

Modelos para determinar variables importantes en el proceso caron. Parte I: consumo específico de energía en molienda

Models to determine important variables in the caron process. Part I: specific energy consumption in milling

Hugo Javier Angulo Palma¹ (hangulo@cil.moa.minem.cu) (<https://orcid.org/0000-0002-5012-0348>)

Angel Legrá Legrá² (alegra@cil.moa.minem.cu) (<https://orcid.org/0000-0002-4456-6546>)

Carlos Hernández-Pedrera³ (pedrera@uo.edu.cu) (<https://orcid.org/0000-0003-2572-0891>)

Resumen

La investigación muestra los resultados obtenidos al utilizar un modelo estadístico cuadrático para predecir el consumo específico de molienda en función del incremento del porcentaje del carbón bituminoso, en el rango de 3,5 a 5,5, en una mezcla formada por el carbón y la mena laterítica. El modelo cuadrático se determinó a partir de las opciones que brinda la utilización de los diseños de experimentos de mezclas del software profesional estadístico STATGRAPHICS Centurión XV, que presenta un coeficiente de correlación ajustado superior al 90%, un residuo que osciló en el rango de -1,2 a 1,2 y un error estándar de 0,9122%.

Palabras claves: Modelo estadístico, índice de trabajo de Bond, proceso Caron.

Abstract

The research shows the results obtained by using a quadratic statistical model to predict the specific milling consumption as a function of the increase in the percentage of bituminous coal, in the range of 3.5 to 5.5, in a mixture formed by coal and laterite ore. The quadratic model was determined from the options provided by using the mixture experiment designs of the STATGRAPHICS Centurion XV professional statistical software, which has an adjusted correlation coefficient greater than 90%, a residual that ranged from -1.2 to 1.2 and a standard error of 0.9122%.

Key words: Statistical model, Bond work index, Caron process.

Justificación y antecedentes

Los procesos de conminución consumen aproximadamente el 29% de la energía total en minería, con una estimación del consumo en el mundo de alrededor de un

¹ Máster en Ingeniería de Procesos Químicos. Investigador Agregado. Centro de Investigaciones del Níquel. Profesor Asistente. Universidad de Moa. Holguín. Cuba.

² Ingeniero Metalúrgico. Centro de Investigaciones del Níquel. Universidad de Moa. Holguín. Cuba.

³ Doctor en Ciencias. Ingeniero Químico. Profesor Titular. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. Cuba.

porcentaje de tres a un cuatro, razón fundamental que justifica los diferentes estudios que se realizan anualmente con el objetivo de incrementar su eficiencia al menor costo posible (Álvarez, Menéndez, Dzioba y Coello, 2013).

Actualmente se reconoce que uno de los equipos con más utilidad en los procesos de conminución son los molinos de bolas, se determina el consumo específico de energía a partir del procedimiento del índice de Bond (Álvarez, González, Coello y Menéndez, 2016).

El índice de trabajo de Bond (W_i) es el método más conocido para el diseño de los molinos industriales y expresa la resistencia del material, es numéricamente igual al kW-h por tonelada corta (907 kg) requerido para reducir el material de un tamaño teóricamente infinito al 80% del pasante del tamaño de corte fijado (Kumar, 2018). Su ecuación básica es:

$$W_i = \frac{44.5}{P_{\text{corte}}^{0.23} * Gbp^{0.82} * \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \dots (1)$$

Donde:

P_{corte} es la abertura en micras de la malla de corte utilizada para cerrar el circuito.

Gbp es el índice de molturabilidad del material en los molinos de bolas, en gramos/revoluciones.

F_{80} es el tamaño correspondiente al 80% de pasante de la alimentación fresca, en micras.

P_{80} es el tamaño correspondiente al 80% de pasante del producto final, en micras.

Hasta la fecha las principales investigaciones realizadas en el proceso de molienda han sido orientadas a la simulación a partir de modelos que se basan en el balance de masa de la población de partículas (Venkataraman y Fuerstenau, 1984).

En el caso de los minerales multicomponentes con composición sustancial variable se reconoce que los estudios realizados son escasos (Coello, Menéndez, Hechavarría, Sánchez y Álvarez, 2011; Kumar, 2020).

Específicamente en Cuba uno de los circuitos de molienda analizados es el de la planta industrial de Punta Gorda, ubicada en el noreste de la provincia Holguín (Coello, Quijano, Menéndez, Pole y Llorente, 2019).

