

**REPUBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**

**TESIS EN OPCIÓN AL TITULO DE MASTER**

**TÍTULO: Proyección para el incremento de la productividad hasta 50 000 t de  
Níquel más Cobalto en la instalación de molienda de la Empresa Ernesto Che  
Guevara.**

**AUTOR: Ing. Luis Llorente Arce.**

**TUTOR: Dr. Alfredo L. Coello Velázquez**

**Agosto, 2003  
“ Año Gloriosos Aniversarios de Martí y del Moncada”**

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todos los compañeros que de una forma u otra, han ayudado en este trabajo.

Agradecer en especial la ayuda del Dr. Alfredo Coello Velázquez, tutor del presente trabajo, a mi esposa e hijos, a la "Empresa Ernesto Che Guevara" y a la Revolución.

## **Resumen.**

Por la importancia que tiene para la economía cubana el incremento de la producción de níquel más cobalto hasta al cansar valores de 50 mil toneladas anuales en la fábrica "Comandante Ernesto Che Guevara" se realiza el estudio para la proyección del incremento de la productividad en la instalaciones de molienda, actual cuello de botella de la empresa . Se realizo análisis estadístico de la humedad, granulometría de la clase (- 0.074 mm) y pruebas a escala de laboratorio e industrial de la adición de petróleo aditivo a la cabeza del molino para establecer su influencia en los índices de trabajo del molino.

Se definieron las variables operacionales que limitan la productividad del molino. Se recomienda la eliminación del punto de adición del petróleo en la alimentación del molino y la inclusión de una clasificación preliminar, se demostró su factibilidad.

## Índice

Introducción .....	2
Capítulo I. Generalidades sobre la materia prima y la producción de Níquel .....	4
1.1. Generalidades geológicas y características químico mineralógicas de la materia prima mineral.....	4
1.1.2 Características geológicas del yacimiento.....	5
1.1.3 Composición química y mineralógica .....	5
1.2. Comportamiento de las principales características tecnológicas del mineral .....	6
1.3. Situación actual de la planta.....	8
1.4. Perspectiva del desarrollo de la industria del níquel.....	9
CONCLUSIONES PARCIALES.....	12
CAPITULO II. Marco Conceptual .....	13
INTRODUCCIÓN.....	13
2.1. Análisis de los trabajos precedentes .....	13
2.2. Fundamentación Teórica de la proyección para el incremento de la productividad.15	15
CONCLUSIONES PARCIALES.....	21
CAPÍTULO III. Influencia del petróleo aditivo en los índices del molino a escala de laboratorio e industrial .....	22
INTRODUCCION.....	22
3.1. Influencia del petróleo aditivo en la calidad del producto molido.....	23
3.1.1 Metodología del trabajo.....	23
3.1.2 Análisis y discusión de los resultados .....	23
3.3. Evaluación industrial del efecto del petróleo aditivo en el trabajo de los molinos.....	26
3.3.1. Metodología de trabajo.....	26
3.3.2 Análisis y discusión de los resultados .....	27
CONCLUSIONES PARCIALES.....	31
CAPÍTULO IV. Propuesta tecnológica para el incremento de la productividad por concepto de recuperación de la clase – 0.074 mm en la alimentación del molino. ....	32
INTRODUCCIÓN.....	32
4.1. Descripción del flujo del esquema propuesto.....	32
4.2. Balance material.....	33
4.3. Característica técnica de los nuevos equipos y diagrama de aparatos.....	36
Selección de los medios de transportación.....	38
4.4. Análisis económico.....	39
4.5 Cálculos de los costos de explotación.....	42
4.6 Cálculo del valor actual neto ( VAN ).....	45
4.7 Cálculo económico del VAN, TIR y R .....	46
CONCLUSIONES FINALES .....	47
RECOMENDACIONES .....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49

## Introducción

La industria del níquel en la economía cubana ocupa el primer renglón exportable y el segundo rublo de la economía. El precio del níquel se comporta con un ritmo creciente, alcanzando valores aproximados de 5.0 usd/lb. La industria cubana del níquel se ha propuesto ante si alcanzar las 100 000 t (Ni+Co) a finales de quinquenio. Un elemento indispensable para lograr este objetivo es la proyección de la ampliación de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" hasta una producción de 50 000 t.

Uno de los retos más importante que tiene ante si, es el aumento de la capacidad operativa de la unidad de molienda, cuya productividad actual no supera los 75 t/h por molino.

La productividad de los molinos de la fábrica "Comandante Ernesto Che Guevara" atraviesa por un momento de crisis, si bien en los años 1991 y 1992 se lograron alcanzar productividades en el orden de las 100 t/h por molino (Coello y Llorente; 1992) en la actualidad esta variable se ha reducido en aproximadamente un 30%.

(Coello y Llorente; 2001) abordando la problemática de la unidad de molienda, exponen de los principales retos que tiene ante si el incremento de la productividad de los molinos.

Los cambios tecnológicos introducidos en la década del 90, tales como la adición de petróleo en la correa caliente (alimentador 11 y 11 A) y la disminución de la apertura de la criba (II etapa) hasta 100 mm han incidido de manera importante en un cambio de la calidad del producto que se alimenta a secadero.

A esto se le suma, que en esta misma época, pasó al esquema de tiro directo desde la mina, sin una homogeneización previa antes de secaderos, cuya estadía de mineral en momento anterior, permitieron reducir el contenido de agua del mineral por concepto de escurrimiento. Esta situación ha sumado una nueva situación, variabilidad de la humedad del mineral que se alimenta a los molinos (> 5.0%).

Por otra parte la reducción del diámetro de la criba ha tenido como consecuencia el aumento del contenido de las clases finas (-0.074 mm) en la alimentación del molino, de manera, que se ha alterado la composición sustancial de la materia prima inicial, introduciendo el concepto de un mineral predominantemente limonítico.

Por ende, el **problema** se relaciona con las limitaciones para el incremento de la productividad de la unidad de molienda de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". El objeto de la investigación es el proceso de molienda del mineral laterítico.

### **Objetivo general.**

Evaluar los factores y variables de operación que limitan la productividad de los molinos en la planta de molienda de la fábrica "Comandante Ernesto Che Guevara"

### **Objetivos Específicos.**

1. Establecer los factores y variables operacionales que limitan la capacidad de los molinos.
2. Definir la influencia del petróleo aditivo en los índices trabajo de los molinos a escala de laboratorio e industrial.
3. Evaluar técnico-económicamente una propuesta tecnológica que permitan la recuperación del mineral fino ( $0.074\text{ mm}$ ) antes del molino.

### **Hipótesis del trabajo.**

1. Las variables operacionales que limitan la capacidad de los molinos son la humedad, el contenido de las fracciones  $-0.074\text{ mm}$  y sobre todo la adición de petróleo en la alimentación del molino.
2. La eliminación del petróleo aditivo en la alimentación de los molinos permitirán incrementar la alimentación en 10-15%.
3. La separación de la clase  $-0.074\text{ mm}$  antes del molino es una solución técnico-económicamente factible.

**La metodología del trabajo** propuesto abarca el análisis de los principales trabajos realizados en el objeto de investigación, evaluación de datos históricos, la realización de investigaciones a escala de laboratorio e industrial y aplicaciones de técnicas estadísticas.

**GENERALIDADES SOBRE LA MATERIA PRIMA Y LA PRODUCCIÓN  
DE NÍQUEL.**

**CAPÍTULO I**

## **Capítulo I. Generalidades sobre la materia prima y la producción de Níquel.**

### **INTRODUCCIÓN**

La materia prima mineral que se alimenta a la fábrica “Cmdte Ernesto Che Guevara” esta compuesta por menas multicomponentes de tipo lateritas, compuestas por dos fases mineralógicas principales: las fases limoníticas y las serpentiniticas. Estas menas tecnológicamente se clasifican como menas oxidadas de níquel, aunque existen cantidades apreciable de cobalto principalmente. Mediante la tecnología carbonato-amoniacial, como producto final se obtiene un concentrado de óxido de níquel y pequeñas cantidades de concentrado sulfuroso de níquel más cobalto.

#### **1.1. Generalidades geológicas y características químico mineralógicas de la materia prima mineral.**

La Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se encuentra ubicada al norte del yacimiento mineral de Punta Gorda, municipio Moa, provincia Holguín, limitada por los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km al oeste del pueblo de Moa y a 2 km al este del pueblo de Punta Gorda.

El yacimiento del mineral de Níquel que abastece a la fábrica está constituido por una capa de ligera inclinación hacia el oeste, la altura de la capa de reserva industrial es de 1 a 20 m, mientras que las de los escombros de 1 a 15 m. El mineral en la capa superior está compuesto fundamentalmente de limonita y otras fases de hierro, manganeso y cromo de menas de importancia y el cuerpo de mineral de óxido de hierro (principalmente limonita) y minerales de serpentinita.

Este mineral está considerado dentro del grupo de menas niquelíferas oxidadas, que se han formado como resultado del deterioro prolongado de las serpentinas, las rocas negras compuestas por lo general de los silicatos acuosos de magnesio, hierro y calcio. Los yacimientos de los minerales oxidados se encuentran normalmente cerca de la superficie terrestre en forma de capas horizontales, realizándose la extracción a cielo abierto con ayuda de excavadoras. Las dificultades para su extracción, se relaciona con la hidrogeología del yacimiento y los principales elementos son el níquel, cobalto y cantidades considerables de hierro, producido a partir del proceso de meteorización

química, a partir de rocas básicas y ultrabásicas todas desarrolladas en condiciones de un clima cálido y lluvioso

### **1.1.2 Características geológicas del yacimiento.**

Durante la meteorización de las serpentinas se forma una concentración, no solo de níquel, sino también del hierro, magnesio y cobalto; de ahí que los yacimientos de limonitas residuales están irrigados con varios elementos. Laterita es un término asociado a la limonita, que consiste en un material de color amarilloso, pardusco, compuesto principalmente por minerales de óxido e hidróxido de hierro (goethita e hidrogoethita, magnetita, hematita, etc).

### **1.1.3 Composición química y mineralógica.**

Según la composición química de las menas niquelíferas oxidadas se pueden subdividir en:

- Ferruginosa.
- Magnesianas (serpentinas).
- Arcillosa.
- Aluminosas.

El mineral que contiene el níquel constituye una mezcla con los óxidos de magnesio y óxido de silicio, estando presente además el óxido ferroso, óxido de aluminio y el agua. Entre los principales metales presente en el yacimiento laterítico se encuentran el níquel, que es un metal usado preferentemente para enriquecer aleaciones, dándole a estas resistencia, ductilidad, dureza oposición a la corrosión y el mantenimiento de la propiedades a elevada temperaturas. Cuando los combinan con otros metales estas propiedades pasan en gran medida a las aleaciones resultantes. El contenido medio de níquel presente en la mena laterítica oscila entre 0.9 y 2 %. Por su parte el cobalto se emplea para formación de acero especial, principalmente el acero magnético y otros aceros resistentes a la corrosión. La presencia del cobalto en estos minerales oscila entre 0.045 % y un máximo de 0.28 %.

El mineral limonítico caracterizado por su mayor contenido de hierro está formado por una serie de óxido de hierro como son:

Hematita( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

Goethita( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$ )

Magnetita( $\text{FeOFe}_2\text{O}_3$ )

limonita( $2\text{FeO}_3\text{H}_2\text{O}$ )

Cromita( $\text{FeOCr}_3\text{O}_2$ )

El níquel se encuentra presente en estos minerales y su reducción es bastante sencilla a bajas temperaturas, con una débil atmósfera reductora.

## 1.2. Comportamiento de las principales características tecnológicas del mineral.

De forma general las características de las menas lateríticas aparecen en un grupo importante de trabajos relacionados con la temática. En este epígrafe se abordan las características más generales de la materia prima mineral procesada en el período enero- octubre del 2003. La composición química promedio del mineral laterítico procesado en la Empresa “Ernesto Che Guevara” aparece más abajo:

Ni -----	1,28 %
Co -----	0,104 %
Fe -----	39,23 %
Mg-----	9,51 %
SiO <sub>2</sub> -----	5,17 %

El contenido de las fracciones menores que 100 mesh se muestran en la tabla 1.1. A juzgar por los datos de la tabla 1.1, el contenido de las fracciones menores de 200 mesh es alto, elemento a considerar, por los efectos que provoca la presencia de finos en la molienda de minerales.

Tabla No 1.1

Contenido de la clase fina del mineral en la cabeza del Molino (SM-4).

No.	Clases de tamaño, mesh	Contenido de la clase, %		
		+ 100	+ 200	- 200
1	Media(%)	43.11	5.72	51.34
2	Desv. Stand (%)	5.51	1.62	6.12
3	Valor Máx. (%)	52.26	9.16	60.46
4	Valor Min. (%)	36.44	3.10	42.61

La característica granulométrica del mineral molido en el período analizado se recoge en la tabla No 1.2.

Tabla No 1.2

Composición granulométrica del producto final (SM-8).

No.	Tamaño de la clase, mesh	Contenido de la clase, %
1	> 100	6.69
2	100-200	5.95
3	200-0	87.32

El comportamiento de la humedad en el citado período se expone en la figura 1.1 Los resultados muestran que hasta el mes de octubre del 2003 la humedad ha estado por encima de la norma exigida por la tecnología (4-4.5%).

