

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO-METALÚRGICO
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD DE METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE DR. EN
CIENCIAS TÉCNICAS**

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE MOLIENDA DEL MINERAL
LATERÍTICO, CON COMPOSICIÓN SUSTANCIAL VARIABLE.**

Autor: Ing. Reynaldo Laborde Brown

Tutores: Dr. C. Alfredo L. Coello Velázquez

Dr. C. Juan M. Menéndez Aguado

Dr. C. Secundino Marrero Ramírez

Moa, 2005

SÍNTESIS

En el presente trabajo se ha particularizado la aplicación de los modelos matemáticos de molienda, basados en el balance de masas de la población de partículas, a un mineral de alta complejidad y variación de su composición sustancial, como es el caso de la laterita. Son establecidas determinadas regularidades entre las funciones de la fragmentación, la composición sustancial variable y el índice de Bond. Estas regularidades son aprovechadas para la formulación de un procedimiento que permite utilizar las concepciones clásicas de la modelación en el caso en que la composición sustancial del mineral sea variable, dando solución a las limitantes que hasta el momento han existido para el empleo de estos modelos en el caso de la laterita. El trabajo está desarrollado sobre una amplia base experimental, tanto a escala de laboratorio como a escala industrial y queda demostrada la factibilidad de emplear el procedimiento propuesto en una planta en explotación, donde los costos de producción en la sección de molienda pueden ser reducidos en un 17 %, en lo que se refiere al pago de electricidad, lo que equivale al ahorro de 337.4 MUSD anualmente por este concepto.

INTRODUCCIÓN

En las últimas cuatro décadas la molienda seca de los minerales lateríticos ha sido objeto de estudio con el fin de profundizar en los complejos fenómenos que tienen lugar durante el proceso industrial y sus altos consumos energéticos. La molienda de minerales es considerada un verdadero coloso energético, consume aproximadamente el 3% de toda la energía que producen los países industrializados (Schonert, 1979), de ahí que en términos de costos, la etapa de molienda es la más significativa en el procesamiento de los minerales (M. Duarte et al, 1998). Durante los últimos 25 años los investigadores han realizado grandes esfuerzos dirigidos hacia el mejoramiento de la eficiencia de este proceso, apoyándose en la modelación y simulación matemática del mismo. Se destacan en estas investigaciones países tales como Sudáfrica, Finlandia, Australia y Canadá.

Los modelos utilizados hasta el presente con mayor éxito y difusión para la simulación de la molienda, se basan en el balance de masa de la población de partículas (F. Muller et al, 1999). En dichos modelos juegan un rol esencial dos funciones básicas de la conminución: la función razón específica de la fragmentación y la función de distribución de la fragmentación. La primera, expresa la probabilidad que tiene una partícula de ser fragmentada. Esta función depende de las características del mineral y el equipamiento (Lynch, 1977); la segunda, expresa la distribución de la progeni de partículas hijas en la fragmentación, antes de que ocurra la refragmentación. Algunos autores al describir la naturaleza de esta función (Lynch, 1977; Prasher, 1987; Austin y Concha, 1994; King, 2001), plantean la tesis de que ella no depende de las condiciones de operación. Particularmente Shoji (1979) señala que los valores de dicha función son insensibles a las condiciones de molienda al menos, en las condiciones normales de operación. En general, estas funciones han sido ampliamente investigadas y aplicadas en la modelación y simulación de los circuitos de molienda, con una gran cantidad de minerales cuya composición sustancial es invariable (cuarzo, cromita, dolomita, magnetita, granito, oro, etc). En el caso de los minerales multicomponentes, es escasa la bibliografía, aunque aparecen algunos trabajos donde se toma como alternativa la de determinar las funciones de la fragmentación para cada componente por separado (Ramírez y Finch, 1980). En el caso particular del mineral laterítico del yacimiento de Punta Gorda (ubicado al este de la provincia de Holguín), estudios preliminares han puesto de relieve la alta complejidad de este tipo de mineral y la conveniencia de tratarlo como un mineral multicomponente, donde la

variación de su composición sustancial está dada por la proporción en que se mezclen las componentes limonítica y serpentinitica, (Coello 1993 a, Coello 1993 b , Coello y Tijonov, 1996).

Como parte del programa de perfeccionamiento empresarial de las empresas niquelíferas cubanas, procesadoras del mineral laterítico, surge la necesidad de elevar la eficiencia del proceso de molienda, para lo cual a su vez es imprescindible la modelación y simulación matemática de dicho proceso, sin embargo, en la literatura está poco tratado el tema de la aplicación de la concepción clásica de la modelación a los minerales multicomponentes, con composición sustancial variable, de aquí surge el siguiente *problema científico*:

La alta variabilidad y complejidad de la composición sustancial del mineral laterítico y su clasificación como un mineral multicomponente, limitan la aplicación de la concepción clásica utilizada en la modelación y simulación del proceso de molienda de este tipo de mineral.

Sobre la base de este problema, se establece el objeto de la investigación, los objetivos del trabajo y la hipótesis científica.

Objeto de estudio: la modelación y simulación del proceso de molienda del mineral laterítico.

Campo de acción: modelación y simulación de un mineral multicomponente, con composición sustancial variable.

Objetivo general: desarrollar la modelación matemática de la molienda tomando como base el balance de masa de la población de partículas considerando la alta variabilidad de la composición sustancial del mineral laterítico como principal limitante en el empleo de las concepciones clásicas.

Objetivos específicos:

1. Determinar el índice de Bond para el mineral laterítico y las regularidades del comportamiento de las funciones de la fragmentación de este mineral.
2. Establecer un procedimiento para la modelación y simulación de la molienda del mineral laterítico con composición sustancial variable.

A partir de este diseño metodológico se definen las siguientes *tareas de investigación*:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Determinación del comportamiento del índice de Bond, para el mineral laterítico con composición sustancial variable.

3. Determinación del comportamiento de las funciones de la fragmentación para la molienda de la laterita con, a escala de laboratorio y en el proceso industrial.
4. Determinación de la variabilidad de la composición sustancial del mineral laterítico, en el proceso de molienda industrial.
5. Establecimiento del procedimiento para la modelación y simulación del proceso de molienda de la laterita, tanto a escala de laboratorio como a escala industrial.

Se plantea como *hipótesis del trabajo* que, si se comprueba que el mineral laterítico presenta una molibilidad variable, entonces para la modelación y simulación matemática del mismo, empleando los modelos basados en el balance de masa de la población de partículas, es necesario utilizar los parámetros de las funciones de la fragmentación en forma de variables, que expresen las regularidades de dichas funciones con respecto al cambio de la composición sustancial del mineral.

Consecuentemente con el cumplimiento de los objetivos propuestos y la hipótesis planteada, constituyen novedades y aportes del trabajo las siguientes:

1. Se establecen las regularidades entre las funciones de la fragmentación, el índice de Bond y la composición sustancial variable del mineral laterítico
2. Se realiza la adaptación de los modelos de molienda basados en el balance de masa de la población de partículas, a la molienda de un mineral con composición sustancial variable.

Metodología de trabajo.

Para la realización del trabajo se tomaron muestras del mineral laterítico en el yacimiento de Punta Gorda, y en el proceso de molienda de la empresa "Comdte Ernesto Che Guevara". Con estas muestras fueron preparadas diferentes mezclas de serpentina y limonita para simular la variación de la composición sustancial del mineral. Las muestras fueron sometidas a ensayos de molienda en molinos de laboratorio y a partir de los resultados obtenidos fueron determinadas la molibilidad de las mismas, los parámetros de las funciones de la fragmentación y las regularidades entre dichas funciones respecto la variación de la composición sustancial del mineral, hecho que fue aprovechado para la formulación de un procedimiento que permite aplicar los modelos del balance de masa de la población de partículas, a un mineral multicomponente con composición sustancial variable. El procedimiento se hizo extensivo al proceso industrial, donde fue validada su efectividad.

I.- MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

Introducción

En el presente capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos relacionados con los temas que son discutidos en la bibliografía consultada, con el fin de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resultan esenciales para el desarrollo del trabajo.

Son tratados temas relacionados con las funciones de la fragmentación, con la modelación y simulación matemática del proceso de molienda y con los diversos usos del índice de Bond.

Los objetivos específicos de este capítulo son los siguientes:

1. Exponer los fundamentos teóricos de la modelación y simulación matemática del proceso de molienda de los minerales.
2. Analizar los trabajos precedentes relacionados con la modelación y simulación de la molienda del mineral laterítico con composición sustancial variable.

1.1 Generalidades sobre las funciones de la fragmentación.

El estado del arte actual, en la modelación y simulación matemática de los proceso de reducción está basado esencialmente en dos conceptos fenomenológicos-mecanicistas, la función de selección o función razón de la fragmentación y la función de distribución de la fragmentación (Epstein, 1947). Estas dos funciones de la conminución son básicas para la representación de un modelo realista y el conocimiento detallado de sus estructuras es esencial para la simulación del proceso

La razón específica de la fragmentación $S(x)$, es definida como la fracción de partículas del punto de tamaño x , fragmentadas en la unidad de tiempo. Representa la probabilidad de las partículas de ser fragmentadas (Lynch, 1980).

La función de distribución de la fragmentación $B(x,y)$ representa la proporción de partículas inicialmente de tamaño y que aparece en la gama granulométrica menor que x después de la fragmentación. (Lynch, 1980).

En los trabajos desarrollados por S. R. Broadbent y T. G. Callcott (1956), A. J. Lynch (1980), E. G. Kelly y D.J Spottiswood (1990), entre otros, están ampliamente tratadas estas funciones de la fragmentación. En los trabajos examinados, relacionados con la determinación de las

funciones de la fragmentación aparecen algunos ejemplos desarrollados para un grupo de materiales (antracita, cuarzo, mica, granito, galena, piritita, calcita, etc) sin embargo no se hace referencia a la determinación de estas funciones para el mineral laterítico con composición sustancial variable, (el término de *composición sustancial variable* ha sido introducido para denotar las proporciones en que se combinan las componentes mineralógicas fundamentales en un mineral multicomponente, para el caso de la laterita nos referimos a la relación serpentina-limonita).

1.2. Modelos de la molienda, basados en el balance de masa de la población de partículas.

La aplicación de las funciones de la fragmentación aparece, en primer lugar, en la ecuación integrodiferencial de la cinética de la molienda (Bass, 1954; Filippov, 1961; Gaudin y Meloy, 1962; Gardner y Austin, 1962):

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial t} = -S(x) M(x,t) + \int_x^\infty S(y) b(x,y) M(y,t) dy \dots\dots\dots 1.1$$

y en la ecuación diferencial:

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = -S_i(t) M_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} S_j(t) b_{i,j}(t) M_j(t) \dots\dots\dots 1.2$$

Estas ecuaciones constituyen modelos basados en el balance de masa de la población de partículas en régimen estacionario, con tamaño y tiempo continuo. La solución analítica general a la ecuación integrodiferencial es complicada y no ha encontrado una aplicación práctica (Bass, 1954). Diferentes autores han intentado buscar soluciones analíticas más simples utilizando funciones especializadas para las funciones de la fragmentación (Gaudin y Meloy, 1962; Harris, 1968; Austin et al, 1972; Gupta y Kapur, 1976), sin embargo, se mantienen las dificultades para la aplicación práctica, por lo que los investigadores se han inclinado hacia el uso de los modelos de cinética de molienda de tamaño discreto, Bass, 1954; Reid, 1965; Mika, 1967; Austin 1971/72; Olsen, 1972; Whiten, 1974, entre otros.

