



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA - ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE DIPLOMA
EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO

Tema: “Determinación del consumo específico de energía del proceso de molienda de las menas lateríticas a escala de planta piloto en el CEDINIQ”

Diplomante: Onel Garcé Rodríguez

Tutores: DrC. Reynaldo Laborde Brown
Ing. Osmany Pérez Aballe

Curso 2011 – 2012

“Año 54 de la Revolución”

HOJA DE FIRMAS

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

Tutor:

Nombre: _____

Firma: _____

Tutor:

Nombre: _____

Firma: _____

Oponente:

Nombre: _____

Firma: _____

J Dpto.:

Nombre: _____

Firma: _____

DECLARACIÓN JURADA

Declaro que yo Onel Garcé Rodríguez soy el único autor de este trabajo de diploma y autorizo al Instituto Superior MINERO METALURGICO para que haga de este trabajo de diploma el uso que estime pertinente.

Firma: _____

PENSAMIENTO

Así, pues, he visto que no hay cosa mejor para el hombre que alegrarse en su trabajo, porque esta es su parte; porque ¿Quién lo llevará para que vea lo que ha de ser después de él?

Salomón

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma:

A mi Dios Jehová:

Que ha estado observando todo cuanto he hecho y que ha estado a mi lado ayudándome.

A mis tutores Osmani y Laborde:

Gracias a ellos que me han dado su ayuda y apoyo para realizar este trabajo de diploma.

Al Instituto Superior Minero Metalúrgico:

Que me ha ayudado a formarme como ingeniero.

A mi amada esposa: Libni Estévez Machado

Porque siempre estás en mis pensamientos y es por ti que hago esto para estar siempre a tu lado.

A mis padres: Onel Jesús Garcé Prado y Ana María Rodríguez Báez

Gracias a ustedes y a su sacrificio es que he podido llegar hasta aquí porque han sabido darme amor y corrección.

A todos mis familiares:

Porque sé que me apoyan en mi carrera y porque también deseo compartir con ustedes cuando termine.

A mis compañeros de aula:

Porque estos cinco años que hemos compartido juntos y porque me han sido de gran ayuda y apoyo en mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos:

A Mi Dios Jehová: Por darme la vida y todo lo que me ha dado, mis padres, mi esposa, mi familia, amigos y hermanos y por darme AMOR para amarlos.

A mis tutores Osmani y Laborde: Por su gran apoyo, ayuda y disposición para ayudarme en la tesis.

Al Ing. Angel Legrá: Aunque no haya sido mi tutor le estoy agradecido por haberme ayudado lo suficiente en mi trabajo de diploma.

A mi esposa: Por corresponderme con su amor que tanto necesité y porque es la mujer con la que quiero envejecer.

A mis padres: Que siempre están pensando y preocupándose por mí y si no fuera por el amor de ustedes yo no estaría aquí hoy.

A toda mi familia: Porque sé que me apoyan también y desean tener un ingeniero eléctrico en la familia.

A todos los profesores: De forma especial, porque si no fuera por ellos no hubiera aprendido lo que sé y no hubiera tenido los conocimientos que tengo ahora.

A mis compañeros de aula: Por haber compartido de su amistad todos estos cinco años y por su gran ayuda y apoyo en todo este tiempo.

A mi País: Que se esfuerza cada día y lucha por mantener el socialismo, la solidaridad y la integridad en todos sus campos.

A todos **MUCHAS GRACIAS**

RESUMEN

Este trabajo fue realizado en el CEDINIQ en Moa, el cuál tiene como objetivo determinar el consumo específico de energía del proceso de molienda a escala de planta piloto. Aquí se muestran los resultados obtenidos y análisis de los experimentos planificados. Se presentan los resultados de las mediciones de potencia del molino de bolas, ventilador de recirculación y la unidad de molienda durante las variaciones de los tres factores fundamentales. Se determinó el flujo de mineral, flujo de aire y carga de bolas experimentalmente y se establecieron los parámetros de trabajo las variables. Se determinó el consumo específico de energía de la unidad de molienda. Se determinaron los modelos matemáticos y gráficos que estiman el consumo específico de energía del molino de bolas, ventilador de recirculación y la unidad de molienda y finalmente se realizó la valoración económica donde se determinó el costo y el ahorro de la producción.

SUMMARY

This work was carried out in the CEDINIQ in Moa, the which it has as objective to determine the specific consumption of energy from the mill process to scale of plant pilot. The results of the mensurations of power of the mill of balls, recirculation fan and the mill unit during the variations of the three fundamental factors are presented. It was determined the mineral flow, flow of air and load of balls experimentally and the variables work parameters were settled down. The specific consumption of energy of the mill unit was determined. It was determined the mathematical models and graphics that they estimate the specific consumption of energy of the mill of balls, recirculation fan and the mill unit and finally it was carried out the economic valuation where it was determined the cost and the saving of the production.

ÍNDICE

Pág.

I	Introducción general
II	Situación problemática
III	Problema
IV	Objetivo
V	Objetivos específicos
VI	Objeto de estudio
VII	Campo de acción
VIII	Hipótesis
IX	Tareas
X	Factibilidad de la investigación
XI	Importancia de la investigación
XII	Resultados esperados
XIII	Aportes

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1	Introducción
1.2	Trabajos precedentes
1.3	Molino de bolas
1.3.1	Partes del molino
1.3.2	Regímenes de trabajo
1.3.3	Bolas
1.3.4	Desgaste de bolas
1.3.5	Llenado del molino de bolas
1.3.6	Peso de las bolas
1.3.7	Tamaño de las partículas de mineral a alimentar
1.3.8	Funcionamiento del molino en ciclo cerrado
1.3.9	Carga circulante. Importancia

Autor: Onel Garcé Rodríguez

- 1.3.10 Factores que influyen en la eficiencia de la molienda
- 1.3.11 Características del mineral alimentado y su influencia en el consumo de energía en el proceso de molienda
- 1.4 Ventiladores centrífugos
 - 1.4.1 Partes componentes
 - 1.4.2 Función
 - 1.4.3 Parámetros que caracterizan a una máquina centrífuga
 - 1.4.4 Curva característica
 - 1.4.5 Puntos de trabajo
 - 1.4.6 Leyes de los ventiladores
- 1.5 Productividad
- 1.6 Método estadístico
- 1.7 Conclusiones del capítulo I

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y METODOS

- 2.1 Introducción
- 2.2 Planificación de los experimentos
- 2.3 Operaciones a realizar
- 2.4 Descripción del proceso tecnológico de la sección de molienda
- 2.5 Características del equipamiento de medición
- 2.6 Programas Utilizados
- 2.7 Características generales del mineral
- 2.8 Características del equipamiento del proceso de molienda
- 2.9 Técnica experimental
 - 2.9.1 Procedimiento para la determinación del flujo de alimentación de mineral
 - 2.9.2 Procedimiento para la determinación del flujo de aire
 - 2.9.3 Método para la determinación de la carga de bolas del molino
- 2.10 Medición de las magnitudes eléctricas
- 2.11 Determinación del consumo de energía aplicando el método estadístico

Autor: Onel Garcé Rodríguez

- 2.12 Determinación del consumo específico de energía aplicando el método estadístico
- 2.13 Método para el planteamiento de la relación entre la productividad y el consumo específico de energía de cada accionamiento
- 2.14 Método para el planteamiento de los modelos matemáticos de cada accionamiento
- 2.15 Método para la realización del análisis de varianza
- 2.16 Procedimiento para la realización de la valoración económica
- 2.17 Conclusiones del capítulo II

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSION

- 3.1 Introducción
- 3.2 Determinación de la carga de bolas
- 3.3 Determinación del flujo de alimentación de mineral
- 3.4 Determinación del flujo de aire
- 3.5 Resultados de los experimentos
- 3.6 Relación entre el consumo específico de energía del molino de bolas y la productividad
- 3.7 Relación entre el consumo específico de energía del ventilador y la productividad

- 3.8 Relación entre el consumo específico de energía de la unidad de molienda y la productividad
- 3.9 Análisis de regresión y varianza para el molino
- 3.10 Análisis de regresión y varianza para el ventilador
- 3.11 Análisis de regresión y varianza para la unidad de molienda
- 3.12 Valoración económica
- 3.13 Conclusiones del Capítulo III

CONCLUSIONES GENERALES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

Autor: Onel Garcé Rodríguez

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es establecer las bases teóricas y analizar los trabajos precedentes relacionados con la determinación del consumo específico de energía en el proceso de molienda del mineral laterítico para el desarrollo del trabajo investigativo.

1.2 Trabajos precedentes

Muchos han sido los trabajos que se han hecho para la determinación del consumo específico de energía en el proceso de molienda con el objetivo de mejorar el consumo específico de energía en este proceso, los cuáles han sido:

Rodolfo Pérez Pérez (2003): Trabajo de diploma realizado en la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara con el objetivo de valorar el comportamiento energético en el proceso de molienda, donde se midieron las magnitudes eléctricas de los molinos de bolas conjuntamente con los ventiladores de recirculación. Con el fin de tomar medidas para mejorar el indicador energético (realizado a escala industrial).

José Manuel Vargas Estévez (2003): Tesis realizada en la Empresa Cdte. René Ramos Latour de Nicaro, en la que se analizó el consumo específico de energía de las dos unidades de molienda y del motor del accionamiento principal del molino B, conjuntamente con el ventilador de recirculación del separador dinámico para tomar medidas para disminuir el consumo específico de energía (realizado a escala industrial).

Uberlandis Lafargue Barrientos (2005): En su trabajo de diploma realiza una comparación entre el consumo específico de energía mediante el ensayo de Bond y el consumo específico de energía real que presenta el molino de bolas industrial en la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara para realizar una valoración de la eficiencia energética del proceso de molienda (realizado a escala industrial).

José Miguel Mendoza (2008): En su tesis de maestría realiza el análisis energético del proceso de molienda en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (escala industrial), donde se evalúa las principales variables del proceso (carga de bolas en los molinos, flujo de aire, flujo de mineral, relación serpentina - limonita) y su influencia sobre el consumo de energía, para tomar medidas para darle un uso más racional de la energía en este proceso.

Jacinto Téllez Pérez (2010): Para la realización de su tesis en opción al grado de master trabajó también a escala industrial ya que para determinar el consumo específico de energía tuvo que ver la relación que existe entre el mineral con el que se alimenta el molino de bolas (teniendo en cuenta las propiedades físico – químicas de éste) y el consumo específico de energía. Fue realizado en la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara a escala industrial con el objetivo de usar más racionalmente la energía.

Yunior Áreas Ledesma (2011): Como los demás trabajos de diploma, éste también se basa en determinar el consumo específico de energía de la unidad de molienda y en los principales agregados a éste proceso (ventiladores centrífugos) en la Empresa Cdte. René Ramos Latour. Se analizó el comportamiento energético de las unidades anteriormente mencionadas antes las variaciones del flujo de aire y del mineral a alimentar con el objetivo de un mejor control y mejoramiento del indicador del consumo específico de energía (realizado a escala industrial).

Todos estos trabajos investigativos citados anteriormente han cumplido con el objetivo fundamental que es lograr disminuir el consumo específico de energía en el proceso de molienda del mineral laterítico, pero éstos han sido hechos a escala industrial y no se había instalado en ese tiempo un clasificador mecánico de mineral antes de molerlo, que a diferencia de este trabajo investigativo tiene como objetivo lograr un consumo específico de energía bajo con una productividad alta pero realizando experimentos a escala de planta piloto (semi – industrial) con esta condición actual, para luego aplicar éstos resultados a escala industrial.

1.3 Molino de bolas

La molienda, fase de conminución de productos finos, requiere una gran inversión de capital y frecuentemente es el área de máxima utilización de potencia y de materiales resistentes al desgaste.

