

**REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
Dr. Antonio Núñez Jiménez**

**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

**TESIS EN OPCION AL TÍTULO DE MASTER EN  
ELECTROMECAÁNICA**

**Título:** Metodología para la normación del consumo de energía en el proceso de molienda del mineral laterítico

**Autor:** Ing. José Miguel Mendoza Sierra

**Tutor:** Dr. C. Reynaldo Laborde Brown

**Moa – 2008**

## **Pensamiento**

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

Fidel Castro Ruz

Líder de la revolución cubana

## **Dedicatoria**

A mi esposa y queridos hijos.

A toda mi familia y suegros,

A mi inolvidable tutor.

A mis buenos amigos,

a todas aquellas personas

que de una forma u otra me apoyaron y estuvieron conmigo en los buenos y difíciles momentos.

## **Agradecimientos**

Deseo hacer llegar mis más sinceros agradecimientos:

A mi tutor por su ayuda desinteresada Dr. C. Reynaldo Laborde Brown, quien ha sido mi guía y ayuda durante todo el tiempo que duró la realización de este trabajo, al profesor y coordinador de la Maestría Dr. C. Luís Rojas Purón quien siempre me orientó y alentó, al profesor MSc. Iván Pérez Carrión le agradezco por todos los conocimientos que me legó, los cuales emplearé en mi vida profesional.

A mis suegros y hermanos que ha sabido aguantarme todas las manías, y a mi esposa Virgen Rodríguez Navarro, por estar siempre a mi lado, apoyarme y ayudarme en lo que necesité.

A los profesores MSc. Ever Góngora Leyva, MSc. Reineris Montero Laurencio, MSc. Yoalbys Retirado Mediaceja, MSc. Roberto Sierra Pérez, por su atención y por haberme soportado todas las molestias que le causé.

A todas aquellas personas que de una forma u otra me han apoyado, mil gracias.

**Mendoza**

## RESUMEN

El presente trabajo se realizó en la sección de molienda de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”, Moa. El objetivo principal fue determinar un procedimiento para la normación del consumo específico de energía eléctrica en el proceso de molienda (molinos de bolas y ventiladores de recirculación) del mineral laterítico, caracterizado por la alta complejidad y variación de su composición sustancial. El procedimiento consiste en la combinación del método de las características energéticas y el método de Bond, ambos métodos tienen en cuenta los diferentes factores que influyen en el comportamiento energético de los procesos de molienda

Se determinó el consumo específico de energía eléctrica aplicando el método estadístico (observación) y el modelo obtenido para estimar el flujo de mineral. Para obtener las características energéticas de la sección de molienda se aplicó el modelo obtenido para determinar el flujo de mineral ya que tanto la productividad como el consumo de energía eléctrica se obtuvieron experimentalmente.

El trabajo está desarrollado sobre una amplia base experimental a escala industrial, se demuestra la factibilidad de emplear el procedimiento propuesto donde los costos de producción en la sección de molienda pueden ser reducidos en 18,85 % referido al pago de electricidad, equivalente al ahorro de 321900 USD/año por éste concepto.

## SUMMARY

This paper was carried out at Cmdte Ernesto Che Guevara Nickel Processing Company's ore grinding section, Moa. Its main objective is to determine a procedure to standardize the electric power specific consumption in the lateritic ore grinding process (ball mills and recirculation fans), which is characterized by its high complexity and the variation of its substantial composition. The procedure is based on the combination of the energetic characteristic method and the Bond method; both methods take into consideration the several factors that influence on the ore grinding process energetic behaviour.

The electric power specific consumption was determined by applying the statistic method (observation) and the model obtained to estimate the ore flow. The model obtained to determine the ore flow was applied in order to experimentally determine the ore grinding section energetic characteristics, such as productivity as well as electric power consumption.

The paper is developed widely on experimental basis at industrial scale, so it shows the feasibility to implement the proposed procedure where the ore grinding section production costs may be reduced by 18, 85 % regarding power payment, equal a saving of 321900 dollars per year.

**ÍNDICE**

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL</b>	
1.1. Introducción	4
1.2. Molinos de bolas	4
1.3. Factores que afectan la eficiencia en la molienda	10
1.4. Circuito cerrado de molienda y clasificación	15
1.5. Ventiladores centrífugos	16
1.6. Métodos para establecer las normas de consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda de minerales	24
1.7. Índice de Bond y las características energéticas para establecer una metodología en la normación del consumo específico de energía eléctrica en la molienda del mineral laterítico	27
1.8. Trabajos precedentes	28
1.9. Conclusiones del capítulo I	31
<b>CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1. Introducción	33
2.2. Planificación de la investigación	33
2.3. Descripción del proceso tecnológico de la sección de molienda	34
2.4. Características del equipamiento de la sección de molienda	36
2.5. Características generales del mineral	37
2.6. Instrumentos utilizados en el desarrollo experimental a escala industrial	39
2.7. Técnica experimental para el trabajo a escala industrial	41
2.8. Determinación de la carga en bolas de los molinos	42
2.9. Determinación del flujo de mineral fresco a los molinos de bolas. Obtención del modelo	42
2.10. Medición y registros de las principales magnitudes eléctricas	43

2.11.	Procedimientos para determinar el consumo específico de energía eléctrica del proceso de molienda aplicando diferentes métodos	44
2.12.	Procedimiento para determinar el consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando el método combinado (características energéticas - método de Bond)	50
2.13.	Conclusiones del Capítulo II	50

### **CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL**

3.1.	Introducción	51
3.2.	Determinación de la carga de bolas actual de los molinos	51
3.3	Determinación del flujo de mineral fresco a los molinos de bolas. Obtención del modelo	53
3.4.	Influencia del flujo de mineral fresco, la relación serpentina – limonita y flujo de aire sobre el consumo específico de energía eléctrica en las unidades de molienda	58
3.5.	Análisis del consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando diferentes métodos	63
3.6.	Análisis del comportamiento del consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando el método de las características energéticas	70
3.7	Análisis del comportamiento del consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando el método de Bond	75
3.8	Análisis del comportamiento del consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando el método combinado (Bond - características energética)	75
3.9.	Procedimiento y algoritmo para evaluar el método combinado	76
3.10.	Valoración económica	78
3.11.	Valoración medioambiental	80
3.12.	Conclusiones del capítulo III	82

<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	84
<b>RECOMENDACIONES</b>	85
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	86
<b>ANEXO I (figuras)</b>	
<b>ANEXO II (tablas)</b>	
<b>CERTIFICADOS</b>	

## INTRODUCCIÓN

El examen de la economía energética deberá tener una alta prioridad tanto en las nuevas inversiones como en las instalaciones existentes, teniendo en cuenta el indisoluble nexo entre eficiencia económica, energética y los adelantos de la ciencia y la técnica. Respondiendo a este llamado de la Resolución Económica del V Congreso del PCC, la industria minero metalúrgica y en especial la del níquel, considerada dentro de los grandes consumidores de energía eléctrica en el país, ha trazado su propia estrategia para disminuir sus costos de producción, sobre la base de alcanzar una mayor eficiencia energética.

Dentro de las empresas más consumidoras de energía eléctrica de la provincia la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” ocupa el primer lugar con 167737 MWh/año . Por ésta razón se hace necesario que los procesos tecnológicos que consumen más energía sean verificados con el objetivo de racionalizar el consumo de los diferentes portadores energéticos, es el caso particular de la molienda del mineral laterítico que constituye la tercera etapa del beneficio de mineral (figura A.1) representando uno de los mayores consumidores de energía eléctrica de las plantas principales. Este elemento obliga a determinar las regularidades del proceso que indiquen los consumos específicos de electricidad en función de establecer un índice representativo.

En la actualidad diferentes autores han tratado la temática de estimar el consumo de energía eléctrica de la molienda a partir de ecuaciones empíricas con resultados que se diferencian con los obtenidos teniendo en cuenta de forma integradora, factores como: la carga de bola de los molinos, el flujo de mineral fresco, el flujo de aire del sistema aerodinámico y el contenido de serpentina en el mineral.

La normación del consumo de energía eléctrica, a nivel de mecanismos, procesos, talleres, plantas, juega un papel fundamental para lograr una mayor eficiencia. En la actualidad no existe una metodología que permita a la empresa establecer un rango racional de operación del conjunto molino - ventilador para lograr una mayor productividad en el proceso de molienda.

Los modelos de los procesos de molienda actuales que conducen a la determinación de los consumos específicos de energía eléctrica (el estadístico, las ecuaciones empíricas, las

características energéticas y el de Bond) se diferencian del resultado de integrar el modelo de Bond y el modelo de las características energéticas a partir de validaciones realizadas que indican una mejor correlación.

### **Situación problemática**

Alta variabilidad del consumo específico de energía eléctrica en el proceso de molienda del mineral laterítico en la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” .

### **Problema**

Inexistencia de una metodología que permita determinar el consumo específico de energía eléctrica del proceso de molienda del mineral laterítico para establecer un rango racional de este indicador.

### **Objetivo general**

Proponer un método que permita determinar las normas del consumo específico de energía eléctrica, en el proceso de molienda del mineral laterítico, según las condiciones de explotación de la empresa “Che Guevara” .

### **Objetivos específicos**

1. Evaluar la influencia de las principales variables del proceso (carga de bolas de los molinos, flujo de alimentación de mineral, flujo de aire y relación serpentina - limonita) sobre el consumo de energía en las unidades de molienda
2. Obtener los modelos matemáticos que permitan predecir el consumo específico de energía eléctrica del proceso de molienda
3. Determinar la reserva energética del portador electricidad en la sección de molienda

**Campo de acción:** Los resultados incidirán directamente sobre el consumo de energía eléctrica del proceso de molienda del mineral laterítico, en las condiciones de explotación de la Empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara” .

Definido el problema y los objetivos, se está en condiciones de plantear la siguiente hipótesis

**Hipótesis**

Si se evalúa la influencia que tienen sobre el consumo energético del proceso de molienda las principales variables del proceso y se conjuga con la aplicación de los diferentes métodos para la normación de los consumos de energía de los equipos y procesos en la industria del beneficio de los minerales, se puede establecer un método particular que permita determinar las normas del consumo específico de energía eléctrica en el proceso de molienda del mineral laterítico según las condiciones de explotación de la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” .

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos y desarrollar con éxito el trabajo se planifican las siguientes tareas:

**Tareas**

1. Realizar el análisis bibliográfico de la temática sobre el objeto de estudio.
2. Planificación de los experimentos.
3. Determinar experimentalmente la carga en bolas de los molinos, la variación del flujo de mineral fresco hacia los molinos (obtención del modelo) y el flujo de aire en el sistema de recirculación.
4. Determinar el consumo específico de energía eléctrica actual en la sección de molienda (molinos de bolas y ventiladores de recirculación) aplicando los siguientes métodos: estadístico, según modelo para la regulación del flujo de mineral fresco, ecuaciones empíricas, características energéticas y Bond.
5. Modelar el consumo específico de energía en las unidades de molienda variando el flujo de mineral fresco.
6. Determinar la reserva energética de la sección de molienda aplicando el método combinado de las características energéticas con el método de Bond.

**Aporte del trabajo**

La metodología que permite determinar el consumo específico de energía eléctrica del proceso de molienda del mineral laterítico y establecimiento del rango más racional del mismo en la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” .

## **CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL**

### **1.1. Introducción**

En el presente capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos relacionados con los temas que son discutidos en la bibliografía consultada, con el fin de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resultan esenciales para el desarrollo del trabajo. Son tratados temas relacionados con la dinámica de los molinos y ventiladores centrífugos, factores que afectan la eficiencia en el proceso de molienda (influencia de la alimentación de mineral, la relación serpentina-limonita y el flujo de aire sobre el consumo específico de energía) y los métodos para determinar el consumo de energía eléctrica en los procesos de molienda.

El objetivo principal del presente capítulo consiste en exponer las bases teóricas y trabajos precedentes relacionados con las normas de consumo de energía en los procesos de molienda

### **1.2. Molinos de bolas**

El objetivo de los procesos de molienda es la reducción mecánica del tamaño de los materiales suministrados por la etapa de trituración hasta el punto de conseguir la liberación de las especies de interés. Esta etapa requiere grandes inversiones de capital, y suele ser la que supone mayores consumos energéticos y mayores costos asociados a elementos de desgastes, entonces, se puede definir la molienda como el proceso mediante el cual se reduce el tamaño del material mineralizado a menos de 0,79 mm , de manera que sea adecuado para la reducción. El material mineralizado que viene de secaderos es triturado en los molinos de bolas.

Aunque existen diversos tipos de equipos aplicables en el ámbito de molienda, los más habituales son los molinos de tipo cilíndrico constituido por una carcasa cilíndrica revestida internamente en cuyo interior se disponen los cuerpos molidores para reducir el mineral. Las paredes están reforzadas con material fabricado en aleaciones de acero al manganeso. Estas molduras van apernadas al casco del molino y se sustituyen cuando se gastan. El molino gira y la molienda se realiza por efecto de las bolas de acero al cromo o manganeso que, al girar con el molino, son retenidas por las ondulaciones de las molduras a una altura determinada, desde donde caen pulverizando por efecto del impacto el material mineralizado

(Dimensionado de molinos, 2003). En la figura 1.1 se muestra el interior de un molino de bolas.

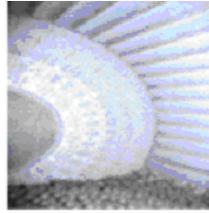


Figura 1.1 Vista interior de los molinos de bolas en los procesos de molienda seca (Dimensionado de molinos, 2003)

La molienda seca necesita de suficiente espacio físico para la planta así como disponer de sistemas de secado de la alimentación y de captación de polvo.

El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto, por esta razón frecuentemente se dice que una molienda correcta es la clave de una buena recuperación de la especie útil.

Una submolienda de la mena resultará en un producto que es demasiado grueso, con un grado de liberación demasiado bajo para separación económica obteniéndose una recuperación y una razón de enriquecimiento bajo en la etapa de concentración. La sobremolienda innecesaria reduce el tamaño de partícula del constituyente mayoritario (generalmente la ganga) y puede reducir el tamaño de partícula del componente minoritario (generalmente el mineral valioso) bajo el tamaño requerido para la separación más eficiente. Además se pierde mucha energía, que es costosa, en el proceso. Es importante destacar que la molienda es la operación más intensiva en energía del procesamiento del mineral (Marchese, 2004).

### **Partes principales de un molino**

Los molinos a escala industrial están diseñados para trabajar con grandes volúmenes de mineral y pesadas cargas en el interior constituidas por los cuerpos moledores, sus paredes están expuestas constantemente a los impactos de las bolas por lo que deben ser robustos y resistentes al desgaste. En la figura 1.2 se muestra la vista exterior de un molino donde se indican las partes principales del mismo.

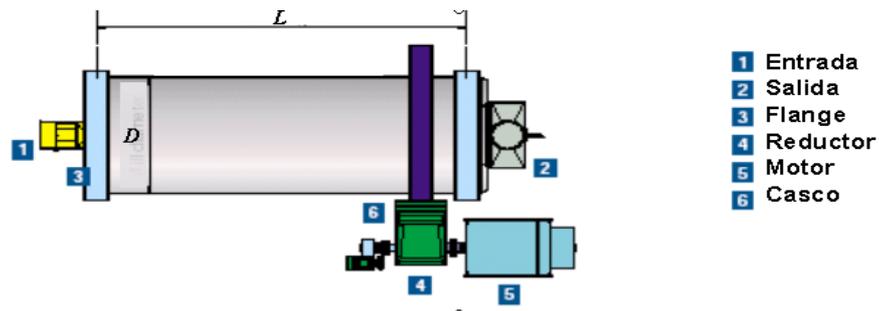


Figura 1.2 Vista exterior de un molino cilíndrico (Dimensionado de molinos, 2003)

A continuación se detallan las partes principales de los molinos

- Entrada: Es por donde se alimenta el mineral al molino, se conecta directamente al ducto proveniente del transportador.
- Salida: Es por donde el molino descarga el mineral hacia las tolvas de producto final ya sea por rebose o por un sistemas aerodinámico.
- Flange: Es el borde donde se refuerza la unión del tambor con las tapas laterales.
- Reductor: Es la parte intermedia en el accionamiento entre el motor y el molino.
- Motor: Es el accionamiento que pone en movimiento al molino, sus características pueden ser muy variadas tanto constructiva como funcionalmente.
- Casco: El casco del molino está diseñado para soportar impactos y carga pesada, y está construido de placas de acero forjadas y soldadas. Tiene perforaciones para sacar los pernos que sostienen el revestimiento o forros. Para conectar las cabezas de los muñones tiene grandes flanges de acero generalmente soldados a los extremos de las placas del casco, los cuales tienen perforaciones para apernarse a la cabeza.

En el interior se encuentran dos partes muy importantes, las mismas son:

- Extremos: Los extremos del molino, o cabezas de los muñones pueden ser de hierro fundido gris o modular para diámetros menores de 1 m . Cabezas más grandes se construyen de acero fundido, el cual es relativamente liviano y puede soldarse. Las cabezas son nervadas para reforzarlas.
- Revestimiento: Las caras de trabajo internas del molino consisten de revestimientos renovables que deben soportar impacto, ser resistentes a la abrasión y promover el movimiento más favorable de la carga.

Para cargas con bolas de hasta 60 mm los revestimientos deben ser de doble onda con una altura de onda por encima del revestimiento de 1,5 a 2 veces del espesor del mismo. Si se opera por debajo del 72 % de la velocidad crítica el deslizamiento acelera el desgaste por lo que debe ser un material muy resistente al desgaste. Para carga de bolas superior a 60 mm los revestimientos han de tener entre 50 y 65 mm de espesor con ondas de 60 a 75 mm sobre los revestimientos.

Los revestimientos del molino son un costo importante en la operación del molino y constantemente se está tratando de prolongar su vida. En algunas operaciones se han reemplazados los revestimientos y elevadores por goma. Se ha encontrado que ellos son más durables, más fáciles y rápidos de instalar, su uso resulta en una significativa reducción del nivel de ruido. Sin embargo se ha informado que producen un aumento en el desgaste de medios de molienda comparados con los revestimientos de metal. Los revestimientos de goma también pueden tener dificultades en procesos que requieren temperaturas mayores que 80 °C .

### **Movimiento de la carga de bolas en los molinos**

Una característica distintiva de los molinos rotatorios es el uso de cuerpos de molienda que son grandes y pesados con relación a las partículas de mena, pero pequeñas con relación al volumen del molino, y que ocupan menos de la mitad del volumen del molino.

Cuando el molino gira, los medios de molienda son elevados en el lado ascendente del molino hasta que se logra una situación de equilibrio dinámico donde los cuerpos de molienda caen en cascada y en catarata sobre la superficie libre de los otros cuerpos, alrededor de una zona muerta donde ocurre poco movimiento, como se muestra en la figura 1.3 . Se pueden distinguir tres tipos de movimiento de los medios de molienda en un molino rotatorio (Andreiev et al, 1987 ; Tapia, 2005)

- a) Caída en cascada, donde los medios bajan rodando por la superficie de los otros cuerpos (figura 1.3a)
- b) Caída en catarata que corresponde a la caída libre de los medios de molienda sobre el mineral (figura 1.3b)
- c) Rotación alrededor de su propio eje, las bolas giran sobre su propio eje tanto en el movimiento de cascada como en catarata.

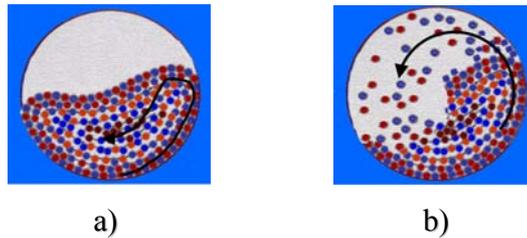


Figura 1.3 Movimientos de las bolas en el interior del molino en los procesos de molienda seca (Dimensionado de molinos, 2003)

a) Movimiento en cascada      b) Movimiento en catarata

La magnitud del elevamiento que sufren los medios de molienda depende de la velocidad de rotación del molino y del tipo de revestimiento del molino. A velocidades relativamente bajas o con revestimientos lisos, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie del molino y la trituración que ocurre es principalmente abrasiva. Esta caída en cascada produce molienda más fina, con gran producción de polvo y aumento del desgaste del revestimiento. A velocidades mayores los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga para describir una serie de parábolas. Esta caída en catarata produce trituración por impacto y un producto más grueso con menos desgaste del revestimiento.

La velocidad en los molinos cilíndricos suele expresarse en porciento respecto a la velocidad crítica (70 a 80 %), es la mínima velocidad a la cuál la carga se adhiere a las paredes del molino y puede calcularse mediante la relación de Coghill (Dimensionado de molinos, 2003) que se muestra en la expresión 1.1

$$n_c = \frac{42,305}{\sqrt{D}} \quad (1.1)$$

Donde:

$n_c$ : Velocidad crítica, (rpm)

$D$ : Diámetro interior del molino, (m)

Cuanto mayor sea el diámetro del molino menor será dicho porciento, como se muestra en la tabla 1.1 para el caso de molinos de bolas.

Tabla 1.1 Relación entre el diámetro de los molinos y su velocidad óptima expresada en % de la velocidad crítica (Dimensionado de molinos, 2003)

Diámetro interior, (m)	n, (% $n_c$ )
0.91 – 1.83	80 – 78
1.83 – 2.74	78 – 75
2.74 – 3.66	75 – 72
3.66 – 4.57	72 – 69

La eficiencia es máxima cuando el molino opera a un 75 % de la velocidad crítica (Dimensionado de molinos, 2003), esta velocidad se calcula según la ecuación 1.2

$$n_{\text{optima}} = 0,75V_c \quad (1.2)$$

Donde:

$n_{\text{optima}}$  : Velocidad óptima, (%)

$n_c$  : Velocidad crítica, (rpm)

Como se expuso en párrafos anteriores, las bolas se mueven en cascada a velocidades lentas del tambor, es decir, tomando como referencia la tabla (1.1), cuando  $n < 0,72n_c$ , las bolas de la periferia se deslizan sobre la zona más compacta en el seno de la carga. Las bolas se mueven en catarata cuando el tambor gira a velocidad rápida sin llegar a la velocidad crítica, es decir, cuando  $0,75n_c < n < n_c$  que las bolas se elevan a determinada altura y caen describiendo una trayectoria parabólica.

También se puede determinar la velocidad relativa ( $\psi$ ) conociendo la velocidad óptima o velocidad real ( $n$ ) y la velocidad crítica ( $n_c$ ). La velocidad relativa se determina por la expresión 1.3.

$$\psi = \frac{n}{n_c} \quad (1.3)$$

Donde:

$\psi$  : Velocidad relativa, (%)

$n$  : Velocidad nominal, (rpm)

Después de la velocidad de giro lo que determina la trayectoria de las bolas es el deslizamiento que a veces es tan grande que impide la catarata a velocidades de giro normales dependiendo del tipo de revestimiento interno del molino y de la carga de mineral. Durante el movimiento de elevación, hay un cambio continuo de posición de las bolas. La posición de las partículas finas dependerá de la velocidad, más en la periferia para velocidades altas y más al centro para velocidades bajas.

Estructuralmente cada tipo de molino consiste de un casco cilíndrico, con revestimientos renovables y una carga de medios de molienda. El tambor es soportado en muñones huecos, fijos a las paredes laterales de modo que puede girar en torno a su eje. El diámetro del molino determina la presión que puede ejercer el medio en las partículas de mena y en general, mientras mayor es el tamaño de la alimentación mayor necesita ser el diámetro. La longitud del molino, junto con el diámetro, determina el volumen y por consiguiente la capacidad (Dimensionado de molinos, 2003).

La mena normalmente se alimenta al molino a través del muñón de un extremo, y el producto molido sale por el otro muñón.

### **1.3. Factores que afectan la eficiencia en la molienda**

Varios factores afectan la eficiencia del molino de bolas. Entre ellos se pueden señalar: composición sustancial del mineral, el por ciento de humedad del mineral con que llega a éste, flujo de alimentación de mineral, flujo de aire en el sistema de evacuación, el deterioro de las bolas, grosor del producto, grado de desmenuzamiento del mineral (Coello, 1993 a ; Llorente, 2003 ; Laborde, 2004).

La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio de molienda. Luego las bolas deberían ser lo más pequeñas posible y la carga distribuida de modo tal que las bolas más grandes sean justo lo suficientemente pesadas para moler la partícula más grande y más dura de la alimentación. Una carga balanceada consistirá de un amplio rango de tamaños de

bolas y las bolas nuevas agregadas al molino generalmente son del tamaño más grande requerido (Rodas, 1997).

### **Tamaño de las partículas del mineral a alimentar**

En cuanto a la alimentación del mineral, según Allis Chalmers (Dimensionado de molinos, 2003), se puede calcular el tamaño de las partículas con las cuales se alimenta al molino, el mismo propone la ecuación 1.4

$$F_{80} = 4000 \sqrt{\frac{13}{W_i}} \quad (1.4)$$

Donde:

$F_{80}$ : Tamaño de la muestra, ( $\mu m$ )

$W_i$ : Índice de consumo específico de energía, ( $kWh/t$ )

Nordberg (Dimensionado de molinos, 2003), propone el valor de 25,4  $mm$  para materiales blandos y 6,35  $mm$  para materiales duros. El tamaño del material de salida variará entre 0,4  $mm$  y 10  $\mu m$

Empíricamente se ha demostrado que el grosor óptimo del mineral a alimentar debe ser menor de 10  $mm$  .

### **Volumen de llenado del molino**

El volumen o nivel de la carga de bolas está relacionado con la dureza del mineral y el flujo de mineral que puede tratar el molino para un mismo grado de molienda. Un aumento del flujo de mineral involucra un menor tiempo de residencia, lo que se compensa con una mayor carga de bolas, a fin de aumentar la probabilidad de contacto entre bolas y mineral. Lo mismo sucede frente a un mineral que presenta una mayor dureza.

No se recomienda que el volumen de mineral exceda el de los huecos entre las bolas, que está entre el 35 y 40 % del volumen de acero que a su vez supone aproximadamente el 40 % del

volumen interno del molino. Se considera una densidad real de las bolas de  $7,8 \text{ g/cm}^3$  con densidad aparente de  $4,6 \text{ g/cm}^3$ .

Se conoce, según Laborde et al (2001), que la potencia demandada por el molino depende en gran medida de la carga de bolas y no de la carga de mineral con que se esté alimentando, por eso se puede afirmar que cuanto más la carga de bolas ( $\varphi$ ) se aproxima a la nominal, aumenta la productividad ( $Q$ ) del molino, disminuye el consumo específico de energía ( $we$ ) y por consiguiente mejora la eficiencia energética del sistema.

