

PRODUCTIVIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL PROCESO DE MOLIENDA DEL MINERAL LATERÍTICO

(PRODUCTIVITY AND ENERGETIC EFFICIENCY IN THE MILLING PROCESS OF THE LATERITIC MINERAL)

REYNALDO LABORDE BROWN

Ingeniero, Dpto. Ingeniería Eléctrica, Facultad de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Las Coloradas, Moa, Holguín.

ALFREDO COELLO VELÁZQUEZ

Dr. C., Dpto. Metalurgia, Facultad de Metalurgia, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Las Coloradas, Moa, Holguín.

SECUNDINO MARRERO RAMÍREZ

Dr. C., Dpto. Eléctrica. Facultad de Metalurgia-Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Las Coloradas, Moa, Holguín.

OLGA ANGULO LEBLANCH

Ingeniera, Dpto. Minas, Facultad de Geología y Minería, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Las Coloradas, Moa, Holguín.

RESUMEN: En el trabajo se realiza un análisis energético del proceso de molienda seca del mineral laterítico, considerado como el proceso de mayor consumo de energía eléctrica entre los procesos beneficiadores que se emplean en las plantas niquelíferas, ubicadas al norte de la provincia de Holguín. Son analizadas las particularidades energéticas que exhibe este proceso cuando las máquinas trabajan normalmente con la presencia de mineral y cuando se producen ausencias ocasionales de éste en el sistema, lo que trae como consecuencia el incremento notable de las potencias demandadas por los molinos y por los ventiladores de recirculación. Se analiza además, la influencia del grado de llenado con bolas del molino, sobre la productividad y la estrecha relación de esta última con la eficiencia energética del proceso. El método fundamental de análisis empleado, se basa en la obtención experimental y en las condiciones concretas de explotación, de las

características energéticas de las unidades de molienda y de sus agregados, como vía directa para descubrir las reservas de energía del sistema y conocer hasta qué punto es posible mejorar su eficiencia influyendo sobre la productividad. El trabajo revela que, cuando las unidades de molienda son operadas con valores de productividades que oscilan entre un 50 y un 60% de la nominal, si son adoptadas las medidas pertinentes para lograr el aumento de la productividad, entonces esto puede reportar hasta un 55% de mejoramiento de la eficiencia energética del proceso.

Palabras claves: productividad, eficiencia energética, características energéticas.

ABSTRACT: In this work, an energetical analysis of the dry milling process of the lateritic mineral is detailed, which is considered the major electric energy consumer, amongst all the process in the plants dilling with this kind of mineral for the

nickel production, at the North of Holguin Province. Energetical singularity performed by this process is analyzed during the normal operation of the machines with the presence mineral flow and when occasionally mineral absences occur in the system, bringing about a considerable increasing of the power consumed by the mills and the recirculating fans. It is also analyzed, the influence of the grade of filling with balls over the productivity and the strong relation of the latest with the energetic efficiency of the process. The main analysis method used, is based on the attainment, by experimental ways and in specific conditions of exploitation, of the energetic characteristics of the milling units and their components, as a direct form to find the system energy reserves and to know how far can its energetic efficiency be improved by means of the productivity raising.

Key words: productivity, energetic efficiency, energetic characteristic.

INTRODUCCION

El tema relacionado con el mejoramiento de la eficiencia energética industrial, se manifiesta hoy a escala mundial como una fuerte competencia en la búsqueda incesante de nuevas tecnologías, diseños, métodos y procedimientos para aplicar en todas las ramas productivas. Los procesos de extracción y de beneficio de minerales, por sus altos requerimientos energéticos, son ejemplos de campos donde se realizan importantes acciones encaminadas a lograr indicadores energéticos

cada vez más favorables. La última década fue una época difícil para la industria de los minerales en general, las plantas sobrevivientes de los años 90' han sido forzadas a buscar nuevos métodos que les permitan aumentar su productividad sin grandes inversiones de capital (Herbst y Zaragoza, 1990). La mayoría de los estudios sobre molienda de minerales han apuntado a la reducción de los costos de operación (Wells, 1990).