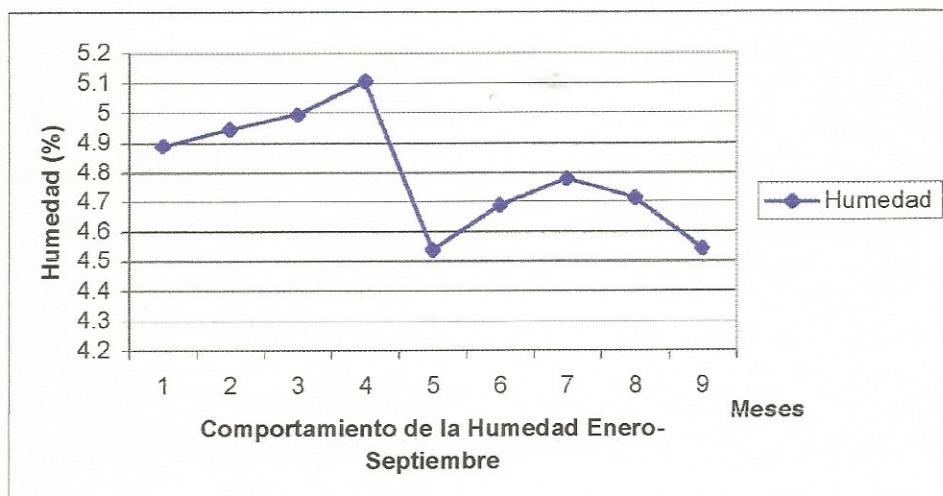


Fig. 1.1 Comportamiento de la humedad en el período enero-septiembre del 2003

### 1.3. Situación actual de la planta.

Desde su inicio de la operación la planta de Molienda ha presentado un considerable número de dificultades, muchos han sido desde entonces los trabajos de investigación que se han realizado en aras de resolverlos (Coello y Llorente, 1992; Coello, 1993b; Aldana, 1996; y Magoteaux, 1999 y otros).

Las propuestas tecnológicas desarrolladas por Coello y Llorente (1992) y Coello (1993b) resolvieron en gran medida los problemas relacionados con los altos consumos energéticos, la remolienda y el alto contenido de la clase + 100 mesh, elemento último de influencia notable en la generación del fenómeno arenamiento que provoca el desgaste prematuro de los turbo – aereadores, además de las pérdidas de níquel y cobalto. La adición del petróleo aditivo a finales de 1992, marcó un cambio considerable en los resultados cualitativos cuantitativos de los molinos.

Actualmente, para evitar el exceso de la clase + 100 mesh (hasta un 8%), el mineral se alimenta con un diámetro de – 100 mm, la fracción + 100 mm se rechaza y con ello, el contenido de SiO<sub>2</sub> y MgO.

El mineral se alimenta a los secaderos sin una previa homogeneización por la no existencia de inventario en los depósitos exterior e interior y el déficit de grúas gantry.

Esto provoca cambios bruscos en la característica del mineral en cuanto a la humedad de entrada y salida del secadero, relación serpentina limonita y contenido de Ni, Co, Fe, SiO<sub>2</sub> y MgO.

Los secaderos producto a los cambios realizados en los elementos internos ( estrella y levantador) han incrementado su productividad hasta más de 88,8 t/h, permitiendo con esto el cumplimiento de los planes de producción con menos secaderos efectivos.

Las unidades de molienda actualmente son el cuello de botella para la planta. No es posible operar con más de cinco secadores efectivos debido a su baja productividad (71 a 72 t/h hasta septiembre del año en curso). La parada de un molino para mantenimiento incide directamente en la producción de la planta.

Las principales variables que inciden en la baja productividad de los molinos son:

1. Humedad del mineral a la entrada de la molienda es mayor de 4,8 %.
2. Adicción de petróleo adictivo al mineral hasta un 4 % t de mineral seco.
3. Constante variabilidad del mineral con alto contenido de la clase preparada.
4. Baja eficiencia del clasificador neumático que provoca un alto contenido de la clase preparada en la carga circulante.
5. El petróleo adictivo provoca incrustaciones en todo el sistema de colección (clasificador, ciclones) que influyen directamente en la eficiencia de estos equipos provocando un mayor contenido de polvo en el régimen aerodinámico y en la carga circulante.

#### **1.4. Perspectiva del desarrollo de la industria del níquel.**

Los yacimientos niquelíferos cubanos se encuentran ubicados fundamentalmente en la región norte oriental, aunque existen otros yacimientos de menor importancia en la meseta Cajálbana en Pinar del Río y San Felipe en Camagüey.

El Comercio del níquel desde Cuba, se realiza a través de tres agencias de ventas, situadas en Canadá, China y Holanda, que comercializan el 100 % del níquel y el cobalto que se produce desde el 1998 hasta el 2002 la producción de níquel ha tenido un ritmo creciente, desde 67 724 t en el 98 hasta 75 234 t en el 2002.

La tecnología ha tenido un desarrollo creciente en los últimos cinco años, en los cuales se han solucionado las deficiencias del sistema de suministro eléctrico, modernizando

las cámaras de combustión de los Secaderos y las del nudo de combustión de Hornos de reducción en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, la planta de molienda de Nicaro. Se ha modificado, además del uso de autómatas y el sistema de enfriamiento de licores. La computación y las comunicaciones han experimentado un salto cualitativo y cuantitativo, asimilando el uso de softwares especializados, y desarrollados por SERCONI.

Se han ejecutado diversas inversiones con incidencia en el medio ambiente, tales como las reparaciones de las Líneas 1 y 2 de la Planta de Ácido y la Presa de Colas en la EPSA y en el filtro de Mangas en Nicaro.

El níquel, cuya producción debe crecer hasta alcanzar 100 000 toneladas, y la minería en general, cuentan con reservas naturales y con buenas perspectivas geológicas que las convierten en una importante fuente de recursos financieros.

La diversificación de los productos del níquel y de las calidades que permitan una mayor valorización de las exportaciones deberá ser un propósito sobre el que hay que intensificar el trabajo complementando la gestión comercial externa, que deberá ser realizada en toda su complejidad y con mayor eficiencia a los fines de convertirse en un factor de potenciación de los ingresos y de reducción de los costos de las exportaciones y de la propia gestión comercial. De particular importancia resultará la búsqueda de la mayor extracción de mineral contenido con el menor consumo energético posible en el proceso fabril.

Los ingresos externos de estas producciones están determinados por los precios que rigen en las bolsas, lo que obligará a una sistemática reducción de los costos de producción y un actuar flexible que garantice un efecto neto creciente y favorable al país.

La Industria del Níquel se encuentra en la proyección estratégica del Ministerio de la Industria Básica hasta el año 2006 y como objetivo fundamental se enmarca en ***“Concluir la modernización de la Industria Cubana del Níquel lo que posibilitará competir en costo y calidad en sus producciones básicas para asegurar el mercado y alcanzar a finales del quinquenio producciones anuales superiores a 100 000 ton de Ní + Co.***

El precio del níquel en el mercado esta oscilando alrededor 4.87 – 5.01(USD/lb). El cobalto esta 10 –10.75 ( USD/lb), el del petróleo ha sido de 169.8 (USD/t). Los precios del níquel en lo que va de año se han comportado de manera creciente, alcanzando precios tan alto como 5.1USD/lb ( LME, 15/10/03), el comportamiento de los precios del cobalto se mantiene igualmente un ritmo ascendente. Cabe señalar que los precios de venta del níquel cubano están algo por debajo del precio de venta de la London Metal Exchange (LME) (ver figuras 1.2 y 1.3)

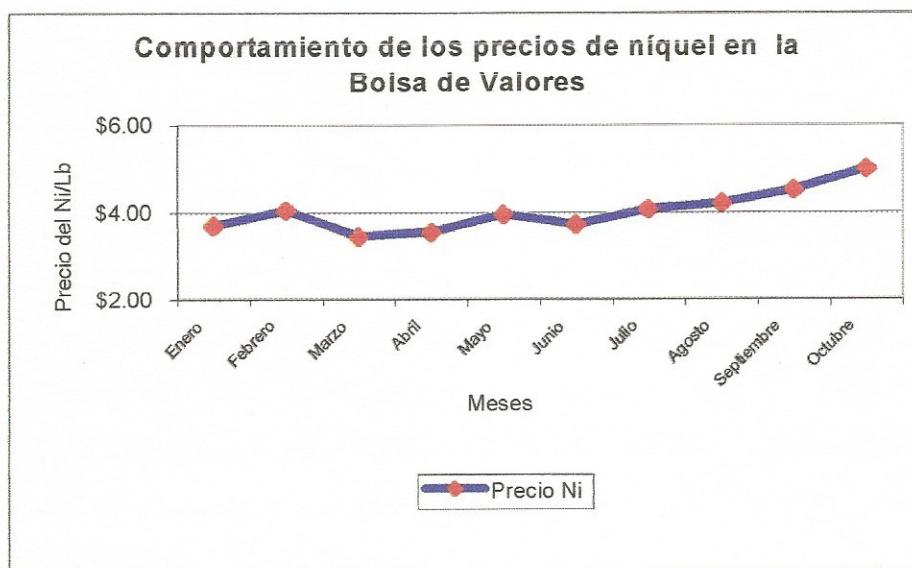


Fig. 1.2. Comportamiento de los precios del níquel en la bolsa de Londres.

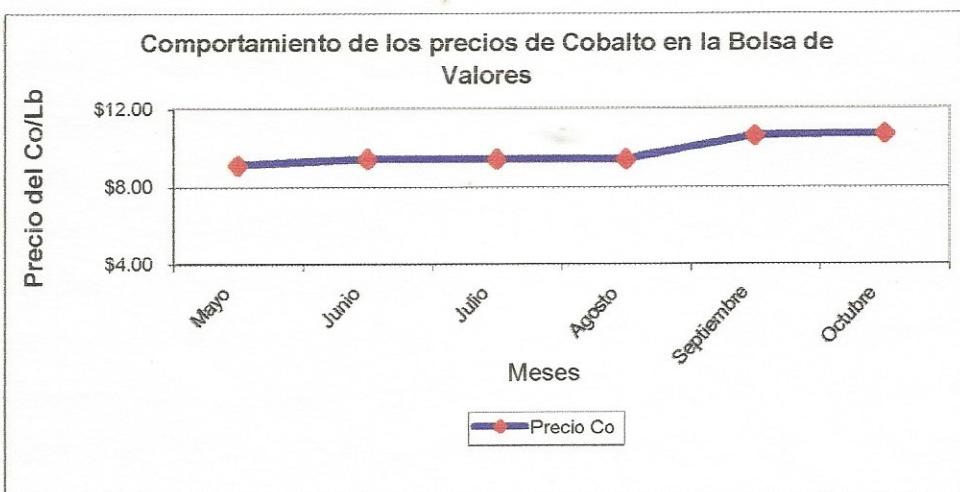


Fig.1.3. Comportamiento de los precios del cobalto según LME.

#### CONCLUSIONES PARCIALES.

- El contenido de la clase –200 mehs en la alimentación de los molinos se encuentra en valores altos, debido a la minería de carácter limonítico que actualmente tiene lugar en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.
- La humedad en el periodo analizado se encuentra en niveles superiores al requisito de calidad de la planta.
- Los precios de Níquel y Cobalto en el periodo analizado tienen una tendencia al incremento.

## **MARCO CONCEPTUAL**

## **CAPÍTULO II**

## **CAPITULO II. Marco Conceptual.**

### **INTRODUCCIÓN.**

Los fenómenos de reducción de tamaño se han estudiado a través de la energía consumida por los equipos de trituración y molienda por más de un siglo. Estos puntos de vistas, en nuestra opinión, bastante correctos están relacionados con los grandes consumos energéticos en que se incurren la trituración/molienda. La práctica mundial ha demostrado que en las plantas de Beneficio más del 50 – 70% del consumo de energía, corresponde precisamente a los procesos de preparación mecánica de minerales (Andreev, 1980). La preparación mecánica de los minerales se puede definir como el conjunto de operaciones, tecnológicamente relacionadas entre sí, cuyo objetivo principal es preparar el mineral para su posterior tratamiento, mediante la transformación física de la materia prima mineral.

#### **2.1. Análisis de los trabajos precedentes.**

La problemática que han envuelto a la planta de Molienda ha sido estudiada por varios autores: Lago (1989), Bustamante (1989), Coello y Llorente (1992), Coello (1993<sup>a</sup>, 1993<sup>b</sup>), Coello y Tijonov (1996), Aldana y Legrá (1996), Coello y Llorente (2001), Aldana y Legrá (2002), Laborde y Coello (2002).

Coello y Llorente (1992) realizaron un profundo estudio acerca de la influencia de las variables operacionales en los indicadores energo – tecnológicos de la planta de molienda con ayuda de un experimento factorial completo. En este estudio, los autores lograron reducir la carga de bolas en un 5% con el consecuente ahorro energético. La optimización de las variables operacionales con ayuda de un experimento factorial completo, permitió reducir el consumo energético en 0.6 kWh/h (Coello y Llorente, 1993; Coello, 1993<sup>b</sup>) y productividades por encima de las 100 t/h. Sin embargo estos resultados se vieron limitados por la introducción del petróleo aditivo en la alimentación de los molinos a finales de 1992, cuestión que se discute más adelante.

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

Laborde y Coello (2002) realizaron un estudio energético en la planta de molienda, sus resultados mostraron la no existencia de correlación entre la productividad y los consumos energético de la instalación, elementos anteriormente demostrados a escala de laboratorio (Coello 1993<sup>a</sup>, Coello y Marrero, 1994) e industrial (Coello y Llorente, 1992).