### **Influencia de la alimentación del mineral sobre el consumo de energía**

Las dimensiones del molino, el grado de llenado y masa de la carga de bolas, diámetro y cantidad de cada tipo de bolas determinan la masa de mineral de alimentación al molino, la misma se determina a través de las ecuaciones: 1.5, 1.6, 1.7 y 1.8

$$M_{a \text{ lim}} = \rho_{mat} \cdot V_{mat} \quad (1.5)$$

Donde:

$M_{a \text{ lim}}$  : Masa de alimentación, ( $kg$ )

$V_{mat}$  , Volumen que ocupa el material, ( $m^3$ )

$\rho_{mat}$  , Densidad del material, ( $g/m^3$ )

El volumen que ocupa el mineral en el interior del molino debe oscilar entre 60 y 110 % del volumen de los espacios entre bolas ( $V_{eeb}$ ) determinando dicho volumen por la ecuación 1.6

$$V_{eeb} = V_{cb} - V_{tb} \quad (1.6)$$

Donde:

$V_{eeb}$  : Volumen de los espacios entre bolas, ( $m^3$ )

$V_{cb}$  : Volumen carga de bolas, ( $m^3$ )

$V_{tb}$  : Volumen total de bolas, ( $m^3$ )

El volumen de la carga de bolas se determina por la ecuación 1.7

$$V_{cb} = \varphi \cdot V_{mol} \quad (1.7)$$

Donde:

$\varphi$  : Grado de llenado en bolas respecto al volumen del molino, (%)

$V_{mol}$  : Volumen del molino, ( $m^3$ )

El volumen total de bolas se determina por la ecuación 1.8

$$V_{tb} = \sum V_b \quad (1.8)$$

Donde:

$V_b$  : Volumen de las bolas, ( $cm^3$ )

En la trituración de minerales se tiene en cuenta las dimensiones del molino ( $L \times D$ ) para calcular, por ejemplo, velocidad y potencia (epígrafe 1.3 y 1.15 respectivamente). La relación longitud – diámetro se expresa a través de la ecuación 1.9 .

$$L = k \cdot D \quad (1.9)$$

Donde:

$L$  : Longitud, (m)

$D$  : Diámetro, (m)

$k$  : Relación del cociente longitud/diámetro

En la liberación de minerales  $k$  oscila entre 1 y 2 . Para alto valor de superficie específica,  $k$  se encuentra entre 3 y 5 .

La potencia del molino de bolas depende en lo fundamental de la carga de bolas, por tal motivo, la diferencia entre el trabajo en vacío y con carga solo se diferencia en 10,5 %

(Laborde et al, 2001). Es recomendable mantener el flujo de mineral alto y estable hacia el molino, de forma tal que el mineral llene todos los espacios vacíos entre bolas, sin que constituya una sobre carga, lo que determinará que el molino trabaje a su máxima capacidad logrando alta eficiencia.

### **Influencia de la relación serpentina - limonita sobre el consumo de energía**

Las variaciones en la relación serpentina - limonita del mineral laterítico son una de las causas que provocan inestabilidad en el comportamiento del consumo específico de energía y el empeoramiento de los indicadores tecnológicos en la sección de molienda.

Se considera como productividad nominal la que se obtiene cuando se muele un mineral con 25 % de serpentina y 75 % de limonita (según está considerado en el proyecto del proceso industrial). Se considera el producto molido cuando 80 % de las partículas que lo conforman han sido transformadas en un tamaño por debajo de  $74 \mu m$  ; ésta constituye la condición primordial de calidad en el producto del proceso industrial y como condiciones complementarias se establecen que, el contenido de la clase ( $+150 \mu m$ ) sea inferior a 5 % y ( $-44 \mu m$ ) inferior a 75 % (Laborde, 2005).

En las investigaciones de la influencia de la relación serpentina - limonita del mineral, sobre los indicadores energotecnológicos del proceso de molienda se aprecia una tendencia decreciente de la productividad del molino con el incremento de serpentina en el mineral. Esta dependencia queda definida en forma analítica mediante la ecuación 1.10 , (Coello et al, 2005)

$$Q = 1,579e^{-0,0189C_s} \quad (1.10)$$

Donde:

$Q$ : Productividad relativa con respecto a la obtenida para la relación limonita – serpentina con relación de 3 a 1 , expresado en ( $t/h$ )

$C_s$ : Contenido de serpentina en el mineral, (%)

En el comportamiento del consumo específico de energía en el proceso de molienda se observa que este indicador mantiene una tendencia lineal y creciente con el aumento del

contenido de serpentina en el mineral. Como se sabe, la potencia que demanda el molino depende prácticamente de la carga de bolas, (Coello, 1993 a ; Laborde, 2004), por lo que mientras más lento transcurra el proceso (cuando la presencia de serpentina es alta), mayor es el consumo de energía y viceversa. Dicha dependencia quedada definida en forma analítica mediante la ecuación 1.11

$$W_e = 0,2733C_s + 0,1227 \quad (1.11)$$

Donde:

$W_e$  : Consumo específico de energía eléctrica en el proceso industrial, (kWh/t)

Las dependencias de la productividad y del consumo específico de energía del molino, respecto a la relación serpentina - limonita en el mineral hayan su explicación a través del comportamiento observado de las funciones de la fragmentación del mineral con sus diferentes mezclas (Coello et al, 2005).

#### **1.4. Circuito cerrado de molienda y clasificación**

La molienda en circuito cerrado es la más común para el procesamiento de minerales. Este tipo de circuito consiste de uno o más molinos y clasificadores y producirá en forma eficiente un producto con un tamaño máximo controlado y con un mínimo de material sobre molido. El material molido que descarga el molino es separado por el clasificador en una fracción fina y una gruesa.

En la operación en circuito cerrado no se intenta alcanzar toda la reducción de tamaño en una pasada por el molino. Por el contrario el énfasis se concentra en tratar de sacar el material del circuito tan pronto alcanza el tamaño requerido. El material retornado al molino por el clasificador se conoce como carga circulante y su peso se expresa en % del peso de la alimentación nueva al circuito, (Bouso, 2004).

La molienda en circuito cerrado disminuye el tiempo de residencia de las partículas en cada paso por el molino y también la proporción de material fino en el molino comparado con molienda en circuito abierto. La sobremolienda del material se trata de evitar en general para minimizar la producción de partículas excesivamente finas que frecuentemente interfieren con

los procesos de recuperación del metal. También se usan sistemas de ventilación para el transporte del mineral desde el interior del molino hasta las tolvas de almacenar, estos pueden ser diversos en tipos y dimensiones.

### **1.5. Ventiladores centrífugos**

Se define como una turbomáquina que transmite energía para generar la presión necesaria con la que mantiene un flujo continuo de aire. Dentro de una clasificación general se encuentran a los ventiladores como turbomáquinas hidráulica tipo generador para gases, (Escoda, 2003).

Un ventilador consta en esencia de un motor de accionamiento generalmente eléctrico, con los dispositivos de control propios: arranque, regulación de velocidad, conmutación de polaridad, etc., y un propulsor giratorio en contacto con el aire al que le transmite energía. El propulsor adopta la forma de rodete con alabes, envuelto por una caja con paredes de cierre en forma de espiral. La envolvente tubular puede llevar una reja radial de alabes fijos a la entrada o salida de la hélice llamada directriz que guía al aire para aumentar la presión y el rendimiento del aparato.

### **Circulación del aire en el sistema aerodinámico**

El aire circula por un conducto gracias a la diferencia de presión que existe entre sus extremos. Para diferencias de nivel de hasta 100 m , velocidades inferiores a 50 m/s , (caso que puede considerarse al aire como incompresible) y régimen estacionario, las presiones obedecen al teorema de Bernouilli que su presión analítica dice: La suma de la presión estática, la dinámica y la debida a la altura es constante para todos los puntos de un filete de fluido.

### **Presiones en el sistema aerodinámico**

Si el conducto es horizontal o la diferencia es inferior a 100 m, la presión por diferencia de altura es cero.

La presión estática actúa en todo sentido dentro del conducto, se manifiesta en el mismo sentido y en el contrario de la corriente del aire. La presión dinámica actúa en el sentido de la velocidad del aire.

La presión total es constante en todos los puntos del sistema donde haya fluido y se expresa a través de la ecuación 1.12

$$P_t = P_e + P_d \quad (1.12)$$

Donde:

$P_t$ : Presión total, (Pa)

$P_d$ : Presión dinámica, (Pa)

$P_e$ : Presión estática, (Pa)

La presión estática y dinámica se determinan experimentalmente con una sonda y un tubo de Prandtl. La presión total se manifiesta constante en todos los puntos para una porción del sistema, según teorema de Bernouilli

#### **Caudal en el sistema aerodinámico**

Es la cantidad de aire que circula por el conducto en la unidad de tiempo, dependiendo directamente de la velocidad del fluido y la sección transversal del conducto. El caudal se determina por la ecuación 1.13 (Escoda, 2003)

$$Q = V \cdot S \quad (1.13)$$

Donde:

$Q$ : Caudal, ( $m^3 / s$ )

$V$ : Velocidad del fluido, ( $m/s$ )

$S$ : Sección del conducto, ( $m^2$ )

La velocidad del fluido se determina según la ecuación 1.14

$$V = 4\sqrt{P_d} \quad (1.14)$$

### **Curva característica de los ventiladores**

Es la representación gráfica de todos los estados caudal - presión de que es capaz el ventilador. Se obtiene en unos ejes de coordenadas los distintos valores caudal - presión mediante ensayos en un laboratorio (Escoda, 2003).

Es muy importante conocer las curvas características del ventilador ya que en ellas se encuentran todas las informaciones que se necesitan sobre el comportamiento del mismo, es decir, la característica de un ventilador es la mejor referencia del mismo ya que siempre indicará su comportamiento según sea el caudal y la presión que esté dando. En la figura A.4 se muestran las curvas correspondientes a la presión dinámica ( $P_d$ ), presión estática ( $P_e$ ), presión total ( $P_t$ ), curva de potencia absorbida ( $W$ ) expresada en watts y el rendimiento ( $\eta$ ) expresado en %. El punto ideal de funcionamiento es el correspondiente al máximo rendimiento, cuanto más cerca de este punto trabaje más económico será su funcionamiento. El punto ( $R$ ), figura A.4, se conoce como punto de desprendimiento, la zona a la izquierda de éste es de funcionamiento inestable y a la derecha corresponde a la zona de funcionamiento estable.

Los ventiladores centrífugos son adecuados para mover caudales pequeños pero a elevada presión. Son empleados para el trasiego de aire u otros gases industriales en aquellos casos en que no se requiere elevar la presión del gas más de 1,15 veces para una densidad del gas de  $1,2 \text{ kg/m}^3$ .

### **Dinámica de los ventiladores centrífugos**

Los ventiladores centrífugos son equipos empleados para el trasiego de aire, gases o partículas en instalaciones industriales (figura 1.5). En estos aparatos la trayectoria del aire sigue una trayectoria axial a la entrada y paralela a un plano radial a la salida. Entrada y salida están en ángulo recto. El rodete de estos aparatos está compuesto de alabes que pueden ser hacia delante, radiales o atrás (Ramos, 1995).

En estos equipos, por la acción de la fuerza centrífuga, el fluido es desplazado desde el eje de rotación del impelente hacia la periferia.

Durante este recorrido, los alabes del impelente le transmiten energía en forma de presión y velocidad al fluido. Parte de esta última es transformada en presión en el colector que rodea al

impelente ya que las altas velocidades provocan pérdidas por fricción y disminuyen la eficiencia del equipo.

Los principales parámetros que permiten caracterizar el equipo centrífugo, según (Escoda, 2003), son:

H: Carga, (m)

Q: Capacidad, ( $m^3 / s$ )

n: Velocidad de rotación, (rpm)

$\eta$ : Rendimiento, (%)

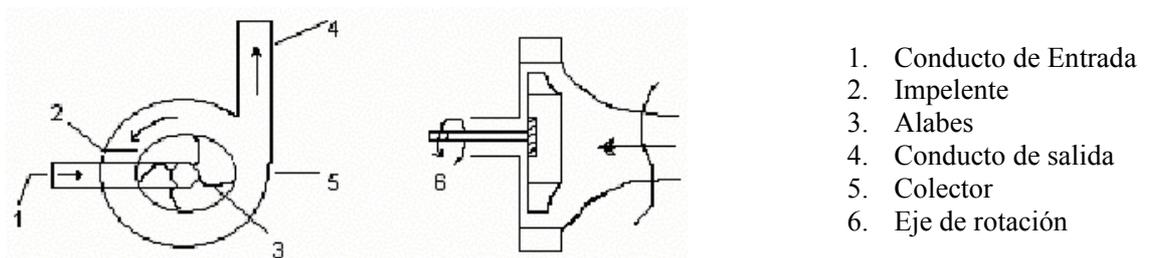


Fig.1.5 Esquema de las partes que forman al ventilador (Ramos, 1995)

La carga de impulsión y presión ( $P$ ) es uno de los parámetros que caracteriza la cantidad de energía que la máquina le trasmite al fluido al pasar por el, por lo tanto corresponde numéricamente igual a la diferencia entre la energía que posee el flujo a la salida y la que poseía al entrar a ésta. Si se expresa en metros la altura, la presión se determina por la ecuación 1.15

$$P = \rho \cdot g \cdot H \quad (1.15)$$

Donde:

$P$ : Presión, ( $Pa$ )

$\rho$ : Densidad, ( $kg/m^3$ )

$g$ : Aceleración de gravedad, ( $m/s^2$ )

La capacidad de un ventilador se define como el volumen que es capaz de entregar la máquina por unidad de tiempo a través del conducto de descarga.

Este volumen se expresa en función de los parámetros de presión y de la temperatura del fluido a la sección de la máquina, o referido a condiciones de referencia establecida previamente.

En ocasiones la capacidad se define en función del gasto másico y el volumétrico, se expresa por la relación 1.16

$$Q_m = \rho \cdot Q \quad (1.16)$$

Donde:

$Q_m$  : Gasto másico, ( $m^3 / s$ )

Se denomina velocidad de rotación (n) de una máquina a las revoluciones por unidad de tiempo en su eje principal. En el sistema internacional de unidades se toma ( $s^{-1}$ ), sin embargo, la literatura especializada emplea universalmente revoluciones por minutos (rpm).

La potencia que la máquina entrega al fluido se denomina potencia útil ( $P_u$ ) y se determina por la expresión 1.17 .

$$P_u = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000} \quad (1.17)$$

Ya que  $P = \rho \cdot g \cdot H$  , se puede sustituir en la ecuación 1.17

El rendimiento ( $\eta$ ) es la relación entre la potencia útil ( $P_u$ ) y la que es necesaria entregarle al eje de la máquina ( $P_e$ ). El rendimiento depende del tipo de construcción, dimensiones, fluido, régimen de trabajo y características del sistema de tuberías. A la hora de determinar el rendimiento conjunto de una instalación, se define como la potencia útil y la potencia consumida por el motor, según la ecuación 1.18 .

$$\eta_{inst} = \frac{P_u}{P_e} \quad (1.18)$$

Considerando que:

$$Pe = \frac{Q \cdot P}{1000\eta} \quad (1.19)$$

### **Influencia del flujo de aire sobre el consumo de energía**

El mineral es barrido desde el interior del molino y transportado por todo el sistema por medio de un ventilador de recirculación. Según Ramos (1995), la potencia del ventilador se determina por la expresión 1.20

$$N_v = \frac{P_t \cdot Q_v}{\eta_v \cdot \eta_t \cdot 1000} \quad (1.20)$$

Donde:

$\eta_v$ : Rendimiento del ventilador, (%)

$\eta_t$ : Rendimiento de la transmisión, (%)

Para diferentes valores de gastos ( $Q_v$ ) del ventilador, por consiguiente diferentes valores de consumo de energía, se observan iguales valores de productividades ( $Q$ ) de la unidad de molienda, por lo que no se establece una relación determinada entre  $Q$  y  $P$ .

Al estudiar el trabajo en vacío ( $Q = 0$ ) de las unidades de molienda, se observa que el consumo de energía de estos equipos en este régimen de trabajo no solo son superiores a los valores promedios observados en condiciones de carga sino que superan a los valores máximos (Laborde y Coello, 2001). A medida que aumenta la cantidad de mineral en la descarga del molino, aumenta la resistencia ( $H$ ) del sistema aerodinámico, con lo cual disminuye el gasto ( $Q_v$ ) del ventilador y, por consiguiente, disminuye la potencia demanda por este. En el caso contrario, a medida que disminuye la cantidad de mineral en las tuberías, disminuye la resistencia ( $H$ ), por consiguiente el punto de operación se desplaza a la zona de mayores gastos a la cual corresponden mayores potencias, es decir el mineral actúa como una válvula de regulación del gasto del ventilador, se obtiene el máximo gasto, y por consiguiente, la máxima potencia del ventilador, para el caso en que no exista mineral en el sistema.

### Punto de trabajo de los ventiladores

Según Escoda (2003), la curva característica del ventilador depende únicamente del ventilador y solamente puede variar si el ventilador funciona a velocidad de rotación distinta. Se debe considerar que un ventilador puede funcionar moviendo distintos caudales y comunicándoles distintas presiones.

Para satisfacer las demandas del sistema al que es acoplada la máquina centrífuga, es necesario que ésta sea capaz de variar sus parámetros dentro de ciertos límites manteniendo alto rendimiento. Para lograr esto se trata de obtener modelos que garanticen, para las máquinas sometidas a régimen variable de trabajo características de rendimiento altas y planas.

Para saber exactamente en qué condiciones funcionará el ventilador, se debe conocer la curva resistente de la instalación, es decir, la curva que relaciona la pérdida de carga de la instalación con el caudal que pasa por ella. Según Escoda (2003), se puede encontrar de forma fácil el punto de trabajo del ventilador simplemente superponiendo las curvas características del ventilador y la curva resistente del conducto, por ejemplo, como se muestra en la figura 1.6 .

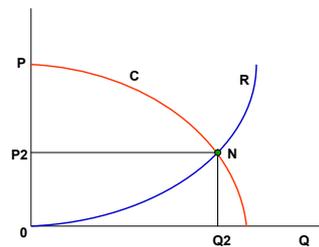


Fig.1.6 Punto de trabajo óptimo del ventilador (Escoda, 2003)

Siendo  $N$  el punto de operación,  $R$  la curva resistiva del conducto y  $C$  la curva característica del ventilador.

La pérdida de carga de una conducción, por consiguiente pérdida de presión, varía proporcionalmente con el cuadrado del caudal, según (Escoda, 2003), se expresa por la ecuación 1.21

$$P_2 = P_1 \left[ \frac{Q_2}{Q_1} \right]^2 \quad (1.21)$$

Donde

$P_1$ : Pérdida de la presión inicial, ( $P_a$ )

$Q_1$ : Caudal inicial, ( $m^3/h$ )

$Q_2$ : Caudal que se desea tener, ( $m^3/h$ )

$P_2$ : Presión que se tendrá para  $Q_2$ , ( $P_a$ )

Para los ventiladores que trabajan en condiciones estables se busca que el rendimiento sea lo más elevado posible en el punto de operación.

La zona de trabajo óptimo de una máquina centrífuga se define como la variación del gasto que queda entorno a  $0,9\eta_{máx.}$ .

Estos criterios deben tenerse en cuenta al seleccionar la máquina para una aplicación dada, ya que una máquina de alto rendimiento puede resultar ineficiente si opera fuera de su zona de trabajo óptimo durante la mayor parte de su tiempo de explotación.

Tanto el molino como el ventilador en sus características energéticas en función de la cantidad de mineral que existe en la unidad de molienda que ellos componen es contradictoria, porque sus potencias se incrementan hasta un 10,5 % en ausencia de mineral por encima de su valor medio de trabajo, según (Laborde y Coello, 2001), pero esta contradicción tiene explicación válida y es fundamental, cuando no existe mineral el ventilador aumenta su gasto volumétrico debido a que tendrá que desplazar una mayor cantidad de aire, en un volumen mayor por la ausencia de mineral, por lo que el trabajo del motor será a plena carga con un consumo de energía mayor, no siendo así con la presencia de mineral, ya que emplea todo el flujo de aire para extraer el mineral del molino siendo el consumo de energía es menor.

El molino incrementa el consumo de energía con la poca presencia de mineral en el sistema debido al cambio de la situación dinámica que se produce entre la masa de bolas y el tambor.

Por esto es conveniente y necesario evitar que las unidades de molienda trabajen sin mineral aunque sea por un corto tiempo para que sea aprovechada la energía eléctrica de forma racional.

## **1.6. Métodos para establecer las normas de consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda de minerales**

La normación del consumo de energía eléctrica, a nivel de mecanismos o procesos, juega un papel fundamental para disminuir los costos de producción. En el presente epígrafe se analizarán los diferentes métodos que se aplican para normar el consumo específico de energía.

### **Método estadístico**

La estadística actual no sólo es un conjunto de técnicas para resumir y transmitir información cuantitativa, sino que sirve también, y fundamentalmente, para hacer inferencias, generalizaciones y extrapolaciones de un conjunto relativamente pequeño de datos a un conjunto mayor. Estadística es la ciencia que se ocupa de la ordenación y análisis de datos procedentes de muestras, y de la realización de inferencias acerca de las poblaciones de las que éstas proceden.

La energía en la molienda puede cuantificarse mediante los índices de tendencia central o promedios, son nombrados así porque pretenden ser síntesis de los valores de la variable. Los índices pueden ser: media aritmética, mediana y moda. Se aplicará la media aritmética porque en ella se basan otros estadísticos y es mejor estimador de su parámetro que la mediana y la moda.

Por las razones expuestas anteriormente, la media es el índice de tendencia central más utilizado. Se define como la suma de los valores observados dividido por el número de ellas. Se representa con la misma letra que representa la variable, en mayúsculas, con una barra horizontal encima.

### **Método de las ecuaciones empíricas**

Según Andreiev et al, (1987), existen ecuaciones que relacionan la potencia útil con la potencia demandada por los accionamientos eléctricos de la red conociendo los datos suministrados por los fabricantes, tales como: el rendimiento de los motores eléctricos, los reductores mecánicos y un coeficiente ( $k = 1,025$ ) que asume el incremento de la potencia en 2,5 % gastada en las transmisiones, es decir, se determinó la potencia útil del molino por

cualquiera de los métodos convencionales, partiendo de sus características constructivas, se puede determinar la potencia demandada de la red

Varios autores han propuesto diferentes ecuaciones para determinar la potencia de los molinos de bolas, (Andreiev et al, 1987), estas son expresadas en el presente epígrafe.

Uno de los aspectos esenciales a tener en cuenta es la potencia demandada por el accionamiento donde se deben considerar: las dimensiones del molino, la carga moledora y la productividad que se desea. El cálculo de la potencia del accionamiento puede realizarse a partir de la estimación de consumo específico de energía eléctrica que se obtiene mediante la ecuación de Bond, teniendo en cuenta el caudal másico de material a procesar. Sin embargo también se puede realizar este cálculo mediante consideraciones de tipo dinámico como se describe a continuación.

- La potencia necesaria para el accionamiento de un molino de tipo cilíndrico, de forma general, viene dada por la ecuación 1.22, según Andreiev et al, (1987), en la que se supone la carga de bolas como una masa compacta que se desliza con cierto ángulo en el fondo del tambor.

$$N = c \cdot W \cdot n \cdot R_g \quad (1.22)$$

Donde:

$N$  : Potencia, ( $kW$ )

$c$  : Constante, ( $u$ )

$W$  : Peso de la carga, ( $kg$ )

$n$  : Velocidad, (rpm)

$R_g$  : Distancia desde el eje del molino al centro de gravedad de la carga, ( $m$ )

Si bien la ecuación 1.22 considera la carga de bolas como una masa compacta que se desliza con cierto ángulo en el fondo del tambor, se han desarrollado otras expresiones que tienen en cuenta el movimiento independiente de las bolas ya sea en forma de cascada o catarata dependiendo de la velocidad de giro del tambor.

- Si el molino trabaja en régimen de cascada, es decir si su velocidad de rotación es menor del 75 % de la velocidad crítica, la potencia útil necesaria para accionar al molino se determina teniendo en cuenta las dimensiones del molino (L x D) y el coeficiente k que depende de la densidad de la carga de relleno (4,6 t/m<sup>3</sup>), según Andreiev et al, (1987), se expresa a través de la ecuación 2.4 , epígrafe 2.11
- Dominion Engineering. En este método solo se tiene en cuenta las dimensiones del molino (L x D) y un coeficiente (k) , según Dimensionado de molinos, (2003), la potencia se determina por la ecuación 2.5 , epígrafe 2.11
- Según las cargas Molturantes. A través de este método se obtiene la potencia partiendo del peso de la carga de bolas considerando la raíz cuadrada del diámetro del molino y el coeficiente (k) que tomará valor según el grado de relleno en bolas (tabla 1.2), la potencia se determina, según Andreiev et al, (1987) , por la ecuación 2.6, epígrafe 2.11
- Tercera ley de Bond. Tiene en cuenta la energía necesaria para el rompimiento de las partículas al introducir el índice de consumo específico ( $W_i$ ) expresado en kWh/t . Se tiene en cuenta que el tamaño tanto inicial (F) como final (P) se definen como un diámetro de la clase de tamaño donde se retiene 20 % del mineral, o sea, un valor constante, propone el coeficiente (k) para el caso de molienda seca y la productividad del molino (t), las dimensiones se expresan en micra y el índice de Bond corregido. La misma queda definida, según Andreiev et al, (1987), por la ecuación 2.7, epígrafe 2.11 .

El índice de trabajo ( $W_i$ ) se determina por la ecuación 1.23

$$W_i = \frac{44,5}{P_{100}^{0,23} \cdot G_{bp}^{0,82} \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (1.23)$$

Donde:

$P_{100}$  : Abertura de la malla de corte utilizada, ( $\mu m$ )

$G_{bp}$  : Índice de molturabilidad del material en molinos de bolas, (g/rev.)

El índice de operación ( $Wop$ ) para los molinos a escala industrial se determinó a partir del índice de trabajo a escala de laboratorio ( $Wi$ ), el mismo se obtiene según la ecuación 1.24

$$Wop = 10 \cdot wi \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{p}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (1.24)$$

### 1.7. Índice de Bond y las características energéticas para establecer una metodología en la normación del consumo específico de energía eléctrica en la molienda del mineral laterítico

Según Coello et al (2001), durante los estudios de los circuitos de molienda, frecuentemente se tiene en cuenta el comportamiento energético del molino y se enfrenta el problema de determinación de la energía asociada al proceso de fragmentación de una partícula. Este problema de alta complejidad ha encontrado respuestas diversas entre los investigadores. Los trabajos más avanzados en este sentido son las llamadas leyes de la conminución: Rittinger (1867), Kick (1883), Bond (1950), Holmes (1957) Charles (1957). Varios autores: Fuesternau (1962), Austin y Luckie (1972), Austin y Brame (1983) han demostrado el carácter no fundamental de estas leyes y sus limitaciones al ser aplicadas en circunstancias prácticas.

