

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DEL FLUJOGRAMA DE PROCESAMIENTO DE MINERAL DE HIERRO PARA LA OBTENCIÓN DE UN DENSIFICANTE PARA LA INDUSTRIA PETROLERA (ORIMATITA).

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar por el Título de
Ingeniero Metalúrgico
Por el Br.
Olmedo B. Maryangel M.
C.I. 14.730.248

Caracas, noviembre de 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DEL FLUJOGRAMA DE PROCESAMIENTO DE MINERAL DE HIERRO PARA LA OBTENCIÓN DE UN DENSIFICANTE PARA LA INDUSTRIA PETROLERA (ORIMATITA).

Tutor Académico: Prof. Di Yorio, Carlo

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar por el Título de
Ingeniero Metalúrgico
Por el Br.
Olmedo B. Maryangel M.
C.I. 14.730.248

Caracas, octubre de 2005

DEDICATORIA

i

*A mis queridos padres, Rafael y Brucelas,
quienes con mucho amor y dedicación hicieron de mi, una persona exitosa y capaz de
afrontar los difíciles retos que impone la vida.*

*A mi querida abuela Julia Rosa por su gran sabiduría y
valiosos consejos.*

*A todos mis primos y tíos que me brindaron su apoyo y
siempre creyeron en mi.*

AGRADECIMIENTO

ii

*A Dios todo poderoso, a la Virgen de la Caridad y a San Andrés,
por estar siempre presente en mi vida y ayudarme a cumplir este gran reto.*

*A la Ferrominera por permitirme realizar esta
investigación en sus Instalaciones.*

*A mis tutores académicos e industrial: Prof. Di Yorio y
el Ing. Francisco Rondón por guiar mis pasos y hacer
crecer mis conocimientos.*

*A mis incondicionales amigas de la residencia: Daniela, Johanna, Indira A, Indira M,
Akatibu, Martha, Mariana y Rosalin, quienes fueron como unas verdaderas hermanas que
me apoyaron y confiaron en mí.*

A todos mis compañeros de clases con quienes viví momentos increíbles.

*A todos mis compañeros de trabajo de la Planta Piloto quienes de manera desinteresada
compartieron sus conocimientos y sobre todo su amistad.*

*A la Sra. Celia, Yeca y Deivys por acogerme en su hogar con
tanto cariño y hacerme sentir como en casa.*

*A Carlitos Ron por ser tan especial y acompañarme no solo en los momentos felices; sino
también en los momentos duros de mi vida.*

*A todos los que de una u otra forma colaboraron con la
realización de este gran sueño.*

ACTA

Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales, para examinar el Trabajo Especial de Grado titulado:

“DISEÑO DEL FLUJOGRAMA DE PROCESAMIENTO DE MINERAL DE HIERRO PARA LA OBTENCIÓN DE UN DENSIFICANTE PARA LA INDUSTRIA PETROLERA (ORIMATITA).”

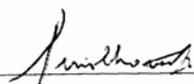
Presentado ante la ilustre **Universidad Central de Venezuela** por el Br. Maryangel Margot Olmedo Boyer, dejan constancia de lo siguiente:

Hemos leído este trabajo y participado en su discusión, encontrando que el mismo es suficiente en contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requerimientos establecidos para optar por el título de Ingeniero Metalúrgico.

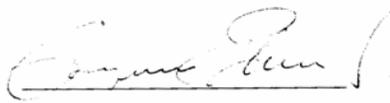
En fe de lo cual se levanta la presente acta en Caracas a los 09 días del mes Noviembre de dos mil cinco.



Prof. Carlo Di Yorio
Tutor



Prof. Luis Chacón
Jurado



Prof. Edwuin Carrasquero
Jurado

Olmedo B., Maryangel M.

DISEÑO DEL FLUJOGRAMA DE PROCESAMIENTO DE MINERAL DE HIERRO PARA LA OBTENCIÓN DE UN DENSIFICANTE PARA LA INDUSTRIA PETROLERA (ORIMATITA).

Tutor Académico: Prof. Carlo Di Yorio, Tutor Industrial: Ing. Francisco Rondón. Trabajo Especial de Grado, Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. 2005.

Palabras claves: **Orimatita, Molienda, D₉₀, Especificaciones del Producto, Flujograma.**

Texto del resumen: La investigación realizada tiene como objetivo primordial diseñar el flujograma de procesamiento del mineral de hierro, a nivel de laboratorio (escala batch; 100-300 Kg/h), para la obtención del densificante: Orimatita (Fe_2O_3) buscando sustituir la de Barita (BaSO_4) como densificante requerido en la Industria Petrolera, dado que la Barita se importa y la Orimatita se obtendría en el país. Ese flujograma, en un futuro podrá operar a nivel de La Planta Piloto de Concentración (5 a 10 t/h) o en La Planta Industrial de Concentración C.V.G Ferrominera Orinoco C.A. Se desarrolla bajo la modalidad de un estudio netamente experimental, en el cual se utiliza el mineral FPF-1 (mezcla de mineral de hierro de alto tenor) como material de alimentación a un molino de bolas. Este material es molido en varios tiempos, hasta determinar el tiempo óptimo de molienda para obtener un producto con una granulometría de 90% pasante (D_{90}) de la malla 400 ($38\mu\text{m}$). Se realizan pruebas en húmedo y en seco, con y sin magnetita (gracias a la utilización de un separador magnético), encontrando que las condiciones más óptimas para producir la Orimatita fueron: moler durante 30 minutos en húmedo y sin magnetita. Luego se realizaron pruebas de decantación y secado para tener un mejor manejo del producto final.

INDICE GENERAL

v

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ACTA	iii
RESUMEN	iv
ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICAS	vii
INDICE DE TABLAS	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I EL PROBLEMA	
1.1 Descripción y Formulación del Problema	3
1.2 Justificación	4
1.3 Limitaciones	4
1.4 Objetivo General	5
1.5 Objetivos Específicos	5
CAPITULO II PLANTA PILOTO DE CONCENTRACIÓN	
2.1 Área de Trituración	6
2.2 Área de Molienda	7
2.3 Área de Concentración	8
2.4 Área Laboratorio	9
2.5 Área de Equipos Auxiliares	9
CAPITULO III MARCO TEÓRICO	
3.1 Uso de Densificantes en la Industria Petrolera	10
3.2 Reducción de Tamaño (Conminución)	16
3.3 Equipos de Clasificación	31
3.4 Equipos de Concentración	33
3.5 Operaciones Complementarias	38
3.6 Antecedentes	43
CAPITULO IV PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	
Introducción	46
4.1 Trituración	49
4.2 Molienda	49
4.3 Clasificación	50
4.4 Separación Magnética	52
4.5 Espesamiento	53
4.6 Filtrado	55
4.7 Secado	55
4.8 Prueba Adicional	55

	Pág.
CAPITULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	
5.1 Molienda tanto en Seco como en Húmedo	57
5.2 Reducción de Tamaño por Pulverización	62
5.3 Separación Magnética	66
5.4 Espesamiento	68
5.5 Secado	71
5.6 Propuestas de Diagramas para la Obtención de Orimatita	73
5.7 Consideraciones Técnico-Económicas de los Diagramas de Procesamiento a Escala Industrial	76
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
Conclusiones	77
Recomendaciones	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS	82
Anexo 1: Glosario	83
Anexo 2: Especificaciones del Separador Magnético de Baja Intensidad	84
Anexo 3: Especificaciones del Separador Magnético de Mediana Intensidad	85
Anexo 4: Análisis Granulométrico de las Diferentes Moliendas	86
Anexo 5: Incide de Bond	97
Anexo 6: Vertimill	99

INDICE DE FIGURAS Y GRÁFICAS

vii

		Pag.
Fig. 2.1	Diagrama en pantalla del Área de Trituración	7
Fig. 2.2	Diagrama en pantalla del Área de Molienda	8
Fig. 2.3	Diagrama en pantalla del Área de Concentración	9
Fig. 3.1	Circulación del lodo y eliminación de sólidos	12
Fig. 3.2	Molino utilizado para determinar el Índice de Bond	23
Fig. 3.3	Molino Vertical (Vertimill)	30
Fig. 3.4	Pulverizador Horizontal	30
Fig. 3.5	Disco del Pulverizador Vertical	30
Fig. 3.6	Ciclosizer	31
Fig. 3.7	Diseño Concurrente de un Separador Magnético	35
Fig. 3.8	Diseño Contra-Rotación de un Separador Magnético	35
Fig. 3.9	Diseño Contra-Corriente de un Separador Magnético	36
Fig. 3.10	Diseño Contra-Rotación modificado de un Separador Magnético	36
Fig. 3.11	Separador Magnético de Baja Intensidad ERIEZ RE 24" X 18"	37
Fig. 3.12	Representación de los Mecanismos de Floculación	39
Fig. 3.13	Secador de Lecho Fluidizado	41
Fig. 3.14.a	Comportamiento del Secado a condiciones constantes	42
Fig. 3.14.b	Curva de Secado	42
Graf. 5.4	Altura decantada vs Tiempo de Sedimentación	69
Fig. 5.4.1	Estado Final de las Pruebas de Sedimentación	69
Graf. 5.5	%hv Eliminada vs Tiempo de Secado	72
Graf. 5.6	Propuestas de Diagramas de la Obtención de Orimatita	73

INDICE DE TABLAS

		Pag.
Tabla N° 3.1	Características de la Orimatita y de la Barita	15
Tabla N° 3.2	Mercado Potencial para los Densificantes	16
Tabla N° 3.3	Rango de aplicaciones de cada una de las etapas de reducción de tamaño y consumo de energía asociados.	18
Tabla N° 3.4	Acción de una carga normal de bolas en varios porcentajes de velocidades críticas	25
Tabla N° 3.5	Efecto de la cantidad de carga de bolas	25
Tabla N° 3.6	Recomendaciones para el diseño de equipos según el tamaño de la alimentación y estériles	35
Tabla N° 3.7	Carga de bolas utilizadas por el personal de la Planta Piloto de Concentración	44
Tabla N° 4.1	Análisis Granulométrico Estándar del mineral FPF-1	46
Tabla N° 4.2	Análisis Químico del mineral FPF-1	46
Tablas N° 5.1	Análisis Granulométricos resultantes de las moliendas tanto en húmedo como en seco, con y sin magnetita	57
Tablas N° 5.2	Análisis Granulométricos resultantes de las pulverizaciones tanto horizontal como vertical	62
Tablas N° 5.3	Resultados obtenidos de la separaciones magnéticas	66
Tabla N° 5.4	Resultados de los ensayos de espesamiento	68
Tabla N° 5.5	Resultado del secado de las experiencias S, SF, SA, SFA	71

INTRODUCCIÓN

Las reservas de mineral de hierro presentes en nuestro país son bastante elevadas, con una densidad privilegiada (5.09 gr/cm^3), que lo hace útil no solo en la industria siderúrgica del país y del mundo; sino también en otras empresas básicas de importante proyección como lo es Petróleos de Venezuela (PDVSA), empresa nacional destinada a la explotación, procesamiento y refinación del petróleo. Entre sus actividades destaca la perforación de pozos petroleros; en donde se emplean lodos de perforación.

Los lodos de perforación son fluidos densificados con aditivos que le confieren determinadas propiedades físicas y químicas. En la actualidad se emplea la Barita (BaSO_4) como densificante, mineral con pocas reservas mundiales y escasas reservas nacionales, lo que se traduce en la importación de este tipo de mineral, generando elevados costos a la industria petrolera. Además, la Barita en casos de accidentes, genera daños irreversibles al ambiente. Por su parte el densificante a base de mineral de hierro, Orimatita (Fe_2O_3), es muy efectivo a la hora de limpiar o remover los recortes o ripio del fondo del pozo, esto motivado a su elevada densidad.

La Orimatita presenta significativas ventajas sobre la Barita, entre las que se encuentran su comportamiento no tóxico ante el ambiente, empleo de menor cantidad de mineral para densificar un fluido, los lodos densificados con Orimatita resultan más estables, etc. Sin embargo, la Orimatita presenta una desventaja notoria: es sumamente abrasiva, razón por la cual, el mineral de hierro debe ser reducido de tamaño por debajo de 38 micrones (400 mallas ASTM).

La producción de Orimatita a nivel industrial en Venezuela, traería consigo numerosos beneficios, entre los que destacan: ahorro de divisas por parte del estado, generación de empleos directos e indirectos y generación de dualidad de empresas (Ferrominera Orinoco C.A y PDVSA), que contribuiría al desarrollo de las mismas.

El presente trabajo de investigación está dividida en cinco capítulos. En el capítulo I se destaca el planteamiento del problema, la justificación de la problemática a investigar, así como también, limitaciones y objetivos generales y específicos.

En el capítulo II y III se explica brevemente la distribución y funcionamiento de las diferentes zonas de la Planta Piloto de Concentración, conjuntamente con los lineamientos teóricos de la investigación, necesarios para una mayor comprensión.

En el capítulo IV y V se describe con detalle el procedimiento experimental, los resultados y el análisis de los mismos.

Por último, en el capítulo VI se presentan las conclusiones de la investigación y las posibles recomendaciones a seguir en futuros trabajos que se encuentren ligados con este informe.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1) DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:

La industria petrolera actualmente utiliza como densificante de los lodos de perforación, un aditivo importado llamado Barita (sumamente costoso) es por ello que conjuntamente con la Empresa Ferrominera de Orinoco C.A., se están llevando a cabo investigaciones para buscar un sustituto de la Barita que sea producido en el país y que tenga como base el mineral de hierro (ORIMATITA).

El mineral de hierro posee una densidad aproximada de 5.06 gr/cm^3 , mayor a la densidad de la Barita (4.2 gr/cm^3), lo que la hace más efectiva como producto densificante en la remoción de recortes durante la perforación; ya que brinda estabilidad al pozo y obstaculiza las formaciones permeables. En el estado Bolívar se encuentran grandes reservas ($260 \times 10^6 \text{ Ton.}$), con las que cuenta el país.

Para la obtención de la Orimatita, en el presente trabajo se desarrolla un estudio de dos flujogramas de procesamiento, con el propósito de determinar el más óptimo y más rentable económicamente. En estos circuitos, el mineral de hierro es sometido a varias etapas de separación: molienda, separación magnética de baja y mediana intensidad, clasificación vía hidrociclones, filtrado, secado y empacado. Esto a escala de laboratorio, pero con proyecciones a escala industrial; las cuales en un futuro podrían ser tomadas en cuenta en el diseño de una planta industrial destinada a la obtención de ORIMATITA.

1.2) JUSTIFICACIÓN:

El mineral de hierro está presente en numerosos yacimientos del país; los cuales poseen grandes reservas de Hematita con excelentes propiedades físicas y químicas. Se hace tentativa la idea de generar un producto nacional que cumpla con todas las especificaciones requeridas para tal fin, y que además, el costo de su producción sea menos elevado y se invierta menos capital que si se importara un producto similar (BARITA), mineral que actualmente se emplea como densificante, pero que posee un elevadísimo costo, motivado a la escasez de sus yacimientos en el mundo; es por ello que se busca proyectar la producción de Hematita Nacional como densificante de fluidos de perforación, mediante el uso a futuro de la Planta Piloto de Concentración o de una planta similar que forme parte de la empresa FERROMINERA ORINOCO C.A., garantizando así el suministro de este importante aditivo a la Industria Petrolera y que contribuirá al desarrollo de la misma.

1.3) LIMITACIÓN:

Por tratarse del diseño de un flujograma para la obtención de un producto nuevo como lo es la Orimatita, la información respecto a la misma es escasa y clasificada debido a que es provenientes de investigaciones realizadas por INTEVEP, el cual mantiene en secreto los resultados obtenidos.

1.4) OBJETIVO GENERAL:

Diseñar un flujograma de procesamiento de mineral de hierro, a nivel de laboratorio (escala batch; 100-300 Kg/h), para la obtención del densificante (Orimatita) requerido por la Industria Petrolera; el cual a futuro, podrá operar a nivel de La Planta Piloto de Concentración (5 a 10 t/h) o en La Planta Industrial de Concentración.

1.5) OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Evaluación de las especificaciones para la preparación del densificante a partir de mineral de hierro, según las necesidades de la industria petrolera.
2. Determinación de los parámetros técnicos de las diferentes fases del procesamiento: tiempo de molienda, granulometría, tiempo de secado, etc.
3. Diseño del flujograma final.
4. Consideraciones técnicas-económicas del diagrama de flujo para la obtención de densificante con las características físicas y químicas requeridas.

CAPITULO II

PLANTA PILOTO DE CONCENTRACIÓN:

La Planta Piloto esta dividida en 5 Áreas:

- Trituración (su equipamiento se identifica con el prefijo 02)
- Molienda (03)
- Concentración (04)
- Laboratorio (05)
- Equipos auxiliares (06).

Debido a que el diseño de la planta piloto, permite implementar diferentes circuitos de operación, se describirá el diagrama de flujo general.

2.1) ÁREA DE TRITURACIÓN (02)

En la figura 2.1 se presenta el diagrama del área de trituración, el mineral que viene de las minas, es alimentado al triturador primario (Triturador de mandíbulas); el cual descarga sobre la cinta (02-002) y de allí es llevado a la cinta (02-101) que transporta el material triturado a la torre de cribado, en donde pasa por la criba (02-002) que tiene mallas de aberturas de 6" y 4", luego pasa a la criba (02-003) de abertura 1 ½" y 1/2". Lo rechazado de la primera malla es transportado por la cinta (02-101) para concentrar una pila con el material mayor a 6" y que luego será la alimentación del molino autógeno. Luego el producto rechazado de la primera malla de la segunda criba, con un diámetro entre 4" y 1 ½", será llevado al molino de pebbles en área de molienda. El producto rechazado en la segunda malla de cada criba, tiene diámetro entre 4"y 6", y entre 1/2" y 1 ½", es pasado por una trituradora de mandíbula secundaria (02-004); el producto obtenido es recirculado por medio de las cintas (02-103) y (02-106), finalmente el pasante de la criba 02-003, inferior a

1/2", es almacenado en una pila por medio de la cinta de trasferencias 02-107 y staker 02-108 (lugar de almacenamiento del mineral en forma de pila).



Fig.2.1 Diagrama en pantalla del Área de Trituración, presentado por el software SCADA empleado por la planta Piloto.

2.2) ÁREA DE MOLIENDA (03)

El mineral de la pila de pebbles (cuerpos moledores) y de la pila de cribado inferior a 1/2" es llevado por medio de un cargador frontal a la tolva final de alimentación de la cinta 03-109. La tolva tiene una capacidad para ocho horas continuas de operación. Mediante una claveta (lámina que impide el paso a una u otra tolva), accionada por un cilindro eléctrico, los pebbles son llevados a la tolva 03-110 y el producto inferior a 1/2" llevados a la tolva 03-112. Estos minerales alimentan al molino de pebbles (03-006) mediante las cintas dosificadoras 03-011 y 03-113. La descarga del molino es enviada por medio de la bomba 03-300 a la criba vibrante 03-007, ó al ciclón 03-008 dependiendo de las características de la alimentación. Los rechazos de ambos se retornan al molino de pebbles y los pasantes son alimentados al tanque (03-302) con agitador (03-303). La bomba 03-301 impulsa la pulpa a la etapa de concentración.

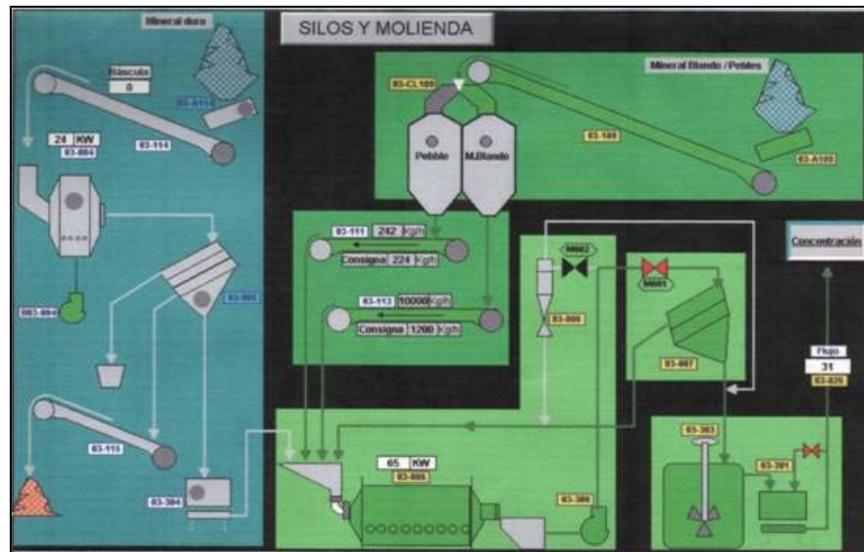


Fig.2.2 Diagrama en pantalla del Área de Molienda

2.3) ÁREA DE CONCENTRACIÓN (04)

El material del tanque 03-302 (molienda), pasa a la bomba 03-301, ésta lo envía hacia el Hidrociclón 04-007 que se encarga de desaguar la pulpa, el overflow va hacia el tanque de estériles 04-025, el underflow cae en el Hidrosizer 04-008, que se encarga de separar el grueso y el fino por medio de agua de lavado, ésta se coloca a 20 GPM y un setpoint de 35 para dar el punto de corte ($75 \mu\text{m}$, o sea 200 mallas).

El overflow de Hidrosizer es enviado hacia flotación, el underflow del hidrosizer cae en la bomba 04-324, ésta lo envía a la bomba 04-327 siendo trasladado el material hacia el tolvin de distribución, aquí se divide: una mitad hacia los espirales MD y otra mitad hacia los espirales Multotec.

