100+X_1$

(Alimentación; $a_1b_3 = 100.00$)

3.3.2 Flotación Primera Limpieza

Esta etapa recibe como alimentación el “concentrado rougher”, más la segunda carga recirculante (X_2), que es la “cola de la segunda limpieza”.

Productos	% Peso	% Peso ajustado
Concentrado 1era Limp.	a_1b_4	$a_2b_4 = a_1b_4 * (a_1b_1 * (100+X_1)/100 + X_2)/a_1b_6$
Cola 1era. Limpieza	a_1b_5	$a_2b_4 = a_1b_5 * (a_1b_1 * (100+X_1)/100 + X_2)/a_1b_6 = X_1$ (1)
Alimentación	a_1b_6	$a_2b_4 = a_1b_1 * (100+X_1)/100 + X_2$

3.3.3 Flotación segunda limpieza

Productos	% Peso	% Peso ajustado
Concentrado 2da. Limp.	a_1b_7	$a_2b_7 = a_1b_7 * (a_1b_4 * (a_1b_1 * (100+X_1)/100 + X_2)/a_1b_6)/a_1b_9$
Cola 2da. Limpieza	a_1b_8	$a_2b_8 = a_1b_8 * (a_1b_4 * (a_1b_1 * (100+X_1)/100 + X_2)/a_1b_6)/a_1b_9 = X_2$ (2)
Alimentación	a_1b_9	$a_2b_9 = (a_1b_4 * (a_1b_1 * (100+X_1)/100 + X_2)/a_1b_6)$

Las cargas recirculantes representadas por X_1 y X_2 , se calculan mediante las ecuaciones (1) y (2). Reemplazando estos valores en el balance anterior se obtienen los % Peso ajustado, de donde debe cumplir:

Productos	% Peso ajustado
Concentrado final	a_2b_7
Cola final	a_2b_2
Alimentación	100.00

3.4 Calculo de la Distribución Ajustada

Se determina en función de las distribuciones parciales (a_3b_i) en forma similar al cálculo anterior.

3.5 Ajuste de Leyes

Se efectúan las compensaciones necesarias mediante la expresión:

$$\text{Ley ajustada } \mu \quad a_6b_i = a_5b_3 * a_4b_i / a_2b_i$$

3.6 Ejemplo de Aplicación

Como ejemplo de utilización del modelo mencionado, se ha tomado, una prueba de flotación diferencial de minerales de Pb-Ag y Zn, cuyo balance metalúrgico se muestra en la tabla No 1.

TABLA 1. Flotación diferencial de Pb-Ag y Zn

PRODUCTOS	% Peso	Ley % Pb	Ley DM Ag	Ley % Zn	% Distrib. Pb	% Distrib. Ag	% Distrib. Zn
Conc Pb-Ag	3,33	23,63	65,91	10,3	42,78	39,96	1,31
Cola 2da Limp. Pb-Ag	1,12	2,96	8,89	27,4	1,80	1,81	1,17
Cola 1era Limp. Pb-Ag	3,68	7,16	18,41	27,6	14,39	12,37	3,90
Concentrado Zn	32,91	0,9	4,8	62,03	16,09	28,70	77,89
Cola 2da Limp. Zn	2,75	1,37	4,68	46	2,04	2,34	4,82
Cola 1era Limp. Zn	6,95	1,23	3,65	29,2	4,70	4,60	7,71
Cola Final	49,26	0,68	1,14	1,7	18,20	10,22	3,20
Cab. Calc.	100,00	1,84	5,5	26,21	100,00	100,00	100,00
Cab. Ens		1,85	4,82	29,87			

En este caso se observa 4 cargas secundarias, por lo tanto habrán 4 cargas recirculantes, que son calculadas mediante 4 ecuaciones con 4 incógnitas.

El balance ajustado de acuerdo al método descrito se muestra en la tabla No 2.

TABLA 2. Balance Ajustado- Flotación Pb-Ag y Zn

PRODUCTOS	% Peso	Ley % Pb	Ley DM Ag	Ley % Zn	% Distrib. Pb	% Distrib. Ag	% Distrib. Zn
Conc. Pb-Ag	4,03	23,63	64,64	10,94	51,82	47,41	1,68
Concentrado Zn	39,98	1,09	5,43	62,04	23,73	39,46	94,63
Cola Final	55,98	0,80	1,29	1,72	24,45	13,13	3,68
Cab. Calc.	100,00	1,84	5,50	26,21	100,00	100,00	100,00
Cab. Ens.		1,85	4,82	29,87			

4. Conclusiones

- Del ejemplo anterior se observa que los pesos y distribuciones de los concentrados y la cola se incrementan debido a las cargas recirculantes, también por efecto de estos, las leyes de los concentrados sufre un pequeño decremento y las colas se incrementan.
- Para ajustar un balance metalúrgico de flotación de minerales, con "n" cargas recirculantes, se formarán "n" ecuaciones lineales, con "n" incógnitas.
- El modelo desarrollado está representado por un sistema de ecuaciones algebraicas y tiene amplia aplicación con ligeras modificaciones para cualquier tipo de flujo-grama.
- Los modelos matemáticos desarrollados y simplificados durante este trabajo de investigación se puede aplicar con bastante confiabilidad para evaluar técnica y económicamente proyectos iniciales de la pequeña y mediana minería, donde los recursos económicos son escasos como para realizar un estudio sistemático de 5

etapas que requiere normalmente implementar un proyecto minero-metalúrgico

- Mediante estas ecuaciones matemáticas es posible predecir con bastante éxito, leyes, recuperaciones que se obtendrían a nivel industrial si beneficiamos un mineral que requiera flotación selectiva a partir de pruebas de laboratorio donde se obtenga dos concentrados y una cola.
- El programa elaborado puede usar técnicas computacionales, mediante una hoja electrónica (Excel, Qpro, etc.)

5. Referencias

1. NAVARRO, C., *Experimentación Metalúrgica con muestras de Plomo, Plata y Zinc Compañía Minera Celeste Ltda. Mina Santa Isabel*. Informe No SERGEOMIN-DMMA-014. Noviembre 2000.
2. CURRIE, J. M. U.C.L. *Unit Operations in Mineral Processing*. Reprinted C.S.M. Press, January 1978.