

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA,  
MINERA Y METALURGICA



**Operación de los Hidrociclones  
Inclinados**

**INFORME DE INGENIERIA**

Para optar el Título Profesional de :  
**INGENIERO METALURGISTA**

**WILFREDO SAUL POMASUNCO CHUMBE**

Lima - Perú  
1996

## DEDICATORIA

*A mi esposa Marta Emperatriz*

*A mis hijos : Marta Luisa, Wilfredo Martín*

*A mis padres : María Angélica y Teodoro*

*A mis colegas : Hernán Parra y José Manzaneda*

# INDICE

<b>PRESENTACION</b>	<b>pagina 1</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>2</b>
<b>CIRCUITO DE MOLIENDA DE MILPO</b>	<b>4</b>
<b>PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>7</b>
<b>EVALUACION DE VARIABLES DE DISEÑO</b>	
<b>Angulo de inclinacion</b>	<b>8</b>
<b>Diametro de vortex</b>	<b>10</b>
<b>Diametro de apex</b>	<b>11</b>
<b>Efecto del respiradero</b>	<b>12</b>
<b>EVALUACION DE VARIABLES DE OPERACION</b>	
<b>Densidad de pulpa</b>	<b>13</b>
<b>Dimensiones de bomba</b>	<b>14</b>
<b>Presion</b>	<b>15</b>
<b>PARAMETROS DEL MATERIAL</b>	
<b>Clasificacion preferencial</b>	<b>16</b>
<b>RESULTADOS ECONOMICOS</b>	
<b>Costo de Mantenimiento Mecanico</b>	<b>17</b>
<b>Ganancia por Mayor Disponibilidad de Equipo</b>	<b>20</b>
<b>Significancia del Consumo de Energia</b>	<b>22</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>25</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>28</b>

# OPERACION DE LOS HIDROCICLONES INCLINADOS

## PRESENTACION

*Tradicionalmente Milpo ha sido y sera una planta concentradora ejemplo de automatización en nuestro País, a pesar de ello el arreglo de su circuito de molienda con clasificadores mecánicos colocaba el limite técnico al desarrollo de una mayor automatización debido a que los parametros internos de control no eran gobernados de acuerdo al control de la relación mineral: agua, así, sea cual fuere la densidad del producto rebose de clasificadores (alimento a flotación) se corregía a un rango cercano a 1300 gr/lt mediante adiciones de agua según respuesta a un indicador nuclear.*

*El reemplazar los clasificadores mecánicos por ciclones se convierte así en un reto técnico a fin de alcanzar niveles superiores de automatización del importante circuito de molienda, se inicia el proyecto en 1987, finalmente personal de Milpo materializa el cambio entre 1992 hasta 1994 periodo en que se inicio un estudio detenido de las variables mas importantes que influirían en dicho cambio, el resultado es el actual circuito de molienda con clasificación en ciclones inclinados con un importante control automático de la densidad de pulpa de la alimentación al ciclón mediante un densímetro nuclear que ajusta el rango de densidad de pulpa mediante adiciones controladas de agua a la descarga de la celda unitaria convirtiéndose así en el único circuito de molienda-clasificación controlado en el punto exacto según el criterio general de clasificación.*

*El resumen de las acciones tomadas en la decisión de cambio de clasificadores helicoidales por ciclones inclinados en Milpo es el trabajo Memoria Descriptiva que me honro en presentar a mi Alma Mater la Universidad Nacional de Ingeniería a fin de cumplir con un requisito de la Titulación Extraordinaria.*

*Lima, Febrero 13 de 1996*

## 1. INTRODUCCION

Las primeras noticias sobre la utilización de hidrociclones inclinados, vienen de Leeman y Fontein<sup>(1)</sup>, cuando en 1957 solicitaron la patente de invención 2,817,441. Ellos decían que la razón por la cual los hidrociclones verticales necesitan una alta presión de alimentación, es que contienen tal tamaño de columna de pulpa que la gravedad se convierte en un factor muy importante e influyente en la operación de los hidrociclones. Sin embargo, afirmaban, esto no ocurría al inclinar el hidrociclón.

De pruebas realizadas con carbones y arenas, encontraron las siguientes ventajas:

- \* No existe componente de fuerza gravitacional que pueda mover las partículas más ligeras en dirección del apex ; y,
- \* el hidrociclón al estar inclinado suficientemente, forma la columna de aire que ayuda al desalojo de partículas finas, y como el underflow siempre tiene una alta concentración, prácticamente sólo las partículas gruesas dejan el hidrociclón a través del á-pex.

El arreglo que proponían contemplaba un tanque elevado del cual la pulpa se alimentaría verticalmente, por gravedad, hacia el hidrociclón. El montaje se haría sobre un piso horizontal, de manera tal que la generatriz más baja de la sección cónica coincidiera con la horizontal, o que sea igual a la mitad del ángulo del ápex del hidrociclón.

A partir de la década del 80, este arreglo fue adoptado en diversas plantas del mundo. Una de las pocas concentradoras de plomo y zinc que lo utilizaron, fue la St. Joe Minerals en Viburnum<sup>(2)</sup>. El año 1982, ellos instalaron un ciclón D26 Krebs inclinado en reemplazo de tres D20B que trabajaban verticalmente. Ellos hicieron observaciones muy importantes, sobre todo para el procesamiento de minerales polimetálicos:

- \* Con el montaje horizontal, era posible usar un ápex de mayor diámetro que el usual en vertical, disminuyéndose el riesgo de obturación durante la operación;
- \* para una similar carga de alimentación (165 TCPH), la proporción de sólidos en malla -200 del underflow era de 67,4 TCPH para los ciclones de 20 pulgadas, en tanto con el de 26 era de sólo 22,7 TCPH;
- \* los análisis químicos de los sólidos del underflow mostraron que el plomo en la malla -200 se había reducido, lo que indicaba que la galena estaba saliendo del circuito de molienda a un tamaño más grueso;
- \* los requerimientos de mantenimiento podían ser reducidos; y,
- \* en los hidrociclones de diámetro mayor de 15 pulgadas, la clasificación es fuertemente afectada por la fuerza gravitatoria, eliminándose esto con la inclinación del equipo al disminuirse la diferencia de presión hidrostática.

Posteriormente se hicieron estudios más detenidos. Ofrecemos luego algunas apreciaciones que hacen diversos autores sobre las variables que afectan el comportamiento de un hidrociclón inclinado.

Estas variables<sup>(3)</sup> podemos agruparlas en: (a) Variables de diseño; (b) parámetros del mineral; (c) variables de operación; y (d) perturbaciones.

Las *variables de diseño* influyen en el tamaño de corte de la separación. Las más importantes son el tamaño del hidrociclón, y los tamaños de la alimentación, apex y vortex. Incluimos también, la inclinación del hidrociclón, la presencia del respiradero (vent pipe), y la geometría del hidrociclón.

- \* Con referencia al tamaño, coinciden en recomendar <sup>(2, 4, 5, 6)</sup> hidrociclones mayores de 15 ó 20 pulgadas de diámetro;
- \* los tamaños del feed inlet, ápex y vortex pueden ser similares a los del hidrociclón vertical. Particularmente, puede usarse ápex en un amplio rango de tamaños sin perjudicar la clasificación <sup>(7)</sup>;
- \* la inclinación del hidrociclón varía según el mineral a tratar<sup>(5, 6, 8)</sup>, y las características operativas de cada planta concentradora. Suele utilizarse inclinaciones, con respecto de la horizontal, a partir de 15°;
- \* todos admiten la presencia del respiradero. Es importante para evitar el efecto sifón<sup>(7, 9, 10)</sup>;
- \* con respecto a la eficiencia de clasificación, los hidrociclones inclinados permiten valores más altos que los verticales y los denominados de fondo plano<sup>(7, 11, 12)</sup>. Estos últimos actualmente están siendo usados en la minería de cobre. Tanto los hidrociclones de fondo plano, como los inclinados son recomendados para moliendas gruesas; permiten incrementar el tratamiento en los circuitos de molienda; y mantienen bajas circulantes y altas densidades de underflow.