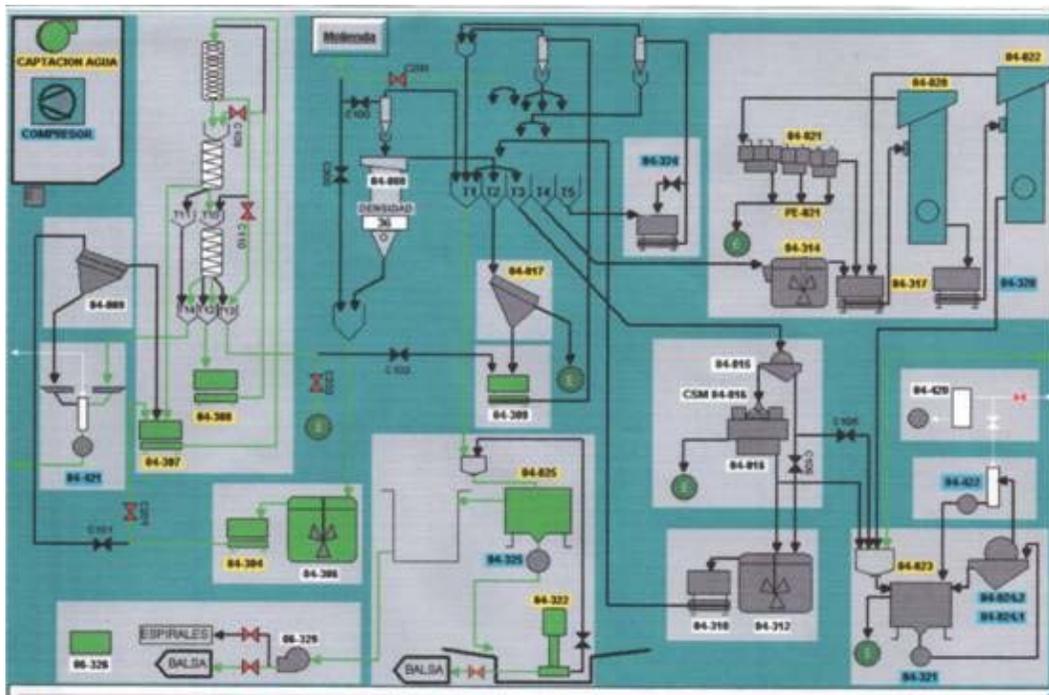


Fig. 2.3 Diagrama en pantalla del Área de Concentración.

2.4) ÁREA LABORATORIO (05)

El área de laboratorio está formada a su vez por tres subáreas.

- Trituración de muestras.
- Zona de proceso en húmedo.
- Zona de manejo de muestra seca.

2.5) ÁREA EQUIPOS AUXILIARES (06)

- Bomba de contra incendio.
- Bomba de Agua.
- Bomba de Agua recirculada.
- Bomba de captación de agua del río.
- Aire Acondicionado.

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

3.1) USO DE DENSIFICANTES EN LA INDUSTRIA PETROLERA:

Las columnas de perforación proporcionan un medio para la circulación continua de los lodos de perforación (ver dibujo esquemático en la Fig. 3.1), que son bombeados a grandes presiones a través de las toberas de la barrena, produciendo un chorro de fluido. El chorro de lodo despeja el área debajo de la barrena, eliminando así los recortes o ripio, ofreciéndole nuevas superficies de rocas.

Cuando este sistema no está densificado, el efecto de flotabilidad que tiene el lodo sobre los recortes es bajo; por lo tanto, la limpieza del pozo depende de la viscosidad y del caudal de los lodos o fluidos de perforación.

LODO DE PERFORACIÓN:

Lodo es el término que suele atribuirse con mayor frecuencia a los fluidos de perforación y es un fluido a base de agua o aceite; cuyas propiedades han sido modificadas por sólidos comerciales y/o nativos, disueltos y/o suspendidos. Se usa para hacer circular los recortes fuera del pozo y cumplir con otras funciones durante la perforación.

CIRCULACION DEL LODO Y ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS:

Las bombas y los motores representan el “corazón” del sistema de lodo, de la misma manera, que el lodo en circulación constituye el alma de la operación de perforación. Las bombas de lodo son bombas de desplazamiento positivo, algunas de las cuales producen hasta 5.000 psi (34.47 MPa). Estas bombas son accionadas por motores diesel o eléctricos. Para producir la presión y el caudal requeridos para un conjunto específico de condiciones de perforación, será necesario seleccionar los tamaños correctos de émbolo y camisa para las bombas y especificar los tamaños apropiados de tobera para la barrena. Este proceso se llama optimización de la hidráulica y constituye un factor clave en una perforación eficaz. Después de salir a alta presión de la bomba de lodo, el fluido de perforación sube por el tubo vertical (un largo tubo vertical atado al pie de la torre de perforación), pasa a través de la manguera del kelly (manguera de perforación o cuello de cisne). Después, el lodo viaja a través de la columna de perforación hasta alcanzar la barrena. En general, una barrena tiene dos o más toberas (chorros) que aceleran el lodo para obtener un chorro de gran velocidad que lava el fondo del pozo para mantener limpios los cortadores de la barrena y proporcionar una nueva superficie de roca a la barrena. Desde del fondo del pozo, el lodo sube por el espacio anular que existe entre la columna de perforación y el pozo, transportando los recortes generados por la barrena.

El lodo y su carga de recortes fluyen fuera del “niple de campana”, pasando a través de una tubería inclinada de gran diámetro (línea de flujo) hasta llegar sobre una o varias mallas vibratorias de tela metálica montadas sobre la zaranda. Este proceso consiste en hacer caer el lodo a través de las mallas, separando la mayoría de los recortes (de tamaño más grande que la apertura de la tela metálica de la malla) del sistema de circulación. Después de pasar a través de la malla, el lodo cae en un tanque metálico de asentamiento (ver Fig. 3.1).

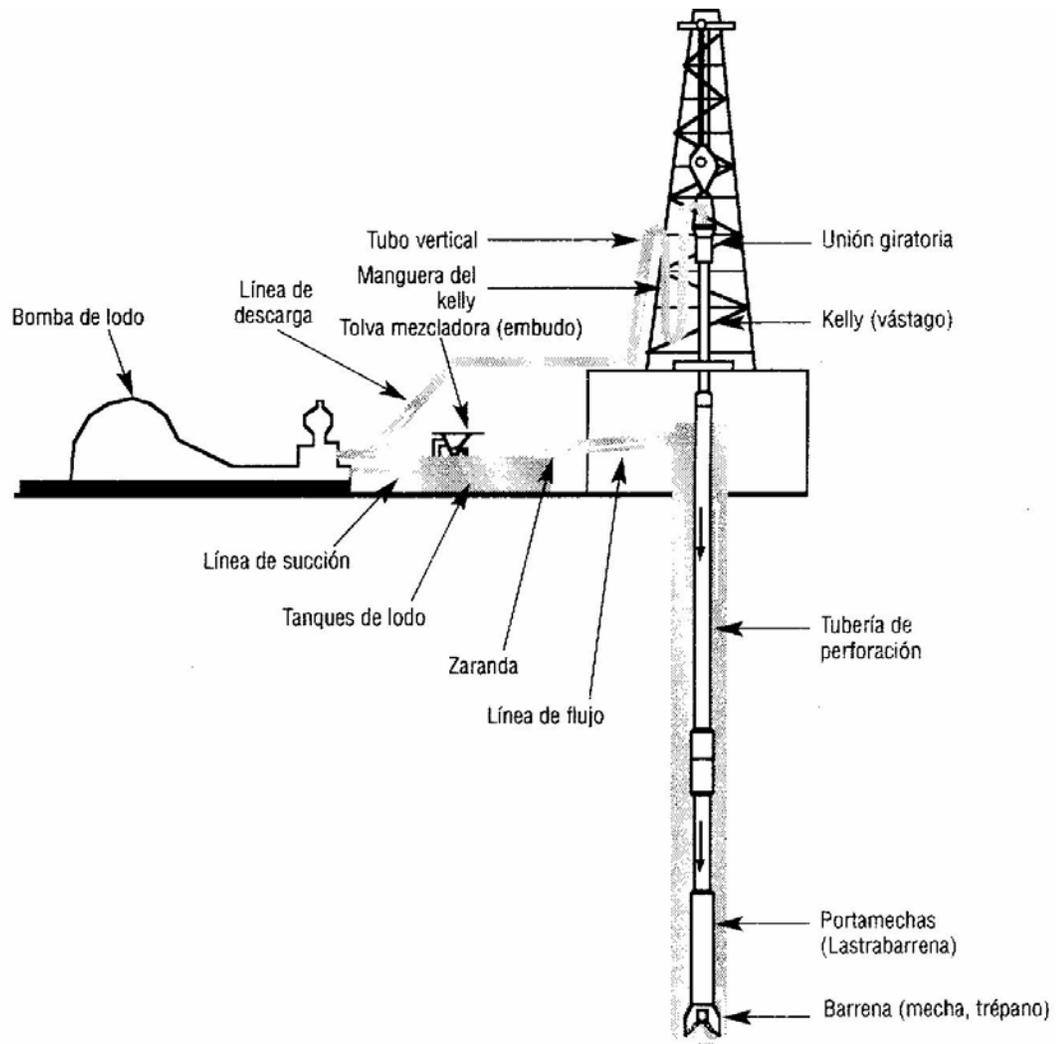


Fig: 3.1 Circulación del lodo y eliminación de sólidos.

DENSIDAD DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN:

Los fluidos de alta densidad, facilitan la limpieza del pozo aumentando las fuerzas de flotación que actúan sobre los recortes; lo cual contribuye a su remoción. En comparación con los fluidos de menor densidad, los fluidos de alta densidad pueden limpiar el agujero de manera adecuada, aun con velocidades anulares más bajas y propiedades reológicas inferiores. Una función básica del fluido de perforación es controlar las presiones de la formación para garantizar una operación de perforación segura.

FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN:

Las funciones del fluido de perforación describen las tareas que éste es capaz de desempeñar, aunque algunas de éstas no sean esenciales en cada pozo. La remoción de los recortes del pozo y el control de las presiones de la formación son funciones sumamente importantes. Aunque el orden de importancia sea determinado por las condiciones del pozo y las operaciones en curso, las funciones más comunes del fluido de perforación son las siguientes:

1. Retirar los recortes del pozo.
2. Controlar las presiones de la formación.
3. Suspende y descargar los recortes.
4. Obturar las formaciones permeables.
5. Mantener la estabilidad del agujero.
6. Minimizar los daños al yacimiento.
7. Enfriar, lubricar y apoyar la barrena y el conjunto de perforación.
8. Transmitir la energía hidráulica a las herramientas y a la barrena.
9. Asegurar una evaluación adecuada de la formación.
10. Controlar la corrosión.
11. Facilitar la cementación y la completación.
12. Minimizar el impacto al ambiente.

SISTEMA BASE AGUA:

En las operaciones de perforación, se usan diferentes tipos de sistemas de fluido de perforación base agua (lodos). Los sistemas básicos de fluido de perforación son generalmente convertidos en sistemas más complejos a medida que la profundidad y la temperatura y/o presión del pozo aumentan. (1)

ORIMATITA:

La Orimatita es un densificante desarrollado con hematita natural de 5 gr/cc en promedio de gravedad específica, que puede ser utilizado como densificante de fluidos de perforación y en lechadas de cementación de alto peso. Es considerado un sólido de Alta Gravedad Específica (HGS). La fuente de materia prima está ubicada en el Estado Bolívar., Venezuela (10).

APLICACIONES DE LA ORIMATITA:

- La Orimatita puede ser utilizada en lodos tanto base-agua como base-aceite, así como también en lechadas de cemento.
- La Orimatita puede ser utilizada con absoluta confianza en los lodos de hasta 18 lbs/gal (2.16 gr/cm³) y ser un sustituto excelente de la Barita.
- La Orimatita no tiene restricciones de temperatura ni presión y por ésto puede ser utilizada en pozos de mediana y alta profundidad; lo cual hace de la Orimatita un producto versátil.
- Como densificantes de cementos en lechadas mayores de 17 lbs/gal (2.04 gr/cm³). (10)

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LA HEMATITA Y DE LA BARITA:

- La Orimatita tiene una **densidad** natural de 5.06gr/cc mientras que la Barita posee 4.20 gr/cc (que es el agente usualmente utilizado en la preparación de lodos de perforación): esta diferencia del 20% permite lograr mayores densidades con menor cantidad de sólidos, característica altamente deseable para mejor control de filtrado, y en consecuencia, menor daño a la formación.

- Los posibles daños a la formación ocasionados por la Orimatita pueden ser removidos químicamente, mientras que los ocasionados por la barita son irreversibles.
- En materia de reología, los lodos densificados con Orimatita resultan más estables debido a su menor contenido de sólido y al hecho de que la distribución de tamaño de partículas es menos susceptible a los cambios que la Barita.
- En materia ambiental, la Orimatita presenta muchas ventajas por su bajo nivel de toxicidad.
- La Barita es un producto importado, mientras que la Orimatita es un producto proveniente del mineral de hierro (Hematita); del cual, se encuentran innumerables reservas en el país (10).

Tabla N° 3.1 Características de la Orimatita y de la Barita (2)

	ORIMATITA	BARITA
DESCRIPCIÓN	Oxido Férrico (Fe_2O_3)	Sulfato de Bario ($BaSO_4$)
GRAV. ESPEC	5.0-5.2 gr/cc	4.2 gr/cc
DUREZA MOHS	5.0-6.0	2.5-3.5
DISPONIBILIDAD	Grandes reservas en el Edo. Bolívar, 260×10^6 Ton.mt.	Agotamiento de los yacimientos por la alta demanda
CARACT. AMBIENTAL	No es contaminante al ambiente.	Contenido de metales pesados y contaminantes
SOLUBILIDAD	Solubles en ácidos 95% removible en caso de daños.	Insoluble en ácidos. Daños irreversibles a la formación
TAMAÑO DE PARTÍCULA	90% < malla 400 (-38 μ m)	97% < malla 200 (-75 μ m) 95% < malla 325 (-45 μ m)

MERCADO POTENCIAL PARA DENSIFICANTES:

Tabla N° 3.2 Mercado potencial para los densificantes (2).

PAISES	MERCADO		1x10 ³ Ton.met/Año	ORIGEN
	PRODUCCION	DEMANDA	IMPORTACIÓN	
VENEZUELA	—	90	90	Europa
Estados Unidos y Canadá	625	946	311	Europa

BENEFICIOS DE USO DE LA ORIMATITA COMO DENSIFICANTE:

- Sustitución de importaciones para cubrir la demanda de PDVSA, estimada en una 50.000 ton.met./ Año por un valor de 9×10^6 \$.
- La posibilidad de abrir una línea de exportación de densificante al sur de EE.UU., Trinidad, Colombia, Ecuador, México y Argentina, entre otros, que traerían considerables divisas al país.
- Generación de empleos directos e indirectos.
- Disminución del impacto ambiental. (2)

3.2) REDUCCIÓN DE TAMAÑO (CONMINUCIÓN):

Los productos minerales en bruto son chancados o triturados, molidos y/o pulverizados por varias razones.

Algunos de los objetivos más importantes de la reducción de tamaño son:

- Lograr la liberación de especies minerales comerciables desde una matriz formada por minerales de interés económico y canga.
- Para promover reacciones químicas rápidas a través de la exposición de una gran área superficial.
- Para producir un material con características de tamaño deseables para su posterior procesamiento, manejo y/o almacenamiento.
- Para satisfacer requerimientos de mercado en cuanto a especificaciones de tamaños particulares en el producto.

La decisión de efectuar la fractura de partículas utilizando procesos de conminución en húmedo o seco, depende del tipo de material a procesar o del producto a obtener.

En ciertos casos, dependiendo del uso final, es necesario efectuar molienda seca, especialmente en el caso de ciertos minerales industriales o cemento.

Los principales factores que determinan que un mineral sea procesado en vía húmeda o seca son:

- Características físicas del mineral.
- Efecto del material en el equipo de molienda, tales como: abrasión, corrosión y compactación en la zona de molienda.
- Forma, distribución de tamaños y calidad del producto deseado.
- Consideraciones económicas.
- Condiciones climáticas.
- Disponibilidad de agua.
- Factores ambientales y de seguridad tales como: ruidos, polvos y vibración excesiva (3).

RELACIONES ENERGÍA - TAMAÑO DE PARTÍCULA

Desde los primeros años de aplicación industrial de los procesos de conminución al campo de beneficio de minerales, se constató la relevancia del consumo de energía específica como parámetro controlante de la reducción de tamaño y granulometría final del producto, en cada etapa de conminución.

Por otro lado, se ha logrado demostrar que en las etapas de chancado y molienda convencional la energía mecánica suministrada al equipo de conminución supera entre 10 a 100 veces el consumo teórico de energía requerida para crear nuevas superficies; es decir, menos del 10% del total de energía entregada al equipo de conminución es efectivamente empleada en la fragmentación de las partículas.

Tabla N° 3.3 Rango de aplicación de cada una de las etapas de reducción de tamaños y consumos de energía asociados (4).

Etapa	Sub-etapa	Rango Tamaño	Consumo Energía [kWh/t]
Chancado (Trituración)	Primario	100 a 10 cm	0.3 a 0.4
	Secundario	10 a 1 cm	0.3 a 2
	Terciario	1 a 0.5 cm	0.4 a 3
Molienda	Primario	10 a 1mm	3 a 6
	Secundario	1 a 0.1 mm	4 a 10
	Terciario	100 a 10 μ m	10 a 30

POSTULADO DE RITTINGER, 1867:

“La energía específica consumida en la reducción de tamaño de un sólido es directamente proporcional a la nueva superficie específica creada”(4).

Este postulado considera solamente la energía necesaria para producir la ruptura de cuerpos sólidos ideales (homogéneos, isotrópicos y sin fallas), una vez que el material ha alcanzado su deformación crítica o límite de ruptura.

Matemáticamente se puede escribir:

$$E_r = Cr(S_f - S_p) \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

E_r = consumo de energía específica (kWh/t).

Cr = constante de proporcionalidad de Rittinger

S_f y S_p = superficie específica de la alimentación y producto respectivamente.

La superficie específica está dada por:

$$s_e = S/M = S/(\rho_s * V) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

S = superficie.

M = Masa (gr).

ρ_s = densidad (gr/ cm³).

V = volumen (cm³).

POSTULADO DE KICK, 1885:

“La energía requerida para producir cambios análogos en el tamaño de cuerpos geoméricamente similares es proporcional al volumen de estos cuerpos”(4).

Kick consideró que la energía utilizada en la fractura de un cuerpo sólido ideal (homogéneo, isotrópico y sin fallas) era aquella, necesaria para deformar el sólido hasta su límite de ruptura, despreciando la energía adicional para producir la ruptura del mismo.

$$E_k = K_k \ln(d_f / d_p) \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

E_k = consumo de energía específica. (kWh/t)

d_f y d_p = tamaño promedio de la alimentación y del producto respectivamente.

$K_k = 1 / \ln 2$

POSTULADO DE BOND, 1952:

Como los postulados de Kick y Rittinger no satisfacían todos los resultados experimentales observados en la práctica, y como industrialmente se necesitaba una norma estándar para clasificar los materiales según su respuesta a los procesos de conminución, Bond, en 1952, postuló una ley empírica que se denominó la Tercera Ley de la Conminución:

“La energía consumida para reducir el tamaño 80% de un material, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de este tamaño, definiéndose el tamaño 80% como la abertura del tamiz (en micrones) que deja pasar el 80% en peso de las partículas” (4).

Índice de Trabajo del material, W_i , que corresponde a la energía necesaria para reducir una tonelada de material desde un tamaño teóricamente infinito hasta partículas que en un 80% sean inferiores a $100\mu\text{m}$. Esto es,

$$E = W_i(10/\sqrt{P_{80}} - 10/\sqrt{F_{80}}) \quad (\text{Ec. 4})$$

donde P_{80} y F_{80} representan el tamaño 80% del producto y alimentación, respectivamente.

ENSAYO NORMALIZADO DE MOLIENDABILIDAD (ASTM D.1191):

Se realiza para determinar el Índice de Bond:

El material se prepara a un tamaño de 100% menor a 6 mallas (3350 μm), se mide 700 cm^3 a granel de este material, lo que da un total de W gramos, cuidando que la densidad aparente sea reproducible y se carga en un molino de bolas de 305x305mm (12x12 plg), con bordes interiores redondeados. La carga de bolas de 20.125 g tiene la distribución que sigue:

43 bolas de 38.10 mm. (1 1/2 plg)

67 bolas de 31.75 mm. (1 1/4 plg)

10 bolas de 25.40 mm. (1 plg)

71 bolas de 19.05 mm. (3/4 plg)

94 bolas de 15.87 mm. (5/8 plg)

El material se muele por un corto período de tiempo, generalmente 100 revoluciones, tamizando el producto por una malla seleccionada (p_1) para eliminar el bajo tamaño y reemplazarlo por material fresco, simulando un circuito cerrado de molienda- clasificación. Esta nueva carga se vuelve a moler tratando de obtener una carga circulante de 250%. De esta forma, el porcentaje de material menor a la malla seleccionada (p_1), deberá ser 100/3.5

El número de revoluciones para la nueva etapa de molienda r_2 se calcula de las revoluciones de la etapa anterior r_1 mediante:

$$r_2 = \frac{100r_1}{3.5\psi_1} \quad (\text{Ec.5})$$

Donde ψ_1 es el porcentaje de material en el molino que tiene un tamaño menor de p_1 después de r_1 revoluciones. Una vez alcanzada la carga circulante de 250%, se define como

moliendabilidad y se designa por G_{bp} , a los gramos netos de material menor al tamaño p_1 , producidos por revolución del molino:

$$G_{bp} = \frac{\psi_1(p_1) - W\psi_1(p_1)}{100r^*} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

$\psi_1(p_1)$ = el porcentaje menor que la malla de separación (%)

p_1 = en la alimentación fresca al molino (μm).

W = masa total de molino (gr)

r^* = número de revoluciones necesarias circulante de 250%.

Finalizado el ensayo, se efectúa un análisis granulométrico completo del producto (bajo tamaño p) y de la alimentación fresca (menor a 6 mallas).

CÁLCULO DEL INDICE DE TRABAJO DEL ENSAYO (W_i):

Por comparación de ensayos realizados según la etapa 1 con resultados experimentales de molienda en un **molino de 2.44 m de** diámetro interior, operando en húmedo y con 250% de carga circulante, Bond concluyó que el índice del ensayo normalizado resultó según la siguiente ecuación empírica:

$$W_i = \frac{(1.1)(44.5)}{p_1^{0.23} G_{bp}^{0.82} \left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right]} \quad (\text{KWh/t}) \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

W_i es el Índice de Trabajo del ensayo expresado en KWh /ton.

p_1 es el tamaño en μm de la malla de separación.

G_{bp} es la moliendabilidad.

P_{80} es el tamaño del 80% en el producto

F_{80} es el tamaño del 80% en la alimentación fresca.

Todos estos valores son determinados en el ensayo de Bond. Se debe destacar que el número 10 en ecuación, corresponde a $\sqrt{100 \mu\text{m}}$, por lo que $10/\sqrt{P_{80}}$ es adimensional. El factor 1.1 convierte el Índice de Trabajo de Bond de kWh/tc a kWh/tm.

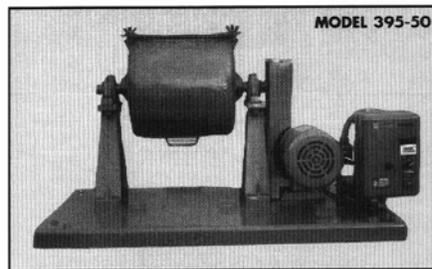


Fig. 3.2 Molino utilizado para determinar el Índice de Bond

POTENCIA NETA DEL SISTEMA:

$$P_s = E * T$$

Donde:

P_s = Potencia Neta del Sistema (KW).