Independientemente que los trabajos anteriormente citados hayan permitido sustentar la solución de parte de la problemática de la planta, la práctica ha demostrado que la adición de petróleo en la banda alimentadora del molino ejerce un efecto negativo en los indicadores de salida, particularmente en la productividad.

Coello (1993b) llegó a la conclusión que en la molienda de minerales multicomponentes, los minerales “participantes en las mezclas minerales” se muelen de acuerdo a sus propias regularidades individuales independientemente unos de otros, de forma tal que cada componente sigue la misma regularidad independientemente del modo de molienda.

El consumo de energía en las máquinas de trituración y molienda es su “el talón de Aquiles”. El equipamiento disponible para la trituración y molienda de minerales carece de un principio organizativo, que le permita suministrar al máximo la energía suministrada en el rompimiento de las partículas minerales (Coello y Tijonov, 2001). En la molienda, por ejemplo, la energía de rompimiento se imprime al material de forma desmedida, el grado de liberación necesario se alcanza a costa de una alta remolienda de uno o varios de los minerales “participantes”, de ahí su baja eficiencia. Austín (1964) estableció que la energía útil en el rompimiento del mineral no supera el 3% de toda la energía consumida por el molino. Beke (1964) determinó que el consumo de energía en el rompimiento del mineral no supera el 0,6% independientemente de la diferencia en los resultados de ambos investigadores, si debemos de estar de acuerdo en que la energía que se consume propiamente en el rompimiento la partícula mineral es sumamente pequeña (Coello, 2003).

## **2.2. Fundamentación Teórica de la proyección para el incremento de la productividad.**

En el contexto de la tecnología carbonato amoniacal el objetivo de la preparación mecánica se relaciona con el aumento de la superficie de contacto del mineral. Las primeras investigaciones sobre la molienda (Rittinger R, 1867; Kik, 1883; Bond, 1950) estuvieron dirigidas a dar una mejor comprensión de los fenómenos que tienen lugar en la molienda y trituración; ambos investigadores defendieron la posición de explicar la molienda de minerales desde la relación energía – reducción de tamaño. En este sentido la reducción de tamaño se estudió como función del área de la superficie de la partícula nuevamente formada y el volumen del material molido y el diámetro (Coello, 2002).

Los experimentos han demostrado que el proceso de reducción de tamaño, la energía consumida por unidad de masa es proporcional a las pequeñas variaciones al tamaño de la partícula y que la energía requerida para lograr dicha variaciones relativamente en el tamaño de las partículas es inversamente proporcional a una función dada del tamaño de inicial del mineral (Lynch, 1977).

Las principales pérdidas de la energía están relacionadas con las grandes pérdidas en las transmisiones del accionamiento del molino en forma de calor y ruido. Las restantes pérdidas tienen lugar durante la fricción entre partícula-partícula sin su consecuente rompimiento, el choque metal – metal en el interior del molino y en la evaporación de la humedad contenida en la mena, además de las pérdidas en la energía cinética y potencial, en las deformaciones plásticas y elásticas durante la molienda y la propia emisión de ruido del molino. No obstante, estas transformaciones de la energía en calor y ruido u otro tipo, son inherentes a los procesos de preparación de mineral, incluso a veces necesarios, aunque en la mayoría de los casos no juega papel alguno en la reducción del tamaño de las partículas minerales. La mayoría de estas pérdidas constituyen reservas considerables de energía, cuyo aprovechamiento puede significar un momento económico importante no sólo para cualquier empresa, sino también para la comunidad. Esto último se apoya en que el resultado del aprovechamiento de la mencionada reserva permite elevar la eficiencia y eficacia de la empresa bajo el principio “hacer más con menos”. En caso de exceso de energía, esta se puede

distribuir a la comunidad, incidiendo de manera importante en su calidad de vida (Coello, 2003).

Las variaciones de la composición substancial de la mena incide de manera importante en los índices de salida del molino. Coello y Tijonov (1996) y Coello (1993b) plantean que si los minerales se muelen de acuerdo a sus propias regularidades, entonces para el caso de las menas lateríticas procesadas por la planta de Punta Gorda, los índices cualitativos-cuantitativos de los molinos dependerán en gran medida de la relación serpentina-limonita, o sea, que cuando la relación se desplaza hacia el aumento del contenido de serpentinita, sin cambiar las condiciones de operación, aumentará el contenido de la clase +100 mesh en el producto molido. Estos elementos fueron demostrados por Coello (1993b) para el mineral laterítico. De hecho la aparición de altos contenidos de la clase >100 mesh en el producto molido se relacionan con los cambios de la composición sustancial de la materia prima mineral, particularmente con el aumento del contenido de serpentinita, sobretodo la dura, en el mineral de cabeza, (ver figura 2.3).

Cuando el contenido se desplaza hacia la limonita, es evidente que se obtendrá un producto más fino, o sea, tiene lugar el fenómeno de la remolienda, que ocasiona grandes pérdidas de níquel y cobalto en las colas. Reid (1984) estableció que las partículas micrónicas y sub-micrónicas al entrar en las zonas de calentamiento del horno sufren transformaciones cristalo-químicas y aparecen las ferritas y forsteritas que encapsulan al níquel y cobalto en su interior sin permitir su lixiviación.

De manera que en este sentido el reto más importante se relaciona con la estabilización de la composición substancial de la materia prima alimentada a proceso, aunque ya sea han dado algunos pasos en este sentido (alimentar solo la clase menor de 100 mm, es preciso además garantizar la calidad estable del producto alimentado mediante la minería eficiente). Otro momento importante guarda relación con la humedad (ver capítulo I), se sabe de la práctica mundial que la disminución de la humedad en 1%, puede aumentar la productividad de los molinos en más de 10-15% La humedad del mineral de entrada limitan el aumento de la productividad de la eficiencia de los molinos en general( ver fig .2.4)

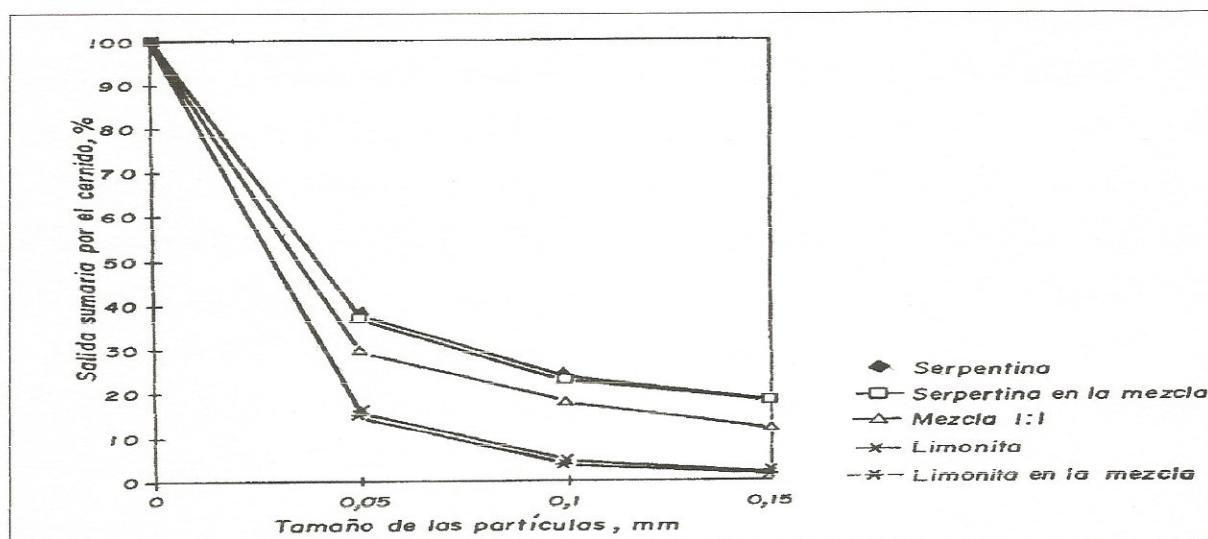


Fig.2.3 Molienda conjunta y por separado de la limonita y serpentinita.(Coello- Tijonov, 1996).

La presencia de finos en la alimentación del molino es otro de los factores que precisan de estudio. El contenido de la clase -0.074 mm en mineral de cabeza desde la puesta en marcha de la planta ha variado de manera considerable (ver fig. 2.5). Esta variabilidad puede estar dada por la cambios casuales en la composición granulométrica y sustancial en los diferentes bloques del yacimiento, que se puede acentuar en la propia medida en que se avance en la explotación minera. El efecto negativo en las fracciones finas en la molienda es archiconocido, sin embargo su separación antes de ella, permite aumentar la capacidad de los molinos.(Coello, Llorente y otros, 2001).

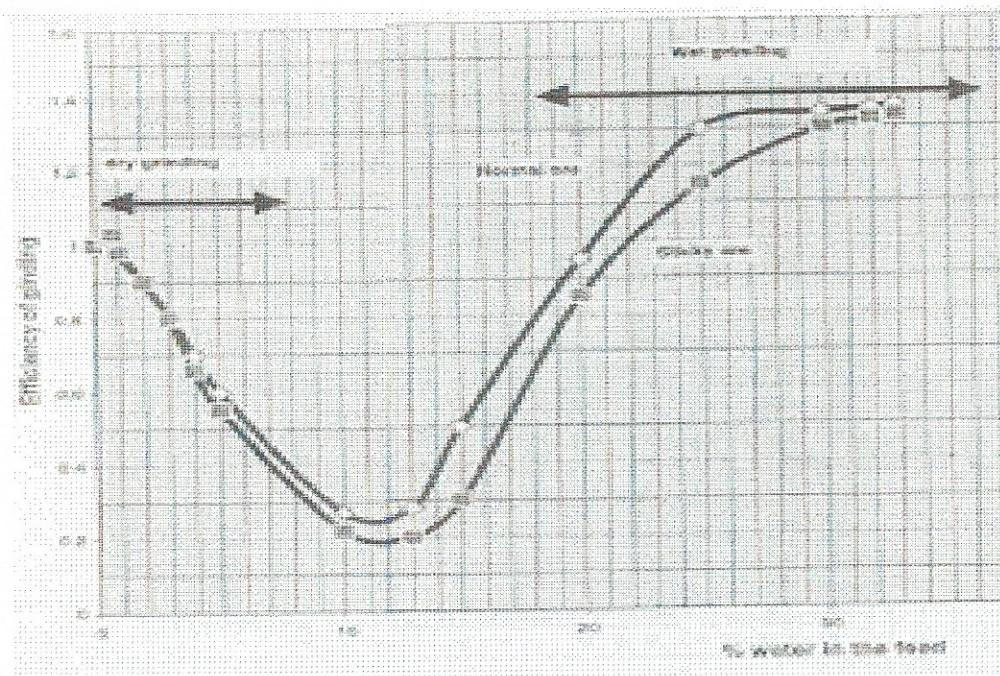


Fig. 2.4 Influencia de la humedad en la eficiencia del molino (Magoteux, 1998).

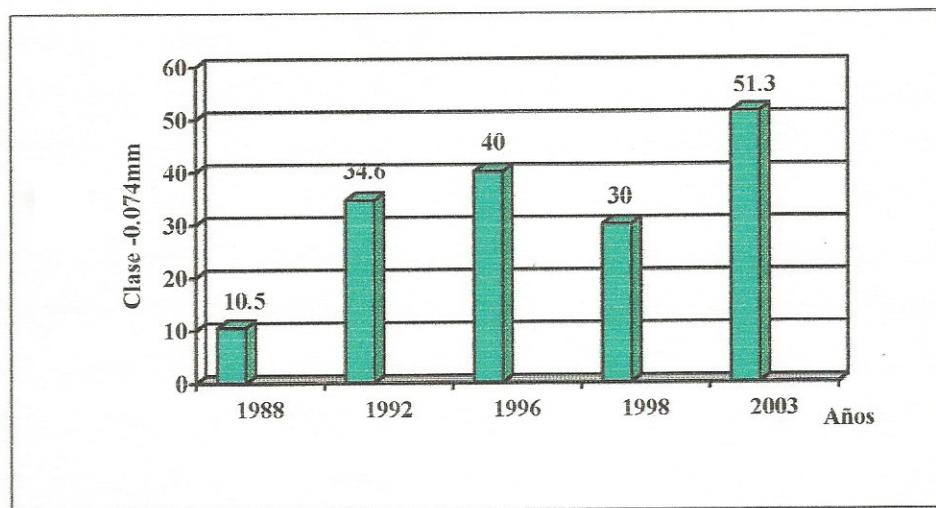


Fig. 2.5 Comportamiento del contenido de la clase-0.074 mm por años.

Como se observa, fig. 2.5 el contenido de la clase -0.074 mm para el año 2003 es superior al resto de los años, sin embargo, los valores máximos y mínimos para este año son superiores a los valores promedios reportados en años anteriores, (ver capítulo I), cuestión que debe llamar la atención de los tecnólogos por su alta incidencia en el proceso, como se señala más arriba. Esto guarda relación con la tendencia a la minería limonítica, presente hoy en la planta de Punta Gorda.

Como se planteó anteriormente, a finales de 1992, se comenzó a utilizar como agente reductor los gases de la combustión del petróleo, por lo que fue necesario alimentarlo en la correa caliente que va a la planta de molienda; esto estuvo motivado por la necesidad de reducción de los costos relacionados con la planta de gas a partir de carbón antracita.

