



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

Dr. Antonio Núñez Jiménez

FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE DIPLOMA

TÍTULO: *“Comportamiento energético del proceso de molienda de las menas lateríticas en la Empresa de Níquel Comandante Ernesto Che Guevara.”*

DIPLOMANTE: Reydel Casa Roca

TUTORES: Dr. Reynaldo Laborde Brown

MSc. José Miguel Mendoza Sierra

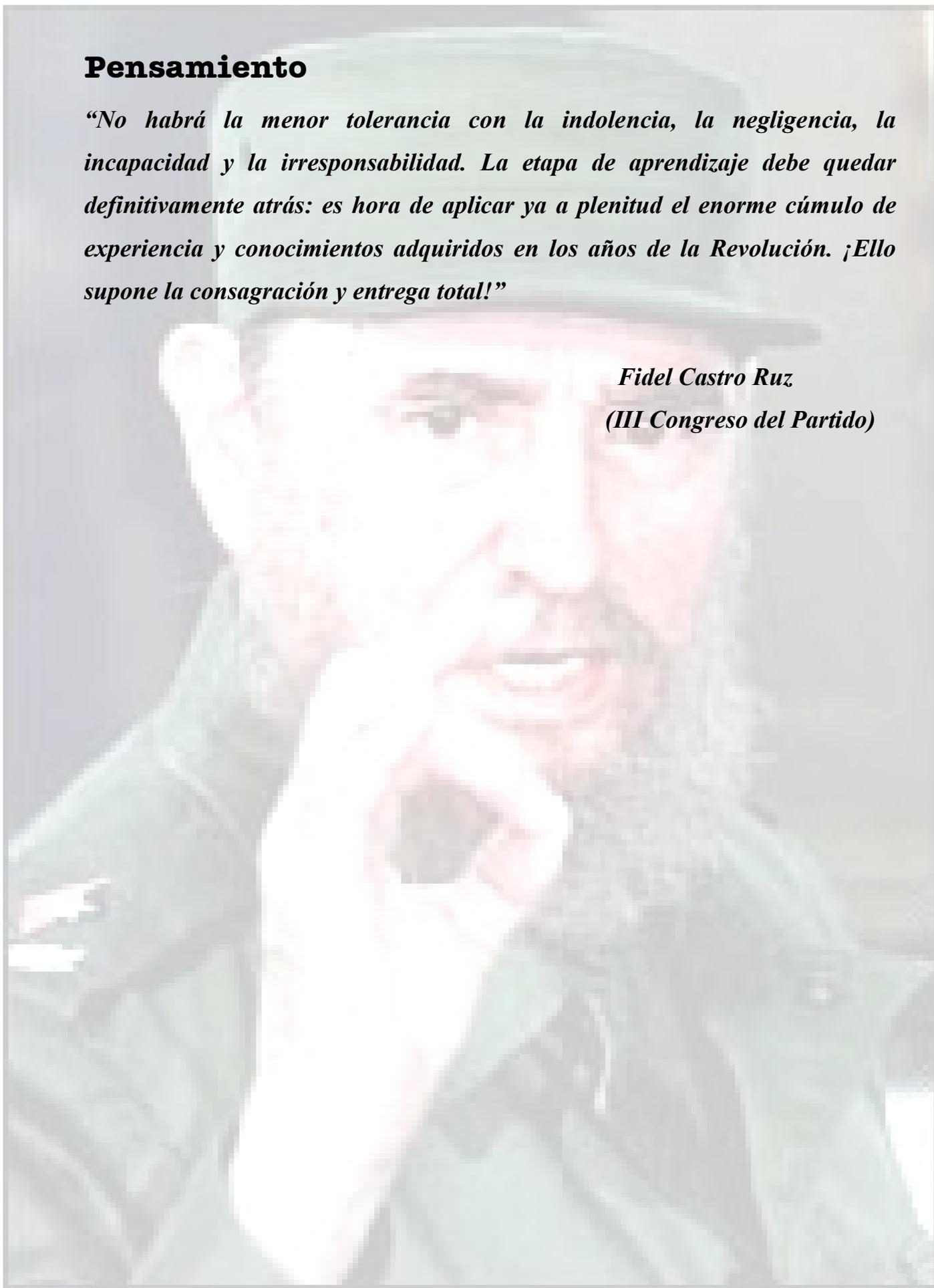
Ing. Osmany Pérez Aballe

MOA- 2012

Pensamiento

“No habrá la menor tolerancia con la indolencia, la negligencia, la incapacidad y la irresponsabilidad. La etapa de aprendizaje debe quedar definitivamente atrás: es hora de aplicar ya a plenitud el enorme cúmulo de experiencia y conocimientos adquiridos en los años de la Revolución. ¡Ello supone la consagración y entrega total!”

*Fidel Castro Ruz
(III Congreso del Partido)*



Agradecimientos

Agradezco la realización de este trabajo:

A **Dios** por haberme dado la vida y por permitirme llegar hasta aquí.

A mi madre **Marilyn Roca Lobaina** por su apoyo en toda mi carrera y su dedicación a prepararme para el futuro.

A mi esposa **Maybelis Blanco Cuenca** por estar siempre a mi lado apoyándome en los estudios y brindándome su amor y comprensión.

A mis tutores: **Dr. Reynaldo Laborde Brown, Msc. José A. Mendoza Sierra** y el **Ing. Osmany Pérez Aballe** por depositar su confianza en mí para la realización de este trabajo.

A mi amigo y hermano en Cristo, **Rubén Alejandro Rosell** por su apoyo incondicional y su dedicación.

A la **Revolución Cubana** por darme la oportunidad de formarme como un profesional para cumplir con mi deber revolucionario de contribuir al desarrollo de mi país.

A todos aquellos que de una forma u otra aportaron su granito de arena y dedicaron parte de su valioso tiempo en mí.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a:

Dios por lo bueno que ha sido conmigo.

Marilyn Roca Lobaina quien es y será mi heroína, además de mi madre.



Hoja de firmas

Este trabajo de diploma ha sido revisado y aprobado por las instancias correspondientes y para que así conste se firma el presente.

Tutor

Nombre: _____

Firma: _____

Fecha: _____

Organismo: _____

Tutor

Nombre: _____

Firma: _____

Fecha: _____

Organismo: _____

Tutor

Nombre: _____

Firma: _____

Fecha: _____

Oponente

Nombre: _____

Firma: _____

Fecha: _____

Organismo: _____

J Dpto.

Nombre: _____

Firma: _____

Fecha: _____

Organismo: _____

Declaración de Autoría

Declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y autorizo al Instituto Superior Minero Metalúrgico para que haga de este trabajo de diploma el uso que estime pertinente.

Firma: _____

Resumen

El presente trabajo fue desarrollado en la sección de molienda de la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara”, la cual ocupa el primer lugar dentro de las empresas más consumidoras de energía eléctrica de la provincia, con 350 194.4 MWh/año y su sección de molienda el segundo dentro de los procesos de la misma con 68531 MWh/año (*Datos de Economía Energética 2011*). El objetivo fundamental del trabajo es caracterizar, desde el punto de vista energético, el proceso de molienda (molinos de bolas y ventiladores de recirculación), una vez que se ha reducido a 10 mm el tamaño máximo de partículas del material de alimentación a los molinos. En el presente se realiza un estudio del comportamiento energético de la sección de molienda de la Planta de Preparación de Minerales teniendo en cuenta las características del material alimentado y del flujo de alimentación fresca al molino. Los datos presentados en el mismo son producto de lecturas diariamente tomadas en los metrocontadores y multímetro de las unidades en cuestión. Los datos registran un consumo inferior al determinado por Rodolfo Pérez Pérez en la obra *“Comportamiento Energético del proceso de molienda de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara”* antes de que se redujera el tamaño de las partículas a alimentar. En el estudio se determina el consumo específico de cada molino y respectivo ventilador, así como de cada unidad completa. Se muestran gráficos de comportamiento de consumo y potencias en el tiempo. Aunque solo se tuvo en cuenta el consumo diario por 20 días se puede apreciar claramente que la molienda sigue siendo la operación más intensiva en el consumo de energía del procesamiento de minerales.

Abstract

This research paper was performed at Commander Ernesto Che Guevara Nickel Processing plant ore grinding section, the greatest power consumer company in the province, with 350 194.4 MWh/year and its ore grinding section is the second power consumer with 68 531 MWh/year (Energetic Economy Data / 2011). This paper main aim is characterizing since the energetic point of view the ore grinding process (ball ore mills and recirculation fans), once the maximum ore feed particle size has been reduced to 10 mm to the ore mills. A research on energetic behavior is being carried out at present the ore preparation plant taking into consideration the feed characteristics and the fresh feed flow to the ore mill. The data compiled on this process are from daily readings taken at the meter counters and the multilink on the units being studied. The data compiled on this issue shows a consumption which is smaller to the consumption determined by Rodolfo Pérez Pérez in the work *“energetic Behavior Commander Ernesto Che Guevara Nickel Processing Plant” before reducing ore particle size to be fed. The specific consumption of each ore mill and fan and complete unit is determined*. Graphs on consumption behavior and power on time are shown. Although only the daily consumption was taken into consideration for 20 days, it can be clearly seen that ore grinding continuous to be the most intensive operation regarding power consumption for ore processing.

Índice	Pág.
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Introducción	1
1.2. Análisis Bibliográfico	2
1.3. Fundamentación Teórica	6
1.4. Molinos de Bolas y Ventiladores	7
1.5. Factores que afectan la eficiencia de la molienda	16
1.6. Productividad y consumo específico de energía	18
1.7. Conclusiones	19
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1. Introducción	20
2.2. Datos Generales de la Fábrica	21
2.3. Caracterización del proceso de molienda	23
2.4. Caracterización del equipamiento de la sección de molienda	27
2.5. Instrumentos utilizados	29
2.6. Características generales del mineral	30
2.7. Descripción del experimento	31
2.8. Conclusiones	34
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
3.1. Introducción	35
3.2. Consumo Diario	36
3.3. Consumo por molinos y ventiladores	37
3.4. Consumo tomando las lecturas cada una hora	42
3.5. Comportamiento de la potencia de la unidad 4	45
3.6. Consumo específico de energía de las unidades de molienda	46
3.7. Análisis de los resultados	49
3.8. Valoración Económica	50
3.9. Conclusiones	50
CONCLUSIONES GENERALES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXO I (figuras)	

INTRODUCCIÓN

La subida en los últimos años de los costes energéticos, la presión medioambiental y la bajada progresiva de los precios de mercado de algunos concentrados metálicos de gran importancia económica ha inducido la necesidad, en la industria minera en general y en las plantas de beneficio en particular, de una mejora de la eficiencia de sus operaciones. Un punto importante en dicha mejora lo constituye el rendimiento energético de las operaciones. Así, dentro de este planteamiento, es importante definir que los procesos de conminución, y en especial los procesos de molienda, juegan un papel esencial dentro de la industria minera debido a que representa una gran parte dentro del coste total de operación y de la eficacia global del proceso. La Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” ocupa el primer lugar dentro de las empresas más consumidoras de energía eléctrica de la provincia, con 350 194.4 MWh/año. Desde el 2008 hasta el 2011 hubo un incremento del consumo energético general de 182 457.4 MWh/año. En la misma la molienda representa el 20% de toda la energía consumida por la entidad, total de la suma entre la generación y la que se consume del SEN (Sistema Energético Nacional). Esto se puede apreciar en la figura 1.1, construida a partir de los datos del año 2011 proporcionados por el Dpto. de Economía Energética.

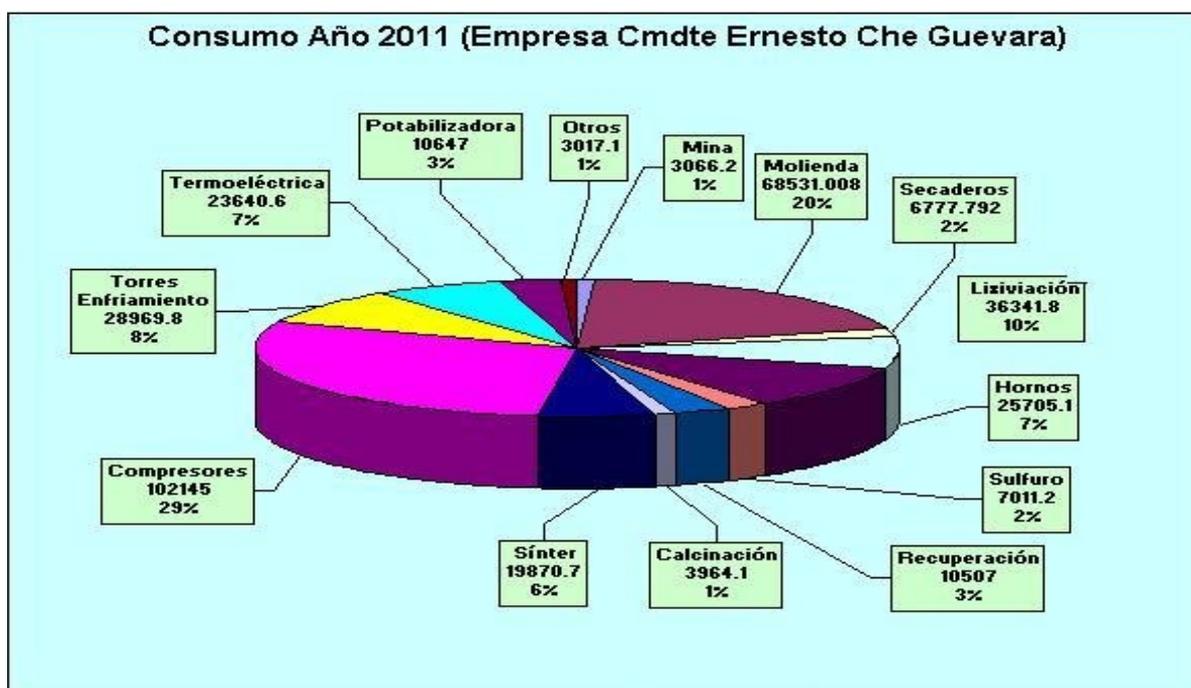


Figura 1.1: Distribución de consumos energéticos de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara (Año 2011).

En dicha figura, se muestra la distribución típica del consumo de energía por plantas, desde las operaciones de Preparación del Mineral (secado, trituración y molienda), hasta los consumos en servicios generales.

Ésta es la razón por la que se hace necesario que los procesos tecnológicos que consumen más energía sean verificados con el objetivo de racionalizar el consumo de los portadores energéticos. Cumpliendo así con el Lineamiento 253: *“Perfeccionar el trabajo de planificación y control del uso de portadores energéticos, ampliando los elementos de medición y la calidad de los indicadores de eficiencia e índices de consumo establecidos.”*

Se estima que la molienda, siendo la operación más intensiva en el consumo de energía del procesamiento de minerales, consume aproximadamente el 3% de la energía que producen los países industrializados, esto es porque se requiere del trabajo continuo de los molinos de bolas y sus correspondientes ventiladores de recirculación, mientras que en las plantas de beneficio entre el 50 y 70 % del gasto energético corresponde a esta labor.

Específicamente en la sección de molienda de la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara” la potencia instalada es de poco más de 8,5 MW, por lo que cualquier acción que conduzca al mejoramiento del indicador energético de los molinos de esta entidad, redundará en una disminución de los costos de operación y de hecho en los de producción del níquel y cobalto.

La molienda del mineral laterítico en particular, constituye la tercera etapa del beneficio de mineral destacándose como uno de los mayores consumidores de energía eléctrica de las plantas principales. Esto obliga a determinar las regularidades del proceso que indiquen los consumos específicos de electricidad en función de establecer un índice representativo.

En este contexto, se entiende que resulta de especial interés la posibilidad de predicción del consumo energético en el que se puede incurrir en las operaciones de fragmentación, a la hora de diseñar o incluso optimizar operaciones de este tipo.

En el presente trabajo se pretende estudiar el comportamiento energético de la unidad de molienda de la Planta de Preparación de Minerales de la Empresa “Cmdte. Ernesto Che Guevara”

Problema

Poco conocimiento sobre la caracterización energética de la sección de molienda de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara, después de haber limitado a un tamaño máximo de 10 mm las partículas del material de alimentación a los molinos.

Objetivo General

Caracterizar, desde el punto de vista energético, el proceso de molienda de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara, una vez que se ha reducido a 10 mm el tamaño máximo de partículas del material de alimentación a los molinos.

Objetivos Específicos

- Evaluar el comportamiento de las potencias y del consumo de energía de los molinos de bolas y de los ventiladores de recirculación, durante el proceso de producción.
- Evaluar el comportamiento del consumo específico de energía de las unidades de molienda y de la sección en general.

Objeto de Estudio

Sección de Molienda de la *Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara*.

Hipótesis

El registro de las principales magnitudes eléctricas (potencia, energía) de los accionamientos de los molinos de bolas y de sus respectivos ventiladores de recirculación, así como el registro de los indicadores de producción y el tiempo de trabajo de las unidades de molienda, permiten la caracterización energética de dicho proceso para las condiciones específicas de alimentación con material cuyo tamaño máximo de partículas es inferior a los 10 mm.



Tareas

Para dar cumplimiento a los objetivos trazados, se proponen las siguientes tareas:

- Análisis bibliográfico.
- Recopilación de la información correspondiente al equipamiento de la sección de molienda.
- Registro de las principales magnitudes eléctricas de los molinos y ventiladores, así como de las variables asociadas al proceso productivo.
- Procesamiento de la información.
- Valoración económica

Campo de Acción

Comportamiento energético de las unidades de molienda en la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara.

CAPÍTULO I**MARCO TEÓRICO****1.1 Introducción.**

En la industria de procesamiento de minerales, la molienda es una de las operaciones unitarias más importantes. En el presente capítulo se desea analizar los estudios realizados por varios autores que han aportado teorías para enriquecer los conocimientos sobre el proceso de molienda y su consumo de energía eléctrica, así como la fundamentación teórica para comprender el tema desarrollado en el mismo.

1.2 Análisis Bibliográfico.

En el tema de la economía energética, varios autores han realizado trabajos con vista a reducir el consumo de la planta de preparación de minerales. Entre los principales estudios se encuentran aquellos que tienen como objetivo determinar valores reales de consumo energético, y las razones que provocan la variabilidad de estos. A continuación se valoran algunos ellos:

1. **Austín** (1964) estableció que la energía útil en el rompimiento del mineral no supera el 3% de toda la energía consumida por el molino. En la molienda, por ejemplo, la energía de desmenuzamiento del material ocurre de forma desmedida, el grado de liberación necesario se alcanza a costa de una alta remolienda de uno o varios de los minerales “participantes”, de ahí su baja eficiencia. **Beke** en ese mismo año determinó que el consumo de energía en el rompimiento del mineral no supera el 0,6%, a pesar de la diferencia en los resultados de ambos investigadores, si debemos de estar de acuerdo (según **Coello**, 2003) en que la energía que se consume propiamente en el rompimiento de la partícula mineral es sumamente pequeña.
2. En la obra *“Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales”* por **Andreiev S.E; Perov V.A y Zverievich V.V** se brindan los aspectos teóricos fundamentales acerca de las tres operaciones básicas en los procesos de preparación de minerales que son cribados, trituración y molienda.
3. En la obra *“Determinación del índice de trabajo o índice Bond para los minerales lateríticos”* del **Ing. Yosbani Reina Licea** se realiza una profunda investigación sobre el consumo específico de energía en los minerales lateríticos, en el cual se determina el índice de trabajo de mezclas de dicho mineral, mediante la realización de la prueba de Bond a escala de laboratorio, y mediante la simulación aplicando el modelo cinético acumulativo; a pesar de la profunda investigación realizada por el autor de esta obra, no se determina el índice de trabajo en mineral industrial a escala de laboratorio, no se estima el índice de trabajo operacional a escala industrial.
4. En la obra *“Modelación a escala de laboratorio del proceso de molienda del mineral laterítico procedente de los yacimientos de Punta Gorda”* por **Núñez G, Y. y Pérez G, S.** se realiza una extensa investigación sobre la cinética de molienda en los minerales lateríticos, para la determinación de los coeficientes, la razón de la



fragmentación y función de la fragmentación, obteniéndose con estos un modelo matricial que caracteriza el comportamiento de la molibilidad del material analizado, a pesar de la profunda investigación realizada, no se aborda el tema del consumo de energía de los minerales lateríticos.