A partir de la expresión (1.2), Bass (1954) ha planteado el modelo:

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = -S_i M_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} S_j b_{i,j} M_j(t) \dots\dots\dots (1.3)$$

para $i = 1, 2, 3, \dots$

Este es el modelo de la cinética de la molienda que ha encontrado mayor aplicación práctica. Soluciones analíticas al mismo han sido propuestas por Reid, (1965) y Olsen, (1972). Gupta y Kapur (1974), introducen la función reducida de Bass como una ruta alternativa para obtener los parámetros de la molienda:

$$S_j B_{i,j} = A_g(x_i) = S_i \dots\dots\dots (1.4)$$

y presentan entonces el llamado modelo de la función reducida de Bass, cuya forma matricial es:

$$M(t) = [\Theta(t)]^v M(0) \dots\dots\dots (1.5)$$

donde M(t) es un vector que representa al producto, M(0) es el vector que representa a la alimentación y $\Theta(t)$, es una matriz triangular inferior de orden n x n, llamada la matriz del molino y cuyo elemento $\Theta_{i,j}$ es la fracción de material inicialmente en el tamaño j, que es encontrada en el intervalo de tamaño i después de sufrir repetidos ciclos de fragmentación durante un período t.

Dada la relativa simplicidad de este modelo, el mismo es ampliamente utilizado en la simulación. En la literatura examinada, la mayor parte de los casos en que se han aplicado los modelos del balance de masa de la población de partículas, se refieren a minerales con composición sustancial invariable y de poca complejidad, no obstante aparecen algunos casos de aplicación a minerales multicomponentes de alta complejidad, como el plomo-zinc (Ramírez y Finch. 1980). Para la modelación y simulación de este mineral se determinan las funciones de la fragmentación independientes para cada componente. En esta solución, si se produce una variación de las proporciones de los componentes, entonces esto puede provocar alteración en los resultados durante la simulación del proceso. En sentido general, la teoría sobre la molienda de los minerales multicomponentes se encuentra dispersa en los trabajos de Holmes y Paching (1957), Fuerstenau (1962), Tanaka (1966), Remenii (1974), Tovorov et al (1981), Bilenko (1984, 200), Kapur y Fuerstenau (1988), Coello (1993), Coello y Tijonov (1996). El análisis crítico valorativo sobre estos trabajos arrojan como conclusión que en la molienda de los minerales multicomponentes, los minerales participantes en las mezclas, se muelen de acuerdo a sus propias regularidades individuales, independientes unos de otros (Coello y Tijonov, 2001). En estos trabajos no se hace referencia a la aplicación de los

modelos para un mineral multicomponente con composición sustancial variable, como es el caso del mineral laterítico del yacimiento de Punta Gorda

1.3.- El uso del índice de Bond y de las características energéticas del molino, como herramienta para valorar la eficiencia energética de los circuitos de molienda en operación.

El índice de Bond ha sido definido como el parámetro de la reducción de tamaño o dimensional, que expresa la resistencia del material a la trituración y a la molienda (Morrell, 2004). Este índice se ha empleado en la industria desde finales de la década del 20 del pasado siglo XX (Mosher y Tague, 2001). En diversos trabajos se dan indicaciones prácticas para facilitar la determinación del índice de Bond, con diferentes tipos de materiales, Deister (1987), Leving (1989), Lewis y Pearl (1990), Aksani y Sonmez (2000), Aguado (2001), sin embargo no aparecen referencias sobre la determinación de este índice para un mineral de composición sustancial variable como es el caso de la laterita

1.4.- Investigaciones realizadas sobre la molienda de los minerales lateríticos cubanos.

En Cuba existen dos plantas procesadoras de las minas oxidadas de níquel y cobalto, ubicadas al nordeste de la zona oriental (empresa ‘‘Cmdte Ernesto Che Guevara’’, en Moa y la empresa ‘‘Cmdte René Ramos Latour’’, en Nicaro), ambas plantas incluyen la molienda como parte del proceso de preparación de minerales y en las mismas está establecido moler de forma conjunta las fracciones serpentinitica y limonítica a razón de 1:3, sin embargo, en la práctica se observa que es difícil mantener de forma estable esta relación (Llorente, 2003). En ambas plantas se han realizado importantes trabajos dirigidos a investigar la influencia de la carga de bolas del molino sobre los indicadores energotecnológicos del proceso (Coello , 1993); las variables operacionales sobre la productividad (Aldana y Legrá, 1996); la influencia del petróleo aditivo sobre los indicadores energotecnológicos (Llorente y Coello , 2003; Zaldívar y Fajardo, 1999); El comportamiento del consumo específico de energía en la sección de molienda (Laborde , 2003; Laborde et al, 2005); y otros. En todas estas investigaciones, sobre el mejoramiento de la eficiencia energética en el proceso de molienda de la laterita, han sido tratados con profundidad problemas particulares, utilizando diversos métodos, sin embargo, están pobremente tratados los temas relacionados con los modelos de la conminución, con la

determinación del comportamiento de las funciones de la fragmentación, para el mineral laterítico y con la simulación matemática del proceso de molienda.

Conclusiones del capítulo I

1. Los fundamentos de la modelación y simulación del proceso de molienda de los minerales se encuentran en dos funciones esenciales: la función de distribución de la fragmentación y la función razón específica de la fragmentación. El comportamiento de estas dos funciones para el caso de un mineral multicomponente, con composición sustancial variable, está pobremente tratado en la literatura.
2. En los trabajos investigativos desarrollados con el mineral laterítico cubano, y en particular, con la laterita de composición sustancial variable, no han sido desarrollados los modelos matemáticos basados en el balance de masa de la población de partículas.

II.- MATERIALES Y MÉTODOS.

Introducción

La adecuada selección de los métodos y de los materiales es fundamental en todo trabajo investigativo, para garantizar su desarrollo eficaz y la veracidad de los resultados, de ahí que este haya sido uno de los momentos más cuidadoso, en cuanto a la toma y preparación de las muestras, los análisis granulométricos, la aplicación de las metodologías para la determinación del índice de Bond, la determinación de los parámetros de las funciones de la fragmentación, así como para el tratamiento de los resultados. Los objetivos específicos de este capítulo son:

1. Exponer de forma general la planificación de la investigación
2. Caracterizar los principales equipos, medios de medición, y materiales que fueron utilizados, durante el desarrollo del trabajo.
3. Exponer las principales técnicas y procedimientos utilizados durante el trabajo experimental.

2.1.- Diseño de la investigación.

Para dar solución al problema planteado, se procedió a la simulación física de la variación de la composición sustancial del mineral laterítico, mediante la preparación de un conjunto de muestras formadas a partir de diferentes mezclas de serpentina y de limonita. A estas muestras se les determinó el índice de Bond, aplicando convenientemente un diseño clásico del experimento, con el fin de conocer los posibles cambios en la naturaleza del mineral con los cambios en la relación serpentina-limonita. Revelada la molibilidad variable del mineral, son determinados los parámetros de las funciones de la fragmentación para las componentes mineralógicas fundamentales y las mezclas, a fin de establecer las regularidades de dichas funciones respecto a los cambios que experimenta el mineral en su composición sustancial. A los modelos clásicos, basados en el balance de masa de la población de partículas, donde los parámetros S_j y $B_{i,j}$, por lo general se consideran constantes para un material dado, se les incorporan las regularidades observadas en las funciones de la fragmentación del mineral laterítico, considerando los parámetros variables y se obtiene un nuevo modelo que es validado primeramente en un circuito abierto a escala de laboratorio y luego en un circuito

cerrado industrial, en la planta de Punta Gorda, dando así solución al problema científico planteado.

Un amplio programa de muestreo del mineral industrial, así como el estudio del comportamiento energético y de la productividad de una unidad de molienda, permiten realizar una valoración económica sobre el impacto que puede producir la aplicación del procedimiento propuesto para la modelación y simulación del mineral laterítico.

2.2. Principales equipos e instrumentos utilizados durante los ensayos .

Durante los ensayos de laboratorio fueron utilizados un pequeño molino cilíndrico de 190 x 245, un molino de Bond (360 x 360); un molino semi-industrial de 430 x 490, un juego de tamices de la serie Taylor (40; 25; 20; 18; 10; 8; 5; 3,5; 3; 1,5; 1; 0,85; 0,60; 0,40; 0,30; 0,20; 0.16; 0.074; 0.044 ; mm); una estufa para el secado de las muestras con rango de temperatura de 0 – 350° C, un reloj cronómetro, y otros medios auxiliares. Durante los experimentos realizados en la industria, fue utilizada una unidad de molienda integrada principalmente por el molino de bolas de 3 200 x 5 700, el cual es accionado por un motor sincrónico de 800 kW, y el ventilador de recirculación, que es un ventilador centrífugo con capacidad nominal de 134 000 m³/h, accionado por un motor asincrónico de 400 kW. Para la medición del flujo de aire en el sistema se utilizó un minibarómetro. Las mediciones de los parámetros eléctricos se realizaron mediante dos analizadores de redes: uno tipo PQM (de la serie Multilin) y otro marca ANALYST. Para el análisis de otras variables del sistema como porcentaje de humedad en el mineral, porcentaje de petróleo aditivo, etc, fueron utilizados los resultados que se obtienen diariamente en el laboratorio, con el empleo de los medios propios de la planta.

2.3. - Materiales utilizados y sus características.

Para el trabajo experimental fueron utilizadas muestras del mineral laterítico, tomadas directamente en el yacimiento de Punta Gorda, este yacimiento es un típico depósito residual de níquel, cobalto y hierro asociado a una corteza de meteorización desarrollada en forma de un potente manto, esencialmente laterítico, sobre un macizo de rocas ultrabásicas serpentinizadas. La constitución del mineral laterítico se compone de una mezcla de limonita (de carácter terroso) y de serpentinas parcialmente descompuestas y duras. Se seleccionaron muestras de las componentes serpentinitica dura, blanda y de limonita. La limonita aparece como tierra suelta o en terrones de color amarillo; por su parte el material serpentínico

presenta toda la gama desde mineral terroso hasta fracciones de rocas duras de diversos tamaños (Rojas, 1995) Este mineral está acompañado de una humedad promedio de 38%, variando desde un 30 a un 40%. El peso volumétrico del mineral seco “in situ” es de 1,20 t/m³ y el del mineral húmedo “in situ” es de 1,78 t/m³

2.4- Metodología para la determinación de la composición granulométrica

La composición granulométrica se determinó por medio del análisis de tamiz. Este análisis se realizó por vía seco-húmeda, mediante el juego de tamices de la serie Taylor con una relación de $\sqrt{2}$ entre tamices contiguos.

2.5.- Procedimiento para la determinación de los parámetros S_j de la función razón específica de la fragmentación S.

Para la determinación de los parámetros S_j de la función razón específica de la fragmentación para los distintos tipos de materiales ensayados, se hizo uso del principio de linealidad, demostrado por Sedlatscheck y Bass (1953), de la función razón específica de la fragmentación respecto a la cantidad de material a ser fragmentado. Así:

$$-\frac{d}{dt}[M_j(t)W] = S_j M_j(t)W \dots\dots\dots (2.1)$$

Si S_j es constante en el tiempo, entonces se puede expresar:

$$\log[M_j(t)/M_j(0)] = -\frac{1}{2,3} S_j t \quad \text{ó} \quad \ln[M_j(t)/M_j(0)] = -S_j t \dots (2.2)$$

donde M_j(0) es la fracción de masa del material de tamaño j para t = 0 (tamaño de alimentación). Entonces si log M_j(t) se plotea contra t, resulta una línea recta de pendiente S_j/2,3 ó -S_j.

Los ensayos de molienda, necesarios para la obtención de las ecuaciones de regresión, fueron simulados con la ayuda del modelo cinético acumulativo.