El gas reductor se obtenía en la planta de gas a través de la quema del carbón antracita, su compleja operación, los problemas tecnológicos y los costos asociados a la transportación del carbón antracita fueron las principales causas de los cambios tecnológicos señalados.

Por otra parte, las dificultades económicas y la difícil adquisición del carbón antracita obligaron a la empresa a buscar nuevas alternativas para mantener la fábrica en explotación, con niveles productivos que permitan asegurar el mercado de la producción final.

El trabajo se inició a finales de 1992, cuando se comenzó a añadir petróleo aditivo en las unidades de molienda de la planta, lo que permitió suplir el déficit de carbón antracita, tomando la decisión del desmonte de la planta de gas, lo cual incidió en la disminución del personal de operación y mantenimiento de forma considerable. La planta de gas en explotación, precisaba de atención de más de 50 trabajadores por día, sin tener en cuenta los costos de transportación del carbón desde el puerto hasta la planta.

Este nuevo sistema aunque todavía imperfecto, en cuanto a la dosificación del petróleo al mineral, comienza a traer serias dificultades en los molinos, tupiciones continuas en la zona de descarga del TR-13 al molino ( ver anexo 1.7), embuchamiento de los molinos por una mala dosificación del petróleo y un deficiente mezclado. Todo esto influye de forma negativa en el rendimiento del molino (productividad), dificultades de

transportación por las bombas de transporte neumático y al almacenaje en tolvas de producto final y silos.

Por las consecuencias anteriores, se toma la decisión de trasladar el petróleo a los TR-11 y 11<sup>a</sup> (correa caliente). El control se realiza a través del pesaje del mineral alimentado a los molinos (ver anexo 1.3). La adición de petróleo en este transportador por un mal mezclado del petróleo con el mineral, se crea una condición insegura para la operación debido a la gran acumulación de mineral con petróleo y su complejidad para la limpieza, esto ocasionó averías en el sistema de los rodillos del transportador y disminución del tiempo de vida útil de la correa.

Buscando alternativas se decide mantener el control del pesaje en esta área, pero pasar la adición del petróleo al área de la cola TR – 12 y 12<sup>a</sup> y se fabricó un mezclador para garantizar el mezclado mineral – petróleo (ver anexo 1.4 y 1.5).

El petróleo adictivo en la planta, actualmente provoca incrustaciones en las tolvas de producto grueso de tal magnitud que disminuyen su capacidad en más de un 50 %, constantes tupiciones en la descarga de esta a los alimentadores de disco (ver anexo 1.5), en la zona del separador y ciclones se crean incrustaciones de mineral con petróleo con espesor (0,5 – 1 m), las toberas de los ciclones se tupen parcial y en ocasiones totales, los diámetros de la batería de los ciclones disminuyen su área de trabajo (ver anexo 1.8 – 1.14). Todo esto provoca un efecto negativo en eficiencia del molino (eficiencia de la clasificación y colección del producto terminado, este último incrementa un mayor contenido de la clase (-0,0074 mm) en la carga circulante, cambios en el régimen aerodinámico y una remolienda.

Para atenuar estos aspectos negativos y de gran afectación a la productividad del molino y la calidad del producto terminado, la planta ha establecido un círculo de limpieza cada tres meses. Es bueno destacar que para garantizar esta limpieza hay que afectar la producción de la planta y para limpiar la tolva del producto grueso del molino 204 hay que parar la planta por un tiempo (4 – 6 h). La limpieza de una línea de molienda afecta la producción de un secadero por más de 32 h.

Esto representa una afectación de la producción de más de 82 mil t de mineral año y más de 8150 usd/año por concepto de preparación de la operación del secadero.

## **CONCLUSIONES PARCIALES.**

- Las limitaciones en cuanto a la productividad de los molinos se relacionan principalmente con el alto contenido de la clase -200 mesh en la alimentación de los molinos y la humedad del mineral en la cabeza del molino.

**INFLUENCIA DEL PETRÓLEO ADITIVO EN LOS ÍNDICES DEL  
MOLINO A ESCALA DE LABORATORIO E INDUSTRIAL**

**CAPÍTULO III**

## **CAPÍTULO III. Influencia del petróleo aditivo en los índices del molino a escala de laboratorio e industrial.**

### **INTRODUCCIÓN**

Como se ha demostrado en el capítulo anterior, las limitaciones incremento de la productividad de los molinos se relacionan fundamentalmente con la adición de petróleo y alto contenido de la clase – 200 mesh en la alimentación del molino.

El efecto del petróleo aditivo no solo es consecuencia de su propia influencia, sino que se combina con el problema que envuelve la variabilidad de la humedad, a causa de imperfecciones en el sistema control de la adición del petróleo, el incremento de la humedad se registra como un incremento de productividad en la romana y por ende un aumento de por ciento de petróleo aditivo en la misma proporción.

La clase –200 mesh no solo influye en la molienda, como ya se ha señalado, sino que provoca variaciones en la humedad del mineral, con sus efectos y consecuencias subsiguientes.

En los momentos actuales en el efecto de la adición de petróleo en la planta, se combinan dos elementos que influyen negativamente en la productividad del molino (petróleo y humedad), debido a que el petróleo está fijo hasta un valor de 3,8 a 4 % para valores fijos de 4,5 % de humedad, como se puede observar durante estos 9 meses el comportamiento de la humedad es superior a lo planificado, es decir siempre se adiciona más petróleo que el porcentaje establecido. Esto es sin tener en cuenta los casos de incremento de la humedad (por encima de 5 %) por problemas operacionales o cambios bruscos en la característica de la materia prima, como sucede frecuentemente.

La alimentación directa sin una previa homogeneización, y la alimentación de mineral limonítico, trae consigo un deficiente secado al formarse perles en el interior del secadero de manera que, manteniendo los parámetros operacionales en norma, la humedad del mineral alcanza valores superiores a (4,5 %). En este caso estamos en presencia de la influencia negativa combinada humedad – petróleo, caso muy frecuente en los meses analizados. El principal reto es estabilizar la relación serpentina – limonita para lograr una calidad en el secado y la productividad de los molinos.

### **3.1. Influencia del petróleo aditivo en la calidad del producto molido.**

#### **3.1.1 Metodología del trabajo.**

Las pruebas se realizaron en un molino de bola DxL 0.495 x 0.245 m con un volumen de 0.073 m<sup>3</sup> con mineral suministrado de la correa caliente de la planta de molienda reducido hasta 6.3 mm. El mineral fue sometido a una cuidadosa homogeneización y cuarteo. La masa mínima de la muestra se calculó por la fórmula

$Q_{\min} = 0.02 \cdot d^2 + 0.5 \cdot d$ , kg . La molienda se realizó durante 15 minutos variando la adición de petróleo de 0-8 % en base seca. La carga de bolas se mantuvo constante. Se evaluó la influencia del petróleo aditivo en las clases de +100,+200 y -200 mesh del producto molido y el por ciento de adhesión de mineral a las bolas y a las paredes del molino. Las variables se correlacionaron con ayuda del Excel.

#### **3.1.2 Análisis y discusión de los resultados.**

La influencia del petróleo aditivo en la clase +100 mesh, aparece en la figura 3.1

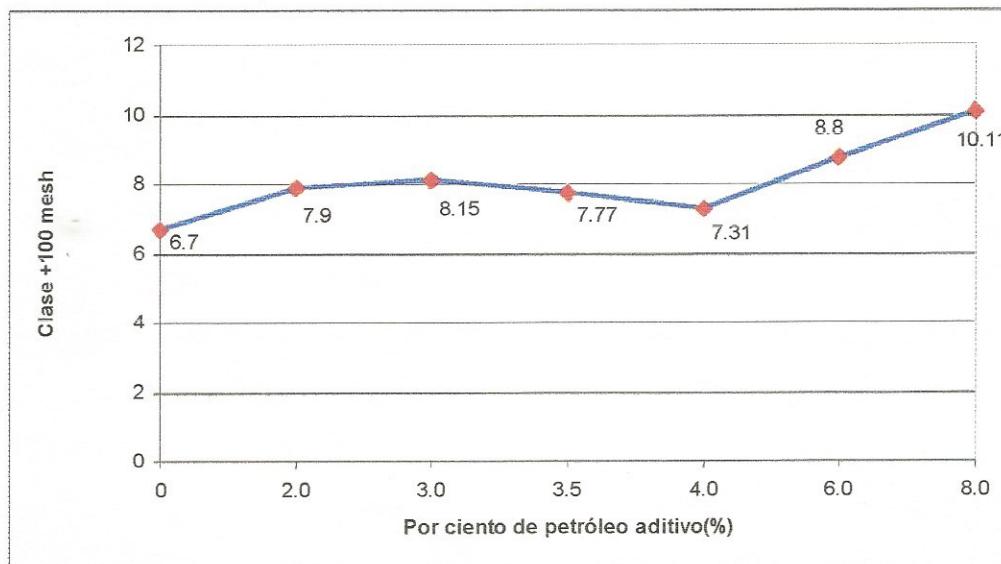


Fig. 3.1 Influencia del petróleo aditivo en la clase +100 mesh.

A juzgar por los resultados el incremento del por ciento de adición de petróleo, aumenta el contenido de la clase +100 mesh hasta valores cercano a 11%. La diferencia es prácticamente lineal. El coeficiente de correlación es de 0.90.

En el gráfico 3.2 se observa la influencia del petróleo aditivo en el contenido de la clase -200 mesh.

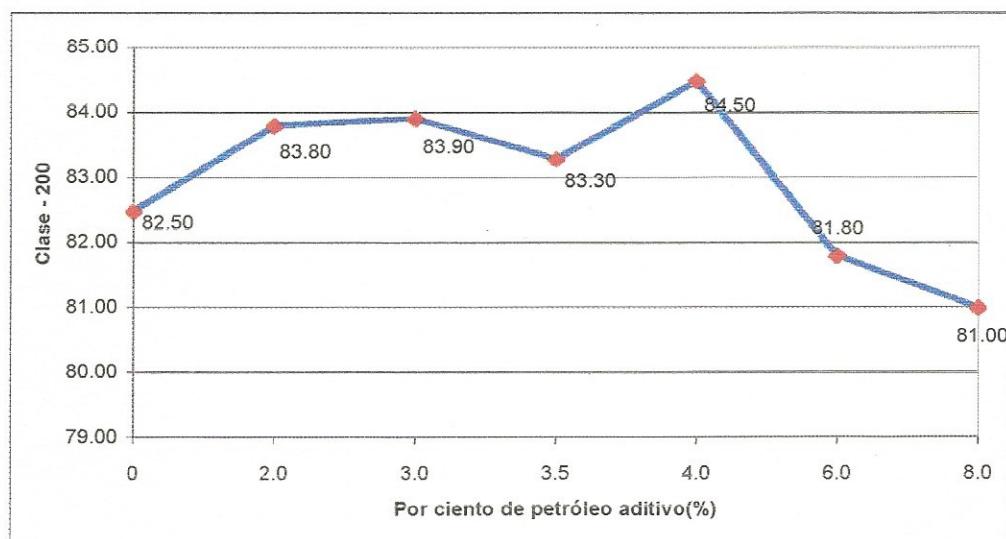


Fig. 3.2 Influencia del petróleo aditivo en la clase -200 mesh del producto molido.

El comportamiento de la clase -200 mesh en el producto molido(ver fig 3.2) es diferente al de la clase +100 mesh. Los resultados indican que el contenido de esta clase tiene un máximo en 4% de adición de petróleo y luego comienza a disminuir hasta valores inferiores a los ensayos sin la adición de petróleo al molino.

En el gráfico 3.3 se observa la influencia del petróleo aditivo en el material adherido a las bolas.

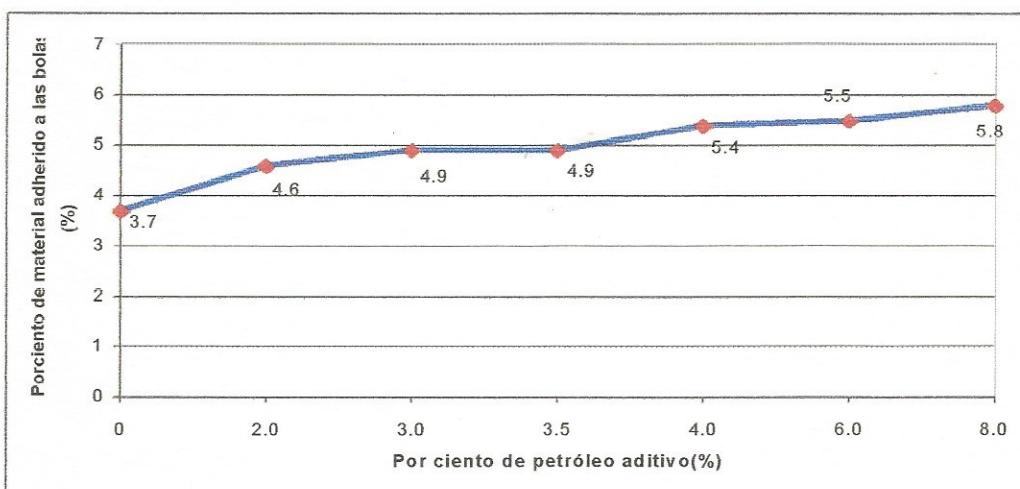


Fig 3.3 Influencia del petróleo aditivo en el material adherido a las bolas.

