

Evaluación de trabajo de un hidrociclón para la clasificación de la pulpa de cienos carbonatados

Assessment of a Hydrocyclone Performance for Classification of the Calcium Carbonate Slurry Feed

Ing. Ariel Breff-Azaharez^I, abreff@moanickel.com.cu, Dr. José Falcón-Hernández^{II},
Ing. Nadielza Góngora-Fonseca^{III}

^IEmpresa Pedro Sotto Alba, Moa, Holguín, Cuba; ^{II}Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba; ^{III}Instituto Superior Minero Metalurgico, Moa, Holguín, Cuba

El trabajo tiene el propósito de brindar información sobre la utilización de hidrociclones para el beneficio de los cienos carbonatados y lograr alimentar a la Planta de Neutralización del proceso de lixiviación ácida a presión localizada en Moa, Cuba, una pulpa con la granulometría requerida para el proceso de -0,84+0,15 mm menor de un 10 %. Para los ensayos se utilizó una instalación piloto compuesta por un hidrociclón, un tanque para el almacenaje de la pulpa y una bomba centrífuga. Para los ensayos se confeccionó un diseño experimental tipo 2³, se realizaron ocho experimentos y cuatro réplicas en el nivel central. Los factores sometidos a estudio para determinar su influencia sobre la variable respuesta, que resulta eficiencia de separación de la clase -0,84+0,15 mm fueron: contenido de arenas (18, 24, 30 %), contenido de sólidos (17, 21, 25 %) en la pulpa y presión de trabajo en el hidrociclón (10, 28, 46 PSIA [317,8; 193,2; 59,0 kPa]). Los resultados mostraron una eficiencia por encima de 97,5 % en la separación. Los hidrociclones mostraron una alta eficiencia de separación de las partículas más gruesas en la clasificación de la pulpa de cienos carbonatados.

Palabras clave: hidrociclones, cienos carbonatados, proceso de lixiviación ácida a presión diseño experimental.

In order to expand the knowledge on the use of hydrocyclones for the calcium carbonate slurry dressing, and feed the Neutralization plant from the acid pressure leaching process located in Moa, Cuba, a -0.84+0.15 mm sized slurry with less than 10 % (which is required for the metallurgical process), a pilot-scale test facility consisting of a hydrocyclone, a slurry storage tank and a centrifugal pump was installed. A type 2³ experimental design was developed for the test works to carry out eight experiments and four duplicates at the central level. The factors under study to observe its influence on the variable: response, the separation efficiency of -0,84 +0,15 mm grain size were: percentage of sand (18, 24, 30 %), percent solids (17, 21, 25 %) and pressure (10, 28, 46 PSIA [317,8; 193,2; 59,0 kPa]). The results indicated separation efficiency over 97,5 %. The use of hydrocyclones confirmed a high efficiency of separation for coarser particles in the classification of the calcium carbonated slurry.

Key words: hydrocyclones, calcium carbonate slurry, acid pressure leaching process, experimental design.

Introducción

Cuba posee una de las mayores reservas de minas lateríticas, en las que se utiliza la vía hidrometalúrgica y piro-metalúrgica para la extracción de níquel más cobalto, en las empresas productoras "Pedro Sotto Alba" y "Ernesto Che Guevara", ubicadas en Moa, al noreste de la provincia de Holguín.

Los licores de este proceso contienen ácido sulfúrico libre, por lo que deben ser neutralizados parcialmente para que, con posterioridad, ocurra la precipitación selectiva del níquel y el cobalto con ácido sulfhídrico. En la empresa Pedro Sotto Alba esta neutralización se realiza con cienos carbonatados (coral), extraídos de un yacimiento situado en la bahía de Moa que es rico en carbonato de calcio (CaCO_3) /4, 15/. Esta es la única planta industrial del mundo que utiliza este tipo de neutralizante. Las otras plantas con similar tecnología de lixiviación ácida a presión (Murrin – Murrin, Cawse y Bulong, todas en Australia) utilizan calizas beneficiadas o un producto llamado calcreta (La Calcreta, de acuerdo con la Enciclopedia Británica (2014): capa sólida rica en calcio, capa endurecida en o sobre el suelo. Se forma en los materiales calcáreos, como resultado de las fluctuaciones climáticas en las regiones áridas y semiáridas).