El molino de bolas consiste en una cámara giratoria de acero, de forma cilíndrico – cónica. En su interior y fijos hacia el exterior posee placas o blindajes de acero Ni – hard, la molienda se produce cuando el molino al girar eleva las bolas hasta una altura determinada y las arroja sobre el mineral, desmenuzándolo hasta producir el producto especificado (-200 mesh ó <0.074mm).

El porcentaje de la velocidad crítica, que es la velocidad a la cuál las fuerzas centrífugas son suficientemente grandes como para conseguir que las partículas pequeñas queden adheridas a los revestimientos del molino en una revolución completa, se da en la especificación del molino. La velocidad crítica se determina por la siguiente fórmula.

$$C_s = \frac{42.305}{\sqrt{D}} \quad 1.1$$

Donde:

D = Diámetro del molino medido al interior de los revestimientos, en metros.

Cs = Es la velocidad crítica en r/min.

La velocidad periferia, que no influye en la potencia del molino, pero es un factor a considerar en el desgaste de los revestimientos y del medio de molienda, se puede determinar por la siguiente fórmula.

$$M_p = \Pi \times D \times N \quad 1.2$$

Donde:

Mp = Velocidad periferia m/min.

D = Diámetro entre los revestimientos.

N = Velocidad del molino en r/min.

En la siguiente tabla se muestra el diámetro interior del molino con respecto al % de la velocidad crítica.

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

Tabla 1.1 Diámetro interior del molino con respecto al % de la velocidad crítica.

1.3.1 Partes del molino

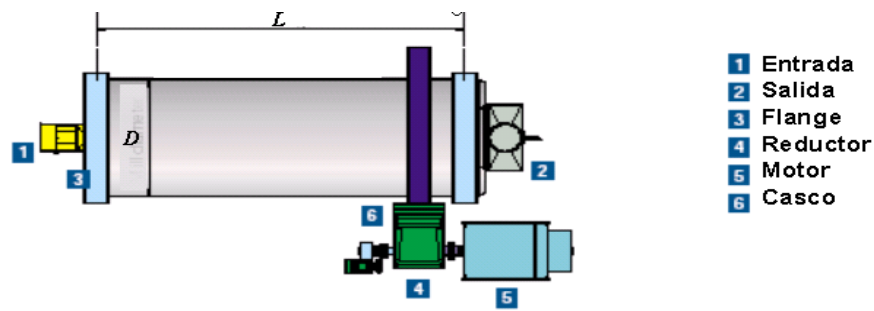


Fig. 1.1 Vista exterior de un molino cilíndrico

Partes exteriores

- 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.

Partes interiores

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

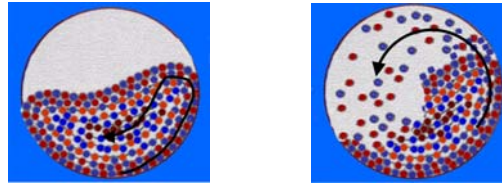
1.3.2 Regímenes de trabajo

En el molino, debido a los regímenes de velocidades de trabajo, existen dos formas de trituración, que son: CASCADA Y CATARATA.

a) El primero ocurre cuando la frecuencia de rotación del molino es baja y se caracteriza por el rodado de unas bolas sobre otras de forma paralela. Aquí el desmenuzamiento se realiza principalmente por aplastamiento y por frotación de las bolas que ruedan. Es por ello que se verán afectadas fundamentalmente las partículas pequeñas.

b) El segundo ocurre a medida que se va aumentando la frecuencia de rotación del molino. En este caso las bolas salen de sus trayectorias circulares y como cuerpos lanzados en ángulos con respecto a la horizontal van a caer de nuevo a las trayectorias circulares en forma de cataratas. Es difícil separar estos dos movimientos,

por eso se dice que el proceso de molienda se efectúa bajo el régimen mixto cascada – catarata.



a)

b)

Fig. 1.2 Movimiento de las bolas en el interior de un molino.

a) Régimen cascada b) Régimen catarata

1.3.3 Bolas

Las bolas de molienda pueden fabricarse forjadas, de hierro fundido o de acero fundido. La calidad depende de acuerdo con el origen del suministro. Aunque no siempre es cierto, frecuentemente las bolas de mejor calidad son de acero forjado. Generalmente, las bolas son de forma esférica, pero también pueden ser de diversas formas cilíndricas, cónicas o irregulares. Las bolas varían considerablemente en dureza, con bolas blandas de dureza Brinell entre 350 a 450, hasta bolas duras con dureza superior a 700. Una regla usual sujeta a argumentos es: “Cuanto más dura es la bola más larga es su vida” (Esto viene de no ser demasiado quebradizas y romper convenientemente quedando demasiado pulimentadas o lisas para pellizcar el material que está siendo molido). La economía local y las especificaciones de cada aplicación son las que aportan generalmente los factores para seleccionar las bolas. Las bolas que proporcionan el más bajo coste de operación y los mejores rendimientos son las que normalmente se seleccionan. Las bolas de menor precio disponible no son normalmente las que tienen menor grado de desgaste; por lo tanto es necesario tomar un compromiso entre estos dos extremos.

Las bolas deben ser sólidas, con dureza razonablemente uniforme a través de todo el molino. Deben desgastarse de acuerdo con una relativa uniformidad. Un indicador de un buen desgaste en las bolas es que, cuando éstas sean descargadas del molino, tengan alrededor de 16mm o menores en tamaño y tengan una forma poligonal con, por

lo menos, 8 o 12 caras, que deben ser ligeramente cóncavas. Una evidencia de rotura de bolas es encontrar que cuando trozos o bolas son descargados algunos sean discos circulares, media esferas o en forma de media luna. Piezas desgastadas o rotas de bolas con agujeros en ellas indican baja calidad de las mismas, con inclusiones de arena y/o burbujas y/o huecos centrales.

Para los cálculos de diseño de la potencia absorbida en un molino, se establecen bolas de acero forjadas o fundidas, con un peso (ϕ) de 6646 Kg. /m³, o con bolas de hierro fundido con un peso de 4165 Kg. /m³.

1.3.4 Desgaste de bolas

Este fenómeno tiene lugar como resultado del rozamiento durante el deslizamiento de los elementos que desmenuzan el material abrasivo y la colisión entre sí de estos elementos y el revestimiento del molino.

Por lo general durante la molienda seca, el desgaste se produce motivado por la abrasión.

Este proceso depende de muchas condiciones Como son: Propiedades del metal de las bolas su grosor, el grosor del material a desmenuzar, del método a desmenuzar (seco o húmedo), de la agresividad del medio (ácido, alcalino), de su temperatura de la existencia de sustancia tenso – activas, del régimen de velocidad del molino, del esquema de desmenuzamiento cerrado o abierto.

El desgaste de las bolas tiende a disminuir el volumen de las mismas en el interior del molino. Para contrarrestar este efecto, periódicamente se le adicionan bolas al molino de distintos tamaño según las especificaciones del fabricante.

1.3.5 Llenado del molino de bolas

Los molinos de bolas se cargan normalmente entre el 40 al 45 % de su volumen, pero pueden cargarse hasta el 50 % o ligeramente más (coeficiente de llenado de bolas ϕ). Para aplicaciones concretas, los molinos se seleccionan con una carga del 40 %, pero el molino y el accionamiento se diseñan para manejar mayores cargas si se requieren.

1.3.6 Peso de las bolas

El peso de las bolas influye sobre el consumo de energía del molino ya que de ella también depende el rendimiento del molino.

- Para el cálculo del peso de las bolas se usa la siguiente ecuación (Klebanov – Shubov).

$$G = \frac{\varphi}{100} \times V \times \wp \quad 1.3$$

Donde:

G = Peso de las bolas.

φ = Coeficiente de llenado de bolas.

V = Volumen del cilindro.

\wp = Peso volumétrico de las bolas.

- El volumen del cilindro se determina por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{D^2}{4} \times L + \frac{1}{3} \times h \times (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \times A_2}) \quad (1.4)$$

Donde:

V = Volumen del molino.

D = Diámetro del cilindro.

L = Longitud del cilindro.

H = Altura del molino.

A₁ = Área del cono truncado 1.

A₂ = Área del cono truncado 2.

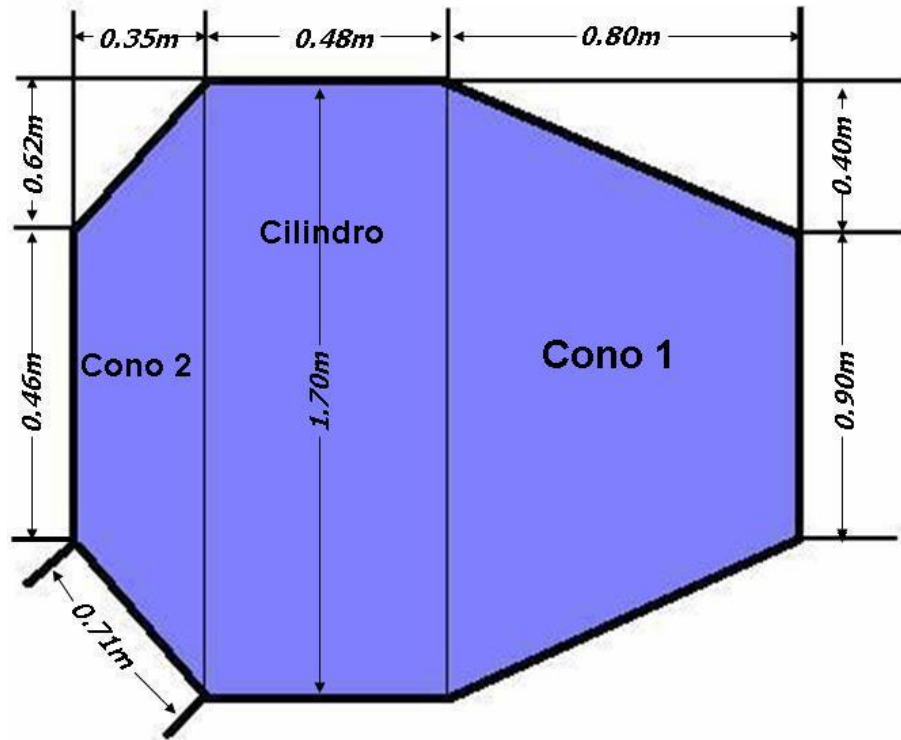


Fig. 1.3 Esquema del molino de bolas con sus medidas

- El diámetro óptimo de las bolas (B) se determina por:

$$B = 28\sqrt[3]{D_{\text{máx}}} \quad (1.5)$$

Donde:

$D_{\text{máx}}$ = Diámetro máximo de las partículas que entran en el molino (10mm).

B se usa para determinar por tabla a φ .

En la siguiente figura se muestra la relación entre la potencia del molino y su carga volumétrica.

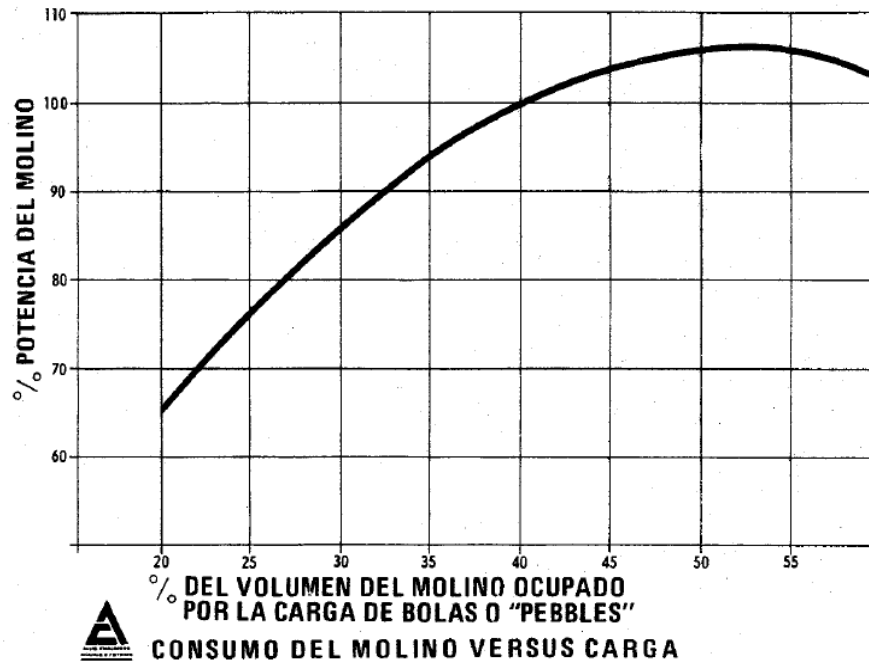


Fig. 1.4 Relación entre la potencia del molino y su carga volumétrica.

