TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN ELECTROMECÁNICA

REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

Dr. Antonio Núñez Jiménez

FACULTAD METALURGIA – ELECTROMECÁNICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MOA – HOLGUÍN

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN ELECTROMECÁNICA

TÍTULO: Las propiedades físico-mecánicas de las menas lateríticas y su relación con el consumo específico de energía en el proceso de molienda.

Autor: Ing. Jacinto Téllez Pérez.

Tutores: Dr. C: Reynaldo Laborde Brown.

Dr. C: Alberto Hernández Flores.

Moa-2010

"AÑO 52 DE LA REVOLUCIÓN"

DEDICATORIA

Como merecedores de los resultados de todo esfuerzo, trabajo y dedicación para desafiar los obstáculos que de una forma u otra entorpecen el conocimiento y el saber, le dedico este logro de opción al grado de Máster en la Especialidad de Ingeniería Electromecánica a:

A mi esposa por la paciencia e inteligencia que tuvo para saberme comprender.

A todos mis hijos, siendo inspiración para seguir estudiando.

A mis nietos, que con sus elocuencias me ayudaban a disipar.

A mis padres que son fuente de constante preocupación por el avance de mi empeño.

A todos mis hermanos y familia en general.

A mis tutores, Reinaldo Laborde y Alberto Hernández por la entrega y sacrificio con que me han guiado.

A mis compañeros de trabajo, fuente de inspiración.

A la Che Guevara por facilitarme el tiempo necesario para lograr los estudios de la maestría.

Al ISMM por facilitarme el curso de la maestría.

A la Revolución por todo el apoyo que me ha dado en la superación en el transcurso de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Como bien es sabido, para lograr un peldaño más de conocimiento en la historia de la lucha por el saber, solo no se logra, por lo que le agradezco con todo cariño y sinceridad a toda mi familia y en especial a mi hijo Jasiel, por el apoyo brindado en los ensayos a escala de laboratorio, a mis tutores Reinaldo Laborde y Alberto Hernández que con gran maestría me han sabido guiar, a mis compañeros de trabajo, reflejando el apoyo y el empuje dado por Ramón Baquero, Luis Llorente, Oniel García y Yudi Matos, por concluir con la tesis de la maestría, a José M. Mendoza y Jorge Noa Borges por la cooperación brindada, a Alexander Machado Noa por la ayuda en la organización e impresión de la tesis, a todas mis amistades, al personal del Departamento de Metalurgia que han colaborado y a todas aquellas personas que de una forma u otra me apoyaron y estuvieron conmigo en los buenos y difíciles momentos.

PENSAMIENTO

El futuro de nuestro país debe ser, necesariamente, un país de hombres de ciencia…

"Fidel Castro Ruz"
Líder de la Revolución Cubana

"La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica".

Aristóteles

RESUMEN.

El trabajo de investigación referido a “Las propiedades físico – mecánicas de las menas lateríticas y su relación con el consumo específico de energía en el proceso de molienda” de la empresa Ernesto Che Guevara conllevó dos etapas de experimentación, una a escala industrial, donde se tomaron diferentes mediciones respecto a la productividad máxima alcanzable, consumo de potencia y altura libre relacionada con los elementos moledores por cada molino; y la otra etapa a escala de laboratorio, donde se hicieron varias corridas con un mismo mineral, variando la carga molturante y el tiempo de molienda. En el desarrollo del experimento se aplicó un método clásico, que permitió interrelacionar las variables de entrada de cargas de bolas, tiempo y variación del tamaño de las partículas con respecto a las variables de salida de fineza, productividad y consumo energético.

Con las herramientas estadísticas se pudo evaluar el efecto de la separación de los trozos mayores a 10 mm antes de la alimentación al molino y el comportamiento de la molienda para las nuevas condiciones de granulometría, además facilitó la creación de modelos que sirven de guía para la recarga de la masa de bolas en función de la potencia en los molinos. Con el diseño experimental se evaluó el coeficiente de llenado, relacionado con la fineza a la salida de los molinos. Se conoció el nivel de llenado de bolas adecuado para los molinos y el costo de la energía para procesar una tonelada de mineral.

ABSTRACT

The research paper on lateritic ore physical- mechanical properties and their relationship with the specific energy consumption carried out at Commander Ernesto Che Guevara Nickel Processing Plant ore grinding section, required two experimental stages, such as an industrial- scale stage, where several measurements regarding maximum achievable productivity, power consumption and free height related to the grinding items for each ore grinding mill, as well as a second laboratory-scale stage, in which several runs were made with the same ore, varying the ball load and the ore grinding time. A classical method was applied for the experiment development, allowing to interrelate the ball load variables, time and particle size variation regarding outlet variables such as fineness, productivity and energy consumption. The use of statistical tools allowed to assess ore lumps greater than 10 mm removal, before ore feeding to the ore grinding mill, as well as ore grinding behavior for the new particle size conditions, it also enabled to prepare models serving as guides for ball mass reloading in function of the ore grinding mills power, with the experimental design, the filling rate was also assessed related to the ore fineness at the ore grinding mills outlet. Besides, the proper ore grinding mill ball filling level and power cost required to process a ton of ore were known.

ÍNDICE

N_{ro}	DESCRIPCIÓN	Pág.
	INTRODUCCIÓN	1
	CAPÍTULO I – MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL	
1.1	Introducción (Resultado de la investigación Bibliográfica).	5
1.2	Teoría de la molienda.	10
1.2.1	Fórmula del desmenuzamiento.	13
1.2.2	Masa de bolas dentro de un molino de tambor cilíndrico.	13
1.2.3	Potencia de un molino de bolas.	13
1.2.4	Productividad de un molino según la carga molturante.	14
1.2.5	Determinación del coeficiente de llenado.	15
1.2.6	Determinación de la potencia a partir de la carga molturante.	15
1.2.7	Cálculo de la potencia de acuerdo a la tercera Ley de Bond.	15
1.2.8	Conclusiones del Capítulo I.	16
	CAPÍTULO II – MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1	Introducción (Datos generales de la fábrica).	17
2.1.1	UBP. Mina.	17
2.1.2	UBP. Preparación de Mineral.	18
2.1.3	UBP. Planta de Hornos de Reducción.	19
2.1.4	UBP. Planta de Lixiviación y Lavado.	19
2.1.5	UBP. Planta de Recuperación NH_3 y Separación de Cobalto.	19
2.1.6	UBP. Planta de Calcinación y Sinter.	19
2.2	Planificación del experimento.	20
2.2.1	Principales equipos y materiales utilizados durante la experimentación en la escala industrial.	20
2.2.2	Materiales.	21
2.2.3	Procedimiento para el desarrollo del trabajo a escala industrial.	21
2.2.4	Principales equipos y materiales utilizados durante la experimentación a escala de laboratorio.	25
2.2.5	Procedimiento para el desarrollo del trabajo a escala de laboratorio.	25
2.3	Principales herramientas de cálculo.	29

2.4	Conclusiones del Capítulo II.	29
	CAPÍTULO III – RESULTADO Y DISCUSIÓN.	
3.1	Introducción.	30
3.2	Comportamiento del molino de bolas industrial posterior a la colocación de la malla clasificadora a las salidas de los secaderos.	34
3.3	Análisis de la molibilidad del material de alimentación al molino de bolas industrial antes y después de la colocación de la malla clasificadora.	36
3.4	Análisis de la carga de bolas del molino industrial.	38
3.5	Análisis de la productividad del molino industrial.	42
3.6	Impacto medio ambiental con el aumento de la productividad.	47
3.7	Valoración económica.	47
3.8	Conclusiones del capítulo III.	49
	Conclusiones generales.	50
	Referencias Bibliográficas.	51
	Anexo I: Figuras.	53
	Anexo II: Tablas.	55

INTRODUCCIÓN.

Como es conocido, en el mundo existe una crisis energética global, el precio del petróleo cada día es más alto, el agotamiento de las reservas de los portadores energéticos es inminente, los niveles de los minerales fósiles de petróleo son inferiores cada día. Es de gran significación la creación de nuevas tecnologías y métodos que viabilicen la disminución de los altos costos de consumo de energía en los procesos de beneficio de los yacimientos minerales. Los altos requerimientos energéticos que exige este proceso son ejemplos de campos donde se realizan importantes acciones encaminadas a lograr indicadores energéticos cada vez más favorables. La mayoría de los estudios sobre molienda de minerales han apuntado a la reducción de los costos de operación, partiendo que consumen alrededor del 75 % de la energía destinada al sistema de beneficio.

En Cuba se cuenta con dos industrias para el procesamiento de minerales oxidados de níquel y cobalto que utilizan la tecnología carbonato – amoniacal y la tecnología CARON. Estas se encuentran al norte de la provincia Holguín, una es la fábrica “Cmdte. René Ramos Latour” en Nicaro y la otra es la “Cmdte. Ernesto Che Guevara” en Moa, ambas tienen sistemas de preparación y beneficio de minerales con el objetivo de obtener como producto final óxido de níquel sinterizado, sulfuro de níquel + cobalto y óxido de níquel en polvo químico. Esta instalación lleva implícita un sistema de molienda, siendo esta, una de las actividades en el proceso más consumidora de energía. Partiendo de lo antes mencionado, es de gran importancia el estudio de todos los factores influyentes en el índice de consumo de energía.

Existen varios factores influyentes en la eficiencia de la instalación de molienda, como es el grado de llenado de bolas dentro del molino que incide en la disminución del volumen de molturación, los diámetros de las bolas dentro del molino pueden afectarse por el tiempo de trabajo desgastándose por abrasión y afectando así el grado de llenado de los elementos molturantes, la adición del 4 % de petróleo de la masa de mineral que se alimenta en los molinos afecta la productividad alrededor del 25 % de su capacidad de diseño que es de 120 t/h. Los niveles de productividad oscilan de 72 hasta 85 t/h. El desgaste de las ondulaciones de los blindajes interiores de los molinos disminuye el levantamiento de la carga de bolas, limitando la acción de impacto de las bolas contra el

mineral. La humedad del mineral es otro de los factores que tiene gran influencia en la productividad, por cada 1% de humedad se afecta en un 13 % la productividad en los molinos; la relación serpentina limonita por falta de homogenización, parámetro establecido de diseño 1 parte de serpentina por 3 de limonita; el índice de molturabilidad varía a partir de la relación serpentina limonita y las paradas imprevistas por averías mecánicas y eléctricas. Todo esto provoca pérdidas de tiempo de operación en los molinos.

Es importante señalar que en las descargas de los secaderos se han montado cribas giratorias (trómel) con el objetivo de eliminar los materiales estériles con alta sílices que son dañinos al proceso extractivo en Hornos, además al proceso de molienda. Esto permite que el material que se alimenta a los molinos su máxima granulometría sea de 10 mm. Con esta nueva situación se mejora sustancialmente el proceso de molienda.

En trabajos anteriores, Coello Velásquez (1993) estableció un modelo que le ha permitido al personal de tecnología de la planta operar y tener la debida información de la carga de bola relacionada con la demanda de potencia del accionamiento motriz del molino, esto facilita el completamiento de la carga de bolas dentro del molino.

A partir de nuevas condiciones, como es el cambio de blindajes de todos los molinos producto a su desgaste prolongado de 17 años de explotación, se requiere del reajuste de este modelo.

Situación problémica:

Con la colocación de una malla o trómel a las salidas de los secaderos se ha disminuido la entrada de rocas estériles hacia el área de molienda y se ha modificado la granulometría del mineral de alimentación a los molinos. Se estima que este cambio tecnológico tiene una influencia positiva sobre la eficiencia energética del proceso, sin embargo, no se conoce en qué medida la nueva característica del mineral debe conducir a una reducción del consumo específico de energía en dicho proceso, lo que da lugar a la existencia del siguiente problema científico.

Problema:

Desconocimiento de la relación que debe existir entre las características físico-mecánicas del mineral de alimentación a los molinos y el consumo específico de energía del proceso de molienda.

Para la solución de este problema ha sido planteado el siguiente objetivo.

Objetivo:

1. Determinar la relación que debe existir entre las características físico-mecánicas del mineral de alimentación a los molinos de bolas y el consumo específico de energía en el proceso de molienda.

Objetivos específicos:

1. Evaluar la influencia de diferentes factores tecnológicos sobre el consumo específico de energía en el proceso industrial.
2. Determinar la variabilidad de las características físico-mecánicas del mineral de alimentación a los molinos.

Objeto de estudio:

Molinos de bolas.

Campo de acción:

Proceso de molienda de las menas lateríticas en la empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara”.

Hipótesis

El análisis de factores tales como: la molibilidad de las menas lateríticas, la carga de bolas de los molinos y el flujo de alimentación a los mismos, puede conducir al esclarecimiento de la relación que debe existir entre el consumo específico de energía de los molinos y las propiedades físico-mecánicas del mineral de alimentación.

Para el desarrollo del trabajo fueron planteadas las siguientes tareas:

Tareas:

1. Caracterización, desde el punto de vista físico-mecánico, del nuevo mineral de alimentación a los molinos.
2. Determinación de la molibilidad del mineral.
3. Evaluación del consumo específico de energía del proceso de molienda, objeto de estudio, en las nuevas condiciones de explotación.
4. Ajuste de las variables tecnológicas para lograr la aproximación hacia el rango de los mejores valores del consumo específico de energía esperado en el proceso.

Aporte metodológico del trabajo:

1. Se presenta una metodología a través de la cual es posible determinar el rango de variación del consumo específico de energía de un molino de bolas industrial, en dependencia de las características (físico–mecánicas) del mineral de alimentación, dadas fundamentalmente por el tamaño máximo de las partículas y por la relación de las componentes mineralógicas (limonita y serpentina).
2. Se mejora el procedimiento existente que permite determinar el nivel de llenado con bolas de los molinos sin necesidad de destaparlos.

CAPÍTULO I Marco Teórico conceptual.

1.1 Introducción.

En el presente capítulo se hace el análisis de las bibliografías consultadas referidas al tema de investigación “Las propiedades físico-mecánicas de las menas lateríticas y su relación con el consumo específico de energía en el proceso de molienda” con el fin de ampliar el conocimiento y las vías de cómo abordar dicho trabajo, aportando la experiencia que se tiene referido al tema de investigación. Esto facilita el camino en busca de soluciones al problema planteado, así como el desarrollo de la investigación.

