

Procedimiento para la determinación de la carga circulante en circuitos cerrados de trituración y molienda

Alfredo Lázaro Coello-Velázquez

Resumen

Con el propósito de disminuir los errores (residuos) que tienen lugar en la determinación de la carga circulante en los circuitos cerrados de molienda o trituración, aplicando los métodos de los mínimos cuadrados y de los multiplicadores de Lagrange a las ecuaciones de balance, se desarrolló un procedimiento que minimiza las desviaciones e incongruencias en el balance de distribución de las clases granulométricas de los productos del esquema. Tomando como punto de partida los datos experimentales obtenidos por el autor en 1993 se validó el procedimiento propuesto. Los resultados muestran que el procedimiento aplicado permite el mejor ajuste de cálculo de la carga circulante y a partir de sus valores se recalculan los contenidos de las clases granulométricas de los productos del esquema que eliminan las incongruencias y errores de la distribución del contenido de las clases granulométricas generados en la toma y procesamiento general de las muestras.

Palabras clave: balance material; carga circulante; circuito cerrado; función de Lagrange; método de los mínimos cuadrados; molienda; trituración.

Procedure for estimating the circulating load in crushing and grinding closed circuit

Abstract

With the objective to eliminate errors (residues) during the estimation of the circulating load in crusher/grinding closed circuit, a procedure was developed that minimize the deviations and inconsistencies that occur in the distribution balance of granulometric classes of the flow sheet product by applying least square and Lagrange multipliers to balance equations. The proposed procedure is approved taking as start point the experimental data obtained by the author in 1993. Results show that applied procedure allows the best fit circulating load calculation and from her resulting data, the size contents of the flow sheet products are then re-estimated which eliminates inconsistencies and errors in the content distribution of the granulometric classes generated in sampling operations

Keywords: mass balance; circulating load; closed circuit; Lagrange multiplier; lest square method; grinding; crushing

1. INTRODUCCIÓN

En la tecnología carbonato amoniacal, la molienda de minerales lateríticos garantiza la superficie específica requerida del mineral para reducir el níquel y el cobalto distribuidos en la red cristalina de los principales portadores. Esto último constituye un elemento imprescindible para conseguir los índices de extractable planificados en el proceso de lixiviación y la producción final. En este sentido, la mena debe ser reducida dimensionalmente hasta un tamaño de 80-85 % de la clase menor a 0,074 μm (Coello-Velázquez 1993).

En este contexto, la molienda del mineral consume aproximadamente el 21 % de toda la energía eléctrica demandada por la tecnología carbonato-amoniacal (Laborde, Coello-Velázquez & Angulo 2003), superada exclusivamente por el proceso de lixiviación.

El esquema tecnológico de la planta de molienda incluye una operación de molienda en circuito cerrado con un separador de aire y dos etapas de precipitación de polvos en baterías de ciclones con un electro-filtro (Coello-Velázquez 1993). En estos esquemas, el proceso de fragmentación se ve afectado no solo por las fluctuaciones de las propiedades físicas y físico-mecánicas del mineral en la alimentación, propias de su distribución espacial en el yacimiento, sino también por una gama de factores tecnológicos que incluyen la carga circulante.

La carga circulante, por concepto, es la relación porcentual de la cantidad de mineral que retorna al molino para su remolienda (arenas del separador de aire) y la alimentación fresca al molino.

En los circuitos cerrados de trituración/molienda, la influencia de la carga circulante está marcada por la incidencia en los niveles de acumulación de material en el interior del molino sobre el rendimiento del molino y los indicadores energo-tecnológicos.

La acumulación de mineral en el interior del molino, sin ser una suma exacta de la productividad inicial y la carga circulante, define el desarrollo del proceso no solo en el orden cualitativo, sino también cuantitativo (Coello-Velázquez, Marrero-Ramírez & Hernández-Flores 1994). Así que la calidad y cantidad del producto final es función de dicha variable. Para garantizar los niveles máximos de la productividad del producto molido es necesario mantener los niveles de acumulación en valores cercanos al valor crítico.