E = Consumo Específico de Energía (KWh/ton).

T = Productividad del sistema, (ton/hr).

MOLIENDA:

El objetivo fundamental de la molienda es reducir el tamaño de partícula, su costo es elevado debido a la cantidad de energía que ella consume. Cualquier exceso de fineza (sobremolienda) produce pérdidas económicas, que pueden afectar la recuperación global del proceso.

La molienda puede realizarse en seco o en húmedo, esta última presenta ciertas ventajas en cuanto al rendimiento energético y la eliminación de los polvos.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA MOLIENDA EN HÚMEDO Y EN SECO:

Molienda Húmeda:

- Menos potencia por tonelada de material que la molienda en seco.
- Menos espacio que la molienda en seco y en general los costos de instalación son menores para un circuito cerrado de operación.
- No requiere equipos de control de polvos.
- Utiliza grandes cantidades de agua y el costo de mantenimiento de las bombas puede ser alto.

Molienda Seca:

- Material alimentado debe tener bajo contenido de humedad o artificialmente seco.
- No se gasta en filtrado y secado de material.
- Se obtiene un producto listo para almacenar; sin embargo, en ocasiones deben ser enfriados antes de proseguir su tratamiento.

MECANISMOS DE MOLIENDA:

1. A velocidades bajas: ocurre solamente un deslizamiento, produciendo una molienda solo en fricción.

2. A media velocidad: además de fricción (deslizamiento) se produce impacto con un comportamiento conocido como cascada.
3. A velocidades más altas: se produce fricción e impacto por un comportamiento de catarata.
4. A velocidades mayores: se produce una centrifugación.
5. No hay molienda, las bolas se pegan al molino; es decir, la fuerza de gravedad se iguala a la fuerza centrífuga; llegando así a la velocidad crítica.

Tabla N°3.4 Acción de una carga normal de bolas a varios porcentajes de velocidades críticas (6).

% Velocidad Crítica	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Deslizamiento	3	3	3	2	2	2	1	1	
Cascada			1	1	1	2	3	3	2
Centrifugación					1	1	2	2	3

Siendo:

- 1: Leve acción de la carga de bolas.
- 2: Apreciable acción de la carga de bolas.
- 3: Mayor acción de la carga de bolas.

La tabla N° 3.5 Efecto de la cantidad de carga de bolas (6).

Carga de bolas (% volumen molino)	5-15	15-25	25-35	35-45	45-50
Deslizamiento	<u>3</u>	<u>3</u>	<u>2</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
Cascada		1	2	<u>3</u>	<u>2</u>
Centrifugación			1	2	<u>3</u>

Siendo:

N_c : valor de efectividad a todas las velocidades.

N_c : efectividad a velocidades altas.

VELOCIDAD CRÍTICA:

Para determinar la velocidad crítica del molino se emplea la siguiente relación:

$$N_c = 42.3 / \sqrt{(D - d)} \quad (\text{rpm}) \quad (\text{Ec. 8})$$

Siendo:

D: diámetro del molino (m)

d: diámetro de las bolas (m)

Si $D/d > 20$, se desprecia el valor de d.

EFFECTOS DE LA DENSIDAD DE PULPA EN EL MOLINO:

Cuando la disolución de la pulpa en el interior del molino es inadecuada (demasiado elevada), la pulpa posee una excesiva viscosidad que dificulta la fácil y rápida descarga de la misma y particularmente, el buen escurrimiento hacia los intersticios de la carga moledora, lo que constituye un factor importantísimo del proceso.

Por otra parte, un excesivo porcentaje de sólido aumenta el efecto amortiguante de la pulpa en los contactos bolas-bolas y disminuye el efecto de la molienda.

Una disolución exagerada es perjudicial para conseguir un trabajo de molienda eficiente: demasiada cantidad de agua agregada al molino disminuye el tiempo de residencia de la pulpa en el mismo, generando así una descarga rápida, se lavan los cuerpos moledores y la molienda es ineficiente, además de ocasionar desgaste en equipo.

Se estima que el máximo porcentaje de sólidos permisibles en molienda de mineral silíceos (valores muy generales), se aproximan al 78% u 80% en etapas de molienda primaria en molinos de bolas y fluctúan entre 70% y 75% para un proceso de molienda secundaria con molino de bolas, siendo entre 60% y 65% para una molienda muy fina también con molino de bolas.

CARGA DE BOLAS:

Es el área de la superficie expuesta, puntos de contacto, volumen y peso de las bolas que conforman los cuerpos moledores del molino.

TEORÍA DE DESGASTE:

A medida que las bolas nuevas trabajan en la molienda se desgastan paulatinamente hasta que desaparecen o son sacadas del molino cuando están muy pequeñas.

El desgaste de cada bola y todas en conjunto, generan una formación “N” de familias de bolas de todos los diámetros que podemos visualizar como “collares” de bolas del mayor al menor diámetro. Si se recarga un solo diámetro periódicamente, tendremos el mismo número de bolas nuevas que el de bolas con mitad de desgaste o con mucho desgaste; es decir se tendrá el mismo número de bolas grandes, medianas y pequeñas.

Ley: “la reducción del diámetro de la bola debido al desgaste, es constante con el tiempo o al tonelaje procesado”.

$$dD/dt = -K \quad (\text{Ec. 9})$$

MOLINO VERTICAL O VERTIMILL:

El vertimill es un molino mediano vertical que ocupa poco espacio, es una alternativa eficiente para aplicaciones de molienda fina; el cual, puede ser usado para moler en húmedo o en seco.

El mineral de alimentación al Molino debe tener una granulometría menor a $\frac{1}{4}$ " para obtener un producto con un rango de tamaño entre 200 malla (74 micrones) hasta 2 micrones de fineza, puede ser usado en aplicaciones continuas o a escala de laboratorio, en circuitos abierto o cerrados.

En el mercado existen líneas de productos bastante amplias; las cuales tienen un rango de potencia que varían entre 20 HP hasta 1250 HP con capacidades entre 1 y 100 T/h (7).

APLICACIONES DEL VERTIMILL:

- Moler finos y ultrafinos.
- Molienda primaria y secundaria.
- Remoler concentrados.
- Moler piedras, calizas, etc.

VENTAJAS DEL USO DEL VERTIMILL SOBRE UN MOLINO DE BOLAS Y/O BARRAS:

- Menor sobremolienda.
- Usualmente ocasiona menos ruido.
- Menores costos operativos.
- Menor tiempo de residencia.
- Menores costos de instalación.
- Ocupa menos espacio físico
- Las operaciones realizadas con este equipo son mucho más seguras.

- Es de fácil instalación.

FUNCIONAMIENTO DEL VERTIMILL:

El mineral alimentado y el agua entran a través de un orificio ubicado en el tope de vertimill, la molienda bien sea con bolas de acero o de cerámica, o con pebbles, es agitada por medio de una hélice doble en forma de tornillo (agitador).

La pulpa entra al cuerpo del Molino a través de una caja bifurcadora que está equipada con una válvula que controla el paso de la entrada de la pulpa fresca y de la carga recirculante.

Una bomba genera la velocidad adecuada a la cual se clasifican las partículas en la parte superior del cuerpo del molino. La preclasificación y la remoción de los productos, hace que se reduzca la sobremolienda y se incremente la eficiencia. Las partículas pequeñas ascienden; mientras que las grandes son llevadas a la parte media y al fondo del equipo, donde se van localizando los cuerpos moledores por acción de la fuerza de gravedad, teniendo lugar la molienda por atricción / abrasión y por la alta presión entre la partículas, por ello se consume menos energía que en un molino tubular (bolas o barras) con los que se pueden desempeñar el mismo trabajo.

El interior del Molino está protegido por recubrimiento magnético; el cual atrae las partículas medianas que funciona a su vez como una superficie de protección.

La hélice normalmente requiere ser reemplazada de 6 a 12 meses.

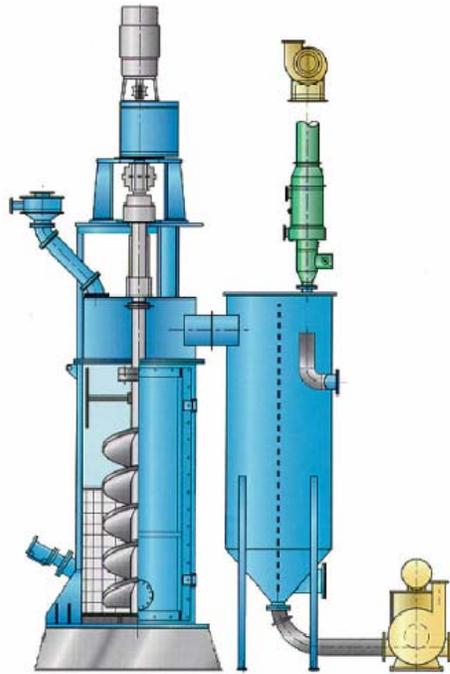


Fig. 3.3 Molino Vertical (Vertimill)

MOLINO DE DISCOS O PULVERIZADORES:

Son equipos de laboratorio destinados a moliendas rápidas en circuitos discontinuo en todo tipo de muestras, generalmente destinadas a análisis químico posterior.

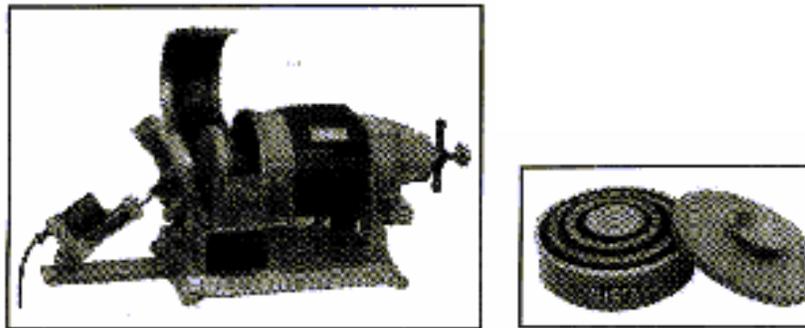


Fig. 3.4 y 3.5 : Pulverizador Horizontal marca: BICO inc.y Discos del Pulverizador Vertical marca: SIEBTECHNIK, respectivamente.

3.3) EQUIPOS DE CLASIFICACIÓN:

3.3.1) CICLOSIZER:

Es un equipo diseñado especialmente para clasificar tamaños de partículas inferiores a 38 μm . Consta de 5 hidrociclones a través de los cuales se hace pasar la muestra en forma de pulpa, gracias a la presión constante de agua se pueden obtener tamaños de partículas de 38 μm , 33 μm , 23 μm , 15 μm y 11 μm .



Fig. 3.6 Ciclosizer, equipo utilizado para la clasificación de finos.

3.3.2) HIDROCICLONES:

Los hidrociclones son los únicos equipos en la industria minera que utiliza la fuerza centrífuga en la separación del mineral. Generalmente son cónicos en su parte inferior y cilíndricos en la parte superior. Aunque pueden presentar cambios en su diseño o forma, las bases de su funcionamiento son las mismas.

La inyección tangencial de la pulpa, produce un movimiento en el aparato que desarrolla una fuerza centrífuga que segrega las partículas en dirección radial, de acuerdo a su tamaño y densidad, permitiendo así la separación.

Las partículas gruesas y densas se concentran en las paredes del aparato, siendo llevadas hacia abajo y eliminadas por el ápice o descarga, las partículas finas se mueven hacia el centro del ciclón, siendo transportadas hacia arriba y afuera a través del vórtice o rebalse por una corriente central ascendente.

La separación de las partículas de la pulpa de alimentación en un rebalse o descarga, depende de la velocidad de sedimentación radial y de la distribución tridimensional de velocidades en el ciclón.

FACTORES QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO DE UN HIDROCICLÓN:

Los efectos de cambio de operación y parámetros de diseños de un ciclón son muy complejos; ya que en ellos, todos los parámetros están interrelacionados. Es casi imposible seleccionar un ciclón para dar la separación requerida en forma precisa y es casi siempre necesario ajustar la alimentación de entrada, vortex finder, abertura de apex, presión de la pulpa y dilución, aún cuando los diseñadores de hidrociclones tienden a especificar ciclones capaces de manejar un determinado caudal de flujo, cierto rango de alimentación, rebalse y abertura de descarga.

El control final del punto de corte y la capacidad del ciclón, puede hacerse ajustando el tamaño de entrada, vortex finder, y apex.

Las variables operacionales tienen un efecto importante en el rendimiento del ciclón: es necesario evitar fluctuaciones en el caudal de flujo durante la operación, ésto se logra implementando un control automático del nivel del sumidero o una autorregulación del sumidero.

Un aumento en la velocidad del flujo de la alimentación, mejorará la eficiencia por aumento de la fuerza centrífuga en las partículas. Siendo constante todas las otras variables,

ésto puede ser obtenido solamente por un aumento en la presión y un aumento en la potencia, ya que ésto, está directamente relacionado con la caída de presión y la capacidad.

El efecto de un aumento en la densidad de pulpa alimentada es complejo: la agudeza de la separación decrece con el aumento de la densidad de pulpa y el punto de corte aumenta debido a la mayor resistencia al movimiento tipo remolino dentro del ciclón; lo cual reduce la caída de presión efectiva. La separación en tamaños más finos solamente puede lograrse con alimentación de bajos contenidos de sólidos y una caída de presión alta. Normalmente la disolución de la alimentación no es mayor de 30% de sólidos en peso, pero para operaciones de circuito cerrado de molienda, donde se requiere obtener relativas de grueso, se usan concentraciones en alimentación altas sobre el 60% de sólidos en peso, combinados con una caída de presión baja.

3.4) EQUIPOS DE CONCENTRACIÓN:

3.4.1) SEPARACIÓN MAGNÉTICA:

Los separadores magnéticos explotan las diferencias de propiedades magnéticas de minerales que conforman la mena. Se usan para concentrar materiales magnéticos valiosos de una canga no magnética o para separar contaminantes magnéticos de un útil no-magnético.

Todos los materiales son afectados de alguna forma cuando sobre ellos actúa un campo magnético. En la mayoría de los materiales este efecto es demasiado pequeño para ser detectado. Los materiales se pueden clasificar en dos amplios grupos dependiendo de si son atraídos o repelidos por un imán.

Diamagnéticos: son repelidos a lo largo de las líneas de fuerza magnética hacia un punto donde la intensidad de fuerza magnética es menor. Las fuerzas involucradas son muy pequeñas y las partículas diamagnéticas no pueden ser concentradas magnéticamente.

Paramagnéticos: son atraídos a lo largo de las líneas de fuerza magnética hacia puntos de mayor intensidad de campo magnético. Los materiales paramagnéticos se pueden concentrar usando separadores magnéticos de alta intensidad. Ejemplos: Ilmenita (FeTiO_3), Rutilo (TiO_2), Wolframio ($(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$), Siderita (FeCO_3), Pirotitita (FeS), Cromita (FeCr_2O_4), Hematita (Fe_2O_3), y minerales de manganeso.

Algunos elementos son ellos mismos paramagnéticos como: Ni, Co, Mn, Cr, Ce, Ti, O y el grupo de los metales Pt, pero en la mayoría de los casos, las propiedades paramagnéticas del mineral se deben a la presencia del hierro en alguna forma ferromagnética.

Ferromagnetismo es un caso especial del paramagnetismo (son atraídos a lo largo de las líneas de fuerza magnética hacia puntos de mayor intensidad de campo magnético), que involucra fuerzas magnéticas muy intensas. Estos materiales tienen muy alta susceptibilidad a fuerzas magnéticas y la retienen después de ser removido del campo magnético (remanencia). Se pueden concentrar usando separadores magnéticos de baja intensidad. El mineral ferromagnético principal es la magnetita aunque se pueden separar hematita y siderita después de la tostación; la cual produce magnetita.

Una guía de modelos con parámetros de dimensiones, alimentación, no es del todo confiable, hace falta realizar pruebas de laboratorio y numerosas experiencias que permitan afinar dichos parámetros, pero sí, nos dan una idea global del tipo de equipo y/o diseño, que se requiere para cubrir las necesidades y llevar a cabo un proyecto.

3.4.1.1) TIPOS DE DISEÑOS DE SEPARADORES MAGNÉTICOS:

- **Concurrente:** en este tipo de diseño, la alimentación entra a la caja destinada para tal fin, para luego ser distribuida en el mismo sentido que gira el tambor del separador magnético, en esta zona el espacio es muy angosto, ésto para que toda la pulpa entre en contacto con el separador.(ver Fig. 3.7)

- **Contra-rotación:** igual que el anterior cuenta con una caja da alimentación por donde entra la pulpa, pero distribuye el mineral en sentido opuesto a la rotación de tambor del separador magnético. La zona de acción del campo magnético es más amplia.(ver Fig.3.8)
- **Contracorriente:** la caja de alimentación distribuye la pulpa directamente al tambor. En esta zona la acción del campo magnético es mediana y sobre ella se lleva a cabo la separación.(ver Fig. 3.9)
- **Contra-rotación modificado:** está basado en el diseño del separador magnético a contra-rotación, se diferencia de éste, en que la zona de acción magnética es extremadamente larga. La pulpa entra a una cámara destinada para permitir la entrada de aire y de esta manera facilitar y mejorar la obtención del concentrado. El alto gradiente magnético es empleado para recuperar finos y material extremadamente magnético.(ver Fig.3.10) (7).

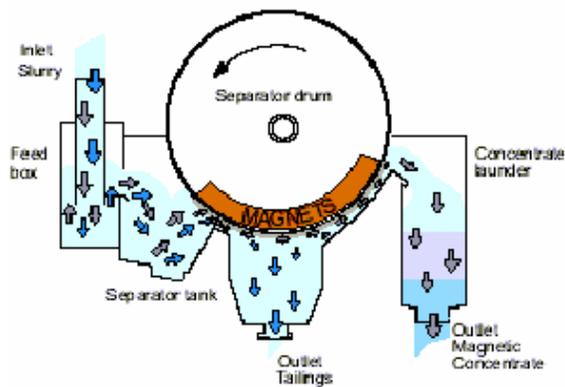


Fig 3.7 Diseño concurrente de un Separador Magnético

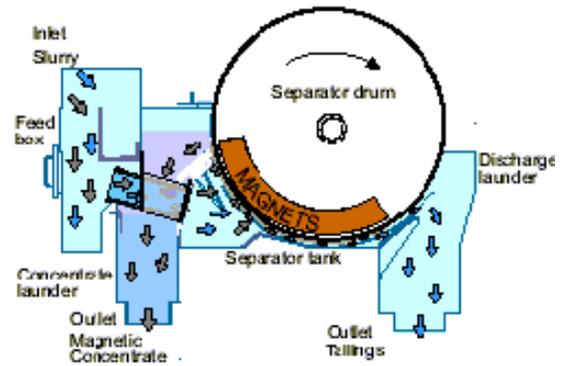


Fig 3.8 Diseño Contra-Rotación de un Separador Magnético

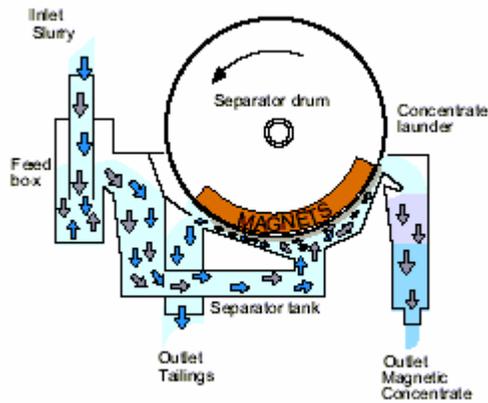


Fig 3.9 Diseño Contra-Corriente de un Separador Magnético

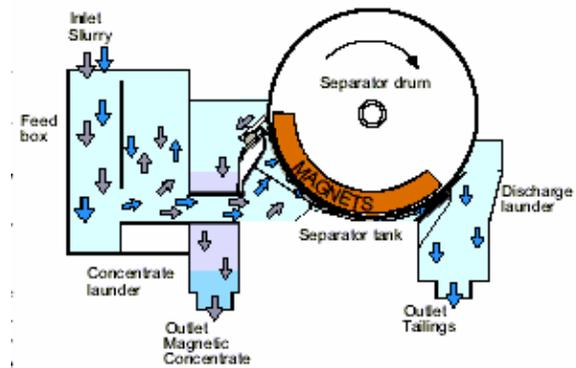


Fig 3.10 Diseño Contra-Rotación Modificado, de un Separador Magnético.

Tabla N° 3.6 Recomendaciones para el diseño de Equipos según el tamaño de la alimentación y estériles (7).

Aplicación , clasificación por tamaño de partículas	Tamaño de partícula μm , % de finos cercaos a 74μm	Alimentación T/h	Estériles m^3/h	Recomendaciones para el Diseño
Mineral de hierro, gruesos	15000 -8000 0-10%	100-160	200-350	Concurrente Contra-Rotación
Mineral de hierro, regular	5000-2000 20-25%	80-120	200-350	Contra-Rotación Contra-Corriente
Mineral de hierro, de fino a regular	1000 40-50%	40-80	150-250	Contra-Rotación Contra-Corriente
Mineral de hierro, finos	100 60-100%	10-60	100-200	Contra-Corriente.

EQUIPOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA A ESCALA INDUSTRIAL:

▪ SEPARADOR MAGNÉTICO ERIEZ RE 24"X 18":

Separador magnético de tambor vía húmeda modelo HMDA de ERIEZ, utiliza imanes permanentes en lugar de electroimanes, con circuitos magnéticos mejorados que ayudan a concentrar las fuerzas separadoras en la profundidad del flujo. El separador está diseñado principalmente para ser usado en circuitos de sistemas de recuperación para la concentración de materiales finos magnéticos o paramagnéticos alimentados en forma de lechada o pulpa. Normalmente se manejan densidades de pulpas de 25% al 55% de sólidos, pero en ciertas circunstancias se pueden manejar pulpas con densidades muy superiores o inferiores a este rango, siendo así, un equipo bastante versátil. Este separador consta de un tambor magnético, tanque, bastidor de soporte y transmisión, raspador giratorio, etc. El raspador giratorio es una rueda de paletas de cuatro cuchillas con un diámetro de 6" y con puntas de acero dulce que facilitan la descarga del mineral imantado; además de contar con agua de lavado.



Fig. 3.11 Separador Magnético de Baja Intensidad ERIEZ RE 24"X 18"

3.5) OPERACIONES COMPLEMENTARIAS:

3.5.1) SEDIMENTACIÓN:

Es la separación de partículas sólidas en suspensión o en un líquido, que se verifica por asentamiento gravitacional, tales procesos pueden dividirse en espesamiento y clarificación, sus principios son básicamente los mismos, aunque difieren en que el objetivo del espesamiento es aumentar la concentración de sólidos, mientras que la clarificación sirve para separar los sólidos de una corriente relativamente diluida.