2.6. Procedimiento para la determinación de los parámetros B_{i,j} de la función de distribución de la fragmentación B.

En este trabajo fue utilizado el método de determinación indirecta, con alimentación de partículas de un solo tamaño, y en específico el método modificado de Kapur con los parámetros concentrados G y H. El procedimiento se basa en esencia en realizar ensayos de

molienda para diferentes tiempos y con los resultados obtener un conjunto de ecuaciones de regresión como la (2.). Al utilizar como alimentación un monotamaño, el segundo término de la ecuación se hace cero y los interceptos en la ordenada dan directamente los valores de los parámetros $B_{i,1}$.

$$\frac{\ln R_i(t)}{\ln R_1(t)} = B_{i,1} - \frac{H_i}{2 S_1} t \dots\dots\dots (2.3)$$

Los ensayos de molienda fueron simulados con ayuda del modelo cinético acumulativo, previa validación del mismo.

2.7.-Procedimiento para la determinación del modelo cinético acumulativo.

Para la determinación de los parámetros de los modelos de los materiales ensayados, primeramente fue investigada la granulométrica inicial del material (para $t = 0$) y luego se procedió a realizar la molienda de las muestras para diferentes tiempos. En todos los casos las muestras fueron de 1200 g

Los valores del parámetro cinético k , para cada tamaño, fueron determinados a partir de una regresión lineal de los valores del retenido del material en el tiempo, con un ajuste de la forma:

$$\ln W_{(x,t)} - \ln W_{(x,0)} = k t \dots\dots\dots (2.4)$$

Los valores de C y de n para cada tamaño se calculan a partir de los valores de k estableciendo una regresión lineal, con un ajuste de la forma:

$$\ln k = \ln C + n \ln x \dots\dots\dots (2.5)$$

2.8.- Toma de muestras en el proceso industrial.

La toma de muestras en el circuito industrial se realizó en 5 puntos que se corresponden con g_i (alimentación fresca al molino, en la banda transportadora de alimentación); f_i (entrada al molino); p_i (descarga del molino); fc (material de retorno al molino); y q_i (producto final, muestreado en la descarga de los ciclones primarios y secundarios). Las muestras fueron tomadas en el sentido del flujo, con 5 réplicas, dejando transcurrir 25 minutos entre cada campaña. En cada punto se tuvo en cuenta la masa mínima de la muestra.

Conclusiones del capítulo II

1. El diseño de la investigación, garantiza adecuadamente el tratamiento del problema planteado y fue concebido sobre la base de simular a escala de laboratorio la composición sustancial del mineral laterítico, utilizar los modelos del balance de masa de la población de partículas en esta simulación, mediante un procedimiento elaborado con este fin y luego extender la experiencia hacia el circuito cerrado industrial.
2. La selección y procesamiento del material de trabajo, durante los experimentos, con la aplicación de técnicas y de métodos reconocidos así como el empleo de equipos e instrumentos de medición en perfecto estado técnico y certificados, han garantizado la calidad y la veracidad de los resultados.
3. La aplicación de las metodologías para la determinación de las funciones de la fragmentación del mineral laterítico, constituyeron la esencia del trabajo experimental y los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO

Introducción

La determinación del índice de Bond constituye el método clásico más fiable de caracterización de un material ante la molienda, en un circuito cerrado, por ello constituye la etapa de partida en este trabajo, para luego profundizar en el estudio del comportamiento de las funciones de la fragmentación con relación a la naturaleza del mineral. Los objetivos específicos de este capítulo son los siguientes:

1. Determinar el comportamiento del índice de Bond y de las funciones de la fragmentación del mineral laterítico con composición sustancial variable.
2. Valorar el comportamiento de la productividad del molino de bolas frente a la variación de la composición sustancial del mineral.
3. Determinar la variabilidad de la composición sustancial del mineral laterítico, en el proceso tecnológico.

3.1.- Determinación del índice de Bond para el mineral laterítico, con una composición sustancial variable.

El índice de Bond fue determinado para las componentes serpentinitica, limonítica y para diferentes mezclas. Se utilizó el método clásico de forma directa (Deister, 1987) y de forma indirecta, mediante simulación de los ensayos con el modelo cinético acumulativo (B. Aksani y Sonmez, 200; Aguado, 2003). En la figura 3.1 se muestran los resultados obtenidos. Se observa una fuerte relación entre el índice de trabajo y la variación de la composición sustancial del mineral (nótese el coeficiente de determinación $R^2 = 0.95$). Interpretando el concepto del índice de Bond dado por Morrell (2004), los resultados obtenidos muestran un aumento de la resistencia del mineral a ser molido a medida que se incrementa la componente limonítica en la mezcla. A diferencia de otros materiales, como la caliza, el feldespato, la mica, la celestina, el clinker, etc, ensayados por otros investigadores (Deister, 1987; Lewis et al, 1990,;Levin, 1990; Laplante, 1993; Aksani y Sonmez, 2000; Aguado, 2003; y otros) los cuales presentan un valor único del índice de trabajo, en el caso de la laterita se revela la particularidad de que este índice varía en dependencia de la composición sustancial del mineral.

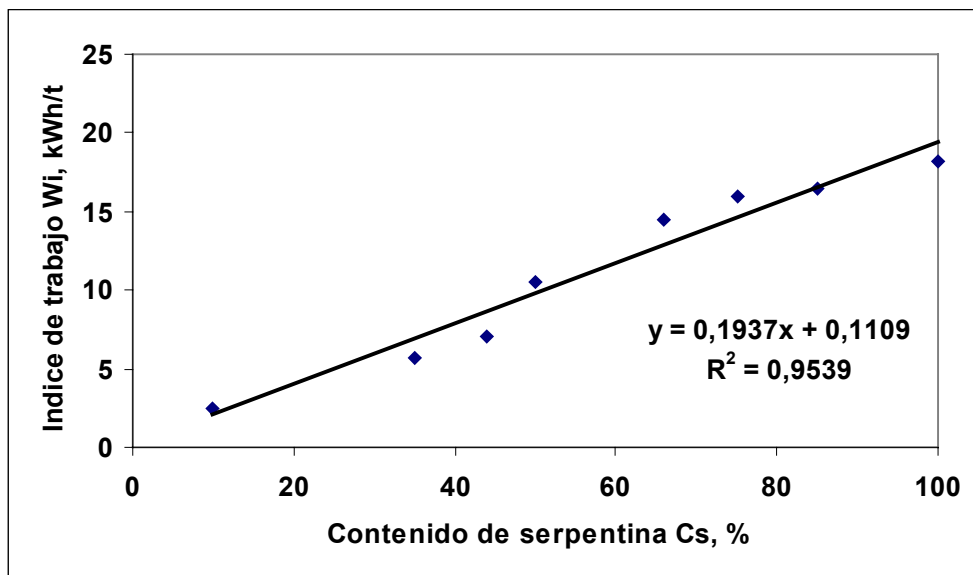


Fig. 3.1. Dependencia del índice de trabajo en función del contenido de serpentina en el mineral laterítico.

3.2. Determinación de los parámetros del modelo cinético acumulativo.

Durante la determinación de los parámetros del modelo cinético acumulativo, se observó una alta correlación entre el parámetro C_m del modelo y la relación serpentina-limonita. La relación inversa (con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.97$) ha sido propuesta como una vía para estimar la proporción en que se combinan las dos componentes mineralógicas fundamentales en una muestra de mineral laterítico. De acuerdo a esta hipótesis se obtiene una dependencia como la que se muestra en la figura 3.2, y que puede ser expresada analíticamente según la fórmula (3.1).

$$C_s = 1.9595 C_m^{-0.7649} \% \dots\dots\dots 3.1$$

El método propuesto fue comparado con el método de análisis mineralógico, con el empleo de técnicas de rayos X, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 3.1. Como se observa los resultados obtenidos por uno y otro método son semejantes, con lo cual queda validado el modelo de la expresión (3.3), como una forma de análisis de la composición sustancial del mineral, mediante ensayos de molienda.

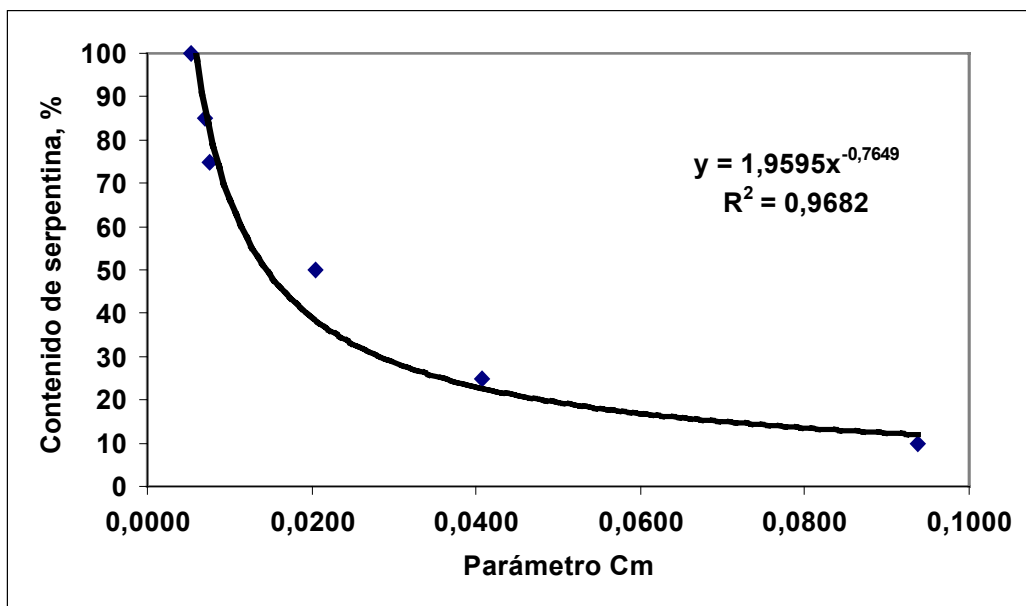


Fig. 3.2 Relación inversa de la dependencia entre el parámetro C_m y la composición sustancial.

Tabla 3.1 Comparación de los resultados obtenidos mediante análisis mineralógico y mediante ensayos de molienda.

No	Contenido de serpentina, %		
	Molienda	Rayos X	Dif, %
1	31,5	32,5	-1
2	25	25,5	-0,5
3	37	35,5	1,5

3.3 Determinación de los parámetros de la función razón específica de la fragmentación, S_j , para el mineral laterítico.

Al aplicar el procedimiento descrito en el epígrafe 2.5, para las dos componentes fundamentales del mineral laterítico y para las mezclas previamente preparadas, se obtuvo un comportamiento de la función razón específica de la fragmentación como el que se muestra en la figura 3.3. Como puede apreciarse, los parámetros de la función razón específica de la fragmentación para las mezclas ocupan un lugar intermedio con respecto a los parámetros de las dos componentes mineralógicas fundamentales. Se aprecia un aumento de los S_j con la disminución del contenido de serpentina en el mineral y viceversa por lo que mientras menor sea el contenido de serpentina en el mineral el proceso de desmenuzamiento transcurre a una mayor velocidad. Aquí se aprecia la semejanza entre el parámetro C_m , del modelo cinético acumulativo y los parámetros S_j de la función razón específica de la fragmentación.