Como se muestra en la fig 3.3, la adición del petróleo aditivo provoca la adhesión de mineral a las bolas con una dependencia lineal positiva ( $r=0.94$ ). Efecto similar se observa en las paredes del molino (figura 3.4) cuyo coeficiente de correlación es de 0.92. En este caso el efecto del adición de petróleo es mayor a partir de 4 % de adición. Este elemento muestra el efecto negativo de la adición de petróleo en la alimentación del molino efecto que puede incrementarse al aumentar la humedad del mineral, como se señaló anteriormente.

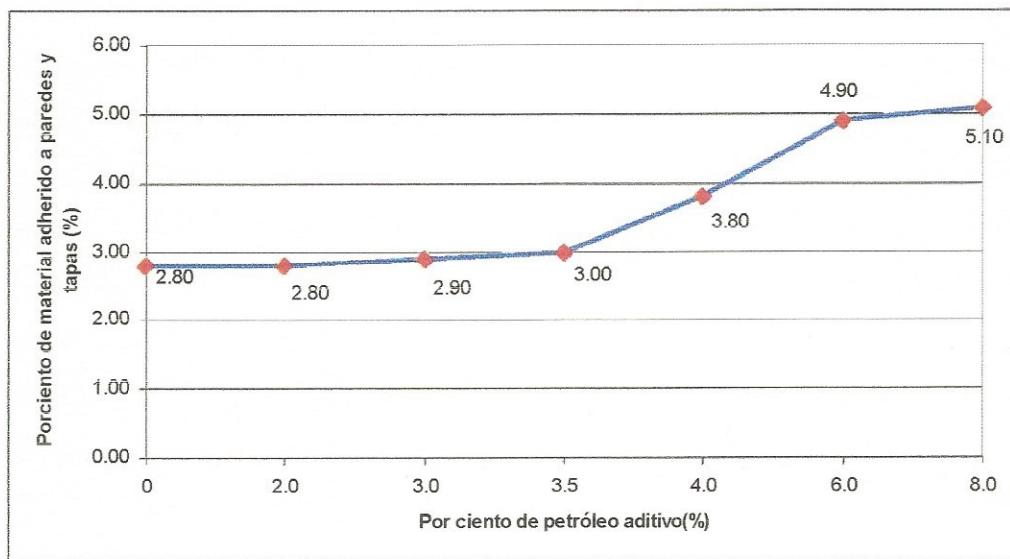


Fig 3.4 Influencia del petróleo aditivo en el material adherido a las paredes y tapas.

### 3.3. Evaluación industrial del efecto del petróleo aditivo en el trabajo de los molinos.

#### 3.3.1. Metodología de trabajo.

Se realizaron corridas de 24 horas con dos regímenes tecnológicos: con petróleo y sin petróleo, cumpliendo el programa organizado por la planta y el Consejo Técnico de la Empresa. El % de petróleo aditivo se fijó en 3%, garantizando la humedad en los niveles de 4-4.5%. Se tomaron muestras cada 15 minutos para la determinación de la humedad antes del molino, formando una muestra compósito cada 4 horas. Las muestras para la determinación de la composición granulométrica en la alimentación del molino se tomaron en igual intervalo de tiempo formando un compósito cada 6 horas. Las pruebas se realizaron en el molino ML-2. La productividad se medio con ayuda de la pesa en las correas del transportador TR.- 3.2. Se realizaron mediciones de la potencia en el molino. Los resultados fueron tratados estadísticamente con ayuda del Excel.

### 3.3.2 Análisis y discusión de los resultados.

En la figura 3.5 se muestra una data cronológica del comportamiento de la productividad promedio de los molinos desde 1992 (sin adición de petróleo) hasta octubre de 2003. Los resultados muestran una disminución de la productividad de los molinos en el periodo evaluado. A nuestro juicio, la reducción de la productividad guarda relación en primer término con el efecto que provoca la adición del petróleo propiamente en el molino. Su efecto acumulativo, producto de las condiciones, tupiciones, disminución de la eficiencia del separador de aire y de todo el sistema de transporte neumático. La desviación promedio de la productividad con respecto al año 1992, es de 22,4 t/h, que representa en el año cerca de 200 000 t.

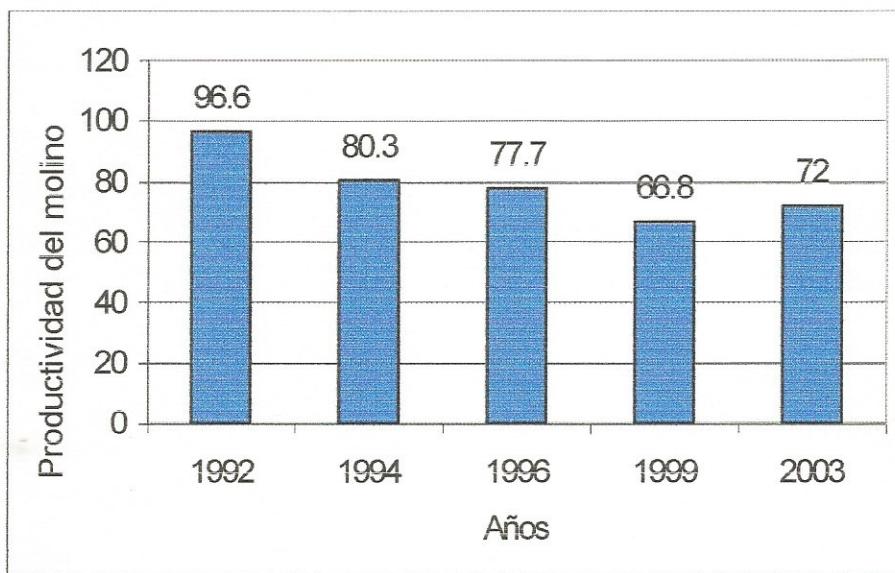


Figura 3.5. Influencia del petróleo en la productividad de los molinos.

A juzgar por el comportamiento de la productividad con la adición y sin la adición de petróleo (fig. 3.6 y 3.7) los resultados mostrados son diferentes. El gráfico que muestra el comportamiento de la productividad con la adición de petróleo (fig 3.6) refleja un

comportamiento relativamente homogéneo alcanzándose valores de productividad de 85-90 t/h. La adición de petróleo aditivo en el comportamiento de la productividad muestra un cuadro diferente. Este caso, la gama de productividad del molino se torna más heterogénea, con valores de productividad promedio más bajo que sin la adición de petróleo. (Fig 3.6). Prácticamente la distribución es bimodal.

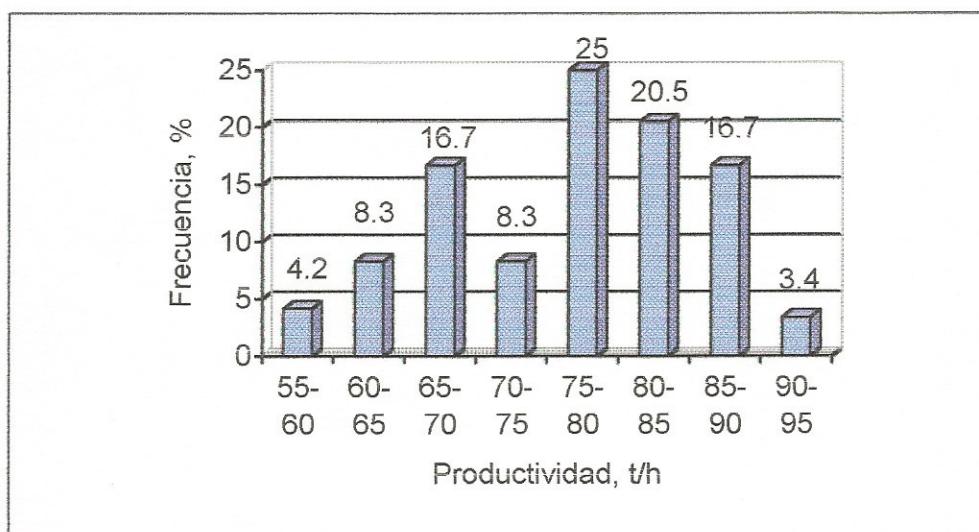


Figura 3.6. Comportamiento de la productividad de los molinos con adición de petróleo.

La frecuencia de productividades mostradas en la figura 3.6, expresa un mayor grado de variabilidad que en la fig 3.5. Estos elementos se corroboran en la tabla 3.1 donde se exponen los resultados del tratamiento estadístico, el coeficiente de variación es mayor para la prueba con la adición de petróleo, lo que es reflejo de una mayor heterogeneidad de productividad. El valor del criterio de Student calculado (29.7) es mayor que el criterio de Student de la tabla (2.06). Esto indica que hay diferencias significativas en las medias de las dos pruebas realizadas, permitiendo establecer que la adición de petróleo en la limitación del molino se reduce en aproximadamente 12 t/h, representa una reducción a nivel de planta de 48 t/h (más de 420 000 t/año).

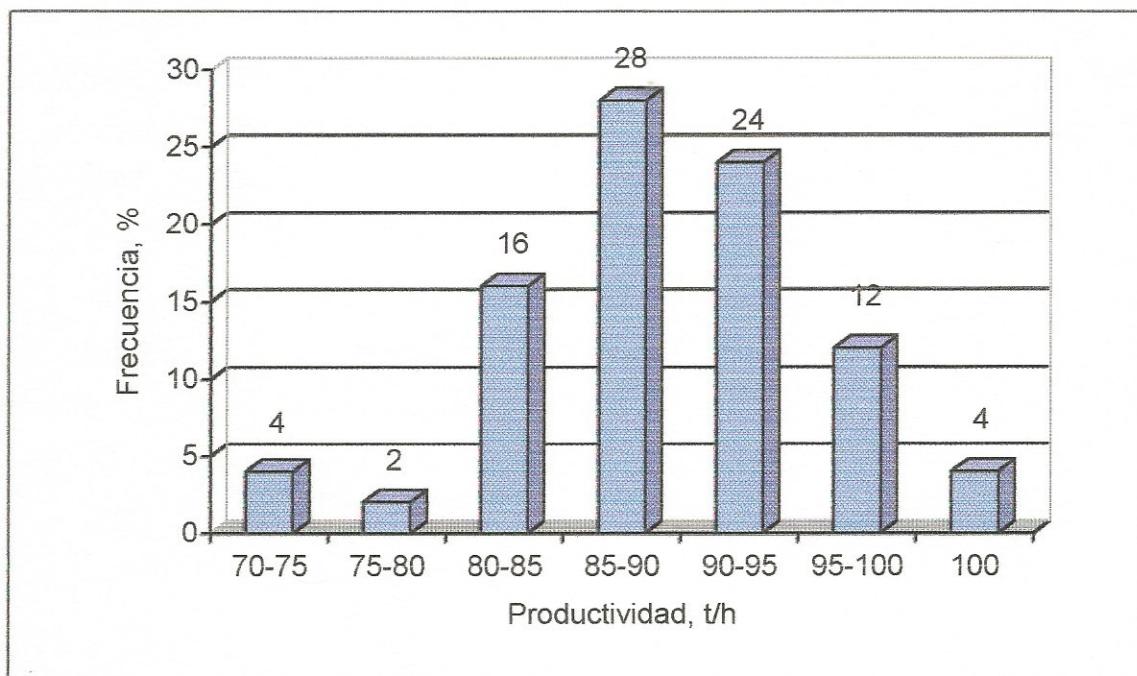


Fig. 3.7. Comportamiento de la productividad de los molinos sin adición de petróleo.

tabla No.3.1

Análisis estadístico de los resultados de la prueba.

Variables estadísticas	Productividad del molino, t/h	
	S/Petróleo	C/Petróleo
Promedio, t/h	87.8	75.9
Desv. Estándar, t/h	7.49	8.77
Coef. Var, %	8.53	11.6
T-Student (Calculado y tabulado)	29.7	2.06

tabla No.3.2

Comportamiento energético de las pruebas con y sin petróleo.

Estadística	Consumo específico de energía, kWh/t	
	S/Petróleo	C/Petróleo
Promedio, kWh/t	10.25	16.51
Desv. Estándar, kWh/t	0.80	8.18
Coef. Var, %	7.77	49.59

De acuerdo a los valores de la tabla 3.2, el consumo específico para el caso de la prueba adicionando petróleo es superior en más de 1,5 veces (aproximadamente) que el régimen tecnológico sin petróleo siendo la variabilidad para la primera muy superior (coeficiente de variación 49,69 %, ubicándose en la clasificación por este coeficiente de muy heterogénea).

Finalmente se puede señalar que la adición de petróleo implica:

- ◆ Disminución de la productividad de los molinos.
- ◆ Aumenta la variabilidad de la productividad.
- ◆ Aumenta el consumo de energía.

## **CONCLUSIONES PARCIALES.**

- Para una adición superior a ( $>4\%$ ) de petróleo la clase (+ 100 mesh) aumenta considerablemente lo que influye de forma negativa.
- A partir de ( $> 4\%$ ), o la tendencia se orienta a una mayor adhesión cierta cantidad de mineral a toda superficie del molino que se encuentra en contacto con este durante la molienda, lo que puede incidir directamente en la reducción del rendimiento del molino, sobre todo si el material a moler posee humedad relativamente alta por diversos motivos como suele suceder en la práctica industrial.
- El petróleo aditivo reduce la productividad a más de 12 t/h.