La planta de Punta Gorda utiliza la tecnología carbonato-amoniaco, también conocida como proceso Caron (Angulo, Merencio, Legrá y Videaux, 2017), con el objetivo de extraer selectivamente el níquel y el cobalto al procesar las menas lateríticas en forma de óxidos a presión atmosférica (Chen, Jak y Hayes, 2019, 2020; De Alvarenga, Gouvêa y De Albuquerque, 2019).

La molienda de las menas lateríticas en el proceso Caron se realiza por vía seca y tiene como objetivo disminuir el tamaño de la mena hasta lograr que el producto que se alimenta a los hornos de reducción presente entre un 80-85% de la clase menor de 0,074 mm por proyecto, lo que equivale a incrementar la superficie específica del material para poder lograr un óptimo contacto con los gases reductores en los hornos de reducción (Coello, Llorente y García, 2020).

Se sabe que en la conminución de la mena laterítica en la planta de Punta Gorda, la energía consumida propiamente en la fragmentación del material es de menos del 1% de la energía consumida por la máquina, mientras que la molienda consume más del 21% de toda la energía consumida por la fábrica (Coello, 2015; Coello y otros, 2020).

En la década de 1990 se introduce como cambio tecnológico la adición del petróleo pesado como aditivo reductor en la planta de Punta Gorda, añadido directamente al mineral antes de ser introducido en los molinos. El cambio, a pesar de mejorar las extracciones de níquel y cobalto en el proceso de reducción, provocó un incremento en el consumo de energía en el proceso de molienda y una disminución de la productividad de los molinos debido a la adhesión del mineral en las bolas y en las paredes del molino (Coello y otros, 2020).

Un estudio realizado a escala de laboratorio determinó que la sustitución parcial del petróleo utilizado como aditivo reductor por el carbón bituminoso, en un porcentaje inferior al 4,5%, puede ser una de las alternativas que permite la disminución de los consumos de energía en los molinos (Angulo, Legrá y Coello, 2020), sin que se generen disminuciones en la eficiencia metalúrgica y extracciones de los metales de interés en los procesos de reducción-lixiviación. La investigación se basó en determinar cómo se afectaba el índice de Bond a medida que se incrementaban los contenidos del carbón, al analizar las diferentes mezclas formuladas como minerales multicomponentes (Angulo, Hernández, Lamorú y Toro, 2020).

La introducción de este nuevo aditivo genera la necesidad de predecir el consumo de energía de molienda a medida que varía el porcentaje másico del carbón bituminoso en el proceso, ya que a escala industrial es imposible mantener la relación laterita/carbón bituminoso constante.

Una de las herramientas a considerar para la solución de esta problemática es la asociación entre el consumo específico de molienda y los contenidos de carbón bituminoso y mena laterítica mediante la utilización de los modelos estadísticos, tomando como referencia que han sido empleados en otras áreas de la tecnología carbonato-amoniaco (Cala, Rodríguez, Mazar y Breffe, 2019; Rojas y otros, 2019).

De acuerdo con lo antes planteado se presenta el siguiente artículo en el que se determinó la exactitud de diferentes modelos estadísticos para predecir el consumo de energía de molienda, a partir de la determinación del índice de Bond, a medida que aumente el contenido de carbón bituminoso en la mezcla resultante.

Data utilizada para determinar el índice de Bond en función del incremento del carbón bituminoso en las mezclas

A partir de los resultados alcanzados por Angulo y otros (2020), y las facilidades que brinda la utilización de los diseños de experimentos de mezclas del software profesional estadístico STATGRAPHICS Centurión XV, se evaluaron diferentes modelos estadísticos con la finalidad de determinar cuál era más exacto.

En la tabla 1 se presentan las mezclas de minerales preparadas para la determinación del consumo de energía específico mediante el índice de Bond. Se aprecia que en la investigación se hicieron cinco experimentos, en el rango de 3,5 a 5,5 % del carbón bituminoso y el resto para las menas lateríticas, a los que se le realizaron 2 réplicas.