Wills y Napier-Munn (2006) plantearon que, probablemente, son las fluctuaciones de la densidad y la dureza en el mineral alimentado los que

con mayor fuerza influyen en el balance de clases de la molienda. Para las lateritas de Moa, Coello-Velázquez, Menéndez-Aguado & Laborde (2008) establecieron que la relación serpentina/limonita influye decisivamente en el rendimiento y la distribución de las clases en el balance del molino.

Comúnmente, en la práctica industrial, la carga circulante se calcula a partir de los resultados del muestreo de la descarga del molino y los productos del clasificador, según la ecuación 1.

$$C = (f' - p)/(c - f') \quad (1)$$

Donde:

C -es la carga circulante, unidades;

f' , c y p -porcentaje en peso de la clase i en la descarga del molino, retorno del separador y su producto fino, respectivamente.

No siempre los cálculos por la ecuación 1 pueden ser considerados como válidos, en la mayoría de los casos están sujetos a los errores graves, casuales y sistemáticos que tienen lugar durante el muestro. En el valor de las variables f' , c y p se resumen los errores que se cometen en las operaciones de tratamiento de las muestras, de su análisis (granulométrico en este caso), los errores en la toma de muestras y las fluctuaciones en la alimentación. La presencia de valores negativos de la carga circulante delata la existencia de fluctuaciones en el balance de las clases de los productos de la instalación.

Wills y Napier-Munn (2006), para resolver estos problemas en el balance material de las operaciones de beneficio de minerales, aplicaron el multiplicador de Lagrange para optimizar los residuos. El procedimiento expuesto por los autores antes citados, en su sentido expreso, es aplicable a los circuitos abiertos de trituración o molienda con cribado o clasificación preliminar, para la determinación de los flujos de los productos, no así para los circuitos cerrados, donde el balance material de clases es un tanto diferente.

Para el circuito abierto la ecuación principal del balance material de cualquier instalación se rige por la ecuación 2.

$$f - Pp - (1 - P)c = 0 \quad (2)$$

La ecuación 2, que aparece en Wills y Napier-Munn (2006), es para el cálculo del balance material en operaciones de separación mecánica en condiciones de "estado de equilibrio del proceso", considerando que el error del cierre del balance es igual a cero. Al adecuar esta ecuación a un

esquema de circuito cerrado de trituración/molienda es obvio que los parámetros cambian su concepto: se sustituye el contenido de los componentes útiles (f , p y c) por el contenido de las clases granulométricas.

Por otra parte, como F' (alimentación a la operación de clasificación) es la suma de la alimentación fresca en el molino (F) y la recirculación al molino (carga circulante), por tanto, la alimentación fresca no es precisamente la suma de los productos del esquema, sino que es igual a P (flujo del producto final). Esto hace que no sea posible emplear directamente la ecuación 2 en el cálculo del esquema de la Figura 1.

El objetivo del presente trabajo es exponer un procedimiento para el cálculo de la carga circulante optimizando los errores residuales.

2. DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO

2.1. Propuesta de cálculo de la carga circulante minimizando los errores residuales.

La propuesta considera el cálculo de la carga circulante en los circuitos cerrados de molienda/trituración a partir de los datos experimentales, resultantes del muestreo en los puntos de descarga del molino (f'), y en el rebose del clasificador (p) y en sus arenas (c), para luego ajustar la data a los valores estimados de la carga circulante.