Una alternativa a esta situación ha sido la determinación de la facilidad o dificultad con la cual el material es reducido en tamaño, la cual a su vez está relacionada con el comportamiento del molino. A través de los años han sido propuestas muchas expresiones de molibilidad pero solamente dos de ellas han encontrado amplia aplicación práctica y han sido reconocidas como la base para el diseño de determinados tipos de molinos: (1) el índice de Hardgrove, asociado principalmente con los molinos verticales y (2) el índice de Bond, asociado con los molinos de volteo (Prasher, 1987).

El índice de Bond ha sido definido como el parámetro de la reducción de tamaño o dimensión que expresa la resistencia del material a la trituración y a la molienda. Este índice se ha empleado en las industrias desde finales de la década del 20 del siglo XX (Mosher y Tague, 2001). Sus valores han sido utilizados para el diseño industrial de los circuitos de molienda

(Rowland, 1998), realizándose prácticas a escala de laboratorios antes de llevarlo a escala industrial, como lo demuestran artículos publicados recientemente (“Comminution Testes”, [www.sgs.com/met](http://www.sgs.com/met), Agosto, 2007).

En diversos trabajos se dan explicaciones prácticas para facilitar la determinación del índice de Bond con diferentes tipos de materiales, Deister (1987), Lewis y Pearl (1990), Aksani y Sonmes (2000), Aguado (2003).

A pesar de que la molibilidad es ampliamente utilizada, tanto en el diseño como para valorar la eficiencia de los molinos, Austin et al (1982) y Austin y Brame (1983) han señalado las limitaciones del método de Bond. Por otro lado, Herbst y Fuerstenau (1980), han demostrado que en diferentes plantas en operación la relación entre el consumo específico de energía observado y el estimado por el método de Bond se encuentra en el rango de  $\pm 20\%$ .

Independientemente del grado de error que puede cometerse al determinar la molibilidad del material por el método de Bond, este continúa siendo el método principal utilizado para determinar la eficiencia operacional en un proceso de conminución, (Rowland, 1998).

La aplicación del método de Bond tanto para el diseño de instalaciones de molienda como para juzgar la eficiencia de los circuitos en operación, no deja duda sobre su efectividad, sin embargo, cuando se trata de un análisis energético en una planta concreta de explotación, además de utilizar el método de Bond es aconsejable determinar un modelo que relacione el consumo específico de energía de la unidad de molienda con su productividad, este modelo representa las llamadas características energéticas de la unidad. Belyx et al (1971) y Aviliov et al (1987) describen en detalles, con ejemplos de plantas procesadoras de materiales ferrosos, las ventajas que ofrece el uso del método de las características energéticas. Laborde et al (2001), Laborde et al (2005) demuestran la conveniencia del uso de las características energéticas en el proceso de molienda del mineral laterítico, como un método que complementa al método de Bond y que tiene en cuenta los cambios que sufren las principales variables del proceso de molienda.

### **1.8. Trabajos precedentes**

Según Laborde (2005), muchos han sido los trabajos en busca de la mejora de la eficiencia energética en los circuitos de molienda (Bonoilli y Fluvio, 1994). En el tema referido a la eficiencia energética de los molinos de bolas, Austin, Klimpel y Luckie (1984), plantean que

el grado de conversión de la energía para la reducción del tamaño útil es un concepto débilmente definido, “la única eficiencia que es realmente de interés, es el encuentro de las especificaciones del producto al costo mínimo”.

Se reconoce que hasta un 99 % de la energía consumida en la molienda de un mineral se gasta en el movimiento del molino, ruido y calor, quedando solo el 1 % para la reducción del material (Rowland, 1998).

Todos los trabajos realizados en el ámbito de la molienda reflejan la ineficiencia de dicho proceso, por lo que se hace necesaria la búsqueda de métodos que normen el consumo de energía eléctrica. Las ecuaciones empíricas conocidas no pueden ser aplicadas a la molienda en casos particulares ya que todos los minerales no tienen las mismas características físicas y químicas, por lo que se necesita encontrar métodos para el caso concreto de explotación de los minerales.

En el ámbito internacional se han realizado trabajos con este objetivo, ejemplos de ellos lo constituye el diseño de molinos mediante el escalado, que permite estimar la potencia que demandará a escala industrial, (Nesset, 2006 ; Rajamani, 2004). Pueden ser construidos a escala partiendo de un molino de pruebas en laboratorios combinando características elementales como: la idéntica especificación y tamaño de los medios de molienda, el movimiento de los medios moledores y el mineral se agitan con un método similar y la disposición de los molinos a escala industrial y de pruebas son iguales, (horizontales). La progresión a escala de laboratorios es muy exacta ya que se mide directamente la energía o el esfuerzo de torsión aplicado al eje del molino, la potencia neta y la potencia bruta. También se tienen en cuenta la clasificación, tamaño de las partículas a moler y el tipo y tamaño de medios de molienda (bolas). A través de este método se conoce la energía que consumirá el molino en condiciones reales porque se diseñó con los valores de los parámetros con los cuales funcionará, pero tiene el inconveniente que las propiedades de los minerales y las condiciones de operaciones pueden cambiar, además se necesita de una instalación a escala de laboratorios para realizar los recálculos

Charreas (1998), realiza la simulación de un circuito de molienda a clasificación directa, con el método numérico de punto fijo el cual da una buena convergencia para el cual se usa la variación de la carga circulante. La simulación se realizó en el programa Visual Basic 6.0, el cual permite predecir el por ciento acumulado pasante en el molino así como también el

balance de material del circuito. Mediante la simulación se predice el consumo específico de energía eléctrica que el molino incurrirá para determinadas condiciones de operaciones, es decir se obtiene la norma de consumo, pero, aunque se cumplieron los objetivos del autor, éste trabajo no es de utilidad para ser aplicado a las condiciones concretas de molienda seca en la laterita ya que el experimento se realiza para tratar la molienda en vía húmeda, presenta algunos inconvenientes al no ser dinámico, es decir, se aplica al estado estacionario, se deben conocer las constantes del clasificador y del molino ya que este simulador no calcula dichas constantes. Los cálculos dependen del flujo de alimentación de mineral fresco y dimensiones y parámetros de operación del molino así como de las propiedades del mineral

En el caso particular del proceso de molienda del mineral laterítico cubano, se han realizado importantes investigaciones en este sentido. En Cuba existen dos plantas procesadoras de las menas oxidadas de níquel y cobalto, ubicadas en el nordeste de la zona oriental (empresa “Comdte Ernesto Che Guevara”, en Moa y “René Ramos Latour”, en Nicaro), ambas plantas incluyen la molienda como parte del proceso de preparación de minerales y en las mismas está establecido moler de forma conjunta las fracciones serpentinitica y limonítica a razón de 1 a 3, sin embargo en la práctica se observa que es difícil mantener de forma estable dicha relación (Llorente, 2003), por lo que la molienda del mineral laterítico se presenta como la molienda de un mineral multicomponente con composición sustancial variable. Falcon (1987) sostuvo la hipótesis sobre la existencia de una interacción positiva entre las fracciones limoníticas sobre la base del comportamiento de los índices del mineral molido al compensar con mineral la disminución de la carga de bolas. Coello (1993 a), también consideró esta posible interacción, sin descartar la necesidad de tener en cuenta los fenómenos relacionados con la molienda de los minerales de diferente dureza y densidad. Otras direcciones de trabajos han estado encaminadas a investigar la influencia de la carga de bolas del molino sobre los indicadores energotecnológicos del proceso (Coello, 1993 a), demuestra que la energía consumida por los molinos no depende en lo fundamental del flujo de mineral y sí de la carga de bolas, cuanto más el grado de llenado en bolas se aproxime a la nominal, se obtendrá mayor productividad.

Laborde et al (2000), realizan un trabajo experimental a escala industrial donde analizan la influencia que tienen el flujo de mineral sobre la eficiencia energética en la sección de molienda, determinan las reservas energéticas en dicha instalación si se adoptan medidas que

controlen el flujo de alimentación y adecuada carga de bolas en el interior de los molinos. Coello et al (2005); Laborde y Ledesma (2008), realizan investigaciones a escala de laboratorio e industrial sobre la influencia de la relación serpentina – limonita en el comportamiento del consumo específico de energía en la sección de molienda, demostrando que las variaciones en dicha relación son una de las causas que provocan inestabilidad en ese indicador. Laborde et al (2004), demuestra que la causa fundamental de la variabilidad del consumo de energía eléctrica en la sección de molienda es la inestabilidad en el flujo de mineral de los molinos, obtiene un modelo estadístico que permite predecir el comportamiento del consumo específico de energía en función de la productividad diaria. Laborde et al (2003), investiga en el sistema aerodinámico del proceso de molienda la influencia que tiene el flujo de aire sobre la productividad y consumo específico de energía en las unidades de molienda, demostrando que no influye significativamente sobre la productividad pero sí sobre el consumo específico de energía, a medida que disminuye el flujo de aire, disminuye el consumo de energía en el ventilador de recirculación.

En estos últimos trabajos se ha revelado la inestabilidad del consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara” (figura A.5), lo que ha motivado investigaciones con el objetivo de normar el consumo de energía en las condiciones concretas de explotación del mineral laterítico cubano.

Laborde et al (2002), realizan un análisis sobre el establecimiento de una metodología particular para el establecimiento de las normas de consumo del proceso de molienda en condiciones de una instalación a nivel de laboratorio y a escala industrial. La metodología expuesta se basa en la aplicación de métodos estadísticos y en la modelación y simulación matricial, incluye la descripción de un método apropiado para la caracterización energética de una unidad de molienda por vía experimental. Los resultados obtenidos en su aplicación evidencian su efectividad y sus ventajas sobre los métodos teóricos y la identifican como una vía científicamente fundamentada para minimizar los consumos de energía en un proceso concreto de molienda de laterita.

### **1.9. Conclusiones del capítulo I**

- ✓ El consumo de energía eléctrica de los molinos de bolas y ventiladores centrífugos se determina aplicando diferentes métodos. Para el caso de la molienda del mineral

laterítico, no se establece un método particular que integre las diferentes variables del proceso

- ✓ En los trabajos investigativos, en particular en la molienda de la laterita con composición sustancial variable, no se han desarrollado los métodos para la normación del consumo específico de energía eléctrica que convine el método de Bond y el método de las características energéticas.

## **CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS**

### **2.1. Introducción**

La adecuada selección de los métodos y materiales 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, determinar las velocidades de los alimentadores de discos y transportadores, selección de los instrumentos de mediciones así como para el tratamiento de los resultados. El objetivo principal del presente capítulo consiste en exponer las principales técnicas y procedimientos utilizados durante el trabajo experimental

Aspecto importante constituye establecer el orden de las acciones que se deben ejecutar para desarrollar la investigación, las mismas se relacionan en el siguiente epígrafe.

### **2.2. Planificación de la investigación**

El presente trabajo ha sido desarrollado a escala industrial para lo cual se planificaron las acciones en el siguiente orden:

La recolección de datos e información detallada sobre la planta de preparación de minerales y en particular sobre la sección de molienda. Esta información incluye el conocimiento sobre el flujo tecnológico, estadística sobre los regímenes de operación de las unidades de molienda, estadística sobre las características del mineral que se procesa incluyendo su composición granulométrica y química (información correspondiente a 17 meses).

Recopilación de la información sobre la productividad de la sección de molienda en cada turno de trabajo.

El estudio sobre el comportamiento electroenergético de la planta de preparación de minerales y en particular de la sección de molienda, incluye el registro del consumo de energía durante 17 meses, para los regímenes de operaciones normales de producción y durante el trabajo en ausencia de flujo de mineral.

El estudio experimental consistente en toma de muestras de mineral en la alimentación de todos los molinos en condiciones normales de operaciones y regulando la descarga de las tolvas a los alimentadores (flujo de mineral) en un amplio diapason que abarcará desde la mínima hasta la máxima alimentación permisible para los molinos.

Determinación experimental de: carga en bolas de los molinos, velocidad de los alimentadores de discos y transportadores de correa que alimentan al molino, así como el flujo de mineral fresco a cada molino.

El programa de investigación en la industria ha sido concebido para determinar cuáles son los regímenes de trabajo más racionales de las unidades de molienda y para permitir elaborar determinados procedimientos o normas de explotación que garanticen el trabajo permanente y eficiente dentro del rango de estos regímenes.

### **2.3. Descripción del proceso tecnológico de la sección de molienda**

El mineral después de secado, es descargado en las correas (215 - TR - 11 y 11 A), pasando por un clasificador que debe dejar pasar hacia el proceso la clase (- 10 mm). Estas correas son denominadas comúnmente correas calientes debido a que son las primeras que hacen contacto con el mineral caliente que sale de los secaderos. La capacidad es de 136,111 kg/s . En estas correas se encuentran instaladas las romanas encargadas del pesaje del mineral seco.

El mineral secado se descarga en las correas (215 - TR - 12 y 12 A) que son la vía de unión entre los secaderos y los molinos. En estos transportadores se encuentran intercaladas cribas vibratorias encargadas de desviar las partículas gruesas hacia las tolvas de reproceso y las más finas hacia las tolvas del proceso. Estas correas transportadoras poseen una capacidad de 136,111 kg/s cada una y descargan su contenido en 4 tolvas, una para cada molino, (215 - TV - 201 a 204) mediante desviadores de mineral colocados sobre las correas y justamente sobre las mencionadas tolvas.

Sobre éstas correas se encuentra montado un sistema de adición de petróleo en forma de ducha que se mezclará con el mineral de forma dosificada mediante un sistema automático que regulará la relación petróleo - mineral instalada en la misma área, siendo utilizado como agente reductor en la Planta de Horno de Reducción. Desde cada tolva el mineral llegará a los molinos en forma dosificada y este trabajo corresponde realizarlo a los alimentadores de disco (215 - AL - 201 A y B a 204 A y B) que poseen cada tolva, pueden entregar de 15,277 a 33,333 kg/s a las correas (215 - TR - 13 - 1 a 13 - 4), las que descargan el mineral en los molinos de bolas (215 - ML - 201 a 204), la capacidad de dichas correas es de 44,44 kg/s . De esta forma el mineral llega a los molinos de bolas cuya capacidad es de 33,333 kg/s y tienen como dimensiones 5700 mm de longitud y 3200 mm de diámetro.

Estos molinos son de forma cilíndrica y para el proceso de molienda fina poseen una carga de bolas cuyo peso es de 54000 kg , las dimensiones de las bolas se describen en la tabla 2.1 .

Tabla 2.1 Dimensiones y cantidad de bolas en el interior de los molinos (Manual de operaciones de la planta de Preparación de Minerales, 2003)

Dimensiones, (mm)	Cantidad, (%)	Peso, (t)	Peso, (kg)
100	10	5.5	5500
70	10	5.5	5500
60	15	8.0	8000
40	25	3.5	13500
32	40	21.5	21500
Total	100	54	54000

El producto que el molino debe entregar tendrá una humedad de 4,5 a 5,5 % y una granulometría de - 0,074 mm (entre 85 y 87 %)

Todo el mineral que entra a los molinos saldrá mediante barrido con aire, que es producido por los ventiladores de recirculación (215 - VE - 205 a 208), de 37,222 m<sup>3</sup>/s de capacidad cada uno, situados a la descarga de los molinos y cerrando un circuito que está formado por los molinos, los separadores (215 - SE - 201 a 204), 4 ciclones (215 - N - 201 a 104 A, B, C) y 2 baterías de 6 ciclones (215 - CN - 205 a 210 A, B, C, D, E, F).

El mineral extraído es introducido en un separador neumático de diámetro 4250 mm donde sufre una clasificación de forma que, el que tenga características de producto final pasará al sistema de colección primaria (a los ciclones) y el que no, pasará al molino (constituyendo el rechazo) para su ulterior tratamiento hasta que alcance la granulometría adecuada. Este trabajo se realiza regulando la válvula situada en el sistema aerodinámico.

El sistema de colección primaria formado por ciclones, se encarga de recoger el polvo producido y lo descarga en las tolvas de producto final (215 - TV-205 A y B). El mineral con granulometría - 0,044 mm pasará por un sistema de limpieza de gases electrostáticos donde se captura dicho mineral.

El polvo recogido es enviado hacia las tolvas de producto final mediante el empleo de bombas en vacío (215 - BO - 201 A, B, C, D, E, F) de 13,888 kg/s de capacidad, todo el mineral

molido es transportado hacia los silos del taller de hornos de reducción mediante el empleo de bombas neumáticas (215 - BO - 107 a 112) colocadas en la descarga de las tolvas.

#### **2.4. Características del equipamiento de la sección de molienda**

A continuación se exponen las características técnicas de los equipos principales que componen una unidad de molienda, de acuerdo al esquema tecnológico.

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  $U = 480 \text{ V}$  ;  $P = 4 \text{ kW}$  ;

$f = 60 \text{ Hz}$

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  $U = 480 \text{ V}$  ;  $P = 15 \text{ kW}$  ;  $f = 60 \text{ Hz}$  ;

Velocidad nominal del motor: 1800 rpm

3. Molino de bolas.

Tipo: cilíndrico, 3200 x 5700

Capacidad: 33,333 kg/s

Carga de bolas: 54000 kg

Diámetro: 3200 mm; Largo: 5700 mm

Velocidad de rotación: 17,36 rpm

Velocidad relativa ( $\Psi$ ): 73,4 %

Accionamiento: motor sincrónico trifásico con  $U = 10 \text{ kV}$  ;  $P = 800 \text{ kW}$  ;  $f = 60 \text{ Hz}$  ;

Velocidad nominal del motor: 720 rpm

## 4. Ventilador de recirculación.

Tipo: centrífugo

Capacidad: 3,722 m<sup>3</sup>/s

Altura de presión: 2840 kgf/m<sup>2</sup>

Accionamiento: motor asincrónico trifásico con U = 6 kV ; P = 400 kW ; f = 60 Hz ;

Velocidad nominal del motor: 1180 rpm

### 2.5. Características generales del mineral

La constitución del mineral laterítico se compone de una mezcla de limonita (de carácter terroso) y de serpentinas parcialmente descompuestas y duras.

La limonita aparece como tierra suelta o en terrones de color amarillo, por su parte el material serpentínico presenta toda la gama desde mineral terroso hasta fracciones de rocas duras de diversos tamaños. Este mineral está acompañado de una humedad promedio de 38 % , variando desde 30 a 40 % . El peso volumétrico del mineral seco “in situ” es de 1,20 t/m<sup>3</sup> y el del mineral húmedo “in situ” es de 1,78 t/m<sup>3</sup> . La dureza del mineral laterítico es otra de sus características, la misma varía, a escala de Mohs, entre los rangos de 2 a 5, no es abrasivo, ni químicamente activo.

### Composición mineralógica

Tabla 2.3 Composición mineralógica de la serpentina (Laborde, 2004)

Nº	Nombre	Fórmula	Contenido, (%)
1	Clorita	Mg <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> [(Si,Al) <sub>3</sub> ·(SiO <sub>10</sub> )](OH)	5
2	Galvasita	Al <sub>4</sub> (SiO <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>	3
3	Nontronita	Fe <sub>2</sub> (Fe,Al) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	10
4	Antigorita	Mg <sub>6</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>	61
5	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	3
6	Goethita	FeOOH·nH <sub>2</sub> O	18

Tabla 2.2 Composición mineralógica de la limonita (Laborde, 2004)

Nº	Nombre	Fórmula	Contenido, (%)
1	Goethita	FeOOH·nH <sub>2</sub> O	67
2	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7
3	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5
4	Espinelas	(Mg,Fe)(Cr,Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	10
5	Asbolanas	MnO <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	1
6	Gibbsita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	7
7	Aluminocromita	Fe(Cr,Al) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2
8	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	1

### Composición granulométrica

Las menas lateríticas níquelíferas se caracterizan por la composición granular en la que prevalecen las partículas de granos finos inferiores a 0,074 mm . El contenido de estas partículas constituye entre el 70 y 90 % de la composición general de las rocas.

Tabla 2.3 Composición granulométrica del mineral que se alimenta a molienda (Ledesma, 2008)

N	Tamaño, (mm)	Contenido, (%)	Salida sumaria, (+)	Salida sumaria, (-)
1	40.00	6.49	6.49	100.00
2	-15.00	0.95	7.43	93.51
3	-5.00	2.65	10.08	92.57
4	-2.00	2.78	12.86	89.92
5	-8.00	3.02	15.88	87.14
6	-2.00	2.24	18.12	84.12
7	-3.00	3.58	21.70	81.88
8	-5 + 3.15	11.02	32.71	78.30
9	-3.15 + 2	2.54	35.26	67.29
10	- 2 + 1.6	8.39	43.65	64.74
11	- 1.6 + 1.0	8.03	51.69	56.35
12	-1.0	48.32	100.00	48.32

### **Características del mineral secado**

Humedad: 4,5 %

Peso volumétrico: 1,1 a 1,3 t/m<sup>3</sup>

Contenido de elementos metálicos principales.

Ni: 1,32 %

Fe: 38,5 %

Co: 0,105 %

En las tablas A.5 ; A.6 se muestran las características del mineral que se procesó en la sección de molienda en el periodo de un mes (31 días)

### **2.6. Instrumentos utilizados en el desarrollo experimental a escala industrial**

Para el registro de las principales magnitudes eléctricas que caracterizan el trabajo de la sección de molienda, se emplearon diferentes equipos, las principales características se detallan a continuación.

1. Contador de energía activa trifásico.

Tipo: CA 3Y-670T

Principio de funcionamiento: Inducción

Constante del contador: 1 kW es el equivalente a 1750 vueltas del disco

Frecuencia de trabajo: 60 Hz

Tensión por fase (3 fases): 100 V

Corriente: 5 A

Fabricado: en la URSS

2. Analizador de redes

Serie: PQM-A y Serie PPQM-1000

Display de LCD

Teclado de membrana, tiene cuatro teclas para control y programación.

Posibilidad de comunicación: RS - 232 y RS - 435

Alimentación: monofásicas, 110 a 230 V CA

Tensión de tolerancia: - 15 % a 10 %

Frecuencia de trabajo: 50 a 60 HZ

Corriente de directa: 24 a 110 V

Consumo: 3 a 6 VA

Clase de precisión: Tensión: 0,5 % de la lectura

Corriente: 0,5 % de la lectura

Permite la visualización de 30 parámetros eléctricos: tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, frecuencia, factor de potencia, etc.

Fabricado: en Canadá

### 3. Relees SR - 469

Serie: 30D200A4.000

Alimentación: monofásica 230 a 400 V CA

Corriente directa: 24 a 220 V

Consumo: 3 a 6 VA

Posibilidad de comunicación: RS - 232 y RS - 485

Posee 4 salidas de transductores de 4 a 20 mA que pueden ser asignadas a cualquier parámetro medido

Permite la visualización de 30 parámetros eléctricos, ejemplos: tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, frecuencia, factor de potencia, velocidad en rpm

Fabricado: en Canadá

### 4. Balanza de laboratorio

Denominación: Balanza Romana

Rango de medición: 0 a 100 kg

Error: 0,058 kg

### 5. Reloj cronómetro

Denominación: Cronómetro digital

Rango de medición: 0 a 100 horas

Exactitud: Resolución = 0,01 s

## **2.7. Técnica experimental para el trabajo a escala industrial**

A continuación se exponen las técnicas experimentales empleadas durante el desarrollo del trabajo.

Se incluyó la toma de muestras de mineral en los transportadores de correa que alimentan a sus respectivos molinos de bolas (figura A.2) y registros de las principales magnitudes eléctricas de los accionamientos principales de la sección de molienda.

Para realizar los experimentos planteados en el epígrafe 2.1 , se realizaron los cálculos correspondientes para determinar la velocidad de rotación y traslación de los alimentadores de discos y transportadores de correa respectivamente, aunque fueron determinados en trabajos precedentes (Laborde 2004), es necesario debido a cambios en los accionamientos.

### **Determinación de la velocidad de rotación de los alimentadores de disco**

Los alimentadores de disco son los encargados de suministrar el mineral fresco a los transportadores de correa, proveniente de las tolvas primarias situadas a la entrada de la sección de molienda. Para determinar la velocidad de rotación de los alimentadores de discos se tomó como referencia un punto en el disco y se cronometró el tiempo en que el alimentador completa una vuelta (en segundos). Se realizaron 5 réplicas.

### **Determinación de la velocidad de los transportadores de correa**

Los transportadores de correa son los encargados de trasladar el mineral fresco desde los alimentadores de disco y descargarlo en los molinos de bolas. Para determinar la velocidad de traslación de los transportadores de correa se midió la distancia (en metros) desde la descarga de los alimentadores de disco hasta la descarga a los molinos, se tomó un punto de referencia perfectamente visible en la cinta transportadora (el empaste de la misma) y se cronometró el tiempo que demoró en recorrer dicha distancia (en segundos). Se realizaron 5 réplicas.

Se determinó que los alimentadores de discos y transportadores de correa mantienen la velocidad constante.

Para determinar el flujo de mineral hacia los molinos se realizó un muestreo en el transportador de correa correspondiente a cada molino de bolas (figura A.2).

## **2.8. Determinación de la carga en bolas de los molinos**

Se determina la carga real en bolas que tiene cada molino lo que permite determinar la productividad que pueden alcanzar. El experimento consiste en detener el flujo de alimentación manteniendo al molino en operación no menos de 30 minutos hasta cerciorarse que todo el mineral ha sido extraído del interior por medio del ventilador de recirculación, a la vez que se mide la potencia del molino y ventilador. Aplicando el modelo matemático obtenido por Coello y Laborde (2004), planteando en el gráfico la demanda de energía, se determina la carga en bolas.

## **2.9. Determinación de la alimentación de mineral fresco a los molinos de bolas.**

### **Obtención del modelo**

Experimentalmente se determinó la alimentación de mineral fresco a cada uno de los molinos de bolas. Los experimentos se realizaron en dos etapas: una para conocer el flujo de mineral que estaban recibiendo los molinos sin manipular la regulación de la alimentación y la otra consistió en regular la descarga en las tolvas para determinar el flujo de mineral máximo permisible que se puede alimentar a los molinos.

Para determinar la alimentación fresca de mineral se realizaron cinco tomas de muestras en cada transportador de correa con un intervalo de 15 minutos, para evitar los regímenes transitorios de la unidad de molienda. Se cumplió el siguiente procedimiento: quitar las guarderas del transportador, detener alimentadores y transportador, medir la longitud de 1 m en el transportador, es la distancia aproximada que recorre la cinta transportadora en un segundo, recolectar del transportador todo el mineral que se encuentra en ese espacio. Esta operación demoró como promedio 2 minutos, así se realizó en el transportador de cada uno de los molinos.

### **Determinación del flujo de mineral fresco a los molinos regulando la descarga en las tolvas**

Para variar el flujo de mineral fresco en los molinos se siguió el mismo procedimiento descrito en el epígrafe 2.8 pero regulando la descarga de las tolvas hacia los alimentadores, para ello se realizaron cinco corridas con cinco réplicas cada una a intervalos de 15 minutos. Según experiencias de los operarios, se determinaron 5 posiciones de descarga de las tolvas

más convenientes para realizar el muestreo, desde la posición de mínima alimentación hasta la máxima sin llegar al rebosamiento de los molinos.