5. En 1996 se realizó un estudio llamado *“Optimización de la productividad y la fineza de la molienda en la Planta de Preparación de Mineral de la Empresa Cmdte Ernesto Che Guevara”* por dos autores: **Aldana y Legrá**, aunque estos en su trabajo aseguran que aún con la adición del petróleo en la cabeza del molino se puede alcanzar hasta 100 t/h, la práctica ha demostrado lo insostenible de esta afirmación.
6. **Coello y Tijonov** (2001) en la obra *“Molienda de minerales multicomponentes. Modelo integro-diferencial para la valoración de la energía”* determinan que: El alto consumo de energía en las máquinas de trituración y molienda es el “talón de Aquiles” de dicho proceso. El equipamiento disponible para la trituración y molienda de minerales carece de un principio organizativo, que le permita aprovechar al máximo la energía suministrada en el rompimiento de las partículas minerales.
7. En el 2002 **Laborde y Coello** realizaron un estudio energético *“Normación del consumo de energía eléctrica en la molienda de la laterita”*. en la planta de molienda, sus resultados mostraron la no existencia de correlación entre la productividad y los consumos energéticos de la instalación, elementos anteriormente demostrados a escala de laboratorio.
8. En la obra *“Metodología para la normación del consumo de energía en el proceso de molienda del mineral laterítico”* por el **Ing. José Miguel Mendoza Sierra** (2008), se propone un método para estimar el consumo específico del proceso de molienda. 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. En este estudio 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 321 900 CUC/año por éste concepto.

9. En la obra *“Las propiedades físico-mecánicas de las menas lateríticas y su relación con el consumo específico de energía en el proceso de molienda”*. (2010) por el **Ing. Jacinto Téllez Pérez**, se realizó un análisis de las propiedades físico-mecánicas del producto de alimentación a los molinos y cómo influye este en el consumo de energía, el mismo consistió en dos etapas de experimentación, una a escala industrial, donde se tomaron diferentes mediciones respecto a la productividad máxima alcanzable, consumo de potencia y altura libre relacionada con los elementos moledores por cada molino y la otra etapa a escala de laboratorio, donde se hicieron varias corridas con un mismo mineral, variando la carga molturante y el tiempo de molienda. En el desarrollo del experimento se aplicó un método clásico, que permitió interrelacionar las variables de entrada, cargas de bolas, tiempo y variación del tamaño de las partículas con respecto a las variables de salida, fineza, productividad y consumo energético. Con las herramientas estadísticas se pudo evaluar el efecto de la separación de los trozos mayores a 10 mm antes de la alimentación al molino y el comportamiento de la molienda para las nuevas condiciones de granulometría, además facilitó la creación de modelos que sirven de guía para la recarga de la masa de bolas en función de la potencia en los molinos. Con el diseño experimental se evaluó el coeficiente de llenado, relacionado con la fineza a la salida de los molinos. Se conoció el nivel de llenado de bolas adecuado para los molinos y el costo de la energía para procesar una tonelada de mineral.
10. En la obra *“Effect of ball size on the performance of grinding and flotation circuits: the Sarcheshmeh copper mine case .Mineral Processing and Extractive Metallurgy”*. por **Banisi, S. y Farzaneh, M.** (2006) se analiza la distribución de tamaño de las bolas en el interior del molino, para un proceso de molienda de mineral de cobre, donde se utilizan bolas únicamente de 80 mm de diámetro y luego se experimenta con una combinación de 75 y 25 % de bolas de 80 y de 60 mm respectivamente, llegando a la conclusión de que con esta combinación era posible obtener un incremento del 4 % en el producto final (mineral con fineza < 0.074 mm). Este trabajo pone de manifiesto una vez más la importancia del estudio de la distribución del tamaño de las bolas para cada caso de mineral en específico.
11. En la obra *“Experimental study on the grinding rate constant of solid materials in a ball mill.”* (2002), por los autores **N.Kotake, K.Suzuki, S.Asashi y Y.Kanda,**

establecen expresiones empíricas que relacionan la constante de la velocidad de la molienda con los diámetros de las bolas y se llega a las conclusiones que las variaciones de la constante adimensional de la velocidad de molienda con el tamaño de alimentación fue aproximadamente análoga y fue independiente de los diámetros de las bolas y de los tipos de materiales. Es posible explicar los resultados mediante el desarrollo de la ecuación propuesta por Asashi. En este trabajo se obtienen ecuaciones para determinar las relaciones óptimas entre el tamaño de alimentación y el diámetro de las bolas y entre la constante máxima de la velocidad de molienda y el diámetro de la bola para los materiales utilizados (limestone, silica glass, gypsum).

12. En la obra *“El Consumo de Energía Eléctrica en el proceso de Molienda del Mineral Laterítico.”* por **Reynaldo Laborde y Olga Angulo Leblanch**, se exponen los resultados del análisis que se realiza sobre el consumo de energía eléctrica que se produce en una industria beneficiadora de mineral laterítico para la extracción de níquel. En el mismo se muestra el gran peso que tiene el proceso de molienda comparado con el resto de los procesos. En el estudio se tiene en cuenta la influencia que tienen sobre la potencia que demanda un molino de bolas factores como: la carga de bolas y la relación serpentina limonita en el mineral. Laborde y Olga expresan: *“Las mediciones de las principales variables eléctricas y no eléctricas del proceso industrial constituyen los elementos básicos en la técnica experimental”*. También se utiliza la simulación física del proceso a escala de laboratorio como herramienta base para el conocimiento que debe permitir el control de la alimentación a los molinos a fin de lograr mejorar el indicador energético en un 16% con respecto al valor observado.
13. En la obra *“Modelación y Simulación del proceso de molienda del mineral laterítico con composición sustancial variable”*. por **Laborde (2005)**, el autor analiza la molibilidad de las menas lateríticas tratándolas como una mezcla de las componentes serpentinitica y limonítica y llega a la conclusión de que cada componente tiene sus propias características de molibilidad y que estas características se combinan en dependencia de la proporción en que se encuentren estas dos componentes en la mena niquelífera.
14. En la obra *“Influencia del beneficio en la productividad del proceso de molienda en la laterita en la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”*, **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.

15. En la obra *“Influencia de la relación serpentina-limonita sobre los indicadores energotecnológicos en el proceso de molienda del mineral laterítico.”* por **R. Laborde, S. Marrero, A. Coello y O. Angulo.** se demuestra que las variaciones en la relación serpentina-limonita del mineral laterítico que procesa la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, 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 de dicha empresa. Se propone, como innovación tecnológica, una metodología para el ajuste del régimen de trabajo de las unidades de molienda, en dependencia del contenido de serpentina en el mineral. Con la aplicación de esta metodología pueden lograrse ahorros anuales en el orden de 237 CUC, por concepto de un uso más racional de la energía eléctrica, en el proceso de molienda.

Como se puede observar en la dinámica de la molienda existen muchos trabajos que relacionan la carga de bolas de los molinos, el por ciento de humedad del mineral con que llega a ésta, el flujo de alimentación de mineral, el flujo de aire en el sistema de evacuación, el deterioro de las bolas, grosor del producto, grado de desmenuzamiento del mineral, la relación serpentina limonita, con el consumo energético; todos estos, factores que influyen en la eficiencia del molino; pero existe la posibilidad de seguir investigando sobre la influencia de estos con relación a la productividad de los molinos y el comportamiento de su eficiencia, es un campo bastante abierto y no agotado que cada día de estudio incrementa el conocimiento de los fenómenos que ocurren en la conminución.

1.3 Fundamentación Teórica.

La normación del consumo de energía eléctrica, a nivel de mecanismos, procesos, talleres, plantas, juega un papel fundamental para lograr una mayor eficiencia. No existe una metodología actualmente 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.

En el mundo se ha trabajado en muchas variantes de determinación energética, en estos siempre se fija como referente comparativo en primera instancia el análisis de Bond, a pesar de haberse realizado importantes intentos de caracterizar por vías alternativas el comportamiento energético ante la fragmentación de los diversos materiales, en todo caso la gran cantidad de datos disponibles y la indudable eficacia práctica de su método permite presagiar que seguirá siendo así por mucho tiempo.

1.4 Molinos de Bolas y Ventiladores.

Molinos.

La molienda es la última etapa del proceso de conminución, en esta etapa las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión ya sea en seco o como una suspensión en agua (pulpa). En la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara la molienda se realiza en molinos de forma cilíndrica que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como “medios de molienda” (generalmente bolas), los cuales están libres para moverse a medida que el molino gira produciendo la conminución de las partículas de mena.

En el proceso de molienda partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaño de 10~300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice. El propósito de la operación de molienda es ejercer un control estrecho en el tamaño del producto y, por esta razón frecuentemente se dice que una molienda correcta es la clave de una buena recuperación de la especie útil.

Por supuesto, una submolienda de la mena resultará en un producto que es demasiado grueso, con un grado de liberación demasiado bajo para la separación económica obteniéndose una recuperación y una razón de enriquecimiento bajo en la etapa de concentración. Sobremolienda innecesaria reduce el tamaño de partícula

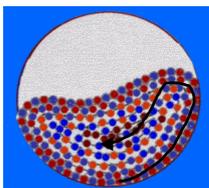
del constituyente mayoritario (generalmente la ganga) y puede reducir el tamaño de partícula del componente minoritario (generalmente el mineral valioso) bajo el tamaño requerido para la separación más eficiente. Además se pierde mucha energía, que es cara, en el proceso; y como se ha mencionado ya la molienda es la operación más intensiva en energía del procesamiento del mineral.

Movimiento de la Carga en Molinos.

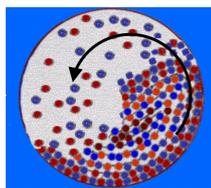
Una característica distintiva de los molinos rotatorios es el uso de cuerpos de molienda que son grandes y pesados con relación a las partículas de mena, pero pequeñas con relación al volumen del molino, y que ocupan menos de la mitad del volumen del molino.

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 hasta el “pie” de la carga del molino. Se pueden distinguir tres tipos de movimiento de los medios de molienda en un molino rotatorio:

- a) rotación alrededor de su propio eje.
- b) caída en cascada, donde los medios bajan rodando por la superficie de los otros cuerpos (figura 1a).
- c) caída en catarata que corresponde a la caída libre de los medios de molienda sobre el “pie” de la carga (figura 1 b).



a) **Cascada**



b) **Catarata**

Figura 1.1 Movimiento de las bolas dentro del molino.

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 conminución que ocurre es

principalmente abrasiva. Esta caída en cascada produce molienda más fina, con gran producción de polvo pero con aumento del desgaste del revestimiento interior del molino. A velocidades mayores los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga para describir una serie de parábolas antes de aterrizar en el “pie” de la carga. Esta caída en catarata produce conminución por impacto y un producto más grueso con menos desgaste del revestimiento.

La velocidad crítica del molino es la velocidad mínima a la cual la capa exterior de medios de molienda se adhiere a la superficie interior del cilindro debido a la fuerza centrífuga.

A esta velocidad la fuerza centrífuga es justo balanceada por el peso de los medios de molienda. Normalmente el rango de trabajo es entre 70 a 80% de la velocidad crítica.

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

Partes Principales de un Molino.

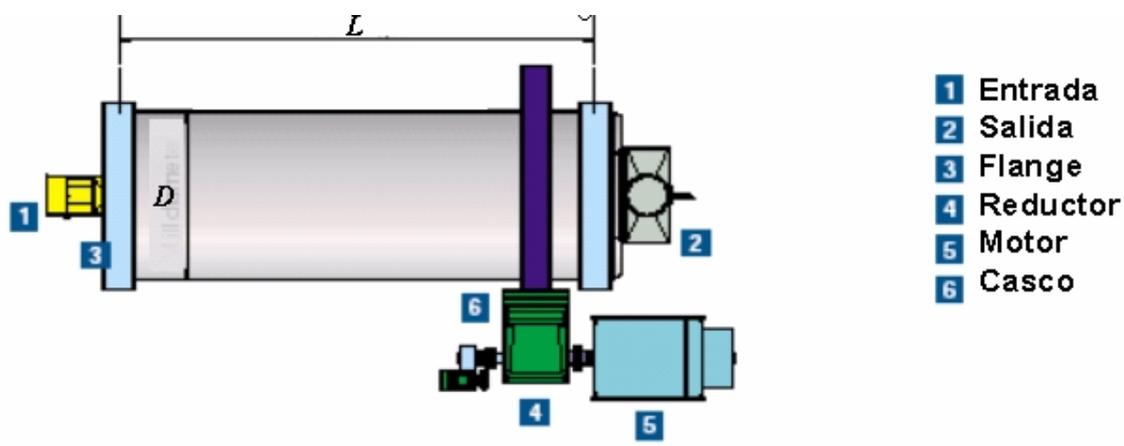


Figura 1.2 Vista exterior de un molino cilíndrico.

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.

Las caras de trabajo internas del molino (**revestimientos**) consisten en revestimientos renovables que deben soportar impacto, ser resistentes a la abrasión y promover el movimiento más favorable de la carga.

Los extremos del molino, o cabezas de los muñones(**Flanges**) 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. Los extremos de los molinos de bolas tienen revestimientos planos de forma ligeramente cónica para inducir el centrado y acción rectilínea de las barras. Generalmente están hechas de acero al manganeso o acero al cromo-molibdeno, con alta resistencia al impacto.

También tienen nervaduras para levantar la carga con la rotación del molino. Ellos impiden deslizamiento excesivo y aumentan la vida del revestimiento, generalmente están hechos de hierro fundido blanco aleado con níquel (Ni-duro) y otros materiales resistentes a la abrasión, como goma. Los revestimientos de los muñones son diseñados para cada aplicación y pueden ser cónicos, planos y con espirales de avance o retardo.

Estos representan 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 y 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 Ni-duro. Los revestimientos de goma también pueden tener dificultades en procesos que requieren temperaturas mayores que 80°C.

Ventilador.

Los ventiladores centrífugos son equipos empleados para el trasiego de aire, gases o partículas en instalaciones industriales (figura 1.3).

En estos equipos, por la acción de la fuerza centrífuga el fluido es desplazado radialmente 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 son:

- La carga (H).
- La capacidad (Q).
- La velocidad de rotación (n).
- El rendimiento (η).

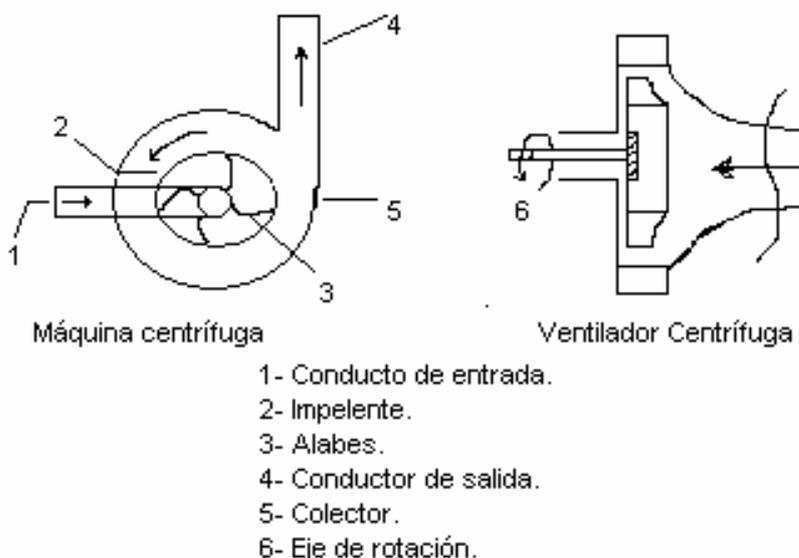


Figura 1.3: Esquema de las partes que forman al ventilador.

La carga de impulsión y presión (H): la carga de impulsión es uno de los parámetros que caracteriza la cantidad de energía que la máquina le trasmite a el 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 esta. Si se expresa en metros de altura de la columna líquida de densidad se tiene que:

$$H = E_{sal} - E_{ent} \quad (1)$$

$$E_{sal} = \frac{P_s}{\rho \cdot g} + \frac{V_s^2}{2 \cdot g} \quad (2)$$

$$E_{ent} = \frac{P_e}{\rho \cdot g} + \frac{V_e^2}{2 \cdot g} + y \quad (3)$$

Sustituyendo 2 y 3 en 1:

$$H = \frac{P_s - P_e}{\rho \cdot g} + y + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

Expresado en unidades de presión (P) sería:

$$P = \rho \cdot g \cdot H = P_s - P_e + \rho \cdot g \cdot y + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} \cdot \rho \quad [pa] \quad (5)$$

La característica de carga se emplea en bombas, mientras que en compresores y ventiladores es más usual el término de presión.

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 desgasto másico y el volumétrico, se expresa por la relación:

$$Q_m = \rho \cdot Q \quad (6)$$

Donde: ρ Densidad de flujo.

Q_m Gasto másico.

Q Gasto volumétrico.

La velocidad de rotación (n): se denomina velocidad de rotación de una máquina a las revoluciones por unidad de tiempo en su eje principal. En el sistema internacional

de unidad se toma (s^{-1}) sin embargo, la literatura especializada emplea universalmente revoluciones por minutos (r/min).

Potencia y rendimiento: la potencia que la máquina entrega al fluido se denomina potencia útil (P_u) y se determina por la expresión:

$$P_u = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000} = \frac{Q \rho \cdot P}{1000} \quad [kW] \quad (7)$$

Donde: Q: Gasto real que entrega la máquina (m^3/s).

H: Carga real de la máquina (m).

ρ : Densidad de fluido (kg/m^3)

g: Aceleración de gravedad (m/s^2)

La entrega de la potencia útil (P_e) y la que es necesaria entregarle al eje de la máquina se denomina rendimiento (η) y se expresa:

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \quad (8)$$

$$P_e = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{1000 \times \eta} \quad (9)$$

El rendimiento depende de muchos factores como son: tipo, construcción, dimensiones, fluido, trasegado, régimen de trabajo, características del sistema de tuberías, etc.

A la hora de determinar el rendimiento conjunto de una instalación, se define como la potencia útil y la potencia consumida por el motor.

$$\eta_{ins} = \frac{P_u}{P} \quad (10)$$

Para satisfacer las demandas del sistema al que es acoplada la máquina centrífuga, es necesario que esta sea capaz de variar sus parámetros dentro de ciertos límites manteniendo alto rendimiento figura 1.4.

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.

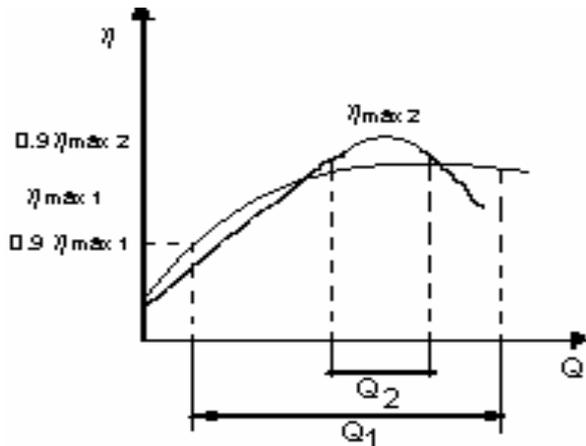


Figura 1.4 Límites de rendimiento de una máquina centrífuga.

Para las 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 $0.9\eta_{\text{máx}}$.

Circuito Cerrado de Molienda y Clasificación.

La molienda en circuito cerrado es la más común en circuitos de molienda 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.