Además del mineral laterítico, la utilización del carbonato de calcio (CaCO_3) constituye una materia prima imprescindible para la producción, el cual es empleado en la planta de neutralización, para lograr el pH óptimo del licor lixiviado, obtenido a partir de la lixiviación del mineral níquelífero.

Para su uso como neutralizante, los cienos carbonatados deben prepararse convenientemente. Estos se clasifican primeramente, para lograr una materia prima con la granulometría requerida por el proceso, y luego se les disminuye el contenido de cloruros, lavando las partículas con agua de proceso /5/.

El problema tecnológico más importante en la preparación de la pulpa de los cienos carbonatados radica en su clasificación granulométrica /5, 6, 8/. El material debe ser preferentemente fino por varias causas: puede ser bombeado con más facilidad,

disminuye el desgaste de los equipos tecnológicos (bombas, agitadores, etcétera.), y aumenta la velocidad de reacción con el ácido sulfúrico objeto de la neutralización /1, 2, 9, 10, 17/.

En el proceso de clasificación granulométrica de la empresa Pedro Sotto Alba, la pulpa de cienos carbonatados, con aproximadamente 40% de sólidos, se alimenta a la planta de Neutralización con un contenido de arenas de aproximadamente un 40 % (30 % de la fracción $-0,84 + 0,15$ mm, y un 10 % de la fracción $-0,15 + 0,044$ mm). Sin embargo, el nivel deseado por la industria es de 21 % (10 % de la fracción $-0,84 + 0,15$ mm, y 11 % de la fracción $-0,15 + 0,044$ mm). Esta exigencia tecnológica se agrava dado el hecho de que los depósitos de cienos carbonatados más finos se están agotando en la concesión minera del yacimiento de la Bahía de Moa /16, 17/. Esto implica que se empiecen a explotar depósitos con mayor contenido de arena, lo cual resultará nocivo para el proceso /3, 6/.

Este escenario, indica la necesidad de perfeccionar el sistema de preparación de la pulpa en la Planta de Beneficio de Cienos Carbonatados de la empresa Pedro Sotto Alba, para lo cual puede ser esencial la selección del equipamiento tecnológico que brinde resultados adecuados. Los trabajos investigativos (sobre cienos carbonatados realizados hasta el presente confirman que la mayor atención se ha centrado en las características del material existente en la Bahía de Moa para su utilización como neutralizante y no se ha estudiado con igual intensidad lo referido a la clasificación de las partículas adecuadas para el proceso /8/.

El presente trabajo se despliega como vía de solución, la selección del equipamiento adecuado para la clasificación de partículas dado que la incorporación de otra etapa de clasificación, más fina, puede producir una pulpa con la calidad requerida.

Se considera que la utilización de hidrociclones que separen las partículas mayores de 0,15 mm, y la inclusión de una operación de reducción de tamaño (molienda) en la instalación para procesamiento de los cienos carbonatados, pueden regular la granulometría exigida para la neutralización /7, 13/, y además, brindarle una utilización más integral al cieno carbonatado extraído de los fondos marinos /9, 11/.

En la búsqueda bibliográfica realizada no se encontraron trabajos de investigación sobre la clasificación de cienos carbonatados con hidrociclones para lograr una pulpa con los requerimientos tecnológicos requeridos por el proceso de neutralización; algunos de ellos solamente han abordado la temática para el tratamiento del rechazo y el comportamiento reológico de la pulpa de cienos carbonatados /6, 8/.

En el presente trabajo se aborda la posibilidad de emplear hidrociclones para controlar el contenido de la fracción $-0,84 + 0,15$ mm en el producto de la Planta de Neutralización. El producto rechazado se someterá a molienda para recuperarlo y de la combinación del producto extraído del mar y el remolido obtener el que satisfaga las exigencias del proceso de neutralización.