Los resultados se muestran en los epígrafes 3.2 y 3.3

Luego de obtener las muestras de mineral para cada molino, fueron pesadas en el laboratorio químico central, (en el epígrafe 2.6 se especifican las características de la balanza).

Se determinó el flujo de alimentación en cada caso conociendo la velocidad de la banda de alimentación para cada transportador (m/s) y el peso de la muestra (kg), según la ecuación 2.1

$$Q = k \cdot P_m \quad (2.1)$$

Donde:

$Q$ : Flujo de alimentación del mineral, (t/h)

$k$ : Factor que tiene en cuenta la conversión de kg a tonelada y de segundo a hora (3,6)

$P_m$ : Peso de la muestra, (kg)

### 2.10. Medición y registros de las principales magnitudes eléctricas

Durante el estudio del comportamiento energético de la planta de preparación de minerales y en particular de la sección de molienda, se registraron las principales magnitudes eléctricas de los accionamientos, para ello se emplearon los registradores de energía que se encuentran instalados en los paneles de control de la planta, los relees RS - 469, los cuales se encuentran conectados en red al sistema SCADA Citect, y los analizadores de redes programables modelos PPQM - 1000 y PQM - A (en el epígrafe 2.6 se especifican las características y en la figura A.3 se muestra una foto de ellos.

Se instalaron los analizadores de redes en los circuitos de control (a través de los transformadores de potencial y de corriente) de los molinos y de los ventiladores de recirculación (paneles de 10 y 6 kV respectivamente que se encuentran en una de las subestaciones de la empresa). De esta forma se registraron las principales magnitudes eléctricas antes de los ensayos de cada régimen de trabajo, durante los ensayos y después de los ensayos (con registros generalmente cada 1 min.). Las principales magnitudes registradas fueron: corrientes y tensiones de líneas, potencia activa trifásica, potencia reactiva trifásica, potencia aparente trifásica, factor de potencia y frecuencia, ver anexos. Como magnitud de

mayor interés se tomó la potencia activa trifásica. Se estudió también de forma independiente el comportamiento energético de cada una de las unidades de molienda durante el trabajo en ausencia de mineral durante 30 minutos. El instrumento registró la potencia a intervalos de 1 minuto). De forma complementaria se realizó el registro de las magnitudes eléctricas para el resto del equipamiento auxiliar de la sección de molienda.

Para determinar el consumo específico de energía del proceso de molienda del mineral laterítico, fueron empleados los métodos descritos en los epígrafes siguientes.

### **2.11. Procedimientos para determinar el consumo específico de energía del proceso de molienda aplicando diferentes métodos**

Se aplicaron varios métodos con el objetivo de analizar el comportamiento del consumo de energía para cada caso. A continuación se exponen los métodos que más se aplican en la práctica

#### **Determinación del consumo específico de energía eléctrica aplicando el método estadístico**

Para el análisis estadístico sobre el consumo específico de energía en la sección de molienda se tuvo en cuenta el consumo de energía de los molinos y los ventiladores de recirculación de cada unidad. Se determinó la media aritmética del consumo de cada equipo (molino y ventilador), según la ecuación 2.2 ; luego se divide este resultado entre la producción de la sección obteniendo el consumo específico de energía eléctrica de los molinos ( $W_m$ ), ventiladores ( $W_v$ ) y unidad ( $W_u$ ). Los resultados se muestran en el epígrafe 3.5

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.2)$$

Donde:

$P$  : Potencia, (  $kW$  )

$n$  : Tamaño de la muestra, (  $u$  )

$P_i$  : Valores observados, (  $kW$  )

### **Determinación del consumo específico de energía eléctrica aplicando los modelos con los cuales se obtuvo la productividad de cada molino**

El procedimiento descrito en el epígrafe 2.8, permite desarrollar los experimentos necesarios para determinar el flujo de alimentación a las unidades de molienda.

En un periodo de 13 días, se realizaron las mediciones en la regulación de la descarga de las tolvas, lo que permitió calcular (estimar) el flujo de mineral hacia los molinos de bolas, se registró el tiempo de trabajo diario de los molinos y ventiladores, se determinó la demanda de potencia al aplicar la ecuación 2.2 , conociendo estos datos se determinó el consumo específico de energía eléctrica de los molinos ( $W_m$ ), ventiladores ( $W_v$ ) y unidad ( $W_u$ ) para la sección de molienda.

### **Determinación del consumo específico de energía eléctrica aplicando método de las ecuaciones empíricas**

Se determinó la potencia útil ( $N$ ) de los molinos aplicando las ecuaciones 2.4 , 2.5 y con la ecuación 2.3 el consumo de energía de la red ( $N_{red}$ ). Las ecuaciones 2.6 y 2.7 expresan directamente la potencia de la red. Para obtener el consumo específico de energía eléctrica se dividen los resultados obtenidos (kW) entre la productividad (t/h).

- Según Andreiev et al (1987), la ecuación 2.3 relaciona la demanda de potencia de la red con la potencia útil a través del rendimiento del reductor y el motor eléctrico

$$N_{red} = \frac{N \cdot k}{\eta_{reductor} \cdot \eta_{motor}} \quad (2.3)$$

Donde:

$N_{red}$  : Potencia de la red, (kW)

$N$  : Potencia útil del molino, (kW)

$\eta_{reductor}$  : Rendimiento del reductor, (%)

$\eta_{motor}$  : Rendimiento del motor, (%)

$k=1,025$ : Representa la potencia gastada en las transmisiones, (2,5 %)

- Según Andreiev et al (1987), si el molino trabaja en régimen de cascada, la potencia necesaria para accionar el molino se determina por la ecuación 2.4

$$N = k \cdot D^{2,5} \cdot L \quad (2.4)$$

Donde:

$$k = \frac{4,6\pi}{4}$$

$N$  : Potencia útil, ( $kW$ )

$k$  : Coeficiente, (3,61)

$D$  : Diámetro interior del molino, ( $m$ )

$L$  : Longitud interior del molino, ( $m$ )

- Según Dominion Engineering, (Dimensionado de molinos, 2003), la potencia se determina por la ecuación 2.5

$$P = k \cdot L \cdot D^{2,18} \quad (2.5)$$

Donde:

$P$  : Potencia útil, ( $HP$ )

$L$  : Largo del molino, ( $pies$ )

$D$  : Diámetro interno del molino, ( $pies$ )

$k$  : Coeficiente propuesto por Engineering, (0,33)

El resultado se obtiene en HP, para expresarlo en kW se multiplica por 0,746

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

$$P = k \cdot P_c \cdot \sqrt{D} \quad (2.6)$$

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

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

Tabla 2.4 Relación entre el coeficiente  $k$  y el grado de llenado en bolas (Dimensionado de molinos, 2003)

$\varphi$ , (%)	10	20	30	40	50
$k$	11.9	11	9.9	8.5	7.0

➤ Tercera ley de Bond

Bond expone los tres principios básicos de su teoría mediante la ecuación 2.7, según Andreiev et al, 1987

$$P = k \cdot 10 \cdot W_i \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \cdot t \quad (2.7)$$

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, ( $\mu m$ )

$F_{80}$  : Tamaño correspondiente al 80 % de la alimentación fresca, ( $\mu m$ )

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

### Procedimiento para determinar el consumo específico de energía eléctrica de los ventiladores

La sección de molienda cuenta con cuatro unidades de molienda y cada una de ellas con un ventilador de recirculación. Debido a que son similares, se realizaron los cálculos referido a un ventilador.

Se determinó la potencia útil del ventilador teniendo en cuenta los parámetros aerodinámicos de la instalación y la relación entre la potencia útil y la potencia demandada del sistema eléctrico teniendo en cuenta el rendimiento de las transmisiones, las mismas se describen a continuación.

Fueron medidos en tiempo real el gasto del ventilador, la presión en el sistema aerodinámico y la densidad del fluido para diferentes posiciones en la abertura de la válvula que regula el flujo de aire en el sistema: 30, 50 y 70 % , como datos aportados por los fabricantes, el rendimiento del ventilador y motor. La potencia se determinó aplicando la ecuación 2.8 (Ramos, 1995)

$$N_v = \frac{P_t \cdot Q_v}{\eta_v \cdot \eta_t \cdot 1000} \quad (2.8)$$

Donde

$N_v$ : Potencia, ( $kW$ )

$P_t$ : Presión, ( $Pa$ )

$Q_v$ : Gasto volumétrico, ( $m^3 / s$ )

$\eta_v$ : Rendimiento del ventilador, (%)

$\eta_t$ : Rendimiento de la transmisión, (%)

Se tuvieron en cuenta cuatro ecuaciones para el molino y una para el ventilador, se calcula el consumo específico de forma individual para el molino y el ventilador, en cada caso se combinan para estimar el consumo específico de la unidad. Los resultados se muestran en las tablas 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 .

### Determinación del consumo específico de energía eléctrica aplicando el método de las características energéticas

Para determinar el consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda, se determinaron previamente en los molinos de bolas y los ventiladores de recirculación de cada una de las unidades. Se obtiene al dividir la energía consumida por los molinos y ventiladores entre la producción de las unidades de molienda en un periodo de tiempo dado, se construyen los gráficos con los datos del consumo específico del molino ( $We_m$ ), ventilador ( $We_v$ ), unidad ( $We_u$ ) y la productividad de las unidades. Las curvas obtenidas caracterizan el comportamiento energético de los molinos, ventiladores y unidades de molienda.

### Determinación del consumo específico de energía eléctrica aplicando el método de Bond

Según se detalla en el epígrafe 1.6 , aplicando la ecuación 1.23 se determina el índice de trabajo ( $Wi$ ) para los molinos a nivel de laboratorio, la ecuación 1.24 se determina el índice de operación ( $Wop$ ) para los molinos industriales y la potencia demandada por los molinos a escala industrial ( $P$ ) a través de la ecuación 2.7 del epígrafe 2.11. El cociente de la demanda de energía (kW) y la productividad (t/h) o del consumo de energía (kWh) y la producción (t) expresan el consumo específico de energía eléctrica (kWh/t).

Según Andreiev (1987), Bond propone el intervalo de confianza de  $\pm 20\%$  para el índice de operación ( $Wop$ ). Para determinar el intervalo de confianza para el consumo específico de energía eléctrica observado ( $We$ ), se calcula la desviación estándar en Matlab, luego se aplican las ecuaciones 2.9 y 2.10

$$\delta = \frac{1.96 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.9)$$

$$\bar{x} - \delta < \mu < \bar{x} + \delta \quad (2.10)$$

Donde:

$\delta$  : Error

$\sigma$  : Desviación estándar

$\bar{x}$  : Media de la muestra

$\mu$  : Media de la población

### **2.12. Procedimiento para determinar el consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando el método combinado (características energéticas- método de Bond)**

Según los resultados observados, el ventilador de recirculación es el que menor variación presenta en el consumo de energía, por tal motivo se selecciona la característica energética de éste para combinarla con el método de Bond. En la curva del ventilador se hace corresponder la productividad promedio (t/h) con el consumo específico ( $We_v$ ), dicho valor se suma con el valor del índice de operación de los molinos ( $W_{op}$ ) determinado por el método de Bond, obteniendo como resultado el consumo específico de energía eléctrica ( $We_{secc}$ ) que puede alcanzar la sección de molienda.

### **2.13. Conclusiones del Capítulo II**

- ✓ El diseño de la investigación, garantiza adecuadamente el tratamiento del problema planteado.
- ✓ Los equipos y medios de mediciones en buen estado técnico y debidamente certificados permitieron garantizar la calidad y veracidad de los resultados.
- ✓ El análisis de los métodos clásicos para determinar el consumo de energía en la molienda de minerales contribuyó al planteamiento de una metodología para la normación del consumo específico de energía eléctrica en la molienda de los minerales lateríticos.

## CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

### 3.1. Introducción

La normación del consumo de energía eléctrica, a nivel de mecanismos, procesos, talleres y plantas juega un papel fundamental en el empeño de alcanzar una mayor eficiencia energética. Normar, en este sentido, significa el establecimiento de un consumo de energía en forma racional, planificado, con un basamento técnico - económico para una producción singular con una calidad establecida. El proceso de molienda del mineral laterítico es un proceso complejo que exhibe sus particularidades con respecto a la molienda de otros tipos de minerales, y en el cual 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.

El objetivo principal del presente capítulo consiste en determinar un procedimiento para normar el consumo específico de energía eléctrica en la molienda del mineral laterítico y la reserva del portador electricidad en la sección de molienda.

### 3.2. Determinación de la carga en bolas de los molinos. Influencia en el comportamiento energético de la sección de molienda

Aplicando el modelo obtenido por Coello et al (2004), y el procedimiento descrito en el epígrafe 2.8 se determinó la carga en bolas que tienen actualmente los molinos de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”. Según la ecuación 3.1 y figura 3.1, se observa que la potencia del molino crece con el incremento de la carga en bolas, con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,9748$

$$P = 0,2286 \cdot \varphi^2 + 29,806 \cdot \varphi - 187,69 \quad (3.1)$$

Donde:

$P$  : Potencia, (kW)

$\varphi$  : Carga en bolas, (%)

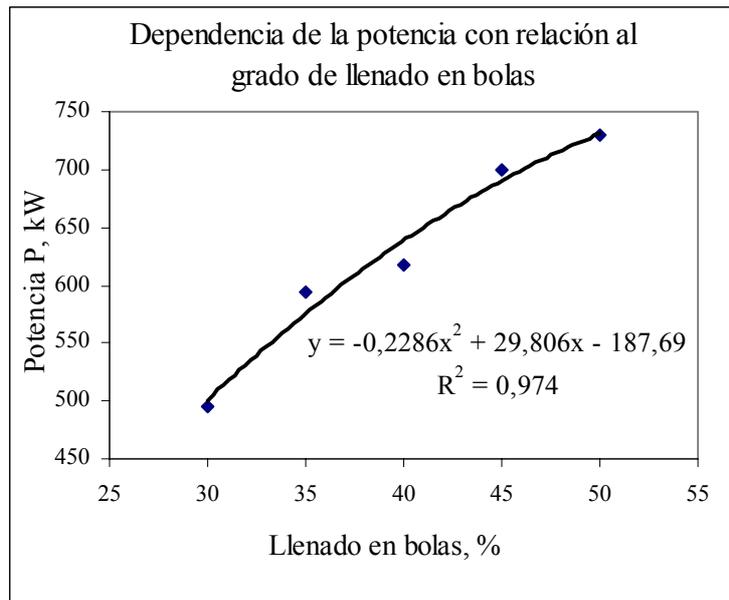


Figura 3.1 Relación del grado de llenado en bolas con la potencia demandada por el molino funcionando sin mineral

En el presente trabajo, partiendo del modelo que se presenta en 3.1, se determinó el grado de llenado en bolas conociendo la potencia de los molinos al trabajar sin mineral. En las figuras A.8, A.9, A.10 y A.11 se muestran los gráficos de potencia de molinos y ventiladores correspondientes a cada unidad de molienda. La relación entre la carga de bolas y la potencia demandada por los molinos queda expresada según la ecuación 3.2, caracterizada por el coeficiente de determinación  $R^2 = 0,9748$ .

$$\varphi = 0,0001 \cdot P^2 - 0,0856 \cdot P + 3863 \quad (3.2)$$

También se determinó la productividad de los molinos y el consumo específico de energía eléctrica. Los resultados se muestran en la tabla 3.1

Donde:

$P$ : Potencia media en vacío, (kW)

$\varphi$ : Grado de llenado con bolas, (%)

$Q$ : Productividad media experimentada, (t/h)

$We$ : Consumo específico de energía eléctrica, (kWh/t)

Tabla 3.1 Grado de llenado en bolas ( $\varphi$ ) en dependencia de la potencia de los molinos en vacío

Molinos	P, (kW)	$\varphi$ , (%)	Q, (t/h)	We, (kWh/t)
1	567	34.2	84.4	14.0
2	495	28.7	69.0	14.4
3	671	42.5	92.2	12.6
4	457	25.9	55.8	14.9

Se determinó que el molino 1, trabajando en vacío, tuvo una demanda de 567 kW , representando una carga en bolas del 28,7 % de la nominal, ese día alcanzó una productividad de 84,4 t/h y consumo específico de 14 kW .

El molino 2 demandó 495 kW , tiene un grado de llenado en bolas de 28,7 % , ese día alcanzó una productividad de 69 t/h y consumo específico de energía de 14,4 kWh/t

El molino 3 fue el que demandó mayor potencia promedio (671 kW), representando una carga de bolas en el interior del molino de 42,5 % , tuvo una productividad de 92,2 t/h y un consumo específico de energía inferior a los demás molinos, es decir, el molino 3 solo consumió 12,6 kW por cada tonelada de mineral que procesaría.

El molino 4 es el que menos potencia demandó (457 kW) por lo que se determina que es el que menos carga de bolas posee, grado de llenado solo del 25,9 % y el que menor productividad alcanzó ese día (55,8 t/h), consumió 14,9 kW por tonelada de mineral fresco procesado.

### 3.3. Determinación del flujo de mineral fresco a los molinos de bolas. Obtención del modelo

Se analiza la influencia que tiene el flujo de mineral en el comportamiento del consumo específico de energía en las unidades que conforman la sección de molienda para lo cual se determina la alimentación de mineral fresco a cada molino.

A continuación se muestran los resultados de los experimentos para determinar el flujo de alimentación a los molinos de bolas 1 y 3 sin regular los tornillos en los alimentadores de discos siguiendo los procedimientos descritos en el epígrafe 2.9 .

**Determinación del flujo de mineral fresco al molino 1 sin regular la alimentación**

En la tabla 3.2 se muestran los resultados de los experimentos realizados en el sistema de alimentación del molino de bolas 1. Se puede observar en ambos experimentos que el promedio del flujo de alimentación se mantuvo por encima de 90 t/h . En el experimento 1 el flujo de mineral promedio fue de 91,5 t/h y en el experimento 2 el promedio fue de 95,5 t/h , se determinó que el molino 1 funciona con una productividad próxima a esos valores .

Tabla 3.2 Muestras de mineral tomada en el transportador de correa que alimenta al molino 1

No	Hora		Peso de la muestra, (kg)		Flujo de mineral, (t/h)	
	Experimento		Experimento		Experimento	
	1	2	1	2	1	2
1	10:40	10:35	22.00	32.50	61.78	91.26
2	10:55	10:50	31.00	35.00	87.05	98.28
3	11:10	11:05	41.00	34.00	115.13	95.47
4	11:25	11:20	36.00	33.00	101.09	92.66
5	11:40	11:35	33.00	35.50	92.66	99.68
Promedio			32.60	34.00	91.54	95.47

**Determinación del flujo de mineral fresco al molino 3 sin regular la alimentación**

Tabla 3.3 Muestras de mineral tomadas en el transportador de correa que alimenta al molino 3

No	Hora		Peso de la muestra, (kg)		Flujo de mineral, (t/h)	
	Experimento		Experimento		Experimento	
	1	2	1	2	1	2
1	10:51	9:40	17	17.80	71.6	74.97
2	11:10	9:55	18	17.00	75.82	71.60
3	11:27	10:10	18	18.00	75.82	75.82
4	11:45	10:25	18	17.40	75.82	73.29
5	12:00	10:40	16	18.30	67.39	77.08
Promedio			17.4	17.7	73.29	74.55

En la tabla 3.3 se muestran los resultados de la toma de muestras en el transportador de correa que alimenta al molino de bolas 3.

Se observa que el flujo de mineral fresco en ambos experimentos se comporta por encima de las 73 t/h , por lo que se infiere que la regulación en la descarga de las tolvas hacia los alimentadores de discos se mantiene prácticamente invariable.

### **Regulación del flujo de mineral fresco en los molinos**

El trabajo experimental se realizó en las unidades de molienda 1 y 3, un primer experimento en una fecha determinada y luego se repite para verificar la veracidad de los resultados, por tal motivo se nombró experimento 1 y experimento 2. Los procedimientos se describen en el epígrafe 2.9 .

### **Obtención del modelo para determinar el flujo de mineral fresco en el molino 1**

El experimento 1 se realizó regulando la abertura en la descarga de las tolvas hacia el alimentador de disco 2 el cual posee una velocidad de 5,16 rpm . Los resultados se muestran en la tabla 3.4 .

Se determinó que las muestras tomadas en la posición mínima (8 cm) pesaron como promedio 19,33 kg , representa una producción estimada en 54,28 t/h . En la posición de máxima abertura (25,5 cm) las muestras pesaron como promedio 45,33 kg representando un estimado de 127,29 t/h . Como resultado se obtiene el modelo que se expresa a través del polinomio de segundo grado según la ecuación 3.3 . Se observa una fuerte relación entre la regulación de la descarga y el flujo de alimentación de mineral (nótese el coeficiente de determinación  $R^2 = 0,9702$  en la figura 3.2).

$$y = 0,0415x^2 + 2,4129x + 34,899 \quad (3.3)$$

El experimento 2 se realizó en el alimentador de disco 1 el cual posee una velocidad de 7,12 rpm . Se determinó que las muestras tomadas en la posición mínima (6 cm) pesaron como promedio 14,38 kg , representa una producción estimada en 40,38 t/h . En la posición de máxima abertura (18 cm) las muestras pesaron como promedio 35,2 kg representando un estimado de 98,84 t/h . Los resultados se muestran en la tabla 3.4 .

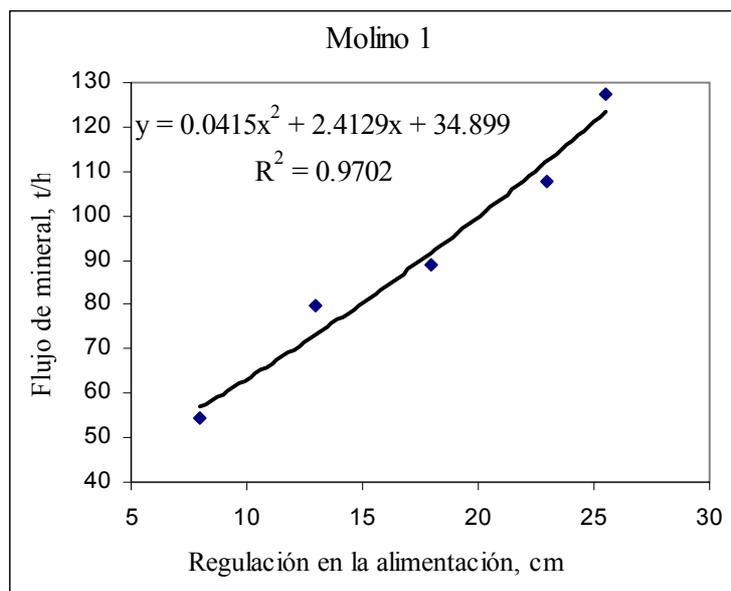


Figura 3.2 Determinación del flujo de alimentación de mineral regulando la descarga (experimento 1)

Tabla 3.4 Muestras de mineral tomadas en el transportador de correa que alimenta al molino 1 regulando el flujo de mineral

No	Regulación de la descarga, (cm)		Peso de la muestra, (kg)		Flujo de mineral, (t/h)	
	Experimento		Experimento		Experimento	
	1	2	1	2	1	2
1	8.0	6.0	19.33	14.38	54.28	40.38
2	13.0	12.0	28.33	24.40	79.55	68.52
3	18.0	18.0	31.66	35.20	88.9	98.84
4	23.0		38.33		107.63	
5	25.5		45.33		127.29	
Máximo	25.5	18.0	45.33	35.2	127.29	98.84
Mínimo	8.0	6.0	19.33	14.38	54.28	40.38

### Obtención del modelo para determinar el flujo de mineral fresco en el molino 3

El experimento 1 se realizó variando la descarga de la tolva hacia los dos alimentadores de disco a la vez, ambos poseen una velocidad de 7,12 rpm . Los resultados se muestran en la

tabla 3.5 . Se determinó que las muestras tomadas en la posición mínima (8 cm) pesaron como promedio 9,33 kg , que representa una producción estimada en 38,63 t/h . En la posición de máxima abertura (24 cm) las muestras pesaron como promedio 23 kg representando un estimado de 95,22 t/h . Como resultado se obtiene el modelo que se expresa a través del polinomio de segundo grado, según la ecuación 3.4 . Se observa una fuerte relación entre la regulación de la descarga y el flujo de alimentación de mineral (nótese el coeficiente de determinación  $R^2 = 0,9724$  en la figura 3.3).

$$y = -0,0375x^2 + 5,2015x - 4,19 \quad (3.4)$$

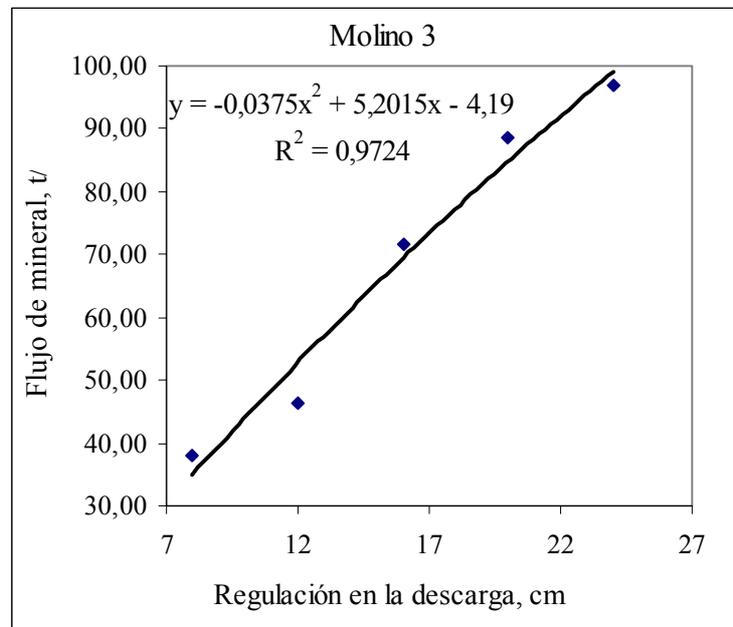


Figura 3.3 Determinación del flujo de alimentación de mineral en dependencia de la regulación en la descarga de las tolvas hacia los alimentadores (experimento 1)

El experimento 2 se realizó variando la descarga de la tolva hacia ambos alimentadores a la vez. Se determinó que las muestras tomadas en la posición mínima (8 cm) pesaron como promedio 10 kg , que representa una producción estimada en 40,57 t/h . En la posición de máxima abertura (24 cm) las muestras pesaron como promedio 22,40 kg representando un estimado de 92,74 t/h .

Las muestras tomadas en la posición mínima (8 cm) pesaron como promedio 10 kg , que representa una producción estimada en 40,57 t/h . En la posición de máxima abertura (24 cm) las muestras pesaron como promedio 22,40 kg representando un estimado de 92,74 t/h .

