



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALÚRGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALÚRGIA

Disminución del contenido de arena de la pulpa de cieno carbonatado mediante la técnica de hidrociclones.

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

Yiliannis Ramírez Justiz

Moa

2012



REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”

FACULTAD DE METALÚRGIA Y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALÚRGIA

Disminución del contenido de arena de la pulpa de cieno carbonatado mediante la técnica de hidrociclones.

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

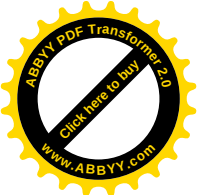
Diplomante: Yiliannis Ramírez Justiz

Tutores: MSc. Pedro Miguel Pelegrín Rodríguez

Ing. Ariel Breff Azahares

Moa,

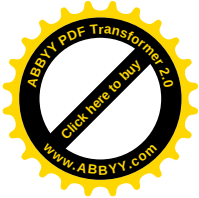
2012



Agradecimientos

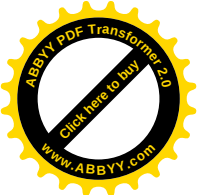
*Le doy gracias a Dios por ser **El amigo que nunca abandona**, a la Revolución Cubana por la oportunidad de formarme profesionalmente y como persona. A mi mamá Maribel Justiz Blanco por la comprensión y cariño mostrado en todo este período de tensiones y por su imprescindible apoyo espiritual y de orden material. A mi papá Orestes Ramírez Jiménez y mi hermano Alejandro Ramírez Justiz por ser y estar por su apoyo, dedicación y por quererme tanto. A mi novio Javier Azahares Fernández, por su apoyo emocional, comprensión, ayuda, y por estar siempre a mi lado, a su mamá Tania Azahares y su tía Odalys Tamara Azahares por haberme ayudado incondicionalmente cuando los he necesitado. A mis tutores MSc. Pedro Miguel Pelegrín por haber sido el más dedicado y paciente en la orientación y realización de este trabajo y el Ing. Ariel Breff Azahares por su colaboración y aporte al mismo. Al MSc. Alfredo Calzada, por su contribución en las corridas experimentales, su apoyo y acertadas sugerencias que me facilitaron la culminación del trabajo. A mis profesores, por su ayuda, consejos, apoyo, por su profesionalidad, su dedicación en la labor que realizan para formarnos como profesionales íntegros.*

Y a todos los que de una forma u otra me han apoyado en la realización de este trabajo, muchas gracias.



Dedicatoria

*Dedico este trabajo que con tanto esfuerzo he logrado, a mi familia y en especial a mi mamá Maribel Justiz Blanco porque siempre estuvo conmigo dándome ánimo, apoyo y mucho cariño cuando lo necesité,
Y a todas esas personas que un día puedan necesitarlo.*



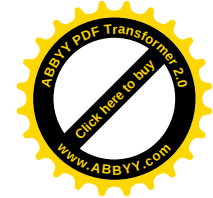
RESUMEN

Actualmente en la Planta de Neutralización de la empresa Pedro Sotto Alba se recibe una pulpa de cieno carbonatado que está fuera de las especificaciones exigidas debido a la gran cantidad de arena contenida en ella. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo consistió en definir un método económico que permita lograr en la pulpa no más de 14 % de la fracción (+ 0,15 mm), sin que se afecte el contenido de sólidos que se alimenta al primer sedimentador de la Planta de beneficio de cienos carbonatados. Para este propósito se utilizó la técnica de los hidrociclones. En un hidrociclón de laboratorio se estudió la influencia, tanto del contenido de sólidos como de la presión de bombeo. En cada corrida se analizó el porcentaje de sólidos en las descargas del equipo. Se demostró que el contenido de sólidos de la pulpa a procesar no es un parámetro influyente en la estabilidad del bombeo. Además se comprobó que con una presión de alimentación de 0,68 atm, equivalente a 20 L/min, se obtiene una pulpa en el reboso del equipo con las especificaciones requeridas por el proceso industrial. La valoración económica efectuada indica la conveniencia de la introducción de esta técnica en la Planta de beneficio de cienos carbonatados.



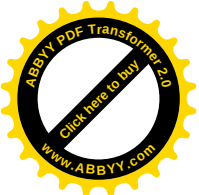
ABSTRACT

The Neutralization Plant of Pedro Sotillo Alba, now, it receives a pulp of carbonated ceno that do not meet the specifications established due to the great quantity of sand contained in it. Therefore, the objective of this work consisted on defining an economic method that allows to achieve in the pulp not more than 14% of the fraction ($+ 0,15$ mm, without the content of solids be affected that feeds to the first sedimentador of the beneficiation plant carbonate silts. For this purpose the technique of the hidrociclones was used. In a hidrociclón laboratory it be studied the influence of the content of solids and the pressure of pumping. In each sample the percent of solids was analyzed in the discharges of the equipment. It was demonstrated that the content of solids of the pulp to process is not an influential parameter in the stability of the pumping. In addition it is proved that with a pressure of feeding of 0, 68 atm, equivalent to 20 L/min, a pulp is obtained in the overflow of the equipment with the specifications required by the industrial process. The made economic valuation indicates the convenience of the implementation of this technique in the beneficiation plant carbonate silts.

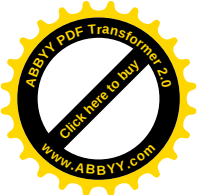


ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Características del yacimiento de cienos carbonatados de la Bahía de Moa.	4
1.2. Preparación de la pulpa de cieno carbonatado.	6
1.3. Fundamentos de hidrociclón como método de separación de partículas.	8
Conclusiones parciales del capítulo I	15
<u>CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS</u>	16
2.1. Toma y preparación de la muestra de cieno carbonatado a clasificar en el hidrociclón.	16
2.2. Instalación experimental para la toma de muestra en las salidas del hidrociclón.	16
2.2.1 Características de los equipos utilizados para la instalación.	17
2.3 El procedimiento experimental desarrollado.	19
2.3.1 Determinación del contenido de sólidos más conveniente para la alimentación de la pulpa al hidrociclón.	19
2.3.2 Determinación de la presión más adecuada para la preparación de la pulpa.	19
2.4. Determinaciones analíticas.	20
2.4.1 Análisis granulométrico integral a la pulpa inicial.	20
2.4.2 Determinación del contenido de arenas.	20
2.4.3 Determinación de la densidad de la pulpa y el % de sólidos	21
2.4.4 Determinación del contenido de CaCO ₃ .	22
2.5. Determinación de la cantidad necesaria de hidrociclones.	23



	Pág.
2.6. Valoración económica.	23
Conclusiones parciales del capítulo II	27
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
3.1. Caracterización granulométrica y química de la muestra de pulpa inicial.	28
3.2. Determinación del contenido de sólidos más conveniente para la alimentación de la pulpa al hidrociclón.	29
3.3. Determinación de la presión más adecuada para la alimentación de la pulpa al hidrociclón.	31
3.4. Cantidad de hidrociclones necesarios.	34
3.5. Resultados de la evaluación económica.	34
3.5.1. Resultados del análisis económico	37
Conclusiones parciales del capítulo III	37
CONCLUSIONES GENERALES	38
RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFIA	41



INTRODUCCIÓN

En la Empresa Pedro Sotto Alba se procesan las lateritas niquelíferas mediante la tecnología de lixiviación ácida a presión. Los licores de este proceso contienen ácido sulfúrico libre, que deben ser neutralizados parcialmente para que posteriormente ocurra la precipitación selectiva del níquel y el cobalto con ácido sulfhídrico. Esta neutralización se realiza con cieno carbonatado (cieno coralino) extraído del yacimiento situado en la Bahía de Moa, que es rico en carbonato de calcio (CaCO_3).

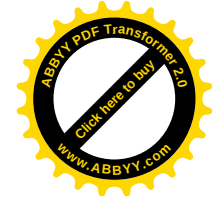
Esta es la única planta que en el mundo utiliza este tipo de neutralizante. Las otras plantas con similar tecnología de lixiviación (las australianas Murrin – Murrin, Cawse y Bulong) utilizan caliza y un producto llamado calcreta.

Para su uso como neutralizante, la pulpa de cieno carbonatado debe ser preparada convenientemente. Esta preparación incluye dos aspectos: la eliminación con agua corriente (“agua dulce”) del contenido de cloruros y la clasificación granulométrica del sólido para eliminar las partículas superiores a 0,83 mm.

La presencia de cloruros por encima de la norma provoca corrosión en el equipamiento tecnológico que se contacta con la pulpa de cieno carbonatado. Para ello se realiza de manera eficiente un proceso de lavado.

En la clasificación granulométrica radica el problema tecnológico más importante de esta preparación. La industria requiere de un material muy fino debido a varias causas:

- Disminuye el desgaste por abrasión de los equipos tecnológicos que contactan con esta pulpa (bombas, agitadores, etc.).
- Mejora el bombeo de la pulpa.
- Aumenta la velocidad de reacción entre el cieno carbonatado y el ácido del licor a neutralizar.



– Se logra un mayor aprovechamiento del cieno carbonatado.

Aunque la pulpa de cienos carbonatados que se recibe en la Planta de Neutralización contiene aproximadamente 40% de sólidos y 30 % de arena ($-0,83 + 0,15$ mm), la industria prefiere, por las causas mencionadas anteriormente, que la misma contenga no más de (~ 14 % de la fracción $-0,83 + 0,15$ mm).

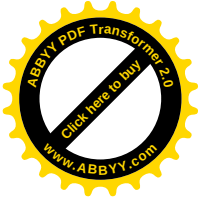
Esta preferencia se complica por el hecho de que los depósitos de cienos carbonatados con granulometría más fina ya han sido prácticamente agotados en la Concesión Minera de la empresa Pedro Sotro Alba y se empiezan a explotar depósitos con mayor contenido de arenas. Esta **situación problemática** ha conllevado a la necesidad de perfeccionar tanto el sistema de clasificación en la llamada Planta de cienos carbonatado, así como proyectar la instalación de un circuito de molienda de todo el rechazo de esta Planta.

En el marco de estas exigencias, el presente trabajo se desarrolló con el objetivo de dar una respuesta preliminar (orientativa) para satisfacer la primera necesidad. Por lo tanto, el **problema** a resolver consistió en cómo obtener una pulpa con el contenido de sólidos y de arenas que exige el proceso industrial (% de sólidos no inferior a 13% en la alimentación al sedimentador 1 y contenido de arenas ($+ 0,15$ mm) no superior a 14%). Para resolver este problema se partió de la **hipótesis** de que si después de la última etapa de cribado (zaranda de doble paño) se instala un hidrociclón, entonces será posible obtener la pulpa con las características físicas requeridas por la industria.