Análisis de los trabajos precedentes:

La problemática en torno al proceso de molienda de la mena laterítica ha sido estudiada por varios autores: Lago (1989), Bustamante (1989), Coello y Llorente (1992), Coello (1993[a], 1993[b]), Coello y Tijonov (1996), Aldana y Legrá (1996), Coello y Llorente (2001), Aldana y Legrá (2002), Laborde y Coello (2002), Llorente (2003). Coello y Llorente (1992) realizaron un profundo estudio acerca de la influencia de las variables operacionales en los indicadores energo – tecnológicos de la planta de molienda con ayuda de un experimento factorial completo. En este estudio, los autores lograron reducir la carga de bolas en un 5% con el consecuente ahorro energético. La optimización de las variables operacionales con ayuda de un experimento factorial completo permitió reducir el consumo energético en 0.6 kWh/t (Coello y Llorente, 1993; Coello, 1993[b]) y productividades por encima de las 100 t/h. Sin embargo, estos resultados se vieron limitados por la introducción del petróleo aditivo en la alimentación de los molinos a finales de 1992.

Aldana y Legrá (1996) realizaron un estudio dirigido a la optimización de la productividad y la fineza, aunque estos autores en su trabajo aseguran que aún con la adición del petróleo en la cabeza del molino se puede alcanzar hasta 100 t/h, la práctica ha demostrado lo insostenible de esta afirmación.

Laborde y Coello (2002) realizaron un estudio energético en la planta de molienda, sus resultados mostraron la no existencia de correlación entre la productividad y los

consumos energéticos de la instalación, elementos anteriormente demostrados a escala de laboratorio (Coello 1993ª, Coello y Marrero, 1994) e industrial (Coello y Llorente, 1992).

Independientemente que los trabajos anteriormente citados hayan permitido sustentar la solución de parte de la problemática de la planta, la práctica ha demostrado que la adición de petróleo en la banda alimentadora del molino ejerce un efecto negativo en los indicadores de salida, particularmente en la productividad.
Coello (1993[b]) llegó a la conclusión que en la molienda de minerales multicomponentes, los minerales "participantes en las mezclas minerales" se muelen de acuerdo a sus propias regularidades individuales independientemente unos de otros, de forma tal que cada componente sigue la misma regularidad independientemente del modo de molienda.

El alto consumo de energía en las máquinas de trituración y molienda es el "Talón de Aquiles". El equipamiento disponible para la trituración y molienda de minerales carece de un principio organizativo que le permita suministrar al máximo la energía suministrada en el rompimiento de las partículas minerales (Coello y Tijonov, 2001).
En la molienda, por ejemplo, la energía de desmenuzamiento al material ocurre de forma desmedida, el grado de liberación necesario se alcanza a costa de una alta remolienda de uno o varios de los minerales "participantes", de ahí su baja eficiencia. Austín (1964) estableció que la energía útil en el rompimiento del mineral no supera el 3% de toda la energía consumida por el molino. Beke (1964) determinó que el consumo de energía en el rompimiento del mineral no supera el 0,6%. Independientemente de la diferencia en los resultados de ambos investigadores, si debemos de estar de acuerdo en que la energía que se consume propiamente en el rompimiento de la partícula mineral es sumamente pequeña (Coello, 2003). Como se ve, en la dinámica de la molienda existen muchos trabajos que relacionan la carga de bolas de los molinos con su consumo energético como son los trabajos de Coello (1993) y Laborde (2003), pero existe la posibilidad de seguir investigando sobre la influencia de la carga de bola con relación a la productividad de los molinos y el comportamiento de su eficiencia. Es un

campo bastante abierto y no agotado que cada día de estudio incrementa el conocimiento de los fenómenos que ocurren en la conminución.

El análisis de la distribución del tamaño de las bolas en el molino ha sido de interés para muchos investigadores y aparecen en la literatura especializada trabajos (Banisi, S.; Farzaneh, M, 2006) donde se analiza la distribución de tamaño de las bolas en el interior del molino para un proceso de molienda de mineral de cobre, donde se utilizan bolas únicamente de 80 mm de diámetro y luego se experimenta con una combinación de 75 y 25 % de bolas de 80 y de 60 mm respectivamente, llegándose a la conclusión de que con esta combinación era posible obtener un incremento del 4 % en el producto final (mineral con fineza < 0.074 µm). Este trabajo pone de manifiesto una vez más la importancia del estudio de la distribución del tamaño de las bolas para cada caso de mineral en específico. En otro trabajo **(**N. Kotake, K. Suzuki, S. Asashi, Y. Kanda, 2002) se establecen expresiones empíricas que relacionan la constante de la velocidad de la molienda con los diámetros de las bolas y se llegan a las conclusiones que: las variaciones de la constante adimensional de la velocidad de molienda con el tamaño de alimentación fue aproximadamente análoga y fue independiente de los diámetros de las bolas y de los tipos de materiales. Es posible explicar los resultados mediante el desarrollo de la ecuación propuesta por Snow. Se obtienen ecuaciones para determinar las relaciones óptimas entre el tamaño de alimentación y el diámetro de la bola y entre la constante máxima de la velocidad de molienda y el diámetro de la bola para los materiales utilizados (limestone, silica glass, gypsum).

La mayoría de los autores coinciden en identificar el tamaño de las partículas, la carga de bolas, el tiempo de molienda, la densidad de las partículas y la velocidad del molino, como los factores más influyentes en el comportamiento del molino. En uno de los trabajos consultados (A. Sahoo y G. K. Roy, 2008), se trata de correlacionar todas estas variables con la molibilidad sobre la base del análisis dimensional y con el método del diseño factorial fraccionario. Se observa que estos parámetros influyen significativamente sobre el comportamiento del molino, de modo que a partir de las correlaciones obtenidas, se llega a la conclusión de que la cantidad de finos se incrementa bajo el efecto general del incremento de la carga de bolas, el tiempo de

molienda y la velocidad del molino. Sin embargo, con el incremento del tamaño de las partículas y de la densidad de las mismas disminuye la molibilidad. De los factores considerados, el más influyente es la velocidad, por lo que cuando se quiere optimizar el proceso con respecto a otros parámetros debe mantenerse un estricto control sobre la misma.

Muchos son los trabajos donde se trata el tema relacionado con la energía que es necesario gastar para lograr la reducción de tamaño de las partículas en un proceso de molienda. E.Stamboliadis (2006), considera que en la teoría de la conminución deben considerarse dos partes, una dedicada a la energía que se requiere para la fractura de la partícula del mineral, y otra dedicada a cómo se distribuye esta energía entre las partículas después de la fragmentación. Este autor utiliza el concepto generalmente aceptado en el cual se asume que la parte útil de la energía de la conminución es utilizada para crear nuevas superficies y encuentra una relación entre un tamaño característico del producto del molino y la energía consumida para la molienda. Este mismo autor llega a la conclusión de que la energía específica superficial es una propiedad física de los materiales y que puede ser utilizada como un indicador universal que caracteriza su molibilidad independiente del tipo de molino y de su eficiencia.

Relacionado con el tema de la energía, están los modelos matemáticos propuestos para el estudio y simulación del proceso de molienda. Tavares L y R. M de Carvaho (2009), presentan un modelo para describir la velocidad de desaparición de las partículas gruesas, resolviendo así uno de los problemas de la modelación, donde este tipo de partícula generalmente no se ajusta a la cinética de primer orden. En su trabajo estos autores analizan la fractura de las partículas gruesas considerando la abrasión que sufren las mismas además del impacto, así como el debilitamiento debido a los impactos sucesivos, la aplicación del modelo propuesto resuelve una de las limitantes de los modelos del balance de masa del conjunto de partículas en el proceso de molienda.

El ensayo de Bond, para la molienda, no siempre resulta un experimento asequible, pues se requiere de un molino especial que no abunda en el mercado, por otro lado se presentan dificultades para la selección de la carga de bolas exacta que propuso Bond,

pues no siempre se encuentran esos tamaños exactos. Para vencer estas dificultades, muchos investigadores se han apoyado en la simulación, y por ejemplo, B. Aksany y B. Sonmez (2000), utilizan el modelo cinético acumulativo para este fin. H. T Ozkahraman (2005) determina que existe una fuerte correlación entre el índice de trabajo y el valor de fragilidad de un conjunto de materiales, de modo que el índice de trabajo puede ser determinado a partir de conocer el valor de fragilidad del material y de esta forma se ahorra tiempo y recursos cuando se quiera determinar el índice de Bond de un material determinado. Este mismo autor, en otro de sus trabajos (2010), analiza la fragilidad de algunos materiales desde el punto de vista de los mecanismos de fractura y reafirma las conclusiones del trabajo anterior cuando determina las correlaciones entre el valor de fragilidad de materiales como el mármol y la bauxita. Aguado et al (2006), muestra diferentes metodologías para la simulación del índice de Bond con un variado grupo de materiales, alerta sobre el cuidado que se debe tener en los cálculos y en los procedimientos para obtener buenos resultados mediante estas vías indirectas.

A pesar de la vasta experiencia que existe en la utilización del índice de Bond para el diseño de los molinos de bolas, es frecuente que se cometan errores durante la realización práctica de los ensayos que conllevan a la falta de precisión en los resultados, algunos autores (J. B. Mosher, C. B Tague, 2001) han dado recomendaciones sobre cómo conducir el ensayo con un alto nivel de precisión tomando en consideración la selección de la carga de bolas a partir de un rango de diámetros con referencia a los valores planteados por Bond y el cuidado que se debe tener a la hora de calcular el índice de molturabilidad para saber en qué momento se alcanza el equilibrio y se dan por terminado los ciclos de molienda.

El análisis de la molibilidad de materiales mezclados ha sido objeto de interés de un grupo de investigadores, por ejemplo, H. Ipek, Y. Ucbas y C. Hosten (2005) aplican la prueba de Bond a los materiales que conforman la materia prima de la cerámica (cuarzo, caolín y feldespato) y determinan que los índices de trabajo de las mezclas que contienen el material más blando (caolín) son más altos que los índices de trabajo de los materiales individuales, por lo que llegan a la conclusión que la molienda por separado de los componentes de la materia prima es más efectivo desde el punto de vista de

ahorro de energía con respecto a la molienda de las mezclas. En otro trabajo (H. Ipek et al, 2005) se realiza un estudio sobre la cinética de la molienda batch para mezclas binarias de la materia prima de la cerámica como son cuarzo-caolín, cuarzo-feldespato de potasio y caolín-feldespato de potasio en un molino de Bond. Fueron determinados los parámetros de fragmentación para predecir las distribuciones del producto. Se observó que según se incrementa en la alimentación del molino la cantidad de mineral con tamaño comprendido entre – 3.35 hasta + 2.36 en el límite superior, y – 0.300 a + 0.212 en el límite inferior. Los valores de la razón específica de la fragmentación (S_i) también se incrementan notándose una fragmentación más rápida en el siguiente orden: cuarzo-caolín, cuarzo-feldespato de potasio y caolín-feldespato de potasio. Los valores obtenidos ($B_{i,j}$) de la función de distribución de la fragmentación fueron ligeramente diferentes para cada una de estas mezclas de minerales. Laborde (2005), también analiza la molibilidad de las menas lateríticas tratándolas como una mezcla de las componentes serpentinítica y limonítica, y llega a la conclusión de que cada componente tiene sus propias características de molibilidad y que estas características se combinan en dependencia de la proporción en que se encuentren estas dos componentes en la mena niquelífera.

1.2 Teoría de la molienda.

Los fenómenos de reducción de tamaño se han estudiado a través de la energía consumida por los equipos de trituración y molienda por más de un siglo. Estos puntos de vistas, en nuestra opinión, bastante correctos, están relacionados con los grandes consumos energéticos en que se incurre la trituración/molienda. La práctica mundial ha demostrado que en las plantas de Beneficio alrededor del 85% del consumo de energía corresponde precisamente al desmenuzamiento y a la molienda, y aproximadamente 75% a la molienda. El nivel del grado de eficiencia de la molienda es objeto de controversia, según la definición que se adopte. De acuerdo con interpretaciones muy diversas, la energía que el molino requiere para transformarla en trabajo de desmenuzamiento queda situada entre el 2% y el 20%, el resto se distribuye en rozamiento de las partículas entre si, rozamiento de las partículas con las paredes del molino, ruido, calor, vibración, rendimiento del motor y del molino, y elevación del mineral en el molino.

El grado de utilización de la energía suministrada, teóricamente baja, ofrece más interés en los dispositivos de molienda que para la explotación práctica, en la cual la energía aplicada a la molienda se puede considerar baja en relación con las ventajas del resultado tecnológico que con ella se obtiene.

La preparación mecánica de los minerales se puede definir como el conjunto de operaciones, tecnológicamente relacionadas entre si, cuyo objetivo principal es preparar el mineral para su ulterior tratamiento mediante la transformación física de la materia prima mineral.

En la fábrica Che Guevara, los molinos de tambor instalados son monocámaras, estos presentan en ambas tapas laterales un muñón que en su interior lleva acoplado un sinfín para retener el mineral a la entrada y salida del molino con el fin de que no obstaculice la recirculación de aire en el interior del molino y además para evitar el derrame, los muñones se apoyan en cojinetes y el tambor gira alrededor del eje horizontal.

En el interior del tambor del molino se depositan los elementos moledores, al girar el tambor, los elementos moledores debido al rozamiento son arrastrados por su superficie interior, levantándose hasta una altura determinada y caen libremente o pasan uno por encima de otro hacia abajo. A través de uno de los gorrones huecos entrega al tambor constantemente el mineral a moler, sometiéndolo a la acción de los elementos moledores, los que muelen el material mediante golpes, desgaste y fricción.
El producto molido se entrega continuamente a través del otro gorrón hueco, al girar el tambor, el material se mueve a lo largo de su eje a causa de la diferencia de niveles de carga y descarga de la presión de entrega continuamente del mineral. También el material es arrastrado por una corriente de aire que se origina al extraer el aire del tambor a ciclo cerrado.

El funcionamiento de los molinos de bolas en ciclo cerrado con clasificador (figura 1) se debe a la necesidad del control del grosor del producto molido.

Varias veces circulan a través del molino, y cuando se establece el régimen de ciclo cerrado su cantidad se estabiliza.

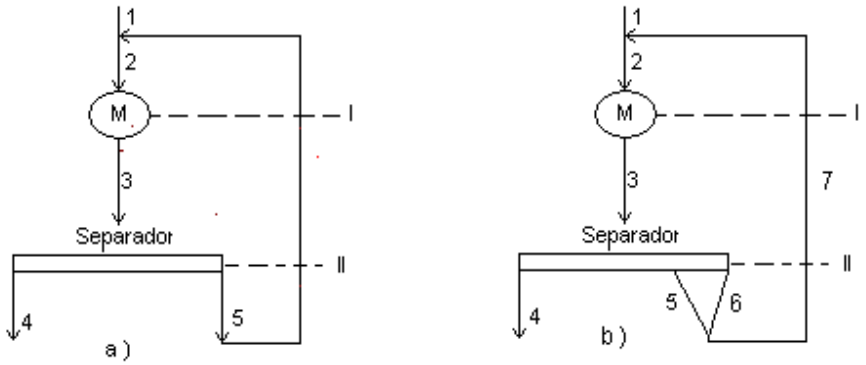
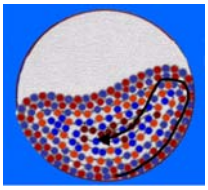


Figura 1. Esquema de un circuito de molienda en ciclo cerrado con clasificación.