En la siguiente tabla se muestra la relación entre el tamaño pasante del 80 % de la alimentación y el tamaño máximo de bola.

Tamaño pasante del 80 % de la alimentación.	Tamaño máximo de bola.
Micras.	Milímetros.
5000 a 10000.	60 a 90
900 a 1400.	40 a 50
Alimentación finos – remolienda.	20 a 30

Tabla 1.2 relación entre el tamaño pasante del 80 % de la alimentación y el tamaño máximo de bola.

1.3.7 Tamaño de las partículas de mineral a alimentar

Como está establecido para que se disminuya el consumo de energía del molino debido a que se ha instalado en la empresa Cdte. Ernesto Che Guevara un clasificador de última tecnología que permita pasar partículas de 10mm de diámetro, por lo que en estos experimentos esta es la dimensión de las partículas que se van a alimentar.

1.3.8 Funcionamiento del molino en ciclo cerrado

El funcionamiento de molinos de bolas en ciclo cerrado con clasificador se debe a la necesidad del control del grosor del producto del desmenuzamiento.

Las partículas gruesas circulan varias veces a través del molino y cuando se establece el régimen de ciclo cerrado, su cantidad se estabiliza. El circuito de la molienda lo cierra el Ventilador Centrifugo y con su ayuda es que el mineral puede elevarse al descargar el molino.

1.3.9 Carga circulante. Importancia

Es la carga que se devuelve al molino después de haber pasado por el clasificador y que es el rechazo del producto molido, retenido por el clasificador.

Esta carga esta compuesta fundamentalmente por los granos que regresan al molino, para su ulterior molienda hasta que logren alcanzar la granulometría adecuada.

Esta carga circulante depende de las propiedades del mineral, las condiciones de su desmenuzamiento y de la eficiencia de la clasificación.

Se ha demostrado que el rendimiento del molino que funciona a ciclo cerrado es directamente proporcional al contenido de la clase gruesa en el mismo, porque precisamente estos granos son sometidos al desmenuzamiento y van al producto final. La adición de la parte gruesa de la carga de circulación al material a procesar, incrementa la cantidad de la carga combinada en el molino, eleva la velocidad de la circulación del material reduciendo de este modo el tiempo de su desmenuzamiento y disminuyendo el sobre desmenuzamiento del material, lo que contribuye al incremento del contenido de la clase gruesa en el material dentro del molino y al aumento de su rendimiento.

La adición de producto acabado a la carga combinada del molino debido a la clasificación imperfecta, al elevar la velocidad de la circulación del material a través del molino, influye negativamente sobre el funcionamiento del mismo, recirculando a través del molino, el producto acabado este se sobre desmenuza consumiendo inútilmente energía y dificultando las operaciones posteriores de su enriquecimiento.

La existencia en el molino de una gran cantidad de producto fino, debido a la retención, suaviza los choques de las bolas.

1.3.10 Factores que influyen en la eficiencia de la molienda

- Material a triturar, grosor del producto desmenuzado, grado de desmenuzamiento del mineral sobre este primer punto podemos decir que el rendimiento del molino es directamente proporcional a la desmenuzabilidad del mineral inicial, dependiendo al mismo tiempo de su grosor y la del producto desmenuzado.
- Mientras más grueso sea el producto desmenuzado, el rendimiento del molino es más alto.
- Empíricamente se ha demostrado que el grosor óptimo del mineral a alimentar debe ser de 15 –20mm.
- Construcción del molino, dimensiones de este y de las formas del revestimiento.
- La potencia útil del molino en dependencia de sus dimensiones se determina por la formula.

$$N = K \times D^{2.5} \times L \quad (1.6)$$

Donde:

N= Potencia útil kW

K= Coeficiente que depende del tipo de molino

D= Diámetro m

L= Longitud m

- El rendimiento de un molino con revestimiento liso es menor que el que posee revestimiento nervado, de la misma forma, los molinos de bolas dotados con rejillas poseen un rendimiento del 15 % mayor que los de descarga por reboso debido a que los elementos trituradores funcionan con mayor efectividad en los primeros.

- La efectividad del funcionamiento del clasificador, el grado de llenado con bolas, las características del grosor de las bolas, la forma, la densidad, la dureza de los cuerpos trituradores, el numero de revoluciones del molino.
- El rendimiento del molino es proporcional al consumo de la energía para el desmenuzamiento. El consumo de energía esta ligado al grado de llenado del molino con el medio triturador.
- Al crecer el grado de llenado del molino con el medio triturador se incrementa también el consumo de energía para el desmenuzamiento. El consumo de energía esta ligado al grado de llenado del molino con el medio triturador. Al crecer el grado de llenado del molino con el medio triturador se incrementa también el consumo de energía para el desmenuzamiento alcanzando el máximo cuando el 50 % del molino esta llenado de bolas.
- En base a experimentos ha sido establecido que el rendimiento de los molinos varia de forma casi directamente proporcional a la densidad de la carga triturada.
- El aumento de la dureza de los cuerpos trituradores ofrece un cierto incremento del rendimiento. Los molinos poseen máximo rendimiento cuando el medio triturador esta constituido por bolas desgastables que siguen conservando su forma inicial.

1.3.11 Características del mineral alimentado y su influencia en el consumo de energía en el proceso de molienda

Hay que tener en cuenta, la granulometría y la humedad del mineral que se va a alimentar al secadero antes de que pase por el molino. La alimentación de mineral muy fino dificulta el proceso de secado debido fundamentalmente a que se elimina solo el agua superficial, quedándose el agua reticular o interna que ayuda a la aglomeración del mineral, provocando un aumento de la humedad en el producto secado, esto provoca la formación de pelets los que dificultan el proceso de molienda.

Además podemos plantear que en el tratamiento de este mineral alimentado aumenta considerablemente el consumo de petróleo y lo que es peor, disminuye la eficiencia operativa de los equipos ya que es necesario disminuir la alimentación para poder obtener el parámetro (% humedad) deseado en el producto.

Por el contrario, un aumento de la granulometría de entrada (serpentina) favorecerá el secado y la eficiencia operativa de los equipos, pero perjudicará la eficiencia operativa de los molinos, ya que aumentará el tiempo de retención del mineral en estos equipos para entregar el producto adecuado.

1.4 Ventiladores centrífugos

Los ventiladores centrífugos son máquinas rotatorias capaces de mover una determinada masa de aire, a la que comunican una cierta presión, suficiente para que pueda vencer las pérdidas de carga que se producirán en la circulación por los conductos.

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

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.

El ventilador centrífugo de esta instalación está constituido por una turbina de acero con paletas planas y radiales situadas en un envolvente de chapa, el rodete va montado sobre un dispositivo mecánico constituido por un eje de acero montado sobre dos soportes, el eje le transmite el movimiento a través del accionamiento por poleas y correas. Puede ser también conectado directamente en dependencia de las exigencias tecnológicas.

- 1- Conducto de entrada
- 2- Impelente
- 3- Alabes
- 4- Conductor sin salida
- 5- Colector
- 6- Eje de rotación

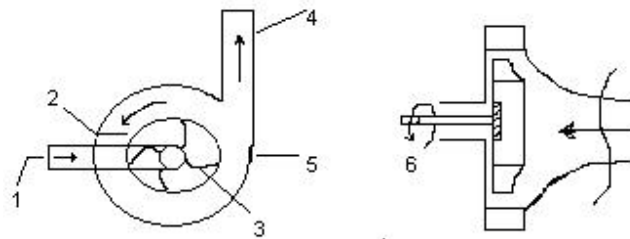


Fig.1.5 Esquema de las partes que forman al ventilador

1.4.1 Partes componentes

Se componen de:

- **Elemento rotativo**

El elemento rotativo es la pieza del ventilador centrífugo que gira en torno al eje del mismo, el cuál es el rodete donde la dirección de salida del aire impulsado es perpendicular al eje del ventilador. Generalmente los rodetes mueven un volumen de aire menor que los ventiladores con hélices, pero con una presión mucho mayor.

Los rodetes pueden ser de tres formas:

- 1- Alabes radiales
- 2- Alabes hacia delante
- 3- Alabes hacia atrás

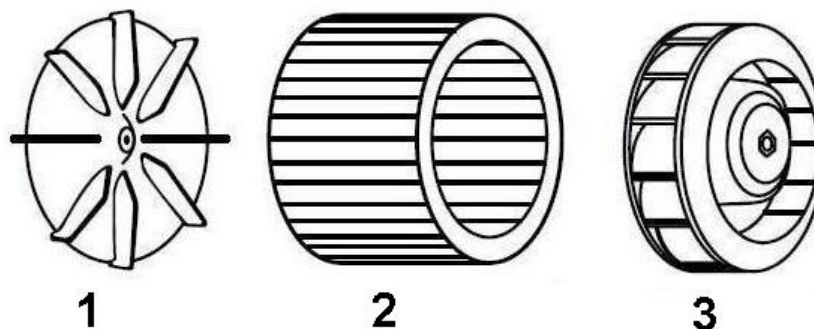


Fig.1.6 Rodetes de los ventiladores centrífugos

- Soporte

En estos ventiladores, los rodetes se montan en una voluta con forma de espiral.

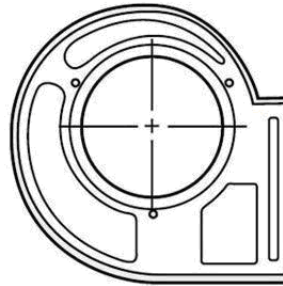


Fig.1.7 Esquema de la voluta de los ventiladores centrífugos

- Motor

El motor es el elemento que acciona el rodete.

1.4.2 Función

El ventilador de recirculación es el encargado de extraer el mineral molido del molino de bolas. Su función es garantizar el régimen aerodinámico necesario en el circuito de molienda.

1.4.3 Parámetros que caracterizan al una ventilador centrífugo

- Carga y presión (H).
- Caudal (Q).
- Velocidad de rotación (n).
- Potencia y rendimiento.

- Carga 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.

$$H = E_{sal} - E_{ent} \quad (1.7)$$

- Caudal (Q)

El caudal de un ventilador centrífugo se define como el volumen que es capaz de entregar la máquina por unidad de tiempo a través del conducto de descarga. Este volumen se expresa en función de los parámetros de presión y de la temperatura del fluido a la sección de la máquina, o referido a condiciones de referencia establecida previamente.

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

$$Q_m = \rho \times Q \quad (1.8)$$

Donde:

Q_m = Gasto másico

ρ = densidad de flujo

Q = Gasto volumétrico

- Velocidad de rotación (n)

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

$$P_u = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{1000} = [kW] \quad (1.9)$$

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)

P = Presión creada por la máquina (pa).

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

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \quad (1.10)$$

$$P_e = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{1000 \times \eta} \quad (1.11)$$

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.

$$\eta_{ins} = \frac{P_u}{P} \quad (1.12)$$

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 5. 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.