Al investigar la relación entre los parámetros S_j y la composición sustancial del mineral se obtuvo la expresión:

$$S_j = [-0.0288 \ln(x) + 0.0238] \ln C_s + 0.1774 (x)^{0.2345} \dots\dots 3.2$$

$j = 1, 2, \dots, 10$

x : tamaño del tamiz correspondiente, en μm

C_s : contenido de serpentina en el mineral, en %

La expresión (3.2) sintetiza la regularidad observada entre los parámetros de la función razón específica de la fragmentación y la variación de la composición sustancial del mineral

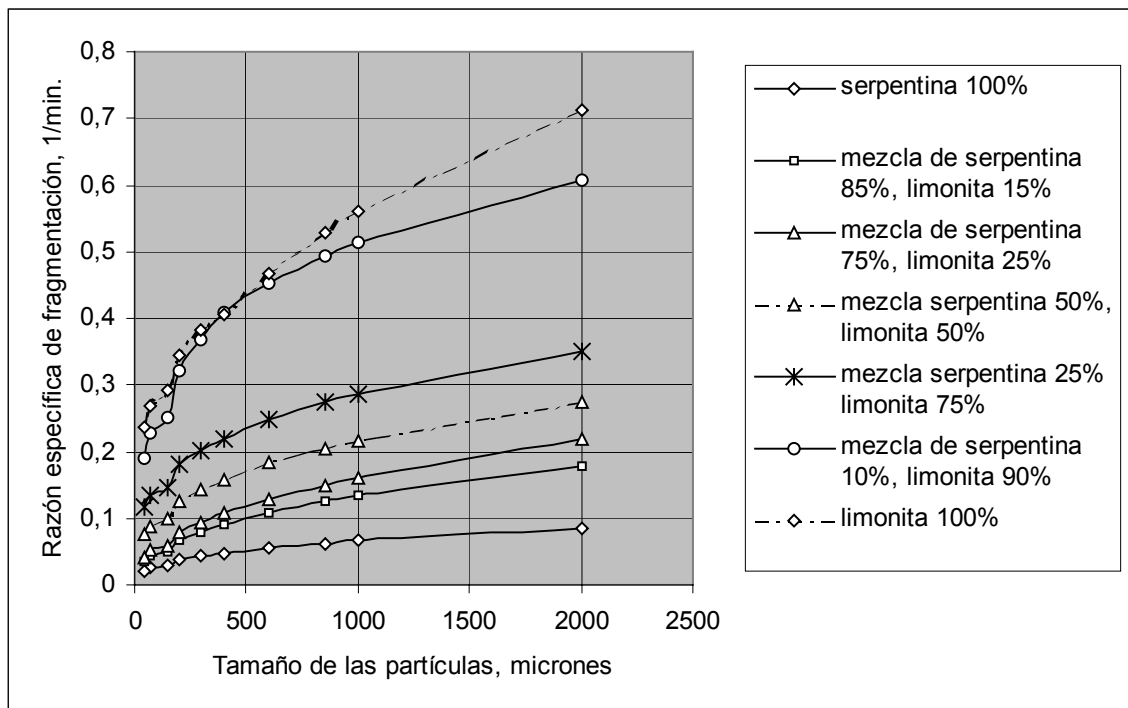


Fig.3.3 Comportamiento de la función razón específica de la fragmentación $S(x)$, para las componentes fundamentales y las mezclas.

3.4 Determinación de los parámetros de la función de distribución de la fragmentación, B , para el mineral laterítico.

Al aplicar el procedimiento explicado en el epígrafe 2.6 se obtuvo un comportamiento de la función de distribución de la fragmentación como el que se muestra en la figura 3.4. Como se observa, los parámetros $B_{i,j}$ para las mezclas, quedan comprendidos entre los límites definidos por los parámetros de las dos componentes mineralógicas fundamentales. Este resultado concuerda con el obtenido por Coello y Tijonov (1996), durante la investigación de la cinética de las mezclas. Entre los parámetros de la función de distribución de la fragmentación y la composición sustancial de mineral pudo ser establecida una dependencia como la que se muestra en la expresión (3.3).

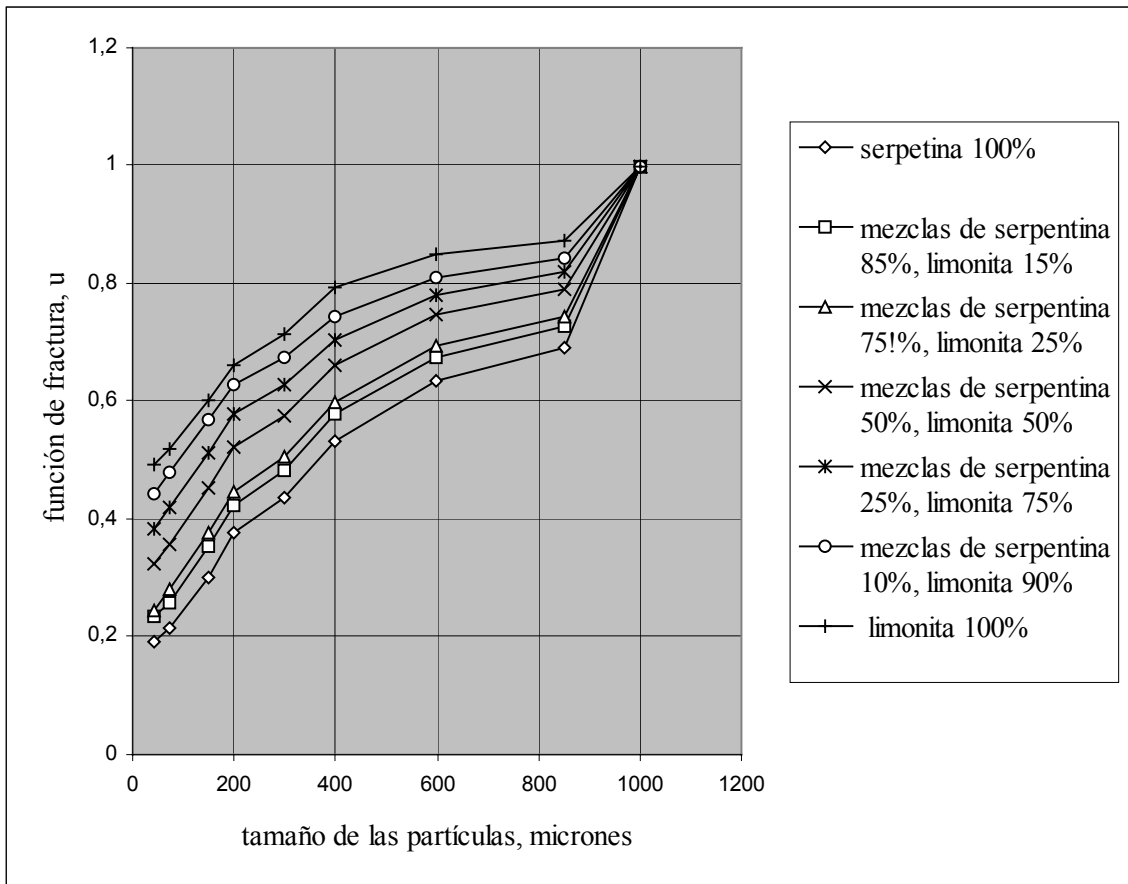


Fig. 3.4. Comportamiento de la función de distribución de la fragmentación B.

$$B_{i,j} = \left[10^{-6} (x) - 0.0035 \right] C_s + 0.1683 (x)^{0.2346} \quad \dots\dots\dots 3.3$$

$i = 2, 3, \dots, 10$

x : tamaño del tamiz, en μm

C_s : contenido de serpentina, en %

La expresión (3.3) sintetiza la regularidad observada entre la función de distribución de la fragmentación y la variación de la composición sustancial del mineral.

3.5 Variación de la composición sustancial del mineral laterítico en el proceso industrial.

La valoración de la variabilidad de la composición sustancial del mineral laterítico en el proceso industrial, ha sido sustentada en el análisis de la variación de la granulometría del mineral en un período de cinco meses y mediante análisis de molienda según el procedimiento explicado en el epígrafe 3.2. Se observó como promedio un 16 % de contenido en peso de la

clase + 5.00 mm, que corresponde a partículas de serpentina y por otro lado se determinó que el mineral de alimentación a los molinos posee un contenido de serpentina aproximadamente de un 32 %, valor que está por encima del establecido según las normas para esta planta (25 %).

Conclusiones del capítulo III

1. A medida que aumenta la componente serpentinitica en la mezcla, aumenta el valor del índice de Bond, según una dependencia lineal con un coeficiente de determinación de 0.95. Esta regularidad evidencia un cambio en la naturaleza del mineral, y de hecho, en el comportamiento de las funciones de la fragmentación.
2. Han sido establecidas, como regularidades, las dependencias de los parámetros de las funciones de la fragmentación, con respecto a la variación de la composición sustancial del mineral, con un coeficiente de determinación de 0.97
3. Se observa como una regularidad que, a medida que aumenta la componente serpentinitica en la mezcla disminuye la productividad del molino. Esta regularidad se manifiesta como una dependencia lineal, con un coeficiente de determinación de 0.98.
4. Ha sido demostrado que, en el proceso tecnológico la variación de la composición sustancial del mineral, es un hecho característico.

IV.- MODELACIÓN DE LA MOLIENDA SECA DEL MINERAL LATERÍTICO CON COMPOSICIÓN SUSTANCIAL VARIABLE

Introducción.

La simulación incuestionablemente es una herramienta muy útil en la tecnología de los procesos, sobre todo si el modelo del proceso satisface la precisión requerida en tales casos, y más aún si los parámetros del modelo pueden ser determinados en el laboratorio o en la planta industrial (Benzer et al, 2001). La mayoría de los algoritmos, utilizados para la simulación de los circuitos de molienda, basados en el balance de masa de la población de partículas en estado estacionario, utilizan una matriz del molino con los parámetros de las funciones de la fragmentación constantes, por cuanto las funciones de la fragmentación una vez determinadas permanecen invariables para el material dado. El mineral laterítico por ser un mineral constituido esencialmente por dos fracciones mineralógicas que se distinguen por la diferencia en sus propiedades físicas y fisico-mecánicas, impone la necesidad de reconsiderar este último elemento. Como se demuestra más adelante en este capítulo, la no consideración de estas especificidades del mineral en cuestión, trae consigo grandes desviaciones entre los resultados observados y los modelados. La variabilidad de la composición sustancial de este mineral es

un hecho a considerar de manera importante en la modelación de la molienda seca de las lateritas. Para resolver este problema, hemos incorporado a los algoritmos clásicos, las regularidades observadas en el comportamiento de las funciones de la fragmentación con respecto a las variaciones de la composición sustancial del mineral. Los objetivos específicos de este capítulo son:

1. Modelar la molienda del mineral laterítico con composición sustancial variable, en un circuito abierto y circuito cerrado similar al esquema industrial de la planta de Punta Gorda.
2. Valorar la influencia de la variación de la composición sustancial del mineral sobre la productividad y el consumo específico de energía en el circuito de molienda industrial.

4.1.- Modelación de la molienda seca del mineral laterítico con composición sustancial variable.

La modelación de la molienda seca fue desarrollada por los algoritmos expuestos en las figura 4.1 y 4.4. Su principal ventaja es que los parámetros del modelo pueden ser determinados off-line en pruebas de laboratorios sencillas. Su distinción con respecto a los expuestos en trabajos anteriores (Benzer et al, 2001; King, 2000; Austin et al, 1984 y otros) radica precisamente en sostener variable los parámetros de las funciones de la fragmentación en dependencia de la composición sustancial de la alimentación al molino,

4.1.1.- Modelación de la molienda seca del mineral laterítico en un circuito abierto.

El algoritmo elaborado para tal efecto aparece en la figura 4.1. Al aplicar este algoritmo para la modelación de la molienda de las componentes fundamentales y de las mezclas se obtuvo el resultado que aparece en la figura 4.2, para el caso particular de la clase -0.074 mm, como se aprecia existe una buena correspondencia entre los valores observados y los estimados.