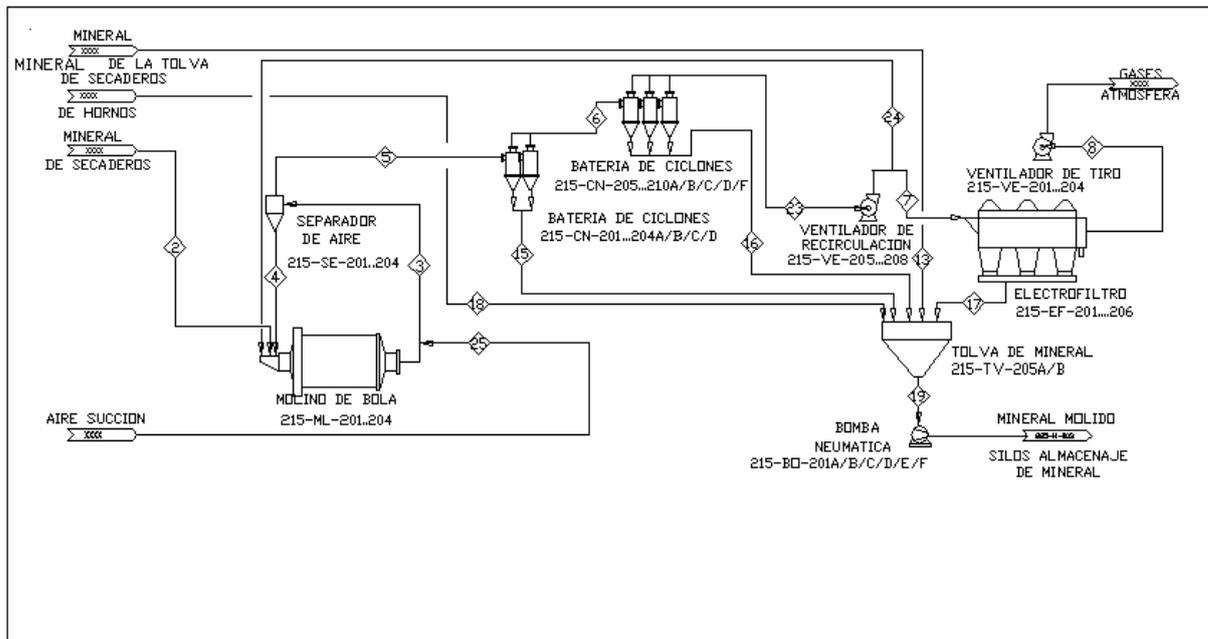


Figura 1.5 Circuito de molienda a ciclo cerrado.

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 como porcentaje del peso de la alimentación nueva al circuito.

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.

La productividad final de los circuitos de molienda en circuitos cerrados en función de la acumulación, definida estrictamente por un polinomio de segundo grado (figura 1.6).

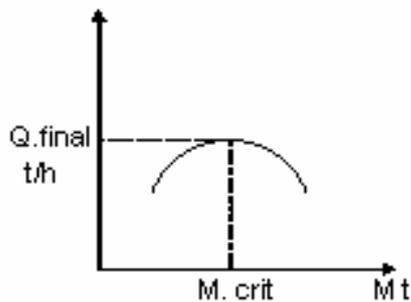


Figura 1.6 Característica de $Q = F(M)$ en el molino de bolas.

A juzgar por el comportamiento de la curva para lograr maximizar la productividad final es imprescindible mantener estable la acumulación en los niveles cercanos al valor crítico y sobre todo trabajar en el ala izquierda de la parábola, puesto que trabajar en la parte derecha no solo lleva a la disminución de la productividad final con su derroche energético, sino que expone al molino a su embuchamiento, a causa del decrecimiento progresivo de la energía de rompimiento de los cuerpos molidores.

1.5 Factores que afectan la eficiencia de la molienda.

Varios factores afectan la eficiencia del molino de bolas. Entre ellos se encuentran, material a triturar, % de humedad del mineral con que llega a este, el deterioro de las bolas, grosor del producto, grado de desmenuzamiento del mineral.

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 debería ser 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. Las bolas muy pequeñas dejan el molino junto con la mena molida y pueden separarse haciendo pasar la descarga por harneros.

Empíricamente se ha demostrado que el grosor óptimo del mineral a alimentar debe ser de 15 a 20 mm.

La potencia útil del molino en dependencia de sus dimensiones se determina según la fórmula:

$$P = K \times D \times L \quad (11)$$

Donde: P: Potencia útil.

K: Coeficiente que depende del tipo de molino.

D: Diámetro.

L: Longitud

Volumen de llenado del Molino.

El volumen o nivel de la carga de bolas está relacionado con la dureza del mineral y tonelaje de alimentación que puede tratar el molino para un mismo grado de molienda. Por ejemplo, un aumento del tonelaje a tratar 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.

La carga de bolas se expresa usualmente como un porcentaje del volumen del molino que es ocupado por las bolas. El cálculo de la fracción o nivel de llenado para un molino en forma cilíndrica puede hacerse una vez que se conoce la altura desde la superficie de la carga hasta el tope del molino. Denominamos h a esa altura y D al diámetro interno del molino.

El volumen del molino ocupado por la carga está dado por el área del segmento achurado multiplicado por el largo interno del molino y la relación matemática con la que se determina el % de llenado de bolas es:

$$\%Cb = 113 - 126 \times \frac{h}{d} \quad (12)$$

Donde: h: Largo del molino

D: Diámetro.

Cb: Carga de bolas

Normalmente los molinos con descarga por rebalse operan con un volumen aparente de 45 a 50 % del volumen total del molino, realizando carguíos periódicos y controlados de bolas para recuperar aquellas gastadas durante la operación de molienda.

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, 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 esta ausencia de mineral, por lo que el trabajo del motor será a plena carga con un consumo de energía grande, no así cuando hay mineral, que este solo crea la turbulencia para sacar el mineral del molino y su potencia es promedio.

Por otra parte en el molino también crece su consumo energético 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 del molino en uno y otro caso. 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 más racional.

1.6 Productividad y Consumo específico de energía.

Cuando se habla del kWh generado, se entiende como el producto final; cuando se encuentra la productividad del kWh, se refiere al resultado posterior a un procedimiento de estudio e investigación ceñido a una metodología con base en indicadores confiables, donde se debe tener en cuenta la calidad del producto como parte del proceso en análisis. Al hallar la productividad, se descubre explícitamente la definición de calidad, pues no se trata de "producir por producir", sin tener como base unas reglamentaciones y procedimientos acordes con el producto final. No se puede hablar de productividad sin asociarlo a la calidad del producto, que para la generación de energía tiene en cuenta la disponibilidad de las centrales, sobre todo en las horas críticas (horas pico) donde la demanda se acrecienta y el usuario final (o Sistema de Transmisión Nacional) requiere una cantidad determinada, que las centrales deben despachar consecuentemente.

Se define “**Productividad**” como la relación entre el producto generado y los factores productivos utilizados para ello. Considerando esa definición general del concepto de productividad, es posible medir la productividad de los molinos en particular a través de *indicadores de productividad*. Si se quiere escribir en términos matemáticos, el indicador más simple y general para describir la productividad sería el siguiente:

$$Q = \frac{t}{h} \quad (13)$$

Donde: **Q**: la productividad

t: es la cantidad de mineral

h: tiempo de producción

El consumo energético específico, relaciona el consumo energético a un indicador de actividad medida en términos físicos (Ej.: kWh/t de níquel); y finalmente, los indicadores de ahorro energético permiten reflejar, en términos absolutos, magnitudes de energía ahorrada. Luego para el cálculo del consumo específico de energía conociendo el factor de productividad tenemos que:

$$We = \frac{P}{Q} \quad [kWh/t] \quad (14)$$

Donde: **We**: Consumo específico de energía.

P: Potencia media consumida en el proceso (kW).

Q: Productividad (t/h).

1.7 Conclusiones.

En este capítulo se hace una referencia del objeto de la tesis y los objetivos específicos que esta persigue, además se describen algunas de las características de los molinos de bolas y de los ventiladores centrífugos, así como algunas ecuaciones que regulan su funcionamiento, además se explica brevemente la relación que existe entre productividad y el consumo específico de la unidad de molienda.



CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

Para garantizar su desarrollo eficaz y la veracidad de los resultados es necesaria una adecuada selección de los métodos y materiales. Es importante ser cuidadoso al seleccionar las muestras, determinar los consumos específicos de los molinos, así como el tratamiento de los resultados. El presente capítulo consiste en exponer las principales técnicas y procedimientos utilizados durante el trabajo experimental, además de una pequeña descripción de flujo tecnológico de la empresa en cuestión y de la planta de Preparación de Mineral.

2.2 Datos Generales de la Fábrica.

La industria cubana del níquel cuenta con más 50 años de experiencia en la obtención del Níquel a partir de los minerales lateríticos. El área de construcción de la fábrica se encuentra al norte del yacimiento de mineral de Punta Gorda, provincia de Holguín, en la costa Norte del océano Atlántico entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km. de la ciudad de Moa. El esquema tecnológico de la fábrica de Níquel Ernesto Che Guevara está basado en el esquema de lixiviación carbonato – amoniacal del mineral reducido o también llamado “Caron”, similar al proceso de la fábrica René Ramos Latour de Nicaro. Una de las deficiencias de este proceso es el bajo % de extracción: (75 a 76) % de Ni y (25 a 30) % de Co. El complejo minero – metalúrgico de la empresa comprende las siguientes actividades:

Mina

Suministra el mineral a la fábrica; está situada a 1 ó 1.5 km. Al Suroeste del área industrial. El mineral de la capa superior está compuesto de Limonita y el cuerpo de Laterita y Serpentina (blanda). Los componentes fundamentales del mineral son el Níquel, el Cobalto y como acompañante en cantidades considerables el Hierro. La transportación se realiza directamente desde las excavaciones hasta el área de recepción por camiones volquetas.

Preparación de Mineral

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

Hornos de Reducción

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

Lixiviación y Lavado

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

Recuperación y Separación de Cobalto

El licor enriquecido en Ni y Co se somete a una inyección de hidrosulfuro de amonio o sulfhidrato de sodio para precipitar el Co en forma de sulfuro, este producto se envasa en big–bag y se comercializa.

El licor descobaltizado se envía a la planta de Recuperación de Amoniac. El licor carbonato amoniacal enriquecido en Ni recibe un tratamiento con vapor en las torres de destilación obteniéndose el carbonato básico de níquel. La pulpa de desecho de la última etapa de lavado se envía a las torres de destilación de colas donde recibe tratamiento con vapor para la recuperación del licor amoniacal contenido en esa pulpa. El producto de desecho (cola) es enviado a la presa de cola. La pulpa de carbonato de Ni se envía a la planta de Calcinación y Sínter.

Calcinación y Sínter

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

2.3 Caracterización del proceso de molienda

Planta de Preparación de Mineral

En la Planta de Preparación de Mineral es donde se inicia el proceso productivo de la Fábrica, según la tecnología lixiviación carbonado – amoniacal. (o proceso CARON).

El mineral procedente de trituración primaria es suministrado a la Planta de Preparación de Mineral por dos vías.

- A través de grúas gantry.
- Directamente por los transportadores de enlace (No.14) ó (15).

Una vez descargado el mineral en galería es remontado y alimentado por las grúas gantry (215-GR-5, A,B,C) Estas remontan el mineral y lo homogeneizan en el deposito exterior que posee una capacidad de 360 000 t húmedos (360 000 000 kg ó 28 días de trabajo de la Planta).

El mineral suministrado por las grúas o el transportador No. 14 ó 15 es descargado en los transportadores 215 TR-5-5A y 215–TR6-6A cuyas capacidades son 750 t/h (208.333 kg/s) cada uno.

El paso del mineral desde las grúas hacia los transportadores 5 y 5A, 6 y 6A se realiza a través de un alimentador que se mueve solidario con las grúas 215- AL –2 A,B,C y que posee para este trabajo (de alimentación) un transportador 215-TR- 8 A,B, C y de capacidad 750 t/h (208.333 kg/s).

Los transportadores 5 Y 5A, 6 Y 6A alimentan a los transportadores 215 TR-7 y 7A las que se encargan de llevar el mineral homogeneizado hasta el edificio de los secaderos. La capacidad de estas correas es de 750 t/h (208.333 kg/s) y todo su contenido lo vierten sobre los transportadores 215-TR8 y 8A que tiene cómo función la de alimentar a los secaderos y al deposito de mineral interior o de emergencia.

La alimentación a los secaderos se realiza a través de unos desviadores que se encuentran justamente sobre las tolvas de los secaderos La alimentación al deposito interior se realiza de la misma forma, o sea, mediante desviadores de mineral que se encuentran situados sobre tres correas colocadas entre los secaderos 2 y 3, 4 y 5 y al final del edificio. Estos transportadores 215- TR-10-1; 10-2; 10-3 poseen capacidad 750 t/h (208.333 kg/s).

El mineral almacenado en el depósito interior que se usará cuando por cualquier tipo de avería surgida en el proceso antes de los secaderos, se interrumpa el suministro de la materia prima a esta sección. La capacidad de este almacén posibilita a la planta trabajar durante 4 días.

Este depósito posee para la manipulación del material, 2 grúas de puente 215- GRL-101 A y B de capacidad igual a 350 t/h (97.222 kg/s) cada una. Se encargan de alimentar a los secaderos en los casos que se explicaron en el párrafo anterior. El mineral llegará a los secaderos 215-SC-101-107 pasando a través de alimentadores de esteras 215-AL-101-107 de capacidad variable 70, 105, 125 t/h y los transportadores de bandas 215-TR-9-1 9-7 de capacidades igual a 125 t/h (3.472 kg/s) cada uno.

El tambor secador posee una longitud igual a 4800 mm y un diámetro 4500 mm. El mineral al entrar al secadero lo hará con una humedad aproximadamente igual al 36 % y saldrá del mismo con 4.5 % según esta establecido.

Para lograr esto cada secadero posee una cámara de combustión 21-CC-101-107 dotada de un quemador de petróleo. Se suministra aire de combustión, aire de pulverización, aire secundario o gases procedente de la planta de hornos.

Los gases combustionados dentro de la cámara alcanzan una temperatura de 1500 °C y bajan hasta 800 - 850 °C al ponerse en contacto con el aire el exceso que se suministra y que sirve para aumentar el volumen de gases necesarios para secar el mineral.

Con esta última temperatura es con la que entran los gases al tambor secador. La de los gases al tambor secador se realiza en dirección a corriente con el mineral alimentado de forma que, ese contacto gases calientes – mineral, permita que este último se vaya secando y se obtenga al final del secadero un producto con las características adecuadas. Los gases al salir del secadero tendrán una temperatura de 80-100 °C. Los gases calientes pueden atravesar el secadero debido a la succión que crea un ventilador 215-VE-108 - 114, de tiro situado a la salida del electrofiltro que posee cada secadero individualmente.

Además, estos gases son capaces de arrastrar con ellos el 28 % del polvo, que entra con el mineral o que se forma durante el proceso de secado y que por lo general poseen una granulometría – 0,074 mm el que será introducido al sistema de colección. El mineral después de secado, es descargado en las correas 215-TR-11 y 11A. 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 490 t/h (136.111 kg/s). En estas correas se encuentran instaladas las romanas encargadas del pesaje del mineral seco. Este mineral seco es llevado (descargado) en las correas 215-TR12 Y 12A que son la vía de unión entre los secaderos y los molinos. Estas correas transportadoras poseen una capacidad de 490 t/h (136.111 kg/s) cada una y descargan su contenido en 4 tolvas (una para cada molino) 215-TV-201.204 mediante desviadores de mineral colocados sobre las correas y justamente sobre las mencionadas tolvas.

Sobre estas correas se encuentran montado un sistema de adición de petróleo aditivo en forma de ducha que se mezclara conjuntamente con el mineral de forma dosificada mediante un sistema automático que regulara la relación petróleo-mineral instalada en la misma área, siendo utilizado cómo 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 hacerlo a los alimentadores de disco 215 AL 201 A Y B 215 AL 204 A Y B que poseen cada tolva y que pueden entregar 55-120 t/h (15.277-3.333 kg/s) a las correas 215-TR -13-1...13-4 las que descargan el mineral en el molino de bolas 215. ML -201... 204, la capacidad de esta correa es de 160 t/h (44.44 kg/s). De esta forma el mineral llega al molino de bolas cuya capacidad es de 120 t/h (33.333 kg/s) y tiene cómo dimensiones 5700 mm de longitud y 3200 mm de diámetro. Estos molinos son de forma cilíndrica y para su proceso de molienda fina poseen una carga de bolas cuyo peso es de 54 t, siendo sus dimensiones (de las bolas).

Tamaño	Cantidad
100 mm - 10 %	5.5 t (5500 kg)
70 mm - 10 %	5.5 t (5500 kg)
60 mm - 15 %	8.0 t (8000 kg)
40 mm - 25 %	13.5 t (13500 kg)
32 mm - 40 %	<u>21.5 t (21500 kg)</u>
Total	54.0 t (54000 kg)

El producto que el molino debe entregar tendrá una humedad de 4,5 –5,5 % y una granulometría de 85 – 87 % de - 0,074 mm.

Todo lo que entra al molino saldrá del mismo mediante barrido con aire, que es producido por un ventilador de recirculación 215-VE-205.208 de 134 000 m³/h (3.722

m³/s) de capacidad situado a la descarga del molino y cerrando un circuito que esta formado por el molino, 1 separador 215 – SÉ-201. 204, 4 ciclones 215-CN-201 104 A, B, C y de 2 baterías de 6 ciclones 215-CN-205.210 A, B, C, D, E, F. Con este ventilador se barre el mineral molido y se succiona, este doble efecto propicia la obtención del mineral molido.

El mineral barrido y succionado es introducido en un separador neumático de diámetro 4 250 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 posea estas características pasará al molino (constituyendo el rechazo) para su ulterior tratamiento hasta que alcance la granulometría adecuada.

Este equipo puede realizar este trabajo a merced de dampers que posee y que son regulados para obtener la granulometría del mineral que se quiera.

El sistema de colección primaria formada por ciclones, se encarga de recoger el polvo producido y lo descarga en las tolvas de producto final 215-TV-205 A y B . Lo que no se recoge en los ciclones y que es por lo general, un mineral con granulometría -0.044 mm pasará por un sistema de limpieza de gases electrostáticos o electrofiltros donde se captura casi la totalidad del polvo que entra en él.

De igual forma, todo 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 Y F de 50 t/h (13.888 kg/s) de capacidad todo el mineral molido es transportado hacia los silos del mineral del taller de hornos de reducción mediante el empleo de bombas neumáticas (215 – BO-107 a 112) colocadas en la descarga de las tolvas.

En la figura 2.1 se muestra un esquema o diagrama del flujo del proceso tecnológico de la sección de molienda.

Diagrama de Flujo del proceso tecnológico de la sección de molienda.