De modo general, el balance material de los procesos de reducción de tamaño está formado por dos ecuaciones básicas: la ecuación de salida de los productos y la ecuación de contenido de las clases. Para la instalación de la Figura 1 el balance material toma la siguiente forma:

$$\left\{ \begin{array}{ll} F' = P + C & \text{para } \epsilon = 0 \\ F'f' = Pp + Cc & \text{para } \epsilon = 0 \\ F = 1 & \text{para } C = \text{cont} \\ F = P & \text{para } C = \text{cont} \end{array} \right. \quad (3)$$

En consecuencia:

$$f'(P + C) = Pp + Cc \quad (4)$$

$$f'(1 + C) = p + Cc \quad (5)$$

Donde:

F , F' , P y C -son los rendimientos (salidas) de los flujos de alimentación fresca, descarga del molino, producto fino y retorno al molino (carga circulante) relativos a la alimentación fresca, unidades.

ϵ - es el residuo o error.

De la ecuación (5) podemos obtener la ecuación de la distribución de las clases de tamaño de la instalación:

$$f' = p - C(f - c) \quad (6)$$

La ecuación es válida solo si el error o residuo es igual a cero ($\epsilon = 0$), lo cual es inamisible en términos experimentales, por lo tanto:

$$\epsilon = f' - p + C(f - c) \quad (7)$$

El objetivo del método es encontrar el valor de la carga circulante que minimiza suma de los cuadrados de los residuos de cada parámetro en la ecuación 6. Entonces se puede escribir que:

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon^2 \quad (8)$$

Sustituyendo en la ecuación 8 se obtiene que:

$$S = \sum_{i=1}^n (f' - p + C(f' - c))^2 \quad (9)$$

$$S = \sum_{i=1}^n (f' - p)^2 + 2C \sum_{i=1}^n (f' - p)(f' - c) + C^2 \sum_{i=1}^n (f' - c)^2 \quad (10)$$

De la ecuación (10) se deduce que para cualquier valor de C , la función S es igual a cero solo para la condición en que los valores de sus parámetros f' , p , c sean coherentes. No obstante, la función S tiene su mínimo si su primera derivada es igual a cero, por lo tanto, el valor de C para esta condición, minimiza los residuos.

$$\frac{dS}{dC} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{dS}{dC} = 2 \sum_{i=1}^n (f' - p)(f' - c) + 2C \sum_{i=1}^n (f' - c)^2 = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n (f' - p)(f' - c) + C \sum_{i=1}^n (f' - c)^2 = 0 \quad (13)$$

Entonces el valor de \hat{C} que minimiza $\epsilon \rightarrow \min$ se puede calcular por la fórmula 14:

$$\hat{C} = \frac{\sum_{i=1}^n (f' - p)(f' - c)}{\sum_{i=1}^n (f' - c)^2} \quad (14)$$

2.2. Cálculo de los valores de los parámetros de la ecuación (14) que satisfacen el mejor ajuste de \hat{C} .

La ecuación 6 puede ser rescrita como:

$$\epsilon = f'(1 + \hat{C}) - p - \hat{C}c \quad (15)$$

Escribiendo la ecuación 15 en función de la carga circulante reajustada \hat{C} por la fórmula 14.

$$f'_r(1 + \hat{C}) - p_r - \hat{C}c_r = 0 \quad (16)$$

Entonces:

$$f'_r - f' = \epsilon f' \quad (17)$$

$$p_r - p = \epsilon p \quad (18)$$

$$c_r - c = \epsilon c \quad (19)$$

Donde:

f'_r , p_r y c_r - son los valores ajustados de los parámetros de la ecuación (14), respectivamente;

$\epsilon f'$, ϵp y ϵc - son los valores de los residuos de los parámetros de la ecuación (14).