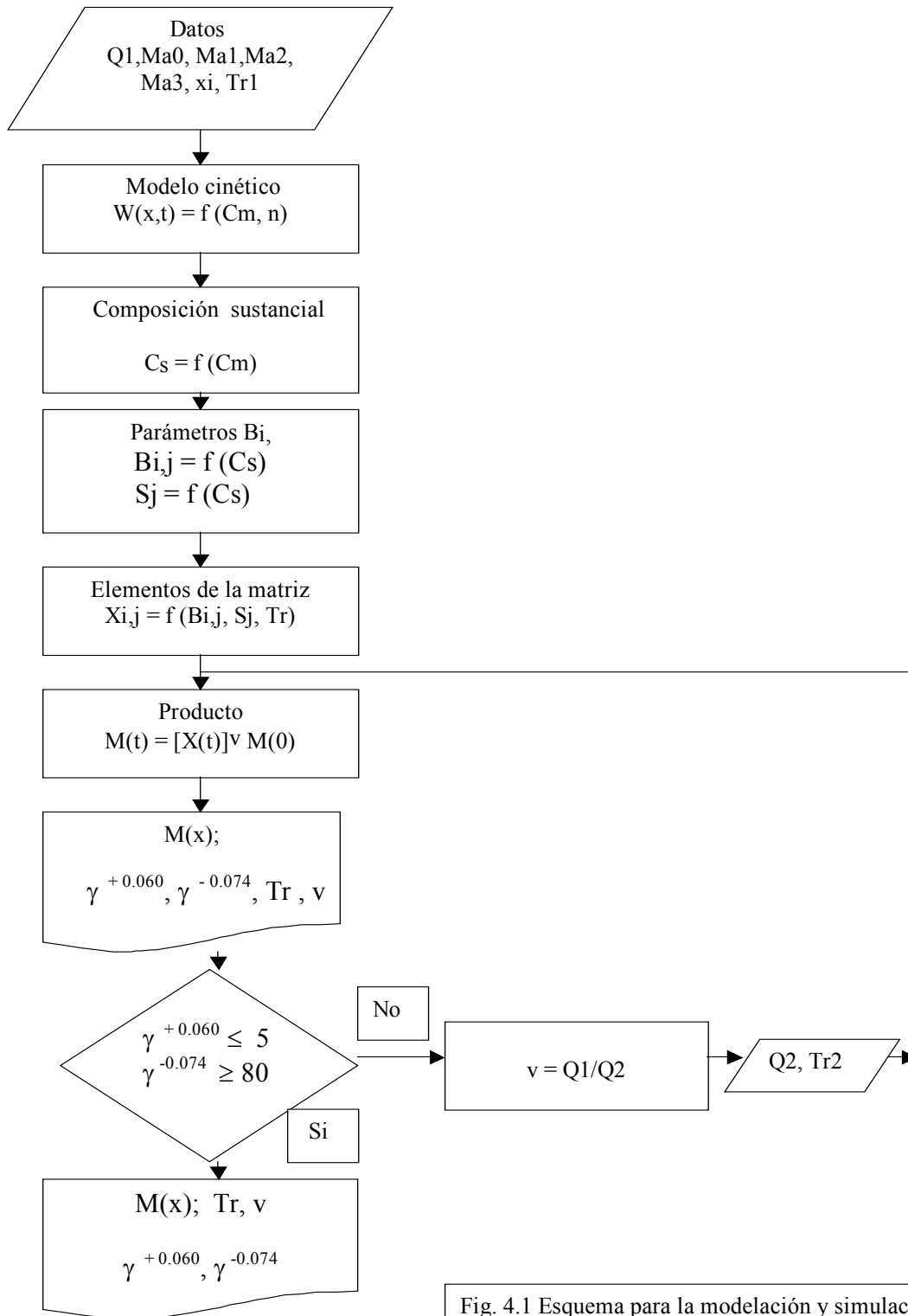


Fig. 4.1 Esquema para la modelación y simulación del circuito abierto

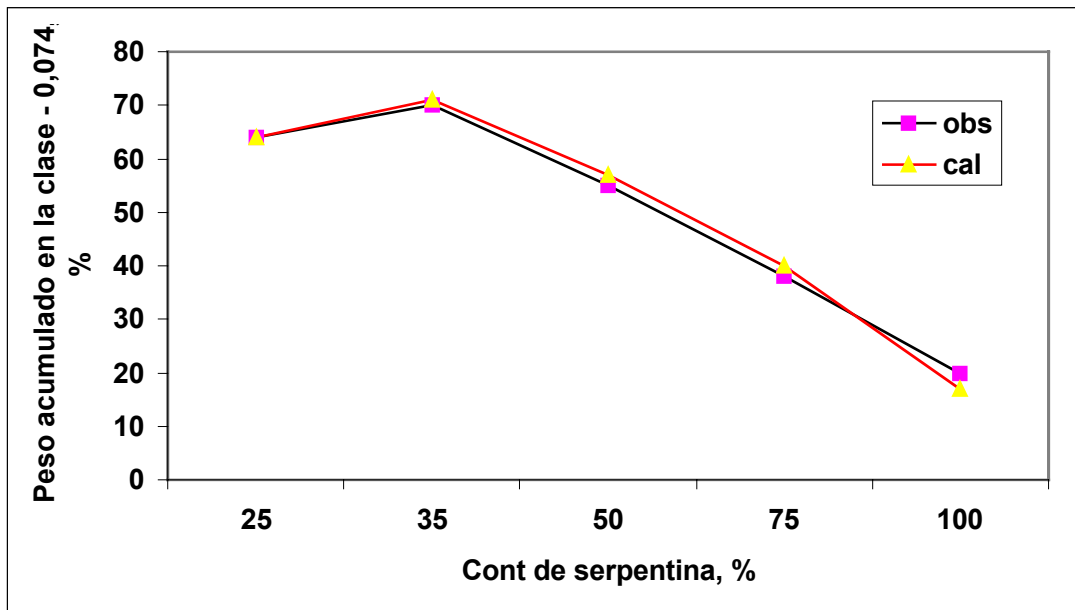


Fig. 4.2 Comportamiento de la clase - 0.074 en la descarga del molino.

Al aplicar una matriz del molino única (concepción clásica) para este tipo de mineral, con variación de su composición sustancial se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 4.1, donde se ha tomado como referencia de matriz única, la correspondiente a la mezcla que contiene el 25 % de serpentina. Se aprecia el incremento de las diferencias entre los valores calculados y observados a medida que nos alejamos de la matriz de referencia, lo que evidencia la inconsistencia de la concepción clásica en este caso.

Tabla 4.1 Comportamiento del error al estimar el contenido de las clases en la descarga del molino, al utilizar el método clásico.

Tamaño, mm	Contenido de serpentina en la mezcla, %			
	35	50	75	100
	Error			
+ 0.160	-2,0	3,0	15,0	28,0
-0.074	-2,0	-10,0	-20,0	-26,0
-0.044	-4,0	-7,0	-18,0	-23,0

4.1.2 Validación del modelo

La validación del modelo se realizó mediante las pruebas estadísticas F, de Fisher y la t, de Student, para ambos casos los valores calculados fueron: $F_{\text{cal}} = 1.12$ y $t_{\text{cal}} = 0.03$, frente a los valores críticos $F_{\text{cri}(0.95)} = 6.4$ y $t_{\text{cri}(0.025)} = 2.3$. Con estos resultados se demuestra que el procedimiento propuesto es válido para la modelación de la molienda del mineral laterítico, utilizando los modelos basados en el balance de masa de la población de partículas y que da solución al problema planteado para el caso del circuito abierto.

4.1.3 Simulación del circuito abierto.

Para la simulación de la molienda en el circuito abierto, con la aplicación del modelo propuesto, en el esquema de la fig. 4.1, se ha incorporado un lazo que recoge las variaciones de la cantidad de mineral en la alimentación (Q) y del tiempo de retención (Tr). Las variaciones de Q, son simuladas a través del parámetro v, considerando la molienda como un proceso de etapas repetitivas (Lynch, 1980). Con el aumento del tiempo de retención aumenta el pasante acumulativo para las clases más gruesas, como se muestra en la fig. 4.3, al simular la molienda para una mezcla con un 25 % de serpentina, para $t = 5$ y $t = 10$ min.

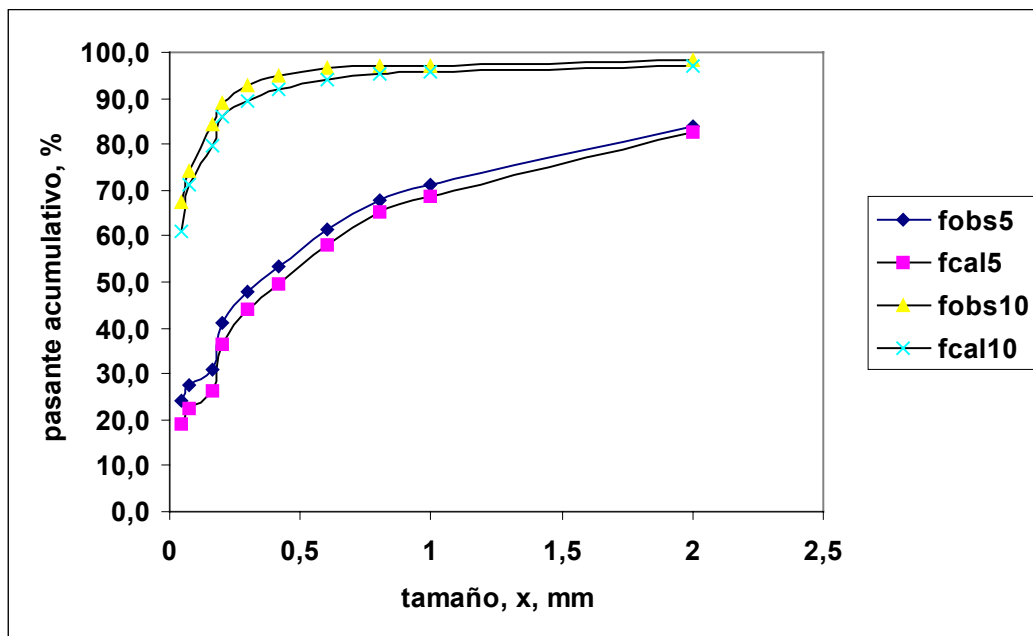


Fig. 4.3 Simulación de al molienda en el circuito abierto, variando el tiempo de retención.

Se aprecia una diferencia muy pequeña entre los valores observados y los calculados. El error en la mayor parte de los casos no sobrepasa el 5 %, lo que evidencia la validez del algoritmo propuesto para la simulación de la molienda en el circuito abierto.

4.2. Modelación de la molienda del mineral laterítico en un circuito cerrado.

Se procedió a realizar un análisis similar para un circuito cerrado industrial, aplicando una metodología semejante a la propuesta para el circuito abierto, aunque con ciertas particularidades. Se tiene en cuenta el escalado de los parámetros de S(x) y se incorporan las regularidades de las funciones de la fragmentación al modelo básico, donde se incluye el modelo de la función reducida de Bass, por ser uno de los modelos del balance de la población de partículas, en estado estacionario, con tamaño discreto y con tiempo continuo que tiene mayor difusión y a través del cual se logra un nivel avanzado de simulación. La distribución de tamaño del producto es estimada mediante la expresión:

$$P_i = (1 + C) (1 - s_i) \theta(t) M_i(0) \dots\dots\dots (4.1)$$

donde,

$\theta(t)$: matriz del molino formada por los términos $\theta_{i,j} = e^{-B_{i,j} S_j t}$

$M_i(0)$: fracción de masa de las partículas en la alimentación al molino

Al aplicar el procedimiento propuesto para la modelación del circuito cerrado, bajo diferentes condiciones de operación de la unidad de molienda (flujo de Alimentación Q, flujo de aire a través del molino, Qa, ángulo de inclinación de las paletas del separador α , carga circulante composición sustancial del mineral, Cs) se obtienen los resultados que se muestran en la figura 4.5. Como se puede apreciar, existe gran semejanza entre los valores observados y los estimados mediante el modelo, lo que fue reafirmado mediante las pruebas estadísticas F de Fisher y la t de Student, Se demuestra así que el modelo propuesto es una solución para la aplicación de los modelos basados en el balance de masa de la población de partículas, en el caso del mineral laterítico con composición sustancial variable.