La sedimentación puede ocurrir de manera natural o artificial, en ambas, se forman flóculos o aglomerados de partículas en un líquido y depende de las colisiones que haya en entre las partículas. Estas colisiones resultan del movimiento relativo entre las partículas producido por agitación externa, fuerzas externa (gravedad) o del movimiento browniano. Solo una fracción de estas colisiones son efectivas; ya que existen partículas desestabilizadas (no tienen fuerzas repulsivas entre ellas) y partículas estables (si tienen fuerzas repulsivas) .

La floculación de las partículas ocurre por dos mecanismos: la floculación *pericinética* debida al movimiento browniano y la floculación *ortocinética* debida a la agitación más vigorosa. La rapidez de la floculación pericinética es mayor para la partículas más pequeñas que 1 μm , mientras la rapidez de la floculación ortocinética es mayor para partículas mayores de 1 μm , pero siempre ocurren de manera simultánea en algún grado .

Cuando se emplean polímeros como agente floculantes se considera que existe una heterofloculación, en donde los flóculos que se forman inicialmente son sueltos y voluminosos hasta que ocurre una densificación por exudación del medio de dispersión. Este mecanismo adicional de la floculación recibe el nombre de *sinéresis mecánica* y existe un modelo cualitativo que describe las reacciones que ocurren en la floculación con polímeros; la cual comprende siete reacciones separadas como se indica en la Fig. 3.12 :

- a) Adsorción inicial del polímero (a dosificación óptima).

- b) Floculación pericinética u ortocinética.
- c) Adsorción secundaria del polímero (ningún contacto con los sitios disponible en otra partícula).
- d) Adsorción inicial del polímero en exceso.
- e) Ruptura del flóculo debido a agitación intensa o prolongada.
- f) Adsorción secundaria del polímero.
- g) Sinéresis mecánica debido a la acción de fuerzas desiguales sobre el flóculo.

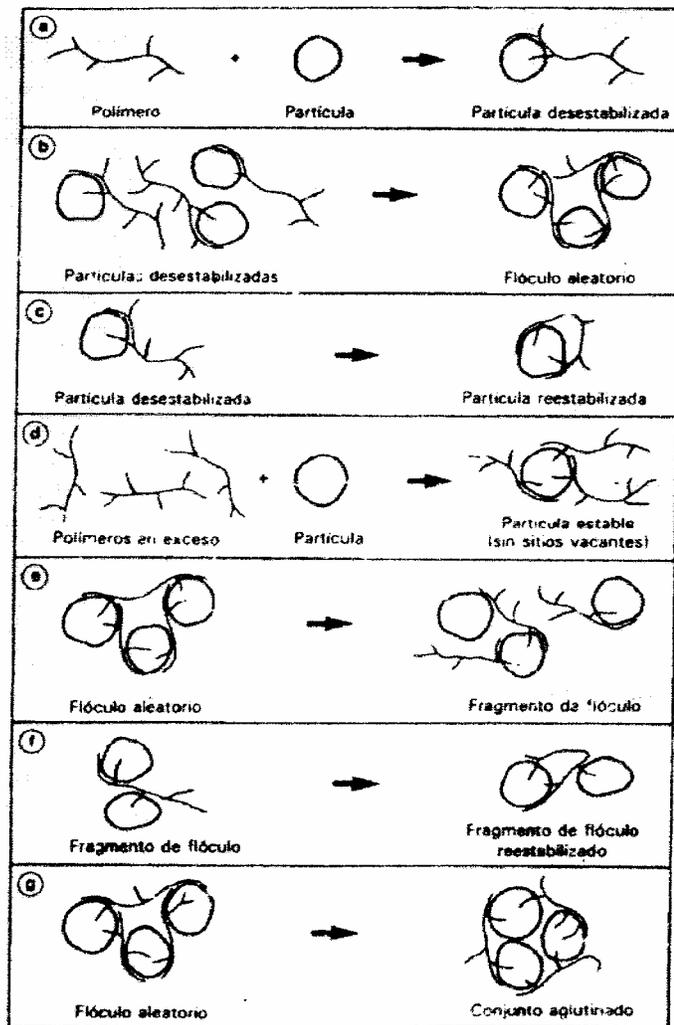


Fig. N° 3.12 Representación de los mecanismos de floculación (3)

3.5.2) SECADO:

Cuando se requieren de niveles de humedad más bajos de los proporcionados por los procesos mecánicos (filtrado, espesamientos, etc.), se recurre a secar el material por métodos térmicos. Estos son relativamente costosos; ya que el sólido no solo tiene que calentarse, sino que el agua tiene que evaporarse para que pueda ser arrastrada por una corriente gaseosa.

El término secado es un término relativo; ya que simplemente significa una mayor reducción del contenido de humedad a partir de cierto nivel inicial, logrado previamente en la separación mecánica. Esto es para obtener niveles más aceptable o requeridos.

La necesidad de realizar el proceso de secado va a depender de las operaciones subsecuentes o bien de los requerimientos de los clientes.

El equipo más adecuado para secar material fino es el secador de lecho fluidizado. Una característica del lecho fluidizado es su temperatura y mezclado uniforme; debido a que cada partícula está rodeada completamente de gas caliente, el secado es mucho más rápido (30 a 60 seg.). El proceso requiere de una cantidad considerable de equipos de recolección de polvo, debido a la elutriación de los finos. (ver Fig. 3.13)

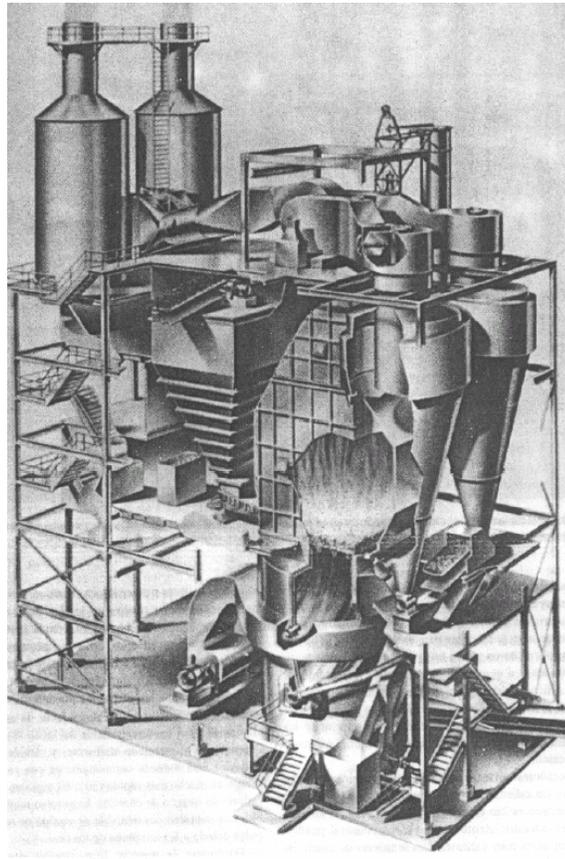


Fig. 3.13 Secador de Lecho Fluidizado.

COMPORTAMIENTO DEL SECADO:

El comportamiento típico del secado de un sólido tratado en condiciones constantes de secado aparece ilustrado en la Fig. 3.14 a.

La diferenciación de los datos permite obtener la curva de secado (Fig. 3.14 b). En la región A-B representa la primera etapa del calentamiento en donde se ajusta la temperatura de los sólidos húmedos a la temperatura del gas de secado. Región B-C es el período de secado a régimen constante en el que toda la superficie está saturada de humedad, ésta región termina en el contenido crítico de humedad, punto C. Más allá de este punto, la temperatura

de la superficie se eleva y el régimen de secado descende rápidamente hasta que eventualmente se alcanza el equilibrio. Este contenido de equilibrio, es la humedad más baja que se puede obtener en el material bajo las condiciones dadas y es cercano a cero.

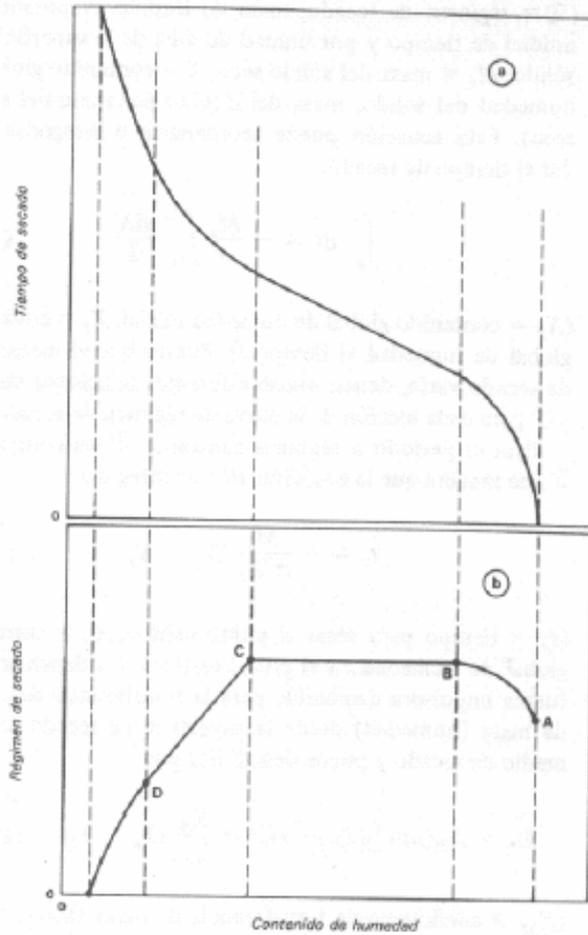


Fig. 3.14 (a), (b): Comportamiento del secado a condiciones constantes, curva de secado (Contenido de Humedad vs. Régimen de Secado). Respectivamente (4).

CANTIDAD DE HUMEDAD ELIMINADA.

$$\%h_v = (P_o - P_f) / P_o * 100$$

(Ec. 10)

Donde:

$\%h_v$ = % de humedad eliminada.

Po= peso inicial.

Pf = Peso Final.

3.6) ANTECEDENTES:

3.6.1) USO DE LA HEMATITA NATURAL COMO DENSIFICANTE:

Después de realizar una exhaustiva investigación se encontró una sola referencia acerca de el uso de la Hematita Natural como densificante . se trata del trabajo realizado por Rivers y Quiroga (10) quienes encontraron:

Con respecto a los problemas de origen magnético, es conocido que una tubería de perforación, rotando en el hoyo crea un pequeño pero significativo campo magnético. Este campo es suficientemente fuerte como para magnetizar la mayoría de los compuestos férricos y por ende, destruir la confiabilidad de cualquier registro de pozo que se base en el sistema de permeabilidad magnética.

Con respecto al problema relacionado con la abrasividad de los compuestos de hierro se notó que cuando éstos eran molidos y aproximados a los parámetros requeridos por API para la barita, producían un efecto abrasivo muy alto que destruían las válvulas, asientos, camisas, pistones de las bombas de lodo y centrífugas; motivado a que las partículas, aún siendo pasante malla 200 poseen una estructura en forma de aglomerados de cristales con aristas agudas, a diferencia de la estructura redondeada que posee la barita.

3.6.2) OPTIMIZACIÓN DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE BAJA Y MEDIANA INTENSIDAD COMO MÉTODOS IMPORTANTES EN MATERIA DE CONCENTRACIÓN DE MINERALES DE BAJO TENOR.

Monzón (8) realizó pruebas de Separación Magnética, empleando un separador magnético de baja intensidad y otro de mediana intensidad, cuyas características se muestran en los anexos 2 y 3 respectivamente. Luego de realizar diferentes pruebas en donde se varió los parámetros de porcentaje de alimentación por minuto (%Vibraciones/min.) y la velocidad del tambor, encontró que los resultados mas óptimos fueron:

En la Separación Magnética de Baja Intensidad: los mejores resultados obtenidos fueron con una alimentación de 35% Vibraciones/min. (0.025 T/h) y 2 rpm.

En la Separación Magnética de Mediana Intensidad: los mejores resultados obtenidos fueron con una alimentación de 35% Vibraciones/min. (0.049 t/h) y 3 rpm.

3.6.3)EXPERIENCIAS REALIZADAS POR EL PERSONAL DE LA PLANTA PILOTO DE CONCENTRACIÓN.

El personal de la Planta Piloto de Concentración en el año 2002 realizó pruebas de molienda en un molino de jarra de 22 lts. Variaron la carga de los cuerpos moledores (bolas de acero) en cantidad y diámetro, por lo tanto en peso. El mejor resultado que se obtuvo se observa en la tabla 3.7.

Tabla N: 3.7 Carga de bolas utilizadas por el personal de la Planta Piloto de Concentración.

TAMAÑO DE BOLAS (mm)	CANTIDAD DE BOLAS	PESO DE BOLAS (Kg.)
37.5	29	7.6
31.5	42	4.8
25.5	68	4.0
19.0	204	6.3
12.5	516	4.1

Con una razón de carga:

$R_c = \text{Carga de Bolas} : \text{Carga de mineral.}$

$R_c = 26.8 : 1.9$

CAPITULO IV

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La muestra estudiada es un mineral de alto tenor (66.35 % Fe) denominado FPF-1; el cual presenta las siguientes características físicas y químicas:

Propiedades Físicas: en la tabla 4.1 proporcionada por la empresa Ferrominera Orinoco C.A., se reflejan las características físicas estándares de un mineral FPF-1.

Tabla N° 4.1 Análisis Granulométrico estándar del mineral FPF-1

Malla	Tamaño (µm)	%Pasante ± 2.76
10	1700	94.43
20	850	84.91
35	500	75.73
70	212	58.34
100	150	46.79
150	106	37.19
200	75	28.29
250	63	24.24
325	45	19.59
C1	38	10.05
C2	33	6.34
C3	23	4.33
C4	15	3.29
C5	11	3.02
C6	2	0

Análisis Químicos:

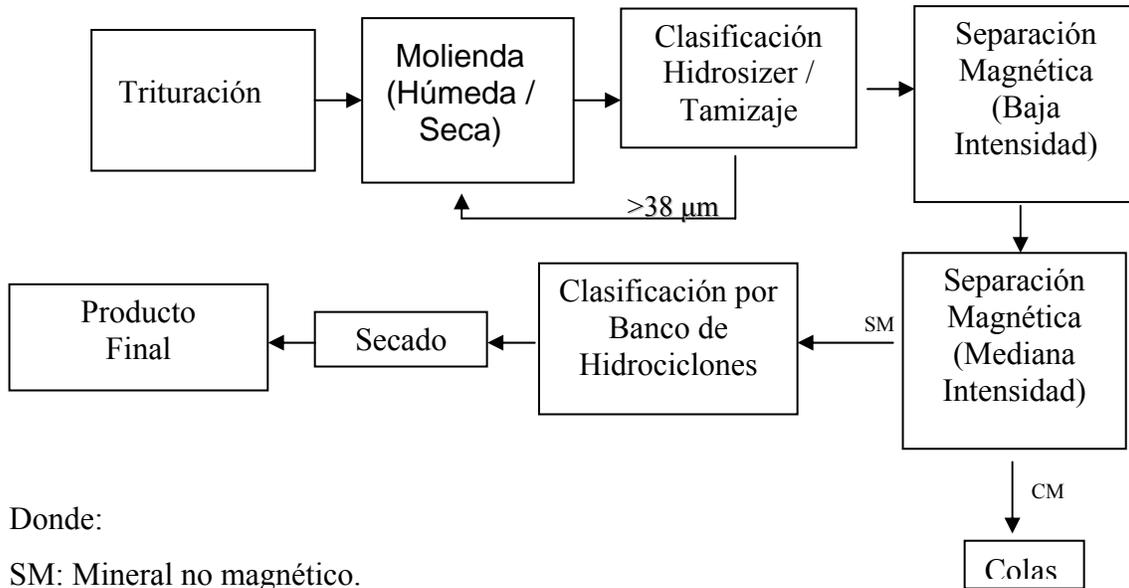
Tabla N° 4.2 Análisis químico del mineral FPF-1, proporcionado por la empresa Ferrominera Orinoco C.A.

%SiO₂	%Al₂O₃	%PPC	%P	%Mn
0.74	0.59	2.11	0.04	0.04

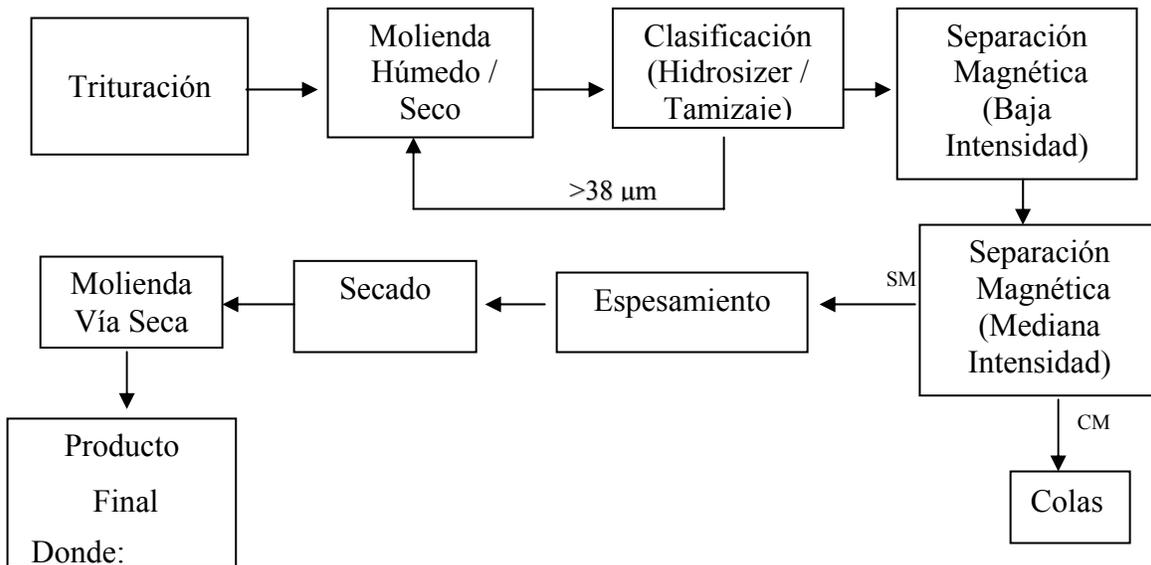
%PPC: Pérdidas Por Calcinación.

Los circuitos evaluados fueron:

Circuito N°1.



Circuito N°2:



SM: Mineral no magnético.

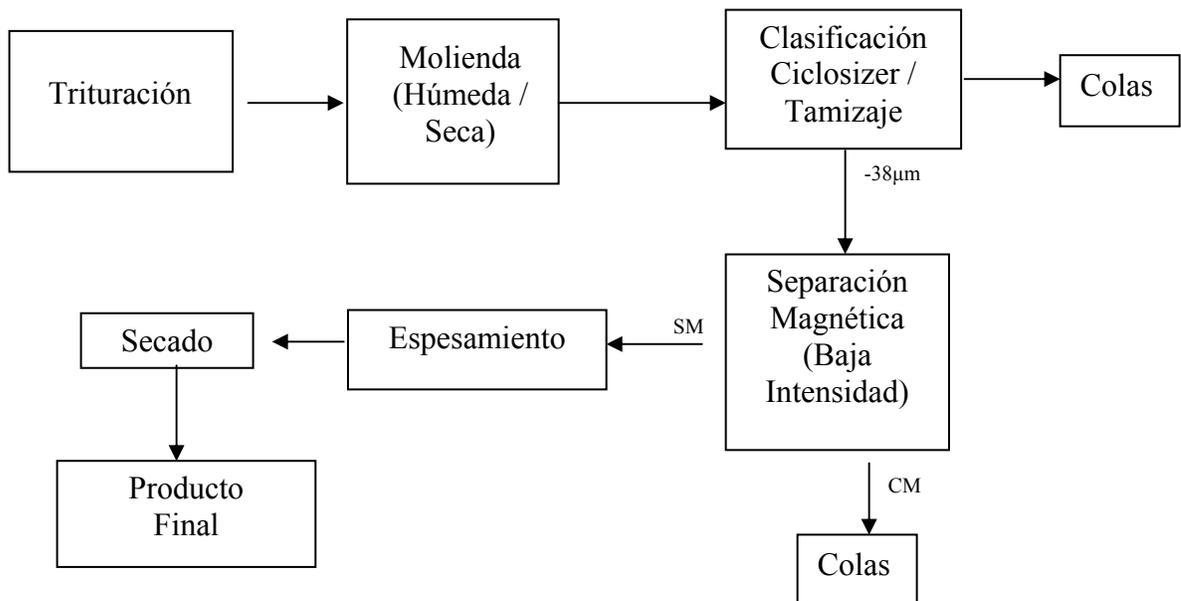
CM: Mineral Magnético (Magnetita)

Se realizaron algunas modificaciones a los circuitos anteriores debido a que algunos de los equipos requeridos no estaban disponibles, tal es el caso del filtro que no tenía tela de

filtrado, no habían separadores magnéticos de baja y mediana intensidad que funcionaran en húmedo, el hidrosizer cuya capacidad (t/h) era demasiado alta para la cantidad de mineral que se debía procesar y faltaban hidrociclones en el banco de hidrociclones.

Los circuitos usados realmente fueron:

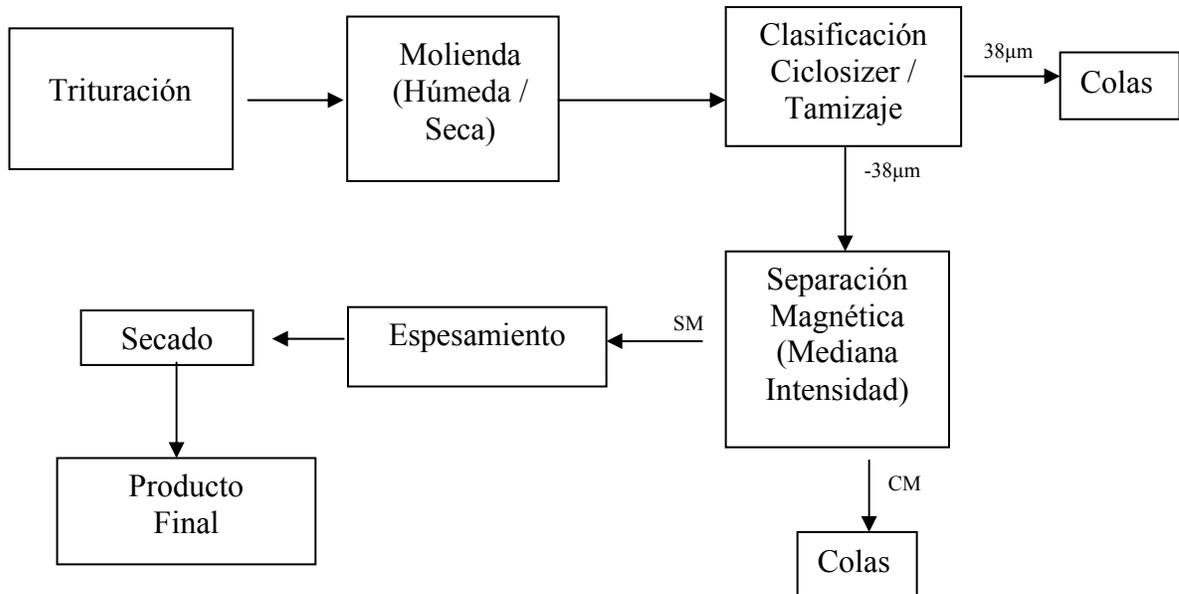
Circuito N°1:



Donde:

SM: Mineral no magnético.