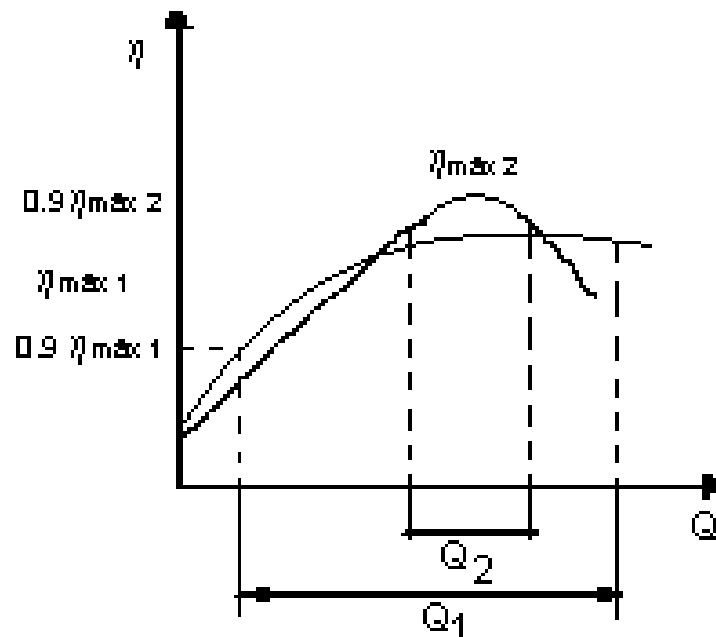


Fig. 1.8 Límite de rendimiento de una máquina centrífuga

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 $0.9\eta_{\text{máx}}$.

En la curva antes expuesta se observa que la curva 1 tiene una zona de trabajo óptimo mayor que la curva 2.

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 es 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.

El molino por otra parte 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.

1.4.4 Curva característica

El ensayo de ventiladores tiene por objeto determinar la capacidad del aparato para transferir la potencia al aire que mueve. El ventilador se hace funcionar a un régimen de giro constante, tomando valores de diferentes caudales movidos, según sea la pérdida de carga que debe vencerse. La curva característica de un ventilador se obtiene dibujando en unos ejes de coordenadas los distintos valores de caudal – presión, obtenidos mediante ensayo en un laboratorio.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de una curva característica de un ventilador centrífugo.

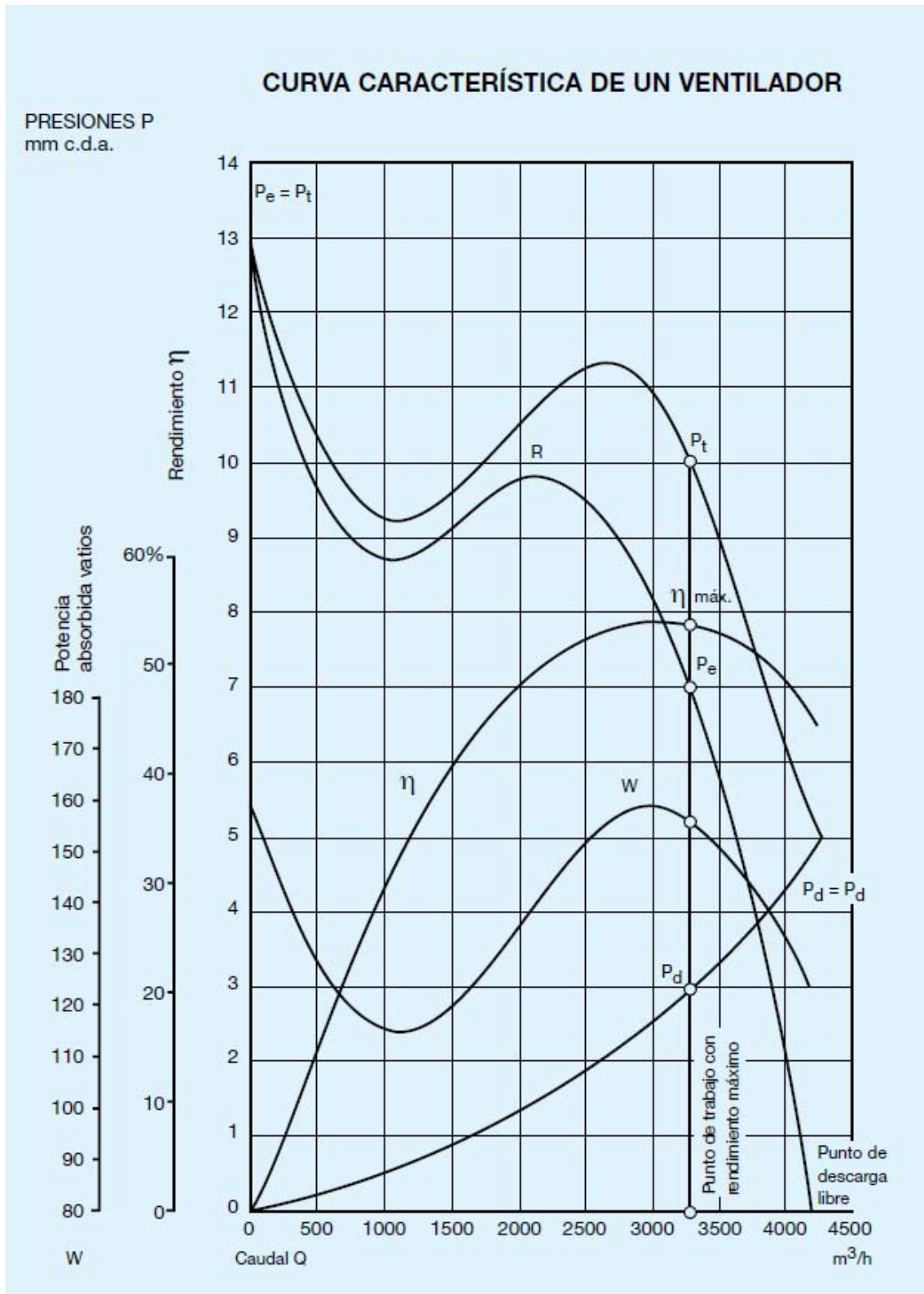


Fig. 1.9 Curva característica de un ventilador

Observemos en primer lugar en la figura curvas diferentes. Cada una de ellas representa un valor distinto y su lectura se hace en las diferentes escalas que están a la izquierda de la figura.

Tres están relacionadas con la presión que da el ventilador para distintos caudales (son las denominadas P_t , P_e , P_d).

P_e : es la Presión Estática

P_d : es la Presión Dinámica (debido a la velocidad)

P_t : es la Presión Total

Cumpléndose en todo momento

$$P_t = P_e + P_d \quad 1.13$$

Obsérvese que a descarga libre, es decir cuando la Presión Estática (P_e) es nula, el ventilador da el máximo caudal que puede mover; en este punto la Presión Total es igual a la Dinámica ($P_t = P_d$). Asimismo, cuando el ventilador esta obturado, es decir que da el mínimo caudal, la Presión Dinámica (P_d) es nula; en este punto, la Presión Total es igual a la Estática ($P_t = P_e$).

Otra curva que podemos ver en el grafico es: la curva de **potencia absorbida (W)**, que leeremos en la escala vertical situada más a la izquierda (en watos). Esta curva nos da la potencia que consume el motor que acciona el ventilador, y podemos ver que presenta un máximo (en la figura corresponde al punto de caudal 3.000 m³/h).

También tenemos representada la curva de **rendimiento (η)**, que se lee en % en la escala vertical intermedia, se puede ver que el rendimiento del ventilador depende del caudal que esta moviendo. El conjunto de estas curvas recibe el nombre de **característica de un ventilador**.

La característica de un ventilador es la mejor referencia del mismo, ya que siempre nos indicara su comportamiento según sea el caudal y la presión que este dando.

1.4.5 Puntos de trabajo

La curva característica del ventilador depende únicamente del ventilador, y solamente puede variar si el ventilador funciona a una velocidad de rotación distinta.

Puede aceptarse en principio que la curva característica es totalmente independiente del sistema de conductos al que se acople. Sin embargo, hay que considerar que un ventilador puede funcionar moviendo distintos caudales y comunicándoles distintas presiones, de tal forma que todos los puntos posibles de funcionamiento se hallen representados sobre la curva (P_e).

1.4.6 Leyes de los ventiladores.

Las curvas características de los ventiladores siguen ciertas leyes, llamadas **leyes de los ventiladores**, que permiten determinar como varían caudal, presión y potencia absorbida por el ventilador al variar las condiciones de funcionamiento. Nosotros aplicamos estas leyes en el caso de la variación de velocidad de giro del ventilador:

El caudal es proporcional a la relación de velocidades:

$$Q_2 = Q_1 \times \left[\frac{n_2}{n_1} \right] \quad 1.14$$

La presión es proporcional al cuadrado de la relación de velocidades:

$$P_2 = P_1 \times \left[\frac{n_2}{n_1} \right]^2 \quad 1.15$$

La potencia absorbida es proporcional al cubo de la relación de velocidades:

$$N_2 = N_1 \times \left[\frac{n_2}{n_1} \right]^3 \quad 1.16$$

La siguiente tabla reúne las leyes agrupadas en función de tres variaciones. Mediante las relaciones anteriores podemos conocer los valores que toman las diferentes variables para diferentes regimenes de giro del ventilador. Variando la velocidad de este podemos conseguir que el caudal y la presión se ajusten a las necesidades de cada

momento. Debemos tener muy en cuenta del as curvas características de los ventiladores están siempre realizadas a las máximas revoluciones posibles. La regulación solo se puede realizar disminuyendo la velocidad de giro del ventilador.

Leyes de los ventiladores		
Si varía	Y permanecen constantes	Se cumple
Diámetro de la hélice (d)	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad - Densidad - Punto de funcionamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - El Caudal es proporcional al cubo de la relación de diámetros - La presión es proporcional al cuadrado de la relación de diámetros - La potencia absorbida es proporcional a la quinta potencia de la relación de diámetros
Velocidad de rotación (n)	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro de la hélice - Densidad 	<ul style="list-style-type: none"> - El caudal es proporcional a la relación de velocidades. - La presión es proporcional al cuadrado de la relación de velocidades. - La potencia absorbida es proporcional al cubo de la relación de velocidades.
Densidad del aire (ρ)	<ul style="list-style-type: none"> - Caudal - Velocidad 	<ul style="list-style-type: none"> - La presión es proporcional a la relación de velocidades. - La potencia absorbida es proporcional a la relación de densidades.

Tabla 1.3 Leyes de los ventiladores centrífugos.

1.5 Productividad

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 explícita 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:

$$Q = \text{Cantidad de mineral (t)} / \text{Tiempo de producción (h)} \quad (1.17)$$

1.6 Método estadístico

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

La energía en la molienda puede cuantificarse mediante los índices de tendencia central o promedios, son nombrados así porque pretenden ser síntesis de los valores de la variable. Los índices pueden ser: media aritmética, mediana y moda. Se aplicará la

media aritmética porque en ella se basan otros estadísticos y es mejor estimador de su parámetro que la mediana y la moda.

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

1.7 Conclusiones del Capítulo I

- No se han desarrollado trabajos investigativos relacionados con este tema que sean realizado a escala semi – industrial.
- No se ha determinado el consumo específico de energía de la unidad de molienda con la nueva tecnología instalada.
- La carga de bolas del molino influye significativamente en su potencia.
- El rendimiento de una máquina centrífuga depende de que esté operando dentro de su zona de trabajo óptima.

CAPITULO 2 MATERIALES Y METODOS

2.1 Introducción

La selección de los materiales y de los métodos durante el trabajo experimental es de suma importancia para el desarrollo del trabajo de diploma ya que éstos son los que se usan para la determinación de los resultados, así también como la exactitud de los mismos. De esto es de lo que se encarga este capítulo.