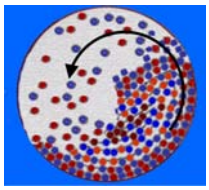
a)1.-alimentación, 2.- material de entrada al molino, 3.- material de descarga del molino, 4.- producto final ,5.- material de recirculación.

b)1.-alimentación, 2.- material de entrada al molino, 3.- material de descarga del molino, 4.- producto final, 5- descarga del cono interior del separador, 6.- descarga del cono exterior del separador, 7- material de recirculación.

En el molino debido a los regímenes de velocidades de trabajo del mismo, existen tres formas de molienda que son: el de catarata, en cascada y la combinación de ambas.



a) Movimiento en cascada



b) Movimiento en catarata

Movimientos de las bolas en el interior del molino en los procesos de molienda seca.

El primero ocurre cuando la frecuencia de rotación del molino es baja y se caracteriza por el rodado de unas bolas sobre otras de forma paralela. Aquí la molienda se realiza principalmente por aplastamiento y por frotación de las bolas que ruedan, de aquí que sean afectadas fundamentalmente las partículas pequeñas. El segundo ocurre a medida que se va aumentando la frecuencia de rotación del molino. En este caso las bolas salen de sus trayectorias circulares, y como cuerpos lanzados en ángulos con

respectos al horizonte van a caer de nuevo a las trayectorias circulares en forma de cataratas.

Bajo este régimen de cataratas, la molienda se efectúa principalmente por el golpe de las bolas que caen y parcialmente por el desgaste.
En los molinos es difícil separar estos dos movimientos de las bolas, por eso se dice que el proceso de molienda se efectúa bajo el régimen mixto cascada-catarata.

1.2.1 Fórmula del desmenuzamiento.

De acuerdo con la tercera teoría de Bond para el desmenuzamiento, cuya fórmula fundamental es:

$W=10W1/P^{0.5})- 10W1/F^{0.5})$ (1.1)

W - kWh por tonelada, 907 kg

F- Tamaño del material de alimentación cuyo 80 % pasa por el tamiz, en μm

P- Diámetro del material terminado cuyo 80 % pasa por el tamiz, en μm

Wi- Índice de trabajo de molienda Bond

1.2.2 Masa de bolas dentro de un molino de tambor cilíndrico.

La expresión de cálculo de carga de bolas en un molino de tambor cilíndrico se manifiesta de la siguiente forma:

$M_{cb} = \varphi\ (\ (\pi \times D^2)/4) \times L \times 4.6 = 3.61\ \varphi\ D^2\ L\ ;\ t$ (SE ANDREIEV 1980) (1.2)

Donde:

M_{cb} - en (t)

φ - Coeficiente de llenado

D - Diámetro del molino en (m)

L - Longitud del molino (m)

1.2.3 Potencia de un molino de bolas.

Para un molino de bolas con el grado de llenado correcto y velocidad de rotación óptima, se puede determinar la potencia exigida mediante la fórmula empírica de Blan

$P= C\ G\ D^{0.5}$; CV (1.3)

$P = 0.7358\ C\ G\ D^{0.5}$; kW (1.4)

P - Potencia necesaria en CV o kW

C - Factor relacionado con los cuerpos moledores y con el grado de llenado. Para nuestras condiciones este coeficiente toma un valor de 10.279

G - Carga de bolas en t

D – Diámetro interior del recinto de molienda

1.2.4 Productividad de un molino.

Según Towaraw, Manual tecnológico del cemento 3, Autor Duda Walter, situado en la Página Web (http://books.google.com.cu) Búsqueda de libros de Google, muestra la fórmula que dedujo para el cálculo del caudal de los molinos de bolas, siendo:

$Q = q \times (a \times b \times c/\ 1000) \times 6.7 \times V \times (D)^{0.5} \times (G/V)^{0.5}$ (1.5)

Donde:

Q - Productividad en t/h

q - kg / kWh, caudal específico del molino, en kg del material de alimentación por kWh de consumo de energía, con un 10 % de residuo al tamiz de 4900 mallas/cm^2, ese caudal específico se acepta con 40 kg/kWh

a - Coeficiente de molturabilidad Tabla 6.6.1

b - Factor de corrección de molienda fina tabla 6.6.3

c - Factor de corrección por el tipo de molino, Tabla 6.6.4

V - Volumen total del molino en m^3

L - Longitud del molino en m

φ - Coeficiente de llenado

$G = (M_{cb})$ - Peso de la carga moledora en t

Si sustituimos la masa de la carga de bolas en esta fórmula por la expresión (1.2) que está en el punto anterior 1.2.2, podemos tener la productividad en función del coeficiente de llenado, haciendo las demás variables estables y variando φ.

$Q = q \times (a \times b \times c/\ 1000) \times 6.7 \times V \times (D)^{0.5} \times (\varphi \times 4.6)^{0.5}$ (1.6)

1.2.5 Determinación del coeficiente de llenado.

$$\varphi = \frac{Vcb}{Vtm}; \quad (1.7)$$

donde:

Vcb - Volumen aparente que ocupa la carga de bolas dentro del molino, m^3

Vtm - Volumen total del molino, m^3

φ - Coeficiente de llenado

1.2.6 Determinación de la potencia a partir de la carga molturante.

Según la carga Molturante, (Dimensionado de molinos, 2003), la potencia se determina por la ecuación 2.6

$$P = k \cdot P_c \cdot \sqrt{D} \quad (1.8)$$

Donde:

P : Potencia, (CV)

P_c : Peso de la carga de bolas, (t)

D : Diámetro interno del molino, (m)

k : Coeficiente según el grado de llenado en bolas del molino, para lo cual propone la siguiente tabla:

Tabla 1.1 Relación entre el coeficiente k y el grado de llenado en bolas. (Dimensionado de molinos, 2003)

φ, (%)	10	20	30	40	50
k	11.9	11	9.9	8.5	7.0

El resultado se obtiene en CV. Para expresarlo en kW se multiplica por 0,735.

1.2.7 Cálculo de la potencia de acuerdo a la tercera ley de Bond.

Bond expone los tres principios básicos de su teoría mediante la ecuación (1.9), según Andreiev et al, 1987

$$P = k \cdot 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \cdot t \qquad (1.9)$$

donde:

P : Potencia, (kW)

k : Coeficiente, (1,3)

t : Productividad del molino, (t/h)

P_{80} : Tamaño correspondiente al 80 % de pasante del producto final, (μm)

F_{80} : Tamaño correspondiente al 80 % de la alimentación fresca, (μm)

Wi : Índice de trabajo del material obtenido a escala de laboratorio, (kWh/t)

1.2.8 Conclusiones.

1- El proceso de molienda de los minerales lateríticos, independientemente de haber sido ampliamente estudiado, requiere de nuevos estudios de acuerdo a la introducción de nuevas tecnologías y a las condiciones actuales de explotación en la planta objeto de estudio, luego de haberse reducido el tamaño máximo de alimentación a los molinos.

2- La bibliografía consultada y las teorías existentes sobre el proceso de molienda son herramientas fundamentales para la solución del problema propuesto.

CAPÍTULO II Materiales y métodos.

2.1 Introducción.

La adecuada selección de los materiales y métodos es fundamental en todo trabajo investigativo para garantizar su desarrollo eficaz y la veracidad de los resultados, de ahí la importancia de ser cuidadoso al seleccionar las muestras y mediciones concretas, usando los instrumentos de mediciones adecuados y debidamente certificados. El objetivo principal del presente capítulo consiste en exponer las principales técnicas y procedimientos utilizados durante el trabajo experimental.

Aspecto importante constituye el uso de programas de computación, los que propician rapidez y confiabilidad en los resultados durante el desarrollo de los experimentos a escala industrial y de laboratorio.

Además se establece el orden cronológico de las acciones que se deben llevar para el desarrollo de la investigación.

Datos generales de la fábrica:

El área de construcción de la fábrica se encuentra al norte del yacimiento de mineral de Punta Gorda, provincia de Holguín, en la costa Norte del Océano Atlántico, entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km. de la ciudad de Moa.

El esquema tecnológico de la fábrica de Níquel Ernesto Che Guevara está basado en el esquema de lixiviación carbonato – amoniacal del mineral reducido o proceso Caron, similar al proceso de la fábrica René Ramos Latour de Nicaro.

Una de las deficiencias de este proceso es el bajo % de extracción: (75 a 76) % de Ni y (25 a 30) % de Co.

El complejo minero – metalúrgico de la empresa comprende las siguientes actividades:

2.1.1 Mina: Suministra el mineral a la fábrica; está situada a 1 ó 1.5 km al Suroeste del área industrial. El mineral de la capa superior está compuesto de Limonita y el cuerpo de Laterita y Serpentina (blanda). Los componentes fundamentales del mineral son el Níquel, el Cobalto y como acompañante en cantidades considerables el Hierro. La

transportación se realiza directamente desde las excavaciones hasta el área de recepción por camiones volquetas.

2.1.2 Preparación de Mineral:

El mineral procedente de la mina se transporta hacia la Planta de Preparación de mineral a través de transportadores de bandas. Este mineral con una humedad de 38 % es secado en los tambores cilíndricos rotatorios (secaderos) hasta valores de (4.0 a 5.5) % de humedad, el que es transportado por bandas hacia la sección de molienda donde es sometido a un proceso de desmenuzamiento en molinos cilíndricos monocámaras de bolas (molienda seca) hasta valores de granulometría de: +0,149 mm (4 a 7,5) %, +0,074 mm (7 a 8)%, -0,074 mm (85 a 87)%, siendo un sistema a ciclo cerrado, barrido por aire provocado por un ventilador centrífugo, cuya función es crear una recirculación de aire dentro del molino para generar la descarga del mineral.

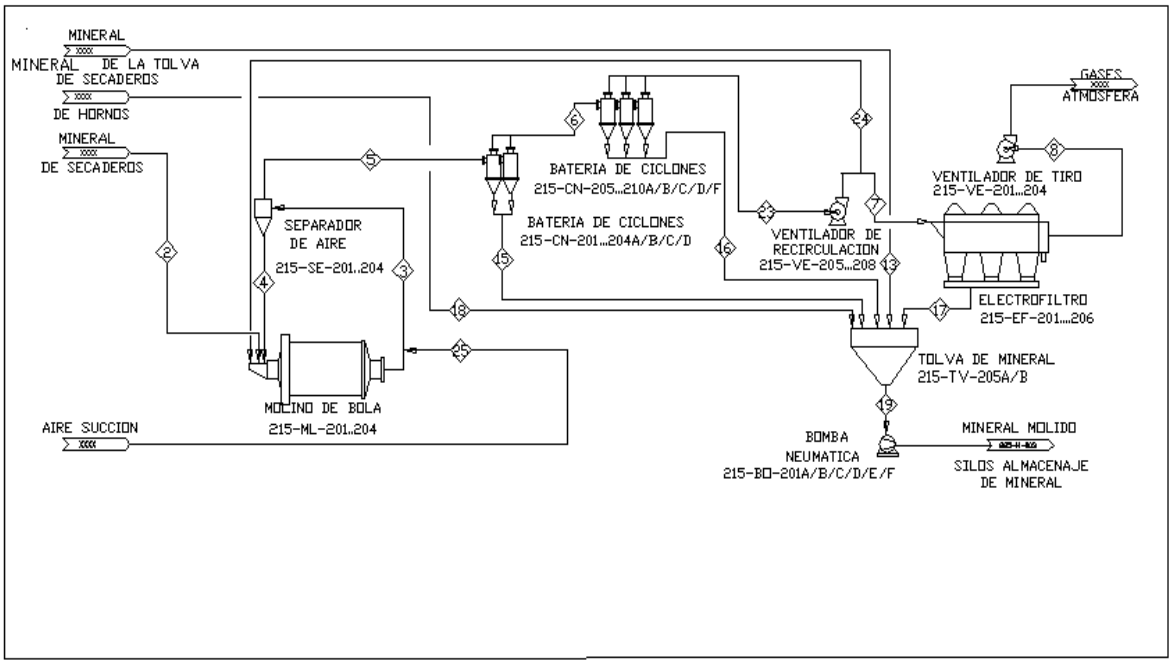


Figura 2.1 Circuito de molienda a ciclo cerrado.

2.1.3 Planta de Hornos de Reducción: En esta planta ocurre el proceso de reducción del Ni contenido en el mineral. Está constituida por 24 hornos de soleras múltiples, los que descargan el mineral a los enfriadores (12), de donde pasa a la planta de Lixiviación y Lavado.

2.1.4 Planta de Lixiviación y Lavado: La pulpa de mineral reducido pasa por 3 sistemas paralelos de tres etapas de lixiviación a contracorriente con el licor carbonato amoniacal. La lixiviación se realiza con el licor carbonato – amoniacal en los espesadores por medio de la aireación de la pulpa con aire (en los turboareadores). Luego de la lixiviación la pulpa se envía al sistema de Lavado (dos en paralelo). El licor enriquecido en Ni y Co es enviado a la planta de Separación de Cobalto, la pulpa de desecho es enviada a la planta de Recuperación de Amoniaco.

2.1.5 Recuperación y Separación de Cobalto: El licor enriquecido en Ni y Co se somete a una inyección de hidrosulfuro de amonio o sulfhidrato de sodio para precipitar el Co en forma de sulfuro, este producto se envasa en big–bag y se comercializa. El licor descobaltizado se envía a la planta de Recuperación de Amoniaco. El licor carbonato amoniacal enriquecido en Ni recibe un tratamiento con vapor en las torres de destilación, obteniéndose el carbonato básico de níquel. La pulpa de desecho de la última etapa de lavado se envía a las torres de destilación de colas donde recibe tratamiento con vapor para la recuperación del licor amoniacal contenido en esa pulpa. El producto de desecho (cola) es enviado a la presa de cola. La pulpa de carbonato de Ni se envía a la planta de Calcinación y Sinter.

2.1.6 Planta de Calcinación y Sinter: Luego de filtrado el carbonato básico de Ni es alimentado a los hornos de calcinación para la obtención del óxido de Ni, que es utilizado en el proceso de sinterización en las máquinas destinadas para este fin; obteniéndose el óxido sinter que constituye el producto final de la planta y de la fábrica. Este producto es envasado en big–bag y trasladado al puerto para su comercialización.

2.2 Planificación del experimento.

Para el desarrollo del trabajo fue planificado un conjunto de experimentos tanto a escala industrial como a escala de laboratorio. En la industria fueron registradas y medidas un conjunto de variables que caracterizan el comportamiento del proceso de molienda, mientras que a escala de laboratorio fueron investigadas las características granulométricas del mineral y el índice de Bond.