Tabla 3.5. Muestras de mineral tomadas en el transportador de correa que alimenta al molino 3, regulando el flujo de mineral fresco

No	Regulación de la descarga, (cm)		Peso de la muestra, (kg)		Flujo de mineral, (t/h)	
	Experimento		Experimento		Experimento	
	1	2	1	2	1	2
1	8.0	8.0	9.33	10.00	38.63	40.57
2	12.0	16.0	10.67	13.60	44.17	56.30
3	16.0	24.0	17.00	22.40	70.38	92.74
4	20.0		21.00		86.94	
5	24.0		23.00		95.22	
Máximo	24	24.0	23.00	22.40	95.22	92.74
Mínimo	8	8.0	9.33	10.00	38.63	40.57

### 3.4. Influencia del flujo de mineral fresco, flujo de aire y la relación serpentina – limonita sobre el consumo específico de energía en las unidades de molienda

#### Influencia de flujo de mineral en la unidad de molienda 1

Se realizaron mediciones de potencia demandada por el molino y ventilador de recirculación en el momento de los experimentos, permitiendo determinar el consumo específico de energía eléctrica de los molinos ( $Wem$ ), ventiladores ( $Wev$ ) y unidades ( $Weu$ ).

En la tabla 3.6 se muestran los resultados correspondientes para cada posición en la descarga de la tolva hacia los alimentadores y por consiguiente para cada nivel de flujo de mineral fresco al molino.

El consumo específico y la productividad queda relacionada por un polinomio de segundo grado, en la figura 3.4 se muestra la ecuación para la curva de la unidad, nótese la fuerte relación expresada por el valor de  $R^2 = 0,9996$  .

Tabla 3.6. Consumo específico de energía en unidad de molienda 1 durante la regulación de la alimentación fresca

No	Flujo de alimentación		Comportamiento de la energía			
	Muestras, (kg)	Productividad, (t/h)	Unidad de molienda, (kW)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	Weu, (kWh/t)
1	19.33	54.28	909.73	9.96	6.80	16.76
2	28.33	79.55	940.62	7.02	4.80	11.82
3	31.66	88.90	946.87	6.30	4.34	10.65
4	38.33	107.63	936.36	5.05	3.64	8.70
5	45.33	127.29	961.72	4.51	3.04	7.56
Promedio			939.06			
Máximo	45.33	127.29	961.72	9.96	6.8	16.76
Mínimo	19.33	54.28	909.73	4.51	3.04	7.56

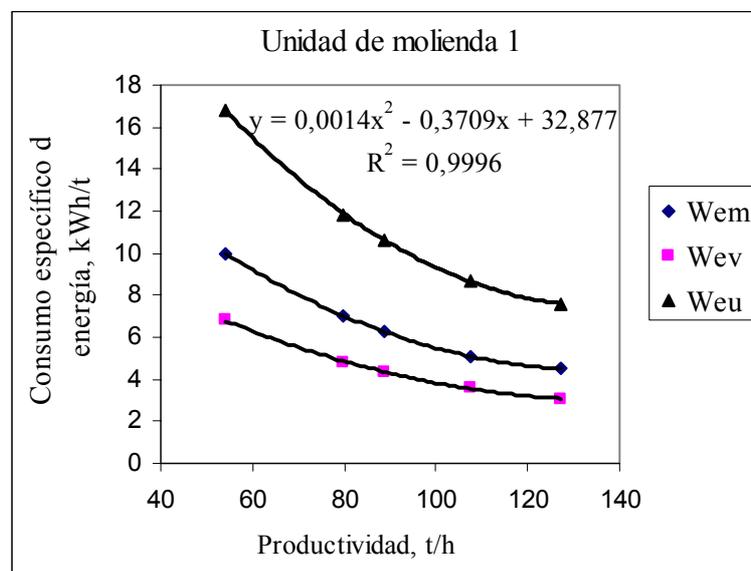


Figura 3.4 Comportamiento del consumo específico de energía en la unidad de molienda 1 durante la regulación del flujo de mineral fresco: Wem (molino), Wev (ventilador), Weu (unidad)

El consumo específico de energía decrece para el molino, ventilador y unidad, con el aumento de la productividad. Para una producción mínima de 54,28 t/h el consumo específico de

energía para el molino fue de 9,96 kWh/t , para el ventilador igual a 6,8 kWh/t y para la unidad de 16,76 kWh/t . Cuando el molino alcanza producción máxima de 127,29 t/h el consumo específico del molino es de 4,51 kWh/t , del ventilador igual a 3,04 kWh/t y la unidad 7,56 kWh/t .

### Influencia de flujo de mineral en la unidad de molienda 3

Se realizaron mediciones de potencia demandada por el molino y ventilador de recirculación en el momento de los experimentos, permitiendo determinar el consumo específico de energía de los molinos ( $Wem$ ), ventiladores ( $Wev$ ) y unidades ( $Weu$ ). En la tabla 3.7 se muestran los resultados correspondientes para cada posición en la descarga de la tolva hacia los alimentadores y por consiguiente para cada nivel de flujo de mineral fresco al molino.

Tabla 3.7. Comportamiento del consumo de energía en unidad de molienda 3 durante la regulación del flujo de mineral fresco

No	Flujo de alimentación		Comportamiento de la energía			
	Muestras, (kg)	Productividad, (t/h)	Unidad de molienda, (kW)	wem, (kWh/t)	wev, (kWh/t)	weu, (kWh/t)
1	9.0	37.91	1134.38	20.02	9.90	29.92
2	11.0	46.33	1122.60	15.71	8.52	24.23
3	17.0	71.60	1194.06	11.46	5.22	16.68
4	21.0	88.45	1120.50	8.20	4.47	12.67
5	23.0	96.88	1127.75	7.75	3.89	11.64
Promedio			1139.86			
Máximo	23.0	96.88	1194.06	20.02	9.90	29.92
Mínimo	9.0	37.91	1120.50	7.75	3.89	11.64

El consumo específico y la productividad queda relacionada por un polinomio de segundo grado, en la figura 3.5 se muestra la ecuación para la curva de la unidad, nótese la fuerte relación expresada por el valor de  $R^2 = 0,9996$  . El consumo específico de energía decrece para el molino, ventilador y unidad, con el aumento de la productividad. Para una producción

mínima de 37,91 t/h el consumo específico de energía para el molino fue de 20,02 kWh/t , para el ventilador igual a 9,90 kWh/t y para la unidad de 29,92 kWh/t . Cuando el molino alcanza una producción máxima de 96,88 t/h el consumo específico de energía del molino es de 7,75 kWh/t , del ventilador igual a 3,89 kWh/t y la unidad consume 11,64 kWh/t .

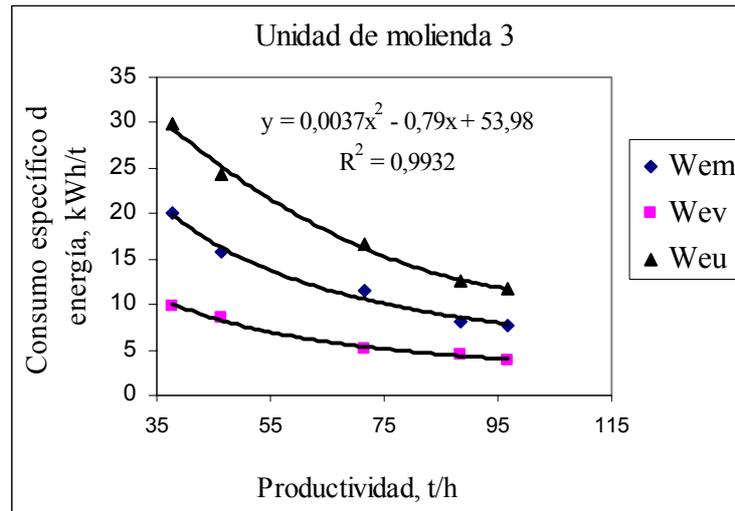


Figura 3.5 Consumo específico de energía en la unidad de molienda 3 regulando el flujo de mineral fresco: Wem (molino), Wev (ventilador), Weu (unidad)

### Influencia de la relación serpentina - limonita

Como se explica en el epígrafe 1.3 y se demuestra por las expresiones 1.10 y 1.11, con el incremento de la serpentina en el mineral se aprecia una tendencia decreciente de la productividad del molino y el consumo específico de energía mantiene una tendencia lineal y creciente.

El contenido de serpentina en el mineral laterítico debe ser por norma igual a 25 % , (Laborde (2004) ; Manual de operaciones de la planta de Preparación de Minerales (2003)). En las condiciones actuales, según Laborde y Ledesma (2008), el contenido de serpentina es de 25,2 % , por lo que no existe una diferencia notable entre la norma y la realidad, es decir se cumple la relación Limonita -serpentina de 3 a 1. Al sustituir los valores de  $C_S$  en las ecuaciones 1.10 y 1.11, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 3.8

Según los resultados, teniendo en cuenta el contenido de serpentina actual en el mineral, la sección de molienda puede alcanzar una productividad de 117,25 t/h y los molinos consumo específico de energía promedio de 7 kWh/t .

Tabla 3.8 Productividad y consumo específico de energía según el contenido de serpentina

Cs, (%)	Q, (%)	Q, (t)	We, (kWh/t)
25.20	97.71	117.25	7.01

Donde:

C<sub>s</sub>: Contenido de serpentina en el mineral, (%)

Q: Productividad, (%) respecto a la nominal, (t/h)

We: Consumo específico de energía eléctrica, (kWh/t)

### Influencia del flujo de aire

En el epígrafe 1.5 se describe como influye el flujo de aire sobre el consumo de energía en el proceso de molienda, su comportamiento se expresa a través de la expresión (1.20). En el desarrollo del trabajo experimental se realizaron mediciones del flujo de aire en diferentes puntos del sistema aerodinámico con diferentes aberturas de las válvulas (Tabla A.7). En la tabla 3.9 se muestran los resultados, se observa como disminuye el consumo específico de energía eléctrica (kWh/t) a medida que disminuye el flujo de aire (m<sup>3</sup>/s). Queda demostrado que el flujo de aire no incide directamente en la productividad del molino pero sí en el consumo específico de energía de la unidad.

Tabla 3.9 Influencia del flujo de aire sobre el comportamiento de la energía en una unidad de molienda

Válvula, (%)	Presión, (Pa)	Flujo de aire, (m <sup>3</sup> / s)	P del ventilador, (kW)	Q, (t/h)	Wev, (kWh/t)
70	8090.50	35.09	390.68	75.82	5.15
50	7943.40	33.66	386.90	76.66	5.05
30	7256.90	33.43	336.83	68.97	4.88

### **3.5. Análisis del consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando diferentes métodos**

En el análisis estadístico realizado sobre el consumo de energía en las diferentes plantas que conforman el proceso de beneficio del mineral, se determinó que la planta de Preparación de Mineral, consume el 50,51 % del total de la energía de la empresa y con respecto al resto de los procesos, la molienda consume el 31 % (figura A.5), (no se tiene en cuenta la estación de compresores) ; dentro de esta planta el proceso de molienda consume el 63 % (figura A.6) ; dentro de la sección de molienda las unidades consumen el 91 % respecto a los equipos secundarios (figura A.7 ; tablas A.1, A.2). Con estos resultados queda demostrado y establecido el peso que tiene el proceso de molienda del mineral en cuanto al consumo de energía en la empresa ‘‘Cmdte Ernesto Che Guevara’’, de ahí la importancia en obtener un método para reducir el consumo de energía en este proceso caracterizado como un gran consumidor.

Se determinó el consumo específico de energía eléctrica de la sección de molienda (molinos y ventiladores de recirculación) aplicando varios métodos que se relacionan a continuación: estadístico, modelación, ecuaciones clásicas, características energéticas y Bond. En los epígrafes siguientes se analizan los resultados.

#### **Aplicando el método estadístico (Histórico)**

Aplicando los procedimientos descritos en el epígrafe 2.11 se determinó el consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda para un periodo de 12 meses.

En la tabla A.3 se muestra el consumo de energía de las unidades de molienda mensual en el periodo de un año. En la tabla 3.10 se muestra el resumen de los resultados. Se observa gran variabilidad en el consumo específico de energía, siendo más notable en los molinos.

En la figura A.13 , A.14 y A.15 se muestra el comportamiento de la productividad, del consumo específico de energía cada mes y el gráfico que describe el comportamiento del consumo específico de energía de la sección de molienda en dependencia de la productividad, respectivamente

Tabla. 3.10 Consumo específico de energía en la sección de molienda, según estadístico

Meses	Productividad, (t/h)	Consumo Sección de molienda, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	We Sección, (kWh/t)
Promedio	286.78	2467191.92	8.48	5.86	14.34
Máximo	310.78	2771778.00	10.36	6.35	16.52
Mínimo	261.58	2144076.00	7.47	5.59	13.13

Los molinos alcanzaron su valor máximo con 10,36 kWh/t , un valor mínimo de 7,47 kWh/t y un promedio de 8,48 kWh/t , los ventiladores mostraron menos variabilidad, con valor máximo de 6,35 kWh/t , un valor mínimo de 5,59 kWh/t y valor promedio de 5,86 kWh/t . El valor promedio de la sección de molienda fue de 14,34 kWh/t .

#### **Experimental, calculando la productividad aplicando el modelo (ecuación 3.3 y 3.4)**

Aplicando el procedimiento descrito en el epígrafe 2.11 se calcula el consumo específico de energía para la sección de molienda. Primero se analiza de forma individual para cada unidad, después en la sección.

#### **Unidad de molienda 1**

En la tabla 3.11 se muestran los resultados correspondientes a la unidad de molienda 1, donde se incluye la productividad (t/h), tiempo de operación de la unidad en horas, producción estimada (t), energía consumida por la unidad (kWh/t) y consumo específico de energía del molino (Wem), el ventilador (Wev) y la unidad (Weu)

Tabla 3.11. Consumo de energía eléctrica en la unidad de molienda 1, según ecuación 3.3

Días	Productividad, (t/h)	Tiempo de operación, (h)	Producción, (t)	Consumo unidad, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	Weu, (kWh/t)
Promedio	69.35	21.11	1448.68	19155.55	7.51	5.62	13.19
Máximo	81.43	24.00	1730.75	22752.83	8.77	6.12	14.89
Mínimo	62.51	12.66	920.59	11871.64	6.40	4.79	11.29

El consumo específico de energía del molino varió entre 6,4 kWh/t (mínimo) y 8,77 kWh/t (máximo) con valor promedio de 7,51 kWh/t . El ventilador de recirculación mantuvo más estabilidad al presentar consumos específicos entre 4,79 kWh/t como mínimo y 6,12 kWh/t como máximo y promedio de 5,62 kWh/t . La unidad (molino y ventilador), consumió como promedio 13,19 kWh por cada tonelada aportando valores mínimos de 11,29 kWh/t y valores máximos superiores a 14 kWh/t .

### Unidad de molienda 2

En la tabla 3.12 se muestran los resultados correspondientes a la investigación realizada en la unidad de molienda 2. Se observa que el consumo específico de energía del molino varió entre 5,86kWh/t (mínimo) y 10,83 kWh/t (máximo) con valor promedio de 8,26 kWh/t . El ventilador de recirculación mantuvo mejor estabilidad al presentar consumos específicos entre 4,65 kWh/t como mínimo y 7,04 kWh/t como máximo y promedio de 5,65 kWh/t . La unidad (molino y ventilador), consumió como promedio 14 kWh por cada tonelada, aportando valores mínimos de 10,51 kWh/t y valores máximos de 17,87 kWh/t .

Tabla 3.12. Consumo de energía eléctrica en la Unidad de Molienda 2, según ecuación 3.3

Días	Produc tividad, (t/h)	Tiempo de operación, (h)	Produc ción, (t)	Consumo Unidad, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	Weu, (kWh/t)
Promedio	69.14	14.94	1028.52	14127.61	8.26	5.65	14.00
Máximo	84.24	21.08	1553.81	20215.03	10.83	7.04	17.87
Mínimo	54.76	10.30	620.34	9458.08	5.86	4.65	10.51

### Unidad de molienda 3

En la tabla 3.13 se muestran los resultados correspondientes a la investigación realizada en la unidad de molienda 3. El consumo específico de energía del molino tuvo valor mínimo de 7,62 kWh/t y valor máximo igual a 9,56 kWh/t con valor promedio de 8,39 kWh/t .

Tabla 3.13. Consumo de energía eléctrica en la Unidad de Molienda 3, según ecuación 3.4

Días	Producti vidad, (t/h)	Tiempo de operación, (h)	Produc ción, (t)	Consumo unidad, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, kWh/t)	Weu, (kWh/t)
Promedio	92.27	20.46	1883.02	23606.84	8.39	4.18	12.56
Máximo	100.60	24.00	2384.64	28758.76	9.56	4.58	14.14
Mínimo	82.80	13.00	1185.67	15114.81	7.62	3.77	11.50

El ventilador de recirculación presentó menos variabilidad al presentar consumos específicos entre 3,77 kWh/t como mínimo y 4,58 kWh/t como máximo y promedio de 4,18 kWh/t .

La unidad (molino y ventilador consumió como promedio 12,56 kWh por cada tonelada aportando valores mínimos de 11,50 kWh/t y valores máximos de 14,14 kWh/t .

#### Unidad de molienda 4

En la tabla 3.14 se muestran los resultados correspondientes a la investigación realizada en la unidad de molienda 4. El consumo específico de energía del molino tuvo valor mínimo de 6,65 kWh/t y valor máximo igual a 11,77 kWh/t con valor promedio de 8,85 kWh/t . El ventilador de recirculación mantuvo mejor estabilidad al presentar un consumo específico mínimo de 5,13 kWh/t y máximo de 8 kWh/t y un valor promedio de 6,19 kWh/t . La unidad (molino y ventilador), consumió como promedio 15,05 kWh/t , aportando valores mínimos de 11,88 kWh/t y valores máximos de 19,51 kWh/t .

Tabla 3.14. Consumo de energía eléctrica en la Unidad de Molienda 4, según ecuación 3.4

Días	Produc tividad, (t/h)	Tiempo de operación, (h)	Produc ción, (t)	Consumo unidad, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	Weu, (kWh/t)
Promedio	55.88	17.29	1003.95	14118.67	8.85	6.19	15.05
Máximo	65.93	24.00	1582.42	19917.86	11.77	8.00	19.51
Mínimo	43.56	8.00	377.20	6774.28	6.65	5.13	11.88

### Sección de molienda

En párrafos anteriores se analiza el comportamiento del consumo específico de energía de las unidades de molienda de forma individual. La productividad se estima aplicando los modelos obtenidos en el presente trabajo expresado por las ecuaciones (3.3) y (3.4). En el presente epígrafe se realiza el análisis para la sección de molienda, se tiene en cuenta la productividad promedio diaria (Figura A.12) y el consumo específico de energía en dependencia de la productividad de la sección de molienda (Figura A.16). En la tabla A.4 se muestra la potencia consumida diaria por los molinos y ventiladores de cada unidad de molienda en el periodo de un mes. En la tabla 3.15 se muestra un resumen de los resultados.

Se determinaron los consumos específicos de forma individual para los molinos, ventiladores y la sección de molienda.

Se observa gran variabilidad en el consumo específico de energía, siendo más notable en los molinos. Los molinos alcanzaron su valor máximo con 9,82 kWh/t, un valor mínimo de 6,98 kWh/t y un promedio de 8,5 kWh/t. Los ventiladores se comportaron con menor variabilidad, con valor máximo de 6,12 kWh/t, un valor mínimo de 4,71 kWh/t y un valor promedio de 5,34 kWh/t.

Tabla 3.15. Consumo de energía eléctrica en la sección de molienda, al estimar la productividad según los modelos expresados por las ecuaciones (3.3) y (3.4)

Días	Productividad, (t/h)	Tiempo operación, (h)	Producción, (t)	Consumo de la Sección, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	We Secc., (kWh/t)
Promedio	286.65	73.80	5364.17	71008.67	8.50	5.34	13.87
Máximo	319.60	83.46	6596.37	79603.02	9.82	6.12	15.88
Mínimo	258.23	63.87	4694.36	61780.53	6.98	4.71	11.86

La productividad promedio estimada es de 286,65 t/h, con un consumo de energía promedio de 71 MW. El consumo específico de energía promedio para la sección de molienda fue estimado en 13,87kWh/t, aunque se estima un valor máximo de 15,88 kWh/t y mínimo igual a 11,86 kWh/t.

En las tablas A.8, A.9, A.10, A.11, A.12 y A.13 del anexo se muestran los datos diarios para cada unidad de molienda y la sección de molienda.

### **Determinación del consumo específico de energía de las unidades de molienda aplicando el método de las ecuaciones empíricas**

Aplicando el procedimiento descrito en el epígrafe 2.11 fueron obtenidos los resultados que se muestran en las tablas 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 .

Primero se determina la demanda de potencia aplicando las ecuaciones 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 para los molinos y 2.8 para los ventiladores, la demanda de las unidades resulta ser las sumas de molinos y ventiladores expresadas como promedios de las 4 unidades. Los resultados se muestran en la tabla 3.16. Se observan las diferencias en los resultados de acuerdo a las ecuaciones aplicadas

Se determinó el consumo específico de energía eléctrica al dividir la demanda de los molinos, ventiladores y unidades entre la productividad promedio (72,68 t/h) de las unidades de molienda.

El consumo específico de energía en los molinos se calculó para cada ecuación (2.4 a 2.7). Los resultados se muestran en la tabla 3.16 donde aparecen los valores calculados, observados y la desviación. Se observa la diferencia entre los valores calculados y observados. Nótese la variabilidad de acuerdo a las ecuaciones aplicadas

Tabla 3.16 Potencia promedio de los molinos, ventiladores y unidades de molienda

Molino de bolas		Ventilador	Unidad de Molienda
Ecuación	P promedio, (kW)	P promedio, (kW)	P promedio, (kW)
(2.4)	439.03	391.50	830.53
(2.5)	773.36	391.50	1164.86
(2.6)	699.44	391.50	1090.94
(2.7)	450.88	391.50	842.38

El consumo específico de energía de los ventiladores se determinó por la ecuación 2.8 . Los resultados se muestran en la tabla 3.17 donde aparece el valor calculado, observado y la

desviación El consumo específico de energía eléctrica calculado difiere del valor observado solo en 0,92 %

El consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda se obtuvo al sumar los obtenidos en los molinos y los ventiladores aplicando las ecuaciones clásicas.

Tabla 3.17 Consumo específico de energía eléctrica promedio de los molinos

Molinos de bolas, (kWh/t)			
Ecuación	Calculado	Observado	Desviación
(2.4)	6.04	8.50	-2.46
(2.5)	10.64	8.50	2.14
(2.6)	9.62	8.50	1.12
(2.7)	6.20	8.50	-2.30

Tabla 3.18 Consumo específico de energía eléctrica promedio de los ventiladores

Ventilador de recirculación, (kWh/t)			
Ecuación, valor calculado	Observado	Desviación	
(2.8)	5.39	5.34	0.05

En la tabla 3.19 se muestran los valores calculados, observados y la diferencia entre éstos. Nótese la variabilidad en dependencia de las ecuaciones

Tabla 3.19 Consumo específico de energía eléctrica promedio en la sección de molienda

Sección de molienda, (kWh/t)			Desviación, (%)
Ecuación	Valor calculado	Estimado	
(2.4)	11.43	13.87	21.34
(2.5)	16.03	13.87	13.47
(2.6)	15.01	13.87	7.59
(2.7)	11.59	13.87	19.67

### 3.6. Comportamiento del consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando el método de las características energéticas

El método de las características energéticas tiene en cuenta las particularidades del mineral larerítico y las condiciones concretas de explotación. A continuación se realiza el análisis según los resultados estadísticos.

#### Aplicando el método a los datos obtenidos por el método estadístico (Histórico)

Se realizó el análisis del consumo específico de energía en la sección de molienda en un periodo de 12 meses aplicando el procedimiento descrito en el epígrafe 2.11. Los datos se obtuvieron de los reportes estadísticos de la planta. En la figura 3.6 se observan los resultados donde se aprecia poca variabilidad en el consumo específico de energía de los molinos, ventiladores y sección pero con tendencia a disminuir a medida que se incrementa la productividad. Nótese el bajo grado de correlación en la ecuación que describe el comportamiento de la unidad,  $R^2 = 0,5775$ .

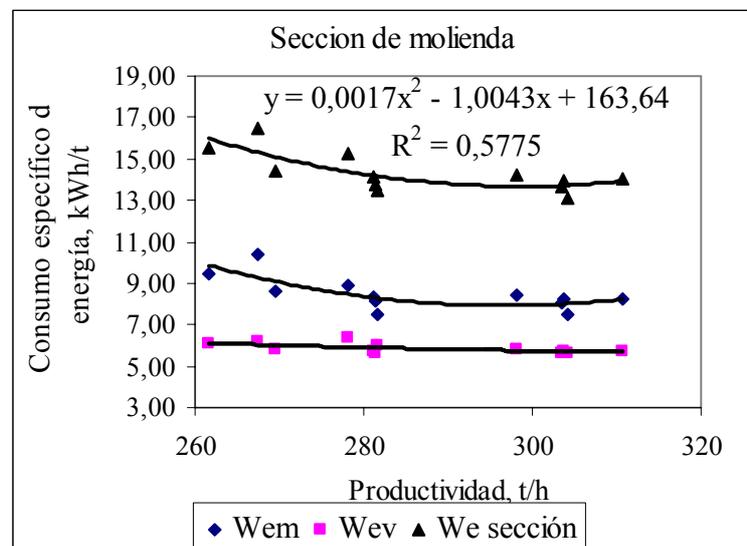


Figura 3.6 Consumo específico de energía eléctrica de la sección de molienda a partir de datos estadísticos (Históricos): Wem (molino), Wev (ventilador), We sección (sección de molienda)

### Según datos experimentales. Se estimó la productividad aplicando los modelos

También se determinó el consumo específico de energía aplicando el método de las características energéticas tomando como datos la productividad estimada, según el procedimiento descrito en el epígrafe 2.11 para las unidades de molienda. Se realizará primero el análisis para cada una de las unidades, luego para la sección.

#### Unidad de molienda 1

El consumo específico de energía en la unidad de molienda 1 se relaciona con la productividad a través de un polinomio de segundo grado, los gráficos se muestran en la figura 3.7, donde se muestra, además, la ecuación correspondiente a la curva de la unidad. Se aprecia como disminuye el consumo específico de energía, tanto en el molino, ventilador y unidad a medida que aumenta la productividad, obsérvese el amplio margen en que oscila para cada componente.