Entre los *parámetros del mineral* se considera que dos son las propiedades que tienen mayor influencia en el comportamiento de un hidrociclón: la gravedad específica del material, si éste es puro, y la composición, si está constituido por una mezcla. En lo que respecta a los hidrociclones inclinados, la experiencia mayor se ha dado en procesamiento de minerales de cobre<sup>(6)</sup>. Sin embargo, tanto en St Joe Viburnum<sup>(2)</sup> como en un anterior artículo nuestro<sup>(9)</sup>, pudo observarse el efecto de tales propiedades en minerales polimetálicos. En general se trata de que los minerales más pesados tienden a concentrarse en el underflow, y los ligeros en el overflow<sup>(13, 14)</sup>. Por ello, en minerales de plomo-zinc, la clasificación vertical es perjudicial, ya que sobremuele la galena. El hidrociclón inclinado, como lo demuestran en St. Joe, reduce fuertemente la recirculación de galena.

Las variables que permiten controlar la operación de un hidrociclón se agrupan en variables de entrada, y variables de salida. Las de entrada son el flujo, la concentración y la presión de alimentación. Entre las de salida interesan especialmente la granulometría del overflow y la proporción de agua que aparece en el underflow. En resumen la literatura indica que:

- \* Los ciclones inclinados producen separaciones más gruesas que los ciclones verticales de igual diámetro. Para producir separación similar que el hidrociclón vertical, debe disminuirse la densidad del alimento. Adicionándose más agua, mejora la eficiencia de clasificación <sup>(7)</sup>;
- \* un gran número de instalaciones demuestran que, para hidrociclones grandes que operan al menos con 10 psi, gran parte del volumen del underflow se debe a la presión hidrostática. Mediante la instalación de hidrociclones inclinados, esta presión se reduce, y, como consecuencia, el volumen de underflow. En algunos casos<sup>(8)</sup>, la caída de presión llega a ser casi la mitad de su correspondiente en vertical. Esto implica adicionalmente mayor duración de los materiales del circuito, y una mayor capacidad de tratamiento que variaría entre 1,8 %<sup>(9)</sup> y 10 %<sup>(10)</sup>, aunque algunos se muestran escépticos ante estas cifras<sup>(16)</sup>;
- \* los hidrociclones inclinados disminuyen la evacuación de agua por el underflow, y con ello el escape de partículas finas. Esto se evidencia por el menor bypass, la menor sobremolienda de minerales, y la mejor eficiencia de clasificación <sup>(2, 6, 7, 8, 16)</sup>;

La principal *perturbación* de un hidrociclón que funciona en circuito cerrado es la distribución granulométrica del alimento. Otra perturbación, es el cambio de la proporción de componentes cuando la alimentación es una mezcla. Ambos casos son inevitables tanto en el hidrociclón vertical como en el inclinado, y actualmente no se tienen estudios al respecto.

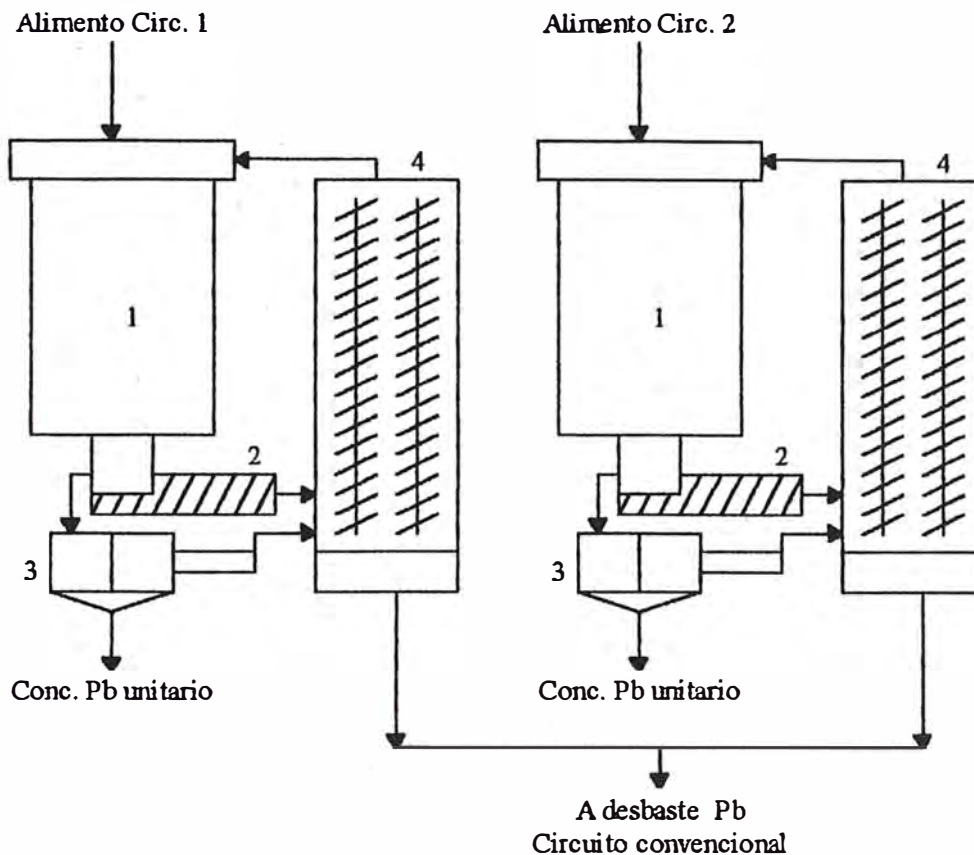
## 2. EL CIRCUITO DE MOLIENDA

La Nueva Planta Concentradora de Milpo trabajó desde 1979, con clasificadores helicoidales. En la Figura 1 y Tabla 1, se describen el diagrama de flujos y los equipos.

Posteriormente, en 1987, nuestra empresa propuso el cambio de clasificadores helicoidales por hidrociclones, encargando la preparación de la Ingeniería Básica a Wright Engineers Limited de Vancouver, Canadá, y la Ingeniería de Detalle a P y V Ingenieros S. A. del Perú. Esta ampliación está enmarcada en un proyecto mayor que debe permitir el tratamiento de 3400 t/d de mineral.

TABLA I. Equipos del antiguo circuito de molienda

N°	CAN T	EQUIPO	CARACT	Hp inst	Hp trab
1	02	Molino de Bolas. Koppers.	9,5' x 12'	600	575
2	02	Transportador de gusano.	12" x 16'	4,8	4,4
3	04	Celdas unitarias Denver Sub A-1500	50" x 50"	24	14,5
4	02	Clasificador Helicoidal Duplex	54" x 33'	18	14,4



**Fig.1. Diagrama de flujo del circuito de molienda del año 1979**

La implementación del proyecto, que culminó en Mayo de 1994, contempló dos etapas. En la primera, se instaló temporalmente un hidrociclón Krebs D20 en posición vertical, el cual fue inclinado en pruebas posteriores. En la segunda etapa, se retiraron los clasificadores helicoidales, y se hicieron las instalaciones definitivas.

Durante la primera etapa de la implementación del proyecto, se experimentó diversas variables con el hidrociclón en posición vertical, pero no se logró estabilizar el sistema. Ante problemas como la alta carga circulante, y la descarga de gran cantidad de partículas gruesas a la salida del molino, se ensayó con el hidrociclón inclinado. Para ello, tomamos la experiencia de otras plantas<sup>(2,6)</sup>, una de ellas dedicada al procesamiento de minerales de cobre, y la otra al de plomo y zinc. Se decidió entonces una inclinación de 20° con respecto de la horizontal. Posteriormente se evaluó todos los parámetros para optimizar el sistema. Las pruebas realizadas verificaron la inclinación de 20°, con respecto de la horizontal, como la posición óptima para una eficiente clasificación del mineral de Milpo.

Actualmente (Fig. 2. Tabla II), la molienda y clasificación, está compuesta de dos circuitos cerrados. Cada molino recibe carga fresca de una faja de 24" a razón de 48 t/h. La descarga de cada molino se alimenta a su respectivo banco de dos celdas unitarias Den-



ver de 50" x 50" (100 pie<sup>3</sup> c/u). Las espumas de estas forman parte del concentrado final (recuperan alrededor del 60 % del Pb total, con leyes promedio de 75 % de Pb y 72 oz/tc de Ag), y los relaves son enviados a su propio hidrociclón Krebs D20 mediante bombas de 8' x 6'. Los over-flows de los hidrociclones se juntan para alimentar el circuito convencional de flotación de plomo.