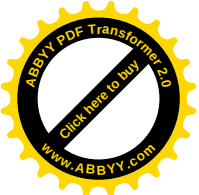
Por lo tanto, el **objetivo general** de este trabajo consistió en obtener una pulpa de cieno carbonatado con las características físicas requeridas por la industria.

Para cumplir con este objetivo general fueron definidos los **objetivos específicos** siguientes:

1. Determinar la influencia del contenido de sólidos en la alimentación al hidrociclón en la estabilidad del bombeo de la pulpa.



2. Determinar la influencia de la presión de bombeo (velocidad de alimentación) de la pulpa hacia el hidrociclón sobre el nivel de “desarenamiento” y sobre el contenido
3. de sólidos en el flujo de reboso del equipo y, como resultado de este estudio proponer:
 - La presión más conveniente para el bombeo a escala industrial y,
 - La forma más adecuada de instalación de este hidrociclón: en circuito cerrado con el proyectado molino para el rechazo o con la zaranda de doble paño.
4. Realizar una valoración económica acerca de la conveniencia de la instalación de un hidrociclón en el circuito de preparación de la pulpa en la Planta de cienos carbonatado.



CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1. Características del yacimiento de cienos carbonatados de la Bahía de Moa

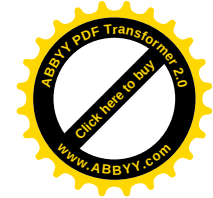
Los cienos carbonatados (cienos coralinos) del yacimiento de la Bahía de Moa, al igual que los de otras partes del mundo, son sedimentos que se forman como resultado de la abrasión sistemática de las barreras de arrecifes coralinos por parte de las olas del mar.

Estos depósitos están situados a no más de 40 metros de profundidad. Ocupan una amplia zona marítima de aguas tranquilas localizada entre la costa y la barrera de arrecifes coralinos, muy cerca de Cayo Moa.

Es obvio pensar que el antecedente más lejano sobre el estudio de este yacimiento se remonta a la década del 50 del pasado siglo, cuando los norteamericanos dragaron la zona con el objetivo de abrir el canal que facilita la entrada y salida de los barcos de carga al Puerto de Moa. La mayor parte de esta información debe de estar guardada en los archivos del Servicio Geológico de Estados Unidos.

Correa (1957) extrajo muestras de estos cienos de la zona oeste de Cayo Moa para realizar corridas experimentales de neutralización de licores ácidos. Más tarde, en el año 1964 el Centro Coordinador para el Desarrollo del Norte de Oriente solicitó al Instituto Cubano de Recursos Minerales (ICRM) la realización de estudios de localización y ubicación de las reservas de "coral" (como se denominaba entonces a los cienos carbonatados), que permitieran tomar decisiones respecto a la tecnología del proceso de refinación del níquel.

Como resultado de esos estudios, en el año 1966 Nedved presentó el informe final, que concluyó en que estos cienos carbonatados tienen alto contenido de carbonato de calcio, siendo un material muy bueno para los fines propuestos. Según este estudio, estos depósitos carecen de una verdadera estratificación. En ellos predominan los cambios granulométricos en sentido vertical y



horizontal, existiendo dos tipos litológicos útiles para la finalidad de la neutralización de los licores ácidos. El primero es de color gris claro y poco arenoso, que posee fuerte olor a H_2S . En él, entre el 50 y 90 % de las partículas son menores de 0,08 mm. El segundo tipo es de color gris oscuro, no tiene olor a H_2S y es mayor el contenido de material grueso.

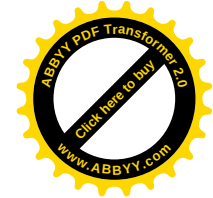
En condiciones naturales estos cienos contienen aproximadamente 80% de carbonato de calcio (CaCO_3), pero después de ser beneficiados este contenido se eleva a más de 88%. Dentro del yacimiento el contenido de este compuesto aumenta de arriba hacia abajo, alcanzando los valores máximos entre los tres y cinco metros de profundidad. Luego, a profundidades mayores su contenido decrece, incrementándose los materiales arcillosos.

Los contenidos de otros óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 , MnO_2 , Fe_2O_3) son variables. Ellos dependen de la cercanía o no de la costa, es decir, de la mayor o menor influencia de los arrastres terrígenos y de la profundidad de la capa. Los óxidos más abundantes son los de aluminio (Al_2O_3), silicio (SiO_2) e hierro (Fe_2O_3).

Castillo (1988) reportó las dificultades que se presentan para la extracción y utilización de este material, sobre todo en lo referente a su composición granulométrica. Fue el primero en recomendar la conveniencia del uso de la fracción gruesa (mayor de 0,83 mm) para los fines de la neutralización debido al alto contenido de carbonato de calcio en la misma.

Nápoles (1992) calculó las reservas con categoría industrial y evaluó el contenido de CaCO_3 en las fracciones de + 0,83 mm, + 0,15 mm; + 0,044 mm y – 0,044 mm.

En los trabajos realizados por Campos (2001) se refleja el carácter natural de los sedimentos que conforman el depósito, su composición química y mineralógica. También se establece la exclusión de los sedimentos que proceden de la formación de las rocas de la asociación ofiolítica y de la corteza de interperismos laterítico vinculados a la misma. La Concesión minera de cienos carbonatados de la empresa Pedro Sotto Alba (Moa Nickel S.A.), abarca una extensión de 8,05 km^2 .



En la siguiente figura.1 se muestra la región de Moa y de la Concesión minera de cienos carbonatados perteneciente a la empresa Pedro Sotto Alba (Moa Nickel SA).



Figura.1.Ubicación de la concesión minera del cieno carbonatado de la Empresa Pedro Sotto Alba

La misma limita por el oeste con Punta Cabagán, por el este con las proximidades del canal de entrada de barcos al Puerto de Moa, por el sur con la línea costera y por el norte con Cayo Moa.

1.2. Preparación de la pulpa de cienos carbonatados

La preparación de esta pulpa se realiza por medio de un esquema clásico de clasificación y lavado. Se obtiene así una pulpa con aproximadamente 40% de sólidos y hasta 30% de la fracción – $0,83 + 0,15$ mm.

El cieno carbonatado es minado por medio de dragas (grúas con jaibas) y se transporta en patanas hasta el área de la Planta de Beneficio (Planta de cienos carbonatado), situada en un lugar aledaño al Puerto de Moa. En las Figuras 2 y 3 se muestran el esquema tecnológico de esta Planta y una foto panorámica de la llamada Torre de Preparación, que incluye la criba fija, la lavadora de paletas y la zaranda de doble paño).

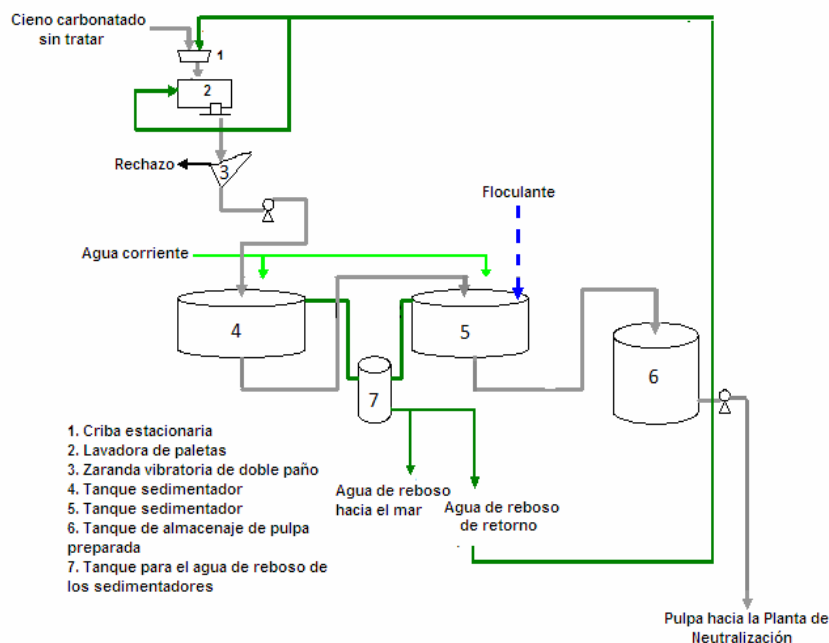
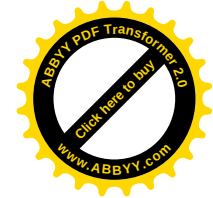


Figura. 2. Esquema tecnológico de la Planta de cienos carbonatado



Figura 3. Vista panorámica de la Torre de Preparación

Cuando llegan las patanas al área de la Planta, éstas descargan el material en un depósito destinado para este fin. Desde el mismo, por medio de grúas, el material es alimentado a una criba estacionaria, que posee raíles situados paralelamente a 152,4 mm de separación, donde se le inyecta agua de reboso procedente de los espesadores de pulpa de la propia Planta.



Las partículas que pasan a través de los raíles caen por gravedad a una lavadora de paletas y, desde ésta, a una zaranda vibratoria de doble malla (la superior con orificios de 6,35 mm y la inferior de 0,83 mm). En esta zaranda se inyecta agua atomizada a una presión que oscila entre 206,8 y 275,8 kPa, procedente también del reboso de los sedimentadores de la Planta.

Las partículas que pasan por la malla de 0,83 mm forman la pulpa con un contenido de sólidos que puede oscilar entre 13 y 25%. Esta pulpa cae por gravedad en un pozo, desde donde se bombea al primer sedimentador, el cual también recibe agua corriente (“agua dulce”) para el lavado del cieno carbonatado.

Cuando la concentración de cloruros es inferior a 700 ppm (0,7 mg/L) la pulpa se transfiere al segundo sedimentador junto con otra inyección de agua corriente y una dosis de floculante. Aquí continúa el lavado y el espesamiento. Cuando la pulpa alcanza 40 - 45 % de sólidos, se transfiere a un tanque agitado más pequeño, desde donde se bombea a la Planta de Neutralización.