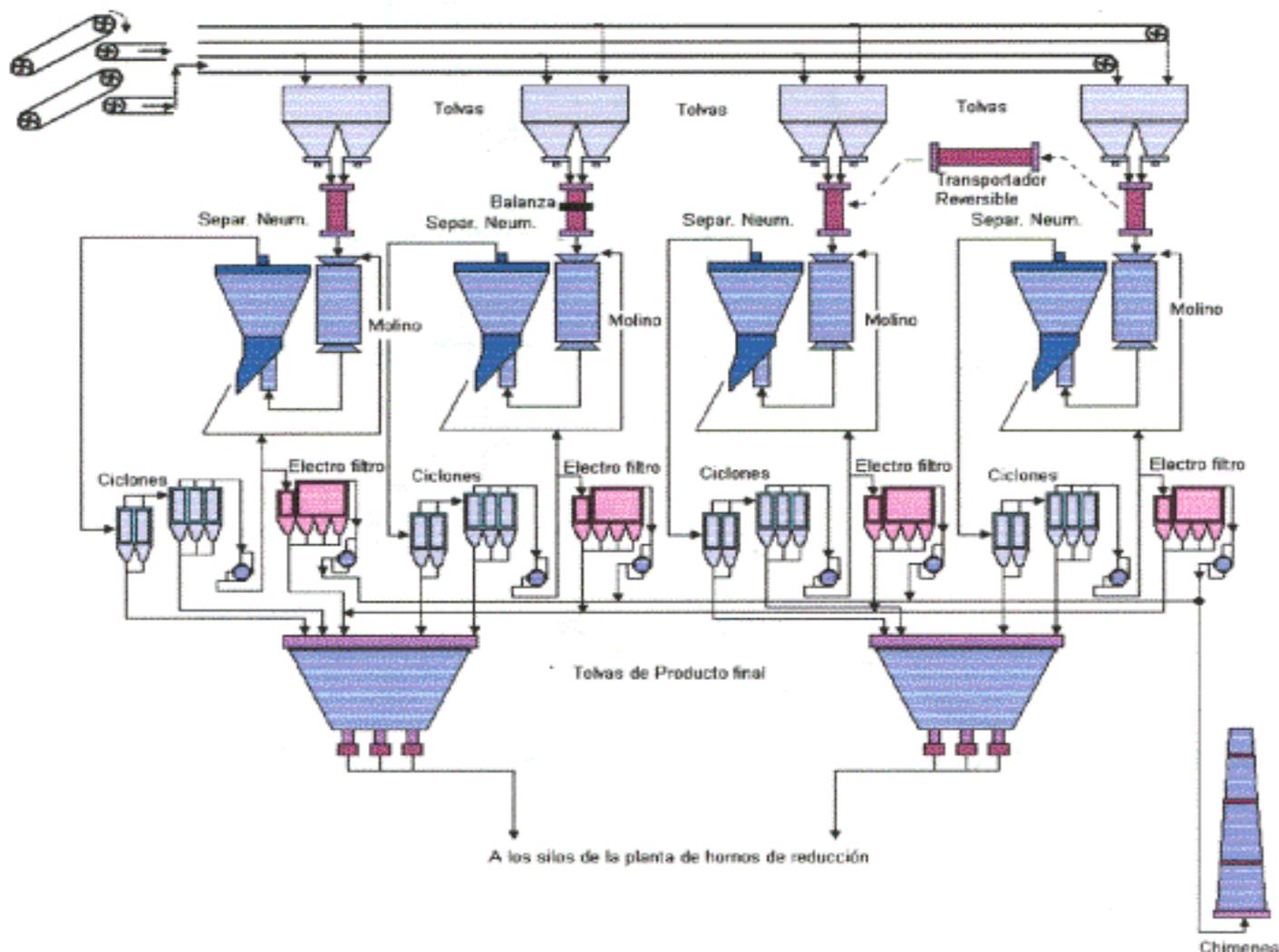


Figura 2.1 Esquema tecnológico de la sección de molienda de la empresa Cmdte “Ernesto Che Guevara”.

2.4 Caracterización del Equipamiento de la sección de molienda.

De acuerdo al esquema tecnológico a continuación se exponen las características técnicas de los equipos principales que componen la unidad de molienda.

1. Alimentador de disco.

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

Velocidad nominal del disco: 8,8 r/min.

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 r/min.

3. Molino de bolas.

Tipo: cilíndrico, 3 200 x 5 700

Capacidad: 33,333 kg/s

Carga de bolas: 54 000 kg

Diámetro: 3 200 mm; Largo: 5 700 mm

Velocidad de rotación: 17,36 r/min.

Velocidad relativa (Ψ): 73,4 %

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

Velocidad nominal del motor: 720 r/min.; $I_n = 54.6 \text{ A}$; Conexión: Y $\eta = 93.4 \%$

$f_p = 0.9$

4. Ventilador de recirculación.

Tipo: centrífugo

Capacidad: 3,722 m³/s

Altura de presión: 2840 kgf/m²

Accionamiento: motor asincrónico trifásico con $U = 6 \text{ kV}$; $P = 400 \text{ kW}$; $f = 60 \text{ Hz}$;

Velocidad nominal del motor: 1180 r/min.; $I_n = 47 \text{ A}$; Conexión: Y $\eta = 91 \%$,

$f_p = 0.89$.

2.5 Instrumentos utilizados

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. Relés SR - 469

Serie: 30D200A4.000

Alimentación: monofásica 230 a 400 VAC.

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 r/min. Fabricado: en Canadá.

3. Analizador de Red

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

Este analizador de redes permite la visualización de 30 parámetros eléctricos: tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, frecuencia, factor de potencia, etc.

2.6 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 es de 1,20 t/m³ y el del mineral húmedo es de 1,78 t/m³. 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

A continuación se detallan las características del mineral.

Tabla 2.1 Composición mineralógica de la serpentina (Laborde, 2004)

Nº	Nombre	Fórmula	Contenido, (%)
1	Clorita	$Mg_4Al_2[(Si,Al)_3(SiO_{10})](OH)$	5
2	Galvasita	$Al_4(SiO_{10})(OH)_8$	3
3	Nontronita	$Fe_2(Fe,Al)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$	10
4	Antigorita	$Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$	61
5	Cuarzo	SiO_2	3
6	Goethita	$FeOOH \cdot nH_2O$	18

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

Nº	Nombre	Fórmula	Contenido, (%)
1	Goethita	$\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	67
2	Hematita	Fe_2O_3	7
3	Magnetita	Fe_3O_4	5
4	Espinelas	$(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al,Fe})_2\text{O}_4$	10
5	Asbolanas	$\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	1
6	Gibbsita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	7
7	Aluminocromita	$\text{Fe}(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$	2
8	Cuarzo	SiO_2	1

Composición granulométrica.

Las menas lateríticas niquelíferas 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.

Características del mineral secado.

Humedad: 4.13 %

Peso volumétrico: 1.1 a 1.3 t/m³

Contenido de elementos metálicos principales.

Ni: 1.16 %

Fe: 39.66 %

Co: 0.092 %

2.7 Descripción del experimento.

El presente trabajo ha sido desarrollado a escala industrial para lo cual se planificaron las acciones siguientes:

- Hacer un levantamiento de todos los datos nominales y otras características de los diferentes motores y equipos que intervienen en el proceso de Molienda de la empresa, en específico de sus unidades de molienda.
- Realizar las lecturas de las principales magnitudes eléctricas y parámetros de producción de los molinos y de sus respectivos ventiladores de recirculación, estos últimos fueron tomados al finalizar los 20 días que duró el estudio y nos permitió confeccionar gráficos de consumo y de producción de la sección de molienda.
- Buscar en el Departamento de Economía Energética los datos de consumo de la empresa del año 2011 con el objetivo de determinar el peso de la molienda sobre los demás procesos.
- Buscar en la oficina del tecnólogo las características del mineral alimentado a los molinos.
- Para determinar los consumos, procesar los datos recolectados y obtener los gráficos se utilizó la herramienta Excel de Microsoft Office.
- Determinar el consumo específico de energía para el mineral característico de alimentación de todo el proceso.
- Conocer las tarifas y gastos por concepto de electricidad para valorar el índice de unidades monetarias que se destinan a este, y determinar además el costo que representa moler una tonelada de mineral.

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

El consumo específico de energía se determina como la relación entre la energía consumida en el proceso y la producción, para un tiempo dado (turno, día, mes, etc.). 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 diario (24 horas) 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).

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

Donde:

P : Potencia (kW)

n : Tamaño de la muestra (μ)

P_i : Valores observados (kW)

Determinación del consumo específico de energía eléctrica en la unidad de molienda.

En un periodo de 20 días, se realizaron las lecturas lo que permitió calcular (estimar) el consumo de energía de los molinos con sus respectivos ventiladores, se registró el tiempo de trabajo diario de los molinos y ventiladores, se determinó la demanda de potencia al aplicar la ecuación 2.2 y se recopiló los datos de productividad, conociendo estos 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.

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. Para determinar la potencia se calculó con las lecturas cada una hora, luego se calculó la potencia promedio. Con esta potencia se calculó el consumo específico de energía (W_v) para este tiempo de trabajo.

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 la energía consumida, teniendo en cuenta los momentos en que las unidades estuvieron detenidas, ya sea por poco flujo de mineral o mantenimiento. Se obtiene al dividir la energía consumida por los molinos y ventiladores entre la producción de la sección de molienda en un periodo de tiempo dado, se construyen los gráficos con los datos del consumo específico de los molinos (W_m), ventiladores (W_v), unidad (W_u) durante los días tomados. Las curvas obtenidas caracterizan el comportamiento energético de los molinos, ventiladores y unidades de molienda.

2.8 Conclusiones

Hasta aquí se han relacionado los materiales utilizados en el estudio así como los métodos utilizados para el cálculo de los diferentes parámetros, solo queda analizar los resultados obtenidos.



CAPÍTULO III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Introducción

En el siguiente capítulo se exponen los resultados de las mediciones y lecturas realizadas, así como el análisis de los mismos. Se muestran además gráficos de consumo y de comportamiento de las potencias en el tiempo.

3.2 Consumo Diario

En la empresa se lleva un control diario de lecturas para saber el consumo de los portadores energéticos. En nuestro caso utilizando las lecturas de los metrocontadores y multilín tomadas durante 20 días se calculó el consumo diario de cada elemento que compone la unidad de molienda (Molino y Ventilador). En la tabla que sigue a continuación se muestran los consumos diarios calculados a partir de las lecturas tomadas expresados en kW. Es importante aclarar que para el caso de los ventiladores el valor de la diferencia de lectura diaria se afecta por los coeficientes de transformación de los TC y TP que son 100/5 y 6000/100 respectivamente, no así para los molinos ya que estos poseen Relés Multilín y el mismo da los valores ya referidos.

Tabla 3.1: “Consumo Diario de los Molinos y Ventiladores”.

FECHA	Consumo Diario								Total sección
	M1 (kWh)	V1 (kWh)	M2 (kWh)	V2 (kWh)	M3 (kWh)	V3 (kWh)	M4 (kWh)	V4 (kWh)	
01/06/2012	928	480	12548	6240	7319	3720	15360	8400	54995
02/06/2012	4703	2640	16570	8880	8856	4920	15145	8760	70474
03/06/2012	4701	2400	17089	8400	9357	4680	14220	8160	69007
04/06/2012	7950	3840	16972	7680	8783	4560	16183	8280	74248
05/06/2012	12062	5400	0	0	6689	3120	16108	8040	51419
06/06/2012	19161	9480	9127	3600	3830	1920	15937	8400	71455
07/06/2012	17532	9360	6101	3000	4951	2160	16111	8040	67255
08/06/2012	14628	8640	2720	1560	5966	2640	15557	8760	60471
09/06/2012	16229	8520	6185	2640	5633	3000	10335	5880	58422
10/06/2012	16755	9000	5753	2760	9171	4200	16927	8160	72726
11/06/2012	15088	9360	4059	2160	6900	3240	16056	8400	65263
12/06/2012	14650	8040	4898	2520	5162	2520	16876	8160	62826
13/06/2012	16178	8400	7892	3720	6576	4800	16833	8280	72679
14/06/2012	9318	4560	6694	3120	4792	2400	16903	8640	56427
15/06/2012	10452	5520	8135	4080	6094	3240	16579	8520	62620
16/06/2012	14318	7680	4236	2520	6116	2880	16279	8040	62069
17/06/2012	14213	8040	4283	1920	7782	3840	16303	8040	64421
18/06/2012	5010	2640	4060	1680	6441	3120	16253	8880	48084
19/06/2012	7726	3720	3681	2040	3909	2160	16080	8280	47596
Prom	11663,26	6195,789	7421,211	3606,316	6543,526	3322,105	15791,84	8216,842	62760,89
Desv	5236,875	2903,298	4972,253	2443,432	1680,625	952,5147	1482,305	624,0108	8272,968

Donde:

Prom: Promedio.

Desv: Desviación estándar de las muestras.

La sección de molienda es una de las más consumidoras de le empresa, a continuación se muestra el gráfico de consumo que tuvo la sección durante los días que duro el estudio.

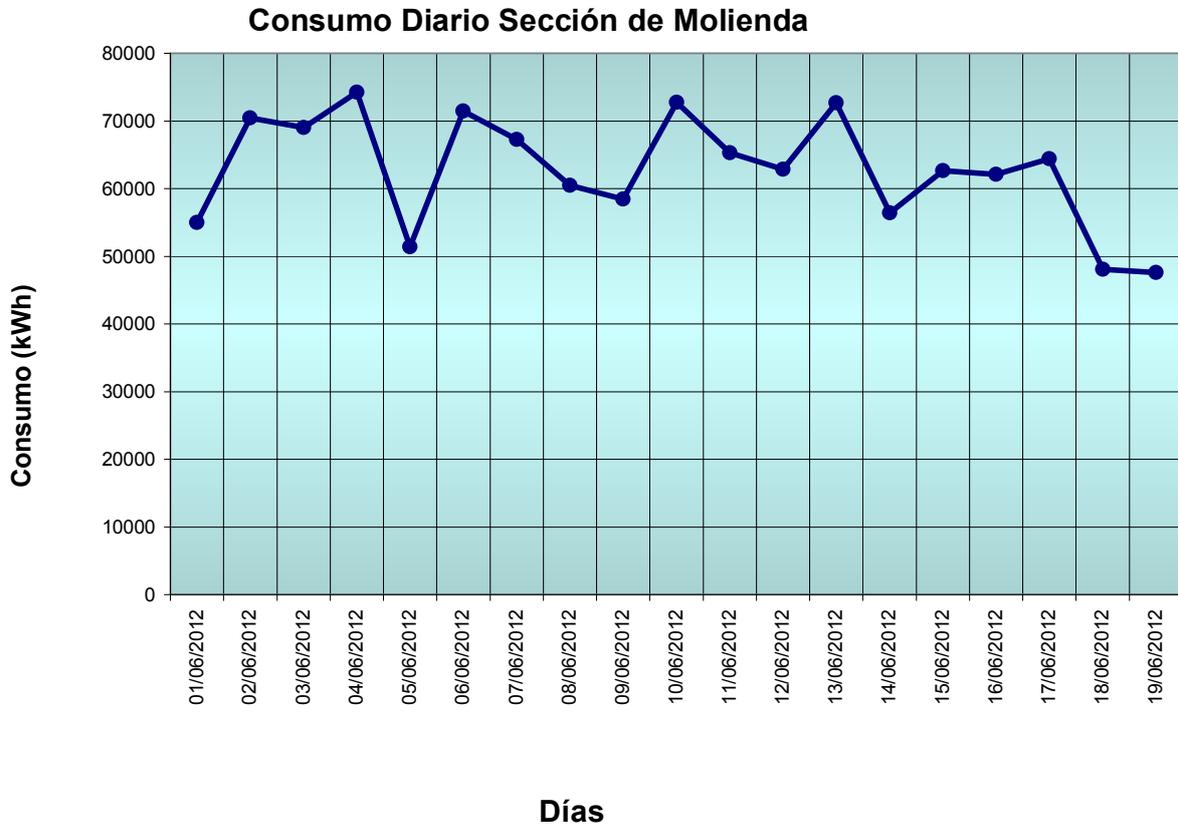


Figura 3.1: "Comportamiento Diario de la sección de molienda".

3.3 Consumo por molinos y ventiladores.

Como se conoce la sección de molienda se compone de cuatro unidades y cada unidad está formada por un molino y su respectivo ventilador. Además, como dato adicional, esta sección se alimenta de las subestaciones de 10 kV y 6 kV. El consumo diario de cada uno de estos molinos y ventiladores se tuvo en cuenta para el estudio y se graficaron los mismos a partir de los cálculos de consumo específico. A continuación se muestran estos gráficos por separado, molino y ventilador.

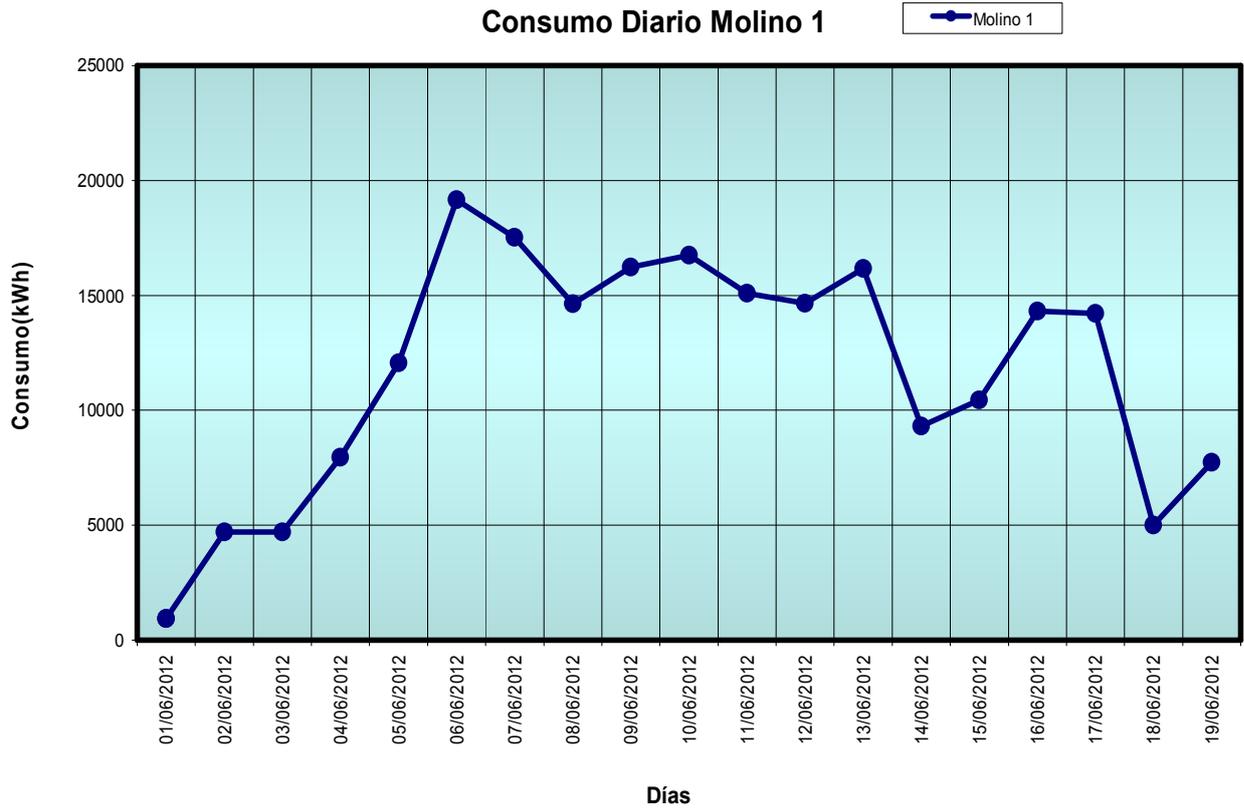


Figura 3.2: “Consumo Diario del Molino 1”

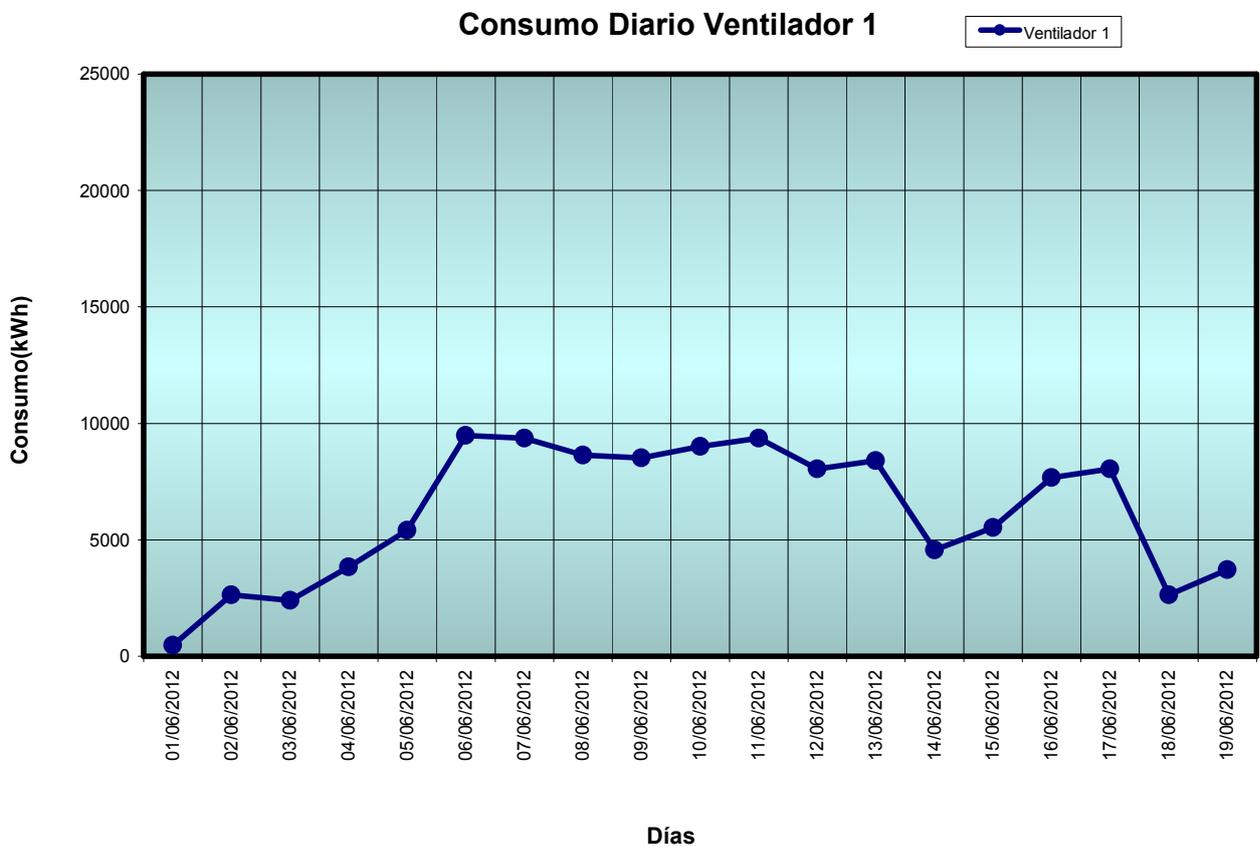


Figura 3.3: “Consumo Diario del Ventilador 1”.