2.2 Planificación de los experimentos

Para el cumplimiento de los objetivos de la etapa, se realizó un diseño completamente aleatorizado con un experimento factorial 2^3 con 3 réplicas, siendo un total de 24 experimentos con una duración de 1 hora cada uno, donde se consideraron los factores: carga de bolas (ϕ), alimentación fresca al molino (Q_e) y el flujo de aire a través del molino (Q_a). En la siguiente tabla se muestran los niveles escogidos para estos factores.

	1	2
Q_e , t/h	2,1	2,8
Φ , %	25	35
Q_a , m ³ /h	4 080	5 440

Tabla 2.1 Factores y sus correspondientes niveles para el experimento factorial

El diseño factorial 2^3 es un conjunto de experimentos que contienen todas las combinaciones experimentales de los valores de los tres factores a dos niveles.

La gran ventaja del diseño experimental es que obtiene la máxima información con el mínimo de experimentos a realizar, y además se obtiene un modelo matemático que describe el sistema, lo más sencillo posible.

- Para determinar el número de réplicas se procedió a determinar la desviación estándar ρ del consumo específico de energía de la unidad de molienda, para 5 experimentos preliminares, y considerando un error de un 5 % (1.08 kWh/t), con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, se aplicó la expresión:

$$n = \left(\frac{1.96\rho}{E} \right)^2 \quad 2.1$$

Donde:

n = Número de réplicas

Tomando n = 3, se planificaron los siguientes experimentos.

No	Coefficiente de llenado φ , %	Flujo de alimentación Q_e , t/h	Flujo de aire Q_a , m ³ /h
1	25	2,1	4 080
2	25	2,1	4 080
3	25	2,1	4 080
4	25	2,1	5 440
5	25	2,1	5 440
6	25	2,1	5 440
7	25	2,8	4 080
8	25	2,8	4 080
9	25	2,8	4 080
10	25	2,8	5 440
11	25	2,8	5 440
12	25	2,8	5 440
13	35	2,1	4 080
14	35	2,1	4 080
15	35	2,1	4 080

16	35	2,1	5 440
17	35	2,1	5 440
18	35	2,1	5 440
19	35	2,8	4 080
20	35	2,8	4 080
21	35	2,8	4 080
22	35	2,8	5 440
23	35	2,8	5 440
24	35	2,8	5 440

Tabla 2.2 Planificación de los experimentos

2.3 Operaciones a realizar

- Determinación de la carga de bolas en el molino.
- Determinación del flujo del mineral a alimentar.
- Determinación del flujo de aire.
- Mediciones de la potencia activa (P) del motor del molino de bolas, y del ventilador de recirculación durante la realización de los experimentos.
- Determinación del consumo específico de energía del molino de bolas, ventilador de recirculación y unidad de molienda.
- Planteamiento de los gráficos, modelos matemáticos y análisis de varianza del molino de bolas, ventilador de recirculación y unidad de molienda.
- Valoración económica.

2.4 Descripción del proceso tecnológico de la sección de molienda

El mineral seco llega a la Zaranda (**SS-1, capacidad 2,5 t/h**); Aquí se produce una clasificación de control del mineral a molienda. El equipo posee un paño de abertura 6mm; al producirse la clasificación se obtiene dos fracciones granulométricas.

1. > 6mm: Esta fracción se envía al Molino de Martillos (**BH-1 capacidad 2,5 t/h**) y se reduce su tamaño a menos de 3mm y cae al Molino de Bolas **BB-1 capacidad 3,5 t/h**).

Existe la posibilidad de enviar directamente al molino estas fracciones a través de un tubo, sin ser reducido su tamaño.

2. < 6mm: Caen directamente a la Tolva (**TB-4 capacidad 7 t**) para la molienda.

Luego de que el mineral cae a la tolva para la molienda y de estar retenido el tiempo necesario para su reducción es descargado en el circuito que eleva el mineral hasta el Clasificador Mecánico (**SP-1, capacidad 3,5 t/h**), el que hace una segunda clasificación de control, esta vez del mineral molido, donde las partículas gruesas son retornadas al molino y las preparadas con las exigencias requeridas, se recuperan en el Ciclón (**GD-2, capacidad 2,5 t/h**) en el recorrido del flujo. El circuito de la molienda lo cierra el Ventilador Centrifugo (**PF-4, capacidad 7000 m³/h**) y con su ayuda es que el mineral puede elevarse al descargar el molino. Este producto terminado cae por gravedad al Elevador de Cangilones (CE-2) y de aquí a los Silos de Almacenaje.

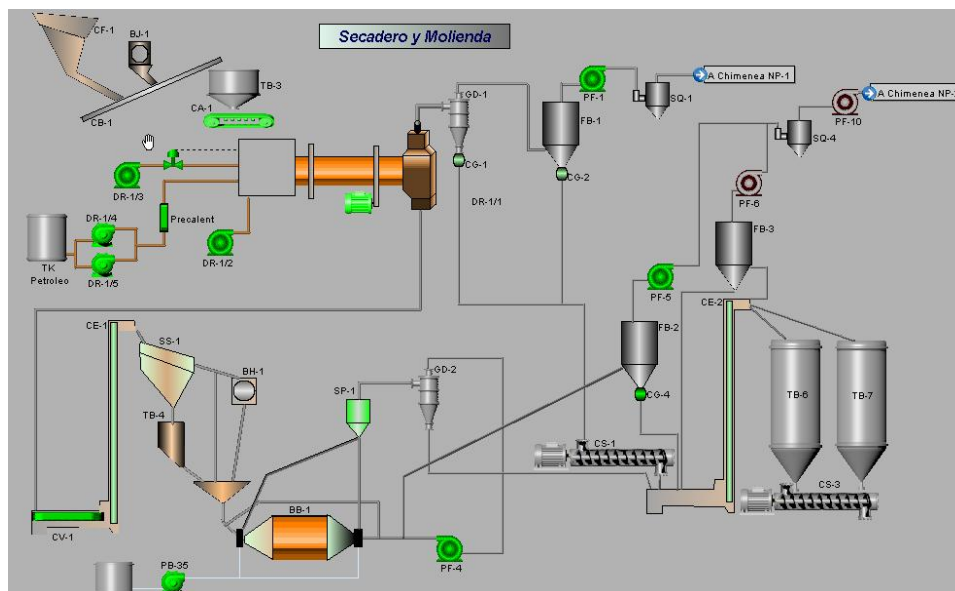


Fig. 2.1 Esquema del proceso tecnológico de la sección de secadero y molienda

2.5 Características del equipamiento de medición

Analizador de Redes

Modelo PPQM - 1000

Display LCD

Puerto de comunicación RS - 232

Alimentación monofásica 110 – 220 V

Frecuencia de trabajo 50 – 60 Hz

Visualiza 54 magnitudes eléctricas entre ellas P, Q, FP, I, U, THD, F, etc. y sus formas de onda.

Metro de Gancho

Modelo UT – 232

Display LCD

Puerto de comunicación USB

Alimentación: 4 baterías AA de 1.5V

Visualiza magnitudes como V, I, P, Q, S, FP, ángulo de fase, F, E, etc.

2.6 Programas utilizados

El programa utilizado para ver y registrar las magnitudes fue:

- GE Power Management – PQMPC. Versión 3.61.

Este programa tiene la habilidad de programar los analizadores de redes, ver las diferentes formas de onda de tensión, corriente, potencias, factor de potencia, frecuencia, etc y descargar los datos en Exel.

- Microsoft Office Excel 2003.

Usamos este programa para realizar los cálculos correspondientes de consumo de energía, consumo específico de energía, potencia media, la graficación de los datos obtenidos y sus ecuaciones.

2.7 Características generales del mineral

El mineral tiene características antes y después de ser procesado.

Mineral Laterítico (inicial)

- Humedad: 30 - 36 %
- Granulometría: variada desde 0 a 300mm
- Composición química:

Ni de 1,25 - 1,35%

Co de 0,08 a 0.105%

Fe de 36 a 45%

MgO de 5 a 6%

SiO₂ de 10 a 12 %.

- Densidad aparente 1.6 ton/m³

Mineral seco y molido (Laterítico preparado).

- Humedad menor de 5 %.
- Densidad aparente de 0,8 – 1,3 t/m³.
- Angulo de reposo 15°.
- Granulometría de 80 – 85 % de fracciones – 0,074mm (y se ajusta según solicitud del cliente).

2.8 Características técnicas del equipamiento del proceso de molienda

Molino de bolas (BB1)

Dimensiones: Ø x L, 1850 x 560mm (parte cilíndrica)

Capacidad: 3,5 t/h.

Suministro: España.

Velocidad crítica: 35 r/min.

Características del motor: 440 V; 70,5 A; 1700r/min. 45kW.

Construcción: Acero regular

Carga de bolas: 2,6 t

Diámetro de las bolas: 20, 30 y 40mm

Características del motor de la bomba de lubricación: 440V; 3,1A; 1,5kW; 1690 r/min.

Ventilador de recirculación (PF - 4).

Presión estática: 450mm col H₂O.

Capacidad: 6800 m³/h

Suministro: España.

Características del motor: 440 V; 25 A; 1740 r/min. 15 kW

Construcción: Acero regular

La transmisión es MOTOR-POLEAS-CORREAS.

Accionamiento: Motor asincrónico trifásico de 15 kW, 440 V, controlado mediante un variador de velocidad.

Alimentador sinfín (CS – 2)

Capacidad: 7.5 t/h

Accionamiento: Mediante un motor trifásico de 3.5 kW, 440 V, controlado por un variador de velocidad.

Clasificador mecánico (SS – 1)

Diseño: 3.5 t/h.

Velocidad de rotación: 140 - 820 r/min.

Motor, 440 V; 10A; 5,5 kW; 1730 r/min.

2.9 Técnica experimental

Se necesita un procedimiento técnico para la realización de los experimentos. Estos permiten el desarrollo del trabajo investigativo para la obtención de los resultados, y para asegurar que estén correctamente establecidos los parámetros de cada variable con los que se van a trabajar durante los experimentos.

2.9.1 Procedimiento para la determinación del flujo de alimentación del mineral

Esta prueba se realizó variando la velocidad del sinfín, a través del variador de velocidad que lo acciona. Se realizaron 9 pruebas de 30 segundos aproximadamente con velocidades diferentes para determinar el flujo de mineral con los que se va a trabajar durante los experimentos.

2.9.2 Procedimiento para la determinación del flujo de aire

Para determinar el flujo de aire se establecieron dos velocidades en el ventilador a través del variador de velocidad que lo acciona para conocer el flujo de aire con la válvula al 80% de su apertura.

2.9.3 Método para la determinación de la carga de bolas del molino

Para determinar la carga de bolas del molino se usaron las ecuaciones 1.3 y 1.4 (Según el método de Klebanov – Shubov) para calcular el diámetro óptimo de las bolas y su peso para los diferentes coeficientes de llenado.

2.10 Medición de las magnitudes eléctricas

La medición de las magnitudes eléctricas es uno de los objetivos fundamentales ya que a través de éstas se determinará el consumo específico de energía y la realización de la valoración económica.

Para la realización de los experimentos se tomarán las mediciones de la potencia activa (P) del molino de bolas y del ventilador de recirculación con los dos analizadores de redes PPQM – 1000 los cuáles se encuentran conectados a los mismos desde el panel de fuerza. Estos instrumentos se programaron para que tomaran mediciones durante intervalos de 1 minuto. De esta forma se realizará la toma y el registro de las principales magnitudes eléctricas.

2.11 Determinación del consumo de energía aplicando el método estadístico

La energía es la capacidad de un sistema físico para realizar trabajo en un tiempo determinado.

El consumo de energía se determina por el producto de la potencia media consumida y el tiempo que demora el experimento.

$$E = P_{med} \times t \quad (\text{kWh}) \quad 2.2$$

Donde:

E = Consumo de energía.

P_{med} = Potencia media.

t = tiempo (h)

2.12 Determinación del consumo específico de energía aplicando el método estadístico

El consumo específico de energía es la relación entre la energía consumida y la cantidad de mineral procesado en una hora.

$$W_e = \frac{P_{med}}{Q} \quad (\text{kWh/t}) \quad 2.3$$

Donde:

W_e = Consumo específico de energía.