CM: Mineral Magnético (Magnetita)

Circuito N°2:

Donde:

SM: Mineral no magnético.

CM: Mineral Magnético (Magnetita)

4.1) TRITURACIÓN:

En ambos casos la trituración realizada es una etapa de preparación del mineral; la cual no se tomará en cuenta a la hora de diseñar el flujograma final a escala industrial. Esta etapa se realizó en un triturador de rodillos con su mínima abertura (1mm).

4.2) MOLIENDA:

La reducción de tamaño se llevó a cabo mediante la utilización de un molino de jarra de 22lts. de capacidad, con una velocidad de 60 rpm, una relación de carga de 26:1,9, en húmedo y en seco, una dilución de la pulpa de 75% de sólido (en húmedo). En esta etapa de la investigación se determinó el tiempo óptimo de molienda para alcanzar una

granulometría con un 90% pasante malla 400 (D_{90}), sin variar ninguno de los parámetros antes señalados. Los períodos de tiempo empleados fueron 10, 15, 20, 25, 30, 35, y 40 min., utilizando el material FPF-1 con y sin magnetita.

4.2.1) CÁLCULO DEL INDICE DE BOND:

Se siguieron los pasos especificados en el ensayo normalizado de moliendabilidad explicado en el punto 3.2 del Marco Teórico.

4.3) CLASIFICACIÓN:

4.3.1) HIDROSEPARADOR (Hidrosizer): No se pudo utilizar el hidroseparador que se encuentra en el laboratorio; debido a que el mismo funciona con un flujo mínimo de alimentación de 500kg/ hr y no se contaba con el suficiente mineral para cubrir este parámetro, además de ello, por lo extenso de esta investigación, el tiempo requerido para llevar a cabo la misma, resultó insuficiente.

La clasificación a escala de laboratorio del material obtenido de la molienda se llevó a cabo mediante la utilización de una serie de tamices movidos con un equipo ROP-TAP y del ciclosizer; a través de los cuales se logró realizar un análisis granulométrico completo de las muestras; cuyo peso a analizar fue 100 a 120 grs. aproximadamente cada experiencia.

4.3.2) ROP-TAP: es un equipo de tamizado mecánico en el que se emplearon los siguientes tamices: 10, 20, 35, 70, 100, 150, 200, PAN, para estudiar la alimentación del sistema. En el caso de las muestra ya molidas, los tamices utilizados fueron: 35, 70, 100, 150, 200, 250, 325, PAN. Luego el pasante de la malla 325 fue analizado por el CICLOSIZER, donde se clasifica el material por medio de 5 ciclones de diferentes tamaños

y en los que se obtienen los siguientes cortes granulométricos: C1= 38 μm , C2= 33 μm , C3= 23 μm , C4= 15 μm , C5= 11 μm .

El tiempo empleado en el ROP-TAP fue de 15 min. y en el ciclosizer fue de 10 min.

Como las muestras presentaban grandes cantidades de ultrafinos, se tuvo que deslamar con la malla 325 a cada una de las muestras antes de comenzar el análisis granulométrico, luego la fracción pasante 325 (-325) del ROP-TAP se unió a la fracción anterior y este conjunto fue la muestra que se incorporó al CICLOSIZER para continuar el análisis granulométrico.

4.3.3) CICLOSIZER: en este equipo se siguieron los siguientes pasos:

- Se agregó la muestra en el recipiente de alimentación.
- Se verificó que el equipo contara con la alimentación de agua adecuada.
- Se enciende el equipo.
- Se fijaron las condiciones de trabajo: presión de agua 100 KPA (Kilo Pascal), temperatura del agua 30°C aproximadamente.
- Se verificó que los 5 ciclones estén cerrados, para luego abrirlos con la finalidad de eliminar en cada uno de ellos el aire contenido.
- Se programó el equipo a un tiempo de 10 min.
- Se abrió el canal de alimentación de las muestras; la cual fue pasando por cada uno de los ciclones, siendo agitada por una fuerza centrífuga que separa el material pesado (grueso) hacia la parte superior y el más liviano (fino) hacia los siguientes niveles.
- Luego de haber transcurrido los 10 min. el equipo acciona una alarma que indica que se puede llevar a cabo la recolección de cada una de las muestras que quedaron en los diferentes ciclones. Esto se hace por medio de una manguera de escape ubicada en la parte superior de cada ciclón. En esta etapa el color del agua fue el indicador de la presencia o no de material.

- Las cinco muestras obtenidas (C1, C2, C3, C4, C5) fueron secadas en una estufa y luego pesadas.
- El material pasante C5 fue determinado por diferencias de pesos entre la cantidad entrante y la sumatoria de todos los pesos retenidos en cada uno de los ciclones.

4.4) SEPARACIÓN MAGNÉTICA:

Se utilizaron dos separadores magnéticos: uno de baja intensidad (1500 Gauss) y otro de mediana intensidad (7000 Gauss). Se tomó como referencia los valores obtenidos por Monzón D. (8):

En la separación magnética de Baja Intensidad : 35% Vibraciones/min. de alimentación (0.025T/h) y 2 rpm en el tambor, mientras que para la separación magnética de Mediana Intensidad: 40% Vibraciones/min. de alimentación (0.049T/h) y 3rpm. Estos valores se verificaron realizando pruebas con un rango de valores por encima y por debajo de los mismos y calculando la magnetita equivalente con un equipo destinado para tal fin (SATMAGAN). En esta etapa del circuito se estudió la ubicación más óptima de la separación magnética, realizándola antes y después de la molienda en seco y en húmedo.

Las especificaciones de los equipos de separación magnética empleados son detalladas en los Anexos.

Para determinar el porcentaje de magnetita equivalente de los diferentes productos de la separación magnética, se empleó el equipo SATMAGAN, siguiendo los siguientes pasos: una vez encendido el equipo se esperan 10 minutos para dejar que el sistema se estabilice, luego se coloca una pequeña cantidad de mineral en el portamuestra del equipo (el material debe ser 100% pasante malla 100) y se procede a realizar la lectura (Lc). Esta lectura (Lc) forma parte de una ecuación que nos revelará el contenido de magnetita equivalente presente en la muestra:

$$\%Mg = 1.8 + (0.115 * Lc) \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

$\%Mg$ = % de Magnetita Equivalente.

Lc = lectura proporcionada por el SATMAGAN.

4.5) ESPESAMIENTO:

Se llevaron a cabo cuatro (4) pruebas:

- El mineral de manera natural sin utilizar ningún tipo de químicos o depresantes, se denotó como (S).
- Se agregó floculante al 3%, se denotó como (SF).
- Se añadió almidón al 3% ,se denotó como (SA)
- Se utilizaron ambos químicos, el floculante y el almidón, en las mismas proporciones empleadas en las anteriores pruebas, se denotó como (SFA).

Todas las Pruebas se dejaron asentar por un tiempo prolongado (81 min), evidenciándose la sedimentación de los sólidos y la clarificación del agua.

La disolución de la pulpa empleada fue de 65% de sólido; la cual se logró diluyendo 200 gr. del mineral molido a 30min. en húmedo y sin magnetita (TM30HSM) en 110ml. de agua. Se hicieron 4 pulpas con estas descripciones y se colocaron en 4 envases que contenían 800ml. de agua cada uno. Posteriormente se les añadió el almidón o el floculante como se explicó en el párrafo anterior.

El almidón utilizado en esta prueba es el mismo que se emplea en la Planta Piloto de Concentración y que es añadido como depresante del hierro en las columnas de flotación (780 ml/ ton.), con el fin de concentrar el mineral de hierro de bajo tenor. El procedimiento para la preparación del almidón al 3% es el siguiente:

Insumos requeridos:

- 5 Kgs de almidón de yuca y maíz.
- 3.2 Kgs de Hidróxido de Sodio (NaOH).
- 200 lts de agua.
- Agitador para hacer almidón.

Se agregan 50 lts de agua aproximadamente en el agitador y se enciende el mismo, se añaden los 5 Kgs de almidón, para homogeneizar la solución se esperan 2-5 min. Luego se agregan los 3.2 Kgs de NaOH y se completan los 200 lts. de agua requeridos. Finalmente se apaga el equipo.

Para realizar esta prueba se tomó una pequeña cantidad de este almidón (15.6ml) determinada de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} 780\text{ml} \text{ ----- } 1 \times 10^6 \text{ gr.} \\ X \text{ ----- } 200 \text{ gr.} \end{array}$$

$X = 0.156 \text{ ml de almidón al } 3\%$, aproximando: 1 ml de almidón al 3%

El floculante empleado en esta experiencia, también es utilizado en la Planta Piloto para sedimentar sólidos (65gr de floculante por cada 200 lts) llamado comercialmente "Areofloc". La cantidad a utilizar se determinó de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} 65 \text{ gr} \text{ ----- } 200.000\text{ml} \\ X \text{ ----- } 100\text{ml} \end{array}$$

$X = 0.0325 \text{ gr de floculante al } 3\%$

De este reactivo químico se disolvieron 0.0325 gr. En 100ml. de agua, esto para tener una solución diluida al 3%.

4.6) FILTRADO:

Estas experiencias no se pudieron llevar a cabo, debido a la falta de finas telas de filtrado con aberturas inferiores a 400 mallas (38 μm). Estas mallas, fueron solicitadas y compradas en el exterior, pero no llegaron a tiempo para su empleo en las pruebas necesarias.

4.7) SECADO:

Se procedió a retirar el mineral sedimentado de cada uno de los envases, se colocaron en bandejas, mediante el empleo de una estufa y de un cronómetro, se determinó la % humedad eliminada (% h_v) cada 2 min, hasta que tomara un valor constante.

$$\%h_v = (P_o - P_f) / P_o * 100$$

Donde:

% h_v = % de humedad eliminada.

P_o = peso inicial.

P_f = peso final.

4.8) PRUEBA ADICIONAL:

Esta prueba consistió en realizar una reducción de tamaño utilizando dos pulverizadores diferentes: uno horizontal de discos marca: BICO inc. y otro vertical de discos marca: SIEBTECHNIK modelo TS , variando para el primero, la abertura y para el segundo el tiempo de pulverizado.

El molino de disco vertical SIEBTECHNIK modelo TS, consiste esencialmente en:

1. La parte superior del motor, incluyendo muelles helicoidales y anillo de retención.
2. El cierre.

3. El accionamiento excéntrico que consta de un motor trifásico.

El molino de disco horizontal BICO , tiene las siguientes especificaciones:

1. La reducción de tamaño se da desde $\frac{1}{4}$ " hasta 150 – 200 mallas.
2. Disponible en 2, 3 y 5 HP, 50 / 60 ciclos, 220 / 380 / 440 / 575 Volts.

CAPITULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1) MOLIENDA TANTO EN SECO COMO EN HÚMEDO CON Y SIN MAGNETITA:

5.1.1) MOLIENDA EN SECO CON MAGNETITA: El mejor resultado que se obtuvo fue con la molienda TM30 (Triturado “T” y Molido “M” en seco durante 30 min. y con Magnetita), lográndose obtener un 72.68 % pasante malla 400.

Tabla N° 5.1.1 Análisis Granulométrico de la molienda en seco con magnetita (30min).

MALLA	MICRA	PESO(gr.) ± 0.01	%RET	%RET ACUM	%PASANTE ACUM
35	500	1.62	0.74	0.74	99.26
70	212	0.01	0.00	0.75	99.25
100	150	0.06	0.03	0.77	99.23
150	106	0.5	0.23	1.00	99.00
200	75	5.93	2.71	3.71	96.29
250	63	9.91	4.53	8.24	91.76
325	45	18.57	8.49	16.74	83.26
400	38	23.14	10.58	27.32	72.68
-400	-38	158.96	72.68	100.00	0.00
TOTAL		218.70			

5.1.2) MOLIENDA EN SECO SIN MAGNETITA: El mejor resultado que se obtuvo fue con la molienda TM30SM (Triturado “T” y Molido “M” en seco durante 30 min. y sin magnetita “SM”), lográndose obtener un 76.99 % pasante malla 400

Tabla N° 5.1.2 Análisis Granulométrico de la molienda en seco sin magnetita (30 min)

MALLA	MICRA	PESO(gr.) ±0.01	%RET	%RET ACUM	%PASANTE ACUM
35	500	0.11	0.04	0.04	99.96
70	212	0.05	0.02	0.06	99.94
100	150	0.11	0.04	0.1	99.90
150	106	0.60	0.23	0.33	99.67
200	75	5.74	2.20	2.54	97.46
250	63	10.42	4.00	6.54	93.46
325	45	20.31	7.79	14.33	85.67
400	38	22.63	8.68	23.01	76.99
-400	-38	200.60	76.99	100.00	0.00
TOTAL		260.57			

De los resultados anteriores se puede observar que la molienda en seco no arroja buenos resultados: el máximo porcentaje que se pudo obtener fue 76.99% pasante malla 400 (en la molienda sin magnetita), lo que si se evidencia es que la magnetita resultó ser un mineral un poco más duro que la hematita; ya que en la molienda en seco con magnetita, se obtuvo un porcentaje pasante malla 400 menor (72.68 %). Ninguna de las dos moliendas anteriores arrojaron productos que cumplan con la especificación primordial de un D90 malla 400; por lo que ambas son rechazadas a la hora del diseño del flujograma final para la producción de ORIMATITA. Además de ello en la molienda en seco se genera mucho polvo, lo que se traduce en pérdidas de las partículas finas.

5.1.3) MOLIENDA EN HÚMEDO CON MAGNETITA: El mejor resultado que se obtuvo fue con la molienda TM30H (Triturado “T” y Molido “M” en Húmedo “H” con Magnetita durante 30 min.), lográndose obtener un 89.88 % pasante malla 400.

Tabla N° 5.1.3 Análisis Granulométrico de la molienda en húmedo con magnetita (30min.)

MALLA	MICRA	PESO(gr.) ±0.01	%RET	%RET ACUM	%PASANTE ACUM
35	500	0,83	0,71	0,71	99,29
70	212	0,00	0,00	0,71	99,29
100	150	0,04	0,03	0,74	99,26
150	106	0,02	0,02	0,76	99,24
200	75	0,11	0,09	0,85	99,15
250	63	0,61	0,52	1,37	98,63
325	45	2,29	1,95	3,31	96,69
C1	38	8,01	6,81	10,12	89,88
C2	33	22,65	19,25	29,37	70,63
C3	23	23,12	19,65	49,02	50,98
C4	15	16,91	14,37	63,39	36,61
C5	11	10,17	8,64	72,04	27,96
<C5	2	32,90	27,96	100,00	0,00
TOTAL		117,66			

Tabla N° 5.1.3.1 Especificaciones de Rango de Tamaños en TM30H

ESPECIFICACIONES REQUERIDAS		RESULTADOS OBTENIDOS	DESVIACIÓN
TAMAÑO	%PAS. ACUM		
75-40 µm =	8,7	2,46	6.24
40-6 µm =	67,22	61,92	5.3
<6 µm =	23,46	35,62	12.16

5.1.4) MOLIEDA EN HÚMEDO SIN MAGNETITA: El mejor resultado que se obtuvo fue con la molienda TM30HSM (Triturado “T” y Molido “M” en Húmedo “H” durante 30 min. Y sin Magnetita), lográndose obtener un 89.07 % pasante malla 400.

Tabla N° 5.1.4 Análisis Granulométrico de la molienda en húmedo sin magnetita.

MALLA	MICRA	PESO(gr.) ±0.01	%RET	%RET ACUM	%PASANTE ACUM
35	500	0,00	0,00	0,00	100,00
70	212	0,00	0,00	0,00	100,00
100	150	0,00	0,00	0,00	100,00
150	106	0,02	0,02	0,02	99,98
200	75	0,11	0,11	0,13	99,87
250	63	0,04	0,04	0,17	99,83
325	45	0,58	0,59	0,76	99,24
C1	38	9,99	10,17	10,93	89,07
C2	33	17,74	18,05	28,98	71,02
C3	23	16,95	17,25	46,23	53,77
C4	15	12,53	12,75	58,99	41,01
C5	11	7,65	7,79	66,77	33,23
<C5	2	32,65	33,23	100,00	0,00
TOTAL		98,26		0,00	

Tabla N° 5.1.4.1 Especificaciones de Rango de Tamaños en TM30HSM.

ESPECIFICACIONES REQUERIDAS		RESULTADOS OBTENIDOS	DESVIACIÓN
TAMAÑO	%PAS. ACUM		
75-40 µm =	8,7	0,63	8,07
40-6 µm =	67,22	55,84	11,38
<6 µm =	23,46	43,53	20,07

NOTA: el resto de los resultados obtenidos se encuentran en los anexos.

De los resultados anteriores se puede notar que la molienda en húmedo arroja mejores resultados que la molienda en seco; ya que se aproxima bastante al D90, tanto en la molienda con magnetita como en la molienda sin magnetita, siendo 89.88% y 89.07%

respectivamente. Pudiera decirse que son resultados bastante buenos; sin embargo, ninguna de las dos moliendas en húmedo cumplen con la segunda especificación (especificaciones por rango de tamaños): para los dos primeros rangos (75-40 μ y 40-6 μ) los tamaños que se tienen en TM30HSM son: 0.63% y 55.83% pasante respectivamente, los mismos están muy por debajo de los valores requeridos que son 8.7% y 67.22%; mientras que para los ultrafinos <6 μ m se obtuvo 43.53% y debe ser 23.46% pasante. Lo que significa que realizando una molienda con molinos de bolas bien sea en seco o en húmedo, no se puede alcanzar la granulometría requerida para la obtención de la ORIMATITA, por lo que se hace necesario optimizar la molienda con la utilización de un equipo de clasificación. En el caso de la molienda en húmedo y a escala industrial se puede emplear un Hidrociclón inmediatamente después del molino, que permita separar las partículas mayores a 38 μ m, para ser llevadas nuevamente al molino, mientras las partículas menores a 38 μ m, pasen a la siguiente etapa del circuito, de esta manera se evita la sobremolienda del mineral y el producto obtenido puede cumplir con todas las especificaciones requeridas.

Otra manera de obtener un producto que cumpla con todas las características deseadas es implementando una de molienda con equipos de mayor tecnología, tal es el caso del molino vertical (Vertimill), que es un equipo especializado para el procesamiento de mineral fino.

En el Anexo 1 se presentan tablas con los resultados de la distribución de tamaño obtenida en todos los ensayos.

5.1.5) INDICE DE BOND:

El índice de Bond obtenido fue:

$$W_i = 18.46$$

$$F_{80} = 440.39$$

$$P_{80} = 41.88$$

Lo que quiere decir que el consumo específico de energía fue de:

$$E = Wi(10/\sqrt{P_{80}} - 10/\sqrt{F_{80}})$$

$$E = 19.72 \text{ KWh. / ton}$$

Este consumo de energía es alto, aproximadamente 2.4 veces mayor que el consumo de energía del molino de pebbles que se tiene en la Planta Piloto de Concentración, que es de 8.75 KWh/ton. , ésto se debe a que el producto (ORIMATITA) es un material demasiado fino (90% pasante malla 400) y por lo tanto se debe emplear más energía para lograr obtener dicha granulometría. Esto se traduce en costos operacionales elevados.

5.2) REDUCCIÓN DE TAMAÑO POR PULVERIZACIÓN:

5.2.1) PULVERIZADOR HORIZONTAL (BICO Inc.) CON UNA ABERTURA DE (3mm):

Tabla N° 5.2.1 Análisis Granulométrico del pulverizado con abertura (3mm)

MALLA	MICRA	PESO(gr.) ±0.01	%RET	%RET ACUM	%PASANTE ACUM
35	500	14,62	13,60	13,60	86,40
70	212	23,31	21,68	35,28	64,72
100	150	12,71	11,82	47,10	52,90
150	106	10,51	9,77	56,87	43,13
200	75	12,19	11,34	68,21	31,79
250	63	6,15	5,72	73,93	26,07
325	45	5,55	5,16	79,09	20,91
C1	38	12,12	11,27	90,36	9,64
C2	33	4,00	3,72	94,08	5,92
C3	23	2,02	1,88	95,96	4,04
C4	15	1,17	1,09	97,05	2,95
C5	11	0,46	0,43	97,48	2,52
<C5	2	2,71	2,52	100,00	0,00
TOTAL		107,52			

Tabla N° 5.2.1.1 Especificaciones de Rango de Tamaños en Pulverizador Horizontal (3mm).

ESPECIFICACIONES REQUERIDAS TAMAÑO %PAS. ACUM		RESULTADOS OBTENIDOS	DESVIACIÓN
75-40 μm =	8,7	10,88	2,18
40-6 μm =	67,22	7,12	60,1
<6 μm =	23,46	82	58,54

5.2.2) PULVERIZADOR HORIZONTAL CON UNA ABERTURA DE (2mm):

Tabla N° 5.2.2 Análisis Granulométrico del pulverizado con abertura (2mm)

MALLA	MICRA	PESO(gr.) ± 0.01	%RET	%RET ACUM	%PASANTE ACUM
35	500	19,11	16,88	16,88	83,12
70	212	23,03	20,34	37,21	62,79
100	150	12,20	10,77	47,98	52,02
150	106	10,31	9,10	57,09	42,91
200	75	11,93	10,53	67,62	32,38
250	63	6,35	5,61	73,23	26,77
325	45	5,54	4,89	78,12	21,88
C1	38	13,23	11,68	89,81	10,19
C2	33	4,65	4,11	93,91	6,09
C3	23	2,4	2,12	96,03	3,97
C4	15	1,5	1,32	97,36	2,64
C5	11	0,58	0,51	97,87	2,13
<C5	2	2,41	2,13	100,00	0,00
TOTAL		113,24			

Tabla N° 5.2.2.1 Especificaciones de Rango de Tamaños en Pulverizador Horizontal (2mm).