En nuestro ámbito nacional, la industria niquelífera, prominente consumidor, no está ajena a esa necesidad

de mejorar sus indicadores, como paso acertado hacia el camino del éxito empresarial.

Con este propósito, en las diferentes empresas relacionadas con el níquel, ubicadas en las regiones de Moa y Nicaro, provincia Holguín, se han realizado un grupo de investigaciones que abarcan desde el proceso de extracción del mineral, hasta la obtención del producto final. Estas investigaciones han permitido localizar y clasificar las diferentes áreas de consumo, para llegar a la conclusión de que el proceso de molienda del mineral laterítico ocupa el primer orden como consumidor energético entre el resto de los procesos a que es sometido el mineral. El grupo de trabajos consultados que abordan la problemática energética, directa o indirectamente, en el proceso de molienda de la laterita, centran su atención en la eficiencia del accionamiento (Estévez, 1997), en la composición del mineral (Coello y Tijonov, 1996), en el estudio de la dinámica del proceso, y en otros aspectos particulares. En todos estos trabajos el tema energético está enfocado desde un segundo plano.

La investigación de mayor rigor realizada sobre el proceso de molienda de la laterita, en las condiciones concretas de explotación de los yacimientos cubanos (Coello, 1993), analiza con profundidad los diferentes factores tecnológicos y de la dinámica del proceso que influyen en el consumo de energía de una unidad de molienda. Sin embargo, en el trabajo se particulariza el estudio del comportamiento del molino de bolas y no se estudia el comportamiento del consumo energético del ventilador de recirculación, como componente inseparable de la unidad de molienda, en tal sentido no se realiza un estudio energético integral de la unidad, es decir, no se investigan las características energéticas $w_m = f(Q)$, $w_v = f(Q)$ y $w_u = f(Q)$ (consumos específicos de energía del molino, del ventilador y de la unidad, respectivamente, en función de la productividad), como vías para conocer la cantidad de energía mínima requerida para el procesamiento de una tonelada de mineral .

Es precisamente el objetivo de este trabajo, mostrar un análisis de la relación existente entre la productividad Q de una unidad de molienda y su eficiencia energética, como fundamento de la metodología que permite la determinación de la energía mínima requerida para el procesamiento de una tonelada de mineral en las condiciones concretas de explotación. Como criterio de medida de la eficiencia, utilizamos el concepto de consumo específico de energía w , y se entiende como tal, la energía consumida para el procesamiento de una tonelada de mineral en la unidad de tiempo (1 hora).

Entre los equipos que forman parte de una unidad de molienda, en un esquema típico para el proceso de la laterita (ver Fig. 1), son fundamentales el molino de bolas y el ventilador de recirculación, tanto desde el punto de vista operacional como energético. Cualquier estudio que se realice en este último sentido, no debe circunscribirse a uno de los elementos en particular, sino que es necesario el análisis del comportamiento

tanto del molino como del ventilador, vistos en su conjunto como una unidad.

Sobre la productividad Q de un molino de bolas, influyen un conjunto de factores tecnológicos como son: el grado de llenado con bolas ϕ del molino, su velocidad de rotación, su revestimiento interno, el grado de desgaste de las bolas, etc. (Avilov, Karnaujov y Ziubroski, 1987; Coello, 1993; Valderrama y Magne, 1996). También influye un conjunto grande de factores propios de las características del mineral como son: el tipo de mineral, el grado de dureza, la humedad, etc. (Avilov, Karnaujov y Ziubroski, 1987). Debido a la complejidad del proceso de molienda, la información sobre la relación existente entre la productividad y la eficiencia energética de una unidad, debe ser obtenida mediante un estudio de la misma en sus condiciones concretas de explotación, con la aplicación de técnicas estadísticas que permitan valorar no sólo la influencia de aquellos factores fundamentales conocidos, sino también de aquéllos de carácter secundario y de naturaleza casual.