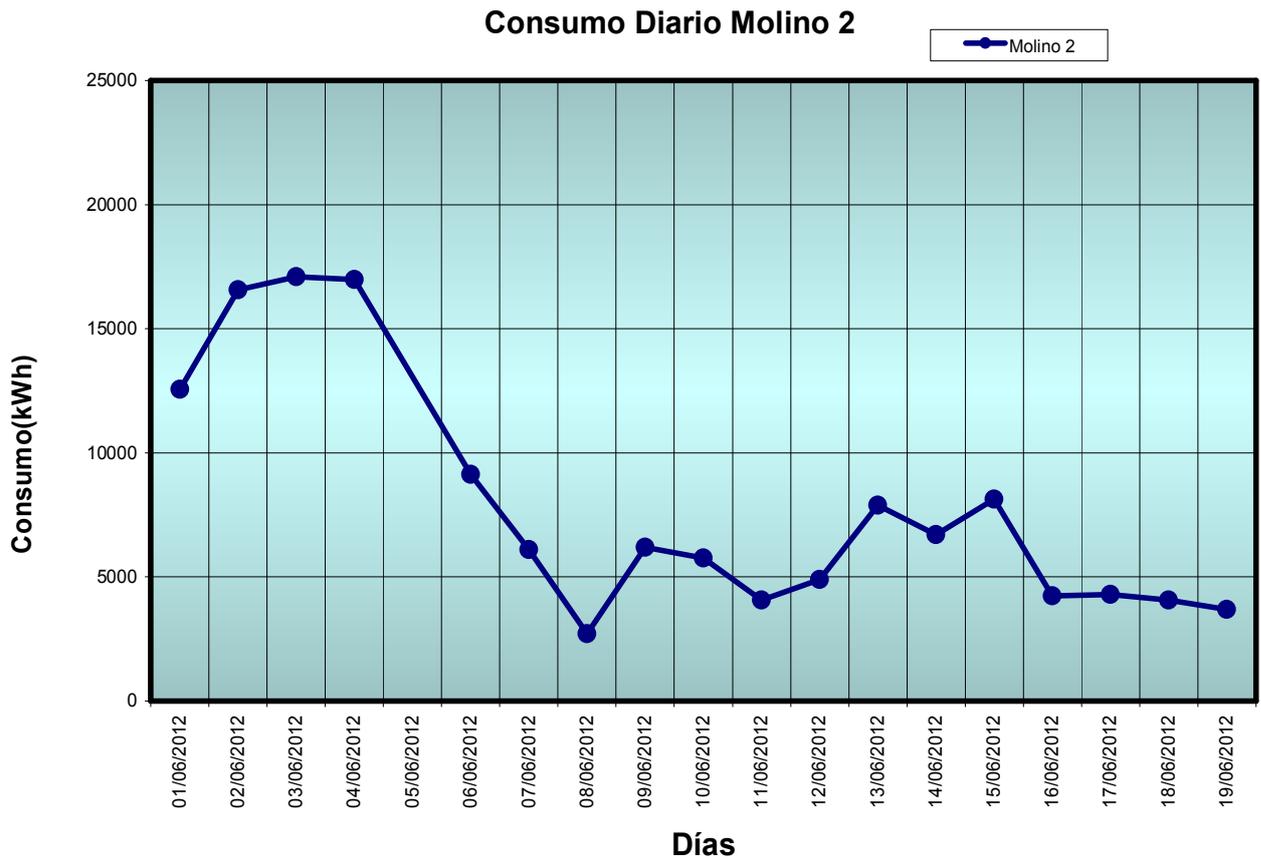


Figura 3.4: "Consumo Diario del Molino 2".

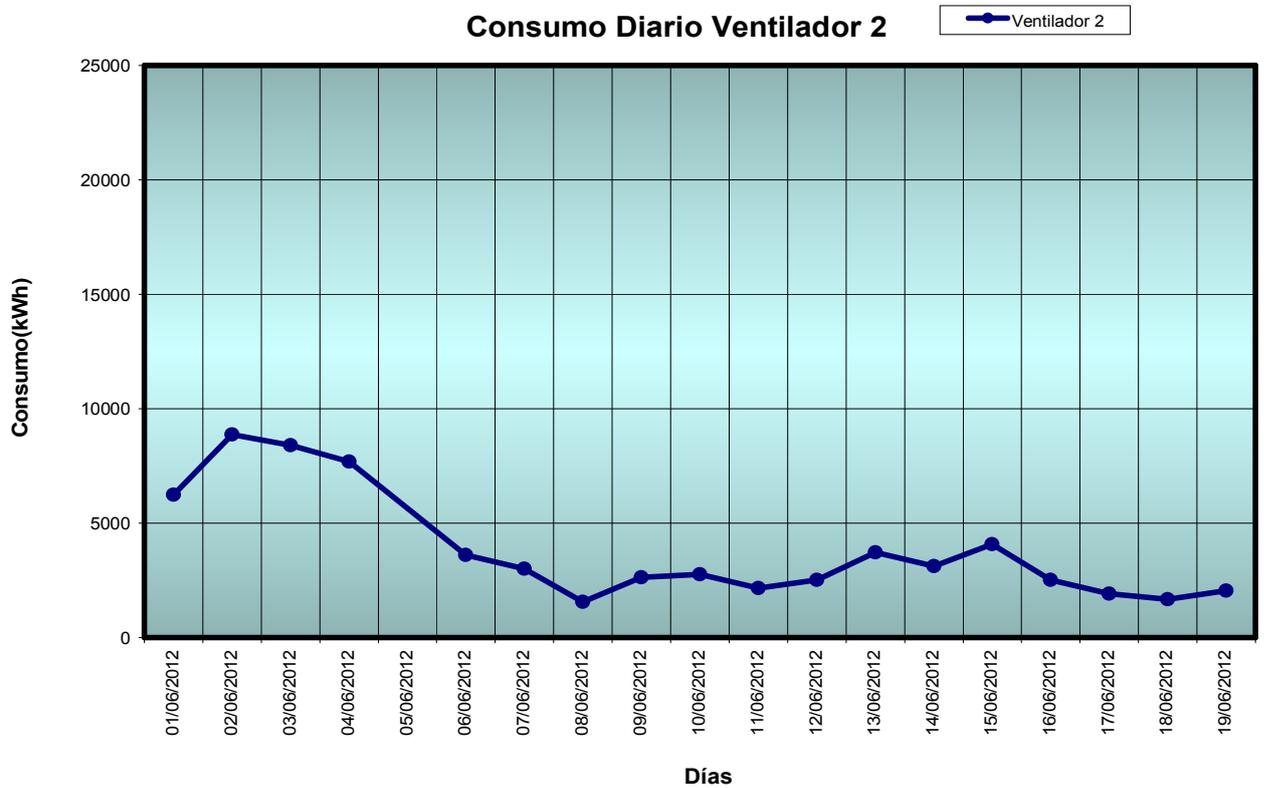


Figura 3.5: "Consumo Diario del Ventilador 2".

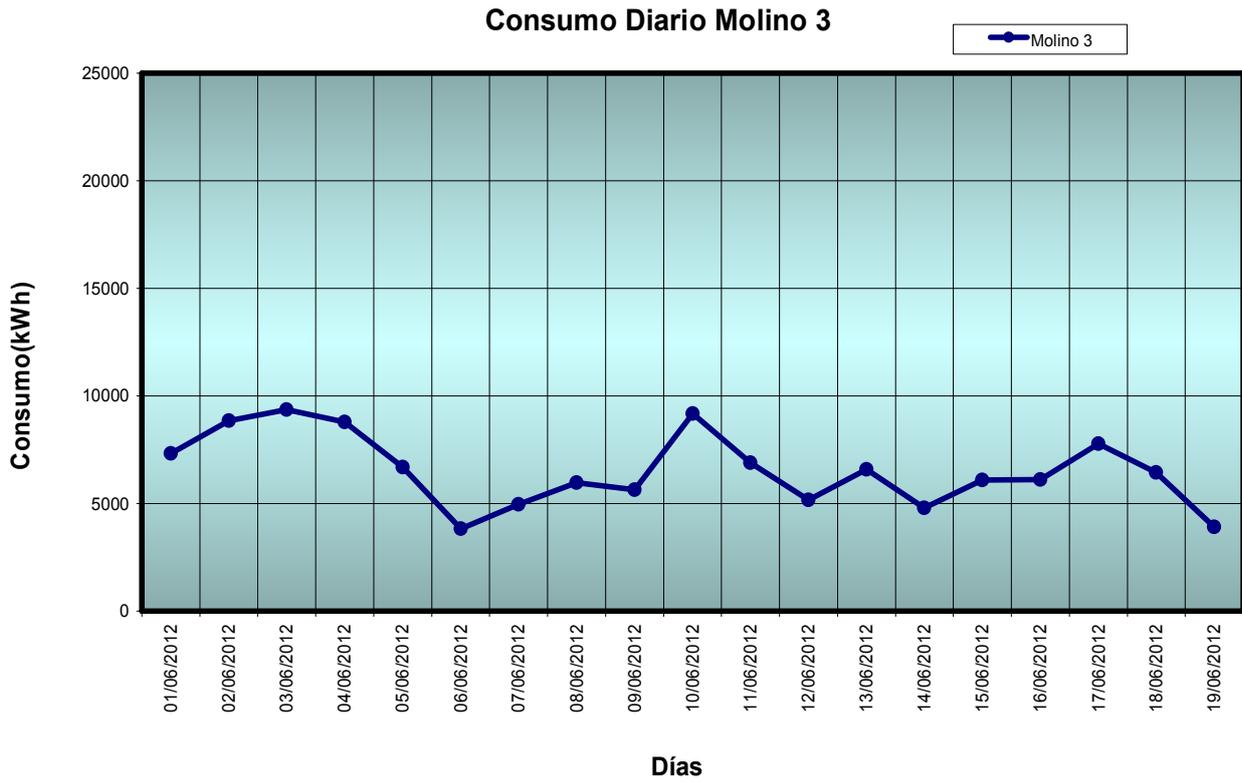


Figura 3.6: "Consumo Diario del Molino 3".

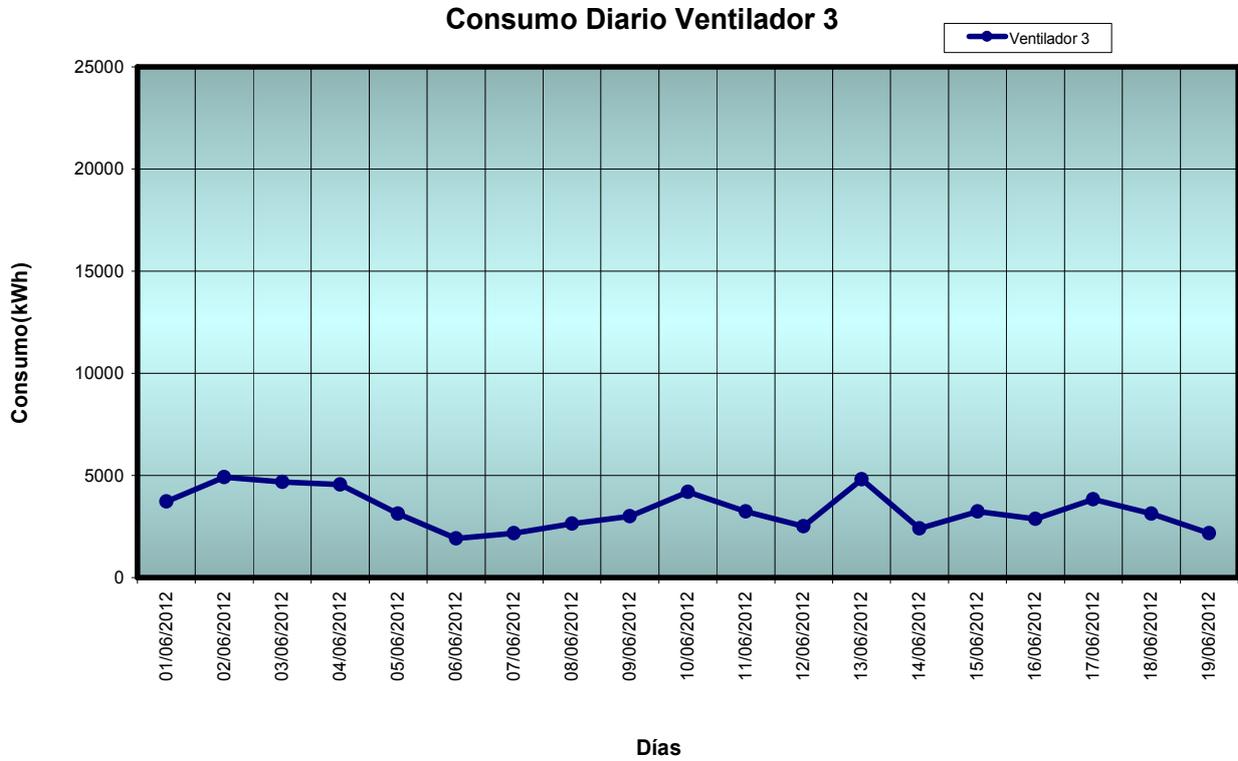


Figura 3.7: "Consumo Diario del Ventilador 3".

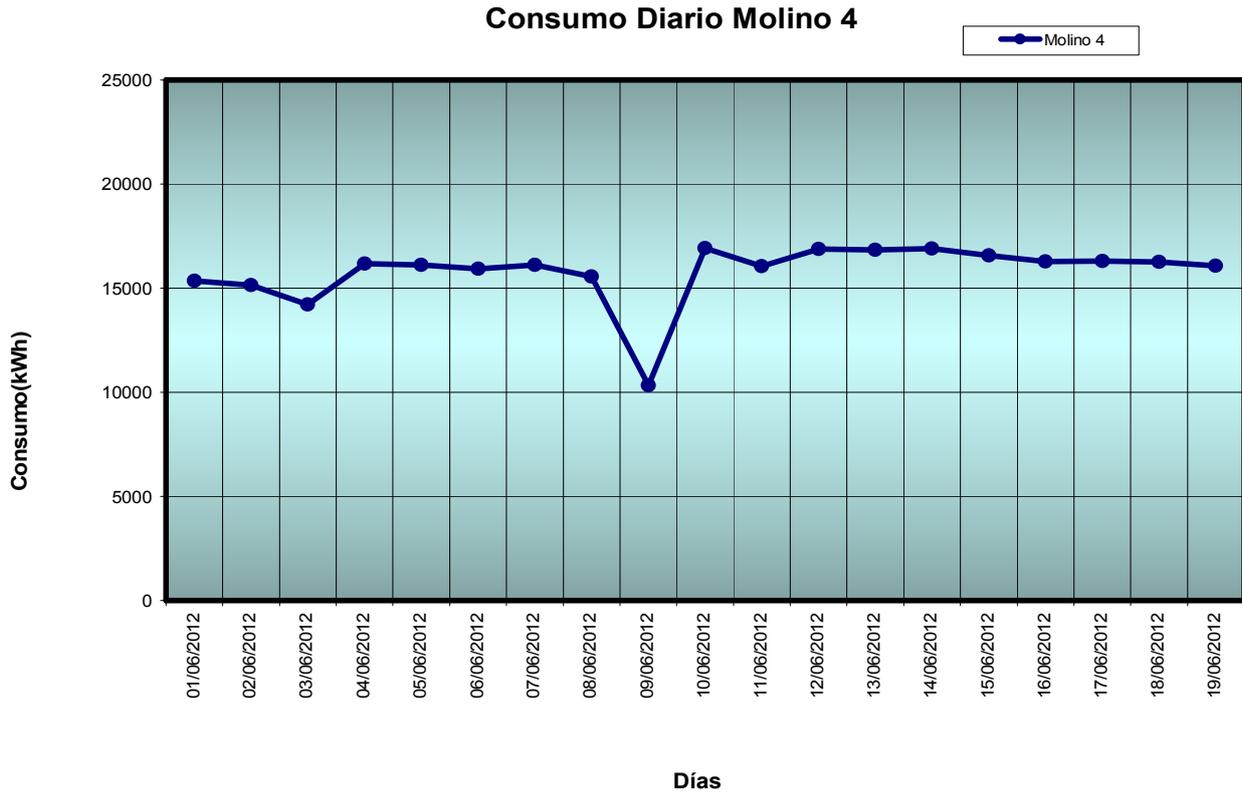


Figura 3.8: “Consumo Diario del Molino 4”.