Tabla 1 Mezclas preparadas para los ensayos de Bond

Materiales	Rango Bajo (%)	Rango Alto (%)
Carbón Bituminoso (CB)	3,5	5,5
Mena Laterítica (ML)	94,5	96,5

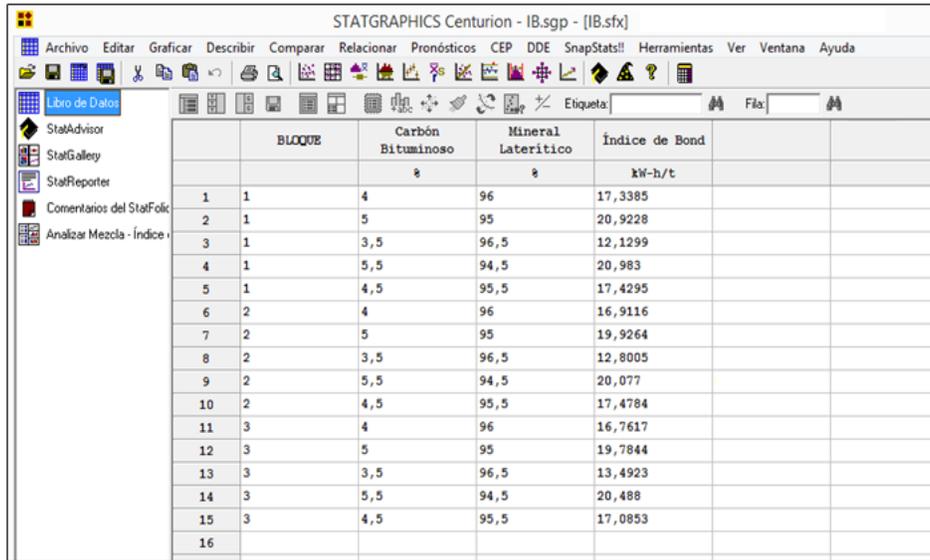
N°	Mezclas
1	CB al 3,5 %
2	CB al 4,0 %
3	CB al 4,5 %
4	CB al 5,0 %
5	CB al 5,5 %

Diseño de experimento de mezcla utilizado para determinar el índice de Bond

En la figura 1 se muestran los resultados del índice de Bond, luego de establecer como variable dependiente el consumo específico de energía y como variables independientes los porcentajes del carbón bituminoso y de la mena laterítica, se realizaron 15 corridas experimentales de acuerdo con el orden exigido por el diseño de experimento de mezcla.

Es importante resaltar que la tendencia que presenta el índice de Bond de aumentar a medida que se incrementa el porcentaje de carbón bituminoso, al ser el carbón bituminoso el mineral presente en la mezcla con más bajo índice de molturabilidad debido a que necesita un consumo energético superior para la producción de finos en los molinos de bolas. Ello indica que durante la molienda seca de la mezcla de los minerales de lateritas y carbón bituminoso sus fracciones se muelen de acuerdo con sus propias particularidades individuales. Se corrobora el estudio realizado por Coello, Méndez y Laborde (2008) al investigar las regularidades que presentan los minerales

de serpentina y limonita contenidos en las menas lateríticas con composición sustancial variable.



	BLOQUE	Carbón Bituminoso	Mineral Laterítico	Índice de Bond
		%	%	kW-h/t
1	1	4	96	17,3385
2	1	5	95	20,9228
3	1	3,5	96,5	12,1299
4	1	5,5	94,5	20,983
5	1	4,5	95,5	17,4295
6	2	4	96	16,9116
7	2	5	95	19,9264
8	2	3,5	96,5	12,8005
9	2	5,5	94,5	20,077
10	2	4,5	95,5	17,4784
11	3	4	96	16,7617
12	3	5	95	19,7844
13	3	3,5	96,5	13,4923
14	3	5,5	94,5	20,488
15	3	4,5	95,5	17,0853
16				

Figura 1 Resultados del índice de Bond utilizando el diseño de experimento de mezcla.

Efectos estimados para los modelos estadísticos

En la tabla 2 se muestran los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos del W_i .

El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes, mientras que en el modelo cuadrático y cúbico se agregan productos cruzados de componentes de segundo y tercer orden respectivamente.