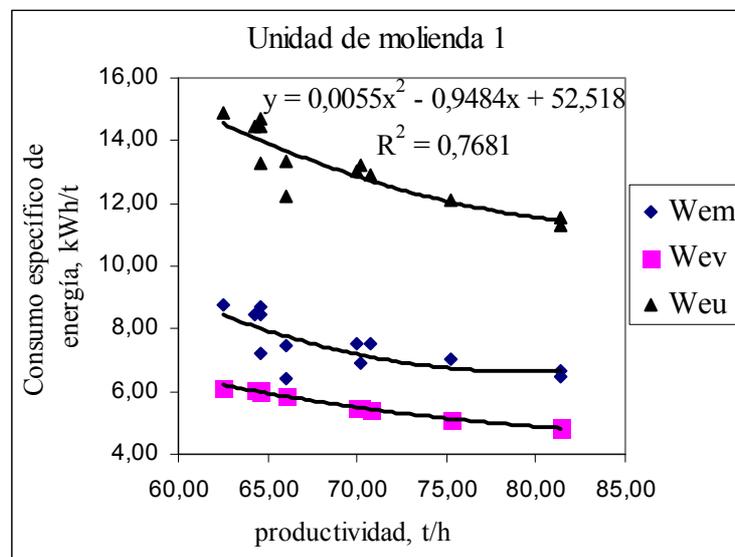


Fig. 3.7 Comportamiento del consumo específico de energía en unidad de molienda 1 a partir de estimar la productividad, según ecuación (3.3): Wem (molino), Wev (ventilador), Weu (unidad)

### Unidad de molienda 2

Al determinar el consumo específico de energía en la unidad de molienda 2 se obtienen los resultados que se muestran la figura 3.8 , la relación consumo de energía – productividad está dado por un polinomio de segundo grado. En dicha gráfica se muestra la ecuación que describe la curva de la unidad, nótese la fuerte relación expresada por el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9775$  . Se aprecia como disminuye el consumo específico de energía, mostrando gran variabilidad, tanto el molino, el ventilador y unidad, a medida que crece la productividad.

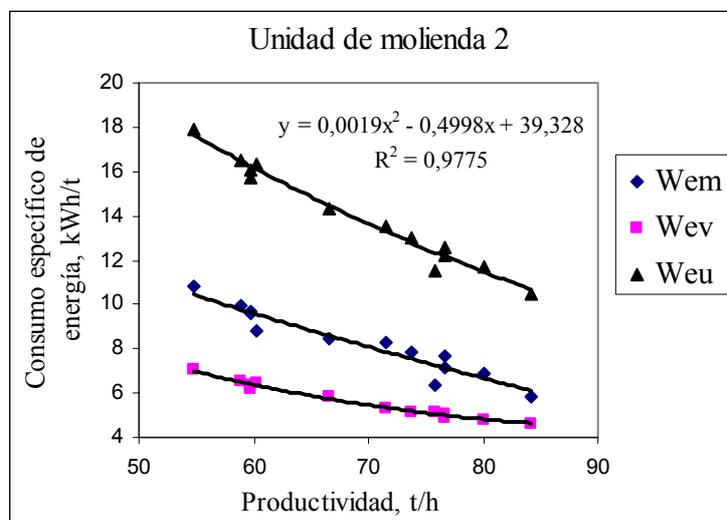


Fig. 3.8 Comportamiento del consumo específico de energía en la unidad de molienda 2 a partir de estimar la productividad, según ecuación (3.3): Wem (molino), Wev (ventilador), Weu (unidad)

### Unidad de molienda 3

Al determinar el consumo específico de energía en la unidad de molienda 3 se obtienen los resultados que se muestran la figura 3.9 , la relación consumo de energía – productividad está dado por un polinomio de segundo grado. En dicha gráfica se muestra la ecuación que describe la curva de la unidad, nótese la fuerte relación expresada por el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9567$  . Se aprecia como disminuye el consumo específico de energía, mostrando gran variabilidad, tanto el molino, el ventilador y unidad, a medida que crece la productividad.

#### Unidad de molienda 4

Se estimó el consumo específico de energía en la unidad de molienda 4, se obtienen los resultados que se muestran en la figura 3.10, la relación consumo de energía – productividad está dado por un polinomio de segundo grado. En dicha gráfica se muestra la ecuación que describe la curva de la unidad, nótese la fuerte relación expresada por el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9089$ . Se aprecia como disminuye el consumo específico de energía, mostrando gran variabilidad, tanto el molino, el ventilador y unidad, a medida que crece la productividad.

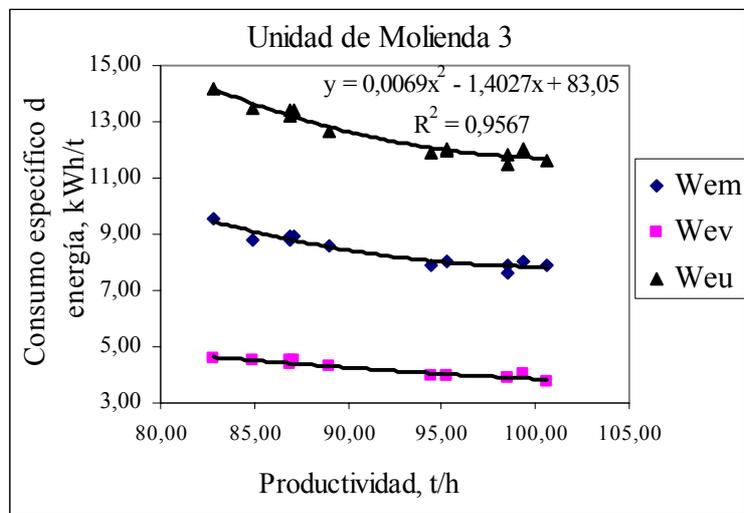


Fig. 3.9 Comportamiento del consumo específico de energía en la unidad de Molienda 3 a partir de estimar la productividad según ecuación (3.4): Wem (molino), Wev (ventilador), Weu (unidad)

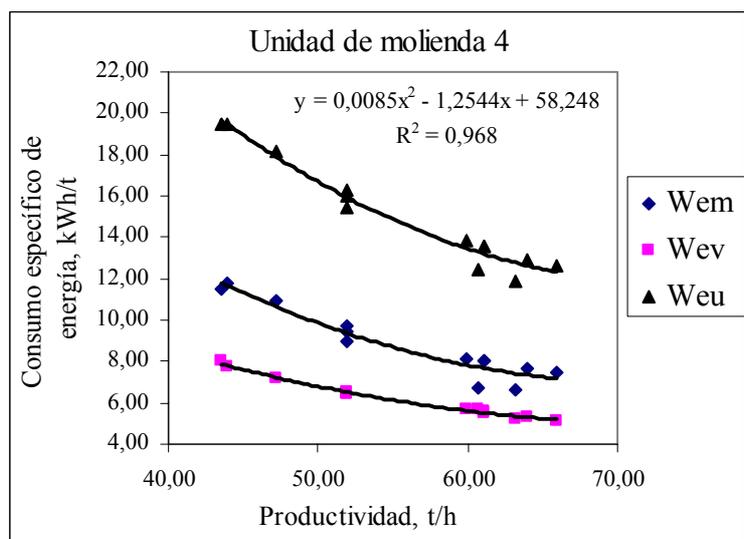


Fig. 3.10 Comportamiento del consumo específico de energía en la unidad de Molienda 4 a partir de estimar la productividad, según ecuación (3.4): Wem (molino), Wev (ventilador), Weu (unidad)

### Sección de molienda

Se determina el consumo específico de energía en la sección de molienda quedando relacionado con la productividad a través de un polinomio de segundo grado, los resultados se muestran en la figura 3.11, nótese, en la ecuación correspondiente a la curva de las unidades, el coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9089$ .

Se observa el amplio margen en que oscila el consumo específico de energía tanto para el molino, ventilador y unidad, disminuyendo a medida que aumenta el nivel de la productividad. Se tiene como resultado que el rango del consumo específico de energía eléctrica obtenido por el método estadístico se encuentra entre 13,13 y 16,52 kWh/h, mientras que el obtenido experimentalmente teniendo en cuenta la productividad estimada aplicando el modelo, se encuentra entre 11,86 y 15,88 kWh/t. Los valores promedios se diferencian solo en 3,27%.

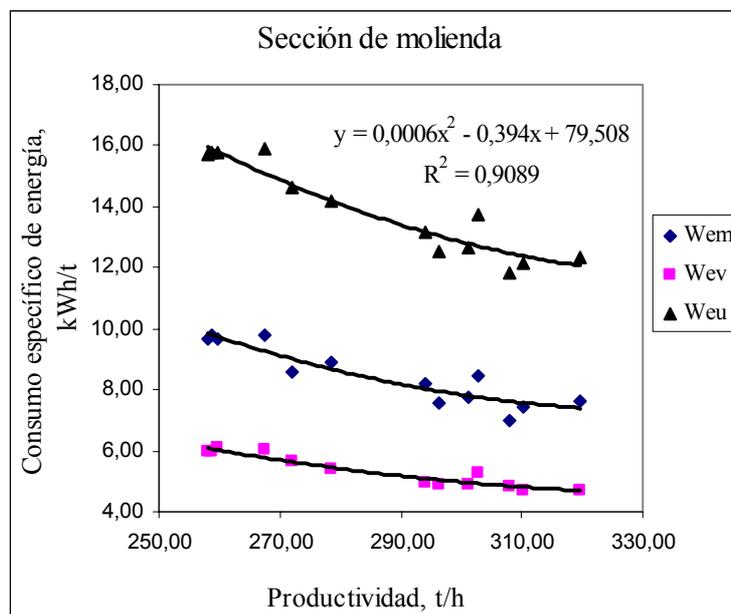


Fig. 3.11 Comportamiento del consumo específico de energía en la sección de molienda aplicando los modelos: Wem (motor), Wev (ventilador), We sección (sección de molienda)

### 3.7. Análisis del comportamiento del consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando el método de Bond

Aplicando el procedimiento descrito en el epígrafe 2.11 y las ecuaciones 1.23 y 1.24 fueron obtenidos los resultados que se muestran en la tabla 3.20 . El índice de trabajo ( $Wi$ ) = 4,96,  $P = 74 \mu\text{m}$  y  $F = 2863 \mu\text{m}$  (Laborde y Ledesma, 2008). En dicha tabla se refleja el índice de consumo específico de energía eléctrica estimado ( $We$ ) y el índice de operación ( $Wop$ ), nótese la marcada diferencia que existe entre ellos, y el intervalo de confianza para cada caso.

Tabla 3.20 Consumo específico de energía e índice de operación de los molinos en la sección de molienda

Molinos de bolas	(kWh/t)	Intervalo de confianza
$Wem$ estimado	8.50	7.76 a 8.74
$Wop$ de Bond	4.84	3.87 a 5.80

### 3.8. Análisis del comportamiento del consumo específico de energía eléctrica en la sección de molienda aplicando el método combinado (características energéticas – Bond)

La productividad promedio observada (estadístico) en la sección de molienda es de 71,69 t/h , la misma se determinó según procedimiento descrito en el epígrafe 2.12 y la productividad promedio calculada aplicando el modelo, ecuación (3.3), según procedimiento descrito en el mismo epígrafe, es de 71,66 t/h .

Aplicando el procedimiento descrito en el epígrafe 2.12 y la ecuación 3.5 correspondiente al gráfico del consumo específico del ventilador que se muestra en la figura 3.11 del epígrafe 3.6, fueron obtenidos los resultados que se muestran en la tabla 3.21 .

En lo adelante se considera la productividad de 71,66 t/h , para la cual el consumo específico de los ventiladores de recirculación de la sección de molienda se determina por la ecuación 3.5, la misma expresa la correspondencia que existe entre la productividad (t/h) y el consumo específico ( $W_{ev}$ ), el coeficiente de determinación es  $R^2 = 0.9616$  .

$$y = 803.74x^{-1.1723} \quad (3.5)$$

Al sumar el consumo específico del ventilador ( $W_{ev}$ ), según el método de las características energéticas y el índice de operación de los molinos ( $W_{op}$ ), calculado por el método de Bond (epígrafe 3.7), se obtiene el consumo específico de la sección de molienda (10.21 kWh/t) que corresponde a una productividad de 90 t/h .

Tabla 3.21 Consumo específico de energía aplicando el método combinado

Indicadores	kWh/t	Intervalo de confianza Bond, ( $\pm 20\%$ )
$W_{op}$ de Bond	4.84	3.87 a 5.80
$W_{ev}$	5.37	4.30 a 6.44
$W_{eSecc}$	10.21	8.17 a 12.25

En la tabla se muestra el índice de operación de Bond ( $W_{op}$ ), consumo específico del ventilador ( $W_{ev}$ ) y Sección ( $W_{eSec}$ ), el intervalo de confianza ( $\pm 20\%$ ) propuesto por Bond .

### 3.9. Procedimiento y algoritmo para aplicar el método combinado

Se está en condiciones de establecer un procedimiento que permita normar el consumo específico de energía eléctrica en la molienda del mineral laterítico evaluando las condiciones concretas de explotación de dicho objeto. La eficiencia del proceso de molienda se ve afectada por las características del mineral en proceso y por las condiciones de explotación del equipamiento, incluyendo el estado tecnológico del mismo y los regímenes de operaciones.

Se analizan los métodos de las características energéticas y Bond.

#### 1. Obtener las características energéticas de la unidad de molienda

- a. Obtener los registros de energía eléctrica de la unidad (molino y ventilador de recirculación), kWh .
- b. Determinar el flujo de mineral fresco al molino aplicando el modelo (regulación en la descarga a los alimentadores de discos – flujo de mineral), t/h.
- c. Determinar el consumo específico de energía eléctrica de la unidad (kWh/t).

## 2. Aplicar el método de Bond

Determinar el índice de trabajo para el mineral en proceso.

Determinar el índice de operación para los molinos industriales.

## 3. Combinar los métodos: características energéticas – Bond

- a. En el gráfico de las características energéticas de la unidad se selecciona el consumo específico del ventilador ( $W_{ev}$ ) correspondiente a la productividad promedio.
- b. Se adiciona ( $W_{ev}$ ) y el índice de operación ( $W_{op}$ ) del molino, obteniéndose el consumo específico de energía de la unidad ( $W_{eu}$ ), el cual constituirá la norma.
- c. Sustituyendo en el modelo que expresa el consumo específico, el valor obtenido en 3.b, se obtendrá la productividad que debe alcanzar la unidad.

### Ajustes de los parámetros

- La carga de bolas de los molinos debe ser entre 40 y 45 % del volumen del molino, lo que garantizará una productividad superior a los 90 t/h .
- Compensar la carga de bolas con el incremento del flujo de mineral hasta obtener la productividad de 90 t/h. Se logra aplicando 1.b .
- Determinar la relación serpentina – limonita del mineral en proceso. Si el contenido de serpentina es inferior a 39 % se obtienen productividades superiores a 90 t/h .
- Regular el flujo de aire en el sistema aerodinámico con abertura en la válvula entre 30 y 40 % , en este rango el consumo específico del ventilador variará entre 4,8 y 5,0 kWh/t .

A continuación se muestra el algoritmo el cual resume los pasos a seguir para aplicar el procedimiento.

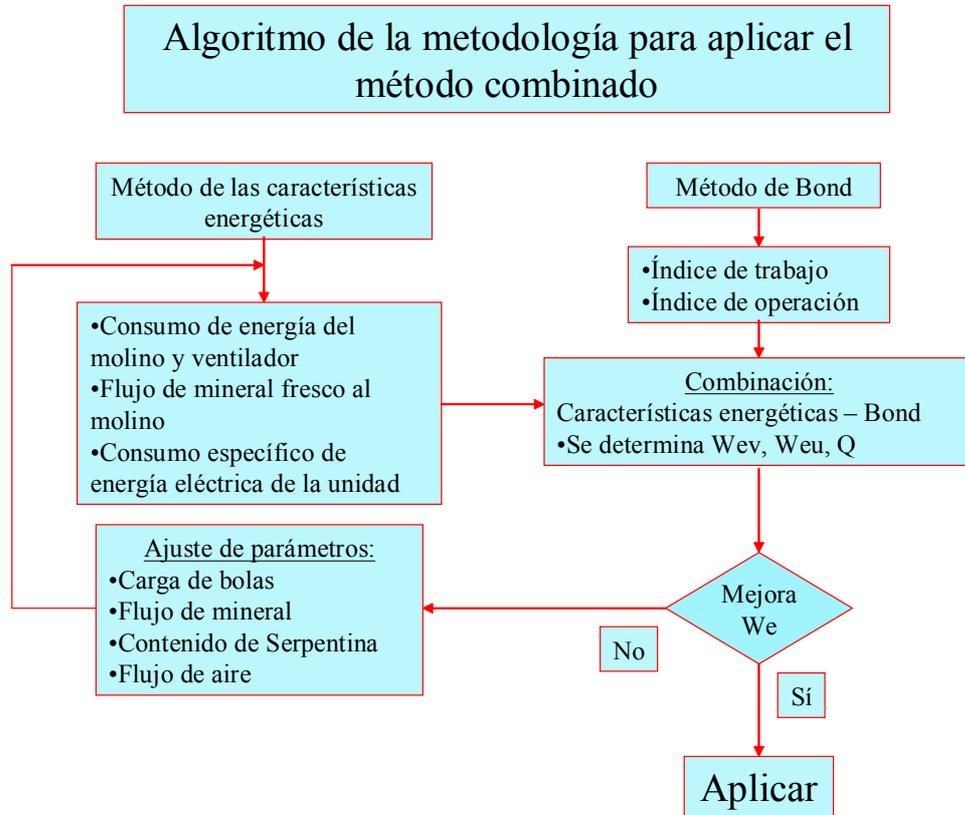


Figura 3.12. Algoritmo para aplicar el método combinado

### 3.10. Valoración económica

Se determinó que la variación de algunos factores, tales como: la carga de bolas, el flujo de mineral, la composición sustancial del mineral y el flujo de aire influyen en la variación del consumo específico de energía en el proceso de molienda. Al no existir actualmente en la industria un procedimiento que norme el consumo de energía, al variar los factores antes mencionados, no se pueden realizar los ajustes de forma efectiva incidiendo en el incremento del consumo específico de energía eléctrica.

De ser aplicado el procedimiento propuesto en el presente trabajo, para establecer la norma del consumo específico de energía eléctrica, puede lograrse la reducción del mismo en 26,40 % . Según se observa en la tabla 3.22 al aplicar el método combinado crece la productividad de la sección de molienda y disminuye el consumo específico de energía eléctrica.

Tabla 3.22 Productividad y consumo específico de energía eléctrica de la de molienda, obtenidos según modelo y el método combinado (Bond - Características energéticas)

Indicador	Estimado, según modelo	Método combinado	Desviación, (%)
Q, (t/h)	71.66	90.00	20.38
Wem, (kWh/t)	8.18	4.84	-40.83
Wev, (kWh/t)	5.37	5.37	0
WSecc., (kWh/t)	13.87	10.21	-26.40

Según se analiza en el epígrafe 3.7.1 , el comportamiento diario promedio del consumo de energía en la sección de molienda es de 71 MW, la misma se distribuye como sigue:

Consumo en el horario del día: 35,50 MWh

Consumo en el horario pico: 11,82 MWh

Consumo en el horario de la madrugada: 23,66 MWh

Teniendo en cuenta la tarifa que aplica la Empresa Eléctrica para los consumidores de media tensión con cogeneración (Manual de aplicación de las tarifas eléctricas, 2002), el costo actual de producción de mineral molido es de \$ 0,69/t (en el renglón de electricidad). La producción actual es de 5364,17 t/día, con la aplicación del procedimiento puede alcanzar una media de 6642 t/día, a un costo de \$ 0,56/t , lo que representa un 18,85 % de reducción del costo de producción, con 26,40 % en la disminución del consumo específico de energía eléctrica. Este efecto es equivalente al ahorro de 321900 USD/año .

En la tabla 3.23 se muestra el efecto económico que puede tener la aplicación del procedimiento propuesto. Se revela de esta forma las reservas energéticas del proceso industrial y las posibilidades que existen de reducir los costos de producción en el mismo.

Tabla 3.23. Efecto económico posible a alcanzar mediante la aplicación del procedimiento propuesto

Estimado		Método combinado					
Q media, (t/h)	We Sección, (kWh/t)	Q media, (t/h)	We Sección, (kWh/t)	Incremento de Q, (t/h)	Reducción We Secc, (%)	Reducción del costo, (%)	Ahorro, (USD/año)
71.66	13.87	90	10.21	18.34	26.40	18.85	321900

### **3.11. Valoración medioambiental**

El talón de Aquiles de las máquinas de trituración y molienda es su alto consumo de energía. La energía útil en el rompimiento del mineral se considera entre 0,6 y 3 % de toda la energía consumida por el molino. Los principales consumos de energía están dados en forma de calor y ruido, en las transmisiones del accionamiento. Las restantes tienen lugar durante la fricción entre partículas y choque metal – metal en el interior del molino (Coello, 1993)

Se conoce que cuando el molino tiene menos mineral en el interior, las bolas, en su movimiento libre, tienen más probabilidad de chocar entre ellas y con las paredes del propio molino generando altos niveles de ruido.

En las instalaciones de molienda de minerales se realizan estudios periódicamente con el objetivo de conocer la concentración de ruidos en las diferentes áreas y tomar medidas desde el punto de vista organizativo y seguridad medioambiental. Estudios en este sentido han demostrado que la exposición continuada al ruido provoca una pérdida progresiva de la audición con el decurso del tiempo, no obstante durante la permanencia en estas condiciones anormales las personas experimentan daños al sistema nervioso central que se manifiestan a través del estrés, pérdida de la concentración, disminución de la capacidad y el rendimiento laboral, entre otras.

Cualquier persona expuesta a ruidos de forma permanente, puede desarrollar una hipoacusia progresiva. La pérdida auditiva empieza en la zona extraconversacional, por tanto, no es percibida por el trabajador afectado. A menudo, el síntoma inicial es el acúfeno que suele presentarse al término de la jornada laboral. Este cuadro no tiene tratamiento. Por tanto, la medida más correcta es impedir la aparición o su evolución en el peor de los casos.

El ruido es uno de los peligros laborales más comunes, es decir, los trabajadores de estas áreas se ven expuestos diariamente a niveles de ruido medios de 85 decibelios ponderados A (dBA). Estos niveles de ruido son potencialmente peligrosos para su audición y pueden producir además otros efectos perjudiciales.

El ruido peligroso no derrama sangre, no rompe huesos, no da mal aspecto a los tejidos, si los trabajadores pueden aguantar los primeros días o semanas de exposición, suelen tener la sensación de “haberse acostumbrado” al ruido. Esa pérdida auditiva avanza luego de manera insidiosa, ya que aumenta gradualmente a lo largo de meses y años, pasa en gran medida inadvertida hasta alcanzar proporciones discapacitantes.

Otra razón importante en la falta de reconocimiento de los peligros del ruido es que el deterioro auditivo resultante implica un estigma. Como Raymond Héту ha demostrado tan claramente en su artículo sobre rehabilitación de la pérdida auditiva inducida por ruido, la opinión que suele tenerse de las personas que sufren deterioros auditivos es que están avejentadas y son mentalmente lentas e incompetentes en términos generales, y quienes corren el riesgo de sufrir este tipo de deterioro son reacios a reconocer su deficiencia ni el riesgo por miedo a ser estigmatizados. Esto resulta lamentable, porque la pérdida auditiva inducida por ruido llega a ser permanente, sumada a la que se produce a consecuencia de la edad, puede dar lugar a cuadros de depresión y aislamiento en personas de mediana edad y mayores. Las medidas preventivas deben tomarse antes de que comience la pérdida auditiva.

Otro punto que es necesario aclarar es el referente al efecto perjudicial del ruido combinado con otros agentes. Aunque los efectos combinados del ruido y de los fármacos o tóxicos se conocen bien, crece la preocupación por la combinación del ruido con los productos químicos industriales. Los disolventes y otros agentes parecen aumentar su carácter neurotóxico cuando la exposición a ellos se combina con altos niveles de ruido.

A medida que aumenta la pérdida auditiva, el afectado comienza a retraerse de las relaciones sociales. Los actos religiosos, las reuniones cívicas, las reuniones sociales o los espectáculos comienzan a perder su atractivo y la persona prefiere quedarse en casa.

En cambio, los niveles de ruido altos pueden degradar el rendimiento laboral, sobre todo si la tarea es complicada o requiere hacer varias cosas a la vez. El ruido intermitente tiende a ser más perjudicial que el ruido continuo, sobre todo cuando los períodos de ruido son impredecibles e incontrolables. Algunas investigaciones indican que en los ambientes ruidosos es menos probable que las personas se ayuden unas a otras y más probable que presenten comportamientos antisociales.

El estudio más reciente para determinar la concentración de ruido en la sección de molienda, objeto de estudio, se realizó a principio del presente año, dicha instalación está constituida por 4 unidades de molienda y cada una de ellas por un molino que tiene en el interior 54 t de bolas de diferentes diámetro, gira a una velocidad de 17,3 rpm , con capacidad para procesar 120 t/h de mineral. Se pudo comprobar que en todos los puestos muestreados las mediciones se comportan por encima de la norma, alcanzando valores críticos en algunas áreas. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.24. Concentración de ruido en la sección de molienda

Área de molienda	Febrero, 2008
Puesto de trabajo	Nivel de ruido, (dB)
215 - ML - 204	Fuera de operación
215 - ML - 203 Norte	95
215 - ML - 203 Sur	96
215 - ML - 203 Este	96
215 - ML - 203 Oeste	98
215 - ML - 202 Norte	98
215 - ML - 202 Sur	99
215 - ML - 202 Este	100
215 - ML - 202 Oeste	100
215 - ML - 201 Norte	104
215 - ML - 201 Sur	98
215 - ML - 201 Este	106
215 - ML - 201 Oeste	98

Los resultados obtenidos se relacionan con las condiciones de explotación de los molinos por constituir las causas principales de la generación de ruidos, como se explicó en párrafos anteriores. El estudio sobre la concentración de ruido arrojó como resultado valores por encima de lo permisible. Los molinos en ese periodo tuvieron una productividad de 70,39 t/h , es decir, se considera como la cantidad de mineral promedio que permaneció dentro de los molinos, representando el 58,65 % del mineral que pueden procesar.

Incrementando la productividad a 90 t/h , como se propone en el presente trabajo, se incrementa la presencia del mineral en el interior de los molinos, disminuye la probabilidad de choque entre las bolas y de éstas con las partes metálicas, obteniendo como resultado una disminución en la generación de ruido en dicho proceso.

### 3.12. Conclusiones de capítulo III

- ✓ Se determinó que la carga en bolas, el flujo de mineral, la relación serpentina limonita y el flujo de aire influyen directamente en el consumo específico de energía eléctrica en la molienda de los minerales lateríticos
- ✓ Se obtuvo un modelo que permite determinar, incluso predecir, el flujo de mineral fresco en cada uno de los molinos de bolas
- ✓ La normación del consumo de energía eléctrica de una unidad de molienda de mineral laterítico, por el método de cálculo teórico, no tiene en cuenta los diversos factores

que influyen realmente en el consumo de energía de la unidad, ni tampoco permite tener en cuenta las particularidades energéticas del proceso de molienda, por lo tanto no es recomendable la aplicación de este método.