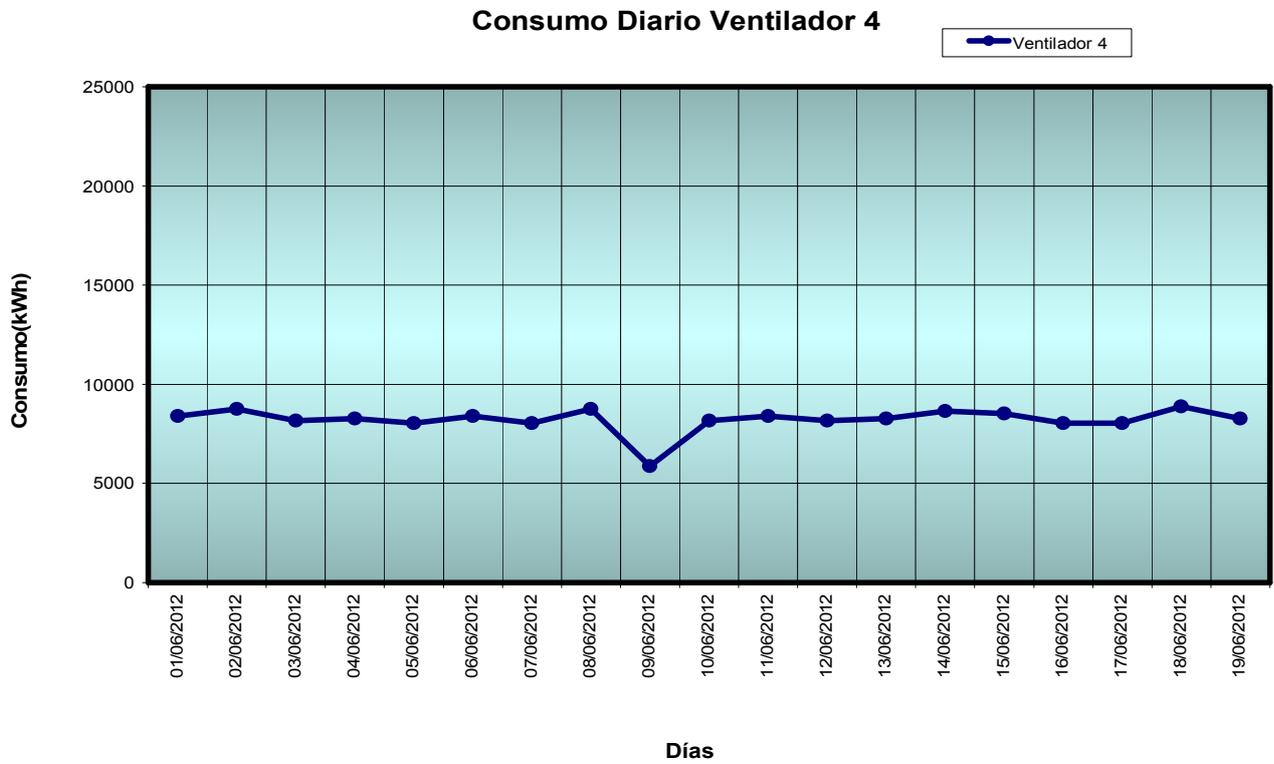


Figura 3.9: “Consumo Diario del Ventilador 4”.

3.4 Consumo de energía tomando las lecturas cada una hora.

Para tener obtener datos de consumo en un tiempo más corto se tomaron lecturas cada una hora en los cuatro molinos y ventiladores. Los datos se detallan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: “Consumo de energía de los Molinos y Ventiladores”.

DIA 20/06/2012									
Consumo de energía de los molinos y ventiladores cada una hora									
Hora	M1 (kWh)	V1 (kWh)	M2 (kWh)	V2 (kWh)	M3 (kWh)	V3 (kWh)	M4 (kWh)	V4 (kWh)	Total (kWh)
8:30 AM	607	320	630	360	600	300	480	300	3590
9:30 AM	600	360	600	360	450	450	900	360	4080
10:30 AM	609	360	600	300	450	264	600	360	3534
11:30 AM	600	420	480	360	600	516	750	420	4146
12:30 PM	603	300	720	300	587	300	450	300	3560
1:30 PM	720	360	750	360	900	360	690	360	4500
2:30 PM	480	240	900	360	450	360	900	360	4050
3:30 PM	600	300	600	240	450	300	780	360	3630
4:30 PM	600	360	600	300	450	300	420	305	3480
Promedio	600,3	335,6	653,3	326,7	548,6	350,0	663,3	363,3	3841,1
Máximo	720	420	900	360	900	516	900	450	4500
Mínimo	480	240	480	240	450	264	420	300	3480

En los figuras 3.10 a la 3.13 se puede apreciar el comportamiento del consumo de energía de los molinos y sus respectivos ventiladores cada una hora desde las 8:30 AM hasta las 4:30 PM del día 20 de junio de 2012.

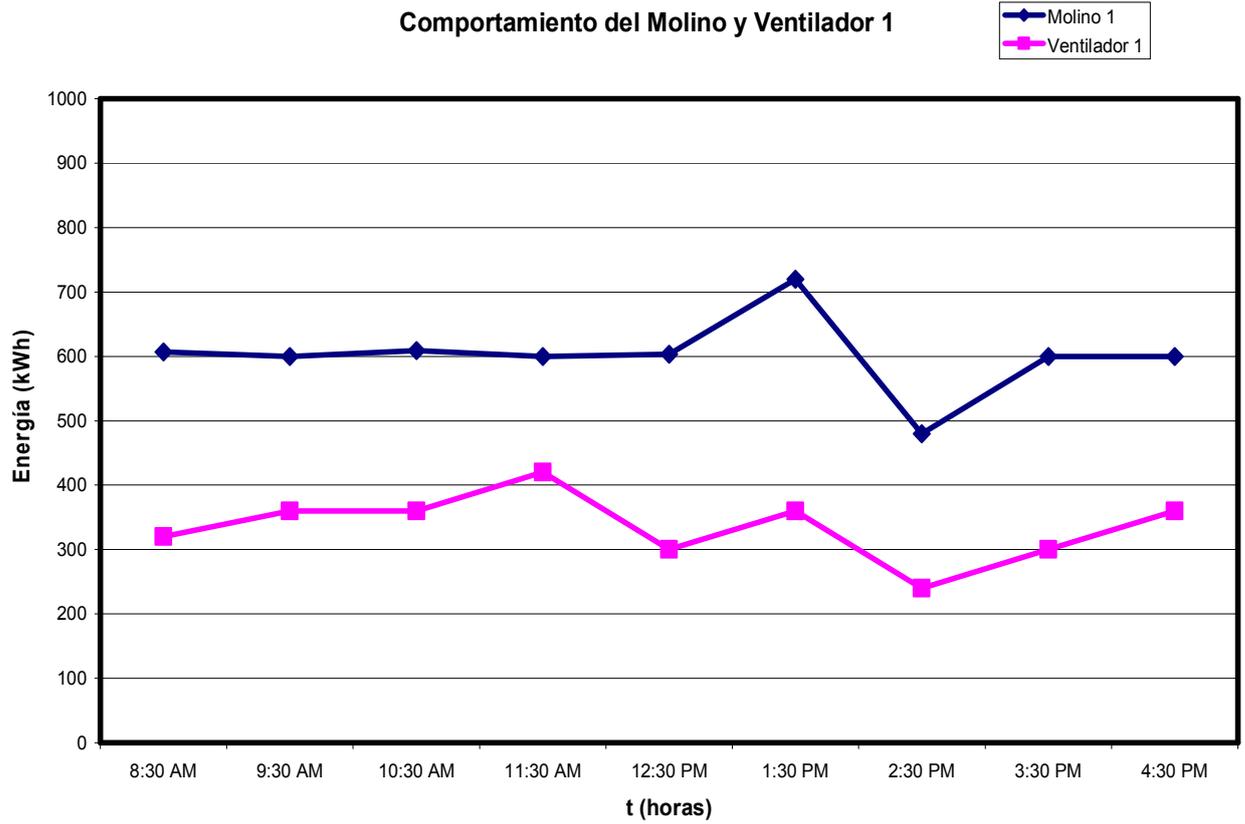


Figura 3.10: “Consumo del Molino 1 y Ventilador 1”.

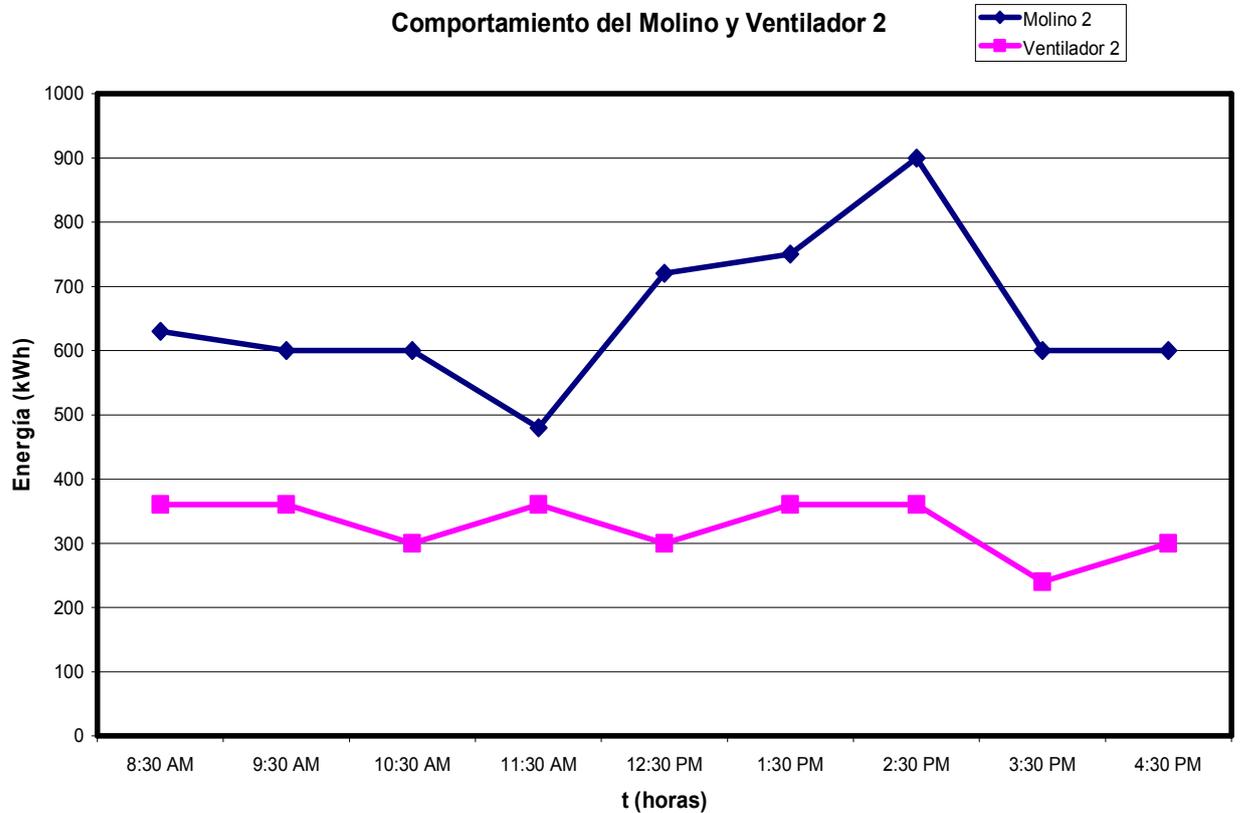


Figura 3.11: “Consumo del Molino 2 y Ventilador 2”.

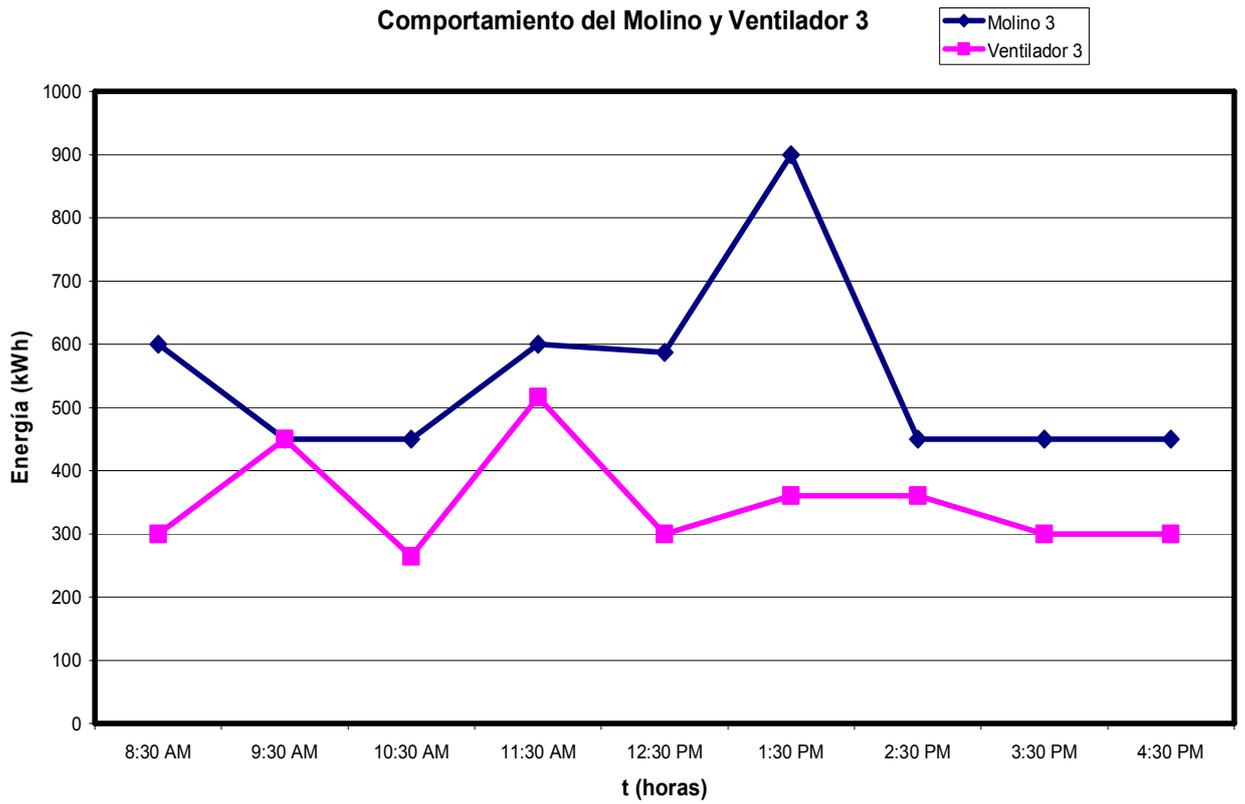


Figura 3.12: “Consumo del Molino 3 y Ventilador 3”.

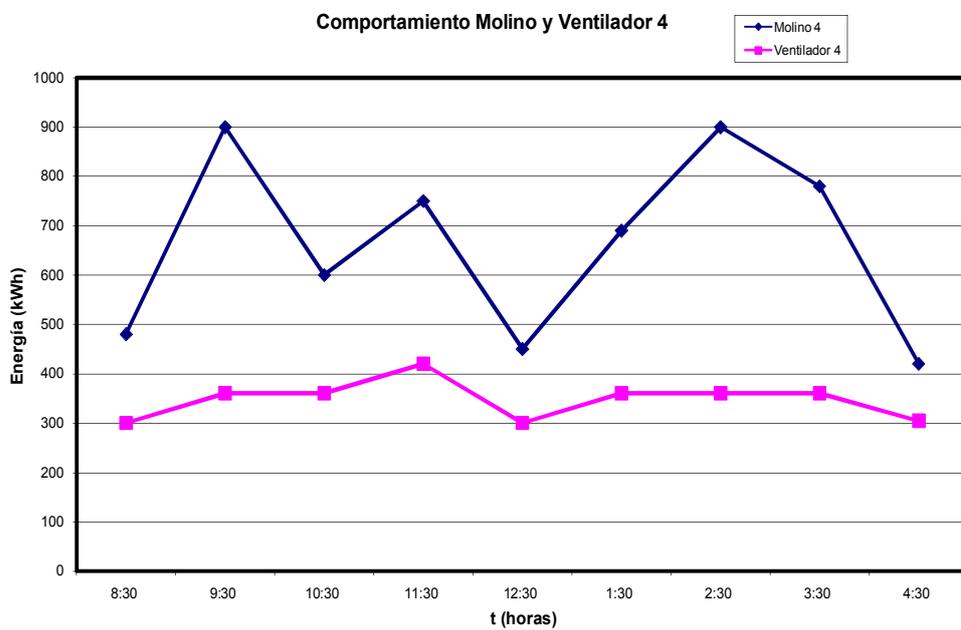


Figura 3.13: “Consumo del Molino 4 y Ventilador 4”.

3.5 Comportamiento de potencia de la unidad 4.

También se tuvo en cuenta el comportamiento del Molino 4 con su Ventilador de recirculación durante una hora, ya que este es el que más trabaja, para esto se programó el Analizador de redes para que tomara lecturas cada un minuto. Las figuras 3.14 y 3.15 muestran este comportamiento.

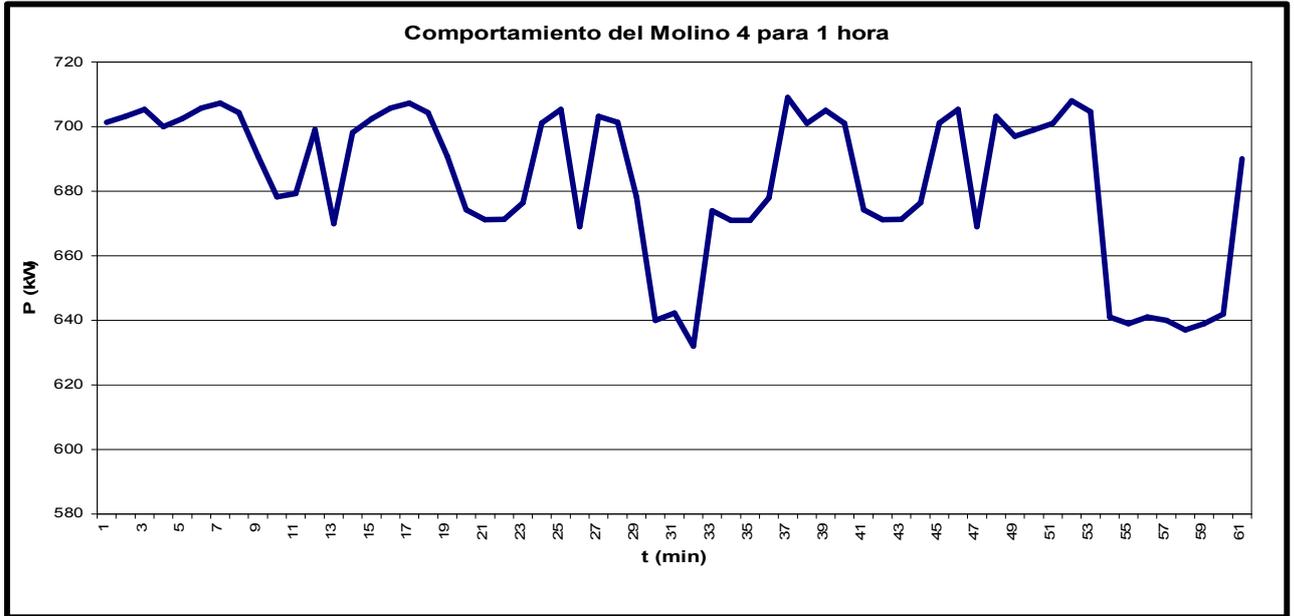


Figura 3.14: “Comportamiento de la potencia del Molino 4”.