P_{med} = Potencia media (kW).

Q = Productividad (t/h).

2.13 Método para el planteamiento de la relación entre la productividad y el consumo específico de energía de cada accionamiento.

Para establecer la relación entre la productividad y el consumo específico de energía se usó el programa Excel, con el cuál se realizó el gráfico y se planteó la ecuación de regresión lineal para cada accionamiento.

2.14 Método para el planteamiento de los modelos matemáticos de cada accionamiento.

Para plantear los modelos matemáticos del molino, ventilador y unidad de molienda se usó el programa ANOVA, con la ayuda del Excel, usando el método de Student y Probabilidades

2.15 Procedimiento para la realización del análisis de varianza

Para la realización del análisis de varianza usamos el método de Fisher y Probabilidades con el programa ANOVA.

2.16 Procedimiento para la realización de la valoración económica

La valoración económica se basa en realizar un análisis económico de la energía consumida y cantidad de mineral procesado. Se va a calcular el costo de la producción por el consumo específico de energía eléctrica aplicando la tarifa eléctrica industrial y se va a determinar su ahorro.

2.17 Conclusiones del Capítulo II

- La técnica experimental para determinar la carga de bolas del molino, flujo de alimentación de mineral y flujo de aire permitieron determinar los parámetros con los que se van a trabajar de cada variable.
- Los planteamientos de los modelos matemáticos permiten predecir el consumo específico de energía de cada accionamiento con la variación de los factores.
- La valoración económica permite evaluar el costo y ahorro de la producción.

CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Introducción

La presentación de los resultados y su discusión permite establecer normas para el uso racional de la energía y su ahorro. De esto se encarga este capítulo.

3.2 Determinación de la carga de bolas

Para la determinación de la carga de bolas usamos el método de Klebanov – Shubov, el cuál se estableció en el capítulo 2.

$$G = \frac{\varphi}{100} \times V \times \rho \quad (1.3)$$

Para la realización de los experimentos primero se establecieron los valores para los coeficientes de llenado del molino (φ) y los valores para el peso de las bolas.

Se ha demostrado experimentalmente que el coeficiente óptimo de llenado con bolas de un molino debe ser de 40 a 50 % de su volumen total. Para nuestro experimento escogemos 25 y 35 %.

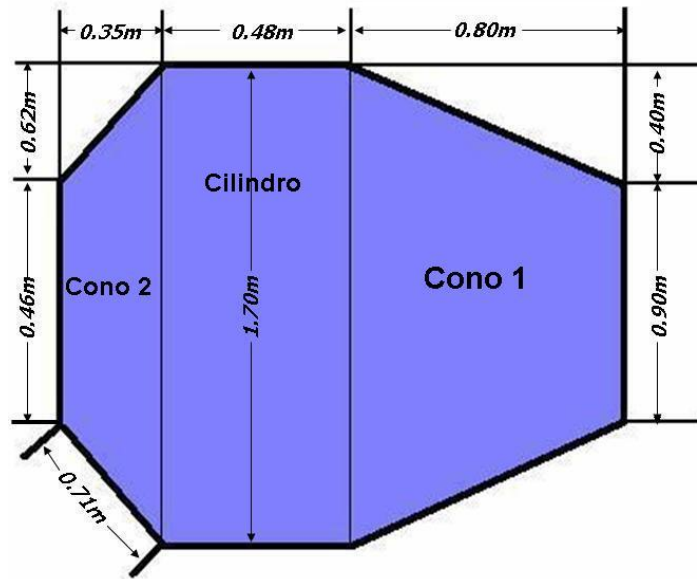
$$\varphi_1 = 25 \%$$

$$\varphi_2 = 35 \%$$

- El volumen del molino se calcula por la ecuación 1.4 que ya se planteó en el capítulo I.

$V = \text{Volumen (Cilindro)} + \text{Volumen (Conos truncados)}$

$$V = \frac{D^2}{4} \times L + \frac{1}{3} \times h \times (A1 + A2 + \sqrt{A1 \times A2}) \quad (1.4)$$



$$V \text{ cono1} = 1.08 \text{ m}^3 \quad V \text{ cono2} = 0.36 \text{ m}^3 \quad V \text{ cilindro} = 1.09 \text{ m}^3 \quad V \text{ molino} = 2.53 \text{ m}^3$$

- Para el peso volumétrico de determina primero el diámetro óptimo de las bolas por la ecuación 1.5.

$$B = 28 \sqrt[3]{D_{\text{máx}}} \quad (1.5)$$

$$D_{\text{máx}} = 10 \text{ mm.}$$

$$B = 60.32 \text{ mm.}$$

- Se estableció el peso volumétrico de las bolas (φ) para 1 m^3 de bolas de 60mm de 4.85 t/m^3 .

- Se calcula G para los dos valores de coeficiente de llenado del molino para bolas de 60mm y el resultado es.

$$\text{Para } \varphi_1 = 25 \% \quad G_1 = 3.065 \text{ t}$$

$$\text{Para } \varphi_2 = 35 \% \quad G_2 = 4.291 \text{ t}$$

- Se recomendó la utilización de bolas de un:

20% de bolas con diámetro de 50mm

20% de bolas con diámetro de 70mm

El resto (60%) de bolas con diámetro de 60mm

- Luego la combinación de bolas es de 50, 60 y 70mm.

- Para el 25 % del coeficiente de llenado de bolas.

$$50 \text{ mm.} \rightarrow 0.2 * 3,065 \text{ t} \rightarrow G_1 = 0.613 \text{ t}$$

$$60 \text{ mm.} \rightarrow 0.6 * 3.065 \text{ t} \rightarrow G_1 = 1.839 \text{ t}$$

$$70 \text{ mm.} \rightarrow 0.2 * 3.065 \text{ t} \rightarrow G_1 = 0.613 \text{ t}$$

- Para el 35 % del coeficiente de llenado de bolas.

$$50 \text{ mm.} \rightarrow 0.2 * 4.291 \text{ t} \rightarrow G_2 = 0.858 \text{ t}$$

$$60 \text{ mm.} \rightarrow 0.6 * 4.291 \text{ t} \rightarrow G_2 = 2.574 \text{ t}$$

$$70 \text{ mm.} \rightarrow 0.2 * 4.291 \text{ t} \rightarrow G_2 = 0.858 \text{ t}$$

3.3 Determinación del flujo de alimentación de mineral

El flujo de mineral es otra de las variables que influye sobre el consumo de energía, la cual determinamos realizando 3 experimentos donde se replicaron 3 veces cada uno. Se varió la velocidad del motor que acciona el sinfín para conocer el flujo de mineral, se tomaron muestras cada 30 segundos, se pesaron y se calculó el flujo de mineral por la relación entre el peso de la muestra y el tiempo que duró cada experimento y luego se convirtió para llevarlo a tonelada por hora (t/h).

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de los experimentos que se realizaron para determinar el flujo de alimentación de mineral.

No	Peso de la muestra (kg)	V (r/min)	kg/s	T/h
1	17.15	438	0.571667	2.058
2	17.5	438	0.583333	2.1
3	17.3	438	0.576667	2.076
4	23.5	609	0.783333	2.82
5	23.5	609	0.783333	2.82
6	23.5	609	0.783333	2.82
7	29	771	0.966667	3.48
8	30	771	1	3.6
9	30	771	1	3.6

Tabla 3.1 Resultados de la determinación del flujo de alimentación de mineral.

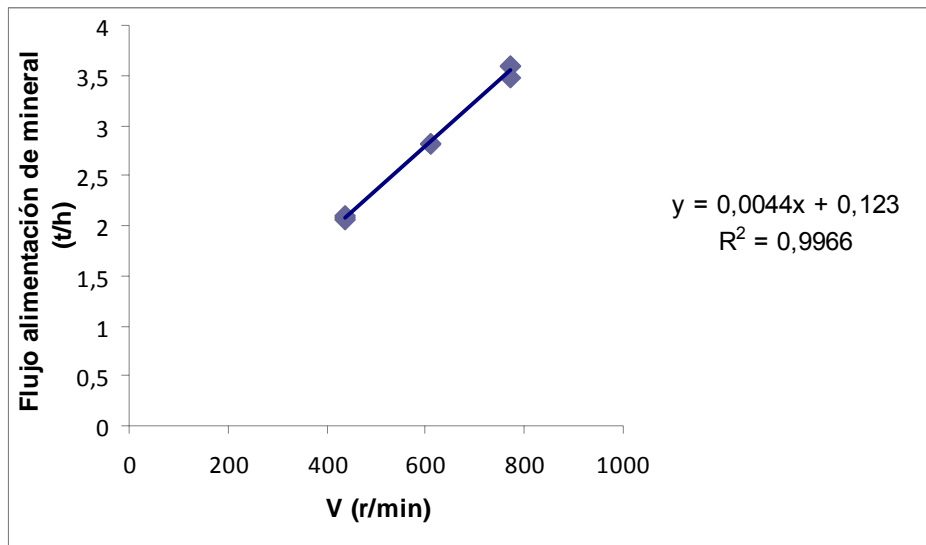


Fig. 3.1 Relación entre el flujo de alimentación de mineral del sinfín y su velocidad.

Aquí vemos la relación entre estos dos parámetros relacionados en una ecuación lineal.

Por ésta ecuación se estima el flujo de mineral del sinfín a una velocidad determinada (x).

Por consiguiente se tomaron los valores 2.1 y 2.8 t/h para la realización de los experimentos factoriales planificados.

3.4 Determinación del flujo de aire

El flujo de aire se determinó variando la velocidad del motor del ventilador a través del variador de velocidad y se lograron los resultados mostrados en la siguiente tabla.

V (r/min.)	Qa (m ³ /h)
1440	4080
1550	5440

Tabla 3.2 Resultados de la determinación del flujo de aire.

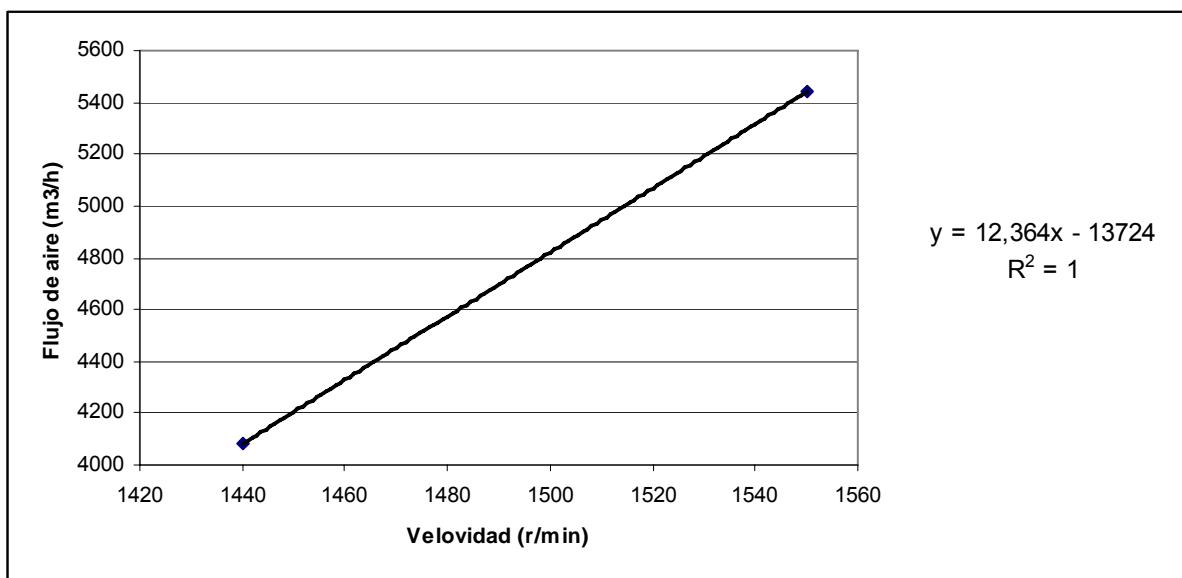


Fig. 3.2 Flujo de aire con respecto a la velocidad del ventilador.