Por muchos criterios ha sido propuesta una amplia gama de fórmulas teóricas y empíricas basadas en la teoría de Davis. Según Coello (1993), en la formulación de su teoría, criticó una serie de elementos de importancia circunstancial, cuyo reflujo se expresa en la dispersión entre los resultados empíricos y los estimados por dichas fórmulas. Se reconoce que cada criterio ha intentado rectificar las omisiones de Davis; sin embargo para la gran mayoría de ellos el principal supuesto desafortunado ha consistido en considerar la carga de bolas como un solo cuerpo compacto que se mueve por el interior de la pared del tambor. A juzgar por ello, no es consecuente ni objetivo su empleo para la valoración del proceso de molienda; por esta razón, toda valoración de las instalaciones de molienda debe centrarse en la evaluación de los consumos energéticos totales por tonelada de mineral consumido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en tres de las unidades de molienda que forman parte del proceso de preparación de mineral en la zona niquelífera ubicada al norte de la provincia de Holguín. Las características técnicas fundamentales de estas unidades son las siguientes:

Molino de bolas cilindro cónico, tipo MB 3040 x 1670

Productividad nominal $Q_n = 47 \text{ t/h}$

Accionamiento del molino con motor de inducción trifásico:

Potencia nominal del motor $P_n = 294 \text{ kW}$

Ventilador de recirculación tipo centrífugo:

Gasto nominal del ventilador $Q_{vn} = 1313 \text{ m}^3/\text{min}$

Accionamiento del ventilador con motor de inducción trifásico:

Potencia nominal del motor del ventilador $P_n = 150 \text{ Kw}$

Alimentador de la unidad tipo tambor:

Productividad nominal del alimentador $Q_a = 0.0264 \text{ m}^3/\text{h}$

Velocidad de rotación $n_a = 32 \text{ r/min}$

Accionamiento del alimentador con motor de inducción trifásico

Potencia nominal del motor $P_{an} = 3.0 \text{ kW}$

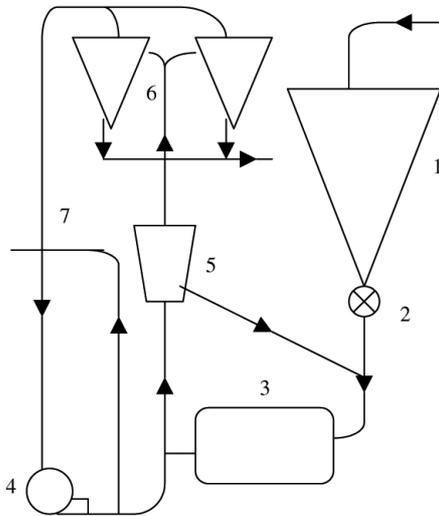


Fig. 1. Esquema típico de una unidad de molienda, para el procesamiento seco de la laterita. 1-tolva de mineral; 2- alimentador; 3-molino de bolas; 4- ventilador de recirculación; 5- separador; 6- ciclones; 7- sistema de tuberías.

En la Fig. No 1, se detalla la posición que ocupa cada uno de estos equipos dentro del esquema tecnológico de la unidad.

Fueron objeto de medición las energías consumidas por los motores de los molinos P_m y de los ventiladores P_v en cada unidad de molienda, y se consideran intervalos de 1 hora. Como instrumentos de medición utilizamos contadores de energía trifásicos del tipo CAZY-I670, con clase de precisión 2.0. Para la medición de potencias, corrientes y tensiones en los diferentes equipos utilizamos el instrumento combinado del tipo K506 con clase de precisión 0.5. La productividad Q de cada unidad fue estimada mediante la medición de la potencia del motor del alimentador en cada ciclo de trabajo, con el uso de la relación existente entre dicha potencia y la cantidad de mineral entregado por el alimentador en cada ciclo. Esta relación fue establecida experimentalmente. Las mediciones abarcaron los tres turnos de trabajo por un período superior a los 30 días.