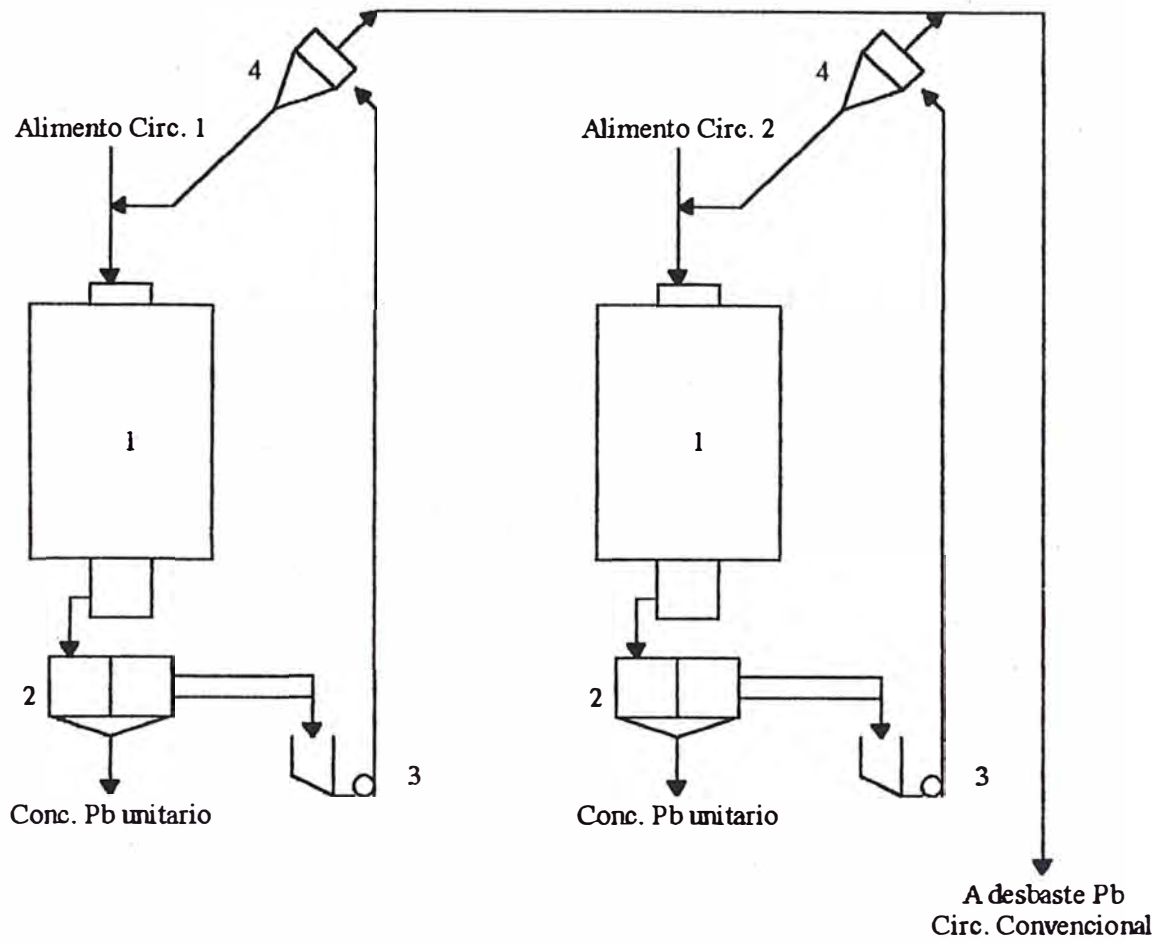


Fig.2. Diagrama de flujo del circuito actual de molienda

TABLA II. Equipos del circuito actual de molienda

Nº	CANT	EQUIPO	CARACT	Hp inst	Hp trab
1	02	Molino de Bolas.Koppers.	9.5' x 12'	600	588
2	04	Celdas Unitarias Denver Sub A-1500	50" x 50"	24	16,5
3	04	Bombas Faço	8" x 6"	48	33
4	04	Hidrociclones Krebs	20" Ø	---	---

### 3. EXPERIMENTACION

Durante la primera etapa de instalación de los hidrociclones, se pudo estudiar el circuito de molienda bajo tres circunstancias: con la operación de los clasificadores helicoidales, con la de los hidrociclones verticales y finalmente con los inclinados. Posteriormente, con la instalación definitiva (Fig. 3, 4), se evaluó la operación con fines de optimización.

La evaluación del clasificador helicoidal se hizo con 15 pruebas; la del hidrociclón vertical e inclinado, con un total de 60; y la evaluación de la operación, con más de 70 pruebas.

Los muestreos se hicieron durante lapsos de ocho horas, sin turno preferente de operación. En cada punto de muestreo se utilizó el equipo más adecuado para la captación de muestras, tanto por las características del flujo de pulpa, como por la granulometría de los productos.

Las características del hidrociclón estudiado son las siguientes:

Marca:	Krebs
Modelo:	D20
Diámetro de la parte cilíndrica:	20 pulg
Diámetro del Vortex Finder:	Variable entre $6 \frac{3}{8}$ y $7 \frac{3}{8}$ pulg
Diámetro del ápex:	Variable entre 2 y 3 pulg
Area del feed inlet:	$27.6 \text{ pulg}^2$
Ángulo incluido:	$14,8^\circ$
Diámetro del respiradero:	2 pulg

Durante la evaluación, se trató de mantener características similares de operación, sobre todo en tonelaje y densidad de overflow. El tonelaje de tratamiento se mantuvo en lo posible en 2 280 t/d. La Tabla III nos da idea de algunas características promedio de los productos durante la evaluación del hidrociclón inclinado a  $20^\circ$ :

**TABLA III. Algunas características de los productos. Hidrociclón inclinado a  $20^\circ$**

MUESTRA	Ps, %	Sp. Gr.
Alimentación	46,38	3,54
Over flow	31,67	3,21
Under flow	79,42	3,96

La densidad de descarga del molino varió entre 1 750 - 1 760 g/l, y la del underflow promedió 2 510 g/l.

Inmediatamente después de finalizar cada muestreo, se procedió a determinar los pesos y los porcentajes de sólidos y densidades. Las muestras debidamente secadas, se ensayaron químicamente por Zn, Fe, y Pb. Previamente se determinaban sus gravedades específicas.

Los balances del circuito se hicieron por pesos, por volúmenes, análisis granulométricos, y ensayos químicos. Tanto para el hidrociclón, como para las celdas unitarias, se utilizó el método de ajuste de datos<sup>(17, 18)</sup> de Reid.

Existen numerosas relaciones empíricas para los cuatro parámetros fundamentales en la operación de hidrociclones<sup>(19, 20, 21)</sup>. Para el estudio de resultados, nosotros escogimos la teoría de Plitt<sup>(22, 23)</sup>. La precisión de separación,  $m$ , considera que valores mayores de 2 corresponden a una excelente clasificación, y pertenece a la siguiente expresión:

$$y' = 1 - e^{[-0,693(d/d_{50})^m]}$$

## 4. EVALUACION DE LAS VARIABLES DE DISEÑO

### 4.1. Ángulo de inclinación

La práctica con hidrociclones verticales, tuvo las siguientes características con respecto del clasificador helicoidal: Elevó la carga circulante de 80 á 240%; disminuyó el tamaño de corte de 163 á 79 micrones; incrementó la proporción de finos en -200 mallas de 54 a 56%; y elevó ligeramente el consumo energético de 10 a 10,5 Kw-h/t.

El desequilibrio provocado por la mayor carga circulante en todo el circuito de molien-da, trajo serias dificultades en la operación de las celdas unitarias. Estas se subsanaron parcialmente con el incremento de la velocidad de rotación de los agitadores. La experiencia mostró que al incrementarse la carga circulante, se reducía en 14 % el tiempo de retención en las celdas, sin embargo, a pesar de que aumentaba el tonelaje alimentado a estas en 300 %, se producía una mejor calidad de concentrado de plomo (de 73% pasó a obtenerse 77%), pero con una reducción de casi 6 % en la recuperación.