2.2.1 Principales equipos y materiales utilizados durante la experimentación en la escala industrial.

A continuación se relacionan las características fundamentales del equipamiento tecnológico que fue utilizado de forma directa o indirectamente en las investigaciones.

1 - Alimentador de disco.

Capacidad: 15,277 a 33,333 kg/s

Velocidad nominal del disco: 8,8 rpm

Longitud: 2540 mm; Ancho: 1890 + 8,5 mm

Diámetro del disco: 1600 mm

Accionamiento eléctrico: motor asincrónico trifásico con U = 480 V; P = 4 kW; f = 60 Hz

2 - Transportador de banda.

Capacidad: 44,444 kg/s

Velocidad nominal: 1,15 m/s

Largo: 13500 mm; Ancho: 1000 mm

Accionamiento: motor asincrónico trifásico con U = 480 V ; P = 15 kW ; f = 60 Hz

Velocidad nominal del motor: 1800 rpm

3 - Molino de bolas.

Tipo: cilíndrico, 3200 x 5700 mm

Capacidad: 33.333 kg/s

Carga de bolas: 54 t

Diámetro: 3200 mm; Largo: 5700 mm

Velocidad de rotación: 17.36 rpm

Velocidad relativa (Ψ): 73.4 %

Accionamiento: motor sincrónico trifásico con U = 10 kV ; P = 800 kW ; f = 60 Hz ;

velocidad nominal del motor: 720 rpm

4 - Ventilador de recirculación BM20

Capacidad nominal de 134 000 m^3/h

Potencia 400 kW

Revoluciones 540 r/min

Los instrumentos de medición utilizados se relacionan a continuación.

1- Analizador de redes trifásico tipo Multilin, Modelo SR 469PC, con clase de precisión de 0.5 %

2- Kilowatímetro analógico de 0 – 800 kW , clase de precisión 1.7 %

3- Amperímetro analógico de 0 – 100 Amp , clase de precisión 1.7 %

4- Balanza mecánica de 0 – 10 kg, clase de precisión 0.01%

5- Cronómetro analógico de 0 - 1 hora

6- Cinta métrica de 0 – 5 m

2.2.2 Materiales:

1 - Mineral laterítico	120 kg
2 - Cartuchos para muestras	20 U
3 - Sobre para envasar las muestras	100 U
4 - Sacos de Nylon	8 U
5 - Brochas	2 U

2.2.3 Procedimientos para el desarrollo del trabajo a escala industrial.

El trabajo experimental en la industria consistió en la observación del comportamiento de los molinos del proceso productivo en la planta objeto de estudio. Para ello fueron registradas las principales magnitudes eléctricas de los accionamientos de los molinos por un período de tres meses, haciendo énfasis en las potencias y en la energía consumida por dichos molinos. Los intervalos de registros fueron por lo general de 5 minutos. Paralelamente fueron estudiadas otras variables como la productividad, el flujo de alimentación de aire a los molinos, la humedad del mineral, el % de petróleo aditivo, la carga de bolas, etc. Para el estudio de estas variables se siguieron los

procedimientos empleados en trabajos anteriores (Llorente, 2003; Laborde, 2005; Mendoza, 2008).

Para la determinación de la carga de bolas de los molinos se empleó el método de medición de la altura que queda en el interior del molino, desde la superficie de la masa de bolas hasta la parte superior del tambor. Esta medición se realiza con el molino detenido y destapado. Los cálculos para estimar el coeficiente de llenado con bolas del molino se realizan a través del modelo que aparece en la fig. 2.1, o utilizando el gráfico que relaciona la altura y el diámetro del molino con el coeficiente de llenado (Mogateux, 2005).

d – Diámetro del molino

h – Altura libre entre la superficie de las bolas y la parte superior interna del tambor del molino.

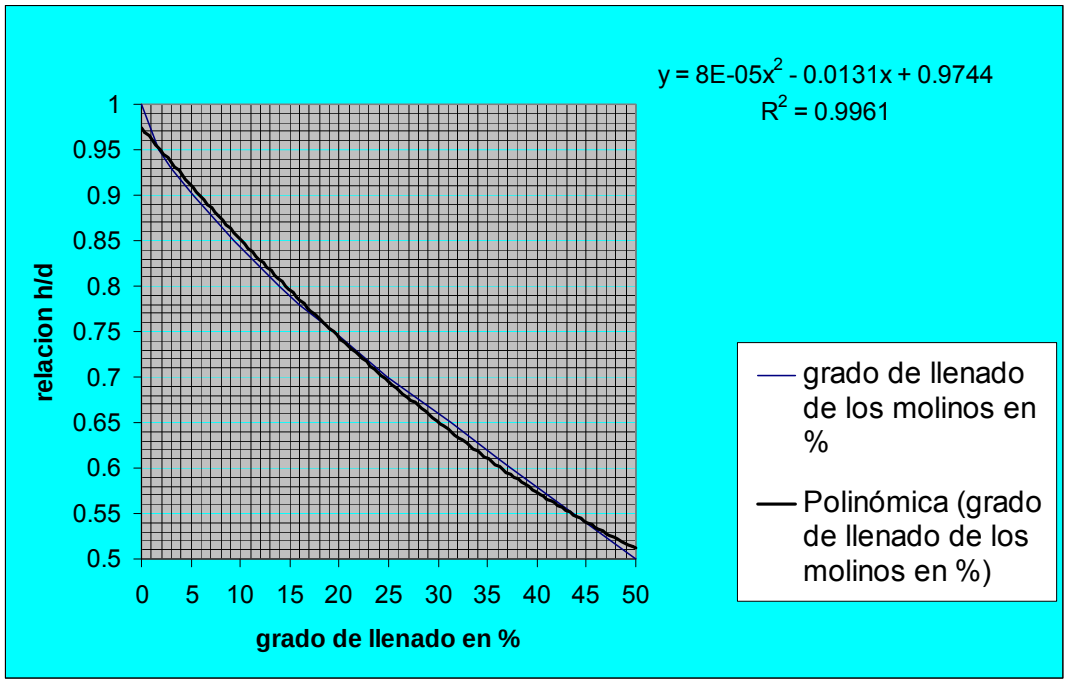


Figura 2.1 Relación de la altura libre y el diámetro del molino con el coeficiente de llenado con bolas.

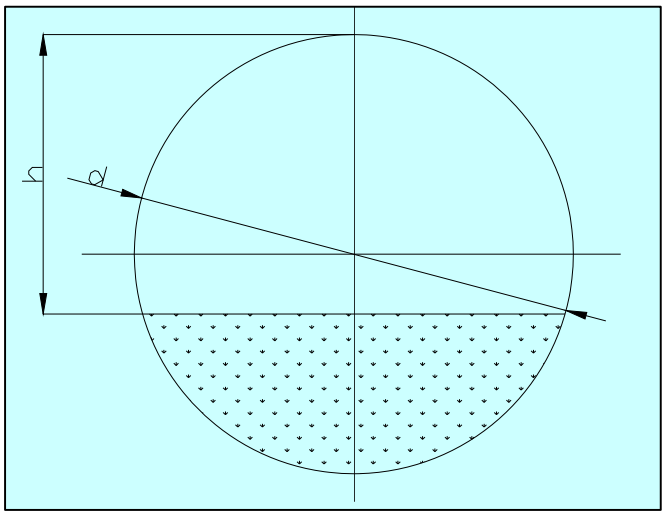


Figura 2.2 Ilustración de las medidas que se toman dentro del molino para determinar el coeficiente de llenado con bolas mediante el empleo del gráfico de la fig. 2.1

Con el objetivo de rectificar el modelo que se emplea actualmente en la planta objeto de estudio y así determinar la carga de bolas de los molinos sin necesidad de detenerlos, ni de destaparlos (modelo propuesto por Coello, 1993), se determinó nuevamente la relación entre la potencia demandada por el accionamiento de cada molino y la carga de bolas. Para este trabajo se incrementó la carga de bolas de forma paulatina en el molino, partiendo desde cero, al mismo tiempo que se medía la potencia del accionamiento.

Para el estudio de la productividad de los molinos fueron utilizados los modelos matemáticos que fueron propuestos en trabajos anteriores para este fin (Laborde, 2005; Mendoza, 2008), donde se tiene en cuenta la altura del tornillo de regulación de los alimentadores de discos con relación a un punto fijo en cada uno de los molinos. A modo de ejemplo se muestra el modelo utilizado para el molino 1 del proceso industrial.

$$Q = 0.041\, l^2 + 2.413 + 35 \qquad (2.1)$$

donde,

Q: Productividad del molino, t/h

l: Desplazamiento del tornillo de regulación del alimentador, cm

Los resultados obtenidos con la aplicación de este método fueron comparados con los reportes técnicos de la planta, observándose siempre una diferencia mínima entre ambos resultados.

La composición granulométrica del mineral a la entrada de los molinos y del producto final fueron tomadas de los reportes del laboratorio de la planta, así como la composición química, la humedad y el % de petróleo aditivo.

Para el estudio del flujo de aire a través del molino se realizaron mediciones de esta variable según los procedimientos seguidos en trabajos anteriores (Laborde 2005).

Para la medición y registro de las principales magnitudes eléctricas de los accionamientos de los molinos se instaló un analizador de redes trifásico a través de los transformadores de corriente y de potencial, que se encuentran ubicados en el panel general de alimentación de los molinos a una tensión de 10 kV. También se realizaron lecturas en los contadores de energía que están permanentemente instalados para cada molino.

Para estimar el consumo específico de energía del molino industrial que teóricamente debe tener, según el método de Bond, se empleó la expresión:

$$W = 10\,Wi\left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}}\right) \text{ kWh/t} \qquad (2.2)$$

donde,

W_i : Índice de Bond (corregido para molienda seca y de acuerdo al diámetro del molino industrial), kWh/t.

P_{80} : Tamaño correspondiente al 80 % de pasante del producto final, en μm.

F_{80} : Tamaño correspondiente al 80 % de pasante de la alimentación fresca, en μm.

Para determinar el consumo específico de energía real del molino, se dividió la energía consumida en un período dado, entre la producción del molino para ese período.

2.2.4 Principales equipos y materiales utilizados durante la experimentación a escala de laboratorio.

A continuación se relacionan las características fundamentales del equipamiento que fue utilizado para el desarrollo del trabajo en el laboratorio de Metalurgia del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

1.- Juego de tamices de la serie Taylor (10; 8; 5; 3.5; 3.15; 1.6; 1; 0.71; 0.60; 0.40; 0.30; 0.20; 0.16; 0.074) mm

2.- Balanza mecánica (Modelo triple bank). Rango de (0 – 2000) g, con clase de precisión de 0.1.

3.- Molino de bolas semi-industrial de 430 x 490, con velocidad relativa Ψ = 0.90, accionado por un motor trifásico de 1.5 kW.

4.- Estufa eléctrica con rango de temperatura de (0 – 350) ^{o}C

El material utilizado para el trabajo de laboratorio consistió en muestras de mineral tomadas directamente en la correa transportadora de alimentación a las tolvas de los molinos en el proceso industrial, con un 4 % de petróleo aditivo.

2.2.5 Procedimientos para el desarrollo del trabajo a escala de laboratorio.

Para el estudio de la composición granulométrica del mineral se realizó un análisis granulométrico a través del tamizado, por vía seca para las fracciones hasta + 1mm y por vía húmeda para las fracciones inferiores. Se tuvieron en cuenta también los estudios precedentes sobre la caracterización del mineral en años anteriores (Llorente, 2000; Laborde, 2005).

Para la determinación del índice de Bond se procedió a realizar ensayos de molienda a 3 muestras del mineral con el fin de estimar los parámetros del modelo cinético acumulativo. Los tiempos de molienda fueron de 1.5, 3.5 y 4.5 minutos para diferentes muestras de 1500 g. El modelo empleado tiene la forma:

$$W(x,t) = W(x,0)\, e^{-kt} \qquad (2.3)$$

donde,

W(x,t): Es el % acumulado de material de tamaño superior a un tamaño dado x, (rechazo acumulado en un tiempo t).

W(x,0): Rechazo acumulado correspondiente al mismo tamaño x, en la alimentación.

K: Parámetro de la cinética de la molienda. Se puede definir como la velocidad de desaparición del material, en $(r/min)^{-1}$.

Según este modelo, la relación entre el parámetro de la cinética y el tamaño de la partícula puede ser descrita matemáticamente mediante la expresión:

$$k = C\ x^n \qquad (2.4)$$

en las que C y n son constantes que dependen de molino y de las características del material respectivamente.

De esta forma una vez que son conocidas C y n puede obtenerse la distribución granulométrica de un producto tras un tiempo t de molienda a partir de una alimentación determinada, haciendo uso de la combinación de las dos expresiones anteriores:

$$W(x,t) = W(x,0)\, e^{-C\, x^n\, t} \qquad (2.5)$$

Los valores del parámetro de la cinética k para cada tamaño se obtienen realizando una regresión lineal de los valores de rechazo acumulado frente al tiempo, sobre la ecuación linealizada de la siguiente forma:

$$\log_{10} W(x,t) - \log_{10} W(x,0) = -k\,t \qquad (2.6)$$

Para el cálculo de C y de n, a partir de los valores de k obtenidos para cada tamaño, se realiza una nueva regresión,

$$\log_{10}(k) = \log_{10}(C) + n\ \log_{10}(x) \qquad (2.7)$$

Conocido el valor de C para la muestra dada de mineral, determinamos el contenido de serpentina de dicha muestra mediante el empleo del modelo (Laborde, 2005):

$$C_s = 1{,}9595\, C^{-0{,}7645}\ \% \qquad (2.8)$$

donde C_s es la componente serpentinítica del mineral.

A partir del valor de C_s, se determina el índice de Bond para la muestra mediante el modelo (Laborde, 2005):

$$W_i = 0{,}1937\ C_s + 0{,}1109 \qquad (2.9)$$

Wi: Índice de trabajo, kWh/t

Para determinar la influencia de la carga de bolas sobre la productividad del molino, se trabajó con los coeficientes de llenado 0.15, 0.19 y 0.23, semejantes a los coeficientes de llenados presentes en los molinos del proceso industrial. Para la carga del molino de laboratorio se buscó una cierta proporcionalidad con respecto a la distribución de las bolas en el molino industrial, según se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Distribución de la carga de bolas en el molino industrial.

Diámetro Bola	Distribución de la carga de las bolas en %	Diámetro de la partícula max.(mm)	Distribución de la carga de bolas en (t)
100	10.18	45.55	5.5
70	10.18	15.62	5.5
50	14.81	5.69	8
40	24.07	2.91	13.5
32	40.74	1.49	21.5

La distribución de las cargas de las bolas seleccionadas para el molino de laboratorio, para cada coeficiente de llenado se muestra en las tablas 2.2, 2.3 y 2.4. Para cada una de estas cargas de bolas se realizaron corridas de molienda para los tiempos previstos. Al producto final de cada corrida se le realizó el correspondiente análisis granulométrico.