Tabla 1. Factores de correlación hallados entre las diferentes magnitudes analizadas, y la productividad Q , para grados de llenado en bolas ϕ , de 0.27 y 0.38

Grado de llenado en bolas, ϕ	Magnitudes analizadas			
	P_m	P_v	w_m	w_v
0.27	0.39	0.15	-0.85	-0.86
0.38	0.36	0.03	-0.96	-0.93

RESULTADOS

En la Tabla 1 mostramos los diferentes factores de correlación hallados entre las principales magnitudes que

caracterizan el trabajo de la unidad de molienda, desde el punto de vista energético y la productividad Q .

Tabla 2. Comportamiento de las potencias máxima y mínima de un molino de bolas para diferentes grados de llenado en bolas, ϕ

Indicadores	ϕ			
	0.20	0.27	0.38	0.44
Núm. de medic, n	30	61	65	30
$P_{m\acute{a}x}$, kWh	136	150	216	245
$P_{m\acute{i}n}$, kWh	120	136	196	228
Dif, %	13	10	10	7

En la Tabla II se refleja el comportamiento de los valores máximos y mínimos de la energía consumida por el molino de una de las unidades de molienda, a la cual se le fue incrementando el grado de llenado con bolas j , desde 0.20 hasta 0.44. En dicha tabla, n representa el tamaño de la muestra y, además,

$$Dif = (P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n}) / P_{m\acute{a}x} \times 100\%$$

Tabla 3. Potencias máxima y mínima observadas en tres molinos con grados de llenado en bolas ϕ , para los valores 0.41, 0.43 y 0.44 respectivamente

Indicadores	Molinos de bolas		
	1	2	3
ϕ	0.41	0.43	0.44
Núm. de medic, n	32	34	30
$P_{m\acute{a}x}$, kWh	239	256	245
$P_{m\acute{i}n}$, kWh	215	236	228
Dif, %	11	8	7

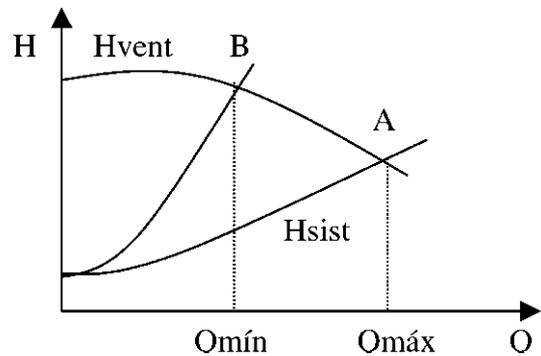


Fig. 2. Características conjuntas $H = f(Q)$, para el ventilador de recirculación y su sistema aerodinámico.