Siendo así, la ecuación 15 puede escribirse de la siguiente manera:

$$(f' - \epsilon f')(1 + C) - (p - \epsilon p) - C(c - \epsilon c) = 0 \quad (20)$$

Si restamos la ecuación 15 y la 16 entonces se obtiene que:

$$\epsilon = (f' - f'_r)(1 + \hat{C}) - (p - p_r) - \hat{C}(c - c_r) \quad (21)$$

Sustituyendo las fórmulas 17, 18 y 19 en la ecuación 21 se obtiene:

$$\epsilon = \epsilon f'(1 + \hat{C}) - \epsilon p - \hat{C}\epsilon c \quad (22)$$

Para la ecuación 21, la suma de los cuadrados que hace mínimo cada parámetro toma la siguiente forma:

$$Sr = \sum_{i=1}^n \epsilon f'^2 + \epsilon p^2 + \epsilon c^2 \quad (23)$$

De acuerdo con Boizán (1984), la función de Lagrange o lagrangiana (ecuación 24) puede ser utilizada para la determinación de las posibles localizaciones del óptimo (máximo o mínimo). Wills y Napier-Munn (2006) aseguraron que los problemas de minimización de los errores pueden ser resueltos con el método de Lagrange.

$$F = Sr + \sum_j \lambda_j R(x) \quad (24)$$

Donde:

F - es la función de Lagrange;

λ - es el multiplicador de Lagrange;

R(x) - es la restricción.

Para este caso particular, la ecuación 25 es la sustracción de las dos restricciones formadas por las ecuaciones 15 y 16:

$$\epsilon - \epsilon f'(1 + \dot{C}) + \epsilon p + \dot{C}\epsilon c = 0 \quad (25)$$

Entonces para el caso en cuestión la función de Lagrange toma la siguiente forma:

$$F = \sum_{i=1}^n \epsilon f'^2 + \epsilon p^2 + \epsilon c^2 + 2 \sum_i \lambda (\epsilon - \epsilon f'(1 + \dot{C}) + \epsilon p + \dot{C}\epsilon c) \quad (26)$$

Para determinar el valor de los residuos $\epsilon f'$, ϵp y ϵc basta con derivar e igualar a cero la ecuación 25 (función de Lagrange) por cada uno de ellos:

$$\frac{dF}{d\epsilon f'} = 2\epsilon f' - 2\lambda(1 + \dot{C}) = 0 \quad (27)$$

$$2\epsilon f' - 2\lambda(1 + \dot{C}) = 0 \quad (28)$$

$$\epsilon f' = \lambda(1 + \dot{C}) \quad (29)$$

Siguiendo el mismo procedimiento obtenemos:

$$\epsilon p = -\lambda \quad (30)$$

$$\epsilon c = -\lambda \dot{C} \quad (31)$$

Como el valor de λ (multiplicador de Lagrange) se desconoce, si derivamos la ecuación 25 por el mismo, y sustituimos los valores de los residuos de cada parámetro obtenemos:

$$\epsilon - \lambda(1 + \dot{C})(1 + \dot{C}) - \lambda - \dot{C}^2 \lambda = 0 \quad (32)$$

$$\lambda = \frac{\epsilon}{(1 + \dot{C})^2 + \dot{C}^2 + 1} \quad (33)$$

El valor de ϵ puede calcularse por la ecuación 15.

2.3. Aplicación del procedimiento al cálculo de la carga circulante del esquema del circuito cerrado de la instalación del CEDINIQ.

La instalación del CEDINIQ (Centro de Investigaciones del Níquel) cuenta con un circuito cerrado de molienda formado por un molino cilíndrico-cónico 1,85 X 0,56 m y un separador de aire con ventilación interna de 3,5 t/h (Figura 1), donde f es el contenido de la clase de cálculo en la alimentación fresca; f' , p , c mantienen significado y la saeta señala la dirección del flujo.