Tabla 2.2 Distribución de bolas en el molino de laboratorio para el coeficiente de llenado φ = 0.15.

Bola diámetro (mm)	Peso de una bola (kg)	Cantidad de bola (U)	Peso total de las bolas (kg)	Distribución en %	Coeficiente de llenado φ
66	1.2	6	11.922	15.39	0.15
48	0.4	22	13.289	17.15	
42	0.28	46	19.744	25.48	
28	0.08	247	32.505	41.96	

Tabla 2.3 Distribución de bolas en el molino de laboratorio para el coeficiente de llenado φ = 0.19.

Bola diámetro (mm)	Peso de una bola (kg)	Cantidad de bola (U)	Peso total de las bolas (kg)	Distribución en %	Coeficiente de llenado φ
66	1.2	8	11.92	15.39	0.19
48	0.4	28	13.28	17.15	
42	0.28	58	19.74	25.48	
28	0.08	312	32.50	41.96	

Tabla 2.4 Distribución de bolas en el molino de laboratorio para el coeficiente de llenado φ = 0.23

Bola diámetro (mm)	Peso de una bola (kg)	Cantidad de bola (U)	Peso total de las bolas (kg)	Distribución en %	Coeficiente de llenado φ
66	1.2	10	11.92	15.39	0.23
48	0.4	33	13.28	17.15	
42	0.28	69	19.74	25.48	
28	0.08	378	32.50	41.96	

Para determinar la cantidad de mineral a moler durante los experimentos, se utilizó el criterio de mantener un valor constante de la función razón específica de la fragmentación (Prasher,1987), y esto se logra cuando el mineral ocupa del 60 al 110 % de los espacios entre las bolas. Este volumen se determinó mediante el procedimiento siguiente:

$V_{eb} = V_{cb} - V_{mb}$ (2.10)

V_{eb} – Volumen total de los intersticios entre las bolas m^3

V_{cb} - Volumen que ocupa la carga de bolas en el molino (0.23) del volumen total del molino m^3

V_{mb} – Volumen total de la masa de bolas m^3

Con una alimentación de 6.2 kg de masa de mineral, siendo esto el 80 % de la masa total calculada para las condiciones de llenado con las bolas.

Para la selección de las muestras a moler, el material fue previamente homogenizado y se aplicó la técnica del cuarteo. Se hicieron 9 réplicas, 3 para cada tiempo de molida de (1.5, 3, 4.5) minutos.

La cantidad de mineral para el análisis granulométrico se determinó a partir de la masa mínima que se obtiene mediante la expresión:

$$Q_{mínima} = 0.02\ (d)^2 + 0.5d \qquad (2.11)$$

donde:

d: Diámetro máximo del mineral, mm.

Q_{min} : Masa mínima, kg.

2.3 Principales herramientas de cálculo.

Para el procesamiento de la información recopilada fue utilizada la herramienta computacional, fundamentalmente el EXCEL, a través del cual fueron obtenidos los gráficos que aparecen en el trabajo y los ajustes de curvas.

2.4 Conclusiones del capítulo.

1- El diseño de la investigación garantiza adecuadamente el tratamiento del problema planteado.
2- Los equipos y medios de medición en buen estado técnico y debidamente certificados permitieron garantizar la calidad y veracidad de los resultados.
3- La medición y registro del conjunto de las principales variables eléctricas y no eléctricas que caracterizan el proceso de molienda industrial, así como la aplicación de métodos clásicos para los ensayos de molienda y la utilización combinada de modelos matemáticos debidamente validados, permiten un enfoque integral del problema planteado.

CAPÍTULO III Resultados y discusión.

3.1 Introducción.

En este capítulo se exponen los resultados del trabajo desarrollado tanto a nivel de laboratorio como a escala industrial, se muestra la relación existente entre las diferentes variables que han sido consideradas en la investigación y que tienen influencia sobre el proceso de molienda del mineral laterítico. Se evalúa la influencia de las propiedades físico-mecánicas del mineral sobre el consumo específico de energía, las cargas de bolas, el coeficiente de llenado con el medio molturante y el consumo energético que existe antes y después del sistema de beneficio instalado a la salida de cada secadero, donde las partículas mayores de 10 mm son separadas como rechazo, alimentando a los molinos con partículas menores de 10 mm.

La importancia de racionar el consumo de energía planificado en condiciones actuales, con un basamento técnico - económico para una producción singular con una calidad establecida, siendo la molienda del mineral laterítico un proceso complejo que exhibe sus particularidades con respecto a la molienda de otros tipos de minerales. En el influyen un gran número de factores que sólo pueden ser tenidos en cuenta mediante la experimentación en las condiciones concretas de explotación de la instalación. Después de haber obtenido los resultados, se explicará cada uno y sus incidencias en el proceso.

La composición granulométrica del mineral de alimentación a los molinos y su variabilidad ha sido ampliamente estudiada (Laborde, 2005) durante un período prolongado, antes de la colocación de la malla clasificadora a la salida de los secaderos y de las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se puede observar que el mineral se caracterizaba por un alto contenido de serpentina (fracción – 40 + 5) y escaso fino en la alimentación (fracción – 0.74).

Tabla 3.1 Comportamiento de la composición granulométrica media del mineral de alimentación fresca a los molinos durante varios meses del año 2005.

Tamaño, mm	Junio	Julio	Octubre	Noviembre	Diciembre
40	0,77	0,00	0,52	0,00	2,36
25	2,32	0,17	1,79	0,00	2,28
18	4,69	1,40	3,99	0,00	1,18
12,5	2,25	3,57	0,40	0,00	1,26
10	2,50	3,12	5,16	0,00	2,97
6,3	6,82	4,24	7,07	1,23	1,55
4,75	4,04	9,55	4,49	1,71	4,81
3,5	11,48	7,28	12,19	0,84	7,73
2	18,14	15,86	12,38	1,03	0,28
1,25	21,50	22,50	17,30	1,83	20,54
1	7,10	17,24	19,02	4,59	14,72
0,6	2,44	4,24	1,18	0,07	4,77
0,4	1,57	1,30	1,11	0,07	6,62
0,2	2,11	0,92	1,63	0,12	5,42
0,1	1,08	1,02	1,47	0,12	1,86
0,074	2,75	0,82	1,44	0,08	2,46

Tabla 3.2 Comportamiento de la clase -40 + 5 mm en el mineral de alimentación fresca a los molinos, durante varios meses.

Valor	Mes				
	Junio	Julio	Octubre	Noviembre	Diciembre
	Contenido de la clase -40 + 5 mm; %				
Promedio	21,9	25,1	20,0	23,1	16
Máximo	52,7	45,6	43,4	56,5	22,2
Mínimo	7,5	12,2	3,6	4,1	12,4
Desv. estándar	10,1	9,7	11,O	11,2	3.1
N	90	93	90	90	72

Tabla 3.3 Comportamiento de la clase – 0,074 mm en el mineral de alimentación fresca a los molinos durante varios meses.

Valor	Mes				
	Junio	Julio	Octubre	Noviembre	Diciembre
	Contenido de la clase – 0,074 mm; %				
Promedio	10,6	8.0	10,9	11,2	17,7
Máximo	23,0	14,0	25,6	21,5	29,5
Desv. estándar	5	4,3	6,2	6,0	5,6
N	90	93	90	90	72

Para este tipo de mineral la productividad registrada por los molinos es como se muestra en la tabla 3.4. Como puede observarse la productividad máxima no sobrepasa las 80.5 t/h.

Tabla 3.4 Comportamiento de la productividad, t/h, por molino en la sección de molienda.

Mes	Promedio	Máximo	Mínimo	Desv. Cuad.	Mol efect	n
Febrero	64,0	76,0	53,0	3,1	3,5	84
Marzo	61,6	70,0	46,0	2,8	3,5	93
Junio	74,7	80,0	67,0	3,2	3,5	90
Julio	74,0	80,5	67,3	4,3	3,5	90
Octubre	72,5	76,3	68,3	2,8	3,6	90
Noviembre	72,0	77,3	67,5	2,6	3,4	90
Diciembre	72,0	77,4	67,6	2,6	3,4	81

El comportamiento característico de la potencia demanda por uno de los molinos objeto de estudio, es como se muestra es la fig. 3.1, donde se aprecian variaciones entre los 600 y los 700 kW, motivadas por las irregularidades en el flujo de alimentación con mineral al molino.

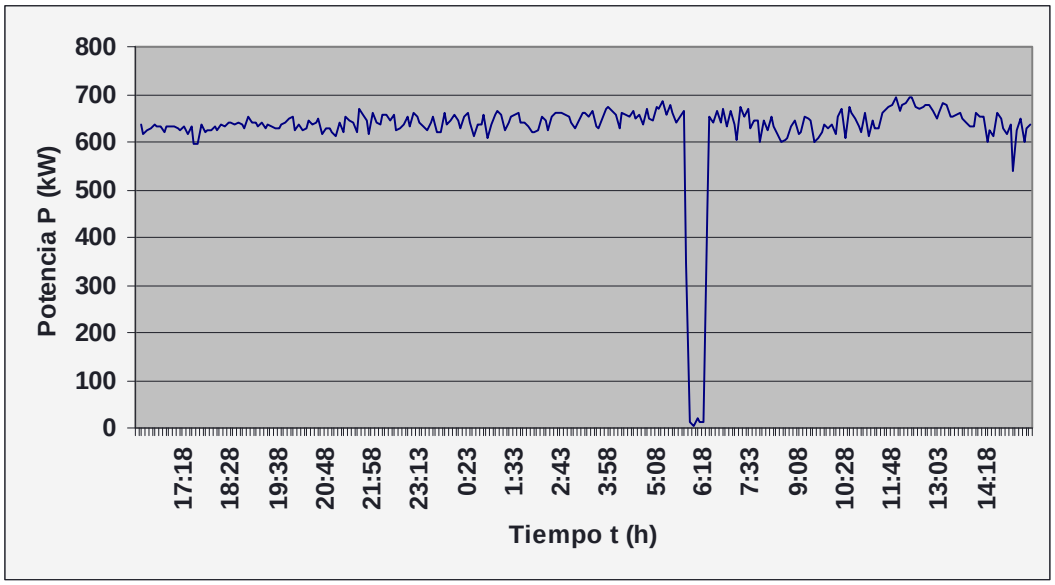


Fig. 3.1 Comportamiento de la potencia del molino de bolas No. 2, (Productividad de 76.3 t/h.)

En la fig. 3.2 se muestra la característica energética experimental del molino que se obtuvo mientras procesaba un mineral con las características expuestas anteriormente y sin la malla clasificadora a la salida de los secaderos. El consumo específico medio exhibido por el molino bajo estas condiciones de explotación es 8,8 kWh/t.

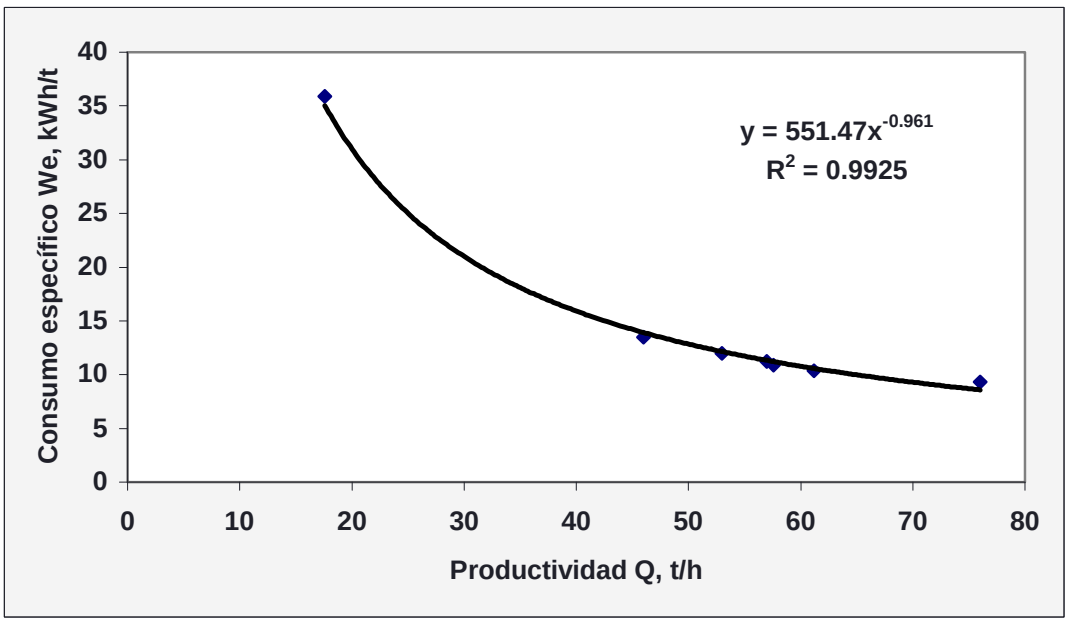


Fig 3.2 Característica energética experimental del molino de bolas industrial.

3.2 Comportamiento del molino de bolas industrial posterior a la colocación de la malla clasificadora a la salida de los secaderos.

Con la colocación de la malla clasificadora, se rechaza todo el material de tamaño > 10 mm, como se muestra en la tabla 3.5. Este material de rechazo tiene naturaleza serpentinítica, por lo que pasa hacia el molino un mineral con una composición predominantemente limonítica. Obsérvese que para las clases inferiores hay un rango importante de variación, lo que está en correspondencia con estudios anteriores sobre la alta variabilidad de la composición de este tipo de mineral (Laborde, 2005).

Tabla 3.5 Granulometría del mineral secado.

Granulometría (mm)	Distribución en %	Observaciones
+50.8	0.9	Rechazo
+38.1	0.6	Rechazo
+25.4	0.7	Rechazo
+19.05	0.5	Rechazo
+12.70	0.6	>10 mm Rechazo
+6.35	2.7	<10 mm alimentación a los molinos
+3.36	2.3	Alimentación
+1.40	2.7	Alimentación
+0.83	5.2	Alimentación
+0.417	3.8	Alimentación
+0.246	3.9	Alimentación
+0.149	(27 a 32)	Alimentación
+0.074	(12 a 18)	Alimentación
-0.074	(45 a 55)	Alimentación

Para tres muestras específicas del mineral de alimentación a los molinos (tomadas en marzo de 2010), los resultados obtenidos son los que se presentan en la tabla 3.6. Nótese que este es un mineral con un alto contenido de fino, y por lo tanto, con una pronunciada tendencia limonítica y de fácil molibilidad.

Tabla 3.6 Composición granulométrica media del mineral de alimentación a los molinos, posterior a la modificación tecnológica.