El incremento de la carga circulante, también trajo como consecuencia la producción de un rebose más fino, que se pudo observar por el cambio drástico del  $d_{50}$ , y el leve incremento del porcentaje en la malla -200. Sin embargo no mejoró la eficiencia de clasificación, lo que significaba el paso de mineral fino al underflow, que provocaba la sobremolienda de la galena.

En las pruebas con hidrociclones inclinados, se trabajó con ángulos entre 15 y 30°, porque debajo de 15, cualquier parada intempestiva podía obstruir la descarga del ápex, y

por encima de 30° se producía mayor carga circulante que creaba problemas tanto porque el molino descargaba partículas muy gruesas, como porque las celdas unitarias no tenían capacidad suficiente para admitir grandes volúmenes de pulpa.

Durante la práctica (Tabla IV), se pudo observar lo siguiente: Conforme el hidrociclón iba variando desde una posición cercana a la horizontal hacia otra vertical, la carga circulante aumentaba fuertemente, mientras el by pass lo hacía lentamente. A la inversa, el  $d_{50}$  decrecía juntamente con la precisión de separación (eficiencia).

**Tabla IV. Evaluación del hidrociclón a diferentes ángulos de inclinación**

$\angle$ inc °	CC %	Bp %	$d_{50}$ μ	$d_{50c}$ μ	Efic m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Da g/l	Do g/l
15	103,62	10,0	135	173	1,60	9,95	53,64	3,82	4,47	1430	1290
20	123,11	9,0	122	149	1,56	6,61	57,30	4,13	5,00	1456	1290
25	146,70	10,7	113	135	1,38	9,08	52,27	5,04	5,50	1486	1286
30	173,67	12,4	90	117	1,24	9,50	55,54	6,34	5,50	1550	1290

Estos valores confirmaban la tendencia de los hidrociclones inclinados a producir separaciones gruesas, a requerir mayor dilución de pulpa en el alimento, y a reducir la carga circulante. Era normal que la eficiencia disminuyera cuando se iba hacia la vertical, ya que había una mayor proporción de finos en el underflow, y viceversa.

A pesar de que los resultados con 15 y 20° de inclinación eran parecidos (Fig. 3), y el de 15 era mejor en algunos parámetros, se decidió la inclinación de 20 porque la proporción de gruesos en la malla +70 en el overflow era menor, y la proporción en malla -200, alrededor de 57 %.

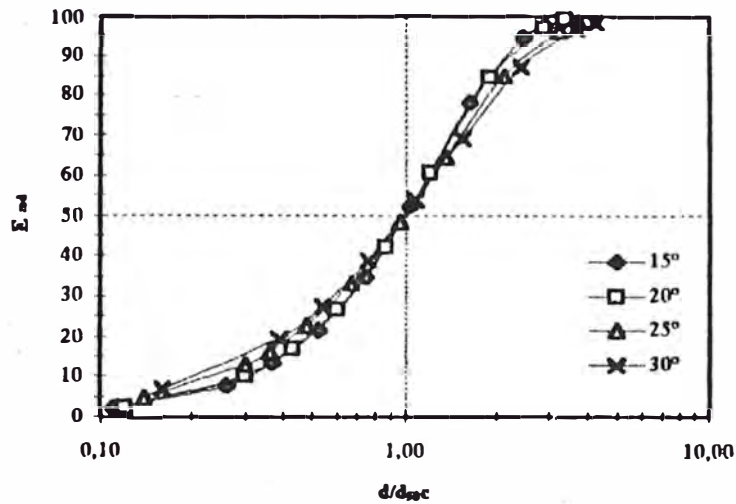


Fig. 3 Curvas de eficiencia reducida en función del grado de inclinación del hidrociclón

#### 4.2. Diámetro de vortex

La ampliación del diámetro del vortex durante la evaluación del hidrociclón vertical, no ofreció resultados importantes, por lo cual en esta etapa se mantuvo la dimensión original de  $7 \frac{3}{8}$  pulgadas.

Al reducir el diámetro de vortex en el hidrociclón inclinado a  $20^\circ$ , se observó que la carga circulante incrementaba fuertemente, mientras el by pass disminuía ligeramente. Esto significaba que a pesar del gran incremento de carga circulante la proporción de finos de salojados por el underflow no era tan fuerte, aunque en términos totales (t/h de malla - 200) afectaba la eficiencia de clasificación. Dados los resultados de proporciones de mineral en las mallas 70 y 200, el vortex seleccionado fue el de  $6 \frac{5}{8}$  pulg.

Tabla V. Evaluación de diámetros de vortex con el hidrociclón inclinado a  $20^\circ$

$\varnothing$ vor pulg	CC %	Bp %	$d_{50}$ $\mu$	$d_{50c}$ $\mu$	Eflc m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Da g/l	Do g/l
$6 \frac{3}{8}$	131,8	8,4	117	143	1,39	8,02	54,70	4,80	4,25	1517	1293
$6 \frac{5}{8}$	123,1	9,0	122	149	1,56	6,61	57,39	4,13	5,00	1456	1290
$7 \frac{3}{8}$	92,8	10,4	154	200	1,81	10,73	51,33	3,37	4,00	1417	1290

### 4.3. Diámetro de ápex

En el hidrociclón vertical (Tabla VI), la práctica con ápex de diversos diámetros, permitió establecer mejores resultados de operación. En este ciclo de pruebas, se ensayó con ápex de 2, 2 ¼, 2 ½, 2 ¾, y 3 pulgadas, determinándose que la dimensión de 2 ¾, sería la más adecuada para obtener la más alta eficiencia de clasificación, aún cuando la carga circulante era muy alta.

**Tabla VI. Evaluación del ápex en hidrociclón vertical**

Øápex pulg	CC %	Bp %	d <sub>50</sub> μ	d <sub>50c</sub> μ	Efic m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Da g/l	Do g/l
2	200,12	7,6	98	115	1,27	10,77	54,81	6,01	6,6	1609	1270
2 ½	239,67	14,7	94	125	1,44	11,17	54,43	6,67	6,0	2040	1270
2 ¾	255,37	20,0	84	132	1,62	10,64	55,97	8,47	6,0	1668	1270
3	266,30	19,4	82	112	1,17	11,92	55,02	9,06	6,6	1629	1284

A 20° de inclinación, no se observó efectos mayores del diámetro de ápex, excepto que se tratara de un diámetro excesivamente pequeño.

Cuando el hidrociclón se va acercando a la posición vertical (obsérvese los resultados a una inclinación de 25°), el diámetro del ápex cobra mucha importancia (Tabla VII). Obsérvese cómo incrementa la carga circulante con mayor diámetro de ápex, y con ella el by pass, es decir la posibilidad de sobremolienda.

**Tabla VII. Evaluación del ápex en el hidrociclón inclinado a 25°**

Øápex pulg	CC %	Bp %	d <sub>50</sub> μ	d <sub>50c</sub> μ	Efic m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Da g/l	Do g/l
2 ¾	146,70	10,7	113	135	1,38	9,08	52,27	5,04	5,5	1486	1286
3 ½	170,12	15,2	99	137	1,44	9,75	54,54	6,45	5,5	1523	1290

#### 4.4. Efecto del Respiradero (Vent Pipe)

La instalación del respiradero no modificó mucho la eficiencia de clasificación (Tabla VIII), pero incrementó la carga circulante. El "efecto sifón", que producía incremento de la proporción de mineral grueso en el overflow, se corrigió con el Vent Pipe, pero al mismo tiempo incrementó el by pass, es decir los finos en underflow, lo cual era perjudicial por la sobremolienda de galena y la excesiva cantidad de mineral que excedía la capacidad del molino.

**Tabla VIII. Efecto del respiradero en el hidrociclón vertical con apex de 2 1/4".**

Resp	CC %	Bp %	d <sub>50</sub> μ	d <sub>50c</sub> μ	Efic m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Da g/l	Do g/l
CON	189,35	14,1	103	148	1,46	11,96	53,92	10,76	5,6	1895	1290
SIN	130,31	9,8	116	160	1,44	12,63	53,08	4,09	5,6	1770	1310

En lo esencial, el efecto del respiradero en el hidrociclón inclinado es similar al observado en el vertical. Entre las más saltantes diferencias, podemos anotar las originadas exclusivamente por el grado de inclinación: hay menor incremento de carga circulante cuando el respiradero es instalado en los hidrociclones más horizontales.