/15/

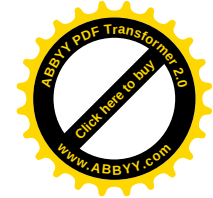
Jiménez (2005), caracterizó esta pulpa y evaluó la instalación existente para su transferencia hasta la Planta de Neutralización. En la caracterización que realizó Caballero (2008) se demostró que más del 70% de las partículas son inferiores a 0,044 mm y que el comportamiento reológico de la pulpa se corresponde con el de flujo plástico de Bingham.

En el sentido de lograr un aprovechamiento más completo de la materia prima extraída del mar, Enedi, J (2010) realizó un estudio de la cinética de la molienda del rechazo del cieno carbonatado.

Es importante señalar que en la literatura no se reporta ningún trabajo dirigido a disminuir el contenido de arenas en este tipo de pulpa.

1.3. Fundamentos del hidrociclón como método de separación de partículas

Aunque el tamizado (en cribas o zarandas) es una operación de amplio uso industrial, sin embargo sólo se realiza normalmente sobre materiales gruesos,

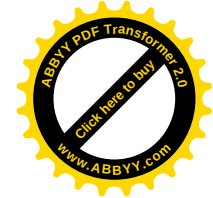


perdiendo eficiencia rápidamente con la disminución del tamaño de las partículas.

Las superficies con aberturas pequeñas son más caras y poseen menor resistencia física. También presentan una alta tendencia a bloquearse con partículas retenidas. Esto hace que la operación de tamizado se vea, en la práctica, restringida a materiales con tamaños mayores que 0,25 mm.

Tamaños de abertura muy pequeños pueden conllevar al cegamiento de la superficie. Para disminuir ese efecto y aumentar la productividad de las zarandas se requeriría disponer de equipos con paños muy grandes, así como altos volúmenes de agua, suministrados a altas presiones.

Una situación similar se presentaría en el caso de utilizar cribas (zarandas) para disminuir el contenido de las fracciones ($- 0,15$ mm) en la pulpa de cienos carbonatados. Por este motivo, tal y como lo indica la práctica, lo más conveniente para esa finalidad consiste en la utilización de la técnica de los hidrociclones. La operación y el mantenimiento son muy simples dado que no hay partes móviles o mayas. Estos filtros se recomiendan para agua de pozo que contenga arena. Su función es separar, mediante la acción de la fuerza centrífuga la parte sólida de la fluida (líquido, gas) en mezclas bifásicas, donde una de las fases está formada por partículas sólidas. Si la fase fluida es un líquido, se denominan hidrociclones. La primera patente sobre el uso del hidrociclón data de 1891, sin embargo, su utilización industrial tuvo sus inicios después de la Segunda Guerra Mundial en la industria de procesamiento de minerales /1/. Los hidrociclones no poseen partes móviles, pero si requieren de la conexión de una bomba para el suministro del material a clasificar. Son empleados principalmente en la industria minera para la clasificación, selección, engrosamiento y deslamados de minerales. También pueden ser utilizados para obtener pulpas espesadas a partir de pulpas más diluidas. El hidrociclón es una máquina altamente eficaz para la clasificación, ampliamente utilizado en el proceso no ferroso del metal, la cerámica, y el producto químico industrial, utiliza la fuerza centrífuga para clasificar o para desvainer de fangos antes de moler fino. Es hoy en día el clasificador más eficiente. /2/



Su función es la de separar la arena y otras partículas compactas más pesadas que el agua, por lo que es ideal como filtro previo en instalaciones que captan agua de pozo.

Son aparatos que pueden hacer las funciones de prefiltro, normalmente se instalan dentro del cabezal, cuando el agua fundamentalmente viene contaminada por arena. Son dispositivos en los que gracias a un flujo vertical se consigue separar hasta el 98% de las partículas mayores de 100 micras, más pesadas que el agua.

Consta de:

- Una entrada con un conducto tangencial que introduce el agua con los sólidos en suspensión hacia el interior de la cámara.
- Una sección cilíndrica, donde se crea un movimiento rotacional.
- Una sección cónica con un ángulo donde tiene lugar la separación de los sólidos.
- Una salida para la descarga de sólidos, cuando el hidrociclón es vertical, esta salida se sitúa en la parte inferior del aparato.
- Un colector en forma de tubo que se introduce ligeramente en el interior de la sección cilíndrica y que conduce el agua limpia, libre de sólidos hacia la red de riego. /9/

La separación se produce gracias a la velocidad de rotación que se genera al ser inyectada el agua de forma tangencial en el interior del cuerpo del hidrociclón. Los hidrociclones son, junto con las bombas centrífugas, los equipos más difundidos en la industria del tratamiento de minerales, principalmente en los circuitos de molienda de rocas minerales (Ver Figura. 4).

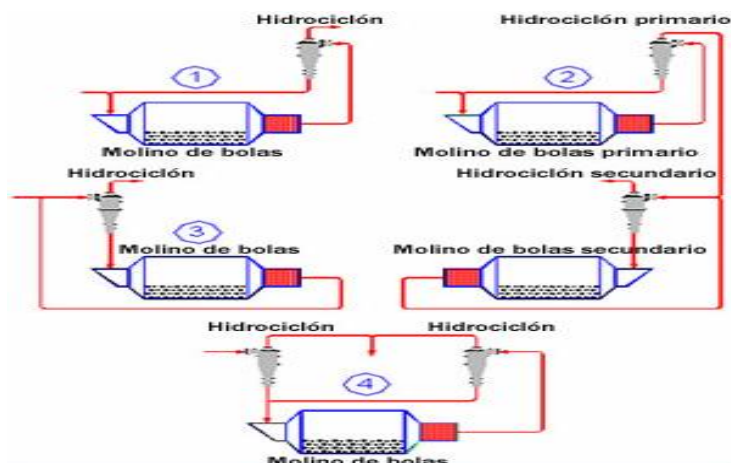


Figura.4. Esquemas más comunes del uso de hidrociclones en la industria minero – metalúrgicas.

Las instalaciones que incluyen hidrociclones consumen poca energía. Ellos son pequeño formato, sencillos, de fácil mantenimiento y alta productividad /4/.

Los proveedores y productores principales de estos equipos son Australia, Chile, USA y Japón.

Debido a la fuerza centrífuga ($F_c = m\omega^2/R$), donde: ω – velocidad del flujo de entrada (en dirección tangencial), m/s; R – distancia entre el centro del equipo y el centro de la partícula, m; m – masa de la partícula, g. La fase sólida es lanzada hacia las paredes exteriores del equipo, desciende y es recogida en la parte inferior, que frecuentemente acaba en un cono. La fase fluida, una vez en el fondo, asciende rotando y es recogida mediante una tubería situada en el centro del ciclón. En el centro del ciclón se produce un fuerte vórtice y la baja presión impulsa la fase fluida hacia arriba. /14/

Regulando la aceleración del torbellino y variando la geometría y toberas del hidrociclón puede ajustarse el tamaño de separación entre 0,005 y 0,6 mm.

El diámetro del hidrociclón puede variar desde 2,5 cm hasta dimensiones que pueden alcanzar 1,8 m. Los hidrociclones de mayor diámetro producen separaciones gruesas y los de menor diámetro producen separaciones finas. En la Figura. 5 se muestra las secciones componentes más importantes de un hidrociclón.

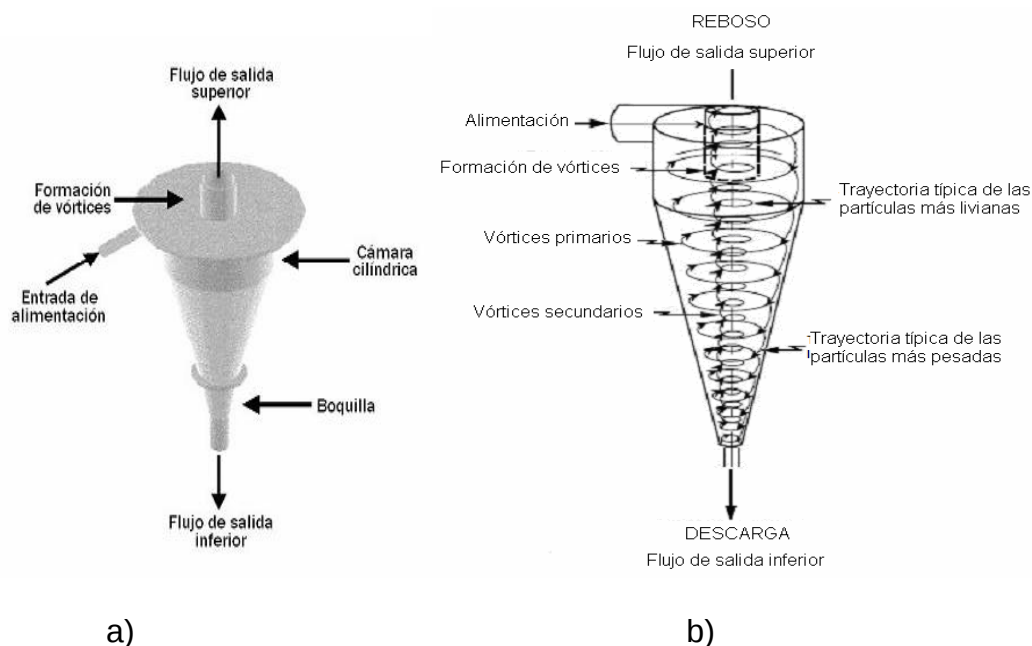


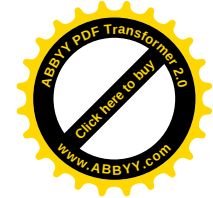
Figura. 5 (a, b). Esquema del hidrociclón y las trayectorias de sus flujos.

Los datos necesarios para la elección de un tipo y tamaño de un hidrociclón son los siguientes /13/

- Naturaleza del sólido
- Distribución granulométrica y forma de las partículas
- Densidades específicas del sólido y el líquido
- Contenido de sólidos
- Viscosidad de la pulpa
- Caudal (flujo) a tratar
- Tamaño de corte (Separación deseada)

Hidrociclones destinados a la clasificación, se han instalados con [éxito](#) para las separación por densidades de granos muy finos. El impetuoso [desarrollo](#) de la aplicación de hidrociclones ha sido consecuencia directa de numerosos trabajos de [investigación](#) y desarrollo, cuyos resultados, en enorme parte, han sido recogidos en monografías. /18/

El balance de extracción de las partes del remolino exterior del hidrociclón se efectúa de la siguiente manera: la parte que continúa en el hidrociclón avanzando hacia abajo, lo abandonará por la boquilla inferior, mientras la parte



que asciende del remolino interior, será extraída por la boquilla exterior (captador de remolino).