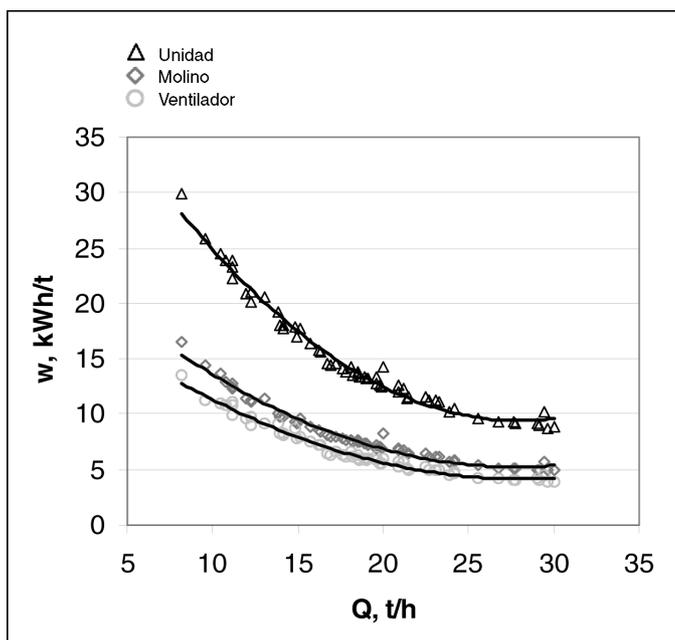


Fig. 3. Características energéticas de una unidad de molienda y de sus agregados, con $\phi = 0.27$.

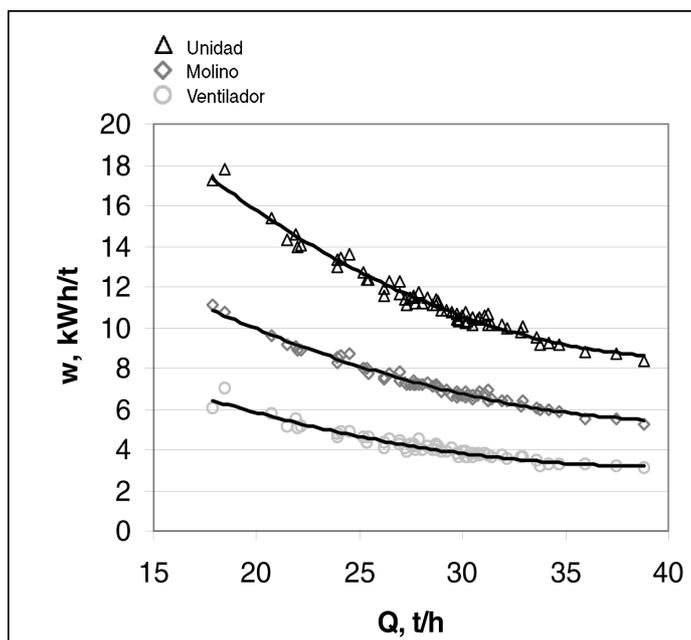


Fig. 4. Características energéticas de una unidad de molienda y de sus agregados, con $\phi = 0.38$

En la Tabla III se hace una comparación de los valores máximos y mínimos observados para las energías consumidas por los molinos de tres unidades de molienda con grados de llenado de bolas ϕ entre 0.41 y 0.44.

En la tabla IV se compara el comportamiento de dos unidades que trabajan en vacío ($Q=0$) y con la carga promedio; en dicha tabla, P_o : potencia demandada por el molino en ausencia de mineral, y

$$Dif = (P_o - P_{prom}) / P_o \times 100 \%$$

Tabla 4. Comportamiento de las potencias en dos unidades de molienda que trabajan en vacío ($Q=0$)

Potencia kW	Unidades de molienda					
	1		3			
	Mol	Ven	Un	Mol	Ven	Un
No	260	170	430	265	150	415
N_{prom}	229	137	366	235	116	351
Dif., %	13	24	17	13	29	18

La fig. 2 muestra las características conjuntas $H = f(Q)$, del ventilador y del sistema aerodinámico.

Las figuras 3 y 4 muestran las características energéticas obtenidas para una unidad de molienda y sus componentes fundamentales cuando el molino trabaja con $\phi = 0.27$ y $\phi = 0.38$, respectivamente. Aplicando el método de los mínimos cuadrados, hallamos los modelos siguientes (para $\phi = 0.38$):