En general, la instalación del respiradero incrementa la carga circulante y el by pass ligeramente. Reduce también el d<sub>50</sub> y muy levemente la eficiencia. La mejor clasificación se obtiene con el hidrociclón inclinado a 20°, ápex de 2 3/4 pulgadas y vortex de 6 5/8 .

**Tabla IX . Efecto del respiradero en hidrociclón inclinado a 15°. Apex 2 3/4 ". Vortex 6 5/8 ".**

Resp	CC %	Bp %	d <sub>50r</sub> μ	d <sub>50c</sub> μ	Efic m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Da g/l	Do g/l
CON	108,33	11,0	134	181	1,64	9,52	53,09	4,08	4,50	1416	1290
SIN	90,69	9,4	145	183	1,81	9,25	53,12	3,29	4,65	1392	1290

**Tabla X . Efecto del respiradero en hidrociclón inclinado a 20°. Apex 2 3/4 ". Vortex 7 3/8 ".**

Resp	CC %	Bp %	d <sub>50r</sub> μ	d <sub>50c</sub> μ	Eflc m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Da g/l	Do g/l
CON	98,85	10,6	152	194	1,67	10,62	50,62	3,53	3,96	1453	1290
SIN	87,34	10,0	160	209	1,68	12,19	48,96	3,06	3,20	1415	1295

**Tabla XI. Efecto del respiradero en hidrociclón inclinado a 20°. Apex 2 3/4 ". Vortex 6 5/8 "**

Resp	CC %	Bp %	d <sub>50r</sub> μ	d <sub>50c</sub> μ	Eflc m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Da g/l	Do g/l
CON	116,97	10,1	126	150	1,52	9,03	54,75	4,47	4,58	1460	1290
SIN	97,79	9,0	142	176	1,59	9,47	53,99	3,52	4,50	1462	1287

## 5. EVALUACIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN

### 5.1. Densidad

En esta evaluación, se trató de obtener una densidad de overflow adecuada para la flotación, mediante la variación de la densidad del alimento.

**Tabla XII. Evaluación del hidrociclón a 20° a diferentes densidades de alimentación**

Da g/l	Do g/l	CC %	Bp %	d <sub>50</sub> μ	d <sub>50c</sub> μ	Eflc m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Dm g/l
1536	1395	75,35	12,4	156	228	1,64	12,55	51,68	4,05	3,00	1650
1533	1360	85,60	11,7	151	210	1,65	12,45	51,05	3,81	3,50	1720
1514	1330	101,69	11,4	140	189	1,57	10,67	52,33	3,96	4,04	1740
1492	1300	108,68	11,5	123	169	1,41	9,57	54,86	4,05	4,50	1800
1470	1270	140,27	11,2	116	157	1,71	7,91	56,02	4,87	4,75	1880



Se observó lo siguiente: A más dilución del alimento, crece la carga circulante, el by pass decrece como el tamaño de corte, y la eficiencia aumenta. Esto hace que el porcentaje de -200 mallas crezca, y disminuya la proporción en la malla +70.

Como se puede ver en la Tabla XII y en la Fig. 4, en hidrociclones inclinados es muy importante trabajar a bajas densidades para obtener buena eficiencia de clasificación.

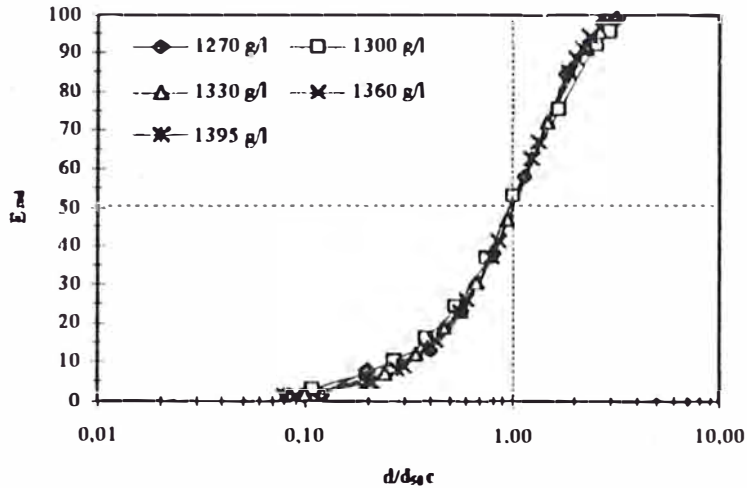


Fig. 4. Curvas de eficiencia reducida en función de las densidades del Overflow

## 5.2. Dimensión de la bomba

Tanto para reducir el consumo energético, como para optimizar la clasificación, se probaron dos dimensiones de bomba (Tabla XIII). A similares condiciones de presión de alimentación, la bomba de 6 x 6 produjo menor carga circulante pero similar retorno de finos con posibilidad de sobremolienda. Asimismo, no se logró alterar la fineza del overflow.

Tabla XIII. Evaluación con diferentes bombas de alimentación.

BOMBA	CC	Bp	d <sub>50</sub>	d <sub>50c</sub>	E <sub>nc</sub>	+ # 70 O'f	- # 200 O'f	- # 200 U'f	P	Da	Do
pulg	%	%	μ	μ	m	%	%	t/h	psi	g/l	g/l
8 x 6	97,47	9,5	144	197	1,90	10,69	53,47	3,16	3,00	1460	1284
6 x 6	85,91	8,0	155	195	1,69	11,46	52,29	3,05	3,05	1386	1282

### 5.3. Presión. Velocidad de Bombeo.

Existe una presión de alimentación recomendable para obtener una buena clasificación. Para la bomba de 8 x 6, debe lograrse una presión entre 3 á 4 psi, y una velocidad de bombeo de 750 rpm.

Para la bomba 6 x 6, esta varía entre 4,5 y 5 psi, que corresponde a una velocidad de 950 rpm, y una carga circulante entre 120 y 125 %, cuando el impulsor y forros de bomba son nuevos. La comparación entre la performance de estas dos bombas sugiere disminución del consumo energético cuando se usa la bomba 6 x 6, y una menor recirculante, parámetros positivos dentro de la operación de clasificación.

**TABLA XIV. Hidrociclón a 20°. Variación de presión y velocidad de bombeo. (Bomba de 6" x 6")**

Veloc rpm	CC %	Bp %	d <sub>50</sub> μ	d <sub>50c</sub> μ	Efic m	+ # 70 O'f %	- # 200 O'f %	- # 200 U'f t/h	P psi	Da g/l	Do g/l
868	85,91	8,0	155	195	1,69	11,46	52,29	3,05	3,05	1386	1282
950	94,21	6,0	128	170	1,52	8,25	57,47	3,08	3,50	1430	1290
1013	131,80	8,4	117	143	1,39	8,02	54,70	4,80	4,25	1517	1293

## 6. PARÁMETROS DEL MATERIAL

### 6.1. Clasificación preferencial

Para concluir con la evaluación del hidrociclón inclinado, creímos conveniente estudiar el comportamiento de los minerales durante la clasificación. Como bien sabemos, la clasificación en los hidrociclones se da tanto por tamaño de partículas como por diferencias en gravedad específica<sup>(13, 14, 24)</sup>. En el hidrociclón vertical, los minerales se clasifican con mejor eficiencia unos que otros dependiendo de sus pesos específicos. En el caso concreto de la galena, esta tiende a regresar al molino, aún cuando ya haya alcanzado un tamaño apropiado para flotar.