La clasificación de los hidrociclones ha sido tratada de forma exclusiva desde sus inicios y actualmente también ha sido abordada por algunos autores esta característica, pero dirigido a los efectos de corrientes transversales y también a las contracorrientes. /12/

El ángulo de la parte cónica del hidrociclón tiene un significativo efecto en los patrones de los flujos internos. Altas eficiencias de separación de las partículas más gruesas se logra con ángulos mayores. Generalmente el ángulo de esta parte cónica oscila entre 10° y 20° .

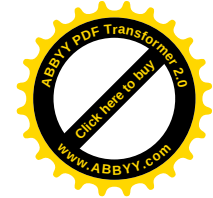
Los hidrociclones más utilizados son los de cono tendido o ancho. El ángulo de su parte cónica varía entre 20° y 45° , aunque excepcionalmente pueden encontrarse

hidrociclones de hasta 160° . Se construyen en diámetros comprendidos entre 250 mm y 1250 mm, aunque algunos fabricantes construyen modelos de hasta 2000 mm (ver Figura. 6).



Figura.6. Hidrociclón de cono tendido ($\varnothing$ - 750 mm) para el lavado de arenas. La presión de operación suele ser menor a 1,5 atm, aunque nunca menor de 0,2 atm. Generalmente se operan entre 0,3 y 0,98 atm y pueden alcanzar cortes entre 0,030 mm y 0,150 mm /3/.

Uno de los principales parámetros a contralorar en los hidrociclones es la presión. A menudo parece olvidarse que los hidrociclones carecen de



mecanismo alguno y que su único “motor” es el movimiento de la propia pulpa a tratar. Resulta de todo punto imprescindible conocer en todo momento la presión de operación y además muy conveniente llevar un registro de la misma, en el tiempo. La eficiencia aproximada de los distintos ciclones se muestra en la Tabla.1 /12/.

Tabla 1.Eficiencia aproximada de los distintos tipos de hidrociclones

Tipos	Eficiencia de separación (%)
Convencionales	70 - 90
Alta eficiencia	80 - 99
Alta capacidad	80 - 99

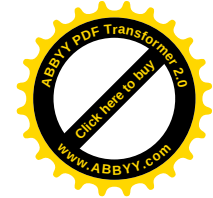
El hidrociclón se caracteriza por su precio competitivo, instalación práctica, mantenimiento sencillo, alta capacidad de tratamiento, granularidad fina, alto rendimiento, etc. Es apto para la clasificación de la pulpa de mineral. Selecciona principalmente la unidad integral. La granularidad y la cantidad de tratamiento están afectadas por el diámetro del tubo, presión de la entrada de pulpa de mineral y la densidad de la pulpa de mineral.

Éste equipo puede producirse bajo especificaciones del cliente. Si no hay explicación especial, el material del hidrociclón puede ser de fundido gris, aunque se pueden fabricar de otros materiales, tales como poliuretano, goma abrasiva, carburo de silicio, cerámica de aluminio, aleación de cromo. El tipo de material debe indicarse en el momento de la solicitud del equipo.

Existen beneficios de estos equipos tales como:

Diseño único

- Exclusivo diseño de admisión en espiral laminado para lograr una eficiencia y capacidad máximas, y una mayor vida útil.
- Una geometría de alimentación completamente nueva que aumenta considerablemente la capacidad hidráulica y al mismo tiempo minimiza el desgaste localizado en la cámara de alimentación y el buscador de vórtice.



- Las mejoras en el diseño se traducen en costos de funcionamiento inferiores y en una menor cantidad de ciclones necesarios para una tarea determinada.

Máxima eficiencia

- Turbulencia reducida que proporciona una ruta de flujo más natural
- Aumento de la vida útil

Capacidad máxima

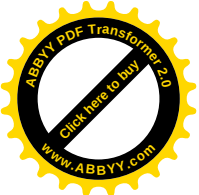
- Un flujo mejorado significa que puede hacer más con menos, menor consumo de energía y menos ciclones

Costos de funcionamiento inferiores

- Igual eficacia con mayor tonelaje
- Mayor recuperación de metal
- Mayor vida útil
- Mayor cinética de filtración

Conclusiones parciales del capítulo I

- Se realiza un análisis de los trabajos precedentes que han sido investigados en la utilización de los cienos carbonatados, se mencionan algunas de las características importantes de la pulpa de cienos carbonatados, como es su composición, preparación y granulometría necesaria para su uso en los fines propuestos.
- Se realiza una caracterización de los hidrociclones, sus usos más importantes, así como su funcionamiento, beneficios y características, como método de separación de partículas, lo cual permite su implementación en el desarrollo de la investigación que se presenta.



CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Toma y preparación de la muestra de cieno carbonatado a clasificar en el hidrociclón

Para las corridas experimentales se tomaron 200 L de pulpa a la entrada del primer sedimentador de la Planta de cienos carbonatado. Esta pulpa fue trasladada en tanquetas plásticas hasta el tanque agitado de la instalación experimental, situada en el perímetro interno de la empresa Pedro Sotto Alba. Se conservaron 100 L como reserva y los otros 100 L fueron convenientemente homogenizados, después de lo cual se tomó una muestra para realizar la caracterización física y la determinación del contenido de carbonato de calcio (CaCO_3).

La caracterización física de la muestra incluyó:

- La realización del análisis granulométrico.
- La determinación de la densidad de la pulpa.
- La determinación del contenido de sólidos.

2.2. Instalación experimental para la toma de muestra en las salidas del hidrociclón

Esta instalación cuenta con un tanque, una bomba, y un hidrociclón principalmente.

En la Figura.7 se muestra la instalación experimental de clasificación de partículas por medio de un hidrociclón.

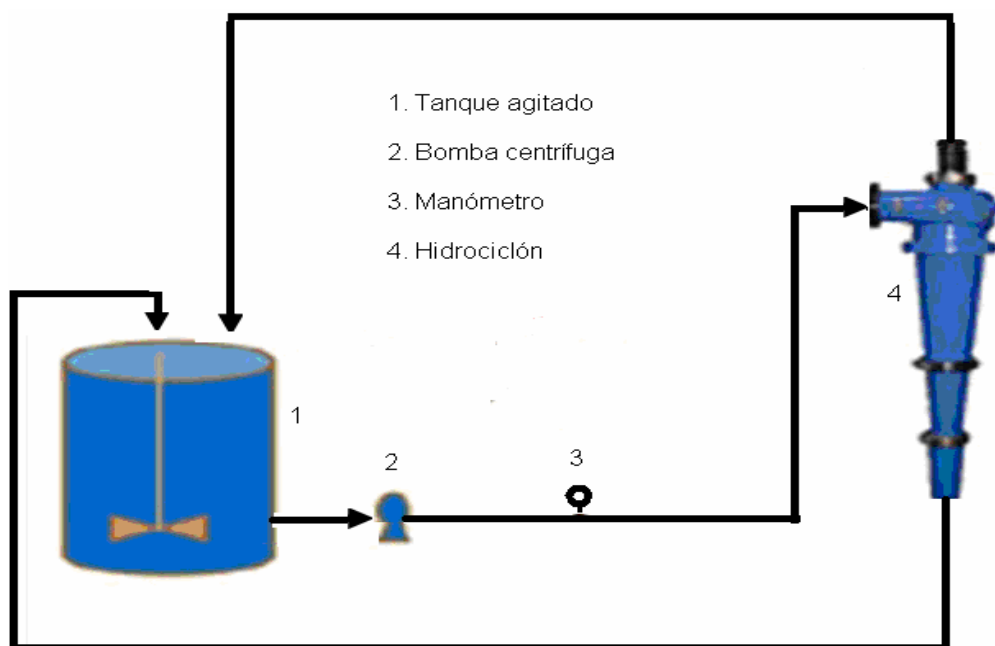


Figura. 7. Instalación experimental

2.2.1 Características de los equipos utilizados para la instalación

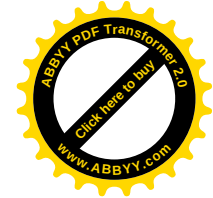
Las características de los equipos de esta instalación son los siguientes:

Hidrociclón (Figura. 8): Material de construcción: porcelana; Altura: 42 cm;
 D_{entrada} : 38,79 mm; $D_{\text{salida superior}}$: 40,67 mm; $D_{\text{salida inferior}}$: 12 mm.



Figura. 8. Hidrociclón de laboratorio para la instalación experimental.

Bomba (Figura.9): Tipo: centrífuga; Flujo: 3,42 – 254,4 m³/h; Material de construcción: acero al carbono; Presión de descarga: 115,5 psi (7,86 atm);



Altura de descarga: 35,21 m; Potencia: 5 kw; Frecuencia: 60 Hz; Voltaje: 440 Volt.



Figura. 9. Bomba centrífuga de la instalación experimental.

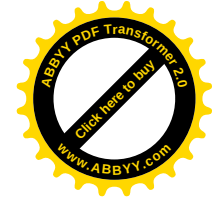
Tanque agitado (Figura. 10). Capacidad: 250 litros; Altura: 1,10 m; Diámetro: 1,6. Con cuatro baffles deflectores.



Figura. 10. Tanque agitado de la instalación experimental

2.3 El procedimiento experimental desarrollado

2.3.1 Determinación del contenido de sólidos más conveniente para la alimentación de la pulpa al hidrociclón



Se trabajó con diferentes contenidos de sólidos en la pulpa inicial, para una presión de bombeo de 0,68 atm. Estas corridas se realizaron con el objetivo de definir el % de sólidos con el cual la bomba garantiza mayor estabilidad operacional y, de paso, analizar cómo se comporta el contenido de sólidos y de arenas (+ 0,15 mm) en los flujos de salidas del hidrociclón.

Para la realización de estas corridas, la pulpa contenida en el tanque 1 de la instalación experimental se agitaba intensamente durante 20 minutos antes de comenzar el bombeo para el hidrociclón.

Los % de sólidos estudiados en la pulpa inicial fueron los siguientes: 22,42; 19,38; 16,33 y 11,45. La disminución del % de sólidos se obtuvo mediante la adición de la correspondiente cantidad de agua. Cada experimento fue replicado una sola vez. Los gráficos y tablas fueron contruidos con los datos promedios.