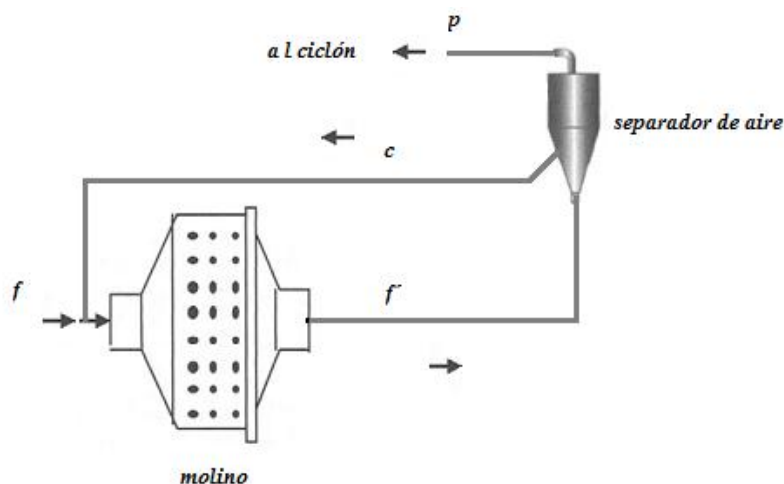


Figura 1. Esquema de la instalación de molienda del CEDINIQ (Coello-Velázquez 1993).

Para el desarrollo del procedimiento los datos iniciales fueron tomados de Coello-Velázquez (1993). Los experimentos se llevaron a cabo en las instalaciones del Centro de Investigaciones del Níquel, en período marzo-junio de 1990, bajo la dirección del autor.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 aparecen los valores de la carga de circulante calculados por la fórmula 1 para diferentes niveles de la alimentación. A juzgar por los valores de la tabla, existen valores de la carga circulante que poseen signo negativo.

Estos valores de carga circulante pierden todo sentido físico y básicamente aparecen por fluctuaciones aleatorias de las propiedades físicas y físico-mecánicas del material en la alimentación fresca o por errores, casi siempre graves, en las operaciones de muestreo y las determinaciones analíticas que provocan desviaciones en el balance de las clases de tamaño.

El desbalance de la distribución de las clases de tamaño de manera natural se reflejará en los valores ponderados de la carga circulante; en

este caso particular se debe a la distribución del contenido de las clases granulométricas en los productos de descarga del molino, la recirculación y el producto final. En este sentido, se ha desplazado hacia un incremento de la clase intermedia 0,074-0,044 mm en el producto de descarga del molino con respecto al producto de recirculación, condición que hace negativa el término de la derecha de la fórmula 1.

En la Tabla 2 se muestran los valores de la carga circulante determinados por las fórmulas 1 y 14. En esta dirección, existen desviaciones importantes entre los de valores \hat{C}_i y C_i , para todos los regímenes tecnológicos. Vale recordar que los parámetros que conforman ambas fórmulas son variables aleatorias, supeditadas no solo a los cambios de valor (magnitud) en cada medición, dados por estar sujetos a la fuerte influencia de errores casuales, sistemáticos e incluso graves, que tiene su expresión de manera importante en su determinación y, por ende, de forma muy particular, en el cálculo de los valores de la carga circulante por la fórmula 1.

En los valores de C_i están representadas todas las fluctuaciones de los parámetros de la fórmula 1, mientras que en los valores de \hat{C}_i , por concepto, se minimiza el efecto de estas fluctuaciones e incongruencias en los valores del contenido de los diferentes productos.

En el caso de la variable carga circulante, calculada por la fórmula 14 (\hat{C}_i), quedó demostrado matemáticamente en el epígrafe 2.1 que sus valores hacen mínimo la suma cuadrática de los residuos, y por ende, resultan más cercanos a los valores reales de esta variable aleatoria. Dicho en otras palabras, los valores resultantes de "mejor ajuste" de la carga circulante.

En la Tabla 3 aparecen los valores recalculados de los contenidos de las clases granulométricas de los productos del esquema de la Figura 1. Estos valores coinciden con el "mejor ajuste" de la carga circulante. El cálculo del residuo (ϵ) con estos "nuevos contenidos" por la fórmula 15 confirma la demostración matemática de la minimización de los residuos en el cálculo de la carga circulante por la fórmula 14 por el procedimiento propuesto.