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA EL INCREMENTO DE LA  
PRODUCTIVIDAD POR CONCEPTO DE RECUPERACIÓN DE LA  
CLASE – 0.74 mm EN LA ALIMENTACIÓN DEL MOLINO.**

**CAPÍTULO IV**

## **CAPÍTULO IV. Propuesta tecnológica para el incremento de la productividad por concepto de recuperación de la clase – 0.074 mm en la alimentación del molino.**

### **INTRODUCCIÓN**

La influencia de las fracciones finas (-0.074 mm) en la alimentación del molino es bien conocida; su alimentación al molino implica, además el fenómeno de la remolienda y su consecuente consumo energético, la disminución en la energía de rompimiento de la bola por el efecto de amortiguación en el “(colchón)” de partículas finas, hecho definidos por Coello (1993<sup>a</sup>). La recuperación de estas fracciones antes de la molienda permite el incremento de la productividad del molino en valores cercanos este contenido de la clase preparada en la alimentación.

#### **4.1. Descripción del flujo del esquema propuesto.**

El mineral secado hasta 4.5% de humedad es transportado por el TR-11, 11a, 12 y 12<sup>a</sup>, al área de molienda. El transportador 12 no será modificado y mantendrá el mismo flujo tecnológico de la planta, alimentando las tolvas de los 4 molinos, ML- 201 al ML-204 en caso necesario. El TR- 12<sup>a</sup> se corta para alimentar las cribas 1 y 2. el mineral a la criba 1 se descarga a través de un machete. El nuevo transportador de banda de 50 T/hora transporta en mineral retenido en las cribas (>3 mm) es descargado en dos tolvas y alimentado a los separadores a través de dos alimentadores de estrella. El separador SEPMASTER clasifica el mineral en dos productos. El fino (-.074mm) es descargado por la zona intermedia y transportado por la misma aspiración del ventilador de recirculación 1 y 2, que permitirá utilizar los mismos ciclones de dos molinos que descargan a las tolvas de producto final y a los electrofiltros. El aire de recirculación se interconectará a la inyección de aire del separador para garantizar la clasificación, debido a que cumple con las exigencias tecnológicas de este equipo. El producto grueso se descarga por la zona inferior y será transportado por los transportadores tubulares a las tolvas de producto grueso de los molinos 3 y 4. en las interconexiones utilizadas se propone el montaje del damper para tener una mayor flexibilidad operacional (by-pass) en caso de las reparaciones de los equipos propuestos, que permite operar normal con los 4 molinos sin tener grandes afectaciones en la producción.(ver Fig1.1 y Fig1.2 en al apéndice)

#### **4.2. Balance material.**

El balance de materiales partiendo de las siguientes premisas:

- Se tomaron los resultados de la clase -200 mesh de la tabla No. 1.1

Contenido de la clase -200 mesh

Valor máximo: 60%

Valor mínimo: 43%

Tonelada procesada por secaderos: 570 t/h

Humedad: 4.5%

Por ciento de arrastre de los secaderos para los electrofiltros: 36%

Se considera el 80% de la clase -3 mm

Eficiencia del equipamiento

Electrofiltro: 99.96%

Ciclones: 70%

Separador del molino: 80%

Separador sepmaster 90 %

Criba: 65%

Según el esquema del flujo tecnológico el cálculo del balance material se expresa como:

$$Q_1 = 570 \text{ t/h}; Q_2 = Q_1 * 0.36; Q_3 = Q_1 - Q_2; Q_4 = Q_2 * 0.04 / 100; Q_5 = Q_2 - Q_4$$

$$Q_6 = Q_3 * 0.2 / 100; Q_7 = Q_6 * 0.9996; Q_8 = Q_6 - Q_7; Q_9 = Q_3 - Q_6; Q_{10} = Q_9 * B_9^{-3} * E_9^{-3}$$

$$Q_{11} = Q_9 - Q_{10}; Q_{13} = Q_{11}^{-0.074} * E_{11}; Q_{12} = Q_{11} - Q_{13}; Q_{14} = Q_{12} + Q_{10}.$$

## Cálculo de la carga circulante de un molino en un ciclo cerrado.

La masa del producto 15 se determina partiendo de la carga circulante óptima, con la que son mínimos los gastos para la molienda. Durante la elaboración del proyecto designamos la carga, que es 1.56. este valor lo comprobamos partiendo de la condición de que según la alimentación total, la carga específica de los molinos no supere:

$$Q_{15}/V < 12 \text{ t/m}^3\text{h} \quad (6)$$

Donde V es el volumen del molino,  $\text{m}^3$

$$301.127/(1.6)^2 * 3.14 * 5.7 = 6.57 \text{ t/m}^3\text{h.}$$

Ya que  $6.57 < 12$  dejamos la carga circulante en 1.56

$$Q_{15} = Q_{16} = 301.127 \text{ t/h}; Q_{18} = Q_{16} * 0.8 * 0.08; Q_{17} = Q_{16} - Q_{18}; Q_{19} = 0.7 * Q_{18}; Q_{20} = Q_{18} - Q_{19}$$

$$Q_{21} = Q_{20} * 0.9996; Q_{22} = Q_{20} - Q_{21}; Q_{23} = Q_{19} + Q_{21}; Q_{24} = Q_{13} + Q_7; Q_{25} = Q_5 + Q_{23}$$

$$Q_{26} = Q_{25} + Q_{24}; Q_{28} = Q_{26} * 0.446/100; Q_{27} = Q_{26} - Q_{28}; Q_{27} = Q_{29}$$

Se muestra en la tabla 3.2 los resultados obtenido en el balance material para los contenidos de la clase – 0.074 mm con valor de 60% y el contenido de la clase – 3 mm de un 20%.

**tabla No 3.1**

Resultados del balance de materiales.

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11
570	205.2	364.8	0.0821	205.12	0.73	0.73	0.0003	364.07	47.33	316.74
Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17	Q18	Q19	Q20	Q21	Q22
194.16	122.58	241.49	376.73	376.73	135.62	241.11	168.77	72.332	72.3	0.0289
Q23	Q24	Q25	Q26	Q27	Q28	Q29	C			
241.08	123.31	446.19	569.5	566.96	2.54	566.96	1.56			

Se muestra en la tabla 3.1 los resultados obtenido en el balance material para los contenidos de la clase – 0.074 mm con valor de 43% y el contenido de la clase – 3 mm de un 20%.

**Tabla No. 3.2**

Resultados del balance de materiales.

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11
570	205.2	364.8	0.082	205.12	0.73	0.73	0.0003	364.07	47.33	316.74
Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17	Q18	Q19	Q20	Q21	Q22
145.70	171.04	193.03	301.13	301.13	108.41	192.72	134.90	57.82	57.79	0.023
Q23	Q24	Q25	Q26	Q27	Q28	Q29	C			
192.70	171.77	397.82	569.59	567.05	2.54	567.05	1.56			

#### **4.3. Característica técnica de los nuevos equipos y diagrama de aparatos.**

##### **4.3.0. Cálculo de los equipos.**

1. Se calcula el área de la criba.

$$F = Q / q * d * k * l * m * n * o * p \text{ (m}^2\text{)}$$

a= 3 mm

$$F = 364.07 / 7.5 * 1.1 * 1.72 * 0.961 * 1 * 1 * 1 * 1 = 26.69 \text{ m}^2$$

Donde:

q - rendimiento específico por 1 m<sup>2</sup> de superficie del tamiz, m<sup>3</sup>/h (tabla 29)

(6 ) S.E.A.Andreiev.

d - densidad del material, t/m<sup>3</sup>

k, l, m, n, o, p - coeficientes de corrección ( tabla 30 ) ( 6 ). S.E.A.Andreiev.

Proponemos instalar 2 cribas CVR- 2560.

Características técnicas de la criba CVR-2560.

Criba vibratoria de contrapeso:

- Superficie útil de cribado-----15 m<sup>2</sup>
- Motor -----30 CV
- Capacidad-----197 t/h

##### **Ventajas de las cribas vibratorias de contrapeso:**

- Regulación de la amplitud de vibración mediante contrapeso.
- Motor de potencia reducida, arranque directo.
- Inclinación de la criba graduable.
- Tensado transversal de las mallas y fácil recambio de las mismas.
- Funcionamiento suave.
- Comodidad para el diseño de conductos.

Para la separación va 316.74 t/h de mineral, que tiene 190.04 t/h del producto final (60 %). Proponemos instalar un separador de aire de 135 t/h de capacidad en producto final. La cantidad de separadores es:

$$N_s = \frac{Q}{Q_{sep}}$$

donde:

$N_s$ : Número de separadores.

$Q$ : Alimentación.

$Q_{sep}$ : Capacidad del separador.

$$N_s = \frac{190.04}{135} = 1.41 \approx 2 \text{ Separadores}$$

#### Característica técnica:

Tipo-----SEPMASTER SKS-M 1550

Diámetro-----3.75 m

Altura-----6.020 m

Material a clasificar---Cemento, arcilla, oro, productos químicos, materiales abrasivos, minerales, cal, productos alimenticios, arena.

Possible suministrador---KHD Humbolt Wedag AG Wiersbergstr.

En el apéndice Fig.1.2 está representado el separador.

#### Según el balance de materiales la cantidad de molinos necesarios:

$$N_s = \frac{Q}{Q_{Mol}}$$

donde:

$N_s$ : Número de molinos.

$Q$ : Alimentación.

$Q_{Mol}$ : Capacidad del Molino.

$$N_s = \frac{193.03}{120} = 1.61 \approx 2 \text{ Molinos}$$

En vez de 4 líneas trabajarán 2 líneas ( 2 molinos, 2 separadores con baterías de ciclones, 2 ventiladores de recirculación y 2 electrofiltros).

### **Selección de los medios de transportación.**

El producto grueso del separador  $Q_{12}$  del separador regresa a las tolvas de los molinos 3 y 4 por la mediación de los transportadores tubulares.  $Q_{12} = 145.7 \text{ t/h o } 132.45 \text{ m}^3/\text{h}$   
Proponemos instalar 4 transportadores tubulares tipo 200 con  $Q = 45 \text{ m}^3/\text{h}$  c/u ( 2 unidades para cada separador).

$$N_s = \frac{Q}{Q_{Tr}}$$

donde:

$N_s$ : Número de transportadores tubulares.

$Q$ : Alimentación.

$Q_{Tr}$ : Capacidad del transportador tubular.

$$N_s = \frac{132.45}{45} = 2.94 \text{ uno}$$

### **Datos técnicos:**

Capacidad -----  $Q = 45 \text{ m}^3/\text{h}$

Potencia del motor -----  $P = 5.5 \text{ kw}$

revoluciones por minuto -----  $n_2 = 15 \text{ RPM}$

velocidad de movimiento de cadena. ---  $V = 0.321 \text{ m/s}$

número de velocidades -----  $i = 91.81$  ( $i = n_1/n_2$ )

Largo máximo ----- 50 m  
Altura máxima ----- 30 m  
Schrage ( Alemania) ----- Firma

El producto fino  $Q_{13} = 171.04 \text{ t/h}$  es aspirado por los ventiladores de recirculación de los molinos 1 y 2.

El diagrama de aparatos verlos en el apéndice fig.1.2

#### **4.4. Análisis económico.**

Fundamentando este proyecto se presenta un análisis económico, basado en las metodologías tanto para el cálculo de los costos capitales, costos de operación, cálculos del valor actual neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el tiempo de recuperación de la inversión.

Para el cálculo de los costos capitales (CP) se utilizará la metodología utilizada en los países occidentales conocida como "Método de la razón de costo de los componentes de la planta" (Mular Andrew y Bhappu Roshan, 1980).

Esta metodología se basa en el costo de equipamiento básico (CEB).

En base del cálculo del balance de materiales y los equipos seleccionados elaboramos la siguiente tabla 4.4.

Tabla No. 4.4

Costo del equipamiento básico.

No	Denominación EB	Cant.(u)	Precio (u) USD	Precio (T) USD
	Cribas vibrantes	2	100 000.00	200 000.00
2	Separador dinámico	2	350 000.00	700 000.00
3	Transportador tubular (m)	184	5 120.59	942 188.56
4	Alimentador de estrella	2	10 000.00	20 000.00
5	Transportador de correa de 72 m (44 t/h)	1	25 000.00	25 000.00
6	Tolva de 160 t	2	8 000.00	16 000.00
	<b>TOTAL</b>			<b>1 903 188.56</b>

Tabla 4.5

Cálculo de los costos capitales de la inversión propuesta.

Nº	Fórmula	Resultado
A	CEB	1903189.00
B	(0.17-0.25) CEB	323542.13
C	(0.13-0.25) CEB	247414.57
D	(0.07-0.25) CEB	133223.23
E	(0.03-0.12) CEB	57095.67
F	(0.33-0.55) CEB	628052.37
G	(0.07-0.15) CEB	133223.23
H	(0.07-0.15) CEB	133223.23
I	(0.03-0.18) CEB	57095.67
J	(0.30-0.33) CEB	570956.70
K	Costo capital	4187015.80

En la tabla 4.5

A- Costo total de los equipos básicos.(CEB)

B- Costo de instalación

C- Costo de electricidad y materiales

D- Costo de tuberías, materiales y montaje

E- Costo de instrumentación

F- Edificaciones, servicios mecánicos y eléctricos

G- Servicios auxiliares a la planta (agua fresca, etc)

H- Edificaciones auxiliares, incluyendo servicios mecánicos y alumbrado

I- Viales fabriles (caminos,etc)

J- Administración de proyectos, incluyendo la ingeniería y construcción

K- Costos fijos completos

#### 4.5 Cálculos de los costos de explotación.

Tabla 4.6

##### Costos por conceptos de salarios anuales.

DESIGNACIÓN	Nº de trabajadores	Salario anual (USD)	Salario anual Total
Salarios			
Labores de operación	4 operadores de cribas y separador	3840	15360
TOTAL			15360

Tabla 4.7

Producción anual y costos de los salarios por toneladas.