2.3.2 Determinación de la presión más adecuada para la preparación de la pulpa

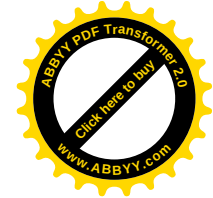
Una vez definida el % de sólidos más apropiado que debe contener la pulpa para su bombeo al hidrociclón, se pasó a estudiar el efecto de la presión de bombeo sobre la eficiencia de separación de las partículas de arena y sobre el contenido de sólidos en los flujos de salida del hidrociclón.

En cada corrida la pulpa se bombeó durante un minuto. Las presiones estudiadas fueron las siguientes, atm: 0,34; 0,44; 0,54 y 0,68.

Como las mangueras que estaban conectadas a la descarga y al reboso del hidrociclón se descargaban al propio tanque agitado, entonces con dos probetas de 1 L de capacidad cada una, se medía la magnitud de ambos flujos.

A las pulpas tomadas del reboso y de la descarga se les analizó el % de sólidos y el contenido de arenas (+ 0,15 mm). Con estos datos se determinó la presión más conveniente para este proceso.

Cada experimento fue replicado una sola vez. Los gráficos y tablas fueron contruidos con los datos promedios.



2.4. Determinaciones analíticas

2.4.1 Análisis granulométrico integral a la pulpa inicial

Para obtener una información completa sobre la distribución granulométrica de la pulpa inicial, una muestra de la misma fue analizada en el analizador de partículas HORIBA LA – 910, el cual es un método más exacto y de análisis más integral con respecto al tamizado húmedo. Por este método se puede determinar el contenido de fracciones desde 0,85 hasta 0,001 mm.

El procedimiento para la realización del análisis en este equipo es el siguiente:

- Se toma la muestra de pulpa que se desea analizar y se agita adecuadamente.
- Se pesan aproximadamente 35 g de pulpa recién homogenizada y se transfiere a un beaker de 1000 mL. Luego se agita por espacio de 5 minutos con el agitador para homogenizarla.
- Con una pipeta se toma alrededor de 2 mL y se vierte en el equipo, manteniéndola en él entre 2 y 5 minutos.
- El equipo envía la información a la computadora acoplada a él, donde con el software instalado a ella se emiten las curvas granulométricas, según el cernido y el retenido.

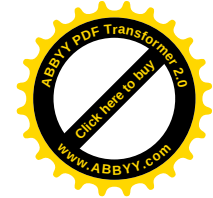
2.4.2 Determinación del contenido de arenas

La determinación del contenido de arenas en la pulpa de cieno coralino se realizó mediante la determinación de la fracción retenida en el tamiz de 0,150 mm.

Los materiales utilizados fueron: tamiz de 0,15 mm y una balanza de precisión ($\pm 0,1$ g).

Esta determinación se realiza de la siguiente manera:

- La pulpa contenida en una probeta se vierte poco a poco en un tamiz de 0,150 mm, del cual se conoce previamente su peso.
- La pulpa vertida encima del tamiz se lava la pulpa con abundante agua hasta que el agua salga transparente.



- Se escurre bien el tamiz con las partículas retenidas y se frota por el fondo (reverso) con una paño seco. Luego se pesa.
- Se le resta el peso del tamiz para obtener el peso de la arena húmeda.

El % de arena se determina por medio de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de arena} = \frac{\text{Peso de arena húmeda} \times 0,65}{\text{Peso de sólidos secos}} 100, \% \quad (1)$$

Donde: 0,65 es el factor de sólidos de la pulpa de cieno carbonatado (sólido aproximado – 65%).

El peso de la arena seca se determina por la siguiente fórmula:

$$\text{Peso de sólidos secos} = \frac{\text{Peso de pulpa} \times \% \text{ sólidos}}{100}, g \quad (2)$$

2.4.3 Determinación de la densidad de la pulpa y el % de sólidos

La densidad se determina por el método volumétrico. La muestra de pulpa se homogeniza mediante agitación y se añade en una probeta graduada seca de 1 L y se pesa en una balanza digital de precisión $\pm 0,01$ g. El peso de la pulpa se obtiene al restar el peso de la probeta con la pulpa menos el peso de la probeta vacía y seca.

La densidad de la pulpa en g/ml se obtiene por la siguiente fórmula:

$$\rho_{\text{de la pulpa}} = \frac{\text{Masa de la pulpa}}{\text{Volumen de la pulpa}}, g/ml \quad (3)$$

Con los datos obtenidos de la densidad de la pulpa se calcula el % de sólidos por la siguiente fórmula:

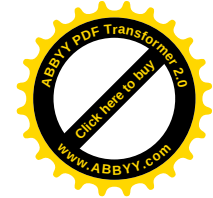
$$\text{Contenido de sólidos} = \frac{\rho_{\text{Pulpa}} - \rho_{\text{Agua}}}{\rho_{\text{Pulpa}}} \cdot \frac{G_{cc}}{G_{cc} - \rho_{\text{Agua}}} \cdot 100, \% \quad (4)$$

Donde:

G_{cc} : Densidad específica del cieno carbonatado - 2,58, g/cm³

ρ_{Pulpa} : Densidad de la pulpa, g/cm³

ρ_{Agua} : Densidad del agua - 0,9962 g/cm³



2.4.4 Determinación del contenido de CaCO_3

Se pesa 1 g de la muestra a analizar y se transfiere a un beaker de 250 mL. Luego se añaden 25 mL de ácido clorhídrico de concentración 1 N, de forma lenta y con agitación. Una vez que cese el desprendimiento de CO_2 se lavan las paredes del beaker con un chorro fino de agua.

El contenido del beaker se filtra a través de un papel de filtración medio rápida y se lava con agua caliente no menos de cinco veces. El filtrado se colecta en un elenmeyer de 300 mL de capacidad y se valora con la solución de hidróxido de sodio 0,5 N añadiendo tres gotas de solución indicadora (una mezcla de rojo de metilo y bromo cresol). La valoración se realiza hasta que la mezcla cambie del color de rojo hasta el verde.

El contenido de carbonato de calcio se determina a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de } \text{CaCO}_3 = \frac{N_1 \cdot V_1 - N_2 \cdot V_2}{M} \cdot 5, \%$$

(5)

Donde:

V_1 : Volumen añadidos de solución de ácido clorhídrico, mL.

V_2 : Volumen consumido de hidróxido de sodio en la valoración, mL.

N_1 : Concentración de la solución de ácido clorhídrico, N.

N_2 : Concentración de la solución de ácido clorhídrico, N.

M : Masa de la porción de ensayo, g.

Los datos fueron procesados en las tablas de Excel. Todas las corridas experimentales fueron realizadas de forma triplicada.

2.5. Determinación de la cantidad necesaria de hidrociclones

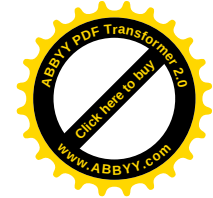
Para calcular la cantidad de hidrociclones requeridos fue necesario conocer:

- El flujo volumétrico total de pulpa de cieno carbonatado que se obtiene a la salida de la zaranda de doble paño de la Planta de cienos carbonatado.
- El flujo admitido por los hidrociclones comerciales.

Entonces, la cantidad necesaria de hidrociclones se calculó por medio de la siguiente fórmula:

$$n = \frac{Q_r}{Q_u}$$

(6)



Donde:

n : cantidad de hidrociclones requeridos

Q_t : Flujo de pulpa a tratar, t/h

Q_u : Flujo que es capaz de procesar un hidrociclón industrial, t/h

2.6. Valoración económica

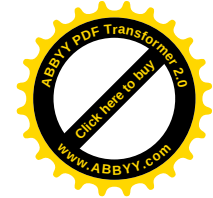
La inversión para la instalación de los hidrociclones después de la zaranda de doble paño estará justificada si como resultado de este proceso se logran los siguientes beneficios:

- Se disminuyen las pérdidas de producción debidas al aumento del amperaje en el mecanismo de los tanques sedimentadores de cienos carbonatados como resultado del alto contenido de arenas.
- Se evitan pérdidas de producción como resultado de la disminución de la capacidad de almacenaje al salir de operación los tanques sedimentadores de la Planta de cienos carbonatado.
- Se disminuyen los gastos de inversión del proyectado circuito de molienda de rechazo en la Planta de cienos carbonatado por disminución de las capacidades de los equipos previstos en el mismo.

Para cuantificar los potenciales beneficios económicos de la instalación del hidrociclón con el objetivo de disminuir el contenido de arenas contenidas en las pulpas descargadas de la zaranda de doble paño de la Planta de cienos carbonatado, se procedió a hacer un estimado del costo capital para la instalación de dos hidrociclones después de esa zaranda de doble paño.

Para estimar este costo se analizaron las diferentes ofertas recibidas por el Departamento de Procesos de la Subdirección de Ingeniería de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba. Con la oferta de los hidrociclones más resistentes a la abrasión se procedió a utilizar el software denominado Cleopatra para obtener este estimado. Para ello al software se le introducen las informaciones siguientes:

- Equipamientos, tanto el principal como auxiliares
- Facilidades previstas



- Mano de obra
- Costos indirectos tales como fletes, ingeniería, seguro, etc.
- Contingencia.

Para estudios preliminares, como es nuestro caso, el estimado presenta un orden de magnitud de ($\pm 50 \%$), para aprobación de gastos y con ofertas firmes ($\pm 30 \%$) y para solicitar el financiamiento para ejecutar la inversión ($\pm 15 \%$).

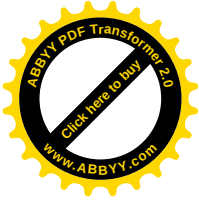
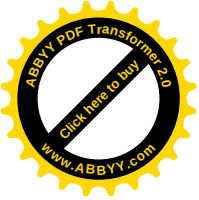
La mayoría de los autores estiman que el problema fundamental que se presenta en toda inversión está relacionado con la determinación de la rentabilidad de la misma. Disponer de una medida de rentabilidad permite decidir si la inversión conviene o no. Además cuando se dispone de varias alternativas de inversión, éstas se ordenan de mayor a menor rentabilidad con el objetivo de seleccionar las más rentables. Esta jerarquización de las oportunidades de inversión tiene especial interés cuando una empresa dispone de escasos recursos financieros, por lo que se requiere elegir la variante que supera la rentabilidad mínima aceptable.

También se deben de tener en cuenta otras ventajas y desventajas, tales como: contaminación ambiental, posibilidad de realizar muestreo, corrosión, afectación a los operadores, gastos de mantenimiento y gastos de operaciones, entre otras.