Materiales y métodos

Para las corridas experimentales se tomaron 100 L de pulpa del primer sedimentador de la planta de Beneficio de Cienos Carbonatados. Se sometieron a ensayos muestras de pulpa con diferentes contenidos de sólidos, de arenas y variando la presión de trabajo del hidrociclón para los experimentos. La pulpa fue homogenizada y luego se tomó una muestra para realizar la caracterización física.

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.
- Determinación de la composición de tamaño de partículas con el Espectrofotómetro secuencial por Inducción de plasma, (Horiba) que es un equipo analizador de partículas, que se utiliza para la determinación de fracciones de tamaño, en diferentes tipos de muestra.

Las tareas de investigación incluyeron:

1. Toma de muestras representativas de pulpa de cienos carbonatados.
2. Caracterización química de la pulpa de cienos carbonatados.
3. Ajuste y puesta en marcha de la instalación experimental.
4. Desarrollo de las corridas experimentales de clasificación.

Corridas en la instalación experimental de separación de partículas por medio del hidrociclón

En la figura 1 se muestra la instalación experimental donde se realizó la clasificación de cienos carbonatados. Está compuesta por un tanque agitado, una bomba de tipo centrífuga y un hidrociclón con un equipo medidor de presión (manómetro) a la entrada del mismo para determinar la presión de operación. Las mangueras que cierran el circuito son engomadas.

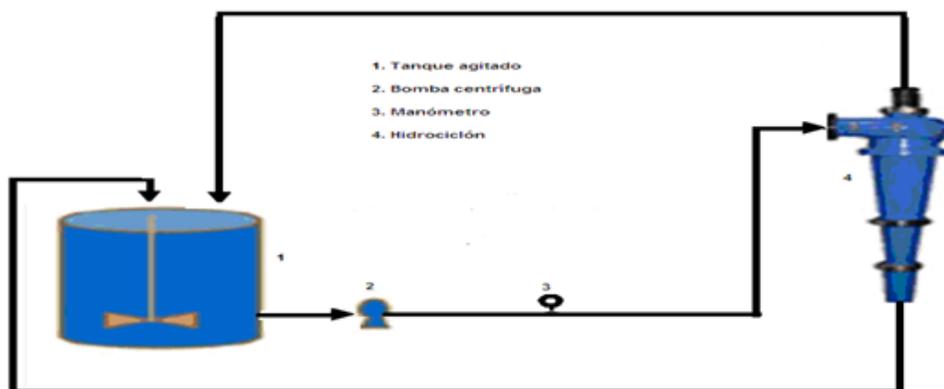


Fig. 1 Instalación experimental para la separación de partículas por medio del hidrociclón.

Características de los equipos de la instalación

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

- **Hidrociclón:** altura: 0,42 m; D_{entrada} : 0,0388 m; $D_{\text{salida superior}}$: 0,0407 m; $D_{\text{salida inferior}}$: 0,012 m.
- **Bomba:** tipo: centrífuga; Flujo: 3,42 – 254,4 m³/h; Material de construcción: acero al carbono; presión de descarga: 115,5 PSIA (796 kPa); altura de descarga: 35,21 m; potencia: 5 kw; frecuencia: 60 Hz; voltaje: 440 v
- **Tanque agitado:** capacidad: 250 L; altura: 1,10 m; diámetro: 1,6 m con cuatro baffles deflectores.

Diseño de experimentos. Metodología experimental

Para el desarrollo de las corridas experimentales se procedió primeramente a determinar las variables que se consideraron con influencia sobre la clasificación de la pulpa de cienos carbonatados en los hidrociclones y estas resultaron: la presión de bombeo (PSIA), el contenido de sólidos en la pulpa alimentada (%) y el contenido de arenas (fracción -0,84 + 0,15 mm) en la fracción de sólidos (%).

Se prepararon las muestras correspondientes para establecer las siguientes condiciones de las variables experimentales, reflejadas en la tabla 1

Tabla 1
Valores experimentales

Variable	Nivel máximo	Nivel central	Nivel mínimo
Contenido de Arenas (%)	30	18	24
Contenido de Sólidos (%)	25	21	17
Presión de Bombeo (PSIA)	48 (317,8 kPa)	28 (193,2 kPa)	10 (69,0 kPa)

Los experimentos se desarrollaron a dos niveles, de modo que al aplicar un diseño factorial 2^k con tres factores experimentales resultaron ocho

experimentos. Se realizaron además cuatro replicas en el nivel central. En la tabla 2 se muestran los niveles fijados de cada factor.