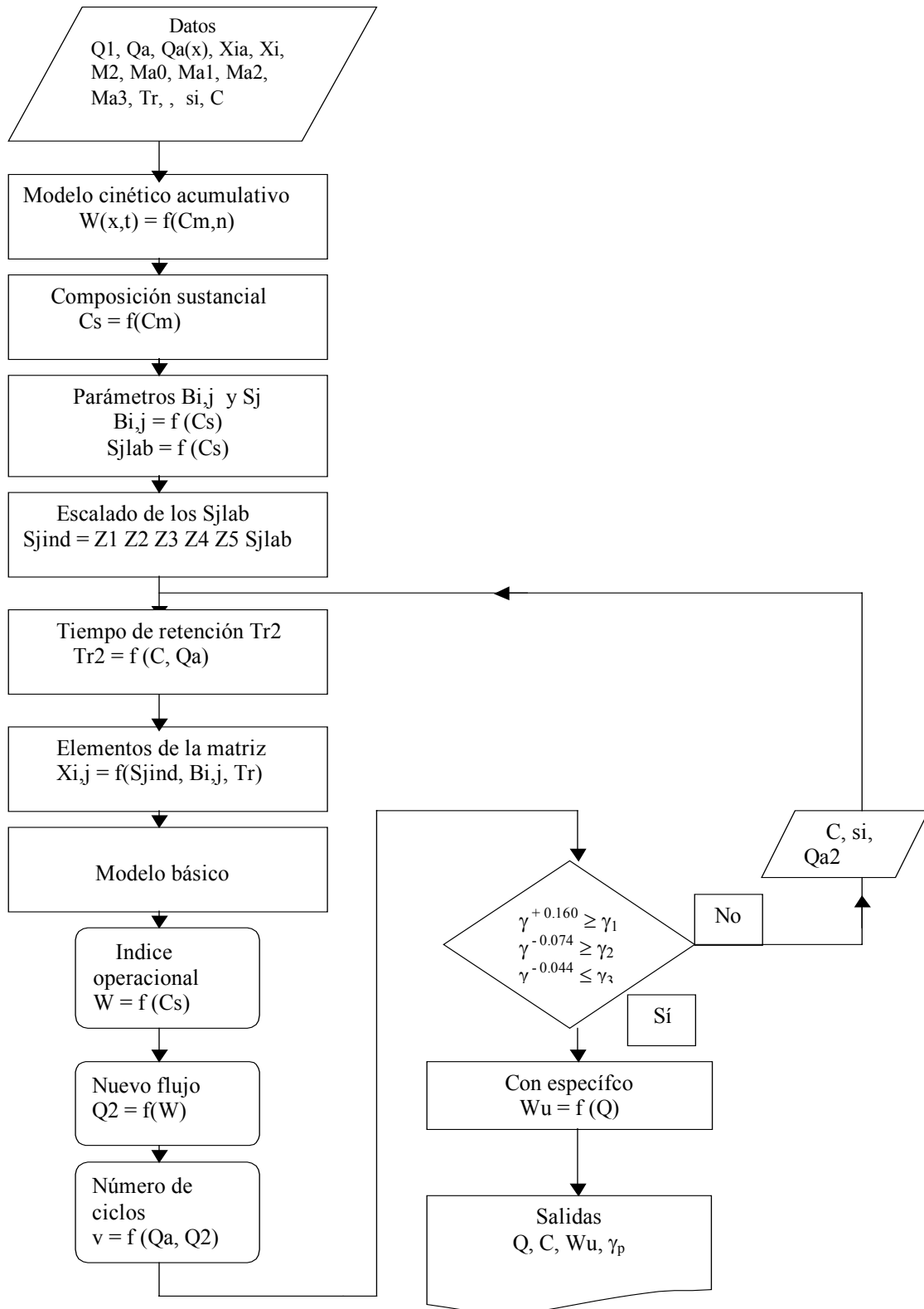


Fig. 4.6 Esquema para la modelación y simulación del circuito cerrado

Fig. 4.4 Esquema del ircuito cerrado.

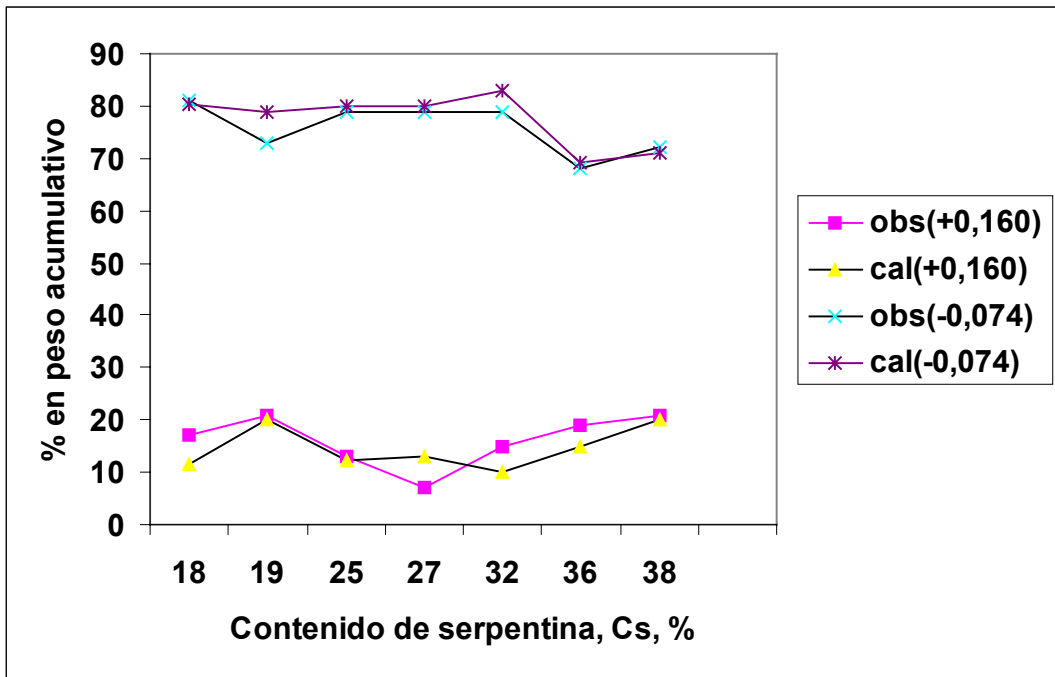


Fig.4.5 Modelación del circuito cerrado, bajo diferentes regímenes de operación.

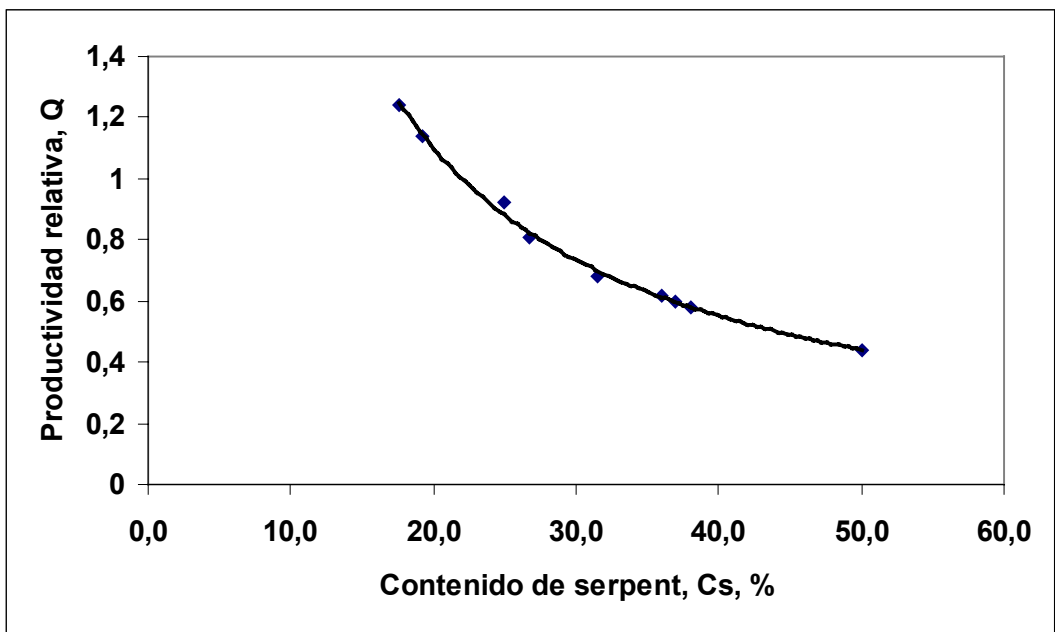


Fig. 4.6 Dependencia de la productividad del molino industrial, respecto a la variación de la composición sustancial del mineral.

Durante la investigación del comportamiento energético de la unidad de molienda y de la productividad se aprecia que la diferencia entre el índice operacional y el consumo específico de energía observado, se encuentra alrededor de un 80 %, aún considerando el posible error que se comete con el método de Bond (hasta un 20 %). Este hecho pone en evidencia un consumo de energía excesivo en el proceso de molienda industrial, al no tomarse en consideración la modelación y simulación del proceso, sobre la base de la variación de la composición sustancial del mineral. Se observa una disminución de la productividad del molino con el aumento del contenido de serpentina en el mineral (ver fig.4.6).

4.4 Simulación del circuito cerrado.

Al añadir al modelo propuesto, los elementos discutidos más arriba, sobre la productividad del molino y sobre el consumo energético, se obtiene un algoritmo como el que se muestra en la figura 4.4, con el cual a partir de un muestreo en las condiciones de operación del circuito cerrado industrial, es posible predecir, mediante la simulación, no sólo el comportamiento del contenido de las clases en el producto fino, sino también el comportamiento de variables tan importantes como la productividad, el índice operacional y el consumo específico de energía real del molino. Según el esquema, la simulación permite comparar el contenido estimado de las clases en el producto final con el contenido establecido por normas para este proceso ($Y^{+0.160} \leq 5\%$; $80\% \leq \gamma^{-0.074} \leq 85\%$; $\gamma^{-0.044} \leq 75\%$) y en caso de alejamiento de las clases de salida, respecto a las normadas, puede ser tomada una primera decisión de lograr un mejor régimen de operación variando la carga circulante, de no lograrse el ajuste deseado, entonces una segunda decisión puede consistir en reducir un tanto el flujo de alimentación hasta lograr resultados aceptables. De las tres condiciones que establecen las normas la fundamental se refiere a la clase -0.074 mm, mientras que las otras dos son complementarias. El no cumplimiento de la condición para la clase -0.044 mm trae como consecuencia la sobremolienda, con sus efectos negativos en el circuito (Coello, 1993). En la tabla 4.2 se recogen los resultados que se obtienen al simular el circuito, primeramente con un aumento del flujo de alimentación (con lo que se obtiene una respuesta no satisfactoria en las clases de salida) y luego con un aumento de la carga circulante y disminución del flujo de alimentación (se obtiene una respuesta satisfactoria).

La simulación del circuito con la aplicación del modelo propuesto, conduce a un mejoramiento significativo de los indicadores energotecnológicos del proceso.

Tabla 4.2. Resultados obtenidos durante la simulación del circuito cerrado.