Luego se calcula el resto de los indicadores económicos:

- Período (tiempo) de recuperación de la inversión (PR)
- Valor presente neto (VAN)
- Razón Costo/Beneficio (C/B)
- Tasa interna de rendimiento al 15 % (TIR)

El Período de Recuperación es el plazo de tiempo que se requiere para que los ingresos netos de una inversión recuperen el costo de la misma. Este se determina sumando los flujos futuros de efectivos de cada año hasta que el costo inicial del proyecto de capital quede por lo menos cubierto. Este indicador se calcula a través de la siguiente fórmula:



$$PR = \frac{\text{Año anterior a la recuperación} + \text{Costo no recuperado al principio de año}}{\text{Flujo de efectivo durante el año}} \quad (7)$$

La determinación del Valor Presente Neto se basa en las técnicas de flujo de efectivo descontado y se define como un método para evaluar las propuestas de inversión de capital mediante la obtención del valor presente de los flujos netos de efectivo en el futuro, descontado al costo de capital de la inversión a la tasa de rendimiento requerida.

La fórmula de cálculo del VPN es la siguiente:

$$VPN = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+k)^1} + \frac{CF_2}{(1+k)^2} + \frac{CF_n}{(1+k)^n} \quad (8)$$

Donde:

VPN: Valor presente Neto

CF_n : Flujo de caja en los diferentes años del proyecto

K: Tasa de descuento, %

T: Cantidad de años

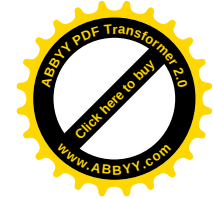
El criterio para la toma de decisiones de aceptación o rechazo, cuando se utiliza esta técnica, es el siguiente: Si el $VPN \geq 0$ se acepta la inversión, por lo que la empresa obtiene un rendimiento igual o mayor al costo capital de la inversión realizada.

La Razón de Costo Beneficio (C/B) se calcula conociendo el valor presente del rendimiento relativo por la suma que se invierte. Esta razón se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Razón C/B} = \frac{\text{Valor Presente de entradas de efectivo}}{\text{Inversión neta}} \quad (9)$$

Si la razón $C/B \geq 1$, se acepta la inversión, de lo contrario es rechazado. Cuando la razón es $C/B \geq 1$, el VPN es mayor o igual a cero.

Por lo tanto, los métodos de VPN y razón C/B dan la misma solución a decisiones de aceptación-rechazo.



La Tasa Interna de Rendimiento (TIR) se define como aquella tasa de descuento que es igual al valor presente de un proyecto con el valor presente de los costos esperados. Esta tasa se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$CF_0 + \frac{CF_1}{(1 + TIR)^1} + \frac{CF_2}{(1 + TIR)^2} + \frac{CF_n}{(1 + TIR)^n} = 0 \quad (10)$$

Donde:

CF_n: Flujo de caja en los diferentes años

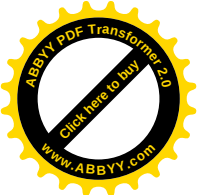
TIR: Tasa interna de Rendimiento

n: Cantidad de años que dura la inversión

El criterio para la toma de decisiones de aceptación o rechazo cuando se utiliza esta técnica es el siguiente: Si la TIR ≥ costo de capital, se acepta la inversión, de lo contrario es rechazado. Para que una inversión sea aceptable, la TIR debe ser mayor, o por lo menos igual al costo de capital o tasa de oportunidad de la empresa. Esto garantiza que la empresa gane más que el rendimiento requerido.

Conclusiones parciales del capítulo II

- Los métodos y técnicas experimentales utilizadas para el análisis están fundamentados a partir de la necesidad de disminuir la arena (0,15mm) contenida en los cienos carbonatados.
- Los métodos experimentales de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental y equipamiento modernos para el desarrollo de las pruebas realizadas basándose principalmente en el uso de hidrociclón.



CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

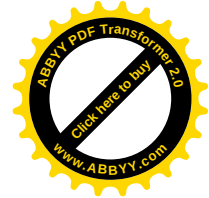
3.1. Caracterización granulométrica y química de la muestra de pulpa inicial

Los resultados de la caracterización granulométrica y química de la muestra de pulpa objeto de estudio, se muestran en las Tablas 2 y 3.

Los datos de la tabla 2, fueron construidos por el analizador de partículas (HORIBA LA – 910) del laboratorio de la Empresa Pedro Sotto Alba.

Tabla 2. Análisis granulométrico de la pulpa inicial realizado en el analizador de partículas

Tamaño de las partículas, mm	Retenido, %
0,0001	100
0,0132	50,858
0,0152	49,342
0,0174	47,783
0,0199	46,167
0,0228	44,475
0,0261	42,677
0,0299	40,777
0,0343	38,817
0,0392	36,862
0,0449	34,972
0,0515	33,177
0,0590	31,485
0,0675	29,879
0,0773	28,303
0,0886	26,682
0,1546	24,916



Estos datos se obtuvieron por las normas de laboratorio de la empresa y mediante la fórmula (5) descritas anteriormente.

Tabla.3. Contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) del cieno carbonatado y de la arena contenida en este material.

Material	CaCO_3 , %
Pulpa de cienos carbonatados	83,80
Arena	95,25

Los datos de la Tabla 2, indican que la pulpa inicial contiene aproximadamente 25 % de arena (+ 0,150 mm), lo que sólo difiere en 1,84 % con respecto al contenido de arenas determinado por medio del tamizado húmedo, que fue de 23,16 %. Lo anterior confirma que esta pulpa contiene mayor contenido de arena que lo exigido por el proceso industrial.

El contenido de carbonato de calcio en el cieno carbonatado es relativamente alto (~ 84 %) y de la arena ~ 95 %. El alto contenido de este compuesto en la arena indica que es un material, desde el punto de vista químico, muy conveniente para ser utilizado en el proceso de neutralización, lo cual justifica la idea de ser recuperado y luego molido para ser aprovechado por el proceso industrial.

3.2. Determinación del contenido de sólidos más conveniente para la alimentación de la pulpa al hidrociclón

Los resultados de estas corridas experimentales se muestran en la Tabla 4 y en las Figuras. 11 y 12.

Estos datos se obtuvieron mediante las fórmulas (1) y (4) representadas en el capítulo 2.

Tabla.4. Contenido de sólidos y de arenas (+ 0,15 mm) en los flujos de salida del hidrociclón en dependencia del contenido de sólidos en la pulpa de alimentación, para una presión de bombeo de 0,68 atm.

Contenido de sólidos en la pulpa inicial, %	Contenido de arenas, %		Contenido de sólidos, %	
	Reboso	Descarga	Reboso	Descarga
11,45	1,07	29,44	5,41	16,18
16,33	0,91	28,80	6,26	24,69
19,38	0,63	22,81	7,1	30,4
22,42	0,35	16,83	7,41	36,12

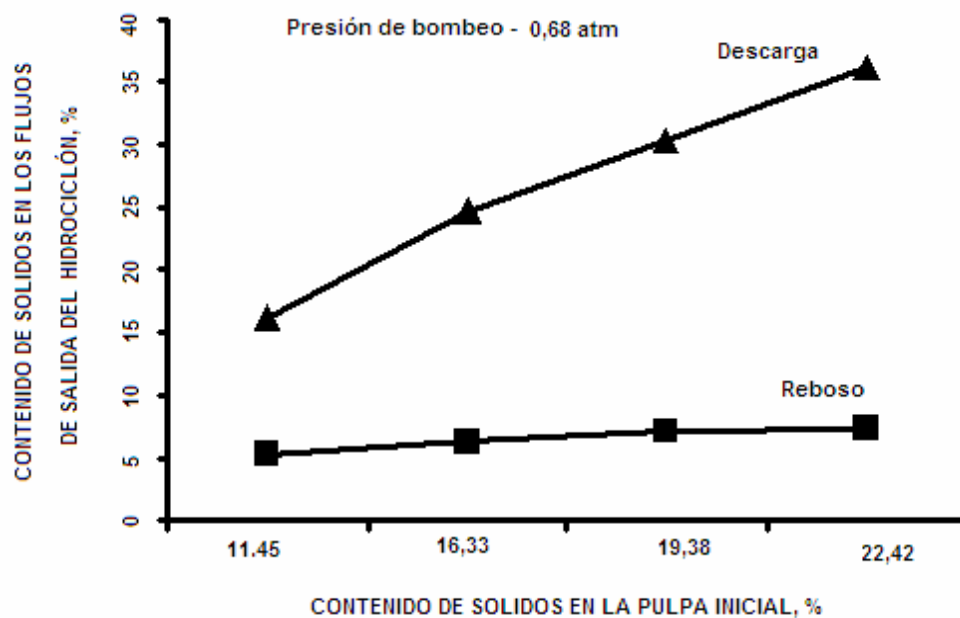


Figura. 11. Contenido de sólidos en la pulpa inicial versus contenido de sólidos en las pulpas de salida del hidrociclón.

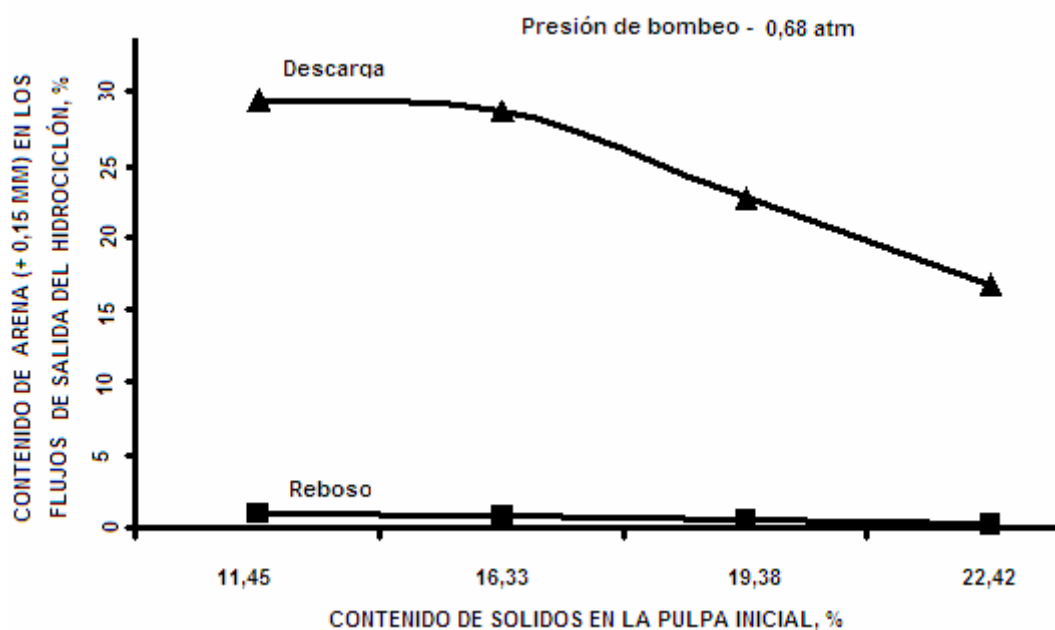
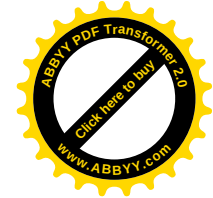


Figura. 12. Contenido de sólidos en la pulpa inicial versus contenido de arenas (+ 0,15 mm) en las pulpas de salida del hidrociclón.