En este gráfico se ve la relación entre el flujo de aire del ventilador de recirculación y su velocidad establecidos en una ecuación lineal. A través de esa ecuación se puede estimar con exactitud el flujo de aire que se desea a una determinada velocidad.

Nota: La máxima velocidad que alcanza el ventilador con el variador es de 1800 r/min.

3.5 Resultados de los experimentos

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los 24 experimentos, donde se observan las potencias demandadas por el molino, ventilador y unidad de molienda respecto al mineral procesado Q_{snet} y al total de mineral producido.

No	Pm, kW	Pv, kW	Pu, kW	Qsnet, t/h	Qstot, t/h
1	30,56	9,53	40,09	0,826	1,983
2	30,86	9,77	40,63	0,540	2,074
3	30,87	10,64	41,51	0,705	2,011
4	30,24	12,53	42,77	0,856	2,025
5	30,68	12,65	43,33	0,715	2,037
6	30,37	12,37	42,74	0,593	2,073
7	32,04	9,94	41,98	1,444	2,789
8	31,69	10,88	42,57	1,135	2,660

9	31,90	9,65	41,55	0,783	2,775
10	31,43	11,77	43,2	0,821	2,608
11	31,51	11,68	43,19	1,012	2,623
12	31,61	11,70	43,31	0,835	2,619
13	35,66	9,97	45,63	1,078	2,025
14	35,20	9,52	44,72	1,002	2,030
15	35,51	9,40	44,91	0,859	2,033
16	35,00	11,61	46,61	0,629	1,981
17	35,28	11,35	46,63	0,729	1,981
18	35,06	11,39	46,45	0,695	2,005
19	37,71	10,02	47,73	0,921	2,742
20	37,05	9,66	46,71	0,541	2,362
21	36,83	9,60	46,43	0,614	2,435
22	36,50	14,08	50,58	0,850	2,335
23	36,82	14,26	51,08	1,047	2,533
24	36,60	14,52	51,12	1,126	2,611

Tabla 3.3 Potencias demandadas por los accionamientos y productividad del sistema.

A partir de los resultados mostrados en las tabla 3.1 y con la aplicación de la expresión 2.3 fueron calculados los consumos específicos de energía para el molino, W_m , para el ventilador de recirculación, W_v , y para la unidad de molienda, W_u . Como productividad neta del sistema, Q_{snet} , se consideró la cantidad de fino realmente producida por el sistema descontando la cantidad de finos en la alimentación fresca. Se consideró también la productividad total, Q_{stot} , donde se incluye la cantidad de finos presentes en la alimentación fresca. Estos resultados están recogidos en la siguiente tabla.

No	Factores			Productividad		Según finos Netos			Según finos Totales		
	ϕ , %	Q_e , t/h	Q_a , m ³ /h	Q_{snet} , t/h	Q_{stot} , t/h	W_m , kWh/t	W_v , kWh/t	W_u , kWh/t	W_m , kWh/t	W_v , kWh/t	W_u , kWh/t
1	25	2,1	4 080	0,826	1,983	36,994	11,536	48,529	15,409	4,805	20,214
2	25	2,1	4 080	0,540	2,074	57,147	18,091	75,238	14,879	4,710	19,590
3	25	2,1	4 080	0,705	2,011	43,791	15,085	58,876	15,352	5,288	20,640
4	25	2,1	5 440	0,856	2,025	35,327	14,641	49,967	14,933	6,189	21,122
5	25	2,1	5 440	0,715	2,037	42,911	17,697	60,608	15,062	6,212	21,274

6	25	2,1	5 440	0,593	2,073	51,212	20,854	72,066	14,650	5,965	20,615
7	25	2,8	4 080	1,444	2,789	22,190	6,880	29,070	11,489	3,562	15,051
8	25	2,8	4 080	1,135	2,660	27,920	9,582	37,501	11,913	4,088	16,002
9	25	2,8	4 080	0,783	2,775	40,743	12,327	53,070	11,496	3,478	14,974
10	25	2,8	5 440	0,821	2,608	38,289	14,335	52,624	12,054	4,513	16,566
11	25	2,8	5 440	1,012	2,623	31,140	11,543	42,683	12,014	4,453	16,468
12	25	2,8	5 440	0,835	2,619	37,859	14,011	51,870	12,070	4,467	16,537
13	35	2,1	4 080	1,078	2,025	33,077	9,252	42,329	17,608	4,926	22,534
14	35	2,1	4 080	1,002	2,030	35,134	9,498	44,632	17,342	4,688	22,030
15	35	2,1	4 080	0,859	2,033	41,343	10,948	52,291	17,469	4,626	22,094
16	35	2,1	5 440	0,629	1,981	55,641	18,463	74,105	17,667	5,862	23,530
17	35	2,1	5 440	0,729	1,981	48,396	15,570	63,965	17,809	5,730	23,539
18	35	2,1	5 440	0,695	2,005	50,448	16,384	66,833	17,487	5,679	23,166
19	35	2,8	4 080	0,921	2,742	40,923	10,874	51,797	13,751	3,654	17,404
20	35	2,8	4 080	0,541	2,362	68,441	17,844	86,285	15,684	4,089	19,773
21	35	2,8	4 080	0,614	2,435	59,973	15,632	75,605	15,125	3,942	19,067
22	35	2,6	5 440	0,850	2,335	42,952	16,569	59,521	15,631	6,030	21,660
23	35	2,8	5 440	1,047	2,533	35,152	13,614	48,766	14,537	5,630	20,167
24	35	2,8	5 440	1,126	2,611	32,515	12,899	45,414	14,018	5,561	19,579

Tabla 3.4 Consumos específicos y productividad alcanzada por el sistema durante el experimento factorial.

Como se observa, en los experimentos 7, 8 y 9 fue donde se alcanzó la mayor productividad promedio de 2.741 t/h, con el menor consumo específico de energía promedio de 15.343 kWh/t. Se llega a la conclusión de que el aumento de productividad disminuye el consumo específico de energía.

3.6 Relación entre el consumo específico de energía del molino de bolas y la productividad

Gráfico de la relación entre el consumo específico de energía del molino y la productividad.

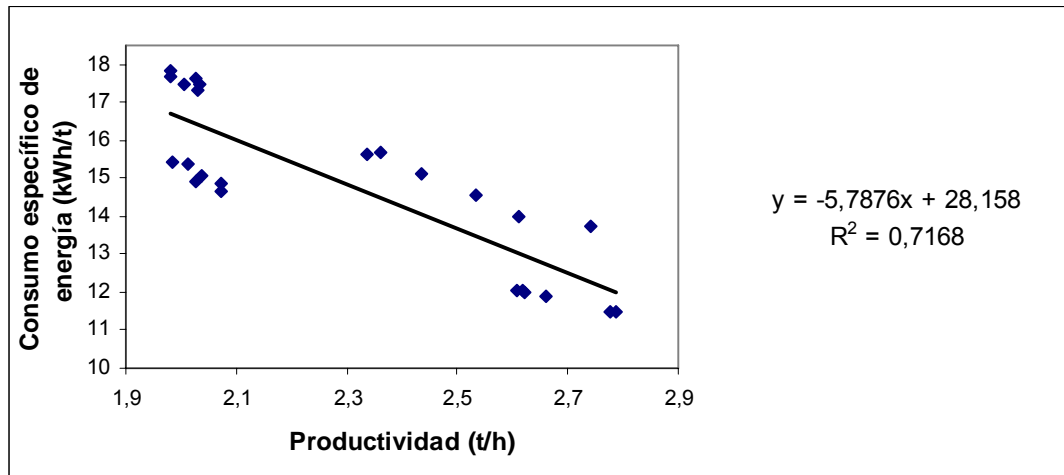


Fig. 3.3 Relación entre la productividad y el consumo específico de energía del molino.

Aquí el consumo específico de energía del molino relacionado con la productividad queda establecido en una ecuación lineal. Nótese que el consumo específico de energía del molino decrece con el aumento de la productividad, donde para una producción mínima promedio de 1.989 t/h, el molino alcanzó un consumo específico de energía promedio de 17.654 kWh/t. Mientras que para una productividad máxima promedio de 2.741 t/h alcanzó un consumo específico de energía promedio de 11.633 kWh/t.

3.7 Relación entre el consumo específico de energía del ventilador de recirculación y la productividad

Gráfico de la relación entre el consumo específico de energía del ventilador de recirculación y la productividad.

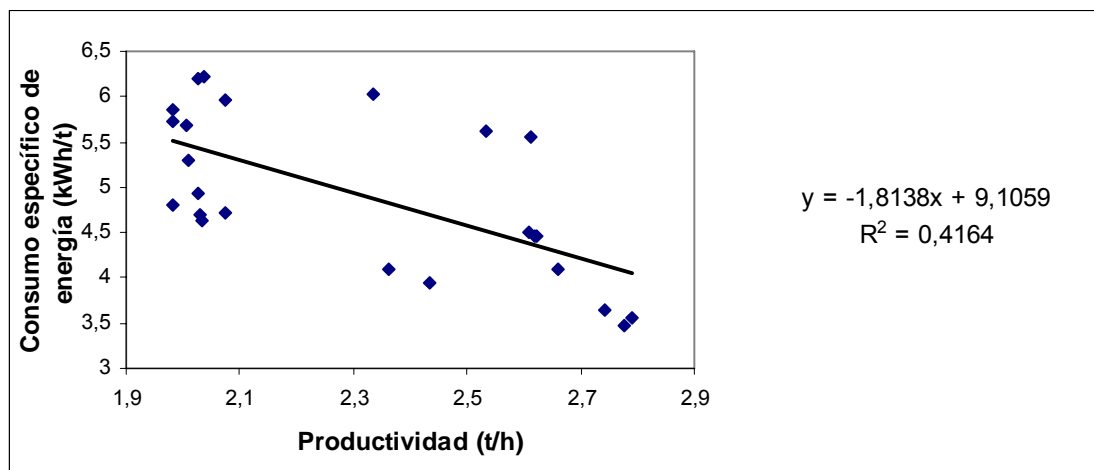


Fig. 3.4 Relación entre la productividad y el consumo específico de energía del ventilador.

Aquí también se ve la relación entre el consumo específico de energía del ventilador y la productividad en una ecuación lineal, donde se nota que el consumo específico de energía del ventilador disminuye con el aumento de la productividad. Para una productividad mínima promedio de 1.989 t/h alcanzó un consumo específico de energía promedio de 5.757 kWh/t, mientras que para una productividad máxima promedio alcanzó un consumo específico de energía promedio de 3.709 kWh/t.

3.8 Relación entre el consumo específico de energía de la unidad de molienda y la productividad.

En la siguiente figura se muestra el gráfico de la relación entre el consumo específico de energía de la unidad de molienda y la productividad

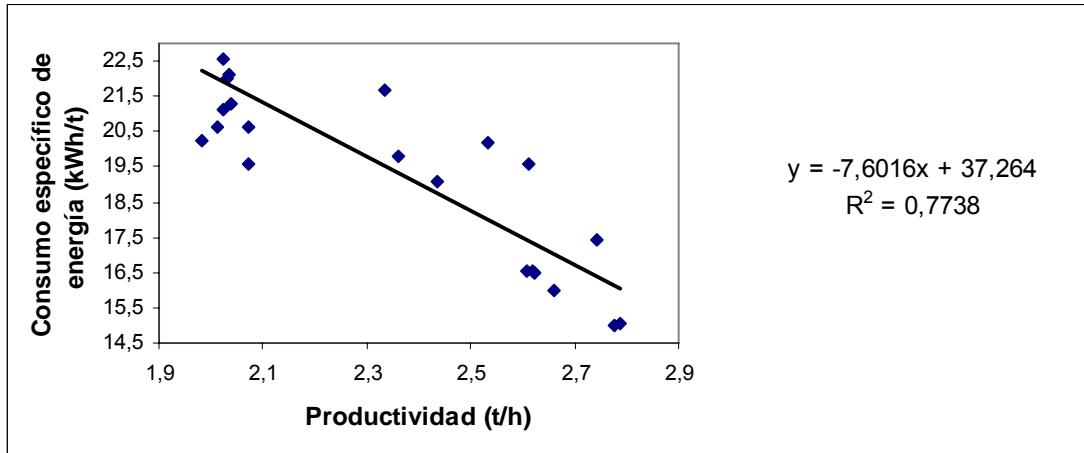


Fig. 3.5 Relación entre la productividad y el consumo específico de energía de la unidad de molienda.