Régimen de trabajo actual					
Prod, Q, t/h	Carg. Circ. C, %	Clase $\gamma^{+0.160}$ %	Clase $\gamma^{-0.074}$ %	Clase $\gamma^{-0.044}$ %	Con esp We kWh/t
50,0	77,0	10,0	84,4	70,8	13,0
Simulación variando la productividad					
86,0	77,0	13,1	76,0	70,0	7,6
Simulación variando Carga circulante y la productividad					
70,0	87,0	10,7	84,0	74,0	10,3

4.5.- Valoración económica

De ser aplicado el procedimiento que hemos propuesto en este trabajo, para la modelación y simulación de la molienda con la aplicación de los modelos basados en el balance de masa de la población de partículas, entonces pueden lograrse reducciones del consumo específico de energía en el orden de un 35 % para el molino y de un 30 % para la unidad de molienda (incluye el ventilador de recirculación) Tomando en consideración las condiciones actuales de operación de las unidades de molienda, las reservas energéticas y productivas detectadas en el sistema y las tarifas eléctricas, de ser aplicada la modelación y simulación en la planta objeto de estudio, según el procedimiento propuesto en este trabajo es posible alcanzar los beneficios económicos que aparecen en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Efecto económico posible a alcanzar mediante la aplicación del procedimiento propuesto.

Observado		Estimado				Reducc de costo, %	Ahorro anual, MUSD
Product media, Qmed, t/h	Consumo esp de la unidad, Wu, kWh/t	Product media, Qmed, t/h	Consumo esp de la unidad, Wu, kWh/t	Increm de la prod Q, %	Reduc del con esp Wu, %		
73,0	15,0	85,0	13,0	11	13	17	337,4

Conclusiones del capítulo IV

1. La simulación de la molienda del mineral laterítico, con composición sustancial variable, en un circuito abierto, utilizando los modelos matemáticos del balance de masa de la población de partículas, es posible siempre y cuando sea utilizada una matriz del molino, cuyos elementos varíen en función de la composición sustancial del mineral.
2. Para la simulación de la molienda del mineral laterítico, en el circuito cerrado industrial, empleando los modelos del balance de masa de la población de partículas, puede aplicarse un procedimiento similar al propuesto para el circuito abierto, tomando los mismos parámetros de la función de distribución de la fragmentación hallados a escala de laboratorio y escalando los parámetros de la función razón específica de la fragmentación.
3. La variación de la composición sustancial del mineral laterítico, en el proceso industrial, tiene una marcada influencia sobre la productividad y sobre el consumo específico de energía de la unidad de molienda. El hecho de tener en cuenta este factor, durante la modelación y simulación del proceso, puede permitir una disminución significativa del costo de producción.

CONCLUSIONES GENERALES

1. A medida que aumenta la fracción serpentínica en el mineral laterítico, aumenta el valor del índice de Bond, según una dependencia lineal. Esta regularidad evidencia la variación de la molibilidad del mineral con la variación de su composición sustancial.
2. Las regularidades observadas en el comportamiento de las funciones de la fragmentación, respecto a la variación de la composición sustancial del mineral laterítico, dada por la relación serpentina-limonita, han sido expresadas a través de una dependencia logarítmica con un coeficiente de determinación de 0,97 para el caso de la razón específica de la fragmentación y por una dependencia lineal con igual coeficiente de determinación para el caso de la función de distribución de la fragmentación.
3. La aplicación de las concepciones clásicas de los modelos de molienda, basados en el balance de masa de la población de partículas, en el caso del mineral laterítico, es posible cuando los parámetros de las funciones de la fragmentación se consideran variables que expresan las regularidades de dichas funciones con respecto a la variación de la composición sustancial del mineral.
4. El procedimiento propuesto para la modelación y simulación de la molienda de la laterita con composición sustancial variable, resuelve las limitaciones encontradas para aplicar las concepciones clásicas de modelación a este tipo de mineral y se demuestra el impacto económico que puede producir la aplicación de este procedimiento en un proceso industrial, ascendente al ahorro de 337,4 MUSD anualmente, por concepto de racionalización en el portador energético, así como en otros beneficios adicionales de carácter económico, social y medioambiental.

RECOMENDACIONES

1. Dar continuidad al trabajo con la elaboración de un software para la aplicación del procedimiento propuesto.
2. Utilizar este trabajo como una base de conocimiento en la automatización del proceso de molienda en la empresa ‘‘Cmdte Ernesto Che Guevara’’.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Aguado M. J., Aplicación de la simulación matemática a la determinación de consumos energéticos en fragmentación. (Tesis doctoral) Universidad de Oviedo, 2003.
2. Aksani. B y Sonmez B. Simulation of Bond grindability test by using cumulative based kinetic model. Minerals Engineering,. Vol 13. No. 6. pág 673-677. 2000
3. Aldana S. Eugenio y Legrá L. Angel. Optimización de la productividad y la fineza de la molienda en la planta de preparación de minerales de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”. Centro de Investigación de la Laterita, Moa, Holguín, 1996
4. Andreiev, S. E. Andreiev; V. A. Perov; V. V. Zverievich. Trituración, desmenuzamiento y cribado de los minerales. Editorial Mir, Moscú, 1980.
5. Anónimo. Manual de aplicación de las tarifas eléctricas. Unión Eléctrica, La Habana, 2002.
6. Anónimo. Manual de operaciones de la planta de preparación de minerales. Empresa ‘Cmdte Ernesto Che Guevara’, 2003.
7. Austin L. G., Measurements of impact forces in ball mills, reanalysis. Minerals and Metallurgical Processing. Vol 18, No. 4 Nov 2001.
8. Austin, L. G. , Luckie, P. T., y Klimpel, R. R. Solution to the batch grinding equation leading to Rosin-Ramler distributions. Trans. AIME, Vol 252, pág 87-94. 1972
9. Austin. L. G., y Brame, K. A comparison of the Bond method for sizing wet tumbling mills with a size mass balance simulation model. Powder Technology, 34 ; 261-274. 1983.
10. Austin, L. G. , Luckie, P. T., y Klimpel, R. R. Grinding equations and the Bond work index. Trans. AIME,. Vol 252, pág 87-94. 1972
11. Austin, L. G. A comentary on Kick, Bond and Rittinger laws of grinding. Powder Technology,. Vol 7, pág 315-317. 1973
12. Austin, L. G., y Weller, K. R., Simulation and scale-up of wet ball milling. 14th Int. Miner. Congress, Toronto,. pág 1-8. 1982
13. Austin, L. G. , Luckie, P. T., y Seebach, H. M. Optimization of a cement milling circuit with respect to particle size distribution and strength development by simulation models. Dechema Monograph,. pág 519-537. 1976
14. Austin, L. G., Concha, F., Diseño y simulación de circuitos de molienda clasificación, CYTED-Green Print Impresores, Chile, pp. 394. 1994.

15. Austin, L. G., Luckie, P. T. and Shoji, K. And analysis of ball and race milling. Part II. Powder Technology, 33, 113 – 125. 1982.
16. Austin, L. G. and Klimpel, R. R., The theory of grinding operations. Ind. Eng. Chem., 56, 18 – 29. 1964.
17. Austin L., Kimplel R., Luckie P.T., Process Engineering of size reduction: Ball mill. AIME publ. NY. 458-471 pp. 1984.
18. Austin, L. G., Shoji, K., Bathia, V. K., Jindal, V., Savage, K., and Klimpel, R. R. Some results on the description of size reduction as a rate process in various mills. Ind. Eng. Chem. Process. Des Devel., 15 (1) , 187-196. 1976.
19. Avilio, B. N., Karnaujov; Zabrowski. Racionalización del consumo de energía eléctrica en las plantas beneficiadoras de minerales. Editorial Niedra, Moscú, 1987.
20. Benzer H., Erguá L., Oner M., Lynch A., “Simulation of open circuit clincker cement”. Minerals Engineering, Vol. 14, No. 7. pp 701-710. 2001
21. Bernard Ostle. Estadística aplicada . Editorial Científico-Técnica, La Habana, 1979.
22. Belyx; B. P., I. S Sbiardel ; B. K Oleinikov. Cargas eléctricas y utilización de la energía eléctrica en las empresa mineras. Editorial Niedra , Moscú, 1971.
23. Bonolli, A., y Fluvio C. The energy saving problems related to grinding, a correct definition of parameters for comminution process optimization. Mineral Processing. June 1994.
24. Blaskett, K.S. Estimation of the power consumption in grinding mills. 9th Comomwealth Min Metallurgical Congress, pág 631-649. 1969
25. Broadbent, S. R., y Callcott, T.G. a matrix analysis of process involving particle assemblies. British Coal Utilization Research Association, Vol 249, 1956
26. Castro, J.R., y J. A. Finch. Simulation of a grinding circuit charge to reduce lead sliming. Mineral Processing. April 1980.
27. Coello V. Alfredo. Consideraciones sobre la molienda seca de minerales lateríticos. Minería y Geología, XIII (2); 57-60 ; 1993 a.
28. Coello V. Alfredo. Mejoramiento de la tecnología de la molienda seca de la laterita. (Tesis de doctorado) Instituto de Minas de San Petersburgo, Rusia, 1993 b.
29. Coello V. Alfredo; N. Tijonov Oleg. Regularidad en la molienda de los minerales lateríticos. Minería y Geología XIII (3); 1996.

30. Coello V. Alfredo; N. Tijonov Oleg. Molienda de minerales multicomponentes: modelo integrodiferencial para la valoración de la energía. *Minería y Geología*, (2) 2001.
31. Coello V. Alfredo, Menéndez, A, J.M. y Laborde, B. R. Regularidad en la molienda conjunta y por separado de mezclas de limonita y serpentina. (Artículo en preparación).2005.
32. Cooke D. R., y J. Pongratz. Nickel laterite deposits-geological, overview, resources and explotation. 2003. [http//www. au.com](http://www.au.com)
33. Deister, R. J. How to determine the Bond work index using the lab ball mill gridability test. *COMJ*. 1987.
34. Falcón, J. Informe al PIF sobre el estado de la molienda del mineral laterítico, ISMM, Moa. , 1987
35. Fred. C. Bond. Crushing and grinding calculations. Part I. *British Chemical Engineering*. January, 1961.
36. Fuerstenau, D. W. and A. Z. M. Abouzeid. Effect of fines particles on the kinetics and energetics of grinding coarse particles. *International Journal of Mineral Processing*., Vol 31, pp. 151-162. 1991.
37. Gaudin, A.M., y Meloy, T. P. Model and comminution distribution equation for repeated fracture. *Trans. AIME*. Vol. 223. pág 43-50. 1991
38. Gupta, V. K., y Kapur, P. C. A simple mill matriz for grinding mills. *Chemical Engineering*., V 29. pág 634-637. 1974
39. Harris, C. C. Batch grinding kinetics. *Transf AIME*.. Vol 241. pág 359-364. 1968
40. Herbst, J..A., y Fuerstenau, D. G. Scale-up procedure for grinding mill desing using population balance methods. *Int Journal, Mineral Processing*, Vol 7. pág 1-31.1980.
41. Herbst, J. A., y Fuerstenau, D. G. The zero order production of fines sizes in comminution and its implication in simulation. *Trans. AIME*., Vol 241. pág 538-548. 1968
42. Herbst, J. A., Potapov, A. V. Radical innovations in mineral, processing simulation. *Minerals and Metallurgical Processing*, Vol 21; mayo 2004.
43. Hodouin, D., Gelpe, T., y Everell, M. D. Sensitivity analysis of material balance calculations- an application to the cement clinker grinding process. *Power Technology*., Vol 32, pág 139-153. 1982
44. John Kare Pettersen and Sandvik K. L. Estimating the breakage and selection functions for a continuo mill. *International Journal of Mineral Processing*., Vol 35, pp. 149-158. 1992