Durante las corridas experimentales se observó que para los diferentes contenidos de sólidos estudiados en la pulpa de alimentación, el bombeo se mantuvo estable, aunque esta estabilidad era mayor para las pulpas más diluidas. Por lo tanto, para el rango en que puede variar el contenido de sólidos de la pulpa que sale de la zaranda de doble paño (13 – 25 %), que es el lugar previsto para la instalación del hidrociclón en la Planta de cienos carbonatado, se garantiza una buena estabilidad de alimentación al equipo. Sin embargo, con la presión prefijada (0,68 atm) en ningún caso se obtuvo el contenido de sólidos deseado en el reboso, que debe ser no menos de 13 %, que es la pulpa que luego será alimentada el sedimentador 1 para ser espesada hasta ~ 40 % y posteriormente bombeada a la Planta de Neutralización. Por lo tanto, es recomendable trabajar con presiones menores a 0,68 atm.

3.3. Determinación de la presión más adecuada para la alimentación de la pulpa al hidrociclón

Los resultados de las corridas anteriores indicaron que se puede trabajar con el % de sólidos de la pulpa que fue tomada en la Planta de cienos carbonatado, la

cual tenía 22,42 % de sólidos. Por tal motivo en el tanque agitado de la instalación experimental se vertieron los 100 L de la pulpa de reserva, y con ellos se realizaron las corridas para determinar la influencia de la presión de alimentación.

En la Tabla 5 y las Fig. 13 y 14 se muestran los resultados experimentales.

Tabla.5. Contenido de sólidos y de arenas (+ 0,15 mm) en los flujos de salidas del hidrociclón en dependencia de la presión de bombeo de la pulpa de alimentación, para un contenido de sólidos inicial de 22,42%.

Presión de bombeo, atm.	Contenido de arenas, %		Contenido de sólidos, %	
	Reboso	Descarga	Reboso	Descarga
0,34	13,69	15,75	13,67	29,36
0,44	9,15	17,44	8,7	30,38
0,54	4,60	19,12	8,06	33,2
0,68	0,35	16,83	7,41	36,12

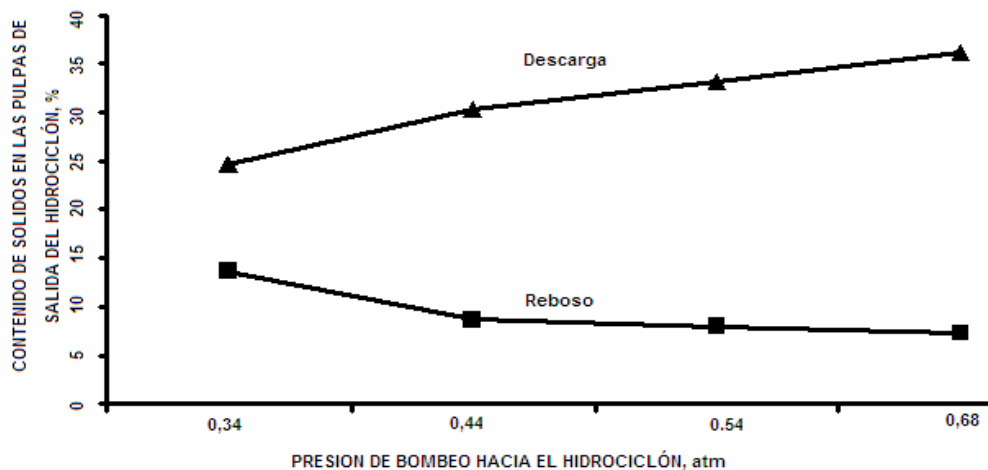


Figura. 13. Contenido de sólidos en las pulpas de salida del hidrociclón versus presión de bombeo.

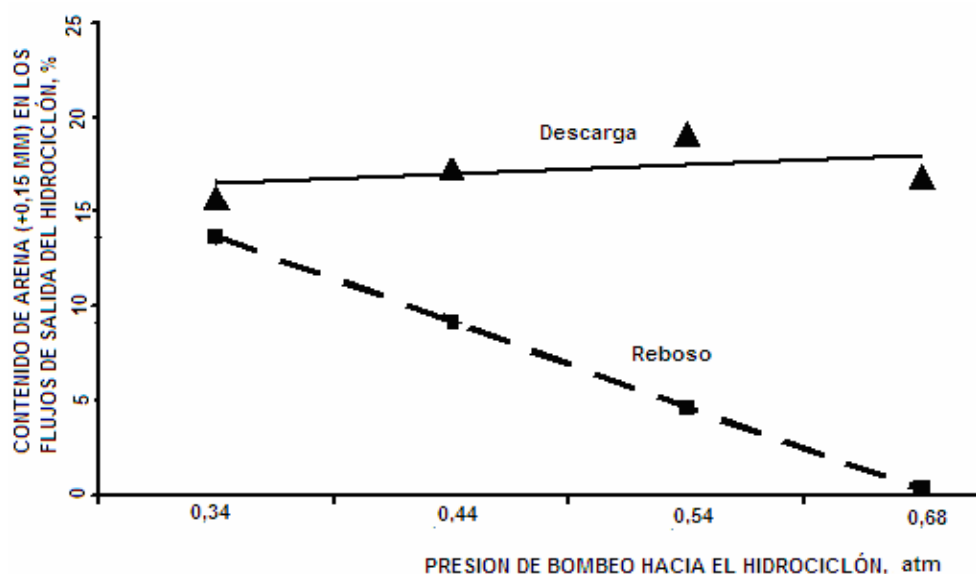
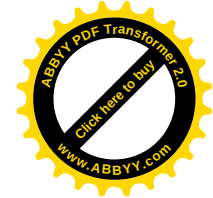


Figura. 14. Contenido de arenas (+ 0,15 mm) en las pulpas de salida del hidrociclón versus presión de bombeo.

Los resultados anteriores indican que a medida que disminuye la presión de bombeo, aumenta la cantidad de arenas y la cantidad de sólidos en el reboso y estos índices disminuyen ligeramente en la descarga.

Para una presión mínima de bombeo de 0,34 atm la cantidad de arenas disminuye desde 23,16% en la pulpa inicial hasta 13,69 % en la pulpa de reboso, magnitud ésta que está en el rango deseado por la industria. También bajo estas condiciones el contenido de sólidos en la pulpa de reboso (13,67 %) es adecuado para ser alimentado al sedimentador 1 de la Planta de cienos carbonatado.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la corrida efectuada para la presión de alimentación de 0,34 atm y un minuto de bombeo.

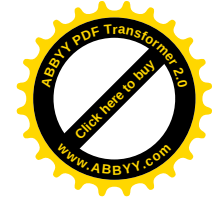


Tabla.6. Resultados de la corrida efectuada para la presión de alimentación de 0,34 atm y un minuto de bombeo.

Parámetros	Pulpa de alimentación	Pulpa de reboso	Pulpa de descarga
Peso, kg	22,85	10,111	12,74
Volumen, L	20,13	9,30	10,85
Densidad, kg/L	1,14	1,09	1,135
Contenido de sólidos, %	22,42	13,67	29,37
Contenido de arena (+ 0,15 mm), %	23,16	13,69	26,66
Cantidad de sólidos (base seca), kg	5,122	1,382	3,74

Como se observa el contenido de finos (- 0,15 mm) en la pulpa de descarga representa el 73,34 % de todo el sólido en ese flujo, lo cual indica que el mismo no debe ser alimentado al proyectado circuito de molienda y sí recirculado a la alimentación de la zaranda de doble paño, es decir, establecer un circuito cerrado entre esta zaranda y el hidrociclón.

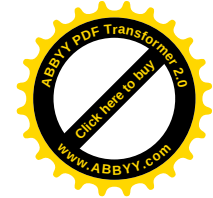
Todos los datos obtenidos anteriormente fueron mediante los cálculos realizados en Excel utilizando las fórmulas de la (1-5) descritas en el capítulo 2.

3.4. Cantidad de hidrociclones necesarios

Aplicando la fórmula (6) se determinó que son suficientes dos hidrociclones industriales en operación para procesar la cantidad de pulpa que llega al sedimentador 1 de la Planta de cienos carbonatado ($Q_T = 120$ t/h), con una capacidad cada uno de 60 t/h ($Q_{u,h} = 60$ t/h).

3.5. Resultados de la evaluación económica

De acuerdo a las ofertas recibidas de los equipos y materiales para la instalación de dos hidrociclones en la torre de beneficio de cienos carbonatados y utilizando el software Cleopatra se determinó el costo capital de la inversión. El mismo presenta un costo capital de 57,000 USD.



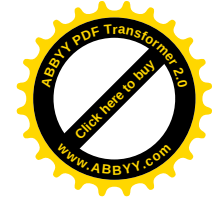
En la Tabla 7 se desglosan las partidas y el estimado de gastos.