**TABLA XV. Clasificación preferencial en diversos clasificadores**

<b>Clasificador</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Galena</b>	<b>Pirita</b>	<b>Esfalerita</b>
<b>Helicoidal</b>	<b>Recup., %. U'flow</b>	47	50	43
	<b>Eficiencia, m</b>	1,56	1,73	1,90
	<b>-200 mallas, %. O'flow</b>	73	52	55
	<b>d<sub>50</sub></b>	100	154	170
<b>Hidrociclón Vertical*</b>	<b>Recup., %. U'flow</b>	93	83	76
	<b>Eficiencia, m</b>	0,70	1,12	1,06
	<b>-200 mallas, %. O'flow</b>	59	52	51
	<b>d<sub>50</sub></b>	42	75	84
<b>Hidrociclón Inclinado**</b>	<b>Recup., %. U'flow</b>	81	75	64
	<b>Eficiencia, m</b>	1,10	1,82	2,01
	<b>-200 mallas, %. O'flow</b>	80	56	55
	<b>d<sub>50</sub></b>	56	93	143

\* Corresponde a hidrociclón con respiradero y un ápex de 2 ¼

\*\* Corresponde a una inclinación de 20° y un ápex de 2 ¾

En el clasificador helicoidal también puede observarse este efecto, sin embargo la eficiencia de clasificación por minerales es mucho más cercana. Es en el hidrociclón vertical donde las eficiencias son bastante diferentes y no alcanzan valores que indiquen una buena clasificación.

En el hidrociclón horizontal, se presenta el mismo fenómeno. Los minerales más pesados tienen tendencia a concentrarse preferentemente en el underflow, y los ligeros en el overflow.

La preconcentración de galena en el underflow conduce normalmente a la sobremolienda de partículas, trayendo como consecuencia pérdidas en la recuperación de esos minerales.

Si comparamos la eficiencia de clasificación de los tres minerales principales, podremos ver que el hidrociclón clasifica exitosamente a la esfalerita, con mucha pobreza a la galena, y mantiene entre estos dos a la pirita. Este efecto es menguado cuando se inclina el hidrociclón

Comparativamente, se producen mejores eficiencias de clasificación por minerales en el hidrociclón inclinado, y una mayor recuperación de galena entre la porción de partículas liberadas en el overflow.

## 7. RESULTADOS ECONOMICOS

Se hace un resumen de la significancia económica como resultado del cambio de los clasificadores helicoidales por hidrociclones, la Inversión tuvo los siguientes rubros :

* Maquinaria y Partes Principales	230 000 US \$
* Instalación y Equipos Menores	257 000 US \$
<b>Total</b>	<b>487 000 US \$</b>

La Tabla XIV muestran globalmente los beneficios alcanzados

**TABLA XVI. Beneficios proyectados y actuales**

<b>RUBRO</b>	<b>Proyectado US \$/año</b>	<b>Actual US \$/año</b>
<b>AHORROS</b>		
Mantenimiento	40 000	65 262
<b>GANANCIAS</b>		
Mayor disponibilidad de equipo	270 000	474 544
<b>PERDIDAS</b>		
Energía		34 465
<b>TOTAL</b>	<b>440 000</b>	<b>505 341</b>

La ventaja económica del cambio es necesario disgregarla del siguiente modo

### 7.1 Ahorro por Menor Costo de Mantenimiento Mecánico

En el rubro de mantenimiento mecánico la operación con ciclón inclinado en Milpo significó un ahorro de US \$ 65,262/anual, para hallar dicha cifra se hace el siguiente análisis.

### 7.1.1. Determinación del Costo por Repuesto

REPUESTO	DURACION CAMBIO (mes)	CANT.	COSTO UNITARIO US \$	COSTO TOT/AÑO	OBSERVACIONES
Scoop Feeder	18	02	10 000,00	13 500,00	Costo total es de 1 año
Drum Feeder	12	02	7 000,00	14 000,00	
Zapatillas de clasificador	18	520	15,87	5 501,00	130 el juego x 4 ejes
Helicoide derecho	12	20	56,75	1 135,00	
Helicoide izquierdo	12	20	73,04	1 460,00	
Brazo de helicoides	12	40	92,57	3 703,00	
Chumacera submergible	3	04	1 800,00	28 800,00	Costo \$ 3 000 (reparac 60%)
Transportador de Gusano	6	02	1 500,00	6 000,00	
Adicionales	12			7 000,00	Reductores, pernos, cajonería
<b>TOTAL</b>				<b>81 099,00</b>	

Fuente : Duración y Cantidad, Mantenimiento Mecánico Planta  
Costo Unitario, Almacén, Mantenimiento Mecánico Planta  
y Peruvian Trading.

**Cuadro : Costo de Mantenimiento del ciclón inclinado**

REPUESTO	DURACION CAMBIO (mes)	CANT.	COSTO UNITARIO US \$	COSTO TOT./AÑO	OBSERVACIONES
Spout Feeder	2	2	342,00	4 104	Reencauchado -1 año
Impulsador bomba 8 x 6	4,5	2	200,00	1 066	1 año
Forro de succión superior	4	2	210,00	1 262	Bomba 8 x 6
Forro de succión inferior	4	2	252,31	1 513	Bomba 8 x 6
Forro de lado del gland	6	2	450,00	1 800	Bomba 8 x 6
Bocina de bomba	4	2	102,00	612	Bomba 8 x 6
Inlet Head Liner	18	2	352,58	470	Forros Hidr. 20"
Cover plate	18	2	233,40	311	Forros Hidr. 20"
Cilinder liner	18	2	527,81	703	Forros Hidr. 20"
Upper cone	18	2	450,05	600	Forros Hidr. 20"
Cone liner	18	2	152,69	458	Forros Hidr. 20"
Apex	> 12	2	300,00	600	Material cerámico
Vortex	> 12	2	584,10	1 168	Material Ni Hard
Manguera y accesorios*	> 48	2	12500,00	6 250	Marca Trellex
<b>TOTAL</b>				<b>20 917</b>	

**7.1.2 Determinación de Costos por Mano de Obra**

**\* Con clasificadores Helicoidales**

Se utilizaba 4 hombres x 30 horas = 120 horas

Mas 30 horas extra adicionales

Total 150 horas-hombres/mes = 1800 horas-hombre/añual

Costo de 1 hora-hombre = US \$ 4.15

Costo anual = 4.15 x 1800 = us \$ 7470

**\* Con ciclones**

Se utiliza 3 hombres x 16 horas = 48 h-hombre/mes

Total 48 h-hombre/mes = 576 h-hombre/añual

Costo 1 h-hombre = US \$ 4.15  
 Costo anual = 4.15 X 576 = US \$ 2390

### 7.1.3 Determinación del Ahorro Total por Mantenimiento Mecánico

* Por mantenimiento de equipos	81,099
Clasificador helicoidal	20,917
Ciclón inclinado	
 AHORRO US \$/ANUAL	 60,182 (A)
 * Por Mano de Obra	
Clasificador Helicoidal	7,470
Ciclón inclinado	2,390
 AHORRO ANUAL TOTAL (A) + (B)	 US \$ 65,2 62 (B)

## 7.2 Ganancias por Mayor Disponibilidad de Equipos

Se estima un incremento de utilidades por US\$ 474,544 por una mayor disponibilidad de equipos como consecuencia de un menor tiempo de mantenimiento con el uso de ciclones, el cálculo se diegrega del siguiente modo

### 7.2.1. Horas de Parada por Mantenimiento

Se hizo una comparación entre el tiempo utilizado en mantenimiento durante un año, tanto en clasificadores como en ciclones inclinados : los meses considerados corresponden a períodos íntegramente con uno u otro equipo, el siguiente es un cuadro resumen :

CLASIFICADOR HELICOIDAL		HIDROCICLON INCLINADO	
FECHA	Mantenimiento (L.)	FECHA	Mantenimiento (h)
ENE. 92	65,00	JUN. 94	37,0
FEB. 92	41,00	JUL. 94	26,0
MAR. 92	44,50	AGO. 94	38,0
ABR. 92	62,00	SET. 94	28,0
MAY. 92	49,50	OCT. 94	19,5
JUN. 92	50,00	NOV. 94	22,5
JUL. 92	52,00	DIC. 94	16,0
AGO. 92	55,50	FEB. 95	5,5
SET. 92	50,00	MAR. 95	65,0
OCT. 92	54,00	ABR. 95	13,0
NOV. 92	53,00	MAY. 95	48,5
DIC. 92	51,00	JUN. 95	17,5
TOTAL	627,75		339,50
Prom. Mens.	52,31		28,29
%	100,0		54,1

Fuente : Reporte de mantenimiento mecánico programado Mantenimiento Mecánico Planta

### 7.2.2. Disponibilidad de Equipo

A. Tiempo utilizado por mantenimiento programado durante 1 año :

- \* Con clasificador helicoidal      627,75 horas    - 26,16 días
- \* Con ciclón                              339,50            = 14,15 días