$$W_m = 172 Q^{-0.951} \text{ con la desviación } s^2 = 0.980$$

$$W_v = 113.5 Q^{-0.99} ; s^2 = 0.936$$

$$W_U = 286 Q^{-0.968} ; s^2 = 0.976$$

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados que se muestran en la Tabla I, ponen de manifiesto que prácticamente no existe correlación entre las energías consumidas por el molino y el ventilador con respecto a la productividad de la unidad de molienda durante el procesamiento del mineral laterítico. En el caso del molino, la potencia que éste demanda, depende en lo fundamental de su grado de llenado con bolas ϕ (Coello, 1993). Para uno de los molinos que trabaja con $\phi = 0.38$, esto representa una carga de bolas de 28 t. La cantidad máxima de mineral observada durante un ciclo de alimentación fue de 0.40 t, con una permanencia de 40 s. Esta masa de mineral representa sólo el 1.4% de la masa de bolas, luego su influencia es insignificante, desde el punto de vista cuantitativo, sobre la potencia demandada por el molino, lo que está en correspondencia con el bajo factor de correlación hallado entre P_m y Q .

En el caso del ventilador, la potencia demandada por éste, según Ramos (1995), está dada por la siguiente expresión:

$$N_v = \frac{P_t Q_v}{\eta_v \eta_t} 1000 \text{ kW} \quad [1]$$

Donde:

P_t : presión total, en Pa.

Q_v : gasto del ventilador, en m^3 / s .

η_v : rendimiento del ventilador

η_t : rendimiento de la transmisión

Se observa que iguales valores de productividades Q de la unidad de molienda, se obtienen con diferentes valores de gastos Q_v del ventilador y, por consiguiente con diferentes valores de la energía que éste consume; como resultado de esto, no se establece una relación determinada entre Q y P_v . A pesar de estos bajos factores de correlación, existen diferencias apreciables entre los valores máximos y mínimos de energías correspondientes a los molinos y ventiladores, según se refleja en las Ta-

blas II y III. Al interpretar estos resultados puede suponerse que para los valores mínimos de energía corresponden las productividades mínimas y viceversa; sin embargo ya fue demostrado que no existe un enlace correlacional significativo entre estas magnitudes y, por otro lado los valores máximos y mínimos de productividades observados, en ningún caso se corresponden con los máximos y mínimos de energías.

Al estudiar el trabajo en vacío ($Q = 0$) de las unidades de molienda, observamos que, según la Tabla IV, los valores de energía consumida por los equipos en este régimen de trabajo no sólo son superiores a los valores promedios observados en condiciones de carga, sino que también son superiores a los valores máximos. Para el caso del molino, este apreciable cambio de potencia que se produce entre el trabajo con ausencia de mineral y con carga, halla su explicación en el análisis de la dinámica del proceso de molienda.

Para el caso del ventilador, a medida que aumenta la cantidad de mineral en la descarga del molino, aumenta la resistencia H del sistema aerodinámico, con lo cual disminuye el gasto Q_v del ventilador y, por consiguiente, según la expresión [1], disminuye la potencia demandada por éste. En el caso contrario, a medida que disminuye la cantidad de mineral en las tuberías (ver Fig. 1), disminuye la resistencia H y en la característica conjunta del ventilador y del sistema (Fig. 2), se aprecia que el punto de operación se desplaza hacia la zona de mayores gastos a la cual corresponden mayores potencias. Es decir, el mineral actúa como una válvula de regulación del gasto del ventilador, se obtiene el máximo gasto, y, por consiguiente, la máxima potencia del ventilador, para el caso en que no exista mineral en el sistema.

En correspondencia con esta explicación, los resultados expuestos en las Tablas III y IV pueden ser interpretados como la manifestación del surgimiento frecuente de intervalos, en los cuales la cantidad de mineral en el sistema es muy pequeña o prácticamente nula, lo que propicia la aparición de picos en las potencias del molino y del ventilador; bajo ciertas circunstancias estos picos pueden llegar a tener una influencia tal que las fluctuaciones de las energías consumidas por la unidad de molienda entre una hora y otra de trabajo, pueden diferenciarse hasta en un 10%, independientemente de las productividades que se hayan alcanzado en ese período.