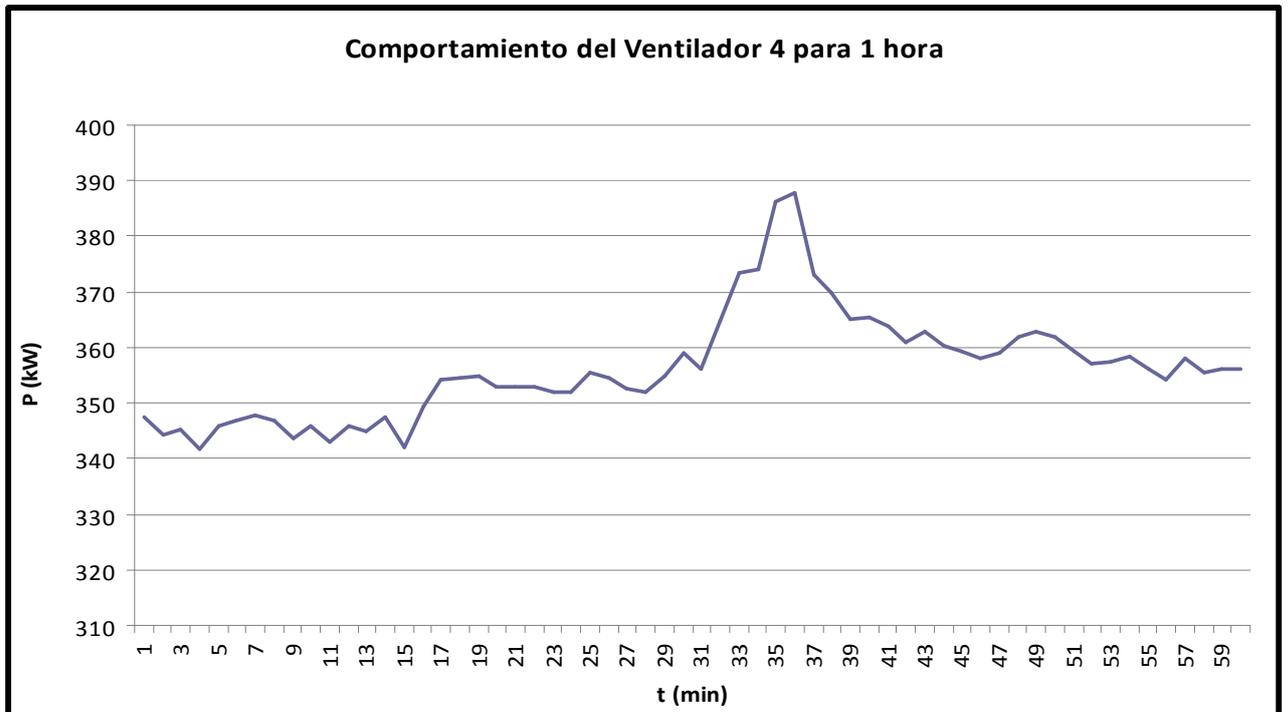


Figura 3.15: “Comportamiento de la potencia del Ventilador 4”.

3.6 Consumo específico de energía de las unidades de molienda.

El consumo específico de energía es un término que se utiliza para mostrar cuanto consume una unidad de molienda por toneladas de material en un tiempo dado, es la relación entre la energía consumida en el proceso y la producción en un tiempo determinado. Para este estudio se tuvo en cuenta la producción diaria de la sección de molienda. Los resultados se muestran en la tabla 3.3 y en los gráficos siguientes:

Tabla 3.3: “Consumo específicos de las unidades de molienda”.

Días	Consumos específicos de Unidades (kWh/t)				Producción (t)
	Wu 1	Wu 2	Wu 3	Wu 4	
01-jun	14,456	14,066	14,707	13,519	3941,239
02-jun	13,545	14,338	14,068	13,707	5040,374
03-jun	10,972	11,208	11,046	10,497	6324,282
04-jun	16,151	16,483	15,803	14,885	4713,478
05-jun	14,950	0,000	19,807	13,206	3491,788
06-jun	12,355	11,300	11,537	10,722	6212,669
07-jun	11,823	11,206	11,706	10,618	5968,615
08-jun	10,727	11,142	12,161	11,698	5339,650
09-jun	19,545	18,999	18,217	18,756	3069,155
10-jun	11,776	11,323	12,671	11,470	6181,348
11-jun	10,571	11,014	11,589	10,575	6064,898
12-jun	11,181	11,787	12,101	11,437	5482,633
13-jun	11,007	10,552	0,000	11,087	5598,622
14-jun	11,138	10,681	11,819	11,386	5016,535
15-jun	13,277	12,314	12,479	12,388	4968,961
16-jun	12,159	11,869	12,332	11,571	5209,539
17-jun	9,865	11,497	11,447	10,490	6131,113
18-jun	11,462	11,210	11,182	11,062	4306,520
19-jun	12,914	11,248	12,291	11,635	3982,506
Promedio	12,625	11,697	12,472	12,143	5107,575

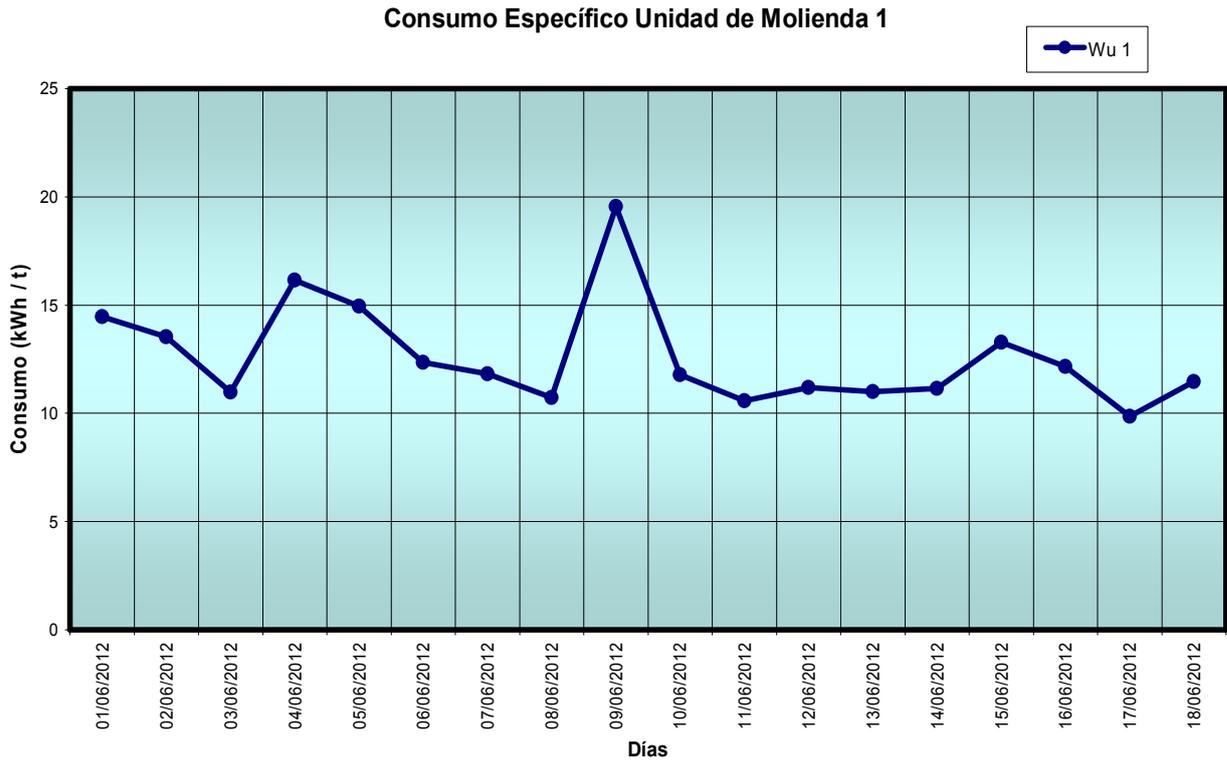


Figura 3.16: "Comportamiento del consumo específico de la unidad 1 de molienda".

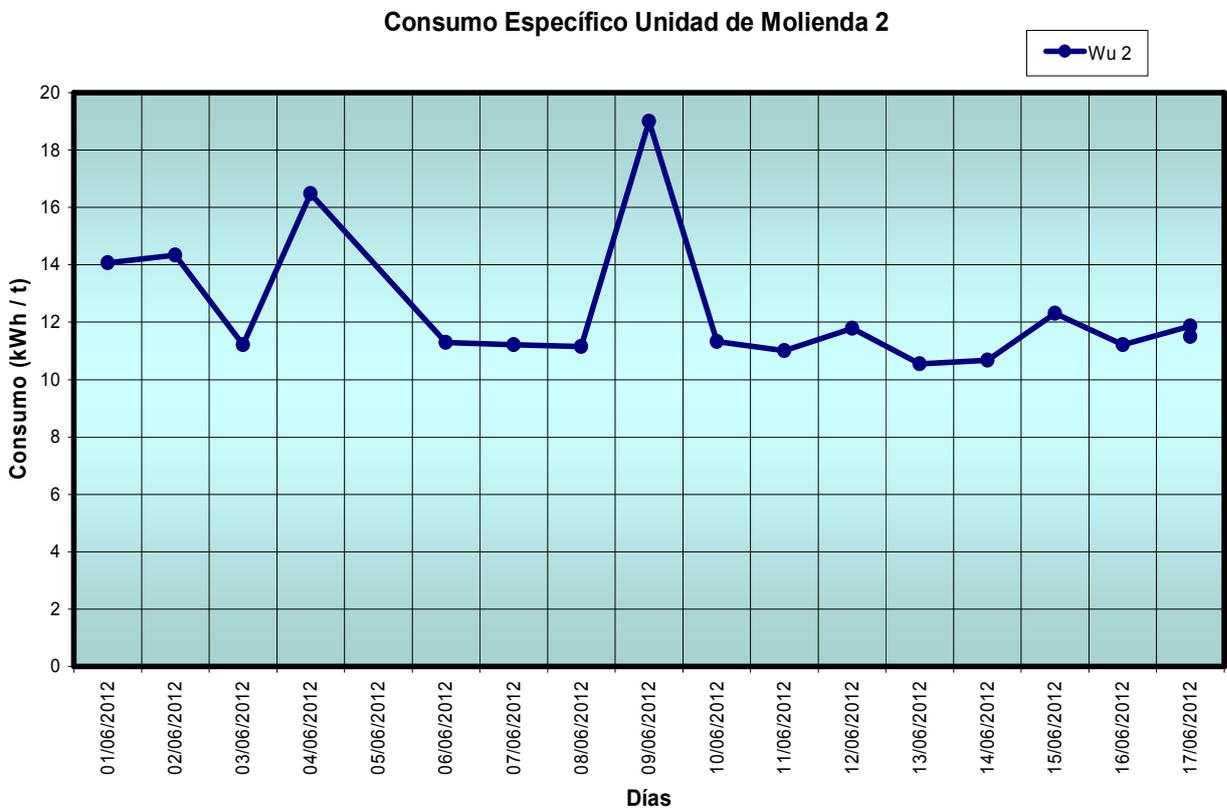


Figura 3.17: "Comportamiento del consumo específico de la unidad 2 de molienda".

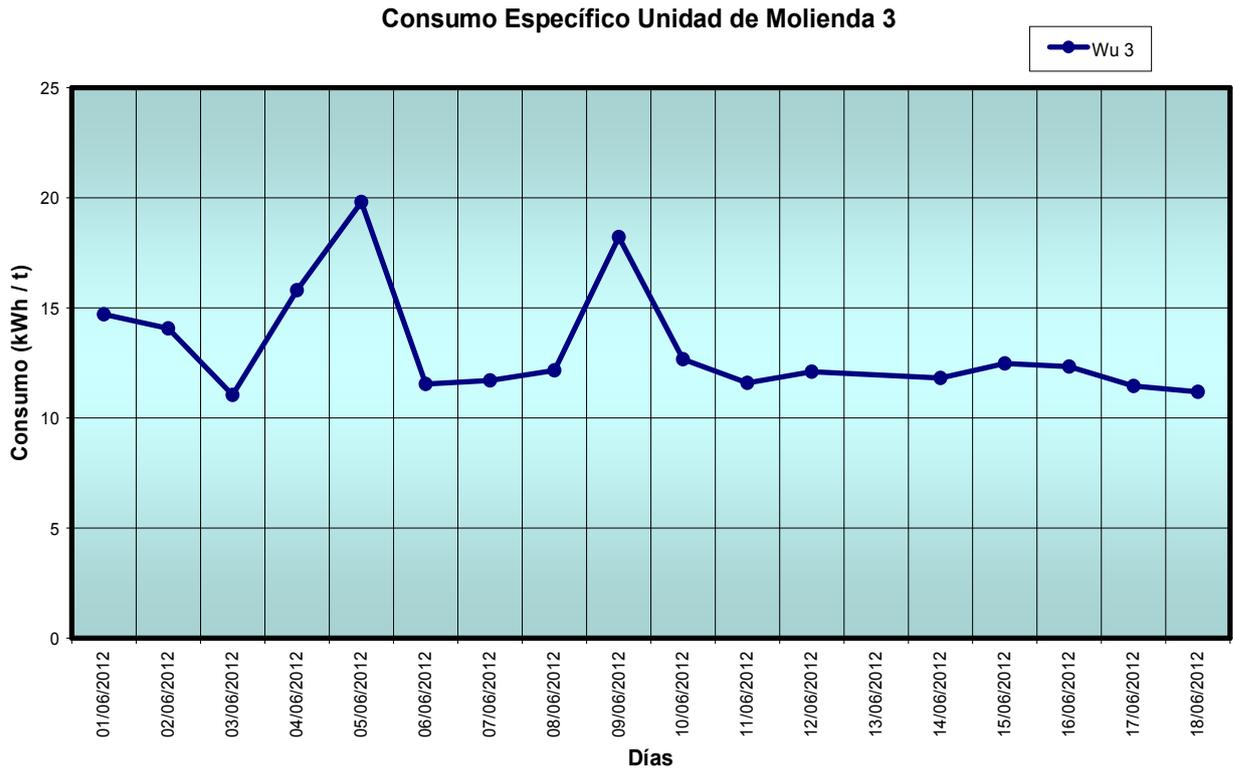


Figura 3.18: “Comportamiento del consumo específico de la unidad 3 de molienda”.

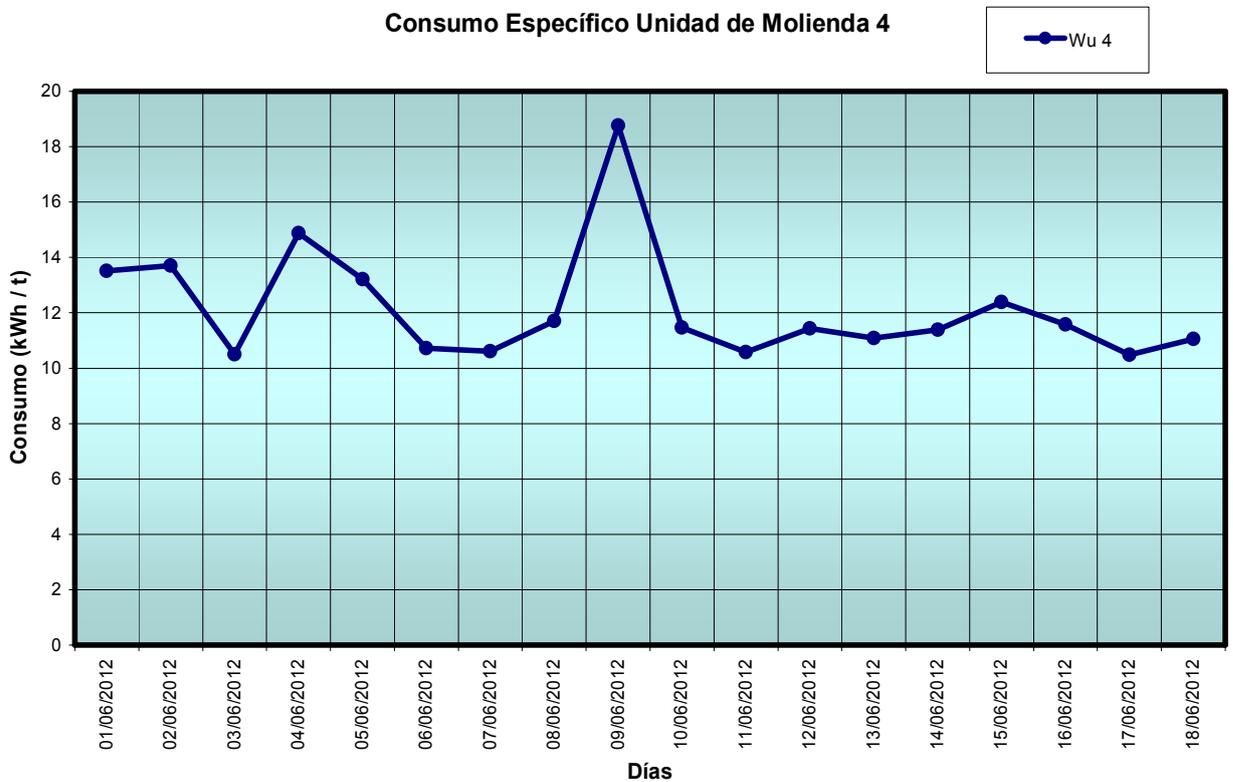


Figura 3.19: “Comportamiento del consumo específico de la unidad 4 de molienda”.

3.7 Análisis de los resultados.

Con los resultados obtenidos y los conocimientos adquiridos en la recopilación bibliográfica, se puede realizar un análisis que conlleve a una mejor interpretación de los mismos.

En la tabla 3.1 se muestran los consumos diarios de los molinos y ventiladores. En ella se puede apreciar que el consumo de la sección de molienda promedia 62760,8 MWh diario, aclarar que esto depende de la alimentación y del tiempo de trabajo de cada unidad.

La figura 3.1 muestra comportamiento en función del tiempo de la sección de molienda, en ella se observa una variación de consumo de un 2,2 % del consumo total de la sección durante los 20 días que duró el estudio.

Las figuras 3.2 al 3.9 muestran los comportamientos de los molinos y los ventiladores de forma separada, los cuales presentan variaciones en el consumo diario, esto depende fundamentalmente de la cantidad de material a alimentar y del tiempo de trabajo diario.

La tabla 3.2 muestra los consumos por horas aproximados según lecturas tomadas cada una hora, en ella se muestra que el consumo de los molinos promedia en 600 kWh para el molino1; 653 kWh para el molino 2; 548 kWh para el molino 3 y 663 kWh para el molino. Para los ventiladores 1, 2, 3, 4 es 335 kWh, 326 kWh, 350 kWh y 363 kWh respectivamente. También esto se puede apreciar en las figuras 3.10 a la figura 3.13.

En las figuras 3.14 y 3.15 se muestran los valores de potencia para una hora de trabajo del molino 4 y ventilador 4, valores tomados por el Analizador de redes (ver epígrafe 2.5). Se tomo esta unidad por ser la de mayor tiempo de trabajo.

En la tabla 3.3 y en los gráficos las figuras 3.16 a la 3.19, muestran los resultados obtenidos en los cálculos de consumo específico teniendo en cuenta la productividad diaria.

Todos estos resultados pueden ser interpretados como la manifestación del surgimiento frecuente de intervalos, en los cuales fluctúan los consumos dependiendo del régimen de trabajo y de la cantidad de material alimentado apareciendo altos consumos en el molino y el ventilador, independientemente de las productividades que se hayan alcanzado en este período.

3.8 Valoración Económica.

Según estudios realizados por Rodolfo Pérez Pérez (2003), antes de poner la malla clasificadora, la media del consumo específico de energía eléctrica era de 16 kWh/t, para una producción diaria de 5276,18 t; siendo el costo de producción de una tonelada de mineral igual a 0,5462 CUC.

Para los cálculos realizados en el presente estudio (junio 2012) se determinó que la producción promedio de la sección de molienda, para un día es de 5107,58 t, con un consumo de energía de 62700 kWh. Se determinó que el consumo específico de energía eléctrica es de 12,23 kWh/t.

Aplicando la tarifa de electricidad actual, teniendo en cuenta los horarios de la madrugada, día y hora pico, el costo de producción de una tonelada de mineral es de 0,40 CUC/t, en el día es de 2043 CUC, representando 745706,68 CUC/año.

3.9 Conclusiones

En el capítulo se realiza un análisis de todos los resultados que se obtuvieron durante los días de mediciones, mostrados de forma tabulada, se analizaron los gráficos de consumo de energía en función del tiempo, llegando a conclusiones que muestran las variaciones que ocurren en los consumos de los molinos, ventiladores y unidades en conjunto, se observan los consumos específicos en función de la productividad para los días tomados y el proceso de molienda en general. Se comprueba el peso que tiene la molienda en todo el proceso industrial y lo que representa para la Planta de Preparación de Mineral.

CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ Se determinó que al colocar la malla clasificadora (10 mm) se reduce el consumo específico de energía en 3,77 kWh/t.
- ✓ El costo de producción de una tonelada de mineral se reduce en 0,1462 CUC/t.
- ✓ Se obtiene un ahorro por concepto de pago de electricidad de 746,76 CUC/día, que al año representa 272555,79 CUC.

RECOMENDACIONES.