ESPECIFICACIONES REQUERIDAS TAMAÑO %PAS. ACUM		RESULTADOS OBTENIDOS	DESVIACIÓN
75-40 μm =	8,7	10,5	1,8
40-6 μm =	67,22	8,06	59,16
<6 μm =	23,46	12,75	10,71

5.2.3) PULVERIZADOR VERTICAL CON UN TIEMPO DE 1 MIN:

Tabla N° 5.2.3 Análisis Granulométrico del pulverizado vertical con 1min de tiempo.

MALLA	MICRA	PESO(gr.) ±0.01	%RET	%RET ACUM	%PASANTE ACUM
35	500	0,00	0,00	0,00	100,00
70	212	5,89	5,07	5,07	94,93
100	150	11,43	9,84	14,91	85,09
150	106	11,81	10,17	25,08	74,92
200	75	13,85	11,92	37,00	63,00
250	63	7,46	6,42	43,43	56,57
325	45	7,33	6,31	49,74	50,26
C1	38	12,57	10,82	60,56	39,44
C2	33	16,22	13,96	74,52	25,48
C3	23	7,5	6,46	80,98	19,02
C4	15	5,38	4,63	85,61	14,39
C5	11	2,76	2,38	87,99	12,01
<C5	2	13,95	12,01	100,00	0,00
TOTAL		116,15			

Tabla N° 5.2.3.1 Especificaciones de Rango de Tamaños en Pulverizador Vertical (1min.)

ESPECIFICACIONES REQUERIDAS		RESULTADOS OBTENIDOS	DESVIACIÓN
TAMAÑO	%PAS. ACUM		
75-40 µm =	8,7	12,74	4,04
40-6 µm =	67,22	27,43	39,79
<6 µm =	23,46	59,83	36,37

5.2.4) PULVERIZADOR VERTICAL CON UN TIEMPO DE 2 MIN:

Tabla N° 5.2.4 Análisis Granulométrico del pulverizado vertical con 2min de tiempo.

MALLA	MICRA	PESO(gr.) ±0.01	%RET	%RET ACUM	%PASANTE ACUM
35	500	0,00	0,00	0,00	100,00
70	212	0,27	0,36	0,36	99,64
100	150	1,27	1,71	2,08	97,92
150	106	4,87	6,56	8,64	91,36
200	75	9,07	12,22	20,86	79,14
250	63	5,56	7,49	28,35	71,65
325	45	5,35	7,21	35,56	64,44
C1	38	13,52	18,22	53,78	46,22
C2	33	10,73	14,46	68,24	31,76
C3	23	5,47	7,37	75,61	24,39
C4	15	4,33	5,83	81,44	18,56
C5	11	2,4	3,23	84,68	15,32
<C5	2	11,37	15,32	100,00	0,00
TOTAL		74,21			

Tabla N° 5.2.4.1 Especificaciones de Rango de Tamaños en Pulverizador Vertical (2min.)

ESPECIFICACIONES REQUERIDAS		RESULTADOS OBTENIDOS	DESVIACIÓN
TAMAÑO	%PAS. ACUM		
75-40 µm =	8,7	14,7	6
40-6 µm =	67,22	30,9	36,32
<6 µm =	23,46	54,4	30,94

Se puede observar en los resultados anteriores, que con ninguno de los 2 pulverizadores, se obtiene el D90 pasante malla 400 y mucho menos las especificaciones en cuanto a los rangos de tamaños. Lo que indica que la ORIMATITA no puede ser obtenida por medio de este tipo de pulverizadores.

5.3) SEPARACIÓN MAGNÉTICA:

5.3.1) SEPARADOR MAGNÉTICO DE TAMBOR DE BAJA INTENSIDAD:

Tabla 5.3.1 Resultados obtenidos de la separación magnética antes de moler:

	%Vibr:42.5 nVueltas: 3	% Vibr:50 nVueltas:3	% Vibr: 2.5 nVueltas:3.5	% Vibr:2.5 nVueltas:2.5	%Vibr:42.5 nVueltas:2.5	%Vibr:42.5 nVueltas:2.5
Peso Inicial (gr)	1900	1900	1900	1900	1900	1900
Peso Adharido (gr)	97.04	66.47	78.52	103.23	103.23	109.57

Tabla 5.3.2 Cantidad de Magnetita Equivalente presente en los diferentes productos de separación magnética de baja intensidad.

MUESTRA			LECTURA	MAG. EQUIVALENTE (%)	Valores de referencia
n Vueltas	%Vibra	Fracción			
2	25	Psm	9	2,835	
2	25	Pcm	19	3,985	
2	30	Psm	9	2,835	
2	30	Pcm	16	3,64	
2	35	Psm	10	2,95	
2	35	Pcm	15,5	3,5825	
2	40	Psm	10	2,95	
2	40	Pcm	18	3,87	
2	45	Psm	10	2,95	
2	45	Pcm	10	2,95	
1,5	35	Psm	9	2,835	
1,5	35	Pcm	18	3,87	
2,5	35	Psm	10	2,95	
2,5	35	Pcm	16	3,64	
3	35	Psm	11	3,065	
3	35	Pcm	18	3,87	

Donde: Psm = Fracción Sin Magnetita, Pcm = Fracción Con Magnetita

Los valores resaltados como Valores de referencia son los obtenidos por Monzón (8).

Con la utilización del SATMAGAN se verificaron los resultados obtenidos por Monzón D.(8) y con ello, se determinó implementar la separación magnética de baja intensidad con una velocidad 2 rpm en el tambor y 35% de vibración en la alimentación, obteniéndose 2.95% de magnetita equivalente, ésto mediante la utilización de la fórmula ($\%Mg = 1.8 + (0.115 * Lc)$).

Es importante resaltar que la magnetita requerida en las especificaciones del producto final (Orimatita), debe ser lo más cercano posible a 0%, por lo cual, se recomienda realizar a futuro, pruebas con este contenido de magnetita (2.9%) para verificar o descartar su posible utilización como agente densificante.

A pesar de utilizar los parámetros anteriores (2 rpm, 35% Vibr.) que son bastantes lentos en el proceso en seco, se generó: mucho polvo, perdidas de material y contaminación ambiental, cuestión que no sucede en el circuito en húmedo.

Las pruebas de separación magnética de baja intensidad en húmedo, a escala de laboratorio, no se pudieron realizar por no tener disponible un equipo de estas características en el laboratorio; sin embargo, se puede decir que a escala industrial se puede emplear un equipo similar al separador magnético de baja intensidad ERIEZ (04-015), que está en funcionamiento en la Planta Piloto de Concentración y que su función es separar la magnetita presente en el material fino (pasante malla 200), este equipo sí cuenta con removedores y con la ayuda de la corriente de agua, el material no se adhiere al tambor, facilitando la remoción del material.

Se determinó que la separación magnética en seco debe realizarse antes de la molienda; ya que al pasar el material después de molido, éste queda adherido casi en su totalidad, siendo imposible removerlo del tambor del separador magnético; motivado a que este equipo no cuenta con removedores que faciliten el proceso de recolección, también se debe a que el equipo está diseñado para una alimentación de una granulometría entre 0.5 y 15 mm. y la que se está proporcionando al mismo es muy inferior (38 μ m).

5.3.2) SEPARADOR MAGNÉTICO DE TAMBOR DE MEDIANA INTENSIDAD.

Tabla 5.3.2 Resultados obtenidos de recuperación en pesos.

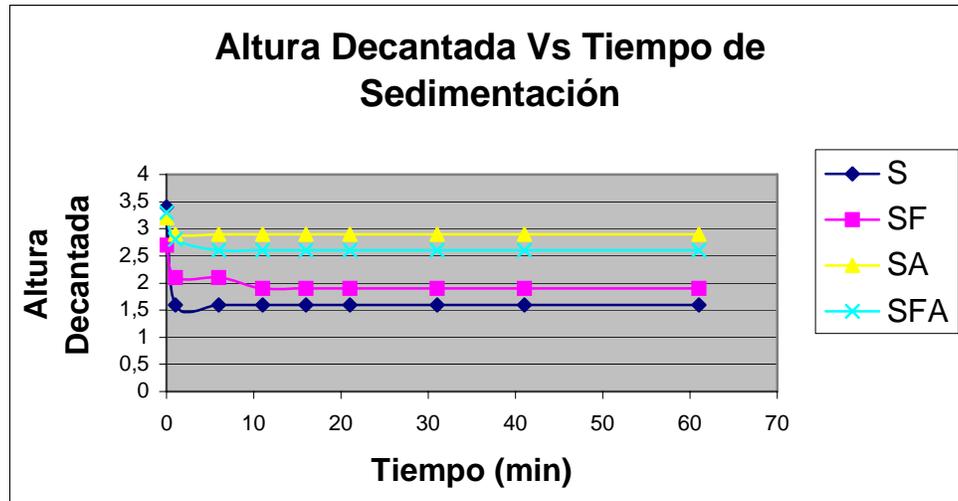
	%Vibr:42.5 nVueltas: 3	% Vibr:50 nVueltas:3	% Vibr:42.5 nVueltas:3.5	% Vibr:42.5 nVueltas:2.5
Peso Inicial (gr)	1900	1900	1900	1900
Peso Adherido (gr)	1838.25	1786.49.	1859.32	1796.10

La separación magnética de mediana intensidad realizada antes de moler el mineral no arrojó resultados satisfactorios; ya que casi todo el material procesado (1838.25 gr. de 1900gr, por ejemplo) respondió al campo magnético de 7000 gauss, queriendo decir que un 90% aproximado del FPF-1 es magnetita; lo cual no es cierto, debido a que este mineral tiene un contenido de 4% a 5% de magnetita. Lo que sí indica, es que el FPF-1 por ser una mezcla de diferentes tipos de minerales de hierro (hematita, magnetita, etc), es un mineral ferromagnético que posee alta susceptibilidad magnética y al estar expuesto a un campo de 7000 gauss, casi todas las partículas se adhieren al tambor del separador magnético.

5.4) ESPESAMIENTO:

Tabla 5.4 Resultado de los ensayos de espesamiento.

t (min)	Altura del Decantado (cm) En (S)	Altura del Decantado (cm) En (SF)	Altura del Decantado (cm) En (SA)	Altura del Decantado (cm) En (SFA)
0	3.4	2.7	3.2	3.3
1	1.9	2.1	2.9	2.8
6	1.6	2.1	2.9	2.6
11	1.6	1.9	2.9	2.6
16	1.6	1.9	2.9	2.6
21	1.6	1.9	2.9	2.6
31	1.6	1.9	2.9	2.6
41	1.6	1.9	2.9	2.6
61	1.6	1.9	2.9	2.6
81	1.6	1.9	2.8	2.6



Graf. N° 5.4: Altura decantada (cm) Vs Tiempo de Sedimentación.

Donde:

S = Sedimentado sin depresante.

SF = Sedimentado con Floculante.

SA = Sedimentado con Almidón.

SFA = Sedimentado con Floculante y Almidón.



Fig. 5.4.1 Estado final de las pruebas de sedimentación.

Al inicio de los 4 ensayos (S, SF, SA, SFA) inmediatamente se tornaron turbios (marrones) y se empezaron a formar los precipitados. A medida que fue pasando el tiempo, el agua de los ensayos SA y SFA fue aclarando, no así para S y SF que permanecieron casi iguales.

En todas las experiencias se formó una nata o capa espumosa en superficie del agua producto de la tensión superficial, la misma presentó variaciones en cada una de las pruebas: resultó ser más gruesa y pronunciada en S, además de poseer una fina capa de pequeñas partículas de hierro adheridas a ella. En SF esta capa es un poco más fina y con menos cantidad de partículas suspendidas. En SA la capa es mucho más fina y no presenta partículas suspendidas; pero sí, sobre el precipitado. En SFA el espesor de la capa es sumamente fina no presenta ningún tipo de partículas suspendidas en el líquido, el color del agua es mucho más clara que las que se tiene en S, SF y SA, lográndose distinguir con gran facilidad el precipitado resultante que además se formó rápidamente. (ver figura 5.4.1)

Se comprobó que añadiendo Floculante y almidón se acelera el proceso de sedimentación. Además de ello, en SF se evidenció la presencia de gránulos o flóculos de gran volumen; los cuales después de cierto tiempo se compactaron haciendo el decantado mucho más denso. Este mecanismo es conocido teóricamente como sinéresis mecánica.

Por su parte el almidón añadido en SA realizó una excelente labor al depresar el hierro haciéndolo más hidrofílico: el mineral se moja y decanta casi en su totalidad; sin embargo el agua producto de la sedimentación resultó ser más turbia que la obtenida de la sedimentación con Floculante (SF).

En SFA se obtuvo lo mejor de las características encontradas en SF y SA pero todo en un solo evento, lográndose obtener un decantado bien diferenciado y nutrido de hierro y un agua bastante clarificada; la cual puede ser utilizada nuevamente en el sistema como agua recirculada y de esta manera se logra contribuir con el ambiente haciendo un consumo racional del agua limpia proveniente de las tomas naturales.

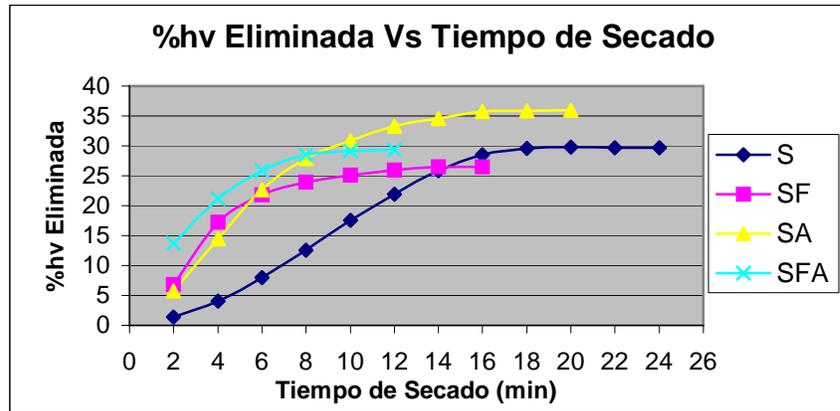
Determinándose así que la combinación de almidón y floculante como agentes que facilitan el proceso de sedimentación, fue el que mejor resultados arrojó a la hora de sedimentar el FPF-1 con una granulometría de D_{90} pasante malla 400 (ORIMATITA).

5.5) SECADO:

Tabla N° 5.5 Resultado del secado de las experiencias S, SF, SA, SFA

EXPERIENCIA: S			EXPERIENCIA: SF		
TIEMPO(min.)	PESO (gr)	%hv	TIEMPO (min.)	PESO (gr)	%hv
0	275,99		0	267,22	
2	272,13	1,40	2	249,09	6,78
4	264,75	4,07	4	221,20	17,22
6	253,90	8,00	6	209,03	21,78
8	241,30	12,57	8	203,19	23,96
10	227,50	17,57	10	200,05	25,14
12	215,49	21,92	12	197,83	25,97
14	204,60	25,87	14	196,36	26,52
16	197,37	28,49	16	196,34	26,52
18	194,42	29,56			
20	193,88	29,75			
22	194,20	29,64			
24	194,11	29,67			

EXPERIENCIA: SA			EXPERIENCIA: SFA		
TIEMPO (min.)	PESO (gr)	%hv	TIEMPO (min.)	PESO (gr)	%hv
0	308,23		0	278,12	
2	290,67	5,70	2	240,01	13,70
4	263,53	14,50	4	219,10	21,22
6	238,51	22,62	6	206,16	25,87
8	222,40	27,85	8	198,80	28,52
10	213,18	30,84	10	196,97	29,18
12	205,70	33,26	12	196,50	29,35
14	201,80	34,53			
16	198,10	35,73			
18	197,58	35,90			
20	197,40	35,96			



Graf. N° 5.5: % h_v Eliminada Vs Tiempo de Secado

Donde:

S = Sedimentado sin depresante.

SF = Sedimentado con Floculante.

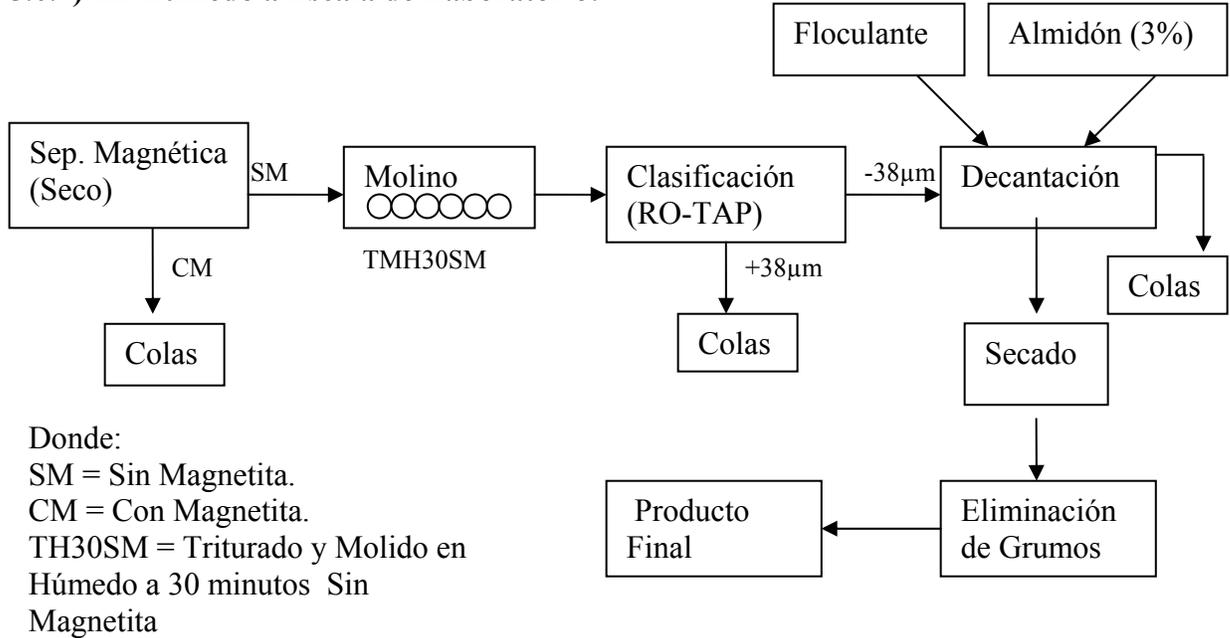
SA = Sedimentado con Almidón.

SFA = Sedimentado con Floculante y Almidón.

Tanto en las tablas como en el gráfico, se observa claramente que el ensayo en el cual se elimina mayor cantidad de humedad, es en el SA (35.95 % h_v) en un período de 20 min.; sin embargo, si se compara con el secado de SFA, que en tan solo 12 min. se logra eliminar aproximadamente 29% de humedad y el agua de producto de la decantación es mucho más limpia; es decir, se puede sacrificar unos pocos puntos de porcentaje de humedad eliminada a cambio de obtener un agua más limpia, que no contamine el ambiente o que pueda ser utilizada posteriormente en cierta parte del sistema de producción como agua recirculada y así, evitar el consumo excesivo de agua limpia o proveniente de las tomas de agua. Por ello, el secado del SFA es el más óptimo .

5.6) PROPUESTAS DE DIAGRAMAS PARA LA OBTENCIÓN DE ORIMATITA

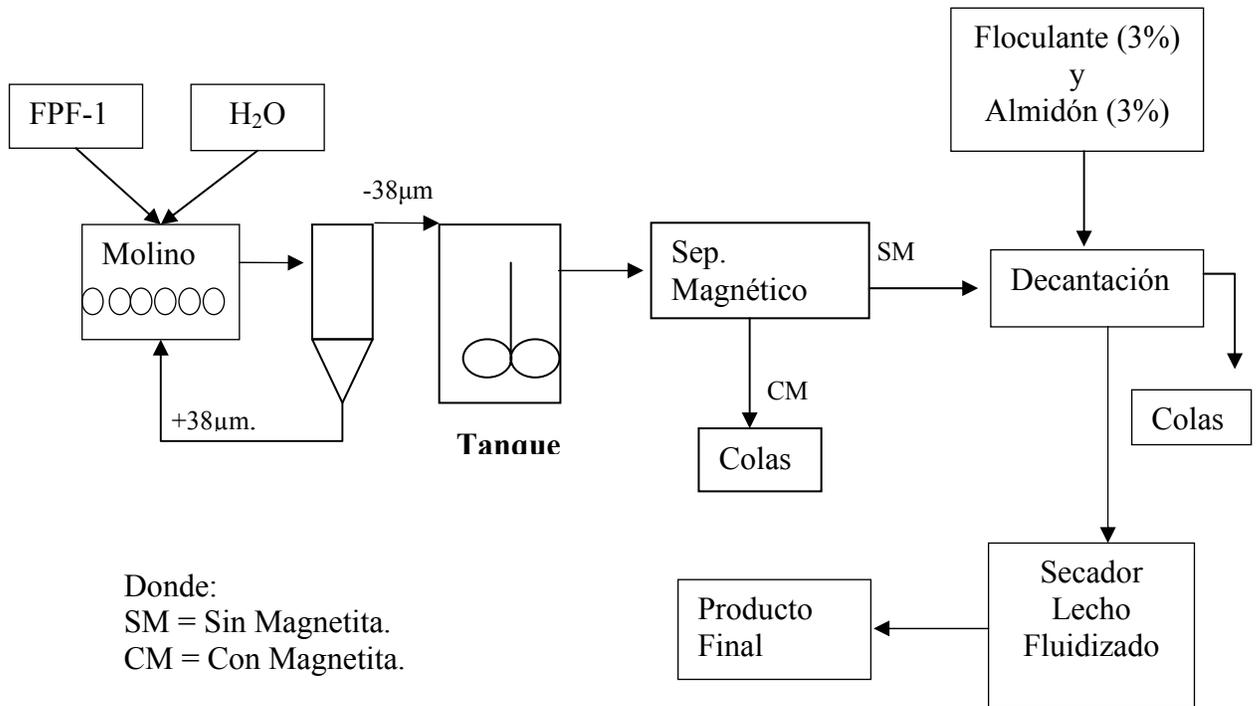
5.6.1) En Húmedo a Escala de Laboratorio:



Graf. N°5.6.1 Diagrama Final para la obtención de Orimatita a escala de Laboratorio

Para iniciar el procesamiento de la hematita a escala de laboratorio, se debe realizar la separación magnética de baja intensidad (1500 Gauss) en seco, con n Vueltas = 2 y con 35 % de vibración, con el fin de eliminar la mayor cantidad de magnetita posible, posteriormente se lleva a cabo la reducción de tamaño con el molino de bolas durante un período de 30 min y en húmedo, con una dilución de pulpa de 75% de sólidos. Luego se realiza la clasificación de tamaños por medio del RO-TAP, con la siguiente serie de tamices: 35, 70, 100, 150, 200, 250 y 325, en donde las partículas mayores a $38\ \mu\text{m}$ son eliminadas del proceso (colas) y las restantes (menores a $38\ \mu\text{m}$) pasan a la siguiente etapa del circuito: la decantación, en donde se elimina la mayor cantidad de agua presente en la pulpa. Para hacer más eficiente la sedimentación de las partículas y obtener el agua mucho más limpia, se adiciona almidón al 3 % y Floculante al 3%. El secado se realiza en una estufa a temperaturas mayores de 100°C y hasta que la humedad sea eliminada casi en su totalidad. Para obtener el producto final, es necesario eliminar los grumos que quedan después del secado, para ello se emplea un mazo o una bola de acero.