Se observa en la tabla 1 que los tres modelos presentan valores-P inferiores a 0,05, lo que indica que existe una relación estadísticamente significativa entre Índice de Bond y los materiales que conformaron las diferentes mezclas evaluadas, con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 2 Parámetros para los modelos estadísticos

Modelos	Valor-P	Error Estándar	R ² (%)	R ² Ajustada (%)
Lineal		1,1355	88,03	84,77
Cuadrático	0,0000	0,9122	92,98	90,17
Cúbico		0,9321	93,40	89,74

Los tres modelos presentan un porcentaje de R^2 ajustada superior al 84%, por lo que pueden considerarse como satisfactorios; es el modelo cuadrático el que mejor se ajusta a los datos obtenidos experimentalmente por presentar el valor más bajo de error estándar (0,9122%) y el porcentaje más alto del coeficiente de correlación ajustado (90,17%).

Representación matemática y gráfica del modelo estadístico

El modelo estadístico cuadrático obtenido a partir del diseño de experimento de mezcla, figura 1, para determinar el W_i se muestra en la ecuación 2.

$$W_i = 20,5516 * x_{CB} + 13,102 * x_{ML} + 5,9773 * x_{CB} * x_{ML} \dots (2)$$

Donde:

W_i es el índice de Bond, en kW-h/t.

x_{CB} es la fracción másica del carbón bituminoso, adimensional

x_{ML} es la fracción másica de la mena laterítica, adimensional.

A juzgar por los términos que se observan en el modelo se puede concluir que presenta tres términos. El primer y el segundo término corresponden a los factores que describen la influencia del incremento del carbón bituminoso y de la mena laterítica en el índice de Bond por separado, mientras que el último término describe el efecto que genera la mezcla de minerales simultáneamente, se corroboran estos resultados en la figura 2.

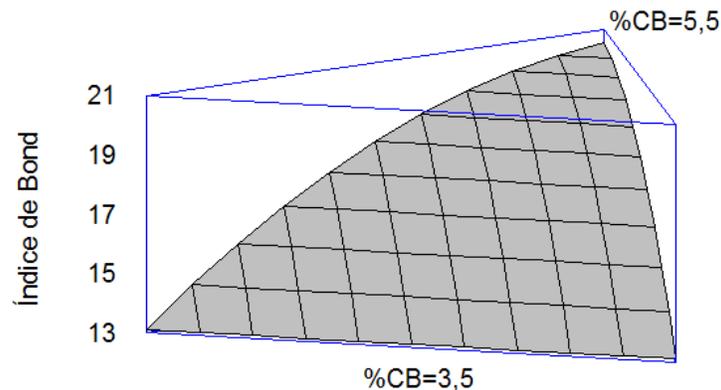


Figura 2 Representación gráfica del modelo cuadrático.

Validación del modelo estadístico

En la figura 3 se muestran los residuos del modelo, determinados por la diferencia entre los valores observados y los valores predichos, en función de los valores predichos.

A juzgar por su comportamiento se puede afirmar que los resultados logrados son satisfactorios, ya que los residuos del modelo estadístico oscilan en el rango de menos

1,2 a 1,2; presenta más exactitud su utilización cuando el porcentaje de carbón bituminoso en la mezcla oscila en el rango de 5,0 y 5,5.

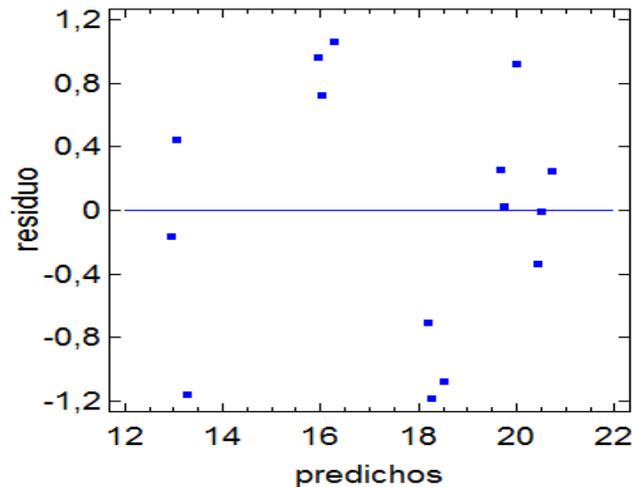


Figura 3 Valores residuales del modelo estadístico en función de los valores predichos.

Precisiones finales

A partir de los resultados logrados se puede llegar a la conclusión de que el modelo estadístico cuadrático puede ser utilizado como una herramienta para predecir el consumo de energía específico de molienda. Los valores observados experimentalmente y los determinados por el modelo mostraron un residuo que osciló en el rango de -1,2 a 1,2, con un coeficiente de correlación ajustado de 90,17% y un error estándar de 0,9122%.