- ✓ Se determinó la reserva energética de la sección de molienda, lo que nos permite, aplicando el procedimiento propuesto para normar el consumo específico de energía, incrementar la productividad en 18,34 %, disminuir el consumo específico de energía eléctrica en 26,4 % e incurrir en ahorro económico de 321900 USD/año .

## CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ Se determinó experimentalmente la carga en bolas de cada molino.
- ✓ Se corroboró que la carga en bolas, el flujo de mineral, la relación serpentina limonita y el flujo de aire influyen directamente en el consumo específico de energía eléctrica de la molienda del mineral laterítico.
- ✓ Se obtuvo experimentalmente un modelo que permite determinar, incluso predecir, la productividad y por consiguiente el consumo específico de energía eléctrica de las unidades de molienda teniendo en cuenta el flujo de mineral fresco en cada molino.
- ✓ La normación del consumo de energía eléctrica de una unidad de molienda de mineral laterítico, no es recomendable determinarla por el método de cálculo teórico ya que no tienen en cuenta los factores que influyen realmente en el consumo de energía, tampoco se recomienda aplicar el método de las características energéticas por sí solo, a pesar de que sí tiene en cuenta las particularidades energéticas del proceso de molienda, se basa en hechos ya ocurridos, en datos estadísticos.
- ✓ Aplicando el método combinado de las características energéticas y el método de Bond, según las condiciones concretas de explotación, se determinó que la norma de consumo específico de energía eléctrica para las unidades de molienda de la empresa “Cmde Ernesto Che Guevara” es de 10,21 kWh/t y el rango más racional se estima entre 8,17 y 12,25 kWh/t para una productividad promedio de 90 t/h .
- ✓ El procedimiento propuesto para la normación del consumo específico de energía eléctrica en los procesos de molienda de la laterita, resuelve las limitaciones encontradas por los métodos tradicionales. Se demuestra el impacto económico que puede producir la aplicación de este procedimiento, ascendente al ahorro de 321900 USD/año .

## **RECOMENDACIONES**

- ✓ Dar continuidad al trabajo con la aplicación del procedimiento propuesto.
- ✓ Utilizar éste trabajo como base de conocimiento en la automatización del proceso de molienda en la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”

Aplicar las medidas necesarias que permitan:

- ✓ Completar la carga en bolas de los molinos (entre 40 y 45 % del volumen del molino).
- ✓ Mantener estable el flujo de alimentación de mineral fresco a los molinos (más de 90 t/h).
- ✓ Operar las válvulas del sistema aerodinámico en el rango más racional posible (entre 30 y 40 % de abertura).
- ✓ Mantener el contenido de serpentina, en el mineral en proceso, próximo al 25 %

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Agudo, M. J. “Aplicación de la simulación matemática a la determinación de consumos energéticos en la fragmentación”. (Tesis doctoral) Universidad de Oviedo. 2003.
2. Aksani. B. y Sonmez B. “Simulation of Bond grindability test by using cumulative based kinetic model. Minerals Engineering”. Vol. 13. Nº 6. pág. 673 – 677, 2000
3. Andreiev S., Perov V., Zverievich V. “Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales”. Primera edición cubana, 1987
4. Anónimo. “Manual de aplicación de las tarifas eléctricas. Unión Eléctrica”, La Habana, 2002
5. Anónimo. “Manual de operaciones de la planta de Preparación de Minerales”. Empresa Cmdte “Ernesto Che Guevara”, 2003
6. Artículos “Comminution Testes”, Minerales Services (Minerales Metallurgy). [www.sgs.com/met](http://www.sgs.com/met), Agosto, 2007
7. Austin L. G., Lukie P. T., Kimplel R. R. “Grinding equations and the Bond work index”. Trans. AIME, Vol 252, pág 87 – 94 . 1982
8. Austin L. G., y Brame K. A. “Comparison of the Bond method for sizing wet tumbling mills with a size mass balance simulation model”. Powder Technology, 34 ; 261 – 274 . 1983 .
9. Austin, Kimplel, Lukie, “Process Engineering of size reduction: Ball Mill”. AIME publ. NY. 458 – 471 pp. 1984
10. Avilioy, B. N., Karnaujov; Zabrobski. “Racionalización del consumo de energía eléctrica en las plantas beneficiadoras de minerasles”. Editorial Niedra, Moscú, 1987.
11. Belyx, B. P., Sbiardel I. S. y Oleinikov B. K. “Cargas eléctricas y utilización de la energía eléctrica en las empresas mineras”. Editorial Niedra, Moscú, 1971.
12. Bond, F. C.: “A new theory of comminution”, AIME. Mining Eng., 187 (8), 1950.
13. Bonoilli, A. y Fluvio C. “The Energy saving problems related to grinding, a correct definition of parameters for comminutions process optimization”. Mineral processing. June 1994.
14. Bouso J. “Evolución histórica de los circuitos de molienda”. Eral, Equipos y procesos, SA. Rocas y minerales, Agosto 2004.

15. Coello A. “Consideraciones sobre la molienda seca de minerales lateríticos”. *Minería y geología*, XIII (2); 57 a 60; 1993 a.
16. Coello A., N. Tijonov. “Molienda de minerales multicomponentes: modelo integro diferencial para la valoración de la energía”. *Minería y Geología* (2) 2001
17. Coello A., Menéndez J., Laborde R. “Regularidad en la molienda conjunta y por separado de mezclas de limonita y serpentina”, 2005
18. Charles, R. J.: “Energy – size reduction relationship in comminution”, trans, *AIME*, 208 : 80 – 88, 1957.
19. Charreas V. “Simulación de un circuito de molienda, clasificación directa”. *Artículos*, [http://www.monografias.com/trabajos34/circuito – molienda](http://www.monografias.com/trabajos34/circuito-molienda), 1998
20. Deister R. J. “How to determine the Bond work index using the lab ball mill gridability test”. *COMJ*. 1987
21. “Dimensionado de molinos”. *Artículos*, [http://www.tecmaqsl.com/Folleto/Molino\\_Bolas.pdf](http://www.tecmaqsl.com/Folleto/Molino_Bolas.pdf), Junio, 2003
22. Escoda S. “Manual práctico sobre ventiladores”, catalogo técnico, segunda edición, 2003, Madrid, España
23. Fuesternau, D. W. y D. A. Sullivan: “Comminution the mixture in ballmill”, *Trans. AIME*, V (23). 1962.
24. Herbst, J. A. y Fuerstenau, D. G. “Scale – up procedure for grinding mill desing using population balance methods”. *Inst. Journal, Mineral Processing*, Vol. 7. pág. 1 – 31, 1980.
25. Holmes, T. A. y S. Patching: “Preliminary inverstigation of the differential grinding of quartz – limestone mixture”, *Trans. Inst. Chem*, 1957.
26. Kick, F.: “Construbution to the knowledge of brittle materials” , *Dinglers Journal*, 1883.
27. Laborde R., Coello A., Marrero S. “Productividad y Eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral laterítico”. *Revista Minería y Geología*. Vol XVII, No. 2, 2000
28. Laborde R., Coello A., Marrero S. “Normación del consumo de energía eléctrica en la molienda de la laterita”. *Memoria FIE 2002*, Universidad de Oriente. ISBN
29. Laborde R., Coello A., Marrero S. “Diagnóstico energético en la sección de molienda de la Empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”. *Memorias SIE 2003*, Universidad Central de Las Villas

30. Laborde R., Coello A., Marrero S. “Diagnóstico energético del proceso de molienda de la laterita”. *Minería y Geología Volumen XIX*, No 3 a 4. 2004
31. Laborde R., “Modelación y Simulación del proceso de molienda del mineral laterítico con composición sustancial variable”, 2005
32. Laborde R., Ledesma L. “Influencia del beneficio en la productividad del proceso de molienda en la laterita en la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”, 2008
33. Lewis K. A., Peral M. and Turker P. “Computer Simulation of the Bond grindability test”. *Minerals Engineering*, Vol. 3 N<sup>o</sup> ½ , pp. 199 – 206. 1990
34. Llorente L. “Proyección para el incremento de la productividad hasta 50000 t de níquel más cobalto en la instalación de molienda de la Empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”. Tesis de Maestría, ISMM, Moa, 2003
35. Marchese A., “Consumo de energía en operaciones de minerales”. Artículos, <http://www.tecsup.edu.pe/webuds/web/publicacion/>. 2004, Lima
36. Mosher J. B. , C. B. Tague. “Conduct and precision of grindability testing”. *Minerals Engineering*. Vol. 14, N<sup>o</sup> 10, 2001
37. Nasset, J. “Evaluación del Rendimiento y la Eficiencia de las Tecnologías de Molienda Fina”, 38a Reunión Anual del CMP, Canadá, Enero, 2006.
38. Prasher, Ch. L. “Crushing and Grinding Process Handbook”, Londres, 1987
39. Rajamani R. K. “On the Dynamics of charge motion in grinding mills”. University of UTA, SALT Lake, City Utah, Noviembre, 2004.
40. Ramos P. “Bombas, ventiladores y compresores”. ISPJAE, La Habana, 1995
41. Rittinger, R. P. Von: “Texbook of mineral dressing”. Ernest and Korn, Berlín, 1867
42. Rodas. “Artículos, [http://www.monografias.com/Trabajo\\_37/Molino\\_Bolas.pdf](http://www.monografias.com/Trabajo_37/Molino_Bolas.pdf)”, 1997
43. Rowland, C. A. “Using de Bond work index to measure operating conminution efficiency *Minerals and Metallurgical Processing*”. Vol. 15 N<sup>o</sup>. 4, 1998
44. Tapia J. “Teoría y técnica de molienda, Preparación mecánica de minerales”, p. 1 a 38. *Ingeniería en metalurgia extractiva*. Universidad Arturo Prat, Iquique – Chile, Julio, 2005

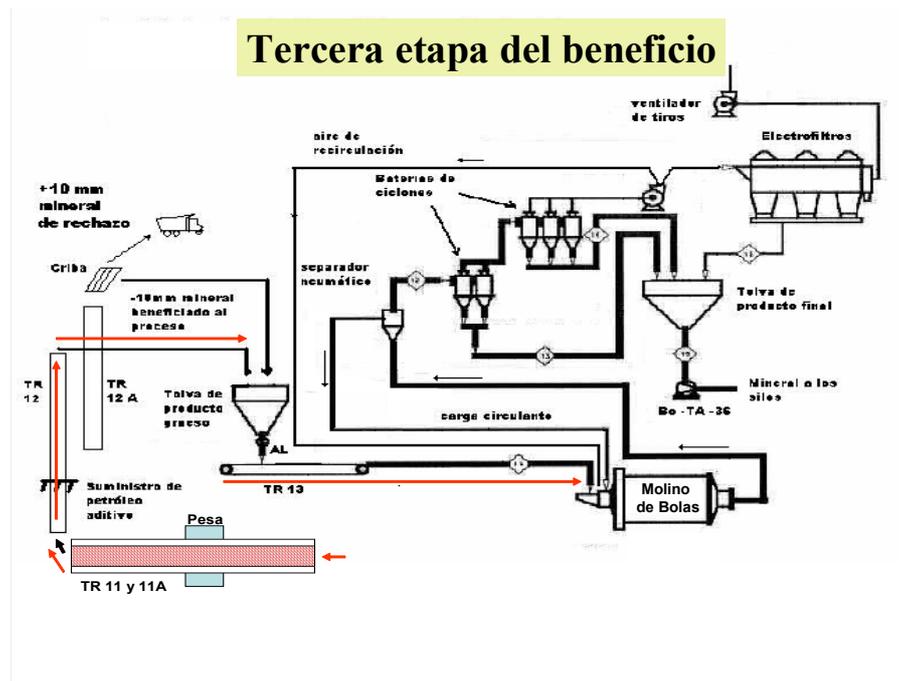


Figura. A.1 Esquema tecnológico correspondiente a una unidad de molienda (Manual de operaciones planta Preparación de minerales, 2003)

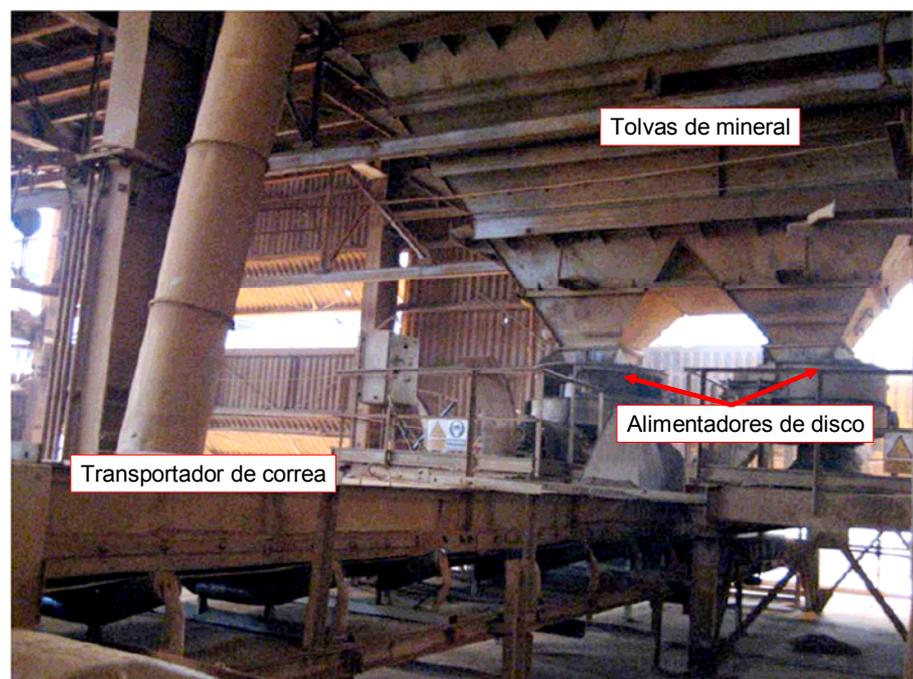


Figura A.2 Área experimental a escala industrial



Figura. A.3 Descargando datos del PQM registrados en el molino 1

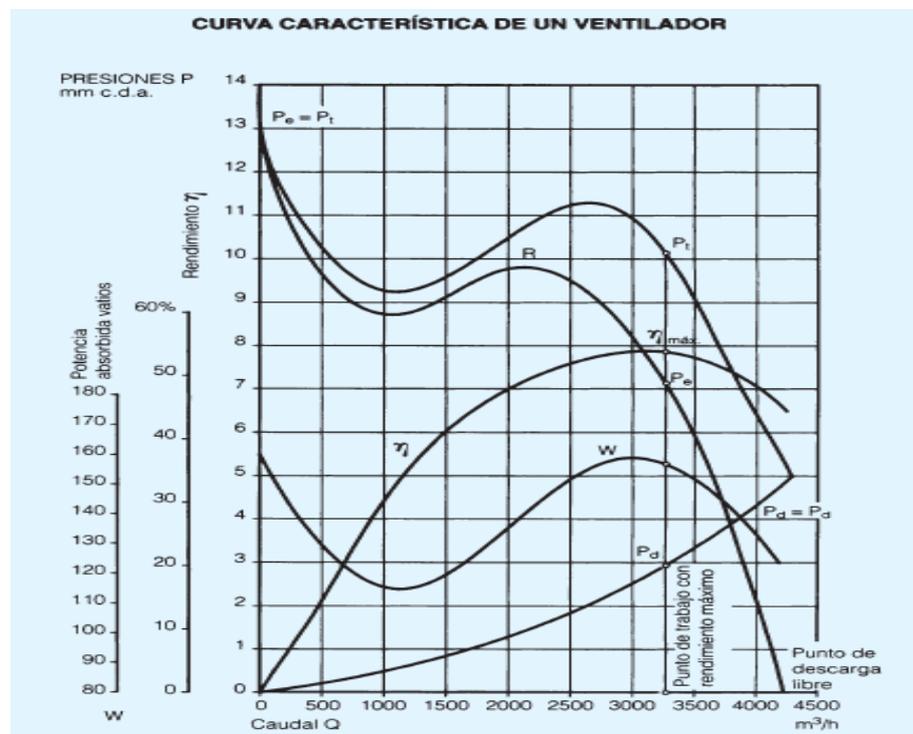


Figura A.4 Curva característica de los ventiladores (Escoda, 2003)

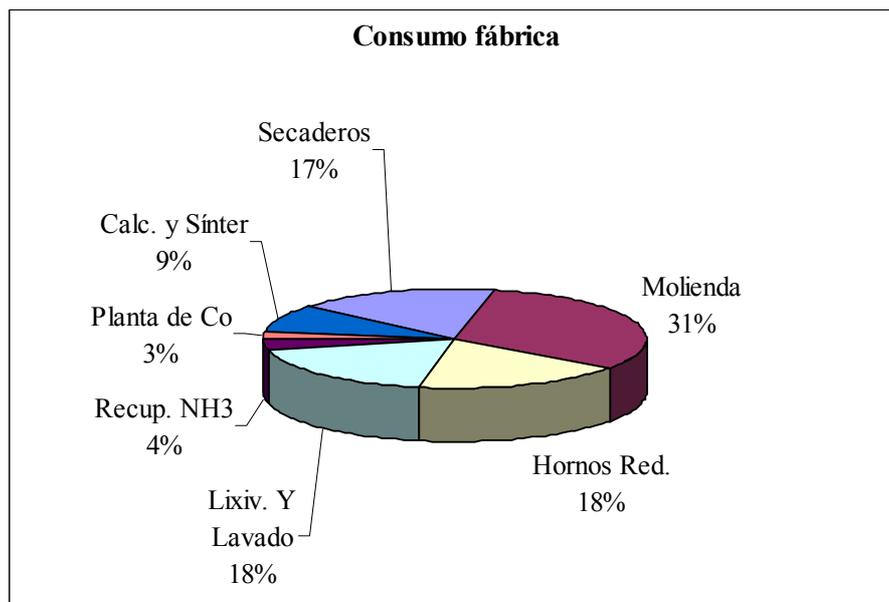


Figura A.5 Comportamiento de consumo energético de plantas principales del proceso