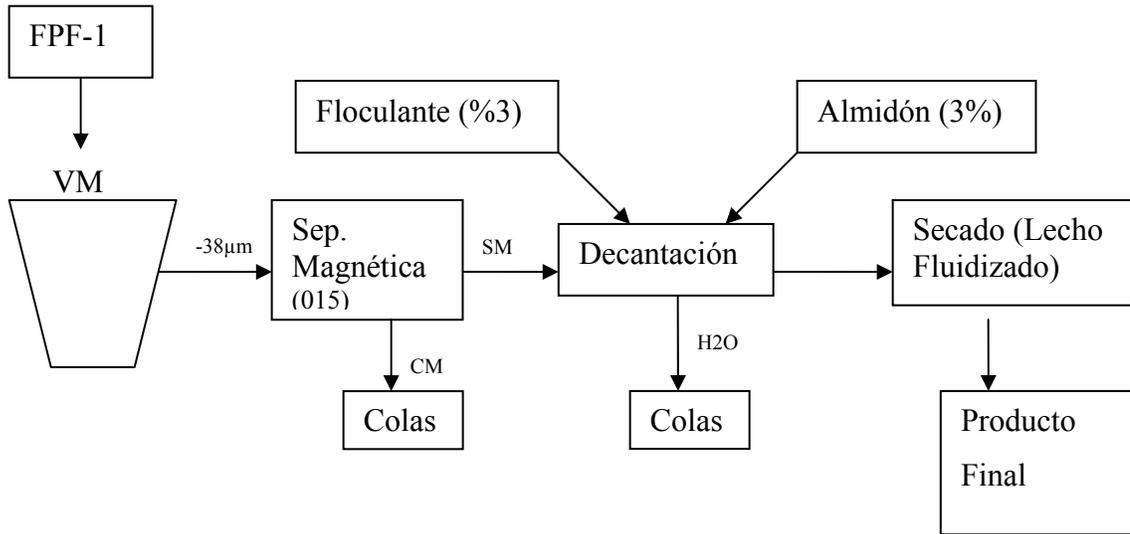
5.6.2) En Húmedo a Escala Industrial con Molino de Bolas:



Graf. N° 5.6.2 Diagrama Final para la obtención de Orimatita a escala Industrial

La primera propuesta a escala industrial radica en optimizar la molienda realizada con molino de bolas colocando un equipo clasificador de tamaño (Hidrociclón) inmediatamente después de la molienda, esto con la finalidad de retornar las partículas mayores a $38\ \mu\text{m}$ al molino, mientras que las menores a $38\ \mu\text{m}$ pasan a la siguientes etapas del circuito, como lo son: separación magnética y decantación, para luego ser secada en secador de lecho fluidizado, en donde cada partícula del mineral está rodeada de gas caliente, permitiendo así un secado más uniforme y mucho más rápido, ideal para la granulometría que se está trabajando y obtener así el producto final.

5.6.3) En Húmedo a Escala Industrial con Vertimilll:



Donde:

CM= material con magnetita.

SM= material sin magnetita.

VM= VertiMill

Graf. N°5.6.3 Diagrama Final para la obtención de Orimatita a escala Industrial

La segunda opción a escala industrial radica en la reducción de tamaño mediante el empleo de un molino vertical (Vertimill). El modelo más apropiado del Vertimill es el VTM-1250-WB, marca Metsominerals con 1250 HP y una capacidad de 15-20 t/h, que es un equipo especializado para procesar partículas de finezas de hasta 2 µm. Luego, con un separador magnético de tambor se elimina la magnetita presente en el mineral, se decanta la pulpa sin magnetita y para realizar el secado se recomienda utilizar un secador de lecho fluidizado; el cual consta de un amplio sistema de recolección de finos, indispensable para evitar la pérdida de material y la contaminación del medio ambiente. Luego del secado se obtiene el producto final.

5.7) CONSIDERACIONES TÉCNICO-ECONÓMICAS DE LOS DIAGRAMAS DE PROCESAMIENTO A ESCALA INDUSTRIAL:

En el primer diagrama a escala industrial, se recomienda el uso del Hidrociclón como clasificador de tamaños de partículas; ya que es un equipo de bajo costo de inversión y de bajo consumo de energía, sin embargo los gastos asociados al mantenimiento de los equipos auxiliares (bombas, tanque, tubería, etc) son bastantes elevados. Por esto se recomienda realizar a futuro pruebas para determinar cual de los dos diagramas a escala industrial genera mas ganancia.

Se recomienda la utilización del molino vertical (Vertimill), debido a los grandes beneficios que éste puede brindar a la hora de procesar el mineral de hierro con las especificaciones requeridas (D90 y características por rango de tamaños) además, este equipo tiene un costo de inversión de 2 millones de dólares aproximadamente, se estima que su instalación puede llegar a ser de 1 millón de dólares, motivado a la adquisición de partes auxiliares que el Vertimil requiere y que no están incluidas en su costo inicial (carga de bolas inicial, bombas, mesa de soporte, alarmas, entre otros). El gasto de consumo de energía es de 25 mil dólares por año aproximadamente. Los costos referentes al secador de lecho fluidizado, no están contemplados en este análisis; ya que se solicitó la información referente a este equipo, pero no se obtuvo respuestas por parte de las fabricantes; sin embargo, gracias al valor comercial del densificante que se desea sustituir (Barita), que es bastante alto (9 millones de dólares por 50.000 toneladas anuales), se tiene un rango bastante amplio de ingresos; con los cuales se puede cubrir cómodamente los gastos operativos, retornar parte del capital invertido en poco tiempo y empezar a generar ganancias, logrando de esta manera cubrir la demanda del densificante con un producto nacional y de buena calidad y si se optimiza el proceso, puede llegar a ser mucho más económico que la Barita.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El diagrama para la obtención de Orimatita a escala de laboratorio más conveniente sería vía húmeda con un mineral FPF-1 molido durante 30 minutos y sin magnetita (separado magnéticamente), para luego ser clasificado, decantado y secado.
- El producto que arrojó mejores resultados (Triturado, Molido, durante 30 min. en Húmedo y sin Magnetita) presentó una desviación de 8.07% en el rango de tamaño de 70-45 μm , 11.38% en el rango de tamaños de 40-6 μm , 20.07% para las partículas menores a 6 μm .
- Los productos obtenidos de la molienda en húmedo y en seco, con y sin magnetita, molido en el molino de bolas, no cumplen con todas las características requeridas del producto deseado (D_{90} y especificaciones por rango de tamaños).
- El consumo de energía del molino de bolas para generar el producto deseado (Orimatita) es 19,72 KWh / ton, valor alto en comparación con el obtenido en la Planta Piloto de Concentración.
- La Orimatita no puede ser obtenida por medio de los pulverizadores horizontales (BICO inc.) ni verticales (SIEBTECHNIK) empleados en esta investigación.
- En el procesamiento en seco del mineral, a escala de laboratorio, la separación magnética debe realizarse antes de la molienda.
- En el procesamiento en húmedo del mineral a escala industrial, la separación magnética puede realizarse después de la molienda.

- La combinación de almidón y floculante como agentes que facilitan el proceso de sedimentación (SFA) fue la que arrojó mejores resultados a la hora de sedimentar el FPF-1 con una granulometría de D_{90} pasante malla 400 (Orimatita).
- El secado del SFA (mineral Sedimentado con Floculante y Almidón) proporciona una mejor relación porcentaje de humedad eliminada (%hv) vs tiempo de secado.

Recomendaciones

- Para la obtención de Orimatita a escala industrial se sugiere realizar una clasificación vía hidrociclones, del mineral molido en el molino de bolas, para luego eliminar la magnetita presente en el FPF-1, decantar y finalmente secar en un lecho fluidizado.
- Una segunda opción para la obtención de Orimatita a escala industrial radica en la utilización del Molino Vertical (Vertimill), modelo VTM-1250-WB, con capacidad (15-20 t/h), como equipo reductor de tamaño, para luego realizar la separación magnética de baja intensidad, decantación y secado en un lecho fluidizado.
- Realizar pruebas con el producto final, para determinar si el porcentaje de magnetita que se tiene (2.9% aproximadamente) afecta el proceso de perforación de los pozos petroleros.
- La adquisición de un Vertimill y un Secador de Lecho Fluidizado es necesaria para la realización de futuras pruebas a escala industrial y también, para obtener un producto de manera eficiente y continua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Barberii, E.E. (1985). El pozo ilustrado, 1era ed. en CD-ROM. FONCEID Caracas: 587 p.
- (2) Convenio Marco de Corporación CVG-PDVSA. (2003). Uso de hematita en operaciones de producción de Petróleo. Ciudad Guayana, Edo. Bolívar.
- (3) Kelly, E. G. Y Spottiswood, D. J., (1990). Introducción al procesamiento de mineral. México: Limusa, Pág. 355-356, 370, 373, 384, 387, 390-394.
- (4) Magne, Luis (1990). Conminución de Minerales. Trabajo de Investigación. Centro de Investigación Minera Metalúrgica CIMM. Puerto Ordaz, Edo. Bolívar, Págs. 6-20,120-125,129-135.
- (5) FELGUERA PARQUES Y MINAS S.A. (1.998) Manual de Operaciones Planta Piloto de Concentración de Menas de Bajo Tenor. CVG Ferrominera Orinoco, C.A.
- (6) Máximo, Benavides.(1989) Optimización de Procesos de Trituración, Molienda y Clasificación. Trabajo de investigación. Proyectos y Servicios Minero-Metalúrgicos PROSEMM, Ciudad Guayana, Edo. Bolívar.
- (7) Metso Mineral (s.f). Productos y servicios.(Catálogo en línea). Disponible: <http://www.metsominerals.com> (Consulta: 2005, julio)
- (8) Monzón M., David E.(2002). Optimización de la separación magnética de baja y mediana intensidad como métodos importantes en materia de concentración de mineral de bajo tenor. Trabajo de Pasantía. Inédito. C.V.G Ferrominera Orinoco C.A, Ciudad Piar, Edo. Bolívar.
- (9) Personal que labora en la Planta Piloto de Concentración. (2000).Optimización de la cantidad de carga de bolas en un molino de jarra para la obtención de Orimatita. Trabajo de investigación. Inédito. C.V.G Ferrominera Orinoco C.A. Ciudad Piar, Edo. Bolívar.
- (10) Rivers, R. Y Quiroga, F. (1990).Uso de la Hematita nacional como densificante. Primer Seminario de Fluidos de Perforación y Terminación de Pozos. INTEVEP. Caracas.

(11)Technomedia International Inc (1993). Series de perforación básica (Grabación en CD). Houston. E.E.U.U.

ANEXOS

ANEXO 1

GLOSARIO

Ápex: parte del Hidrociclón destinada a la descarga de mineral.

Barrena: parte cortante que gira durante la perforación del pozo.

Ganga: material sin valor.

Cementación: etapa final en la perforación de un pozo petrolero, consiste en sellar o revestir las paredes del pozo con una fina capa de material que se adhiere al mismo dándole estabilidad y protección.

Chancado: etapa de la reducción de tamaño. También llamada Trituración.

Conminución: reducción de tamaño de las partículas.

Deslamar: proceso de eliminación o separación de fino y ultrafinos.

Espirales MD: tipo de equipo de separación gravimétrica, que consta de un espiral sencillo y emplea agua de lavado.

Espirales Multotec: tipo de equipo de separación gravimétrica, que consta de un espiral doble que no emplea agua de lavado.

Gravedad API: gravedad del crudo medida con un sistema recomendado por el Instituto Americano de Petróleo.

Hidrosizer: hidroseparador, clasificado partículas de acuerdo a su tamaño mediante el empleo de agua.

Overflow: material de alimentación.

Reología: ciencia que estudia la deformación de los fluidos.

SCADA: Sistema de Control Supervisorio y de Adquisición de Datos.

Set point: punto o valor determinado de la presión en el hidrosizer.

Underflow: material de descarga.

Vertimill: molino vertical especialmente diseñado para procesamiento de partículas finas.

Vórtice: parte del Hidrociclón destinada a alimentar el equipo.

ANEXO 2:
ESPECIFICACIONES DEL SEPARADOR MAGNÉTICO DE BAJA INTENSIDAD

DATOS DE LA MÁQUINA	
MARCA	KHD Humboldt Wedag
MODELO	PTS 202
ANCHURA DEL CAMPO MAGNETICO	180 mm.
PESO COMPLETO	82 Kg.
LARGO	736mm.
ANCHO	420mm
ALTURA	672mm.
ANCHURA DE TAMBOR	224mm.
DIÁMETRO EXTERIOR DEL TAMBOR	204mm.
VELOCIDAD CIRCUNFERENCIAL	0.1-1.5 m/s
No. DE REVOLUCIONES DEL TAMBOR	10-150/min.
DATOS SOBRE EL SISTEMA DE IMANTACIÓN	
ALCANCE DEL CAMPO MAGNETICO	Aprox. 140 Grados
INTENSIDAD MAGNETICA	Aprox. 1500 Gauss
DATOS SOBRE LA ALIMENTACIÓN	
MATERIAL DE ALIMENTACIÓN	Material seco
TAMAÑO DE GRANO	0.5-15mm.
RENDIMIENTO	Máx.200Kg/h
DATOS SOBRE EL CANAL TRANSPORTADOR OSCILANTE	
POTENCIA NOMINAL	100W
APARATO DE MANDO	Vibra, VIB R6 / 43947
TENSIÓN / FRECUENCIA	220 / 230 V, 50 / 60 Hz

**ANEXO 3:
ESPECIFICACIONES DEL SEPARADOR MAGNÉTICO DE MEDIANA
INTENSIDAD.**

DATOS DE LA MAQUINA	
MARCA	KHD Humboldt Wedag
MODELO	PERMOS PTS 202
ANCHURA DEL CAMPO MAGNETICO	160 mm.
PESO COMPLETO	135 Kg.
LARGO	1460mm.
ANCHO	400mm
ALTURA	888mm.
ANCHURA DE TAMBOR	224mm.
DIÁMETRO EXTERIOR DEL TAMBOR	204mm.
VELOCIDAD CIRCUNFERENCIAL	0.1-1.5 m/s
No. DE REVOLUCIONES DEL TAMBOR	10-150/min.
DATOS SOBRE EL SISTEMA DE IMANTACIÓN	
ALCANCE DEL CAMPO MAGNETICO	Aprox. 120Grados
INTENSIDAD MAGNETICA	Aprox. 7000 Gauss
DATOS SOBRE LA ALIMENTACIÓN	
MATERIAL DE ALIMENTACIÓN	Material seco
TAMAÑO DE GRANO	0.5-15mm.
RENDIMIENTO	Máx.200Kg/h
DATOS SOBRE EL CANAL TRANSPORTADOR OSCILANTE	
POTENCIA NOMINAL	100W
APARATO DE MANDO	Vibra, VIB R6 / 43947
TENSION /FRECUENCIA PROTECCIÓN	220 / 230 V, 50 / 60 Hz, IP 54

ANEXO 4

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ALIMENTACIÓN
MUESTRA DE FPF-1 SIN TRITURAR

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
6	3350	129,18	15,97	15,97	84,03
12	1400	59,68	7,38	23,35	76,65
18	1000	21,57	2,67	26,02	73,98
35	425	62,78	7,76	33,78	66,22
70	300	49,38	6,11	39,89	60,11
100	150	134,61	16,65	56,53	43,47
200	75	144,34	17,85	74,38	25,62
-200	-75	207,17	25,62	100,00	0,00
Total		808,71	100,00		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA ALIMENTACIÓN
MUESTRA DE FPF-1 TRITURADA

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
10	1700	8,42	6,57	6,57	93,43
20	850	10,93	8,52	15,09	84,91
35	500	11,78	9,19	24,27	75,73
70	212	22,30	17,39	41,66	58,34
100	150	14,81	11,55	53,21	46,79
150	106	12,31	9,60	62,81	37,19
200	75	11,42	8,90	71,71	28,29
250	63	5,19	4,05	75,76	24,24
325	45	5,96	4,65	80,41	19,59
C1	38	12,24	9,54	89,95	10,05
C2	33	4,76	3,71	93,66	6,34
C3	23	2,58	2,01	95,67	4,33
C4	15	1,33	1,04	96,71	3,29
C5	11	0,35	0,27	96,98	3,02
C6	2	3,87	3,02	100,00	0,00
		128,25			

**ANALISIS GRANULOMÉTRICO
MOLIENDA EN SECO CON MAGNETITA**

Muestra de FPF-1TM10

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	3,07	0,95	0,95	99,05
70	212	0,11	0,03	0,99	99,01
100	150	1,73	0,54	1,52	98,48
150	106	8,70	2,70	4,22	95,78
200	75	33,93	10,52	14,74	85,26
250	63	28,19	8,74	23,47	76,53
325	45	51,15	15,85	39,33	60,67
400	38	30,23	9,37	48,70	51,30
-400,00	-38,00	165,52	51,30	100,00	0,00
Total		322,63			

**ANALISIS GRANULOMETRICO
MOLIENDA EN SECO CON MAGNETITA**

Muestra de FPF-1TM15

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	1,57	0,46	0,46	99,54
70	212	0,13	0,04	0,50	99,50
100	150	0,90	0,26	0,76	99,24
150	106	6,34	1,85	2,61	97,39
200	75	34,61	10,10	12,70	87,30
250	63	32,07	9,35	22,06	77,94
325	45	80,90	23,60	45,65	54,35
400	38	24,49	7,14	52,80	47,20
-400,00	-38,00	161,83	47,20	100,00	0,00
Total		342,84			

Muestra de FPF-1TM20

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	4,60	1,79	1,79	98,21
70	212	0,70	0,27	2,06	97,94
100	150	0,40	0,16	2,22	97,78
150	106	2,80	1,09	3,31	96,69
200	75	15,00	5,84	9,14	90,86
250	63	16,50	6,42	15,56	84,44
325	45	26,30	10,23	25,80	74,20
400	38	23,20	9,03	34,82	65,18
-400,00	-38,00	167,50	65,18	100,00	0,00
Total		257,00			

Muestra de FPF-1TM30

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	1,62	0,74	0,74	99,26
70	212	0,01	0,00	0,75	99,25
100	150	0,06	0,03	0,77	99,23
150	106	0,50	0,23	1,00	99,00
200	75	5,93	2,71	3,71	96,29
250	63	9,91	4,53	8,24	91,76
325	45	18,57	8,49	16,74	83,26
400	38	23,14	10,58	27,32	72,68
-400,00	-38,00	158,96	72,68	100,00	0,00
Total		218,70			

**ANALISIS GRANULOMETRICO
MOLIENDA EN SECO SIN MAGNETITA**

Muestra de FPF-1TM10SM

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,11	0,05	0,05	99,95
70	212	0,04	0,02	0,07	99,93
100	150	0,88	0,38	0,45	99,55
150	106	6,07	2,64	3,08	96,92
200	75	23,37	10,15	13,24	86,76
250	63	19,46	8,45	21,69	78,31
325	45	37,17	16,15	37,84	62,16
400	38	17,07	7,42	45,25	54,75
-400,00	-38,00	126,03	54,75	100,00	0,00
Total		230,20			

**ANALISIS GRANULOMETRICO
MOLIENDA EN SECO SIN MAGNETITA**

Muestra de FPF-1TM20SM

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,07	0,03	0,03	99,97
70	212	0,01	0,00	0,04	99,96
100	150	0,15	0,07	0,11	99,89
140	106	2,00	0,91	1,02	98,98
200	75	14,86	6,80	7,82	92,18
250	63	16,72	7,65	15,46	84,54
325	45	40,75	18,64	34,10	65,90
400	38	13,80	6,31	40,41	59,59
-400,00	-38,00	130,29	59,59	100,00	0,00
Total		218,65			

Muestra de FPF-1TM30SM

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,11	0,04	0,04	99,96
70	212	0,05	0,02	0,06	99,94
100	150	0,11	0,04	0,10	99,90
150	106	0,60	0,23	0,33	99,67
200	75	5,74	2,20	2,54	97,46
250	63	10,42	4,00	6,54	93,46
325	45	20,31	7,79	14,33	85,67
400	38	22,63	8,68	23,01	76,99
-400	-38,00	200,60	76,99	100,00	0,00
Total		260,57			

**ANALISIS GRANULOMETRICO
MOLIENDA EN HUMEDO CON MAGNETITA**

Muestra FPF-1 TM10H

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,40	0,17	0,17	99,83
70	212	0,01	0,00	0,17	99,83
100	150	0,06	0,03	0,20	99,80
150	106	0,46	0,19	0,39	99,61
200	75	5,50	2,32	2,72	97,28
250	63	13,86	5,86	8,57	91,43
325	45	58,71	24,81	33,39	66,61
400	38	19,05	8,05	41,44	58,56
-400	-38,00	138,58	58,56	100,00	0,00
Total		236,63			

Muestra FPF-1 TM20H

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	1,86	0,71	0,71	99,29
70	212	0,01	0,00	0,71	99,29
100	150	0,07	0,03	0,74	99,26
150	106	0,20	0,08	0,82	99,18
200	75	2,07	0,79	1,61	98,39
250	63	5,68	2,17	3,78	96,22
325	45	35,17	13,44	17,22	82,78
400	38	23,02	8,80	26,02	73,98
-400	-38,00	193,56	73,98	100,00	0,00
Total		261,64			

Muestra FPF-1 TM30H

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,15	0,06	0,06	99,94
70	212	0,01	0,00	0,07	99,93
100	150	0,05	0,02	0,09	99,91
150	106	0,03	0,01	0,10	99,90
200	75	0,22	0,09	0,20	99,80
250	63	1,06	0,45	0,65	99,35
325	45	8,56	3,67	4,32	95,68
400	38	10,14	4,35	8,67	91,33
-400	-38,00	213,06	91,33	100,00	0,00
Total		233,28			