B. Disponibilidad Mecánica

- \* Con Clasificador helicoidal      365-26,16      = 338.84 días
- \* Con Ciclón                              365-14,15      = 350.85

Incremento de disponibilidad por uso de ciclón : 12.01 días



### 7.2.3 Incremento de Utilidades por Mayor Disponibilidad de Equipos

Con ciclón se tienen anualmente 12 días adicionales de tratamiento, considerando un promedio de 2280 toneladas/día el tonelaje mínimo a incrementar durante un año sería de :

$$* 12.01 \cdot x 2280 = 27,382.8 \text{ toneladas/año}$$

Considerando el valor promedio de las utilidades por tonelada tratada en Milpo según los datos del siguiente cuadro

MES	COSTOS DE (US \$/ t )		
	Mineral tratado	Producción	Mineral bruto
ENE	36,80	28,56	8,24
FEB	39,56	30,41	9,15
MAR	45,71	30,83	14,88
ABR	37,52	33,07	4,45
MAY	44,65	36,04	8,61
JUN	46,92	33,81	13,10
JUL	45,81	31,86	13,96
AGO	51,81	30,27	21,54
SET	50,47	31,36	19,11
OCT	54,76	27,82	26,94
NOV	66,02	31,79	34,22
DIC	63,97	30,21	33,76
PROMEDIO	48,67	31,34	17,33

Luego se obtiene un incremento anual de :

$$17.33 \cdot x 27,382 = 474,543.9 \text{ US\$}$$

### 7.3 Significancia del Mayor Consumo de Energía

Con el nuevo circuito de ciclones inclinados se estima un incremento en el costo de energía que asciende a 34,465 US \$/ Anual, el detalle es el siguiente :

A. Formulas utilizadas para el cálculo

\* Potencia (Hp) =  $\sqrt{3} \times \text{amp (trab)} \times \text{kvol (trab)} \times \cos \phi \times 1,341$

\* Potencia total (Kw) = (Nº de equipos) x Hp x factor 0.746

\* Kw-h/T = Potencia (kw) x tiempo (hrs operadas)/min tratado

B. Consumo de energía trabajando con Helicoidales

EQUIPO	CALCULO	Kw	Kw %
Clasificadores	2 x 14,4 x 0,746	21,4848	2,55
Celdas Unitarias	4 x 14,5 x 0.746	43,2680	4,74
Transportador de gusano	2 x 4,4 x 0.746	6,5648	0,72
Molinos	6 802 108 / 8 082,76	841,5576	92,19
<b>TOTAL</b>		<b>912,8752</b>	<b>100,00</b>
Kw-h/t	912,8752 x 8 082,76 / 776,507.53	9,502	

Fuente : Mantenimiento Eléctrico Planta

C. Consumo de energía trabajando con Hidrociclones Inclinados

EQUIPOS	CALCULO	Kw	Kw, %
Bombas de Hidrociclones	2 x 21,1 x 0,746	31,481	3,18
Celdas Unitarias	4 x 16,5 x 0,746	49,236	4,97
Molinos	7 512 150/8 257,98	909,684	91,85
<b>TOTAL</b>		<b>990,401</b>	<b>100,00</b>
Kw h/	990,401 x 8 257,98/767 038,81	10,663	

Fuente : Mantenimiento Eléctrico Planta

### 7.3.1. Costo de Energía con los dos Sistemas de Clasificación

#### A. Considerado

* Días operados anualmente	350 días
* Tratamiento diario	2280 toneladas
* Costo de energía	0,0372 \$/Kw-h
* Mayor consumo por uso de ciclones	$10,663 - 9.502 = 1.161$

#### B. El incremento del costo por trabajar con ciclones es :

$$2,280 \text{ T/día} \times 350 \text{ días} \times 1.161 \text{ kw-h/T} \times 0,0372 \text{ US\$/kw-h} = 34,465$$

US \$ 34,465 anualmente de mayor gasto por energía

## 8. CONCLUSIONES

1.- En este trabajo hemos mostrado cómo evolucionó la clasificación primaria en la Planta Concentradora de Milpo. Hemos comparado la operación del antiguo clasificador helicoidal con los hidrociclones en posiciones vertical e inclinado, lo cual nos ha permitido determinar las bondades de la instalación de hidrociclones en esta última posición.

2.- En resumen, podemos decir que el hidrociclón inclinado permite una mejor eficiencia de clasificación (Fig. 5) con respecto del hidrociclón vertical. Este ayuda a obtener una buena fineza en el overflow. Es necesario tener en cuenta aquí, que un bajo  $d_{50}$  no significa asegurar una mayor fineza en el overflow. Este depende, sobre todo, de la eficiencia.

3.- También disminuye la carga circulante. Permite la obtención de concentrados de galena argentífera más limpios, y una mayor recuperación de la misma. Obsérvese que la proporción de mineral por debajo de malla 200 que regresa al molino, es menor que en el hidrociclón vertical. Esto evita la sobremolienda, principalmente, de galena argentífera, y contribuye así a su mejor recuperación.

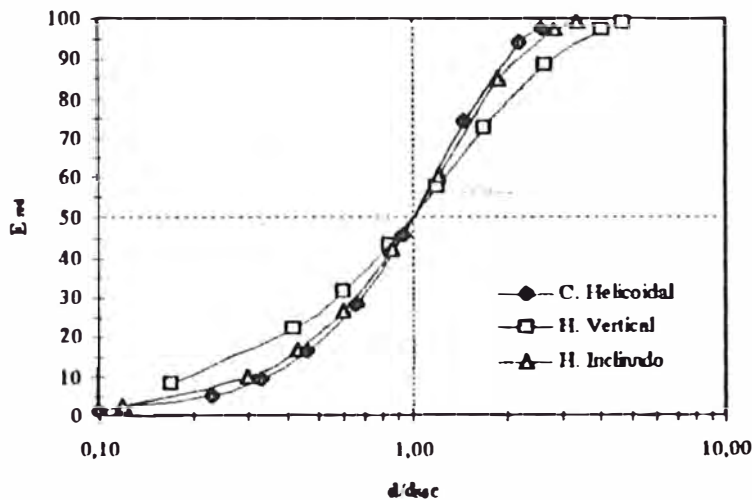


Fig. 5. Curvas de eficiencia reducida por tipo de clasificadores

4.- Incrementa también la disponibilidad de los equipos del circuito de molienda entre 96 y 97 %, lo que ayuda a lograr una mayor producción. Algunas ventajas adicionales incluyen el menor desgaste de piezas, apex, vortex y forros, y la eliminación del scoop y drum feeder del molino y las chumaceras submergibles del clasificador helicoidal, que reportan altos costos de mantenimiento.

5.- En general se observan ciertas relaciones entre algunos parámetros evaluados. Al aumentar la carga circulante, se incrementan el by pass, y el tonelaje de malla -200 que vuelve al molino. También disminuye el tamaño de corte  $d_{50}$ , y no se observa relación directa con la presión, la eficiencia y la proporción de mineral en malla +70 y -200 del overflow.

6.- En cuanto al comportamiento de las especies minerales dentro de la clasificación con hidrociclón inclinado, cualitativamente este resulta similar al observado en el hidrociclón vertical, sin embargo se obtienen mejores eficiencias, lo que conviene sobre todo para la concentración de la galena, el único friable de los minerales presentes.

**TABLA XVII. Cuadro comparativo de clasificadores.**

CLASIFICADOR	CC	Bp	$d_{50}$	$d_{50c}$	EPc	+ # 70 O'f	- # 200 O'f	- # 200 U'f	P	Da	Do
	%	%	$\mu$	$\mu$	m	%	%	t/h	psi	g/l	g/l
<b>Helicoidal</b>	79,89	6,0	163	193	1,75	10,92	54,52	2,00	-	1458	1294
<b>Hid. Vertical</b>	239,3	16,2	79	106	1,17	10,08	56,39	9,05	6,0	1686	1315
<b>Hid. Inclinado</b>	123,1	9,0	122	149	1,56	6,61	57,39	4,13	5,0	1456	1290

7.- Con el hidrociclón inclinado la Carga Circulante óptima que hemos encontrado varía entre 120 y 125 %, y el  $d_{50}$  adecuado entre 115 y 125 micrones. Con estos parámetros se consiguen buenos resultados en la metalurgia del plomo principalmente. Para la metalurgia de zinc faltan ajustes que tendrán que hacerse en el mismo circuito de flotación, tal vez con remolienda adicional.