La observación del sistema de alimentación del molino, nos indica las causas fundamentales por las cuales se producen los picos de potencia:

1. La formación de arcos de resistencia en el interior de las tolvas de alimentación (Fig 1), lo que provoca un trabajo irregular en el régimen de carga del alimentador, el cual puede llegar a trabajar incluso en vacío.
2. El sistema de control automático del accionamiento del alimentador, basado en la señal de corriente del ventilador de recirculación (esta corriente crece con la disminución del mineral en el sistema), permite espacios frecuentes en los cuales el sistema queda prácticamente sin mineral y la alimentación se retarda.

La combinación de estos dos factores tiene influencia negativa tanto sobre la productividad como sobre la energía consumida por la unidad de molienda.

Los altos valores de factores de correlación hallados para los consumos específicos del molino y del ventilador con respecto a la productividad (Tabla I) revelan un alto grado de enlace correlacional entre estas magnitudes. Los cálculos demuestran la naturaleza no lineal de estos enlaces y la posibilidad de ajustarlos a modelos de la forma $w = A_0 + Q^b$ con un alto grado de aproximación, con lo cual se obtienen las características energéticas que se muestran en las figuras 3 y 4. Al comparar ambas figuras observamos que la unidad de molienda exhibe mejores índices energéticos para el mayor valor de φ , a la vez que aumenta su productividad, lo que está en correspondencia con lo planteado en (3). Del análisis de la característica de la unidad se infiere que si son adoptadas las medidas pertinentes para lograr valores cercanos a la productividad nominal, es posible alcanzar una mejoría de la eficiencia energética de hasta un 55% con relación al valor promedio observado.

CONCLUSIONES

1. En el proceso de molienda seca del mineral laterítico, en condiciones concretas de explotación, no existe enlace correlacional significativo entre la productividad de una unidad de molienda y la energía consumida por esta.
2. Las ausencias ocasionales de mineral en el sistema originan picos crecientes en las potencias que demandan tanto el molino como el ventilador, lo que se refleja en una oscilación apreciable de la energía consumida por la unidad de molienda entre una hora y otra, independientemente de la productividad.
3. Las características energéticas halladas por vía experimental, en las condiciones concretas de explotación, permiten valorar las reservas existentes en el sistema. En el caso objeto de estudio, la reducción de los consumos específicos desde 33 kWh / t hasta 15 kWh / t permitirá el mejoramiento de la eficiencia energética del proceso de molienda en un 55%.

BIBLIOGRAFÍA

- Avilov, B. N., Karnaujov y Ziubroski (1987): *Ahorro electroenergético en las plantas beneficiadoras de mineral*. Niedra.
- Coello Velázquez, Alfredo y Oleg Tijonov (1996): "Regularidad en la molienda de los minerales lateríticos" en *Revista Minería y Geología*. Vol XIII, No. 13.
- Coello Velázquez, Alfredo (1993): "Perfeccionamiento de la tecnología de la molienda seca del mineral laterítico". San Petersburgo, Tesis de Doctorado.
- Estévez Reyes, Ariel (1997): "Optimización del proceso de molienda en los molinos de bolas de la planta de preparación de mineral de la empresa Cmdte Ernesto Che Guevara". ISMM, Moa, Holguín, Tesis de Grado.
- Herbst, L. y R. Zaragoza (1990): "Experiencias en la optimización de circuitos de molienda" en *Procesamiento de minerales*. Año 11, 4.
- Ramos Pérez, Néstor (1995): *Bombas, ventiladores y compresores*. ISPJAE.
- Valderrama, W. y L. Magne (1996): "Efecto del diseño de revestimientos sobre el consumo de potencia de molienda". *Cenin*. Revista de Metalurgia. Volumen 16, 61.
- Wells, B. A. (1990): "Comminution in the mineral industry—an over view" en *Rev Minerals Ingeneering*. Vol 3, 2.