Tabla 1. Valores de la carga de circulante calculados por la fórmula 1

N	Cantidad de aire, m ³ /h	Capacidad alimentada, t/h	Clases de tamaño, mm	Contenido de las clases, %			Residuo, u	Carga circulante, u
				descarga del molino	recirculación	producto fino		
1	1 276,3	0,86	>0,074	26,5	33,4	11,8	6,2	2,13
			0,074-0,044	8,7	11,7	9,3	-4,3	-0,20
			0,044-0,0	64,8	54,9	73,9	3,1	0,92
			-0,074-0	73,5	66,6	83,2	-1,2	1,41
2	2 234,2	0,86	>0,074	51,6	56,3	22,1	11,3	6,28
			0,074-0,044	10,6	13,3	13,6	-13,5	-1,11
			0,044-0,0	37,8	30,4	64,3	2,2	3,58
			0,074-0,0	48,4	43,7	77,9	-11,3	6,28
3	2 839,1	0,86	>0,074	59,1	62,5	27,9	3,7	9,18
			0,074-0,044	10,0	7,7	11,7	16,9	0,74
			0,044-0,0	30,9	29,4	60,4	-17,4	19,67
			0,074-0,0	40,9	37,1	72,1	-0,5	8,21
4	1 276,3	3,71	>0,074	33,3	58,3	22,1	-0,6	0,45
			0,074-0,044	20,8	9,3	14,3	11,9	-0,57
			0,044-0,0	45,9	32,1	63,6	-11,2	1,28
			0,074-0,0	66,7	41,4	77,9	0,7	0,44
5	2 234,2	3,71	>0,074	37,6	54,8	23,7	2,0	0,81
			0,074-0,044	20,8	9,8	14,3	14,1	-0,59
			0,044-0,0	45,8	37,3	65,6	-13,9	2,33
			0,074-0,0	66,6	47,1	79,9	0,2	0,68
6	2 839,1	3,71	>0,074	43,9	54,7	28,6	-2,7	1,42
			0,074-0,044	10,4	8,0	5,5	8,9	-2,04
			0,044-0,0	45,7	37,3	65,9	-6,2	2,40
			0,074-0,0	56,1	45,3	71,4	2,7	1,42

Tabla 2. Valores de la carga circulante calculados por las fórmulas 1 (Ci) y 14 (Ĉi)

N	Cantidad de aire, m ³ /h	Capacidad alimentada, t/h	Carga circulante, u		Desviación absoluta, u
			Ci(*)	Ĉi	
1	1 276,3	0,86	1,41	1,23	0,18
2	2 234,2	0,86	6,28	3,88	2,40
3	2 839,1	0,86	8,21	8,08	0,13
4	1 276,3	3,71	0,44	0,47	-0,03
5	2 234,2	3,71	0,68	0,69	-0,01
6	2 839,1	3,71	1,42	1,67	-0,75

(*) Carga circulante por la clase de cálculo -0,074 mm.

Tabla 3. Valores ajustados de los contenidos de las clases granulométricas de los productos de la Figura 1