- ✓ Dar continuidad al presente estudio para disminuir los costos de producción en la sección de molienda.
- ✓ Utilizar éste trabajo como base de conocimiento para mejorar la eficiencia energética en la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. **Andreiev S.E; Perov V.A y Zverievich V.V.** : “*Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*”, Editorial Mir, Moscú, 1980.
2. **Banisi, S.; Farzaneh, M.** “*Effect of ball size on the performance of grinding and flotation circuits: the Sarcheshmeh copper mine case*. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*”. Volume 115, Number 3, September 2006 , pp. 165-170(6).
3. **Coello A. V., Llorente L, García A.**, “*Optimización de la molienda seca de los minerales lateríticos*”. Informe II. Fac. Metalurgia. ISMM. Moa. Nov.1992.
4. **Coello A. V., Marrero S.**, “*Control de la carga interior del molino a través de terceros parámetros*”. Rev. Minería y Geología. Vol 11. N°1. 1994.
5. **Coello. A. V.**,”*Consideraciones de la molienda del mineral laterítico*”. Rev. Minería y Geología. Vol. 1.No1.1993a.
6. **Coello A. V. Tijonov O.**”*Molienda de minerales multicomponentes. Modelo integro-diferencial para la valoración de la energía*”. Rev Minería y Geología.N° 3-4.2001.
7. “*Dimensionado de molinos*”.
Artículos, http://www.tecmaqsrl.com/Folletos/Molino_Bolas.pdf, Junio, 2003
8. **Laborde B. Reynaldo y A. Coello.** “*Normación del consumo de energía eléctrica en la molienda de la laterita*”. Memorias FIE 2002, Universidad de Oriente. ISBN.
9. **Laborde B, R. , A. Coello, S. Marrero, Angulo, L.O.** “*Influencia de la relación serpentina-limonita sobre los indicadores energotecnológicos en el proceso de molienda del mineral laterítico*”
10. **Laborde B, R. y Coello V, A. Angulo, L. O.** “ *El consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda del mineral laterítico* “, CICT, ISMM, Moa, 1998.
11. **Laborde B, R.**”*Modelación y simulación del proceso molienda de mineral lateríticos, con composición sustancial variable*”, Tesis Doctorado ISMM. Moa 2005.
12. **Mendoza S, J.** “*Metodología para la normación del consumo de energía en el proceso de molienda del mineral laterítico*”. Tesis maestría ISMM Moa 2008.



13. **Núñez G, Y. y Pérez G, S.** "Modelación a escala de laboratorio del proceso de molienda del mineral laterítico del yacimiento de Punta Gorda". (Trabajo de diploma), ISMM, Moa, 2003.
14. **Reina L, Y.** "Determinación del índice de trabajo o índice de Bond para los minerales lateríticos". ISMM, Moa, 2004.
15. **N. Kotake, K. Suzuki, S. Asashi, Y. Kanda.** "Experimental study on the grinding rate constant of solid materials in a ball mill. *Powder Technology*". Volumen 122, pp (101-108), 2002.
16. **Téllez, Jacinto.** "Las propiedades físico-mecánicas de las menas lateríticas y su relación con el consumo específico de energía en el proceso de molienda". Tesis maestría ISMM Moa 2010.

ANEXOS

Tabla A1 Lecturas diarias de los metrocontadores y multilín de ventiladores y molinos.

FECHA	HORA	Lecturas Metrocontadores y Multilín							
		M1 (kWh)	V1 (kWh)	M2 (kWh)	V 2 (kWh)	M3 (kWh)	V3 (kWh)	M4 (kWh)	V4 (kWh)
01/06 2012	8:30 PM	21074	5319.1	3026892	289.5	4350813	6207.7	12049680	5173.6
	12:30 AM	21982	5319.2	3029456	290.2	4351809	6207.7	12051476	5174
	4:30 AM	21982	5319.2	3032395	291.6	4354768	6208.6	12058632	5176.3
02/06 2012	8:30 AM	22002	5319.5	3039440	294.7	4358132	6210.8	12065040	5180.6
	12:30 PM	22791	5319.9	3045290	297.3	4359143	6212.1	12069456	5182.7
	4:30 PM	23552	5320.5	3046278	298.1	4361890	6212.5	12072458	5184.9
03/06 2012	8:30 PM	26705	5321.7	3056010	302.1	4366988	6214.9	12080185	5187.9
	12:30 AM	26789	5322.1	3063054	306.4	4366988	6216.9	12083791	5188.4
	4:30 AM	27012	5322.9	3073054	308.3	4367009	6217.1	12088564	5190.5
04/06 2012	8:30 AM	31406	5323.7	3073099	309.1	4376345	6218.8	12094405	5194.7
	12:30 PM	31406	5323.7	3086614	310.1	4376425	6219.2	12096324	5196.7
	4:30 PM	31406	5323.7	3088457	310.2	4379510	6220.3	12097845	5197.8
05/06 2012	8:30 AM	39356	5326.9	3090071	315.5	4385128	6222.6	12110588	5201.6
	12:30 PM	44459	5329.4	3090071	315.5	4385521	6221.3	12115478	5203.7
	4:30 PM	47307	5329.7	3090071	315.5	4388562	6223.4	12117894	5204.8
06/06 2012	8:30 AM	51418	5331.4	3090071	315.5	4391817	6225.2	12126696	5208.3
	12:30 PM	61957	5338.4	3090171	315.8	4392541	6225.9	12131564	5210.3
	4:30 PM	70421	5339.2	3090183	315.8	4393658	6226.1	12134654	5210.3
07/06 2012	8:30 AM	70579	5339.3	3099198	318.5	4395647	6226.8	12142633	5215.3
	12:30 PM	79981	5344.2	3099253	318.8	4397563	6227.2	12146956	5218.9
	4:30 PM	80923	5346.2	3099253	318.8	4398642	6227.9	12149435	5220.3
08/06 2012	8:30 AM	88111	5347.1	3105299	321	4400598	6228.6	12158744	5222
	12:30 PM	91640	5350.9	3106312	321.2	4401863	6229.1	12159067	5222.8
	4:30 PM	94625	5351.9	3107435	321.8	4403892	6230	12162459	5223.4
09/06 2012	8:30 AM	102739	5354.3	3108019	322.3	4406564	6230.8	12174301	5229.3
	12:30 PM	103758	5355.9	3111056	322.9	4408654	6231.4	12176894	5229.8
	4:30 PM	108501	5356.7	3112489	323.4	4410546	6231.1	12179456	5230.1
10/06 2012	8:30 AM	118968	5361.4	3114204	324.5	4412197	6233.3	12184636	5234.2
	12:30 PM	120210	5364.0	3116253	325.1	4414562	6234.5	12186392	5234.4
	4:30 PM	125315	5367.9	3117958	325.9	4417623	6235.1	12191024	5234.5



11/06 2012	8:30 AM	135723	5368.9	3119957	326.8	4421368	6236.8	12201563	5241
	12:30 PM	142315	5370.9	3120658	327.4	4423147	6237.5	12209453	5244.6
	4:30 PM	143851	5374.9	3121857	327.8	4424653	6238.4	12212945	5245.3
12/06 2012	8:30 AM	150811	5376.7	3124016	328.6	4428268	6239.5	12217619	5248
	12:30 PM	153520	5379.6	3125479	329.1	4429865	6239.9	12224876	5250.2
	4:30 PM	154316	5380.4	3126489	329.9	4430254	6240.4	12229452	5251.1
13/06 2012	8:30 AM	165461	5383.4	3128914	330.7	4433430	6241.6	12234495	5254.8
	12:30 PM	174310	5385.1	3129579	331.2	4433430	6241.6	12241067	5257.3
	4:30 PM	178516	5385.9	3132047	331.7	4433430	6241.6	12248928	5258.9
14/06 2012	8:30 AM	181639	5390.4	3136806	333.8	4435214	6243.6	12251328	5261.7
	12:30 PM	182480	5391.6	3138259	334.2	4437134	6244.1	12254672	5265.9
	4:30 PM	184113	5392.2	3140285	334.9	4437134	6244.1	12261892	5266.4
15/06 2012	8:30 AM	190957	5394.2	3143500	336.4	4440006	6245.6	12268231	5268.9
	12:30 PM	191512	5396.2	3145654	337.5	4441021	6246.2	12273091	5273.1
	4:30 PM	193116	5398.6	3148256	338.1	4443160	6247.1	12279357	5275.6
16/06 2012	8:30 AM	201409	5398.8	3151635	339.8	4446100	6248.3	12284810	5276
	12:30 PM	202009	5403.5	3152478	340.2	4448301	6248.9	12291024	5279.1
	4:30 PM	204635	5404.1	3153684	340.8	4450321	6249.2	12299942	5281.9
17/06 2012	8:30 AM	215727	5405.2	3155871	341.9	4452216	6250.7	12301089	5282.7
	12:30 PM	219314	5408.9	3156287	342.5	4454326	6251.1	12313939	5286.9
	4:30 PM	225816	5410.6	3157964	342.8	4456154	6252.3	12315945	5287.3
18/06 2012	8:30 AM	229940	5411.9	3160154	343.5	4459998	6253.9	12317392	5289.4
	12:30 PM	233925	5413.9	3161547	343.9	4460123	6254.5	12320564	5292.4
	4:30 PM	233925	5413.9	3162538	344.1	4464231	6255.1	12327945	5294.6
19/06 2012	8:30 AM	234950	5414.1	3164214	344.9	4466439	6256.5	12333645	5296.8
	12:30 PM	235634	5415.6	3165987	345.2	4467254	6256.9	12334567	5299.5
	4:30 PM	237812	5416.8	3166512	345.9	4468412	6257.4	12334567	5299.5
20/06 2012	8:30 PM	242676	5417.2	3167895	346.6	4470348	6258.3	12349725	5303.7

Tabla A2. Productividad de los molinos 1/6 al 20/6/2012.

Días	Productividad t/h
1/6	73,27
2/6	73,96
3/6	94,76
4/6	68,48
5/6	76,19
6/6	96,59
7/6	94,77
8/6	90,38
9/6	58,65
10/6	91,13
11/6	96,33
12/6	91,21
13/6	94,38
14/6	93,47
15/6	84,42
16/6	87,57
17/6	96,69
18/6	97,72
19/6	87,24
20/6	92,57

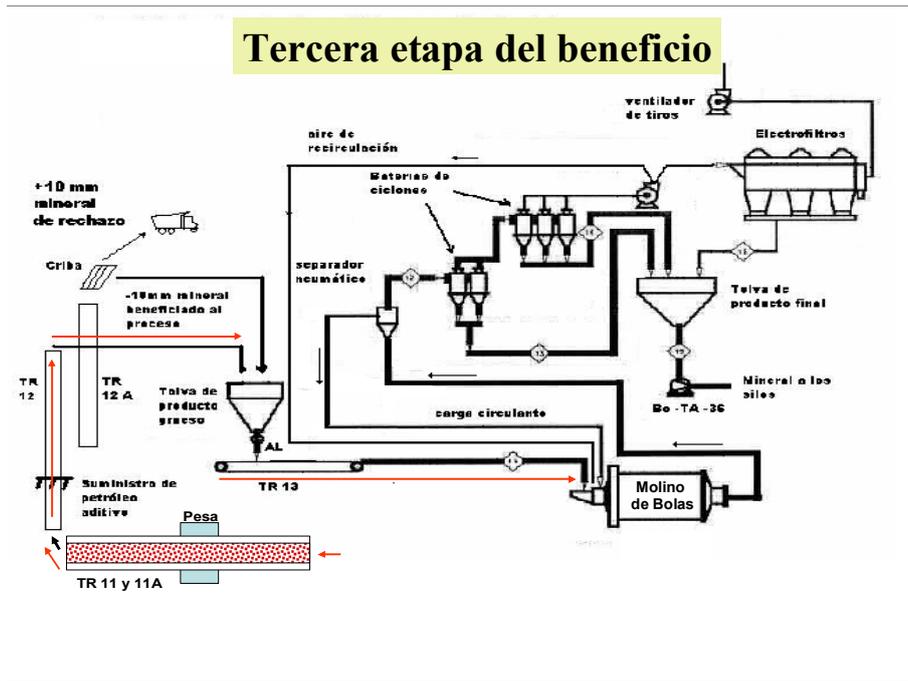


Figura. A1. Esquema tecnológico correspondiente a una unidad de molienda

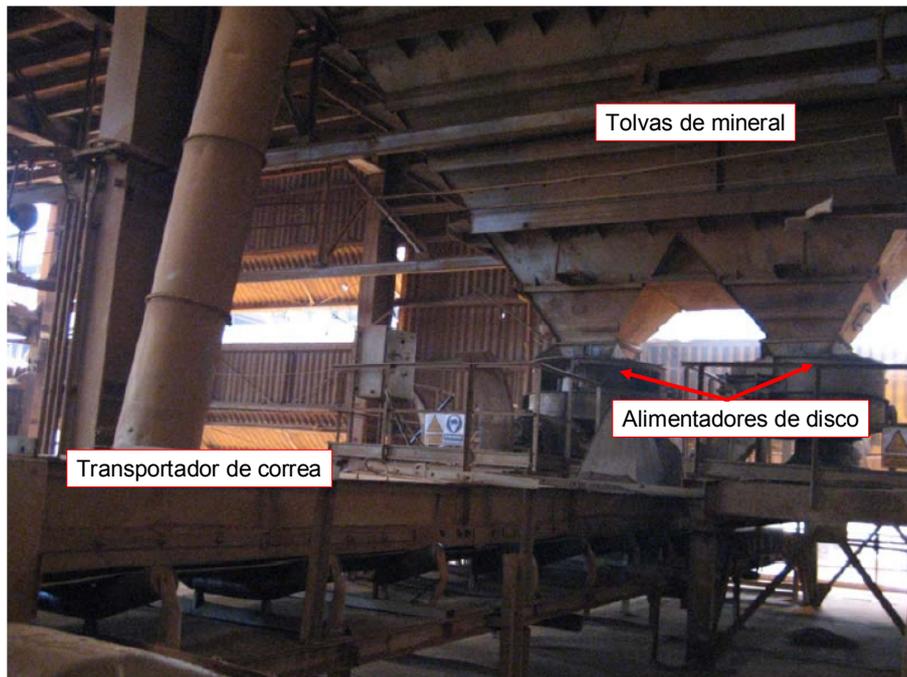


Figura A2. Planta de Preparación de Mineral



Figura A3. PQM utilizada en el estudio.

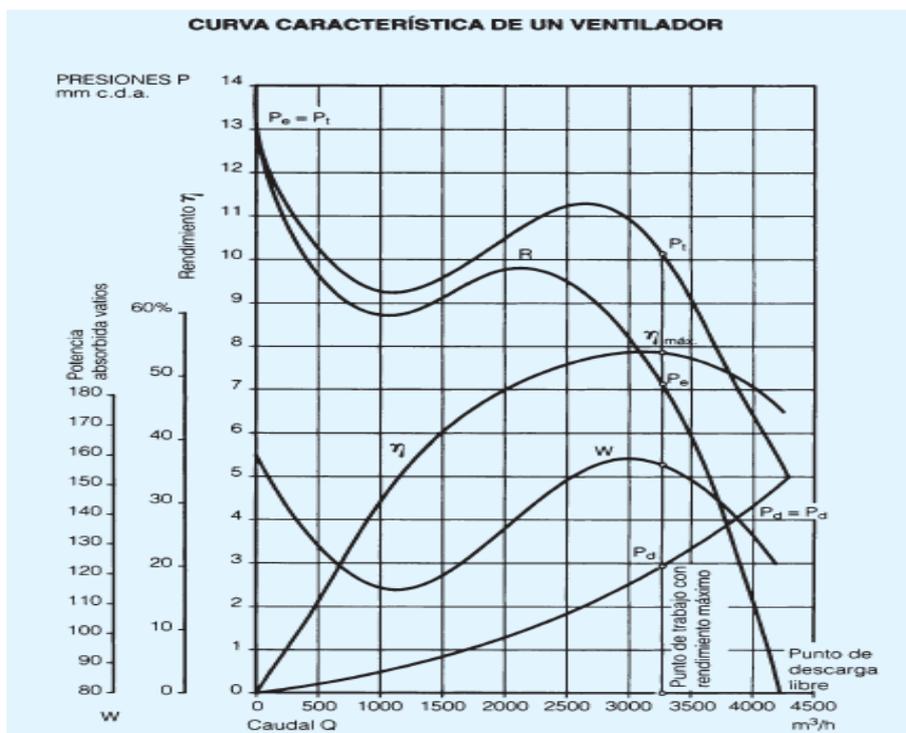


Figura A4. Curva característica de los ventiladores (Escoda, 2003)

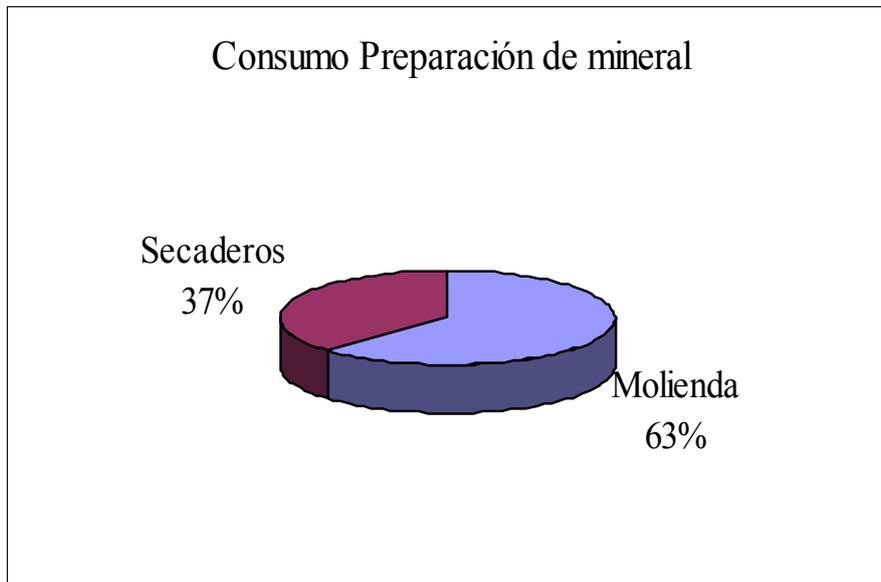


Figura A5. Comportamiento de consumo energético en planta Preparación de mineral

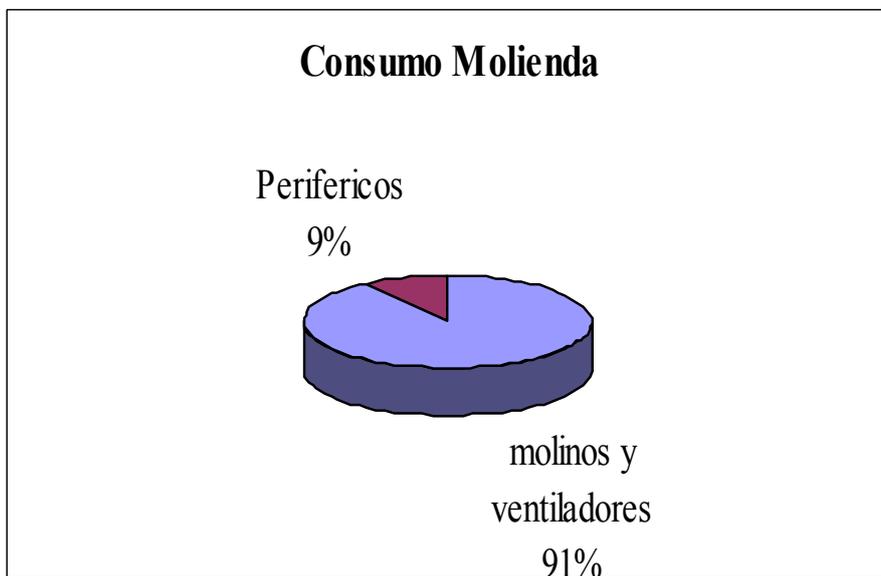


Figura A6. Comportamiento de consumo energético en sección de molienda