45. Kapur, P. C. and Agrawal, P. K., Effect of feed charge weight on the rate of breakage in batch grinding. Trans. IMM, (London) 79, C269 – C274. 1970.
46. Kelly, E. G., y D. J. Spottiswood. The breakage function, what is it really ?. Minerals Engineering., Vol 3, No. 5 , pp. 405-414. 1990
47. Kelsall, D. F., Reid, K. J. and Restarick, C. J. Continuous grinding in a small wet ball mill. Part II. A study of the influence of hold-up weight. Powder Technology., 2, 162 – 168., 1968/69.
48. Kelsall, D. F., Reid, K. J. and Restarick, C. J. Continuous grinding in a small wet ball mill. Part III. A study of distribution of residence time.. Powder Technology., 3, 170 – 178., 1969/70.
49. King, P. Modeling and simulation of mineral processing system. Butterworth Heinemann. Boston-Oxford-Johannesburg.. pp. 403. 2000
50. Klimpel, R. R., y Austin, L. G. The back calculation of specific rates of breakage from continuous mill data. Powder Technology., Vol 38, pág. 77-91. 1984
51. Laborde B. Reynaldo, A Coello, S. Marrero. Productividad y Eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral laterítico. Revista Minería y Geología. Vol XVII, No. 2 del 2001. a)
52. Laborde B. Reynaldo, A. Coello. S. Marrero. Optimización del proceso de molienda del mineral laterítico en la empresa ‘Comdte Ernesto Che Guevara’. Memorias SIE. Universidad Central de Las Villas, 2001. b) ISBN.
53. Laborde B. Reynaldo. A. Coello. Normación del consumo de energía eléctrica en la molienda de la laterita. Memorias FIE 2002, Universidad de Oriente. ISBN.
54. Laborde B. Reynaldo, A. Coello, S. Marrero. Diagnóstico energético en la sección de molienda de la empresa ‘Comdte Ernesto Che Guevara’. Memorias SIE 2003, Universidad Central de Las Villas.
55. Laborde B. Reynaldo, A. Coello, S. Marrero. O Angulo. Diagnóstico energético del proceso de molienda de la laterita. Minería y Geología Vol XIX, No. 3 – 4 .del 2004.
56. Laplante, A. R, U. Prasad, R. E. Mc Ivor y J. A. Finch. Error analysis for Bond work index determinations. Part 2. Minerals Engineering. Vol 6. No 5. pp – 509 – 521. 1993.
57. Levin, J. Observations on the Bond standard grindability test for the fine materials. Mineral and Metallurgical Processing., Vol 89, No 1 , pp. 13-21. 1990

58. Lewis, K. A., M. Pearl and P. Tucker. Computer Simulation of the Bond grindability test. Minerals Engineering., Vol 3, No. ½ , pp. 199-206. 1990
59. Luckie, P. T., y Austin, L. G. A review introduction to the solution of the grinding equations by digital computation. Mineral Science Engineering., Vol 4. pág 24-51. 1972
60. Lynch, J. A. Circuitos de trituración y molienda de minerales. Editorial Rocas y Minerales, Madrid, 1980.
61. Lynch A. J., Mineral Crushing and Grinding Circuits. Their simulation, optimisation, design and control. T1. Elsevier . Scientific Publishing Company. Amdertam, Oxford. N.Y.1977.
62. Llorente Luis Arce. Proyección para el incremento de la productividad hasta 50 000 t de níquel más cobalto en la instalación de molienda de la empresa 'Cmdte Ernesto Che Guevara'. Tesis de Maestría, ISMM, Moa, 2003.
63. Machado, M. R, Kinetic models for the simulation of crushing circuits. Mining Engineering Vol 3, No 1/2 pp. 165 – 180. 1990.
64. Malghan, S. G. and Fuerstenau, D. W., The scale up of ball mills using population balance models and specific power input. Dechema Monograph 79, 613 – 630, 1976.
65. Marchand, J. C., Hodouin, D., and Everell, M. D. RTD and mass transport characteristics of large industrial grinding mills. Proc 3 rd Int. Fed. Automatic Control Symp, Montreal, 295-302. 1980.
66. Mason D. Robert; Lind A. Douglas; Marchart C. William. Statistics- an introduction (fourth edition). Sanders College Publishing. Universidad de Toledo, U.S.A. 1994.
67. Mehta, R. K., S. K. Dhar and R. R. Mallepali. A computational approach toward the mill matrix of distributed conminution models. Mineral and Metallurgical Processing. May, 1993 (technical note).
68. Mika, T. S., Berloiz, L. M. Y Fuertesneau, D. G. An approach to kinetics of dry batch milling. Dechema Monografia. pág 205-240. , 1967
69. Mitrofanov, S. I., L. A. Barski; I. D. Samygin. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Editorial Mir, Moscú, 1982.
70. Mosher, J.B., C. B. Tague. Conduct and precision of Bond grindability testing. Minerals Engineering., Vol 14, No. 10, 2001.
71. Prasher, Ch. L. . Crushing and Grinding Process Handbook. Londres, 1987.

72. Ramírez, J. C., Finch, J. A. Simulation of a grinding circuit change to reduce lead sliming. Mineral Processing. CIM Bulletin , 1980
73. Ramos Pérez Néstor. Bombas, ventiladores y compresores. ISPJAE, la Habana, 1995.
74. Rajamani R. K; B. K. Mishra; P. Songfack and R. Venugopal. Millsoft- simulation software for tumbling-mill design and trouble shooting. Minerals Engineering. December, 1999.
75. Rajamani, R. K. Impact energy spectra of tumbling mills. Powder Technology. Vol 108, no. 2-3, 2000.
76. Reid, K. J. A solution to the batch grinding equation. Chemical Engineering Science, , Vol 20, pp: 953-963. 1965.
77. Reyes - Bahena, Juan L. Modelling and Simulation of the grinding circuit at El Pilon Mine. Mineral Processing, feb 2004.
78. Rogers, R. S. C., y Austin, L. G. Residence time distribution in ball mills. Particulate Sci.Technology. 2, 191-209. 1984.
79. Rogers, R. S. C. A short- lived radioactive tracer method for the measurement of closed circuit ball mill RTD. Powder Technology. 32. 245-252. 1982.
80. Rojas P. Arturo. Principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento de Moa.(Tesis de doctorado) Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 1995.
81. Rowland, C. A. Using the Bond work index to measure operating comminution efficiency. Minerals & Metallurgical Processing.. Vol. 15 No. 4. 1998.
82. Shoji K., Austin, L. G., Smaila, F. Brame K., and Luckie P. T. Further studies of ball and powder filling effects in ball milling. Powder Technology. 31, 121-126. 1982.
83. Thomas, A. L. O. Filippov. Fractures, fractals and breakage energy of minerals particles. International Journal of Mineral Processing., Vol 57, pp. 285-301. 1999
84. Vera S. León. Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa. (Tesis de doctorado). Instituto Superior Minero-metalúrgico, Moa, 2001.
85. Zaldívar H. Gaspar; Fajardo M Andrés. Prueba de máxima productividad de los molinos con petróleo en el proceso de molienda de la empresa ‘ Cmdte René Ramos Latour’. Informe técnico. Departamento de Investigaciones y Desarrollo, empresa del níquel ‘ Cmdte René Ramos Latour’, Nicaro, 1998.

86. Zaldívar H. Gaspar, Fajardo M. Andrés. Prueba para la determinación de la influencia del petróleo aditivo y de las características del mineral sobre la productividad de los molinos. Informe técnico. Centro de Investigación de la Laterita, Moa, 1999.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DEL AUTOR RELACIONADA CON LA TESIS DOCTORAL

Ponencias presentadas en eventos científicos:

1. Optimización del proceso de molienda del mineral laterítico en la empresa 'Cmdte Ernesto Che Guevara' SIE 2001, Universidad Central de Las Villas.
2. Diagnóstico energético en la sección de molienda de la empresa 'Cmdte Ernesto Che Guevara'. SIE 2003. Universidad Central de Las Villas.
3. Normación del consumo de energía eléctrica en la molienda de la laterita. FIE 2002, Universidad de Oriente.
4. Diagnóstico energético en la sección de molienda de la empresa 'Cmdte Ernesto Che Guevara'. XV Forum de Ciencia y Técnica (relevante a nivel Municipal).
5. Influencia de la relación serpentina-limonita sobre los indicadores energotecnológicos en el proceso de molienda del mineral laterítico. CIER 2005.
6. El consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda del mineral laterítico. CIMEI 2004.
7. El consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda del mineral laterítico. CINAREM 2004.

Publicaciones de ponencias presentadas en eventos científicos:

1. Optimización del proceso de molienda del mineral laterítico en la empresa 'Cmdte Ernesto Che Guevara' SIE 2001, Universidad Central de Las Villas. (ISBN)
2. Diagnóstico energético en la sección de molienda de la empresa 'Cmdte Ernesto Che Guevara'. SIE 2003. Universidad Central de Las Villas. (ISBN)
3. Normación del consumo de energía eléctrica en la molienda de la laterita. FIE 2002, Universidad de Oriente. (ISBN)

4. El consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda del mineral laterítico. CINAREM 2004. (ISBN)
5. Influencia de la relación serpentina-limonita sobre los indicadores energotecnológicos en el proceso de molienda del mineral laterítico. CIER 2005. (ISBN)

Publicaciones en revistas científicas

1. Productividad y Eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral laterítico. Revista Minería y Geología. Vol XVII, No. 2 del 2001.
2. Diagnóstico energético del proceso de molienda de la laterita. Minería y Geología Vol XIX, No. 3 – 4 .del 2004.

Trabajos de diplomas dirigidos , relacionados con la tesis doctoral.

1. Estudio de las características energéticas de una unidad de molienda de mineral laterítico en la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”. Fredy González Fernández. ISMM. Dpto de Eléctrica. 2000.
2. Simulación del proceso de molienda del mineral laterítico a escala de laboratorio. Carlos M. Rojas Jomarrón . ISMM. Dpto de Eléctrica. 2002.
3. Comportamiento energético del proceso de molienda , en la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”. Rodolfo Pérez Pérez y Alexis Rodes Condis., ISMM, Dpto de Eléctrica, 2003.
4. Consumo energético del proceso de molienda de la empresa “Cmdte René Ramos Latour”. José M. Vargas Estévez. ISMM, Dpto de Eléctrica. 2003.
5. Modelación a escala de laboratorio del proceso de molienda del mineral laterítico, procedente del yacimiento de Punta Gorda. Yusmay Núñez González y Zolnier Pérez González. ISMM. Dpto de Metalurgia. 2003.
6. Consumo electroenergético en el proceso de molienda a escala de laboratorio. Lilia Encinas Bertolín y Luis E. Santiesteban Powery. ISMM, Dpto de Eléctrica. 2003.
7. Determinación de las funciones de la fragmentación para el mineral laterítico. Alexander Garcés Rigñag y Yulio Feria Tamayo. Dpto de Metalurgia. 2003.
8. Determinación del índice de trabajo o índice de Bond para el mineral laterítico. Yosbany Reina Licea. ISMM. Dpto de Metalurgia. 2004.

9. Procedimiento para la regulación de la alimentación de los molinos de bolas en la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara” Nersy Fonseca. ISMM. Dpto de Eléctrica. 2004.
10. Estudio del comportamiento energético de la unidad de molienda 2, en la empresa “Cmdte René Ramos Latour”. Elvis Gil Riverón. ISMM. Dpto de Eléctrica. 2004.
11. Análisis del comportamiento del consumo específico de energía en el proceso de molienda de la Laterita en la Empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”. Uberlandis Lafargue Barrientos. ISMM, Dpto de Metalurgia. 2005. (Premio Relevante en el XVI Forum Nacional Estudiantil de Ciencia y Técnica)
12. Valoración de la influencia de algunos factores tecnológicos, sobre el consumo específico de energía en el proceso de molienda del mineral laterítico. Delvis Toirac Martínez. ISMM, Dpto Eléctrica. 2005.