Tamaño, mm	Posterior a la clasificación		
	# Muestras (%)		
	1	2	3
10	1.232	2.767	0.226
8	2.008	0.643	0.950
5	3.742	0.621	1.284
3.5	10.776	1.617	3.211
3.15	0.075	0.049	0.068
1.6	21.976	3.657	4.816
1	9.063	6.083	6.164
0.71	3.261	4.466	4.409
0.6	2.624	3.994	4.274
0.4	1.668	1.850	2.700
0.3	1.683	3.461	3.944
0.2	4.530	4.636	6.399
0.16	1.235	3.534	2.022
0.074	5.862	8.296	11.419
- 0.074	30.262	54.327	48.114

Como se aprecia en la tabla 3.7, los cambios en la naturaleza del mineral de alimentación a los molinos y la eliminación de las partículas mayores de 10 mm de diámetro medio no se reflejan ni en la productividad ni en el consumo específico de

energía de los molinos, lo que motiva a profundizar en el análisis de otros factores tecnológicos influyentes en el comportamiento energético del molino como son la carga de bolas y el flujo de alimentación (Laborde, 2005).

Tabla 3.7. Comportamiento del molino industrial objeto de estudio, ante un mineral con alto contenido de fino y con la malla clasificadora a la salida de los secaderos.

	Productividad (t/h)	Tiempo de operación (h)	Producción (t)	Wem (kWh/t)
Promedio	69.14	14.94	1028.52	8.26
Máximo	84.24	21.08	1553.81	10.83
Mínimo	54.76	10.30	620.34	5.86

3.3 Análisis de la molibilidad del mineral de alimentación al molino de bolas industrial antes y después de la colocación de la malla clasificadora.

En la tabla 3.8 se muestra el resultado obtenido de la molienda a escala de laboratorio para un coeficiente de llenado con bolas de 0.23. A partir de esta tabla fueron determinados los parámetros del modelo cinético acumulativo, según se explicó en 2 y a partir del valor de C fue estimado el contenido de serpentina en cada muestra, según los resultados que se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.8 Resultados de los ensayos de molienda en el molino de laboratorio para el coeficiente de llenado φ = 0.23.

Coeficiente de llenado φ = 0.23				
Tamaño en (mm)	Tiempo de corrida en minuto			
	0	1.5	3	4.5
	%			
10	1.68	0.23	0	0
8	1.14	0.95	0.35	0
5	2.48	1.28	0.25	0.30
3.5	9.84	3.21	1.4	0.55
3.15	0.29	0.07	0.12	0.04
1.6	19.31	4.82	2.08	1.21
1	8.47	6.16	3.33	1.08
0.71	3.91	4.41	3.28	1.34
0.6	2.44	4.27	4.78	2.25
0.4	1.91	2.70	2.83	1.72
0.3	3.27	3.94	4.29	2.25
0.2	3.87	6.40	5.78	4.36
0.16	1.76	2.02	2.33	1.64
0.074	6.49	11.42	11.13	8.32
-0.074	33.14	48.11	58.09	74.76

Tabla 3.9 Contenido de serpentina en las muestras de mineral ensayadas, estimado a partir del modelo matemático.

Muestras	Antes de la clasificación		Posterior a la clasificación	
	Parámetro C	Contenido de serpentina, %	Parámetro C	Contenido de serpentina, %
1	0.01750	43.26	0.03201	27.25
2	0.01965	39.59	0.05263	18.63
3	0.02454	33.40	0.04162	22.30

En la tabla 3.10 se muestran los resultados de los ensayos de Bond, realizados según procedimiento explicado en 2 para muestras de mineral de alimentación a los molinos antes de la colocación de la malla clasificadora y después de la colocación de dicha malla, para un mineral con las características reflejadas en la tabla 3.6. Como puede apreciarse, según los valores de W obtenidos para el mineral actual (con un alto contenido de finos), el consumo específico de energía del molino industrial debe estar fluctuando entre 2,96 y 5,34 kWh/t. Este es el rango que corresponde para el mineral actual, con las características físico-mecánicas dadas por un tamaño máximo de alimentación menor de 10 mm y con un alto contenido limonítico, es decir para un material de tendencia blanda y de fácil molibilidad. Con este resultado se da solución al problema planteado en la investigación, no obstante, la no correspondencia entre el valor del consumo específico de energía estimado por el método de Bond y el valor real, motiva continuar la investigación sobre la influencia de otros factores que están provocando tan marcada diferencia. De acuerdo a la experiencia que se tiene de trabajos anteriores (ver epígrafe 1.1), los principales factores a considerar son: la carga de bolas del molino y el flujo de alimentación con mineral fresco.

Tabla 3.10 Indice de Bond y consumo específico de energía estimado para el molino industrial.

Muestras	Antes de la clasificación			Posterior a la clasificación		
	F_{80}, µm	W_i, kWh/t	W, kWh/t	F_{80}, µm	W_i, kWh/t	W, kWh/t
1	6425	8.49	8.81	3360	5.39	5.34
2	5130	7.78	7.96	740	3.72	2.96
3	4430	6.58	6.66	810	4.43	3.59

3.4 Análisis de la carga de bolas del molino industrial.

En la tabla 3.11 se muestra el resultado del estudio realizado sobre la carga de bolas de los molinos en la industria objeto de estudio. Para ello se utilizó el procedimiento explicado en 2. Como puede apreciarse, los molinos están por debajo de su carga

nominal, lo que puede influir en que no alcancen los valores del indicador energético obtenido según los ensayos de Bond.

Tabla 3.11 Carga de bolas de los molinos.

Designación	Molinos				
	1	2	3	4	Proyecto
Masa de la carga de bolas en (tn)	45.40	34.95	37.20	37.11	54
D diámetro del molino en (m)	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20
L longitud del molino en (m)	5.95	5.96	5.97	5.96	5.96
Potencia demanda por el molino en (kW)	576.00	482.00	503.00	495.00	680
Relación de alturas libres dentro del molino h/d	0.78	0.79	0.78	0.78	0.72
h altura libre sobre la carga de bolas (m)	2.40	2.53	2.51	2.51	2.3
Volumen del molino (m^3)	47.87	47.93	47.97	47.93	47.93
h altura de la carga de bola dentro del molino en (m)	0.80	0.665	0.69	0.69	0.899
Área transversal de ocupación de las bolas (m^2)	1.57	1.20	1.29	1.28	1.85
Volumen de la carga de bolas ($m^{3)}$	9.36	7.206	7.67	7.65	11.05
Cálculo del coeficiente de llenado φ	0.20	0.15	0.16	0.16	0.23

En la fig.3.3 se muestra la dependencia obtenida entre la carga de bolas y la potencia demandada por el accionamiento eléctrico del molino.

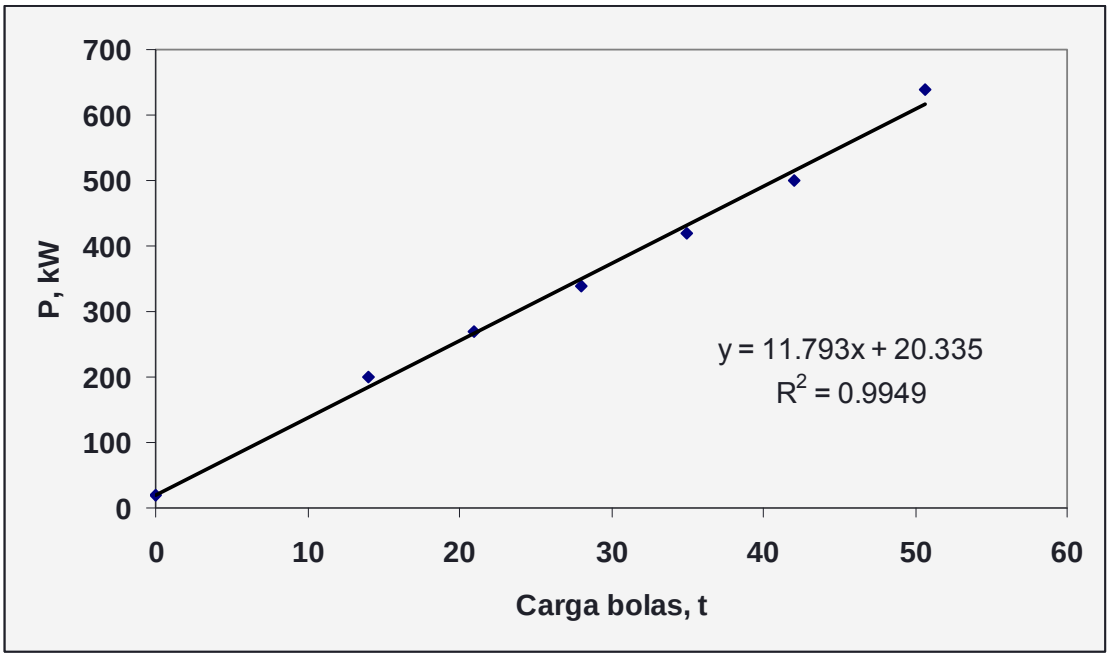


Fig.3.3 Relación entre la carga de bolas y la potencia demandada por el molino.

La relación inversa, fig. 3.4 permite contar con un modelo actualizado a partir del cual es posible estimar la carga de bolas mediante la medición de la potencia del accionamiento cuando el molino funciona sin mineral.

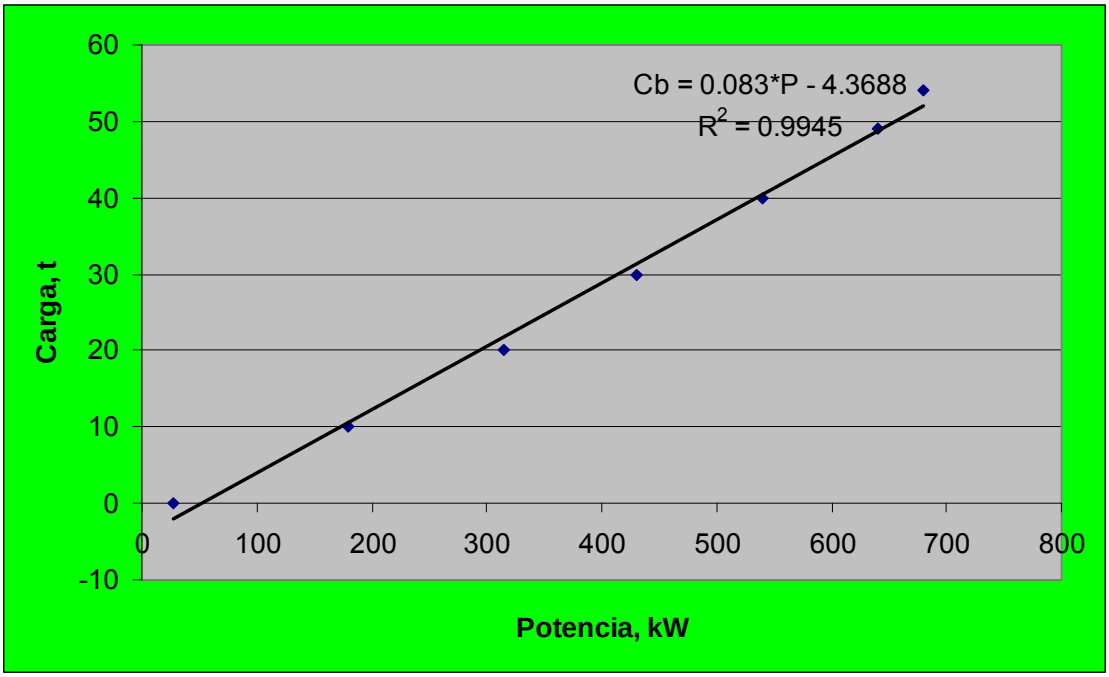


Fig. 3.4 Relación inversa entre la carga de bolas del molino y la potencia demandada por el accionamiento.

$$C_b = 0.083\,P - 4.3688\ \ (t) \qquad (3.1)$$

Los resultados del proceso de validación del modelo dado por la expresión (3.1) se muestran en la tabla 3.12, donde ha sido aplicado el método de la falta de ajuste de cuadrados.

Tabla 3.12 Análisis de varianza para el modelo inverso.

Análisis de varianza para el modelo lineal inverso	
Error estándar Syx	1.63668474
Suma total de cuadrados Sstotal	2430
Suma de cuadrados del error SSE	13.3936
Suma de cuadrados de la regresión SSR	2416.6064
Cuadrado medio de la Regresión MSR	2416.6064
Cuadrado medio del Error MSE	2.67872
F	902.149683
Fcrit	6.02
R cuadrado	0.9945

Tabla 3.13 Resultados de los análisis estadísticos del modelo inverso.

Fuente de variación Debido a	gl	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Regresión	1	2416.6	2416.6	902
Error	5	13.39	2.68	
Total	6	2430		

Como se observa, $F > F_{crit}$, lo que nos permite afirmar que las diferencias observadas entre el modelo y los valores experimentales se deben a errores casuales y no a la falta de ajuste de cuadrados.

El intervalo de predicción estimado para P= 680 kW es de (49 - 59) t con un nivel de confianza del 95 %, por lo que el error de estimación de la carga de bolas nominal a través de la aplicación del modelo será de más menos 5 t.

3.5 Análisis de la productividad del molino industrial.

Aplicando el procedimiento descrito en 2 para estimar la productividad del molino industrial, pudo determinarse la dependencia entre la productividad y el grado de llenado con bolas del molino según se representa en la fig. 3.5. Obsérvese que para un mayor coeficiente de llenado, se obtiene una mayor productividad, lo que está acorde con los trabajos consultados. El límite de llenado para el molino objeto de estudio es de 0.23 debido a sus características constructivas, y este valor se corresponde con la carga de diseño que es de 54 t.

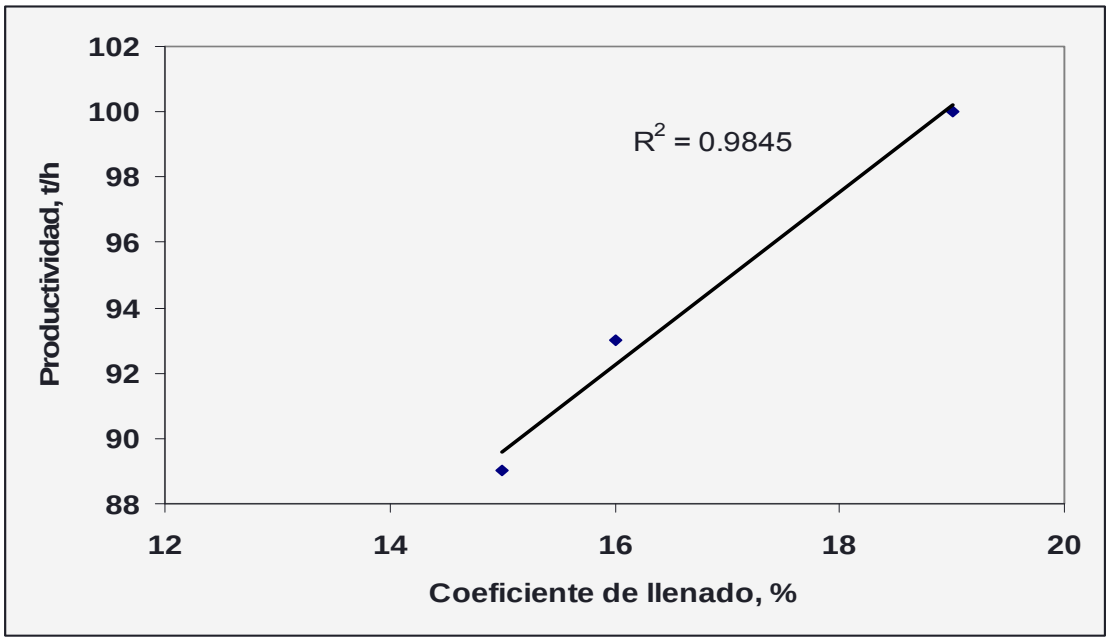


Fig. 3.5 Relación entre la productividad y el coeficiente de llenado con bolas del Molino industrial.