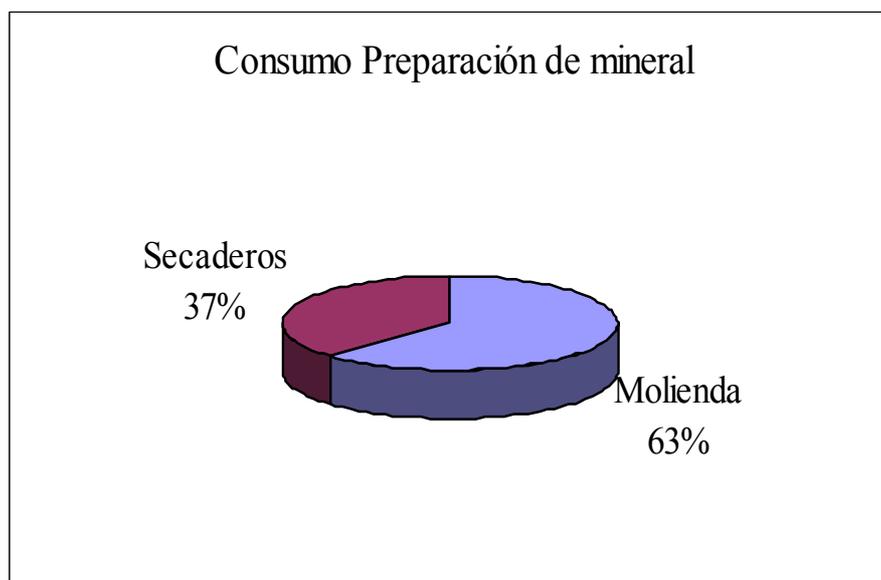


Figura A.6 Comportamiento de consumo energético en planta Preparación de mineral

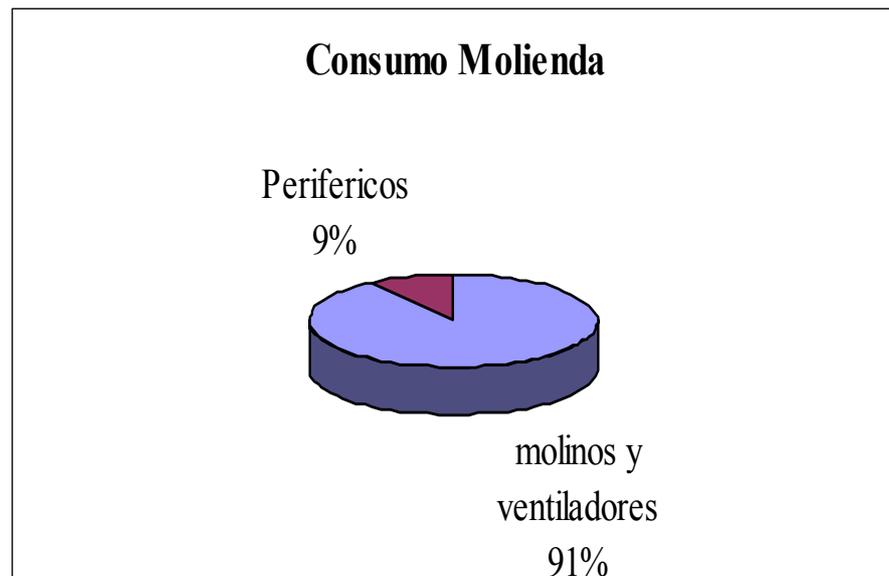


Figura A.7 Comportamiento de consumo energético en sección de molienda

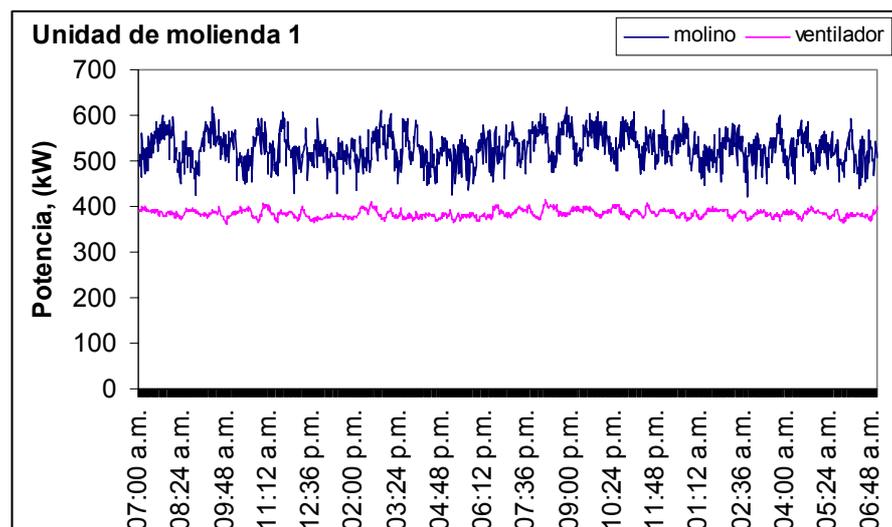


Figura A.8 Demanda de potencia unidad de molienda 1

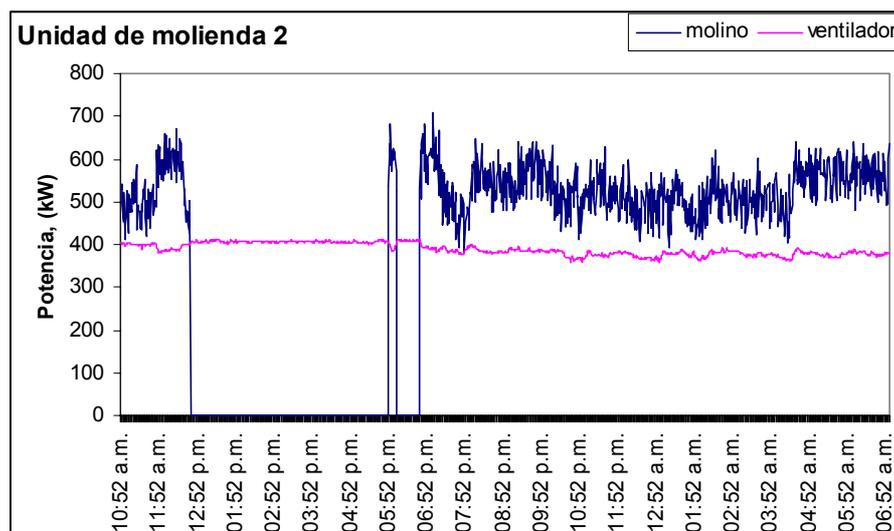


Figura A.9 Demanda de potencia unidad de molienda 2

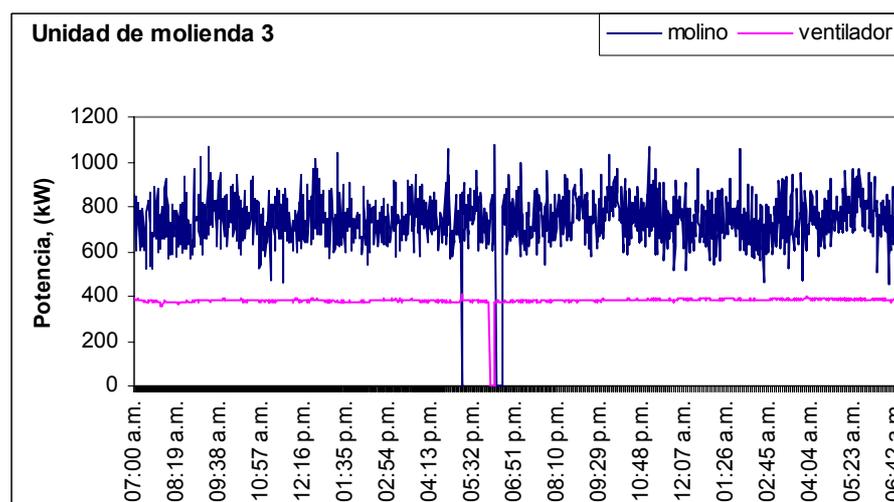


Figura A.10 Demanda de potencia unidad de molienda 3

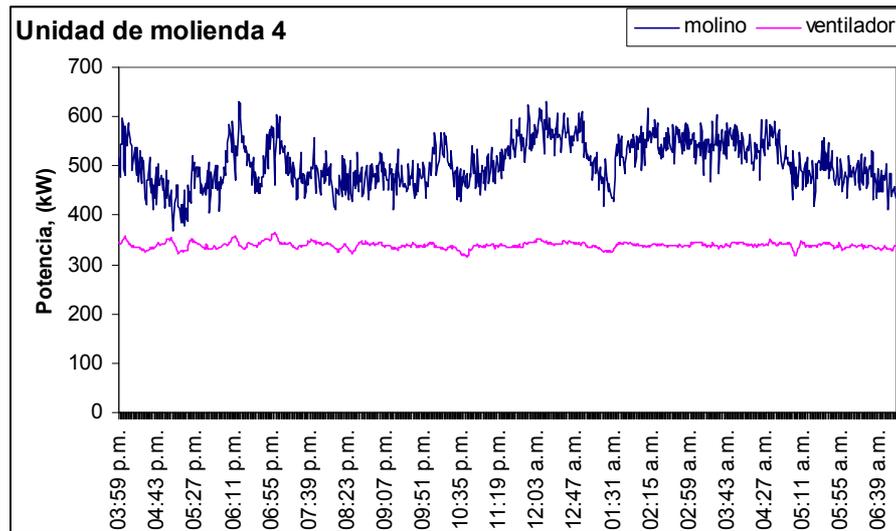


Figura A.11 Demanda de potencia unidad de molienda 4

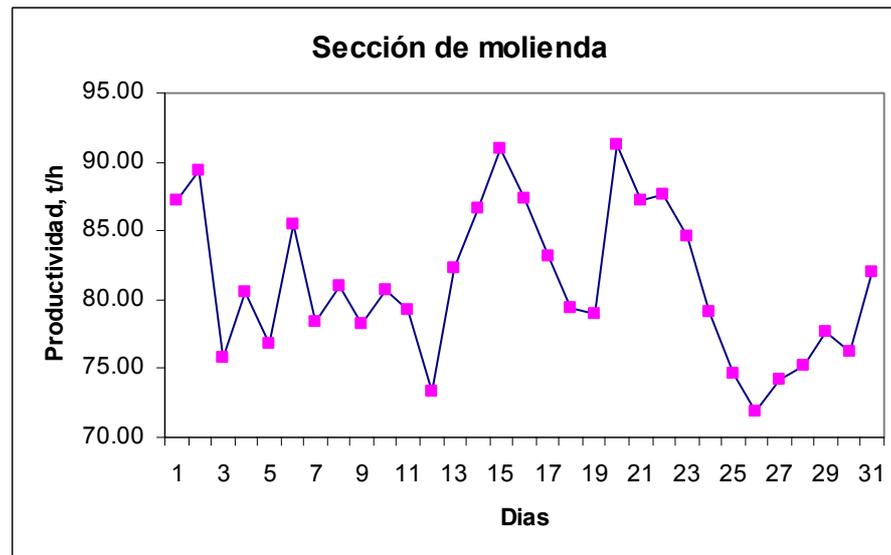


Figura A.12 Productividad promedio de la sección de molienda, un mes

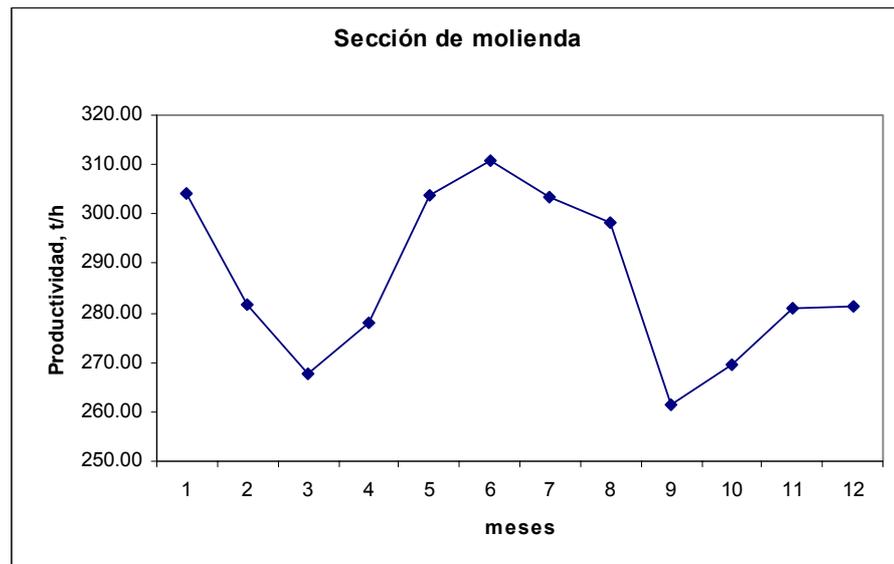


Figura A.13 Comportamiento de la productividad, 12 meses

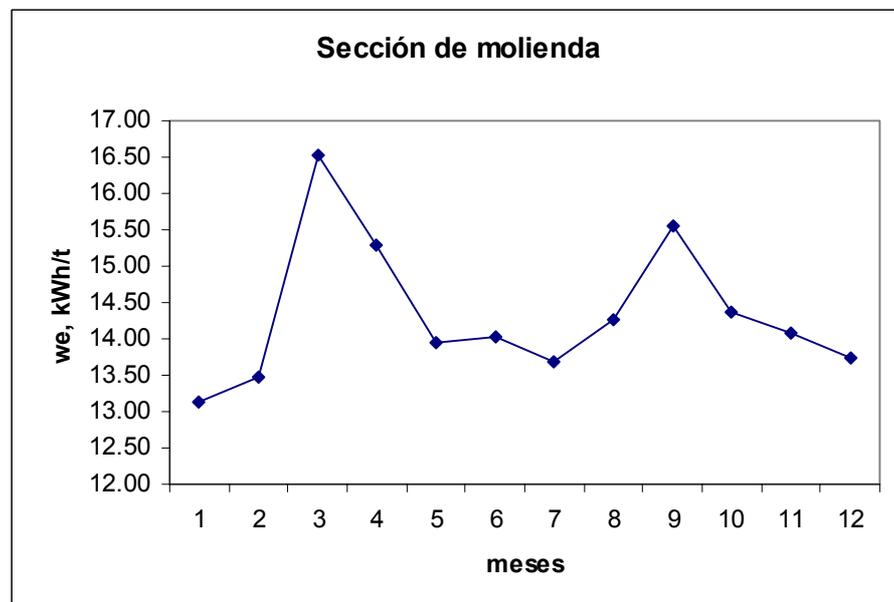


Figura A.14 Comportamiento del consumo específico de energía eléctrica, 12 meses

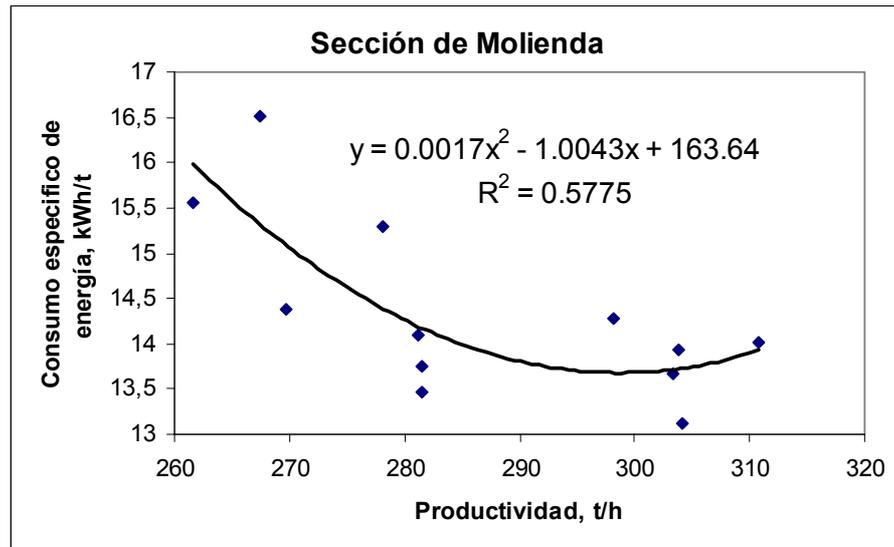


Figura A.15 Comportamiento del consumo específico de energía eléctrica (Histórico)

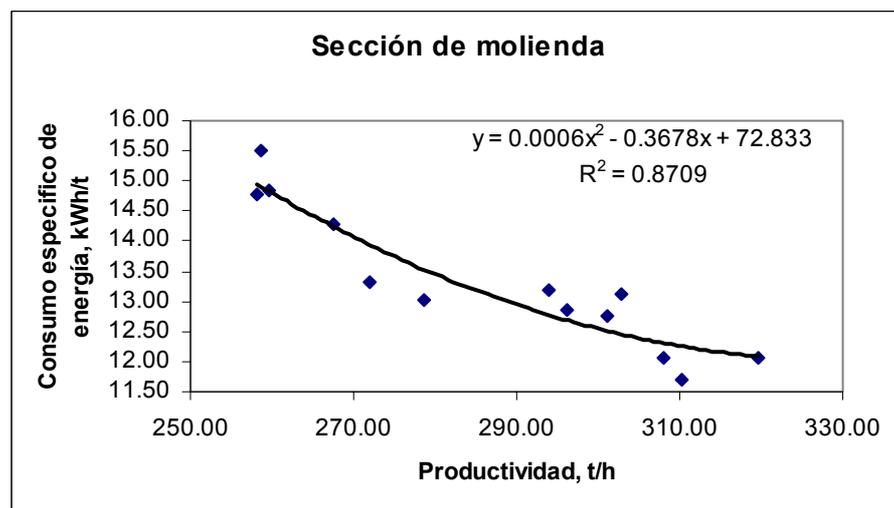


Figura A.16 Comportamiento del consumo específico de energía eléctrica aplicando el modelo para estimar la productividad

Tabla A.1 Consumo de energía de las plantas principales de proceso de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”

Plantas Principales	kWh	%
Secaderos	1653208	17.72
Molienda	3058578	32.79
Hornos de Reducción	1713077	18.36
Lixiviación y Lavado	1745547	18.71
Recuperación de NH <sub>3</sub>	342351	3.67
Planta de Cobalto	266981	2.86
Calcinación y Sínter	835195	8.95

Tabla A.2 Consumo de energía de la sección de molienda comparando las unidades (molinos y ventiladores) con los equipos secundarios

Sección de molienda	kWh	%
Molienda	3058578	100
Molinos y ventiladores	2771778	90.62
Equipos secundarios	286800	9.38

Tabla A.3 Consumo de energía en las unidades de molienda en un año

Meses	Unidad 1, (kWh)	Unidad 2, (kWh)	Unidad 3, (kWh)	Unidad 4, (kWh)
Enero	654568	537051	465368	650579
Febrero	683391	227640	587666	645379
Marzo	771563	741623	689819	568773
Abril	715811	616055	576526	657303
Mayo	720700	445816	557680	672783
Junio	660582	592915	468071	631698
Julio	689094	562473	588510	635494
Agosto	708947	626984	567124	591171
Septiembre	699438	666345	652700	647093
Octubre	648449	508039	632866	620123
Noviembre	667672	576667	628642	610697
Diciembre	668318	611344	636450	622303

Tabla A.4 Consumo de energía en las unidades de molienda (molinos y ventiladores) en un mes

Día	Mol 1, (kWh)	Vent 1, (kWh)	Mol 2, (kWh)	Vent 2, (kWh)	Mol 3, (kWh)	Vent 3, (kWh)	Mol 4, (kWh)	Vent 4, (kWh)	Total, (kWh)
1	11307	8640	11712	8400	9225	8520	10899	7560	76264
2	11966	9480	9502	9480	5114	6360	11493	8280	71677
3	2492	3000	12853	8760	7918	8280	11007	7920	62233
4	0,00	0,00	13456	8760	11909	9000	9122	8280	60531
5	0,00	0,00	13943	9120	12299	9240	11547	8160	64314
6	0,00	0,00	13780	8640	1789	9240	11461	8160	53076
7	58,00	0,00	13448	8880	22044	9000	11478	8040	72955
8	0,00	0,00	12969	8640	11531	9120	11463	8160	61891
9	0,00	0,00	12992	8760	11759	9120	11151	8040	61831
10	0,00	0,00	12994	8880	2258	9240	10266	7920	51568
11	0,00	120,00	13910	9120	20815	9600	11981	8520	74077
12	3767	3360	11573	8640	10274	9000	11169	8040	65835
13	7072	9480	10124	8880	9937	9000	11126	7920	73552
14	8348	9600	13021	9000	4717	9480	10985	8160	73325
15	11863	8880	7701	8520	8419	8760	11651	7680	73489
16	11144	9480	12158	9000	9838	9360	11399	8040	80435
17	12647	9000	5984	9000	7053	8640	11146	7800	71287
18	12672	9240	9768	9120	11596	9240	8141	5760	75555
19	10338	8280	12004	8760	12749	9480	11620	8520	81770
20	12397	9360	11573	9000	11730	9360	3878	3480	70798
21	12132	9000	7521	9000	11285	8880	968	5040	63847
22	12132	9000	7521	9000	11285	8880	968	5040	63848
23	1132	8230	12150	8998	9828	9380	11140	7805	68663
24	13006	9360	11489	9240	12235	9360	3032	3480	71226
25	11965	8640	7050	8280	11400	8640	5726	4800	66526
26	12907	9840	6741	9720	11996	9600	2599	3360	66789
27	12395	9480	7480	7200	11820	9480	5542	8880	72304
28	11770	9120	12389	8880	12612	9000	6670	8280	78749
29	12498	9000	12463	8760	12072	8880	4038	8520	76260
30	11169	9120	11345	8880	12195	9000	2994	8640	73373
31	11287	9480	9594	9240	11915	9240	5458	6720	72965

Tabla A.5 Características del mineral a procesar en molienda

Día	Humedad, (%)	SM2 , (%)				
		Ni	Fe	Co	SiO2	MgO
1	3,95	1,14	40,52	0,11	10,05	4,02
2	4,51	1,09	39,49	0,09	9,64	3,92
3	4,16	1,07	40,21	0,09	9,66	3,87
4	4,59	1,21	41,12	0,09	9,98	4,36
5	4,78	1,12	40,45	0,09	9,85	4,37
6	4,80	1,15	40,56	0,10	10,96	5,34
7	4,30	1,18	41,41	0,10	9,98	4,29
8	4,13	1,27	38,87	0,10	11,55	5,93
9	3,80	1,25	41,42	0,10	9,92	4,28
10	3,90	1,21	41,46	0,08	7,57	3,18
11	3,90	1,21	41,73	0,08	8,36	3,77
12	3,80	1,20	40,89	0,09	9,60	4,71
13	3,60	1,12	40,51	0,08	9,44	4,30
14	3,95	1,19	41,59	0,10	10,24	4,32
15	4,08	1,16	41,61	0,09	10,41	4,32
16	3,71	1,20	41,76	0,10	9,01	3,64
17	3,89	1,24	40,71	0,11	9,99	4,33
18	3,40	1,18	42,22	0,09	8,30	3,56
19	3,34	1,37	39,85	0,10	10,90	5,48
20	4,64	1,25	41,63	0,12	9,08	4,09
21	4,66	1,29	42,32	0,09	8,73	3,70
22	4,66	1,17	41,50	0,08	8,36	3,08
23	4,03	1,14	37,71	0,08	11,97	5,82
24	4,30	1,29	43,27	0,11	8,35	3,66
25	4,60	1,17	41,72	0,11	9,09	4,14
26	5,08	1,27	42,53	0,09	8,91	3,56
27	4,91	1,26	41,74	0,12	9,83	4,01
28	4,46	1,13	38,51	0,10	12,21	5,85
29	4,86	1,14	39,67	0,10	11,43	5,07
30	4,55	1,15	41,68	0,13	10,26	4,78
31	4,58	1,21	43,44	0,11	7,66	3,34

Tabla A.6 Características del mineral procesado en molienda

Día	SM8 – 1 , (%)					SM8 – 2 , (%)				
	Ni	Fe	Co	100	-200	Ni	Fe	Co	100	-200
1	1,12	39,30	0,095	6,27	87,17	1,14	39,10	0,10	6,91	86,62
2	1,11	40,40	0,097	6,60	87,48	1,09	39,20	0,09	6,27	88,02
3	1,11	40,50	0,092	6,96	87,95	1,16	40,70	0,10	6,11	88,13
4	1,07	39,50	0,09	6,67	85,74	1,10	39,20	0,09	6,13	87,12
5	1,08	38,60	0,09	7,52	84,19	1,08	40,30	0,10	6,77	85,62
6	1,14	41,00	0,1	6,34	87,47	1,18	38,30	0,10	6,26	87,92
7	1,16	40,00	0,095	6,30	88,00	1,15	40,30	0,11	6,15	87,63
8	1,10	41,26	0,104	7,03	87,01	1,12	41,23	0,11	6,55	87,72
9	1,28	38,54	0,096	6,87	87,21	1,30	37,96	0,09	6,38	88,23
10	1,22	41,00	0,096	6,18	88,61	1,22	40,90	0,10	6,49	87,91
11	1,20	41,40	0,092	6,30	88,00	1,19	42,00	0,09	6,81	87,10
12	1,05	38,70	0,082	6,29	86,84	1,10	39,60	0,09	6,94	85,74
13	1,01	40,30	0,083	6,10	87,15	1,06	41,00	0,09	6,42	86,02
14	1,13	41,20	0,097	6,49	87,21	1,12	41,40	0,10	6,25	88,15
15	1,17	42,40	0,097	7,13	86,12	1,18	42,00	0,09	7,06	87,19
16	1,19	39,30	0,099	6,82	87,92	1,20	39,40	0,10	6,37	88,07
17	1,18	39,84	0,092	6,83	87,37	1,21	37,74	0,09	6,45	87,93
18	1,14	41,90	0,1	6,69	88,04	1,17	42,40	0,10	6,15	88,15
19	1,20	40,20	0,109	6,30	88,10	1,21	40,60	0,11	6,69	87,82
20	1,22	40,90	0,114	6,05	87,56	1,21	41,20	0,11	7,18	84,49
21	1,16	41,50	0,091	5,89	86,97	1,17	41,80	0,09	6,62	85,12
22	1,19	40,00	0,085	5,81	88,69	1,20	40,30	0,09	5,62	89,08
23	1,18	42,70	0,085	5,62	88,98	1,20	42,30	0,08	5,20	89,10
24	1,21	38,43	0,088	6,69	87,36	1,21	39,08	0,09	6,43	87,89
25	1,10	40,55	0,098	6,48	87,88	1,19	39,48	0,10	6,25	88,29
26	1,15	41,30	0,101	6,70	88,17	1,14	40,80	0,10	6,22	88,28
27	1,18	39,60	0,099	6,74	87,96	1,17	40,70	0,10	6,80	88,03
28	1,13	39,40	0,096	7,40	84,84	1,13	39,50	0,09	6,68	86,21
29	1,06	40,30	0,095	7,75	83,88	1,08	40,40	0,10	7,31	84,77
30	1,28	39,30	0,103	7,61	85,55	1,17	39,90	0,10	6,60	87,25
31	1,09	41,10	0,099	6,40	87,79	1,12	41,00	0,10	6,63	88,25

Tabla A.7 Parámetros de los ventiladores de recirculación para diferentes posiciones de la válvula de regulación

Punto de medición	Válvula, %	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	PE, Pa	Temperatura, °C	Velocidad, m/s	Flujo trabajo, m <sup>3</sup> /h
Recirculación	70	1.12	-588.40	40	13.29	63430
Entrada separador	70		-3873.63			
Salida ciclón	70	1.05	-8090.49	35	13.8	126359
Recirculación	50	1.12	-382.46	40	14.72	70246
Entrada separador	50		-4020.73			
Salida ciclón	50	1.06	-7943.39	35	13.23	121163
Recirculación	30	1.13	-156.91	40	18.2	86856
Entrada separador	30		-3628.46			
Salida ciclón	30	1.06	-7256.92	35	13.14	120336
Recirculación	50-5	1.12	-353.04	40	14.65	69952
Entrada separador	50-5		-3971.69			
Salida ciclón	50-5	1.06	-7943.39	35	13.49	123454
Recirculación	70-5	1.12	-588.40	40	12.25	58468
Entrada separador	70-5		-4265.89			
Salida ciclón	70-5	1.06	-8433.72	35	13.28	121611

Tabla. A.8 Consumo específico de energía en la sección de molienda, según estadístico (Histórico)

Meses	Productividad, (t/h)	Consumo Sección, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	We Sección, (kWh/t)
1	304.18	2307566.00	7.47	5.65	13.13
2	281.56	2144076.00	7.47	6.01	13.47
3	267.50	2771778.00	10.36	6.16	16.52
4	278.17	2565695.00	8.93	6.35	15.29
5	303.78	2396979.00	8.20	5.73	13.94
6	310.78	2353266.00	8.27	5.75	14.02
7	303.38	2475571.00	8.06	5.62	13.68
8	298.22	2494226.00	8.42	5.85	14.27
9	261.58	2665576.00	9.45	6.11	15.56
10	269.63	2409477.00	8.61	5.77	14.38
11	281.13	2483678.00	8.35	5.74	14.09
12	281.48	2538415.00	8.16	5.59	13.75

Tabla A9 Consumo de energía eléctrica en la unidad de molienda 1, según modelo 3.3

Días	Productivi dad, (t/h)	Tiempo de operación, (h)	Produc ción, (t)	Consumo unidad, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	Weu, (kWh/t)
1	81.43	18.80	1530.88	17283.68	6.50	4.79	11.29
2	81.40	12.66	1030.52	11871.64	6.65	4.88	11.52
3	70.76	13.01	920.59	11903.20	7.51	5.41	12.93
4	75.25	23.00	1730.75	20976.69	7.02	5.11	12.12
5	70.20	19.50	1368.90	18096.86	6.92	5.50	13.22
6	70.00	24.00	1680.00	21890.40	7.54	5.48	13.03
7	65.99	24.00	1583.76	21127.36	7.47	5.87	13.34
8	65.99	24.00	1583.76	19369.38	6.40	5.83	12.23
9	64.58	24.00	1549.92	22365.35	8.45	5.98	14.43
10	64.58	20.00	1291.60	17165.36	7.22	6.07	13.29
11	64.58	24.00	1549.92	22752.83	8.69	5.99	14.68
12	64.30	24.00	1543.20	22345.54	8.46	6.02	14.48
13	62.51	23.50	1468.99	21873.84	8.77	6.12	14.89

Tabla A.10 Consumo de energía eléctrica en la Unidad de Molienda 2, según modelo 3.3

Días	Producción, (t/h)	Tiempo de operación, (h)	Producción, (t)	Consumo Unidad, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	Weu, (kWh/t)
1	73.71	21.08	1553.81	20215.03	7.87	5.14	13.01
2	58.97	18.45	1087.96	17919.30	9.91	6.56	16.47
3	75.82	13.16	997.74	11494.55	6.37	5.15	11.52
4	76.66	10.82	829.44	10418.03	7.65	4.91	12.56
5	76.66	18.16	1392.12	16984.18	7.15	5.05	12.20
6	80.03	12.30	984.34	11546.65	6.92	4.81	11.73
7	84.24	13.58	1143.98	12023.22	5.86	4.65	10.51
8	71.60	17.00	1217.27	16517.40	8.27	5.30	13.57
9	54.76	17.66	966.99	17281.39	10.83	7.04	17.87
10	60.23	10.30	620.34	9458.08	8.79	6.46	16.37
11	59.81	13.16	787.10	12392.77	9.56	6.18	15.74
12	59.80	16.57	991.06	15946.16	9.64	6.38	16.09
13	66.55	12.00	798.60	11462.19	8.50	5.85	14.35

Tabla A11 Consumo de energía eléctrica en la Unidad de Molienda 3, según modelo 3.4

Días	Producti vidad, (t/h)	Tiempo de operación, (h)	Produc ción, (t)	Consumo unidad, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, kWh/t)	Weu, (kWh/t)
1	98.53	19.58	1929.26	22186.45	7.62	3.88	11.50
2	98.53	13.00	1280.92	15114.81	7.88	3.92	11.80
3	100.60	19.00	1911.44	22268.25	7.88	3.77	11.65
4	95.22	16.00	1523.52	18282.24	8.02	3.98	12.00
5	94.39	19.32	1823.65	21737.95	7.93	3.99	11.92
6	82.80	14.32	1185.67	16765.74	9.56	4.58	14.14
7	84.87	24.00	2036.88	27394.88	8.76	4.50	13.45
8	89.01	24.00	2136.24	27002.46	8.62	4.30	12.64
9	86.94	24.00	2086.56	27603.34	8.82	4.36	13.23
10	95.22	24.00	2285.28	27500.80	8.04	3.99	12.03
11	87.15	22.75	1982.59	26566.76	8.90	4.50	13.40
12	99.36	24.00	2384.64	28758.76	8.04	4.02	12.06
13	86.94	22.00	1912.68	25706.42	8.94	4.50	13.44

Tabla A.12 Consumo de energía eléctrica en la Unidad de Molienda 4, según modelo 3.4

Días	Producción, (t/h)	Tiempo de operación, (h)	Producción, (t)	Consumo unidad, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	Weu, (kWh/t)
1	65.93	24.00	1582.42	19917.86	7.46	5.13	12.59
2	63.94	24.00	1534.46	19791.05	7.64	5.31	12.90
3	60.74	24.00	1457.74	18076.22	6.69	5.65	12.40
4	63.14	23.00	1452.15	17250.00	6.65	5.23	11.88
5	59.94	23.58	1413.39	19611.41	8.15	5.72	13.88
6	61.14	23.58	1441.65	19606.86	8.07	5.53	13.60
7	61.14	17.00	1039.36	14135.57	8.04	5.56	13.60
8	51.95	8.00	415.60	6774.28	9.75	6.53	16.30
9	51.95	11.00	571.45	9143.20	9.42	6.45	16.00
10	51.95	9.57	497.14	7656.29	8.95	6.45	15.40
11	47.15	8.00	377.20	6832.00	10.92	7.19	18.11
12	43.96	14.00	615.44	11998.00	11.77	7.73	19.49
13	43.56	15.00	653.40	12750.00	11.52	8.00	19.51

Tabla A.13 Consumo de energía eléctrica en la sección de molienda, según modelos (3.3 y 3.4)

Días	Producción, (t/h)	Tiempo operación, (h)	Producción, (t)	Consumo de la Sección, (kWh)	Wem, (kWh/t)	Wev, (kWh/t)	We Secc. , (kWh/t)
1	319.60	83.46	6596.37	79603.02	7.65	4.72	12.37
2	302.84	68.11	4933.86	64696.80	8.48	5.26	13.72
3	307.92	69.17	5287.51	63742.22	6.98	4.86	11.86
4	310.27	72.82	5535.86	66926.96	7.44	4.71	12.15
5	301.19	80.56	5998.06	76430.40	7.74	4.92	12.67
6	293.97	74.20	5291.66	69809.65	8.18	4.97	13.16
7	296.24	78.58	5803.98	74681.03	7.55	4.90	12.52
8	278.55	73.00	5352.87	69663.52	8.88	5.38	14.17
9	258.23	76.66	5174.92	76393.28	9.69	5.95	15.70
10	271.98	63.87	4694.36	61780.53	8.59	5.63	14.60
11	258.69	67.91	4696.81	68544.36	9.79	5.96	15.75
12	267.42	78.57	5534.34	79048.46	9.82	6.04	15.88
13	259.56	72.50	4833.67	71792.45	9.65	6.12	15.77