Tabla 2.
Matriz del diseño experimental

Experimentos	Contenido de Arena (%)	Contenido de Sólidos (%)	Presión de Bombeo (PSIA)
1	18	17	10
2	30	17	10
3	18	25	10
4	30	25	10
5	18	17	46
6	30	17	46
7	18	25	46
8	30	25	46
9	24	21	28
10	24	21	28
11	24	21	28
12	24	21	28

Para los experimentos se consideraron fijos los parámetros siguientes:

- Densidad del carbonato de calcio 2.58 g/cm³;
- densidad del agua 0.9962 g/cm³, viscosidad del agua 1*10⁻³ Pa.s;
- distribución granulométrica y forma de las partículas; y
- dispersión de la suspensión y uniformidad.

Para lograr la dispersión de la suspensión y uniformidad en la pulpa se instaló un tanque con un agitador y cuatro baffles deflectores espaciados desde el cual se alimentaba la pulpa a la instalación experimental /18, 19/.

En la evaluación de los resultados se consideraron la eficiencia del trabajo del hidrociclón en correspondencia con los sólidos totales recuperados en el fondo (h), definida como la relación entre el flujo másico de las partículas más gruesas separadas por el fondo (m_{pc}) y el flujo másico de esas partículas en el flujo de entrada (m_{pe}) (12,13).

$$h = m_{pc}/m_{pe} \quad (2.1)$$

También se determinó la eficiencia basado en el balance de productos obtenidos en el fondo

respecto al de la alimentación para las arenas (clase -0,84 + 0,15 mm) y para los sólidos totales. En este caso la eficiencia (E) se determinó por la expresión:

$$E = \frac{\beta}{\beta} \left(\frac{\beta - \alpha}{\beta - \alpha} \right) \quad (2.2)$$

donde:

α , β y β - contenidos en la alimentación, el reboso y el fondo del hidrociclón de la clase de tamaño correspondiente.

Resultados y discusión

Se presentan los resultados de los experimentos, aplicado la técnica de los hidrociclones y desarrollado el diseño experimental propuesto tipo 2³, resultado del procesamiento estadístico y la discusión de los mismos.

En la figura 2 se representa el contenido en por ciento típico de la composición granulométrica por tamaño de partículas presente en la pulpa de cienos carbonatados. Esta determinación se realizó con el equipo Horiba.

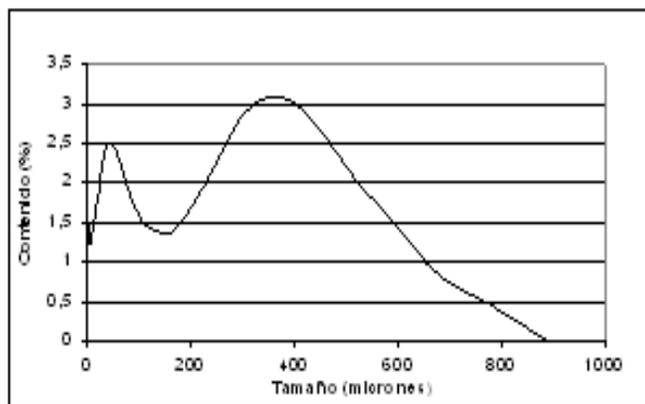


Fig. 2 Curva de distribución granulométrica.

La figura 3 muestra que un 80 % del material resulta menor de 240 micrones y por tanto se

requiere de clasificación para reducir el contenido de arenas (fracción - 0,84 + 0,15 mm).