Después de ajustar el flujo de alimentación en el molino industrial objeto de estudio, se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas 3.14 y 3.15.

Tabla 3.14 Productividad y características del mineral observada en el molino industrial durante el mes de abril de 2010.

Día	Product. t/h	Entrada de mineral al molino			Salida del mineral del molino		
		Clase			Clase		
		+ 100	+ 200	- 200	+ 100	+ 200	- 200
13	87.38	37.4	6.3	56.3	6.6	5.9	87.5
14	88.34	37.1	6.8	56.1	5.8	6.0	88.2
15	88.55	36.5	7.9	55.6	7.0	6.3	86.7
16	93.55	36.7	6.9	56.4	6.5	5.9	87.6
17	93.04	38.9	6.9	54.2	6.7	5.2	87.9
18	100.56	38.9	6.9	54.2	6.9	5.2	87.9
19	101.74	37.8	8.8	53.4	7.6	6.4	86.1

20	95.55	38.4	8.2	53.4	7.0	6.9	86.1
21	95.57	36.9	8.3	54.8	6.4	6.0	87.6
22	100.66	37.6	9.0	53.4	7.0	5.5	87.5
23	97.11	37.5	7.8	54.7	6.4	6.0	87.6
24	96.71	36.9	7.9	55.2	6.5	6.0	87.5
25	82	38.9	6.7	54.4	6.9	5.2	87.9
26	93.32	38.9	6.8	54.3	6.5	5.3	88.2
27	88.37	37.4	8.1	54.5	7.0	6.8	86.2
28	99.77	37.6	7.3	55.5	6.8	6.6	86.6
29	112.89	37.2	8.1	56.7	6.3	6.6	87.1
30	100.73	37.0	7.5	55.5	5.9	5.7	88.4

Tabla 3.15 Productividad y características del mineral observado en el molino industrial durante el mes de mayo de 2010.

Día	Product. t/h	Entrada de mineral al molino			Salida del mineral del molino		
		Clase			Clase		
		+ 100	+ 200	- 200	+ 100	+ 200	- 200
1	95.76	35.7	8.4	55.9	6.4	5.7	87.9
2	102.03	35.7	8.2	56.1	6.3	5.3	88.4
3	100.85	37.9	6.7	55.4	6.1	5.8	88.1
4	103.41	38.2	6.8	55.0	6.3	5.6	88.1
5	94.60	37.6	7.4	55.0	7.0	6.8	86.2
6	105.39	40.1	8.3	51.6	7.2	7.0	85.8
7	108.27	36.6	7.2	56.2	5.7	5.3	89
8	88.71	38.6	8.3	53.1	6.5	6.2	86.3
9	113.22	37.7	7.9	56.4	6.2	5.6	88.2
10	101.60	35.7	8.0	56.3	6.3	5.3	88.4
11	100.00	38.0	6.9	55.1	6.9	5.2	87.9
12	104.26	39.0	6.7	54.3	6.8	5.1	88.1
13	94.00	38.6	7.1	54.3	7.0	6.8	86.2

Tabla 3.16 Resumen de la productividad y de las características de mineral observada en el molino industrial durante el mes de abril, 2010.

Indicador	Productividad t/h	Entrada de mineral al molino			Salida del mineral del molino		
		Clase			Clase		
		+ 100	+ 200	- 200	+ 100	+ 200	- 200
Promedio	95.324	37.644	7.567	54.922	6.656	5.972	87.367
Máximo	112.89	38.9	9	56.7	7.6	6.9	88.4
Mínimo	82	36.5	6.3	53.4	5.8	5.2	86.1
Desv.	7.095	0.814	0.778	1.050	0.430	0.552	0.736
Rango	30.89	2.4	2.7	3.3	1.8	1.7	2.3

Tabla. 3.17 Resumen de la productividad y de las características de mineral observada en el molino industrial durante el mes de mayo, 2010.

Indicador	Productividad t/h	Entrada de mineral al molino			Salida del mineral del molino		
		Clase			Clase		
		+ 100	+ 200	- 200	+ 100	+ 200	- 200
Promedio	100.931	37.646	7.531	54.977	6.515	5.823	87.585
Máximo	113.22	40.1	8.4	56.4	7.2	7	89
Mínimo	88.71	35.7	6.7	51.6	5.7	5.1	85.8
Desv	6.511	1.373	0.669	1.397	0.434	0.664	1.056
Rango	24.51	4.4	1.7	4.8	1.5	1.9	3.2

Como se observa en las tablas 3.16 y 3.17, el mineral mantiene una alta estabilidad en cuanto a su composición granulométrica durante un período relativamente largo, sin embargo, las variaciones de la productividad expresada a través del rango y de la desviación estándar son altas y no se corresponden con la estabilidad que muestra el mineral.

Al determinar el consumo específico de energía actual del molino industrial objeto de estudio y de toda la sección de molienda, fueron obtenidos los resultados que se

muestran en las tablas 3.18 y 3.19 correspondientes a los meses de abril y mayo respectivamente.

Tabla 3.18 Comportamiento del consumo específico de energía en el molino objeto de estudio y en la sección de molienda durante el mes de abril, 2010.

Indicador	Consumo específico de energía, kWh/t	
	Molino 2	Sección de molienda
Promedio	6.54	22.15
Máximo	7.56	34.04
Mínimo	5.49	9.67
Desv	0.48	5.62
Rango	2.07	24.37

Tabla 3.19 Comportamiento del consumo específico de energía en el molino objeto de estudio y en la sección de molienda durante el mes de mayo, 2010.

Indicador	Consumo específico de energía, kWh/t	
	Molino 2	Sección de molienda
Promedio	6.17	20.28
Máximo	6.99	24.17
Mínimo	5.48	15.08
Desv	0.403	2.64
Rango	1.51	9.09

Para el caso del molino 2, que posee la mayor carga de bolas, el consumo específico de energía se comporta de forma estable, aunque el valor de este indicador energético supera en 0.83 al valor estimado mediante el método de Bond (ver tabla 3.10). No obstante, esta diferencia está dentro de la tolerancia permitida (hasta un 20 %) y se corrobora la hipótesis del trabajo: con la reducción del tamaño máximo de las partículas de alimentación al molino de bolas se reduce el consumo específico de energía, en este caso la reducción observada es de un 39 % con respecto al caso en que el sistema funcionaba sin la clasificación del mineral a la salida de los secaderos.

Al analizar el consumo específico de energía del conjunto de molinos, se observa una alta variabilidad del indicador y un promedio muy distante del valor obtenido mediante el método de Bond, lo que evidencia la existencia de falta de ajuste en los parámetros tecnológicos del resto de los molinos y la necesidad de ajustar dichos parámetros, fundamentalmente la carga de bolas y el flujo de alimentación fresca, hasta lograr resultados semejantes a los obtenidos para el molino objeto de estudio.

3.6 Impacto medio ambiental con el aumento de la productividad.

Como es conocido, el proceso de molienda es a ciclo cerrado, por lo que las emanaciones de polvo en estas instalaciones son mínimas. Todos los sistemas que intervienen en esto proceso llevan implícito un sistema de aspiración de gases y polvo que limitan las emanaciones. Estos gases y polvos fluyen a las instalaciones de limpieza de gases de molienda. Actualmente se está sustituyendo los electrofitros por filtros de mangas más eficiente y de alta tecnología, con emanaciones máxima permisible de 20 mg/m^3n. El vertimiento a la atmósfera de los electrofiltros era de 200 mg/m^3n, pero por falta de reparación estos valores eran muchos mayores.

Relacionando los resultados obtenidos por ahorro de consumo de combustible en generar electricidad para accionar los molinos, implicaría menos gases contaminantes a la atmósfera por la disminución de producción energía, manifestándose en una mejora al medio ambiente.

3.7 Valoración económica

En la tabla 3.20 se reproduce información correspondiente a la tarifa establecida por el MINBAS para el cobro de la electricidad en los consumidores de media tensión con cogeneración.

Tabla 3.20 Tarifas eléctricas establecidas para el cobro de la electricidad en la Emp. "Cmdte. Ernesto Che Guevara".

#	Designación	Horarios	Costo (CUC/MWh)	Observación
1-	Generación horario día	6 am – 6 pm	104	
2-	Generación horario pico	6 pm – 10 pm	123	Alta demanda
3-	Generación horario madrugada	10 pm – 6 am	84	

Tabla 3.21 Evaluación del costo del producción por concepto del consumo de energía eléctrica.

Comparación del costo del consumo de energía antes y después de la instalación de los trommel, referido a los ventiladores y los motores de los molinos.									
N	Etapas	Producción promedio diaria, t	Consumo de energía promedio diario, MWh	Tarifas horarias	Distribución de la energía de acuerdo a la tarifa horaria	Tarifas horarias (CUC)	Costo energía de acuerdo a las tarifas horarias, diario (CUC)	Costo total de energía mensual (CUC)	Costo de la energía para moler una t mineral (CUC)
1	Antes de la clasificac	5 276	56.2	Día	28.1	104	2 922.4	169 447	1.07
				Pico	9.37	123	1 152.5		
				noche	18.73	84	1 573.3		
2	Después de la clasificac	6 912	31,8	Día	15,9	104	1 654	95 662	0.46
				Pico	5.31	123	653.13		
				noche	10.5	84	882		

Como puede observarse en la tabla 3.21, después de la introducción de la malla clasificadora a la salida de los secaderos y con los reajustes de los parámetros de los molinos de bolas, fundamentalmente con la carga de bolas y el flujo de alimentación fresca, se observa que el costo de producción de una tonelada de mineral molido se ha reducido en un 57 % con respecto al valor estimado antes de realizarse la innovación tecnológica. Se atribuye esta diferencia, en gran medida, a la reducción del tamaño máximo de las partículas en la alimentación. Para una producción promedio mensual de 158 280 t de mineral procesado, se pagarían aproximadamente 2 millones de CUC por concepto de electricidad, para una producción igual, alimentando a los molinos con un

tamaño máximo de partículas por debajo de los 10 mm, entonces se pagarían 873,7 M CUC, lo que es equivalente a un ahorro de 1,158 millón de CUC anualmente.

3.8 Conclusiones del Capítulo.

1. Se determinó que la carga de bolas, el flujo de mineral y la relación serpentina limonita influyen directamente en el consumo específico de energía eléctrica en la molienda de los minerales lateríticos.
2. Se obtuvo un modelo que permite determinar la carga de bolas en función de la potencia del motor de accionamiento del molino.
3. Se determinó que el coeficiente de llenado del molino a medida que aumenta, la productividad del molino es mayor.

CONCLUSIONES GENERALES.

1. La reducción del tamaño máximo de las partículas de alimentación a los molinos por debajo de 10 mm, conduce a una variación en las características físico-mecánicas del mineral, dadas en la reducción de la componente serpentinítica, en el aumento de la componente limonítica y en la disminución de la dureza general del mineral, lo que conlleva que para esta situación el consumo específico de energía del molino de bolas industrial debe fluctuar entre 3,34 y 5,39 kWh/t.
2. Para lograr la adecuada correspondencia entre el consumo específico de energía del molino y las características físico-mecánicas del mineral, en las actuales condiciones de explotación, es imprescindible el ajuste y control de dos factores fundamentales: la carga de bolas del molino que debe encontrarse próxima a un factor de llenado $\varphi = 0,23$ y el flujo de alimentación fresca que debe mantenerse por encima de las 95 t/h.
3. La variabilidad de las características físico-mecánicas del mineral, dadas por el índice de trabajo, según el ensayo de Bond, ha sido determinada en un intervalo de 3,72 a 5,39 para el material con mayor contenido de finos (más blando) y para el material con menor contenido de finos (más duro), respectivamente.
4. La introducción de la malla clasificadora a la salida de los secaderos puede conducir a una reducción del costo de molienda en 57 % con respecto al costo antes de colocar la malla por concepto de pago de electricidad, lo que es equivalente a un ahorro anual de 1,158 millón de CUC.

RECOMENDACIONES.

1- El campo de la automática en el área de molienda referida al área de desmenuzamiento está completamente virgen, donde la alimentación y el control del nivel de las tolvas de alimentación a los molinos se hace visual. Esto sería un punto de buen comienzo en aras de levantar los mayores obstáculos que impiden mejorar la productividad, la eficiencia y seguir disminuyendo el consumo energético.
2- Bajar la recarga de los molinos de un año a tres meses, con la finalidad de mantener las cargas moledoras, y así evitar que los molinos pierdan productividad por variabilidad de los elementos molturantes.
3- Seguir muy de cerca el buen funcionamiento del trómel y su estado técnico en todos los secaderos y reparar lo más urgente aquellos que permitan pasar granulometrías por encima de 10 mm. Con esta medida se garantiza el aumento de productividad y disminución del consumo energético del área de molienda.

BIBLIOGRAFÍA

1- Andreiev, Perov, Zverievich, Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Niedra. Moscú.1980.

2- A. Sahoo y G. K Roy. Correlations of grindability of the ball mill as a measure of its performance. Chemical Engineering. Volumen 3, No.2 pp.230-235, 2008.

3- Bustamante C., Estudio de la capacidad instalada de los molinos, Moa, 1989.

4- B. Aksani and B. Sönmez Simulation of bond grindability test by using cumulative based kinetic model. Julio 2000.

5- Banisi, S.; Farzaneh, M. Effect of ball size on the performance of grinding and flotation circuits: the Sarcheshmeh copper mine case.Mineral Processing and Extractive Metallurgy. Volume 115, Number 3, September 2006 , pp. 165-170(6).

6- Coello A. V. Tijonov O. Molienda de minerales multicomponentes. Modelo integro-diferencial para la valoración de la energía.Rev Mineria y Geologia.N° 3-4.2001.