N	Cantida d de aire, m ³ /h	Capacidad alimentad a, t/h	Clases de tamaño,m m	Contenido de las clases, %			Residuo , u €
				descarg a del molino	recirculaci ón	product o fino	
1	1276,3	0,86	>0,074	24,6	34,4	12,6	0
			0,074- 0,044	10,0	11,0	8,7	0
			0,044-0,0	63,9	55,4	74,3	0
			-0,074-0	73,9	66,4	83,0	0
2	2234,2	0,86	>0,074	50,2	57,4	22,4	0
			0,074- 0,044	12,2	12,0	13,3	0
			0,044-0,0	37,5	30,6	64,4	0
			0,074-0,0	49,8	42,6	77,6	0
3	2839,1	0,86	>0,074	58,9	62,7	27,9	0
			0,074- 0,044	9,0	8,6	11,8	0
			0,044-0,0	32,0	28,5	60,3	0
			0,074-0,0	40,9	37,1	72,1	0
4	1276,3	3,71	>0,074	33,5	58,2	21,9	0
			0,074- 0,044	15,6	11,0	17,8	0
			0,044-0,0	50,8	30,5	60,3	0
			0,074-0,0	66,4	41,5	78,1	0
5	2234,2	3,71	>0,074	36,8	55,1	24,2	0
			0,074- 0,044	15,3	12,0	17,6	0
			0,044-0,0	51,2	35,1	62,4	0
			0,074-0,0	66,5	47,1	79,9	0
6	2839,1	3,71	>0,074	44,6	54,3	28,3	0
			0,074- 0,044	8,2	9,4	6,3	0
			0,044-0,0	47,2	36,4	65,3	0
			0,074-0,0	55,4	45,7	71,7	0

4. CONCLUSIONES

1. El procedimiento presentado permite el cálculo de la carga circulante y el recálculo de los contenidos de las clases de los diferentes productos en un circuito cerrado de molienda o trituración, a partir de los datos experimentales generados por el muestro y determinación del contenido de las clases de los productos del esquema.

2. La aplicación del procedimiento propuesto ha sido validado en la práctica, sobre la base de datos experimentales, resultado del muestreo y la determinación de los contenidos de las clases granulométricas mediante el análisis de tamiz en las instalaciones semi-industriales del Centro de Investigaciones de Níquel.
3. Los valores de la carga circulante determinados por el procedimiento y los contenidos de las clases granulométricas resultantes de su ajuste al parámetro citado representan una posibilidad concreta de minimizar los errores cometidos durante la toma y el tratamiento de las muestras, y la determinación de los contenidos de las clases granulométricas.
4. El procedimiento propuesto es válido para el cálculo de la carga circulante y la determinación de los contenidos de las clases de los productos de los circuitos cerrados de trituración o molienda a cualquier escala.

5. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al ingeniero Gilberto Font, director del CIL en el momento del desarrollo de las pruebas, por su inmenso apoyo, comprensión, confianza e inteligencia demostrada. A los ingenieros Arnulfo Carcasés, Idalmis Peña y Mirelis Molina (estudiantes en aquel momento) por su participación directa en la toma de las muestras.

6. REFERENCIAS

- BOIZÁN, M. 1984: *Optimización (sistemas estáticos)*. Editorial Oriente, Santiago de Cuba, 174 p.
- COELLO-VELÁZQUEZ, A. L. 1993: *Sobersensstobovanie tehnologii izmelchenia lateritovij rud*. Dis. na izk. uch. step. Kan. tecn. nauk. Inst. Mejanobr. Saint Petersburg.
- COELLO-VELÁZQUEZ, A. L.; MARRERO-RAMÍREZ, S. & HERNÁNDEZ-FLORES, A. 1994: Control de la carga interior del molino a través de terceros parámetros. *Minería y Geología* 11(1): 35-39.
- COELLO-VELÁZQUEZ, A. L.; MENÉNDEZ-AGUADO, J. M. & LABORDE, R. 2008: Grindability of lateritic nickel ore in Cuba. *Powder Technology* 182(1): 113-115.
- LABORDE, R.; COELLO-VELÁZQUEZ, A. L. & ANGULO, O. 2003: Racionalización del consumo de energía en la molienda de los minerales lateríticos. En: Seminario de Ingeniería Eléctrica SIE. UCLV. Las Villas, Cuba. 1-4.
- WILLS, B. & NAPIER-MUNN, T. 2006: *Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspect of ore treatment and mineral recovery*. Seventh Edition. Elsevier Science & Technology Books, 450 p.

Alfredo L. Coello Velázquez. acoello@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Centro de Estudios de Energía y Alta Tecnología.
Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín,
Cuba.