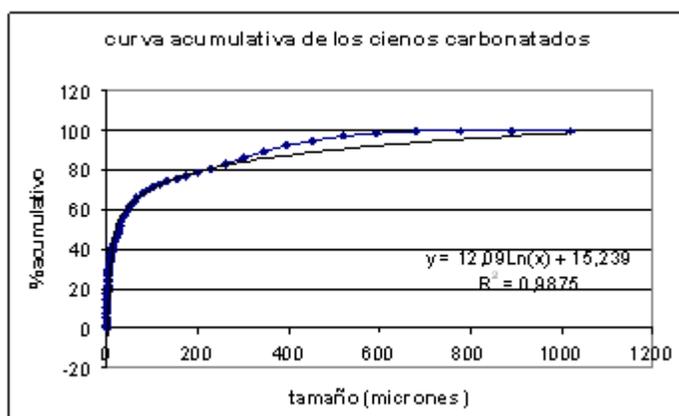


Fig. 3 Curva acumulativa de los cienos carbonatados.

Resultados de las corridas experimentales

Los experimentos desarrollados a escala piloto demostraron que con la utilización de hidrociclones, se obtiene una pulpa con la granulometría y calidad requerida por el proceso industrial.

En las corridas experimentales se pudo demostrar la alta eficiencia en la separación de las arenas (clase $- 0,84 + 0,15$ mm) del producto alimentado al ciclón, el rebozo del ciclón será enviado al proceso con las especificaciones requeridas, el fondo con alto contenido de arena

será alimentado a una unidad de molienda, con el objetivo de disminuir el tamaño y recircular la pulpa junto con el rebozo al proceso tecnológico.

En la figura 4, en forma de diagrama de barras, se muestra el comportamiento de la eficiencia de separación de los sólidos para cada experimento, en base al trabajo del hidrociclón en correspondencia con los sólidos totales recuperados en el fondo (h). Como se puede observar el experimento que logra la mayor eficiencia fue el experimento ocho, correspondiente a un 25 % de sólidos, 30 % de arena y 46 PSIA (317,8 kPa) de presión.

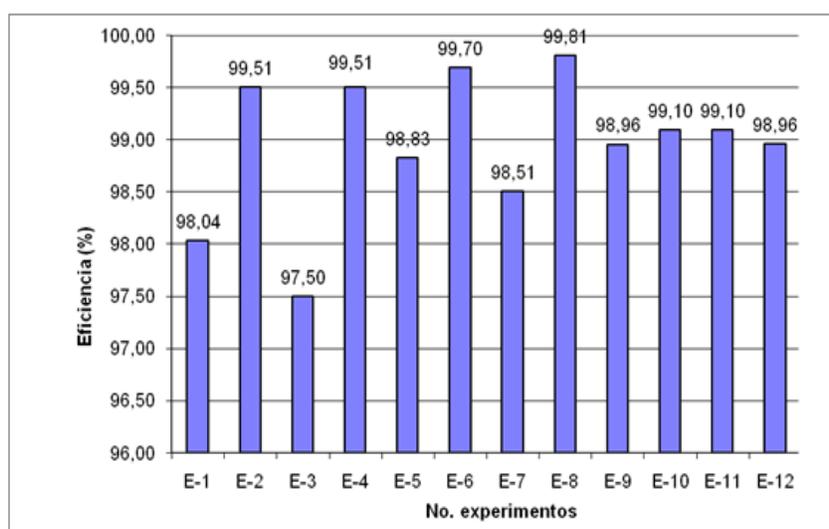


Fig. 4 Gráfica del comportamiento de la eficiencia de separación según flujo de másico de partículas en cada experimento.

En la tabla 3 se muestran los resultados de contenido de los sólidos componentes de los productos separados en los experimentos para los sólidos totales y para las arenas.

La figura 5 muestra la eficiencia obtenida en los diferentes experimentos según el balance de productos para los sólidos y para la clase - 0,84 + 0,15 mm.