No	Q <sub>a</sub> (t)	Salarios / año ( USD)	Salarios / t
1	49 24800	15360	0.00325

$$Q_a = 570 * 24 * 360 = 49 24800 \text{t/año}$$

##### Suministros para mantenimiento.

Estos representan el 5% de los costos capitales. En el proceso se utiliza la energía eléctrica.

Tabla No. 4.8

Cálculo de los costos de energía.

No	Equipos	Potencia, KW/h	Precio, USD/MW	Costo de energía, USD/t
1	Cribas vibrantes (2*30CV)	44.13	65.00	0.033855
2	Separador (2)	220.00		
3	Transportador tubular	22.00		
4	Alimentador de estrella	10.00		
5	Transportador de correa	60.00		
	Potencia instalada	356.13		

$$CE = 0.8 \cdot \sum_{i=1}^n P_i / Q_a ; \text{ donde:}$$

Ce- Costo de energía

Pi- Potencia instalada

## Costos totales de operación

Tabla No. 4.9

### Cálculo de los costos totales de operación

Designación	Resultado
Salarios	0.00325
Suministros para mantenimientos	24.23
Costo de energía	0.0338
Costos totales de operación (USD/T)	24.267
Costos totales de operación (USD / año)	209666.88

### 4.6 Cálculo del valor actual neto ( VAN )

Para realizar el cálculo del VAN se tomaron en cuenta el valor de dinero en el tiempo, para este caso fue analizado para un período de 3 años y se hizo uso de la siguiente expresión:

$$VAN = C_0 + C_1/(1+k) + C_2/(1+K)^2 + C_n/(1+K)^n ,$$

donde:

$C_0$  - Desembolso inicial de la inversión (USD/año)

$C_n$  - Flujo de fondo

K- Tasa de interés

Se toma K = 12%

El cálculo de la tasa interna de retorno (TIR), plantea:

Si  $K < TIR$ ----- $VAN > 0$ -----proyecto aceptable

Si  $K > TIR$ ----- $VAN < 0$ -----proyecto irrentable

Si el proyecto resulta aceptable, este debe ser mayor o igual a la rentabilidad mínima que exige la empresa.

El cálculo del tiempo de recuperación del proyecto se realiza para  $TIR = VAN$ , cuando este se hace 0. El tiempo de recuperación de la inversión se calculará por la siguiente fórmula:

$$R = C_o / C_n$$

#### 4.7 Cálculo económico del VAN, TIR y R.

Tabla 4.9

No	Años				VAN K=12%(usd)	TIR (%)	R (años)
	0	1	2	3			
1	-4396683	1 701 097 .4	1524183.2	1356034.9	184632.5	14	2.3

$$C_n = 1\ 905\ 229$$

De los resultados del cálculo económico se infiere que el proyecto es rentable, el TIR es mayor que K y el VAN es mayor que cero. La inversión se recupera en unos 2.3 años.

## CONCLUSIONES FINALES

1. Existen elementos suficientes para concluir que aún se poseen potencialidades no explotadas en las instalaciones de molienda que permitirían el aumento de la capacidad instalada sin grandes inversiones.
2. La humedad del mineral de entrada junto a la adición del petróleo limitan la capacidad de los molinos y por lo tanto constituyen un cuello de botella para solucionar las producciones futuras.
3. La adición del petróleo no solo limita la productividad, sino que lateralmente incide de manera substancial en el consumo energético de la instalación y por ende de su economía.
4. La clasificación previa en los molinos permite procesar la misma cantidad del mineral (49 24800 t/año) utilizando solamente dos molinos de los 4 instalados, aumentar la carga circulante hasta 1.56 y disminuir los consumos energéticos. Con esta variante propuesta ahorraremos 1 243.87 kw de potencia instalada que no se va a utilizar, que representa un ahorro de 859 762.94 USD/año. Según el análisis económico, el proyecto es aceptable ( $VAN = 184\ 632.5$  y  $TIR = 14\ %$ ) y la nueva inversión se recuperará en 2.3 años.

## **RECOMENDACIONES**

1. Disminuir al menos en 1% la humedad al mineral alimentado al molino.
2. Eliminar el punto de adición del petróleo de la alimentación de los molinos.
3. Incluir la clasificación preliminar para separar el contenido de la clase -0.074 mm antes de la molienda.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Andreiev, Perov, Zverievich, Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Niedra. Moscú.1980.
2. Bustamante C., .Estudio de la capacidad instalada de los molinos, Moa,1989.
3. 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.
4. Coello A. V., Tijonov. O., Regularidad en la molienda de los minerales lateríticos. Rev. Minería y Geología. Vol XIII.N°3.1996.
5. Coello A. V. Sobershenstobovanie technologii izmilchenia lateritovij rud na zabode Punta Gorda. Tesis de doctorado. IMS. Saint Petersburg. 1993b
6. Coello A. V., Algunas consideraciones sobre la molienda seca de los minerales lateríticos. Rev. Minería y Geología, N°1.1993.
7. Coello A. V., Investigaciones industriales de la molienda seca del mineral laterítico. ECECG. Moa.1992
8. Coello A. V., Llorente L, García A., Optimización de la molienda seca de los minerales lateríticos. Informe II.Fac.Metalúrgia.ISMM.Moa.Nov.1992.
9. Coello A. V., Llorente L., Garcia; Laborde R. Molienda del mineral laterítico. Retos y perspectivas. Jornada Científica del CIL. Junio.2001.
10. 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.
11. Coello A. V., Potencialidades en la aplicación de los principios de sostenibilidad energética en la preparación mecánica. III Jornadas Iberoamericanas de materiales de la construcción. San Juan. Argentina.25-29 de septiembre.2003.ISBN-84-96023-13-3.
12. Coello. A. V., Consideraciones de la molienda del mineral laterítico. Rev. Minería y Geología. Vol. 1.No1.1993a.
13. Colectivo de autores. Pruebas tecnológicas con el mineral del yacimiento Punta Gorda.Tomo I. Sección de Secado y Molienda, Habana,1971.
14. Fernández E., Material docente para la Maestría de Beneficio de Minerales ISMM. 1998.

15. Lago P. L., Análisis de los resultados de pruebas efectuadas en los molinos. Moa. 1989.
16. Lago P. L., Estudio del proceso de molienda. Informe técnico de investigación. Moa, 1989.
17. Manual de Operaciones Taller de Preparación de Minerales. Palacio de las Convenciones. La Habana-Moa 1985.
18. Razumov, Perov. Proyectos de fábricas de preparación de minerales. Ed. Mir, Moscú. 1980.
19. Taggart A., Handbook of Mineral Dressing. Willey. Handbook Series, 1927.
20. Informe de Magoteux. 1998.

## **ANEXOS**

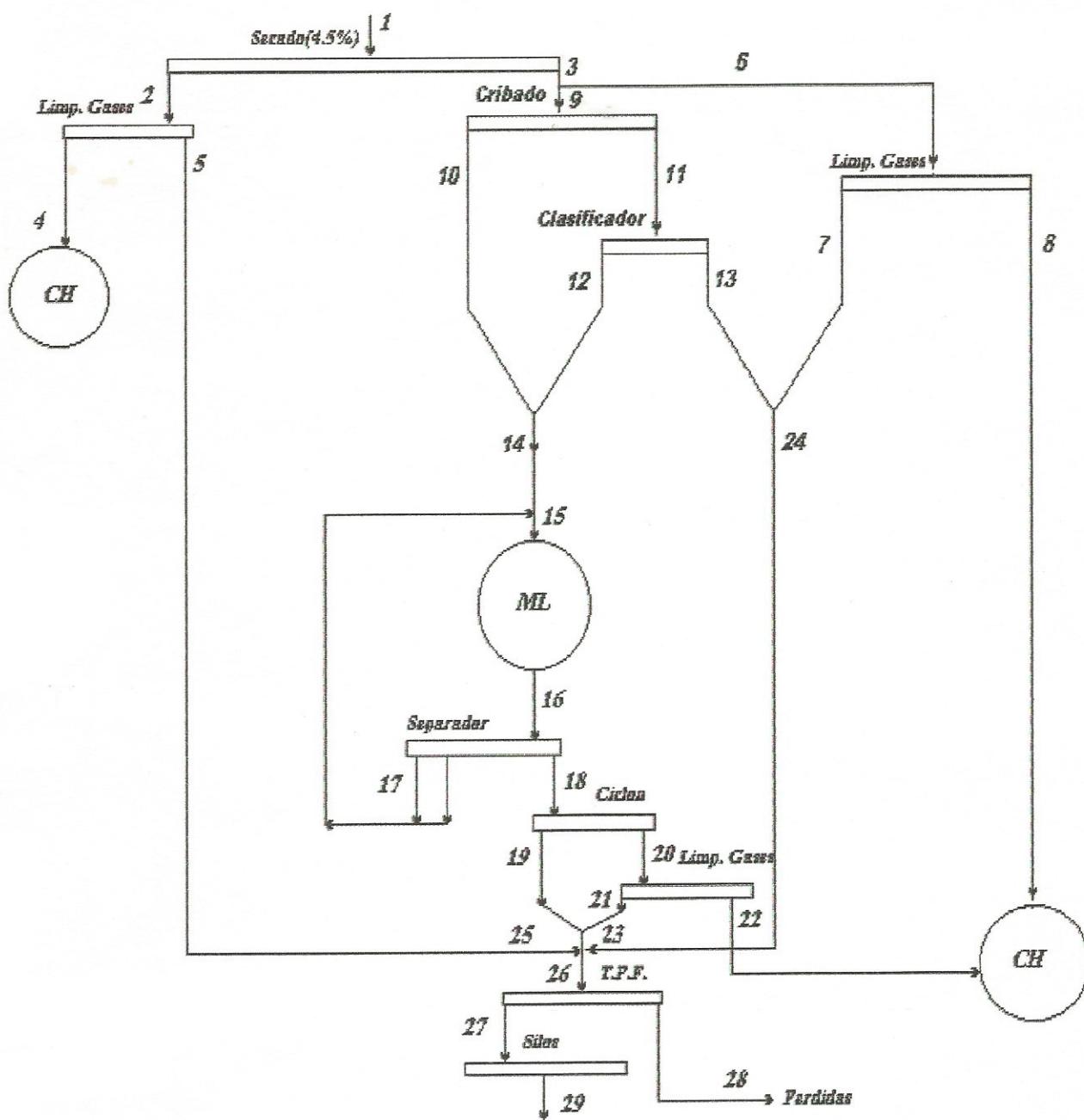


Fig.1.1 Esquema de flujo tecnológico del balance de material.

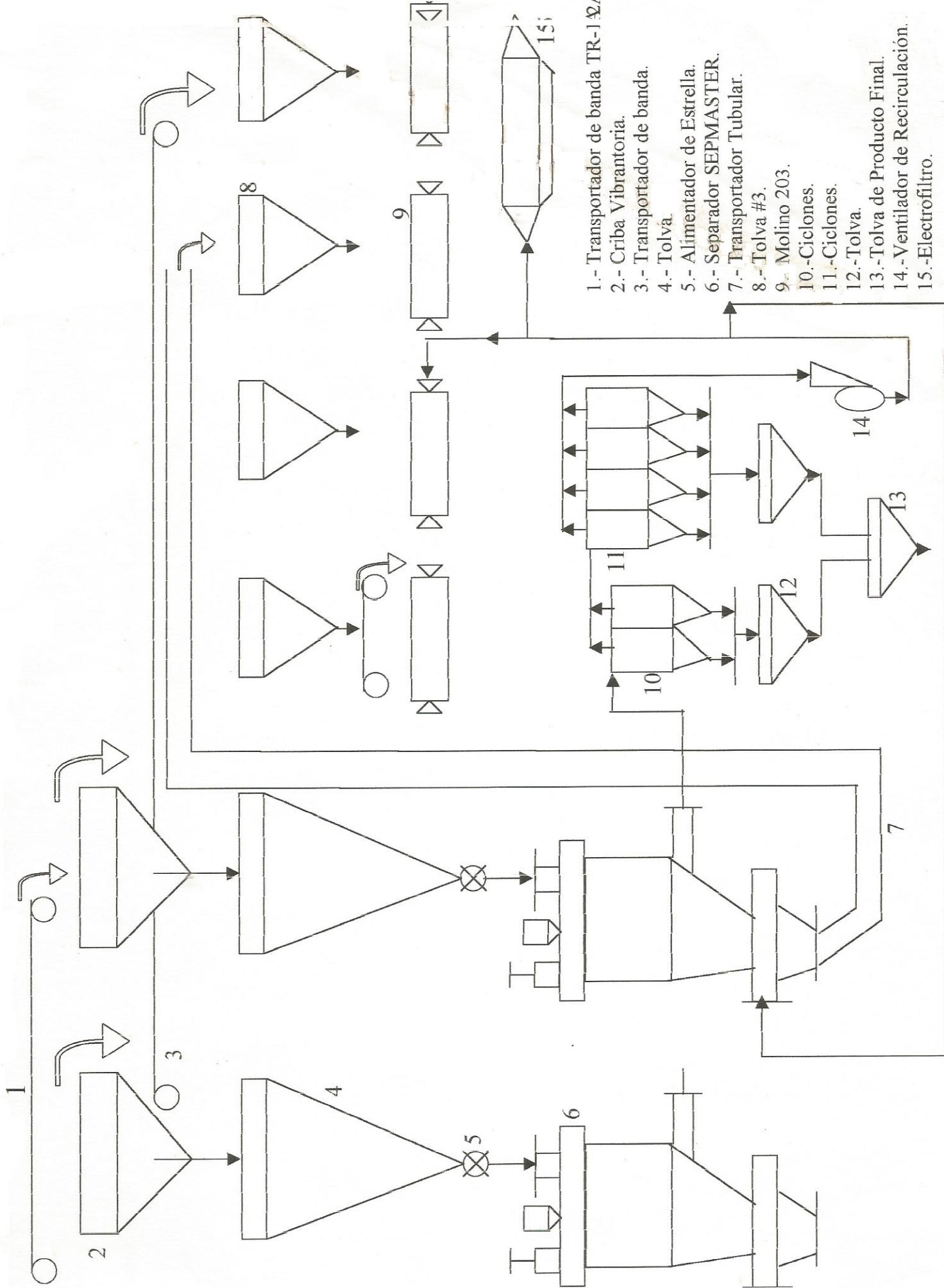


Fig. 1.2. Esquema propuesto.