Tabla.7. Partidas de gastos

No.	Renglones	Costo capital, USD
1	Equipos	27,000
2	Tubería	22,000
3	Edificio y Estructuras	1,000
	Total de costos directos	50,000
4	Ingeniería (3,5 % con respecto al equipo principal)	2,000
	Total de otros costos relacionados	2,000
5	Contingencia (3,5 % con respecto al equipo principal)	5,000
	Total de la inversión	57,000

Esta inversión se justifica sobre la base que a continuación se relacionan:

1. Se evitan gastos de operación por disminución del amperaje en el mecanismo de los tanques de almacenaje de cienos carbonatados.
 - Consumo de potencia de los mecanismos de agitación de los sedimentadores: 15 kW/h
 - Estimado del incremento en la potencia de los mecanismos debido a las arenas : 20 kW/h
 - Diferencia: 20 kW/h -15 kW/h= 5 kW/h
 - Tiempo de operación: 3 meses
 - Costo de la energía comprada: 0,19 USD/kW
 - Gastos por energía: 5 kW/h x 24 h/d x 90 d x 0,19 USD/kW = 2,052 USD.
2. Se evitan pérdidas de producción porque no será necesario disminuir la capacidad de almacenaje por salida de operación de un tanque sedimentador.
 - Producción de Sulfuro de Níquel + Cobalto: 105,3 t/d



- Disminución de la capacidad de la Planta debido al arenamiento: 25 %
- Cantidad de días fuera de operación el tanque: estimado 3 días
- Disminución en la producción: $105,3 \text{ t/d} \times 0,25 \times 3 = 78,975$ toneladas de Sulfuro de Níquel mas Cobalto.
- Costo de la tonelada de Sulfuro de Níquel y Cobalto: 1,296, 000 USD
- Costo de operación: 8,255 USD/tonelada de sulfuro de Níquel y Cobalto
- Costo de operación total: 651,938.63

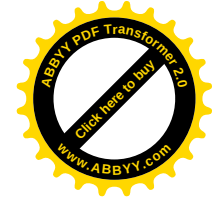
Ahorros totales: $1, 296, 000 \text{ USD} - 651,938.63 \text{ USD} = 644,061.4 \text{ USD}$

3. No serán necesarios gastos excesivos por sobre dimensionamiento de la proyectada unidad de molienda de rechazo.

Por el balance de masa realizado en el Departamento de Procesos de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba y de acuerdo a la capacidad de la Planta de cienos carbonatados, se dispone de la siguiente información:

- Flujo alimentado de cieno carbonatado a la criba fija – 120 t/h.
- Para un material que tenga 15 % del sólido de granulometría (+ 0,83 mm), 28 % de granulometría (– 0,83 + 0,15 mm), la diferencia sería el material utilizable en el proceso, entonces los cálculos efectuados por el departamento de la empresa indican que para moler esos rechazos se necesitaría un molino de 120 t/h, incluyendo toda la pulpa de fondo del hidrociclón. Pero si esa pulpa de fondo se retorna a la zaranda de doble paño y no al molino, entonces sólo se requerirá de un molino de 18 t/h, es decir, se necesitarían procesar en el molino 102 t/h menos de material.
- El costo de una unidad de molienda de 18 t/h es de 3, 500,000 USD y el de una unidad de molienda de 120 t/h es de más de 10,000, 000 USD.
- Además con la disminución del tamaño del molino se disminuiría el gasto de la energía necesaria.

En resumen, con la instalación de un hidrociclón se logran las siguientes ventajas económicas:



- Se disminuye el costo de operación en 2,052 USD por concepto de energía.
- Se evitan pérdidas de producción ascendente a 78,975 toneladas de sulfuros de níquel + cobalto.

3.5.1. Resultados del análisis económico

Teniendo en cuenta las bases que se describen anteriormente y utilizando el flujo de caja aprobado para la evaluación económica de los proyectos en la empresa Pedro Sotto Alba, más el precio del níquel y el cobalto, respectivamente de 19,8 USD/Kg y 33 USD/kg y el costo capital de la instalación de dos hidrociclones de 57, 000 USD, se obtienen los siguientes indicadores económicos:

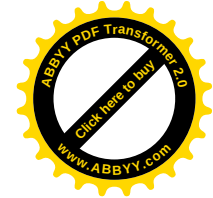
Tiempo de Recuperación de la Inversión: 2,4 meses

Tasa Interna de Retorno al 15 %: 176,9 %

Valor Actualizado Neto: 267,000 USD

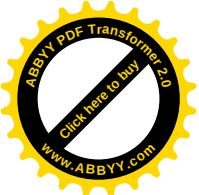
Conclusiones parciales del capítulo III

- Los resultados de las pruebas indican que con el uso de un hidrociclón es posible disminuir la arena (0,15mm) contenida en los cienos carbonatados.
- Las curvas obtenidas del resultado del comportamiento de la pulpa en la salida del hidrociclón (reboso y fondo) muestran que para un porcentaje de sólido a escala de industria y una presión no mayor a 0,34 atm es posible disminuir la arena de acuerdo a las especificaciones exigidas por el proceso industrial.
- Los cálculos económicos demuestran que con dos hidrociclones, uno trabajando y otro de reserva es suficiente para procesar el flujo de 120 t/h de cienos carbonatados que sale de la torre.



CONCLUSIONES

1. La pulpa inicial de cieno carbonatado objeto de estudio contenía 22,42 % de sólidos y 23,16% de arena (+ 0,15 mm), La arena requerida por la industria es (~ 14 %).
2. Se demostró que hubo una reducción importante del contenido de arena en la pulpa del reboso, variando adecuadamente la presión y el % de sólido de dicha pulpa.
3. Para el rango de sólidos de la pulpa estudiada (11,45 hasta 22,42 %) no se observó inestabilidad apreciable durante el bombeo de la pulpa inicial hacia el hidrociclón con las presiones de bombeo entre 0,34 y 0,68 atm; sin embargo a menor contenido de sólidos la estabilidad era mayor.
4. La presión de bombeo tiene una influencia notable en la eficiencia de la disminución tanto del contenido de arena (+ 0,15 mm) como de sólidos en la pulpa producto (reboso del hidrociclón). A mayor presión el nivel de “desarenamiento” aumenta, pero disminuye el contenido de sólidos.
5. Se demostró que con una presión de 0,34 atm es posible obtener una pulpa con las especificaciones requeridas. No se estudiaron presiones inferiores a 0,34 atm porque bajo las mismas el hidrociclón no lograr clasificar. Con esta presión se obtuvo un flujo de descarga con 29,37 % de sólidos y 73,34 % de partículas inferiores a 0,15 mm. Por tal motivo no se recomienda introducir este material directamente a un molino, si no retornarlo a la zaranda de doble paño para su reclasificación.
6. La valoración económica realizada, que fue del orden de magnitud de $\pm$ 50%, indicó que con la instalación de un hidrociclón a la salida de la zaranda vibratoria de la Planta de cienos carbonatado se logra:

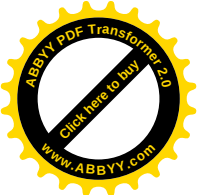


- Ahorrar 2,052 kW/h por concepto de disminución de gastos al evitarse el aumento del amperaje del mecanismo de los tanques de almacenaje de cienos carbonatados.
- Se ahorran diariamente 644,061.4 USD por disminución de pérdidas en la producción de sulfuros de níquel y cobalto, que ocurriría si se disminuye la cantidad de cieno coralino producido.
- Se ahorran 6,5 millones de USD por disminución del tamaño del molino proyectado para la molienda del rechazo de la Planta de cienos carbonatado.

Tiempo de Recuperación de la Inversión: 2,4 meses

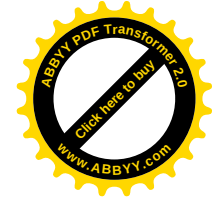
Tasa Interna de Retorno al 15 %: 176,9 %

Valor Actualizado Neto: 267,000 USD



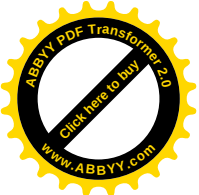
RECOMENDACIONES

1. Confirmar a la misma escala de laboratorio, los resultados obtenidos en la presente investigación, realizando una mayor cantidad de réplicas para cada condición experimental y optimizar los resultados.
2. Realizar corridas a una escala mayor con los resultados optimizados a escala de laboratorio.
3. Una vez satisfechas las recomendaciones anteriores, proceder a instalar el hidrociclón a escala industrial en la Planta de cienos carbonatado.



BIBLIOGRAFÍA

1. Arterburn, R.A. Design and Installation of Comminution Circuits. In: A. Mular and G. Jergersen, eds. SME-AME, New York, NY, 592-607. (1982)
2. Anon, The Sinzing of hidrociclones, Krebs Engeneering, California. (1977).
3. ALNICOLSA del Perú S.A.C. Consultado en: www.aguanet.com.ar
4. Bouso, J. Presidente de ERAL Equipos y Procesos. Publicado en Américas Mining. (1998)
5. Correa. F. Estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al oeste de Cayo Moa Grande. (1957).
6. Castillo, D. Informe sobre problemas de extracción y utilización de la materia prima de Cieno Carbonatado. (1988).
7. Campos, G. Nuevos datos acerca de la naturaleza y génesis de los sedimentos del yacimiento de Cieno Carbonatado en la bahía de Cayo Moa Grande. Holguín. (2001).
8. Caballero, Y. Caracterización de las pulpas de Cieno Carbonatado para su perfeccionamiento en el hidrotransporte. Trabajo de Diploma. (2008).
9. Mular A.L y Bhappu R.B. Diseño de Planta de Proceso de Minerales. Editorial Rocas y Minerales. Segunda Edición
10. Eneði, J. Molienda del rechazo del Cieno Carbonatado de la Empresa Pedro Sotto Alba. Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico, Instituto Superior Minero Metalúrgico. (2010).
11. Jiménez, D. Cálculo verificativo y propuesta de modificación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado desde el puerto hasta la planta de Neutralización de la Empresa "Pedro Soto Alba". Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. (2005)



12. King, P. Principles of Flotation, Institute of Mining and Metallurgy South African, pag. 215-224. (1982).
13. King P. , Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems, Department of Metallurgical, Universidad de Utah, USA, 98-126 (2001)
14. Lynch, A., Rao, T., Bradley, C. The influence of design and operating variables
on the capacities of hidrociclones classifiers, Int. J. Min. Proc 2. (1986).
15. Manual de operaciones de la Planta de cienos carbonatado.
16. Nedved, M. Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al Sur de Cayo Moa Grande. (1966).
17. Nápoles, E. Informe exploración orientativa de Cienos Carbonatados al Sur de Cayo Moa Grande. (1992)
18. Pierson, H.G.W. The selection of solid – liquid separation equipment. En: Solid –Liquid separation (Ed. L. Svarovsky) 4^a ed., Butterworth – Heinemann, Oxford, 512 – 525, (2000)