7- Coello A. V. Sobershenstobovanie tecnologii izmilchenia lateritovij rud na zabode Punta Gorda. Tesis de doctorado. IMS. Saint Petersburg. 1993b

8- Coello A. V., Investigaciones industriales de la molienda seca del mineral laterítico. ECECG. Moa.1992

9- Coello A. V., Llorente L, García A., Optimización de la molienda seca de los minerales lateríticos. Informe II. Fac. Metalurgia. ISMM. Moa. Nov.1992.

10- Coello A. V., Llorente L., Garcia; Laborde R. Molienda del mineral laterítico. Retos y perspectivas. Jornada Científica del CIL. Junio.2001.

11- Coello A. V., Marrero S., Control de la carga interior del molino a través de terceros parámetros. Rev. Minería y Geología. Vol 11. N°1. 1994.

12-Coello. A. V., Consideraciones de la molienda del mineral laterítico. Rev. Minería y Geología. Vol. 1.No1.1993a.

13- Casillas, Maquinas calculo de Taller, 1981.

14- Elias Th. Stamboliadis. The energy distribution theory of comminution specific surface energy, mill efficiency and distribution mode. Minerals Engineering, Volume 20, No. 2, pp (140-145), 2007.

15- Fernández E., Material docente para la Maestría de Beneficio de Minerales ISMM. 1998.

16- Hakan Benzer. Modeling and simulation of a fully air swept ball mill in a raw material grinding circuit. Powder Technology. Volumen 150, pp. 145-154, 2005.

17- H. T Ozkahraman. A meaningful expresion between Bond work index, grindability index and friability value. Minerals Engineering. Volumen 18, pp. (1057-1059), 2005

18- H. Ipek, Y. Ucbas y C. Hosten. The bond work index of mixtures of ceramic raw materials. Minerals Engineering. Vol 18. No. 9, 2005.

19- H. Ipek et al. Dry grinding kinetics of binary mixtures of ceramic raw materials by Bond milling. Ceramics International, Volume 31, No. 8, pp (1065-1071), 2005.

20- H. T Ozkahraman H. T Ozkahraman. Breakage mechanisms and an encouraging correlation between the Bond parameters and the friability value. Journal of theSouthern African Institute of Mining and Metallurgy. Volume 110, No. 3, 2010.

21- J. B. Mosher and C. B. Tague. Conduct and precision of Bond grindability testing. Minerals Engineering. Volumen 14, No.10, pp (1187-1197), 2001.

22- Lago P. L., Análisis de los resultados de pruebas efectuadas en los molinos. Moa. 1989.

23- Laborde R., Modelación y simulación del proceso molienda de mineral lateríticos, con composición sustancial variable, Tesis Doctorado ISMM. moa 2005.

24- Lago P. L., Estudio del proceso de molienda. Informe técnico de investigación. Moa, 1989.

25- Laborde B. Reynaldo, A Coello, S. Marrero. Optimizacion del proceso de molienda del mineral lateritico en la empresa " Cmdte Ernesto Che Guevara", Memorias SIE. Universidad Central de las Villas. 2001. b ISBN.

26- 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.

27- Laborde B. Reynaldo, A. Coello, S. Marrero. Diagnóstico energético en la sección de molienda de la empresa 'Cmdte Ernesto Che Guevara'.Memorias SIE 2003, Universidad Central de Las Villas.

28- Laborde B. Reynaldo. A. Coello. Normación del consumo de energía eléctrica en la molienda de la laterita. Memorias FIE 2002, Universidad de Oriente. ISBN.

29- 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)

30- Llorente L. Determinación de los factores que influyen en la baja productividad de los molinos en la empresa Ernesto Che Guevara. Tesis maestría 2003.

31- Mendoza JM. Metodología para la normación del consumo de energía en el proceso de molienda del mineral laterítico Tesis maestría ISMM Moa 2008.

32- Manual de Operaciones Taller de Preparación de Minerales. Palacio de las Convenciones. La Habana-Moa 1985.

33- Magoteaux, Mecanismo de desgaste en cuerpos moledores. Seminario. Cuba 2005.

34- M. Aguado et al. Process models for simulation of Bond tests. Minerals Processing. Volumen 115, No. 2, June, 2006, pp. 85-90.

35- Nelson Mazola Collazo, Manual del sistema internacional de unidades, año 1972.

36- N. Kotake, K. Suzuki, S. Asashi, Y. Kanda. Experimental study on the grinding rate constant of solid materials in a ball mill. Powder Technology. Volumen 122, pp (101-108), 2002.

37- Razumov, Perov. Proyectos de fábricas de preparación de minerales. Ed. Mir, Moscú. 1980.

38- Rogers, R. S. C., y Austin, L. G. Residence time distribution in ball mills. Particulate Sci.Technology. 2, 191-209. 1984.

39- Taggart A., Handbook of Mineral Dressing. Willey. Handbook Series, 1927.

40- Walter D. Manual Tecnología del cemento 3 Barcelona.

41- 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.

42- 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.

ANEXO I

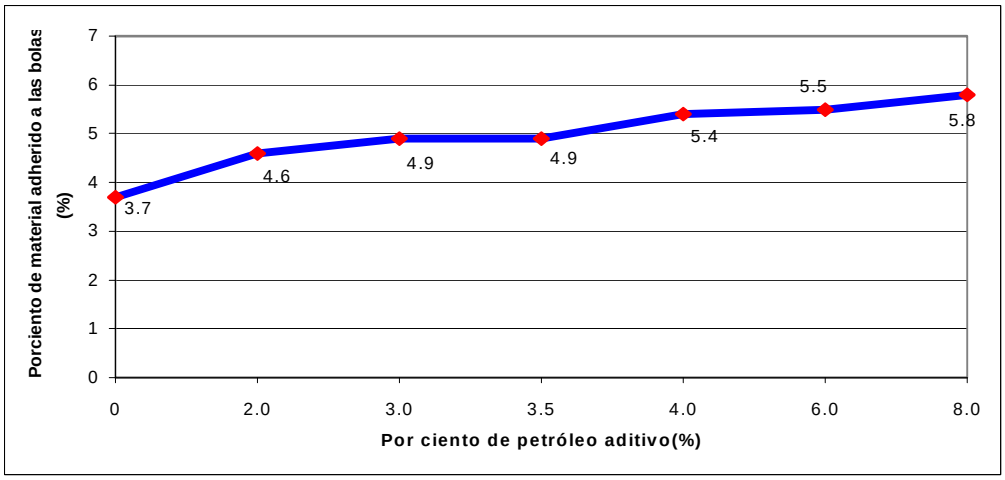


Figura 4.1 Influencia del petróleo aditivo en el material adherido a las bolas, Ref. Tesis maestría Llorente L. 2003

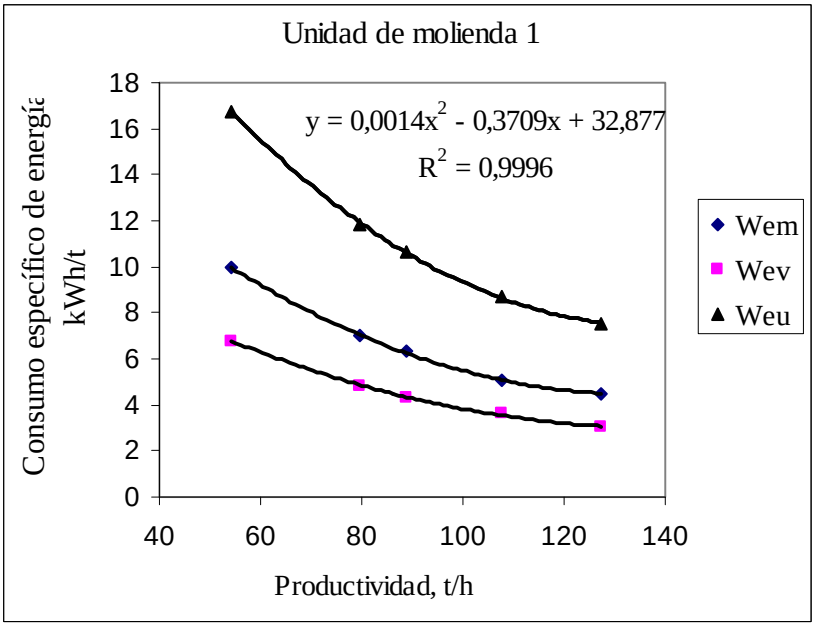


Figura 4.2 Comportamiento del consumo específico de energía en la unidad de molienda 1 durante la regulación del flujo de mineral fresco: Wem (molino), Wev (ventilador), Weu (unidad) Ref. Mendoza M. tesis maestría 2008.

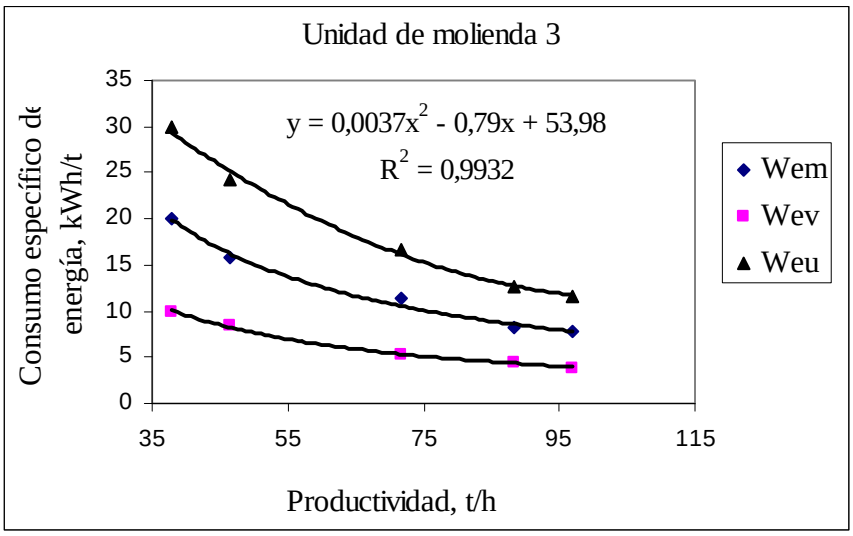


Figura 4.3 Consumo específico de energía en la unidad de molienda 3 regulando el flujo de mineral fresco: Wem (molino), Wev (ventilador), Weu (unidad) Ref. Mendoza M. tesis maestría 2008.

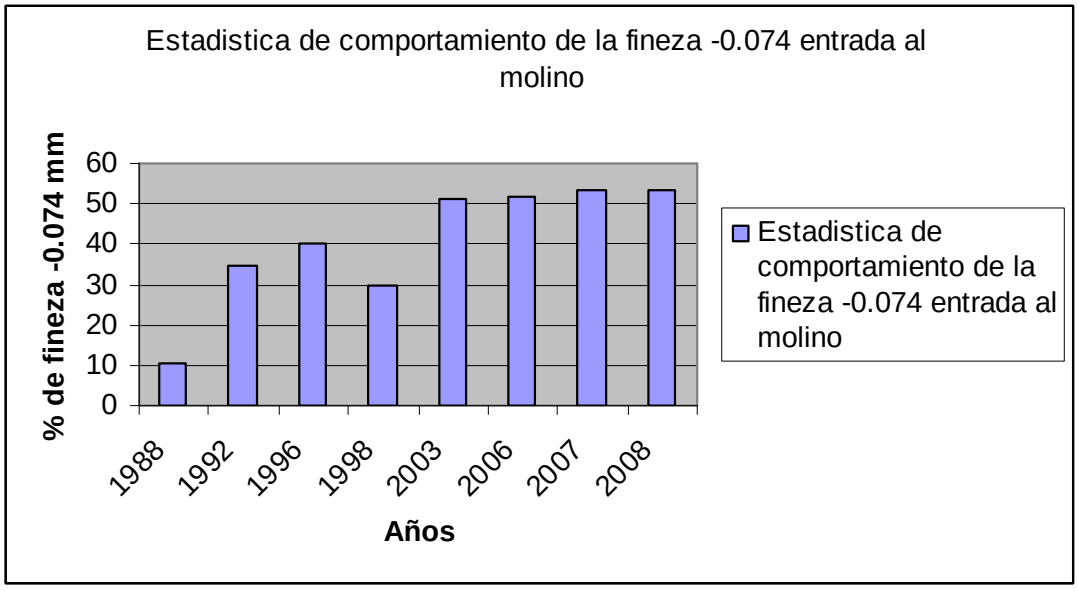


Figura 4.4 Comportamiento de la fineza – 0.074 alimentada a molienda por años.

ANEXO II

Tabla 4.1 Índice de Bond determinado experimentalmente para diferentes contenidos de Serpentina en el mineral laterítico.

No	Contenido serpentina, %	Índice de trabajo, W_i, kWh/t	Índice de trab W_i, kWh/t (corre g)
1	100	18.17	26.03
2	85	16.49	23.62
3	75	15.98	22.89
4	66	14.5	20.77
5	50	10.57	15.14
6	44	7.1	10.17
7	35	5.66	8.10
8	10	2.5	3.58

Es esta tabla se recogen los valores para los diferentes valores en % de serpentina con su respectivo índice de trabajo (Laborde R. tesis Doctorado 2005)

Tabla 4.2 Especificaciones técnicas de las bolas de los molinos.

DATOS DE LAS BOLAS DE LOS MOLINOS					
Diámetros de las bolas (mm)	Peso de una bola (kg)	Número de bola en 1000 kg (U)	Peso de 1 m^3 de bola (kg)	Superficie de una bola (cm^2)	Superficie de las bolas / t (m^2)
100	4.115	243	4560	314	7.6
90	2.994	334	4590	254	8.5
80	2.107	474	4620	201	9.5
70	1.41	709	4640	154	11
60	0.889	1125	4660	113	12.7
50	0.514	1946	4708	78	15.2
40	0.263	3802	4760	50	19
30	0.111	9009	4850	28	25

Tabla 4.3 Composición química de las bolas de los molinos.

Calidad de bolas	**Acero al carbono**			**Aceros aleados**		
Tamaño (Pulgada)	0.75 - 0.85	2.0, 2.5	3.0, 3.5, 4.0, 5.0	1.5	2.0, 2.5	3.0, 3.5, 4.0
Carbono %	0.45 - 0.55	0.55 - 0.70	0.65 - 0.85	0.65 - 0.75	0.65 - 0.80	0.74 - 0.85
Manganeso %	0.50 - 0.90	0.50 - 0.90	0.60 - 0.90	0.25 - 0.50	0.60 - 0.90	0.60 - 0.90
Fosforo % Máx.	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
Azufre % Máx.	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicio %	0.30 Máx.	0.30 Máx.	0.30 Máx.	0.15 - 0.30	0.15 - 0.30	0.15 - 0.30
Cromo %	-	-	-	0.45 - 0.60	0.45 - 0.60	0.50 - 0.65
Moliteno	-	-	-	0.15 - 0.25	0.15 - 0.25	0.15 - 0.25