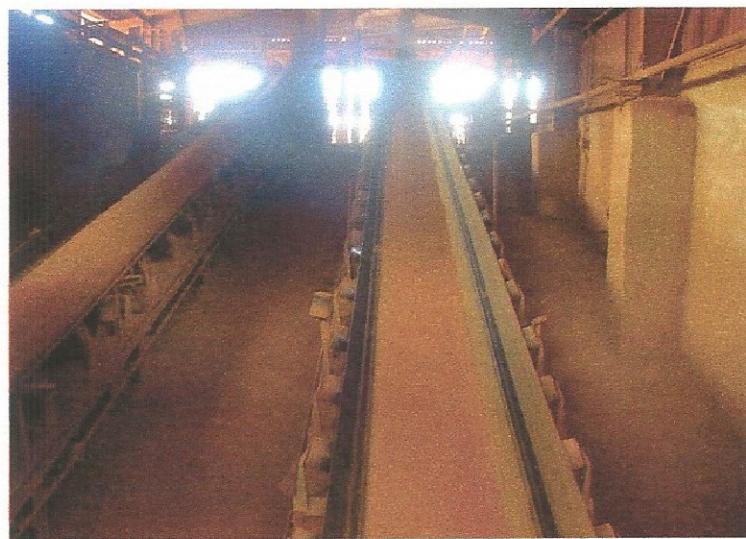


Foto.1.3 Transportador 11 se pesa el mineral de la descarga de los secaderos.



Foto1.4 Transportador 12 se adiciona el petróleo aditivo ante de mezclarse.

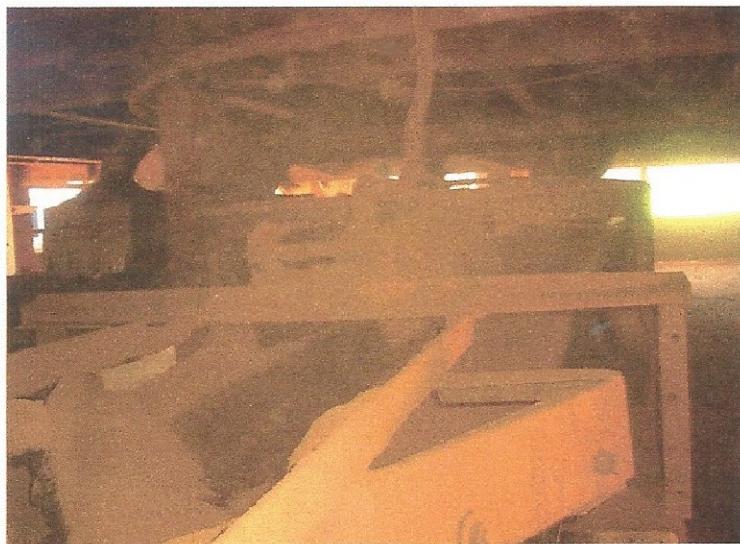


Foto1.5 Transportador 12 se adiciona el petróleo aditivo y se mezcla.

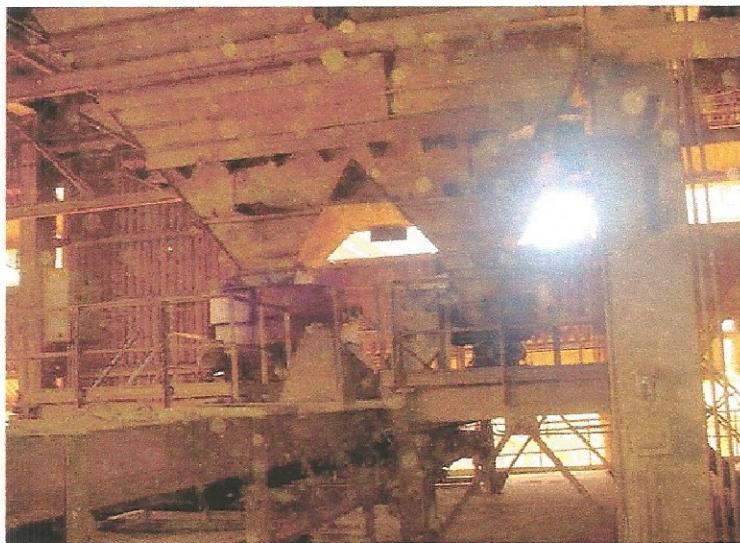


Foto.1.6 Tolvas de producto grueso y alimentador de disco.

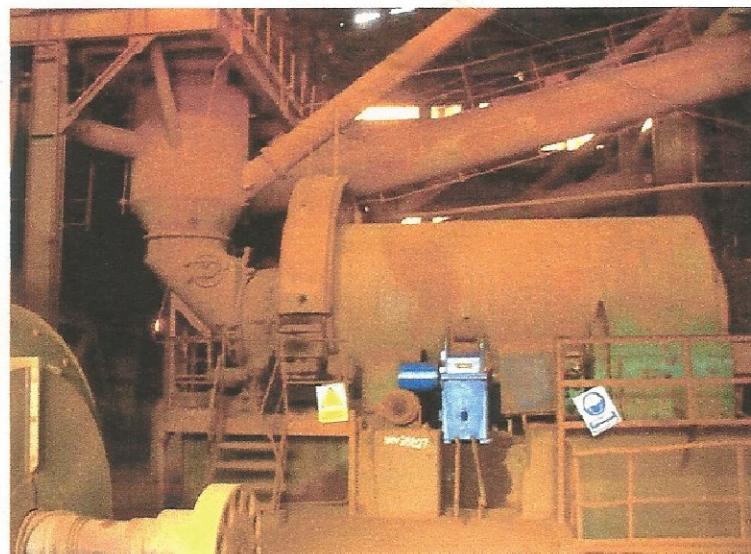


Fig.1.7 Molino de bola.

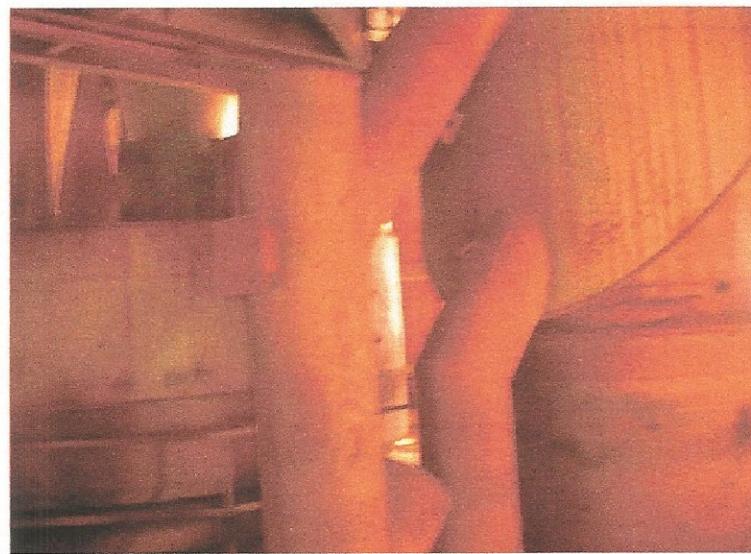


Foto.1.8 Descarga de los conos interiores y exteriores del separador neumático.

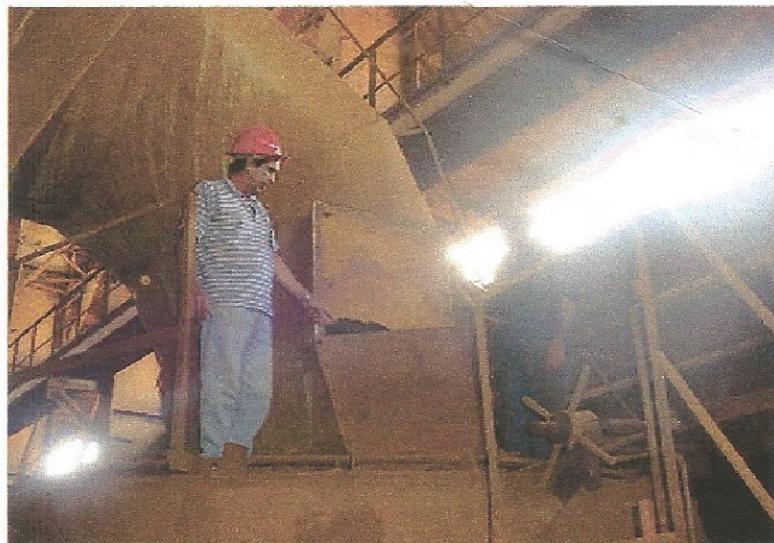


Foto1.9 Zona de descarga del separador.

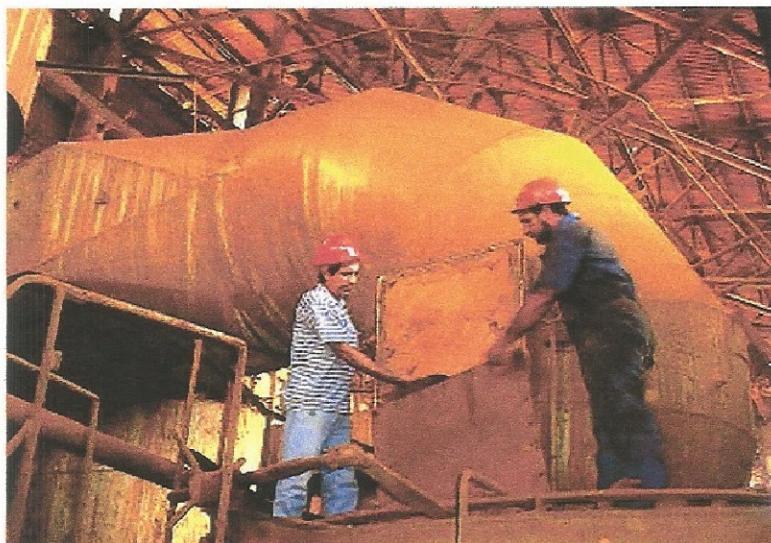


Foto.1.10 Zona de descarga del separador a los ciclones.

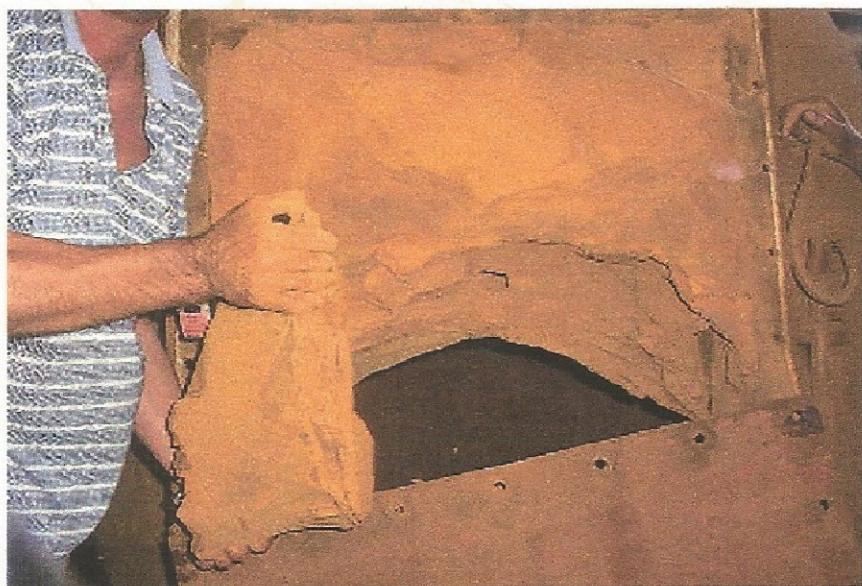


Foto.1.11 Incrustaciones en el área del separador neumático.



Foto.1.12 Incrustaciones en el interior del separador neumático.