Referencias

Álvarez, B., González, G., Coello, A. L. y Menéndez, J. M. (2016). Product size distribution function influence on interpolation calculations in the Bond ball mill grindability test. *International Journal of Mineral Processing*, 157, 16-20. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2016.09.004>

Álvarez, B., Menéndez, J. M., Dzioba, B. R. y Coello, A. L. (2013). Evaluación de materias primas en una planta de beneficio de arena de sílice para aumentar la eficiencia energética del proceso de molienda. *Dyna*, 80(177), 95-100. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49625661012.pdf>

Angulo-Palma, H. J., Hernández-Pedreira, C., Lamorú-Urgellés, A., & Toro-Villarroel, N. (2020). Reducción de menas lateríticas utilizando como aditivo mezclas de carbón bituminoso y petróleo. *Tecnología química*, 40(1), 93-105. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v40n1/2224-6185-rtq-40-01-93.pdf>

- Angulo-Palma, H. J., Legrá-Legrá, A., & Coello-Velázquez, A. L. (2020). Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso de molienda de los minerales lateríticos. *Sinergia Académica*, 3(2), 22-31. Recuperado de <https://doi.org/10.51736/sa.v3i2.16>
- Angulo, H. J., Merencio, P. L., Legrá, A. Videaux, L. (2017). Análisis especiales en un horno de reducción de níquel a escala de Planta Piloto. *Tecnología Química*, 37(3), 484-499. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v37n3/rtq07317.pdf>.
- Cala, Y. C., Rodríguez, A. P., Mazar, P. E. B., & Breffe, O. L. (2019). Comportamiento denso-granulométrico y químico de las colas de la tecnología Caron en Moa. *HOLOS*, 7, 1-14. Recuperado de <http://doi.org/10.15628/holos.2019.7706>
- Coello, A. (2015). Procedimiento para la determinación de la carga circulante en circuitos cerrados de trituración y molienda. *Minería y Geología*, 31(2), 66-79. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223539558005.pdf>.
- Coello, A., Llorente, L. y García, A. (2020). Efecto del petróleo aditivo en los indicadores energo-tecnológicos en los circuitos cerrados de molienda del mineral laterítico a nivel industrial. *Minería y Geología*, 36(3), 316-327. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v36n3/1993-8012-mg-36-03-316.pdf>
- Coello, A., Menéndez, J., Hechavarría, J., Sánchez, A. y Álvarez, B. (2011). Toward determining the behavior of fragmentation functions during the impact crushing of minerals. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 28(2), 82-87. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/BF03402392>
- Coello, A., Menéndez, J. M. y Laborde, R. (2008). Grindability of lateritic nickel ores in Cuba. *Powder technology*, 182(1), 113-115. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.05.027>
- Coello, A., Quijano, V., Menéndez, J. M., Pole, F. M. y Llorente, L. (2019). Use of the Swebrec Function to Model Particle Size Distribution in an Industrial-Scale Ni-Co Ore Grinding Circuit. *Metals*, 9(8), 882. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/met9080882>
- Chen, J., Jak, E. y Hayes, P. (2019). Investigation of the reduction roasting of saprolite ores in the Caron process: microstructure evolution and phase transformations. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 1-12. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/25726641.2019.1699361>
- Chen, J., Jak, E. y Hayes, P. (2020). Investigation of the reduction roasting of saprolite ores in the Caron process: effect of sulphur addition. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 1-10. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/25726641.2020.1729020>

- De Alvarenga, V., Gouvêa, C. y De Albuquerque, E. (2019). Assessing the Influence of NaCl on the Reduction of a Siliceous Laterite Nickel Ore Under Caron Process Conditions. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50(3), 1309-1321. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01552-w>
- Kumar, V. (2018). Understanding production of fines in batch ball milling for mill scale-up design using the population balance model. *Advanced Powder Technology*, 29(9), 2035-2047. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2018.05.010>
- Kumar, V. (2020). Effect of particulate environment on the grinding kinetics of mixtures of minerals in ball mills. *Powder technology*, 375, 549-558. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.072>
- Venkataraman, K. y Fuerstenau, D. (1984). Application of the population balance model to the grinding of mixtures of minerals. *Powder technology*, 39(1), 133-142. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(84\)85030-5](https://doi.org/10.1016/0032-5910(84)85030-5)