**ANALISIS GRANULOMETRICO
MOLIENDA EN HUMEDO SIN MAGNETITA****Muestra FPF-1 TM15HSM**

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,01	0,01	0,01	99,99
70	212	0,02	0,02	0,03	99,97
100	150	0,04	0,03	0,06	99,94
150	106	0,10	0,08	0,14	99,86
200	75	1,00	0,84	0,99	99,01
250	63	3,50	2,96	3,94	96,06
325	45	7,87	6,64	10,59	89,41
400	38	16,12	13,61	24,20	75,80
PAN	-38	89,78	75,80	100,00	0,00
TOTAL		118,44			

Muestra FPF-1 TM20HSM

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	6,02	0,32	0,32	99,68
70	212	0,02	0,00	0,33	99,67
100	150	0,24	0,01	0,34	99,66
150	106	0,66	0,04	0,37	99,63
200	75	2,88	0,16	0,53	99,47
250	63	10,10	0,54	1,07	98,93
325	45	68,97	3,72	4,79	95,21
400	38	138,46	7,47	12,26	87,74
-400	-38	1627,09	87,74	100,00	0,00
Total		1854,44			

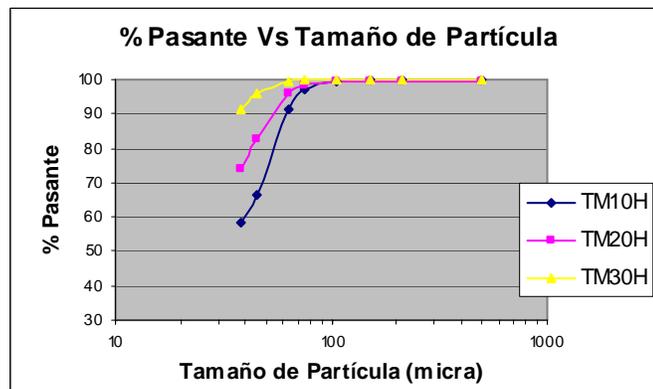
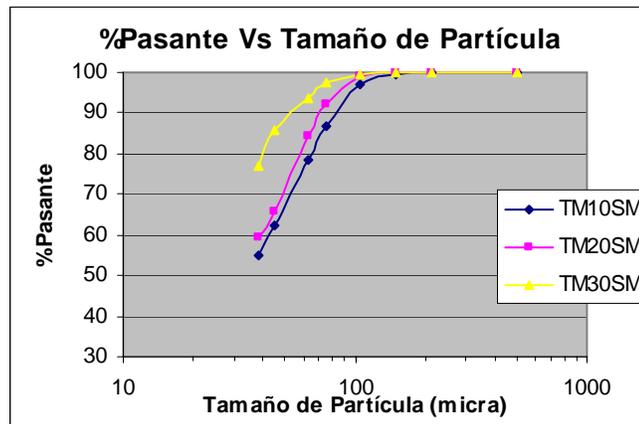
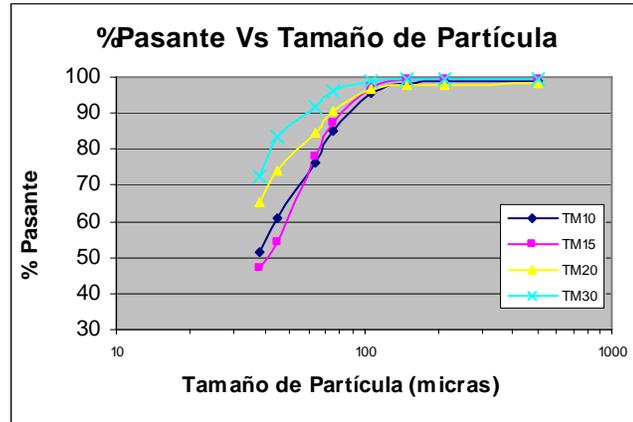
Muestra FPF-1 TM25HSM

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	1,08	0,92	0,92	99,08
70	212	0,01	0,01	0,93	99,07
100	150	0,01	0,01	0,94	99,06
150	106	0,08	0,07	1,01	98,99
200	75	0,04	0,03	1,04	98,96
250	63	0,89	0,76	1,80	98,20
325	45	2,40	2,05	3,85	96,15
400	38	13,82	11,80	15,66	84,34
PAN	-38	98,75	84,34	100,00	0,00
	TOTAL	117,08			

Donde:

- TM10 = Triturado Y Molido en Seco, con Mag. durante 10 min.
 TM15 = Triturado Y Molido en Seco, con Mag. durante 15 min.
 TM20 = Triturado Y Molido en Seco, con Mag. durante 20 min.
 TM25 = Triturado Y Molido en Seco, con Mag. durante 25min.
 TM10SM = Triturado Y Molido en Seco, sin Mag. durante 10 min.
 TM15SM = Triturado Y Molido en Seco, sin Mag. durante 15 min.
 TM20SM = Triturado Y Molido en Seco, sin Mag. durante 20 min.
 TM25SM = Triturado Y Molido en Seco, sin Mag. durante 25min.
 TM10H = Triturado Y Molido en Húmedo, con Mag. durante 10 min.
 TM15 H = Triturado Y Molido en Húmedo, con Mag. durante 15 min.
 TM20H = Triturado Y Molido en Húmedo, con Mag. durante 20 min.
 TM25H = Triturado Y Molido en Húmedo, con Mag. durante 25min.
 TM10HSM = Triturado Y Molido en Húmedo, sin Mag. durante 10 min.
 TM15 HSM = Triturado Y Molido en Húmedo, sin Mag. durante 15 min.
 TM20HSM = Triturado Y Molido en Húmedo, sin Mag. durante 20 min.
 TM25HSM = Triturado Y Molido en Húmedo, sin Mag. durante 25min.

Representaciones de Los Análisis Granulométricos de las Diferentes Condiciones



**ANALISIS GRANULOMETRICO COMPLETO
DE LAS MOLIENDAS MÁS OPTIMAS**

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,83	0,71	0,71	99,29
70	212	0,00	0,00	0,71	99,29
100	150	0,04	0,03	0,74	99,26
150	106	0,02	0,02	0,76	99,24
200	75	0,11	0,09	0,85	99,15
250	63	0,61	0,52	1,37	98,63
325	45	2,29	1,95	3,31	96,69
C1	38	8,01	6,81	10,12	89,88
C2	33	22,65	19,25	29,37	70,63
C3	23	23,12	19,65	49,02	50,98
C4	15	16,91	14,37	63,39	36,61
C5	11	10,17	8,64	72,04	27,96
<C5	2	32,90	27,96	100,00	0,00
		117,66			

Especificaciones:		Resultado	Desviación
75-40=	8,7	2,46	6,24
40-6=	67,22	61,92	5,3
<6=	23,46	35,62	12,16

Muestra FPF-1 TM10HSM

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,32	0,27	0,27	99,73
70	212	0,01	0,01	0,28	99,72
100	150	0,10	0,08	0,36	99,64
150	106	0,40	0,34	0,70	99,30
200	75	2,38	2,02	2,72	97,28
250	63	5,29	4,48	7,20	92,80
325	45	11,53	9,77	16,97	83,03
C1	38	10,13	8,58	25,55	74,45
C2	33	30,44	25,79	51,33	48,67
C3	23	13,82	11,71	63,04	36,96
C4	15	9,26	7,84	70,89	29,11
C5	11	4,97	4,21	75,10	24,90
C6	2	29,40	24,90	100,00	0,00
		118,05			

Especificaciones:		resultado	Desviación
75-40=	8,7	14,25	-5,55
40-6=	67,22	49,55	17,67
<6=	23,46	36,2	-12,74

ANALISIS GRANULOMETRICO COMPLETO

Muestra FPF-1 TM15HSM

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,01	0,01	0,01	99,99
70	212	0,02	0,02	0,03	99,97
100	150	0,04	0,03	0,06	99,94
150	106	0,10	0,08	0,14	99,86
200	75	1,00	0,84	0,99	99,01
250	63	3,50	2,96	3,94	96,06
325	45	7,87	6,64	10,59	89,41
C1	38	16,12	13,61	24,20	75,80
C2	33	32,58	27,51	51,71	48,29
C3	23	15,26	12,88	64,59	35,41
C4	15	10,78	9,10	73,69	26,31
C5	11	5,79	4,89	78,58	21,42
C6	2	25,37	21,42	100,00	0,00
		118,44			

Especificaciones:	Resultado	Desviación
75-40=	8,7	9,6
40-6=	67,22	54,38
<6=	23,46	36,02

Muestra FPF-1 TM20HSM

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,36	0,33	0,33	99,67
70	212	0,00	0,00	0,33	99,67
100	150	0,00	0,00	0,33	99,67
150	106	0,05	0,05	0,37	99,63
200	75	0,26	0,24	0,61	99,39
250	63	1,06	0,96	1,56	98,44
325	45	2,58	2,33	3,90	96,10
C1	38	15,97	14,44	18,33	81,67
C2	33	27,18	24,57	42,91	57,09
C3	23	17,1	15,46	58,37	41,63
C4	15	11,81	10,68	69,04	30,96
C5	11	6,3	5,70	74,74	25,26
C6	2	27,94	25,26	100,00	0,00
		110,61			

Especificaciones:	resultado	Desviación
75-40=	8,7	3,29
40-6=	67,22	56,41
<6=	23,46	40,3

ANALISIS GRANULOMETRICO COMPLETO

Muestra FPF-1 TM25HSM

Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	1,08	0,92	0,92	99,08
70	212	0,01	0,01	0,93	99,07
100	150	0,01	0,01	0,94	99,06
150	106	0,08	0,07	1,01	98,99
200	75	0,04	0,03	1,04	98,96
250	63	0,89	0,76	1,80	98,20
325	45	2,40	2,05	3,85	96,15
C1	38	13,82	11,80	15,66	84,34
C2	33	21,14	18,06	33,71	66,29
C3	23	19,99	17,07	50,79	49,21
C4	15	14,83	12,67	63,45	36,55
C5	11	7,61	6,50	69,95	30,05
C6	2	35,18	30,05	100,00	0,00
		117,08			

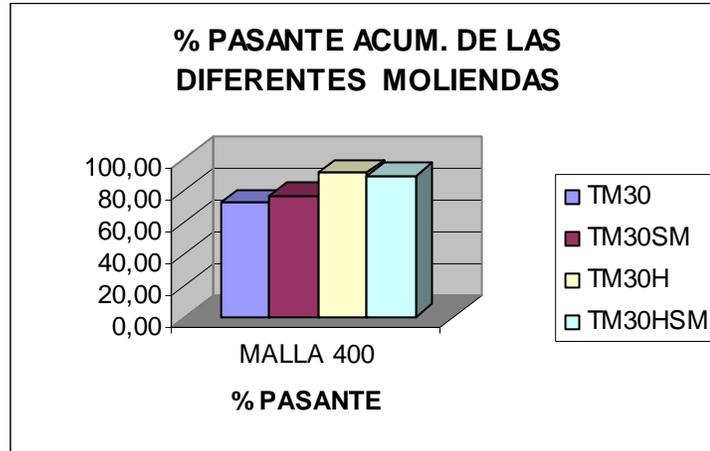
Especificaciones:	resultado	Desviación
75-40=	8,7	5,43
40-6=	67,22	54,29
<6=	23,46	-16,82

Muestra FPF-1 TM30HSM

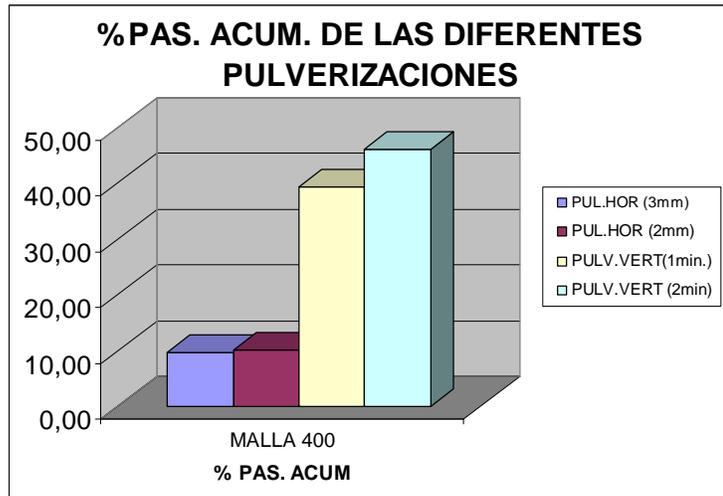
Malla	Micras	Peso (gr)	%Ret	%Ret Acum	%Pasante Acum
35	500	0,00	0,00	0,00	100,00
70	212	0,00	0,00	0,00	100,00
100	150	0,00	0,00	0,00	100,00
150	106	0,02	0,02	0,02	99,98
200	75	0,11	0,11	0,13	99,87
250	63	0,04	0,04	0,17	99,83
325	45	0,58	0,59	0,76	99,24
C1	38	9,99	10,17	10,93	89,07
C2	33	17,74	18,05	28,98	71,02
C3	23	16,95	17,25	46,23	53,77
C4	15	12,53	12,75	58,99	41,01
C5	11	7,65	7,79	66,77	33,23
C6	2	32,65	33,23	100,00	0,00
		98,26			

Especificaciones:	resultado	Desviación
75-40=	8,7	0,63
40-6=	67,22	55,84
<6=	23,46	43,53

GRÁFICO QUE MUESTRA LOS MEJORES RESULTADOS DE LAS DIFERENTES MOLIENDAS



Gráfica que muestra el %Pas Acum de las diferentes Pulverizaciones realizadas





**CVG FERROMINERA ORINOCO CA
PROYECTO CONCENTRACIÓN PIAR
LABORATORIO DE PROCESOS**

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE TRABAJO APLICANDO EL TEST ESTÁNDAR DE BOND PARA
MOLINO DE BOLAS**

Identificación de la Muestra:	FPF-1		
Densidad a granel (-6M):	2,36		
Peso (g) equivalente a 700 cc:	1652		
% pasante malla de corte:	8,60		
Malla de corte:	400	38	micrones

Ciclo	No. Rev.	Pasante original de la malla de corte (-P1)	Sobre malla de corte (+P1)	Pasante nuevo malla de corte (-P1)	Pasante neto malla de corte (Pneto)	Gramos de bajotamaño neto por rev. (Gbpe)	Carga circulante (Rcc)
1	100	142,07	1295,61	356,39	214,32	2,1432	363,54
2	206	30,65	1366,00	286	255,35	1,2400	477,62
3	361	24,60	1272,50	379,5	354,90	0,9836	335,31
4	447	32,64	1222,20	429,8	397,16	0,8891	284,36
5	489	36,96	1182,00	470	433,04	0,8850	251,49
6	488	40,42	1179,80	472,2	431,78	0,8855	249,85
	487	40,61					

0,8853

251

Valor final del Gbpe	=	0,8853
Carga circulante	=	251

Cálculo del Índice de trabajo (WI)

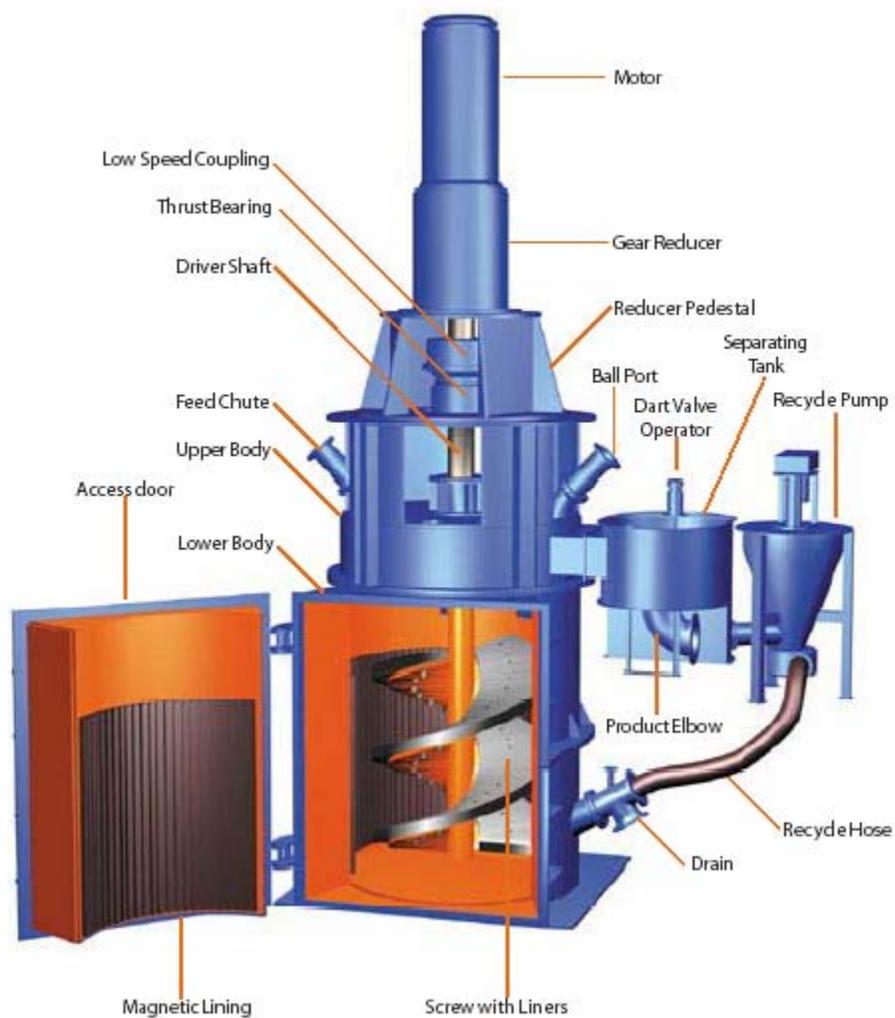
F80 = 440	WI =	18,46
P80 = 38		
P1 = 38		
Gbpe = 0,8853		

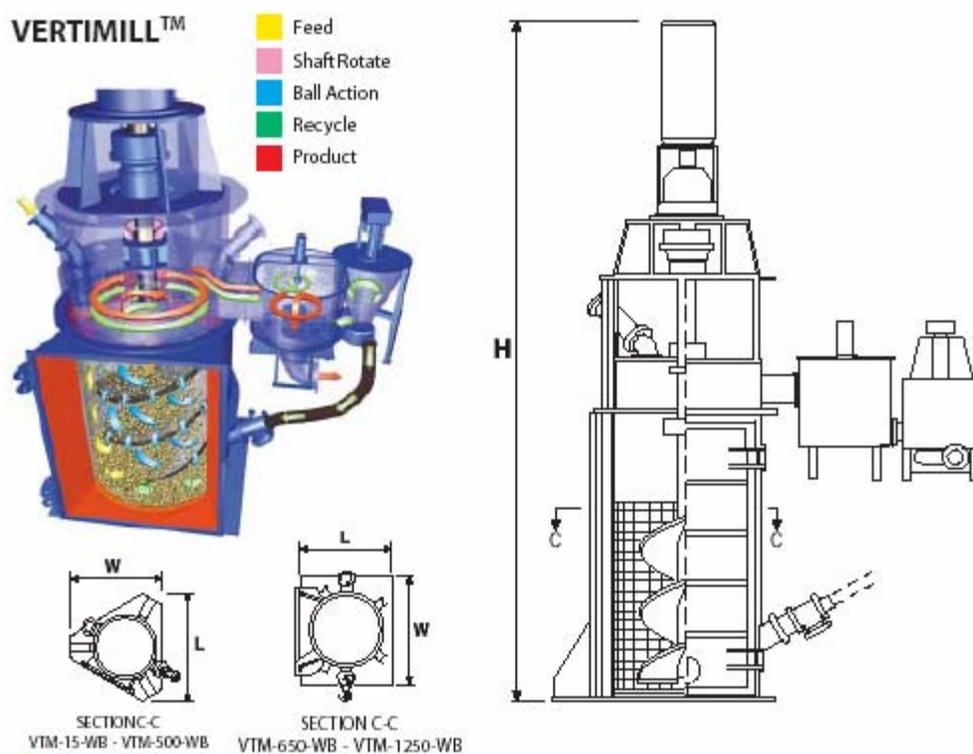
Granulometría

Malla Tyler o equivalente	Micrones	FPF-1 ALIMENTACIÓN			Producto		
		Ret.	%Ret.	%Pas. Acum.	Ret.	%Ret.	%Pas. Acum.
10	2000	8,10	2,74	97,26		0,00	100,00
20	850	21,50	7,28	89,98		0,00	100,00
35	500	20,60	6,98	83,00		0,00	100,00
65	212	54,00	18,29	64,71		0,00	100,00
100	150	23,40	7,92	56,79		0,00	100,00
150	106	42,50	14,39	42,40		0,00	100,00
200	75	33,00	11,18	31,22		0,00	100,00
250	53	15,40	5,22	26,01		0,00	100,00
325	45	50,80	17,20	8,80		0,00	100,00
400	38	0,60	0,20	8,60	14,32	17,87	82,13
C1	33	25,40	8,60	0,00	20,71	25,84	56,29
C2	23	0,00	0,00	0,00	9,26	11,55	44,74
C3	15	0,00	0,00	0,00	6,11	7,62	37,12
C4	11	0,00	0,00	0,00	3,24	4,04	33,08
C5	6	0	0	0,00	26,51	33,08	0,00

Alimentación		Producto	
Pendiente	F80	Pendiente	P80
0,29005024	440,394663	2,67758582	37,6283087

Anexo 6: Molino Vertical (Vertimill)





Model	H mm (inch)	L mm (inch)	W mm (inch)	Power motor kW/tp	Weight (empty) ton
VTM-15-WB	7060(278)	1520(60)	1320(52)	11/15	5.5
VTM-20-WB	7180(283)	1520(60)	1320(52)	15/20	5.9
VTM-40-WB	7460(294)	1780(70)	1520(60)	30/40	8.2
VTM-60-WB	7600(299)	1780(70)	1520(60)	45/60	8.8
VTM-75-WB	7900(311)	1960(77)	1700(67)	56/75	12.5
VTM-125-WB	9270(365)	2670(105)	2310(91)	93/125	17.9
VTM-150-WB	9780(385)	2670(105)	2310(91)	112/150	19.6
VTM-200-WB	9780(385)	2670(105)	2310(91)	150/200	20.5
VTM-250-WB	9650(380)	3660(144)	3180(125)	186/250	33.8
VTM-300-WB	9650(380)	3660(144)	3180(125)	224/300	35.7
VTM-400-WB	11320(446)	3910(154)	3380(133)	298/400	52.7
VTM-500-WB	12070(475)	3860(152)	3780(149)	373/500	66.1
VTM-650-WB	12270(483)	3250(128)	3860(152)	485/650	82.6
VTM-800-WB	13460(530)	3560(140)	4060(160)	597/800	100.4
VTM-1000-WB	13460(530)	3660(144)	4270(168)	746/1000	116.1
VTM-1250-WB	13460(530)	4090(161)	4520(178)	932/1250	125.4

Detalles de los diferentes modelos de Vertimill presentes en el mercado actual