El consumo específico de energía de la unidad de molienda relacionado con la productividad queda establecido en una ecuación lineal, donde también se ve la influencia significativa que tiene la productividad sobre el consumo específico de energía, la cuál tiende a disminuirlo. Donde para una productividad mínima promedio de 1.989 t/h la unidad de molienda alcanzó un consumo específico de energía promedio de 23.412 kWh/t, mientras que para una productividad máxima promedio de 2.741 t/h alcanzó un consumo específico de energía promedio de 15.342kWh/t.

3.9 Análisis de regresión y varianza para el molino

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de regresión del consumo específico de energía del molino.

Parámetros	Estimación	Error estándar	Estadístico t	p
Constante	14,1768	1,296	10,13	0,0000
Factor φ	0,30669	0,0223	13,73	0,0000
Factor Q_a	0,00018	0,000164	1,154	0,26119
Factor Q_e	-3,79728	0,3189	-11,906	0,0000

Tabla 3.5 Análisis de regresión para el consumo específico de energía del molino.

$R^2 = 94.31\%$.

R^2 (Ajustado g.l.)=93.46%.

Error estándar de estimación=0.5446

Error absoluto medio=0.4038

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza del modelo de regresión del consumo específico de energía del molino.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medio	F	p
Modelo	99,226	3	33,07	11,61	0,0000
Error	5,98	20	0,299	***	***
Total	105,208	23	***	***	***

Tabla 3.6 Análisis de varianza del modelo de regresión del consumo específico de energía del molino.

La dependencia del consumo específico de energía con la carga de bolas (ϕ), la alimentación fresca al molino (Q_e) y el flujo de aire a través del molino (Q_a) está representada en la expresión 3.1.

$$W_m = 14.177 + 0.306\phi + 0.0001Q_a - 3.797Q_e \quad (3.1)$$

El valor de (P) mostrado en la tabla 3.5 de análisis de varianza del modelo de regresión es inferior a 0.05 lo que es indicativo de que existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza de 95 %.

El estadístico R^2 ajustado indica que el modelo explica un 93.46% de las variaciones específica de energía del molino (W_m).

Para el flujo de aire a través del molino (Q_a) el valor de (P) es superior a 0.10, por lo tanto este término no es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 90% o superior, sobre esta base se decide presentar un modelo simplificado según la expresión 1.7.

Modelo simplificado.

$$W_m = 15.0789 - 3.797Q_e + 0.366\phi \quad (3.2)$$

3.10 Análisis de regresión y varianza para el ventilador

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de regresión para el consumo específico de energía del ventilador.

Parámetros	Estimación	Error estándar	Estadístico t	p
Constante	3,282	1,048	3,13	0,0051
Factor Q_a	0,00095	0,00015	6,155	0,0000
Factor Q_e	-1,158	0,301	-3,847	0,0009

Tabla 3.7 Análisis de regresión para el consumo específico de energía del ventilador.

R^2 (Ajustado g.l)=68.79%.

Error estándar de estimación=0.516

Error absoluto medio=0.371

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza del modelo de regresión del consumo específico de energía del ventilador.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medio	F	p
Modelo	14,042	2	7,021	26,35	0,0000
Error	5,595	21	0,266	***	***
Total	19,638	23	***	***	***

Tabla 3.8 Análisis de varianza del modelo de regresión del consumo específico de energía del ventilador.

El modelo simplificado obtenido para el consumo específico de energía del ventilador (W_V), aparece en la expresión 3.3

$$W_V = 3.282 + 0.00095Q_a - 1.158Q_e \quad (3.3)$$

El modelo anterior es indicativo de que con el aumento del flujo de aire, aumenta el consumo específico de energía del ventilador y por el contrario disminuye con el incremento del flujo de mineral.

3.11 Análisis de regresión y varianza para la unidad de molienda

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de regresión para el consumo específico de energía de la unidad de molienda.

Parámetros	Estimación	Error estándar	Estadístico t	p
Constante	16,418	2,275	7,216	0,0000
Factor φ	0,341	0,0391	8,715	0,0000
Factor Q_a	-4,955	0,5594	-8,857	0,0008
Factor Q_e	0,0011	0,0002	3,971	0,0000

Tabla 3.9 Análisis de regresión para el consumo específico de energía de la unidad de molienda.

R^2 (Ajustado g.l.)=87.906%.

Error estándar de estimación=0.959

Error absoluto medio=0.766

El estadístico R^2 ajustado indica que el modelo es explicativo en el 87.9 % de la variabilidad del consumo específico de energía de la unidad de molienda (W_u).

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza del modelo de regresión del consumo específico de energía de la unidad de molienda.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medio	F	p
Modelo	156,613	3	52,20	56,73	0,0000
Error	18,40	20	0,920	***	***
Total	175,018	23	***	***	***

Tabla 3.10 Análisis de varianza del modelo de regresión del consumo específico de energía de la unidad de molienda.

El modelo de regresión obtenido para el consumo específico de energía de la unidad de molienda (W_u), aparece en la expresión 3.4.

$$W_u = 16.419 + 0.341\varphi - 4.955Q_a + 0.0011Q_e \quad (3.4)$$

El modelo permite definir que un aumento de la carga de bolas (φ) y de alimentación de mineral (Q_e), provocan un incremento del consumo específico de energía de la unidad de molienda (W_u), mientras que con el aumento de flujo de aire disminuye el consumo de energía.

3.12 Valoración económica

3.13 Conclusiones del Capítulo III

CONCLUSIONES GENERALES

- Se logró en los experimentos 7, 8 y 9 la mayor productividad con el menor consumo específico de energía.
- Se demostró que los tres factores como la carga de bolas, flujo de aire y flujo de mineral tienen influencia significativa sobre el consumo específico de energía en la unidad de molienda.
- La ausencia de mineral aumenta el consumo específico de energía del molino, por lo que hay que suministrarle mineral constantemente para aprovechar esa energía y la misma disminuya
- Se obtuvieron modelos matemáticos que permiten determinar y predecir el consumo específico de energía del molino, ventilador de recirculación y unidad de molienda teniendo en cuenta los parámetros del flujo de alimentación de mineral, carga de bolas y flujo de aire.
- Cuando se analizan todos los factores que influyen en el consumo específico de energía para la unidad de molienda, la interacción entre ellos de acuerdo a la ecuación de regresión obtenida para dicha unidad, indica que con un incremento del coeficiente de llenado del molino con bolas y de flujo de mineral se provoca un aumento del consumo específico de energía de la unidad, por el contrario cuando se incrementa el flujo de aire disminuye este índice.

RECOMENDACIONES

- Continuar el trabajo realizando un experimento factorial de 3^3 para obtener resultados más concretos.
- No permitir que el molino trabaje sin mineral porque esto aumenta el consumo de energía y esta se desaprovecha.
- Continuar con este proyecto para tratar de lograr mejoras en el consumo específico de energía en el proceso de molienda.

BIBLIOGRAFÍA

1. MULAR, A. L. *Diseño de plantas de procesos de minerales* [Documento de Word]. 1 ed. España: Madrid, 1980. 396 p.
2. MENDOZA, J. M. *Metodología para la normación del consumo de energía en el proceso de molienda del mineral laterítico* [Documento de Word]. Tesis de maestría. ISMM Moa, 2008, 86 p.
3. LEGRA, A. *Operador de secado y molienda en la planta piloto Moa* [Documento de Word]. 5 ed. Feb 2007. 36p.
4. *Sp_ventilación_c4* [Documento pdf]. Disponible en <http://rapidlibrary.com/files/sp-ventilación-ca-pdf-ulzceb9vcei89on.html>
5. *Tecnología del molino de bolas* [en línea]. Disponible en <http://www.monografías.com/trabajos37/molino-de-bolas/molino-de-bolas.shtml>
6. BARRIENTOS, U. L. *Análisis del comportamiento del consumo específico de energía de molienda de la laterita en la empresa Cdte. Ernesto Che Guevara* [Documento de word]. Trabajo de diploma. ISMM Moa, 2005, 83 p.
7. PÉREZ, J. T. *Las propiedades físico-mecánicas de las menas lateríticas y su relación con el consumo específico de energía en el proceso de molienda.* [Documento de word]. Trabajo de diploma. ISMM Moa, 2010, 55 p.
8. LEDESMA, Y. A. *Determinación del Comportamiento del Consumo específico de Energía en el Proceso de Molienda de la Empresa “Cmdte. René Ramos Latour” de Nicaro.* [Documento de word]. Trabajo de diploma. ISMM Moa, 2011, 69 p.

ANEXOS**Anexo 1**

Resultados de las mediciones de las potencias de los accionamientos del molino de bolas y del ventilador de recirculación.

No Exp	Potencias del molino, kW				Potencias del ventilador, kW			
	Pmed	Pmáx	Pmín	Desv	Pmed	Pmáx	Pmín	Desv
1	30,557	33,9	28,11	1,06438	9,528	9,92	9,29	0,12414
2	30,860	32,77	28,91	1,07306	9,769	10,09	9,45	0,17436
3	30,872	33,45	29,02	0,91943	10,635	11,19	10,18	0,22532
4	30,240	32,43	27,61	1,05355	12,533	12,88	12,1	0,16082
5	30,682	32,45	28,61	0,92853	12,654	13,11	12,29	0,19584
6	30,369	32,72	27,09	0,97530	12,366	12,73	12,07	0,16088
7	32,042	34,43	30,13	0,97713	9,935	10,55	9,57	0,23148
8	31,689	34,15	29,34	1,15301	10,875	12,2	9,48	1,13054
9	31,902	34,85	29,43	1,00189	9,652	9,89	9,29	0,11953
10	31,436	33,45	28,88	0,99349	11,769	12,14	11,33	0,15834
11	31,514	33,56	29,55	0,86092	11,681	12,3	11,3	0,20837
12	31,612	33,75	29,76	0,86754	11,700	12,06	11,36	0,15576
13	35,657	38,02	34,06	0,90274	9,974	10,38	9,6	0,17524
14	35,204	37,23	33,61	0,82833	9,517	9,87	9,07	0,14648
15	35,514	37,13	32,54	1,00058	9,404	9,68	9,2	0,11184
16	34,999	37,42	33,42	0,78501	11,614	12,01	11,23	0,18844

17	35,280	37,08	33,42	0,72908	11,350	11,87	10,92	0,17738
18	35,062	37,92	33,08	0,99088	11,387	11,83	11,07	0,18027
19	37,713	38,35	36,96	0,48202	10,025	10,43	9,6	0,20588
20	37,049	37,78	36,32	0,48362	9,656	9,89	9,45	0,11838
21	36,833	37,87	36	0,58916	9,598	9,94	9,27	0,14270
22	36,500	27,65	25,95	0,56322	14,086	14,520	13,76	0,17280
23	26,817	27,73	25,49	0,55302	14,265	14,92	13,69	0,23755
24	36,603	37,5	35,85	0,58065	14,222	14,62	13,81	0,20987