8.- Con respecto a las bombas ideales para la clasificación, nuestros estudios indican que para un tonelaje de tratamiento de 2280 t/d, podría reducirse el gasto energético con la bomba de 6 x 6, sin embargo se incrementaría el costo de mantenimiento. La bomba 8 x 6 está ligeramente sobredimensionada, y tiene bajo costo de mantenimiento por la baja presión de alimentación que se utiliza. Esta bomba está proyectada para la ampliación de planta que actualmente estamos desarrollando.

9. Los valores de la eficiencia de la clasificación “m” para un mineral polimetálico como el nuestro, nos muestran bajos valores a través de las diferentes pruebas realizadas que difícilmente llegan a 2.

10. El by pass considerado es el obtenido de la curva tromp al prolongar la curva del porcentaje de recuperación en peso en el Under Flow hasta interceptar al eje de la Y. No se ha considerado como la partición de agua por no tenerse aún claro el comportamiento de un mineral polimetálico en la etapa de la clasificación.

11. En la evaluación de la ápex del ciclón en posición vertical se puede notar para una abertura de  $2\frac{3}{4}$ ”, se tiene una máxima eficiencia de clasificación disminuyendo sus valores al aumentar o disminuir el diámetro del ápex, notándose en forma clara los efectos de “paraguas” y “soga” respectivamente.

## NOMENCLATURA

Bp	By pass. Es la proporción de líquido arrastrado en el Underflow
CC	Carga circulante, %
Da	Densidad de alimento
Dm	Densidad de descarga del molino
Do	Densidad de overflow
d	Diámetro de la partícula, micrones
$d_{50}$	tamaño de partícula para el cual $y' = 50\%$
$d_{50c}$	$d_{50}$ corregido
g/l	Gramo por litro
m	Parámetro en la expresión de Rosin Rammler para una curva de clasificación que sirve como medición de la precisión de separación. En la teoría de Plitt representa la eficiencia de clasificación.
O'f	Overflow
oz/tc	Onzas por tonelada corta
P	Presión
Ps	Porcentaje de sólidos
psi	libras por pulgada cuadrada (unidades de presión)
pulg	pulgadas
Sp. Gr.	Gravedad específica
TCPH	Toneladas cortas por hora
t/h	Toneladas métricas secas por hora
U'f	Underflow
$y'$	Eficiencia corregida
$\varnothing$ vort	Diámetro de vortex, pulgadas
$\varnothing$ ápex	Diámetro de ápex, pulgadas
$\angle$ inc	Angulo de inclinación con respecto a la horizontal

## REFERENCIAS

- 1. Leeman, J.; Fonteln, F.**  
PROCESS FOR SEPARATING MIXTURE OF SOLID PARTICLES INTO FRACTIONS BY MEANS OF A HYDROCYCLONE  
Patente. 4 pp. United States Patent Office. December 24, 1957.
- 2. Hochscheid, R.E.**  
EXPLICAR EL DESARROLLO EN ST. JOE VIBURNUM  
Krebs Engineers International. Perú. 9 pp. Setiembre 7, 1984.
- 3. Austin, L.; Concha, F.**  
DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CIRCUITOS DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN  
Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo. CYTED. Subprograma de Tecnología Mineral. Red de Fragmentación XIII-A. Green Print Impresores. Concepción. Chile. 394 pp. 1994.
- 4. Lira, P.**  
CICLONES KREBS. PRINCIPIOS Y VARIABLES DE CONTROL  
Clasificación y concentración gravimétrica de minerales. TECSUP. Lima. Perú. 14 pp. 23 - 24 de Marzo. 1995.
- 5. Heiskanen, K.**  
CLASSIFICATION IN INDUSTRIAL CIRCUITS  
Mineral Processing and Environment. A volume in memory of Alexander Sutulov. Proceedings of the IV Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology; and III Latin-American Congress on Froth Flotation. Volume I. Concepción, Chile. p. 1-18. November 20-23, 1994.
- 6. Tello F., R.**  
EVOLUCION DEL CIRCUITO DE MOLIENDA EN LA CONCENTRADORA "LA CARIDAD".  
VI Symposium sobre Molienda. Armco - Chile. p. 148-162. 1990.
- 7. Schmidt, M. P.; Turner, P.**  
A FLAT BOTTOM OR HORIZONTAL CYCLONES... Which is right for you?  
World Mining Equipment. p.21-22. September 1993.
- 8. Parra, H.; Chía, J.**  
EVOLUCIÓN DE LA CLASIFICACIÓN PRIMARIA EN MILPO  
Clasificación y concentración gravimétrica de minerales. TECSUP. Lima. Perú. 9 pp. 23 - 24 de Marzo. 1995.
- 9. Trawinski, H.**  
THEORY, APPLICATIONS, AND PRACTICAL OPERATION OF HYDROCYCLONES  
Eng. Min. Journal, 177. U.S.A. p 115 - 127. September 1976.
- 10. Arterburn, R. A.**  
THE SIZING OF HYDROCYCLONES  
Krebs Engineers. Menlo Park, California. U.S.A. 27 pp. October 1976.
- 11. Bouso A., J.**  
NUEVOS TIPOS DE HIDROCICLONES.  
Canteras y Explotaciones. España. Mayo 1990.
- 12. Bouso, J. L.**  
APLICACIÓN DE HIDROCICLONES  
Clasificación y concentración gravimétrica de minerales. TECSUP. Lima. Perú. 36 pp. 23 - 24 de Marzo. 1995.

**13. Villachica L., C.; Parra V., H.**

UNA CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA MOLIENDA Y CLASIFICACION PREFERENCIAL EN MINERALES POLIMETALICOS.  
III Symposium sobre Molienda. Armco - Chile. p. 304-347. 1981.

**14. Parra V., H.**

SELECCIÓN DE UN CIRCUITO DE MOLIENDA. ESTUDIO DE UN CASO.

Tesis para optar el Título de Ingeniero Metalurgista. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima - Perú.  
201 pp. 1985.

**15. Anónimo**

DESIGN OF CYCLONES AND CYCLONE SYSTEMS FOR CLOSED CIRCUIT GRINDING

Corporación técnica de comercio S. A. Krebs Engineers International. U.S.A. 7 pp.

**16. Anónimo**

CICLONES HORIZONTALES

Corporación técnica de comercio S. A. Krebs Engineers International. Perú. 3 pp.

**17. Reid, K. J.**

RECONCILING HYDROCYCLONE PARTICLE-SIZE DATA

Chemical Engineering. p. 43-44. June 27, 1983.

**18. Quiroz, I.**

INGENIERIA METALURGICA. Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales.

Perú. 280 pp. Setiembre 1986.

**19. Wills, B. A.**

FACTORS AFFECTING HYDROCYCLONE PERFORMANCE

Mining Magazine. United Kingdom. p. 142 - 146. February 1980.

**20. Bouso, J. L.**

EFICIENCIAS EN HIDROCICLONES

Clasificación y concentración gravimétrica de minerales. TECSUP. Lima. Perú. 16 pp. 23 - 24 de Marzo. 1995.

**21. Smith, M. R.; Gochin, R.**

CLASSIFIERS. PART 1: AN INTRODUCTION TO THE THEORY AND PRACTICE

Mining Magazine. United Kingdom. p. 27 - 39. July 1984.

**22. Plitt, L. R.**

THE ANALYSIS OF SOLID-SOLID SEPARATIONS IN CLASSIFIERS

CIM Bulletin. Canadá. p. 42 - 47. Abril 1971.

**23. Plitt, L. R.**

A MATHEMATICAL MODEL OF THE HYDROCYCLONE CLASSIFIER.

CIM Bulletin. Canadá. p. 114 - 123. December 1976.

**24. Chía A., J.**

INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN LA RECUPERACIÓN DE LOS SULFUROS DE ZINC EN LOS MINERALES DE CERRO DE PASCO

III Symposium sobre Molienda. Armco - Chile. p. 491-509. 1981.