Tabla 3
Contenido de componentes (%) en los productos separados en los experimentos

No de Experimento	Contenido de sólidos, %			Contenido de la clase - 0,84 + 0,15 mm, %		
	Alimentación	Reboso	Fondo	Alimentación	Reboso	Fondo
1	25,37	8,48	65,20	18,54	0,67	25,44
2	25,46	9,87	54,43	18,30	0,86	21,66
3	16,95	5,20	52,74	18,03	0,75	28,07
4	16,95	6,75	45,01	18,03	0,71	20,63
5	25,00	8,35	52,42	30,16	0,40	33,04
6	24,64	7,81	58,20	29,98	0,24	36,69
7	16,99	6,22	51,93	30,15	0,39	40,66
8	17,09	6,96	43,52	30,13	0,76	37,52
9	21,52	6,64	62,56	23,68	1,09	33,84
10	21,52	6,53	62,73	23,68	0,96	33,64
11	21,52	6,69	62,98	23,68	0,94	33,54
12	21,52	6,25	62,85	23,68	1,16	33,60

Variación Eficiencia de separación de sólidos y arenas en los ensayos

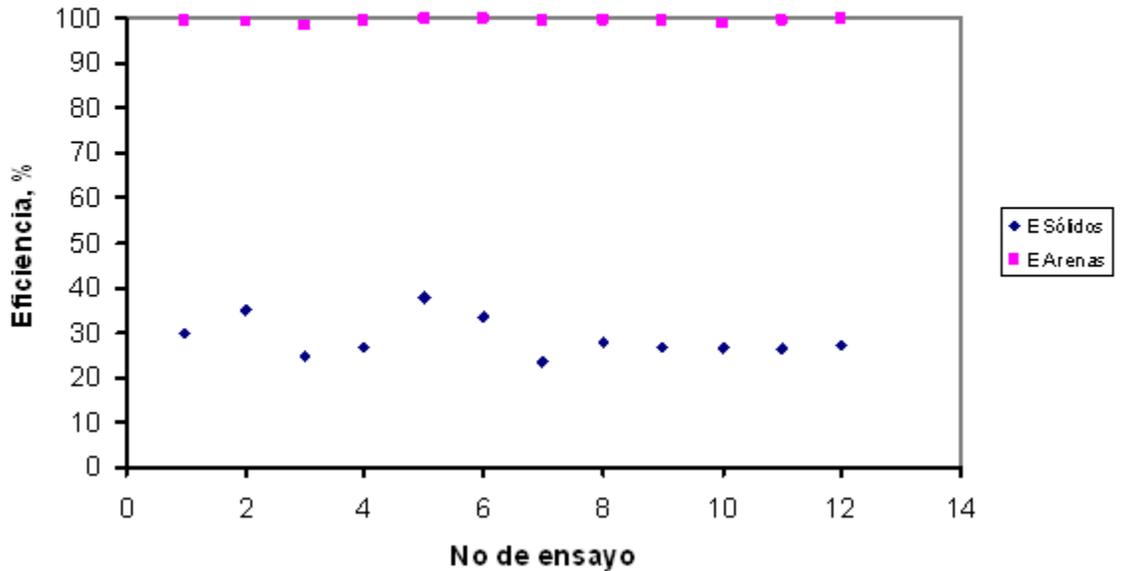


Fig. 5 Eficiencia de separación para los ensayos según el contenido de sólidos y de la clase - 0,84 + 0,15 mm (arena).

De los resultados anteriores se tiene que el experimento con menor contenido de sólidos en el fondo resulta el séptimo (Eficiencia de 23,56 % y la de arenas se mantiene en 99,66 %), ya que con este asegura mayor cantidad de sólidos en reboso, que se incorpora a la pulpa de cieno carbonatado que va para el producto preparado. También se puede apreciar que entre los resultados según el flujo másico de partículas y el obtenido por el balance en base al contenido de sólidos se tiene una diferencia poco significativa, por ejemplo, la eficiencia de las réplicas en el nivel central manifiestan diferencias según flujo másico de partículas y según el balance de contenido de sólidos del orden de 0,4 % máximo.

Como mejor resultado puede ser seleccionado el trabajo con las condiciones del experimento 7.

Análisis estadístico de los resultados de eficiencia de separación de las partículas gruesas

Para la realización del análisis que se muestra continuación se tomaron los datos de la eficiencia según la eficiencia determinada los valores de flujos másicos de partículas.

El análisis estadístico de los resultados de las eficiencias de separación alcanzadas en la clasificación final de la pulpa de cienos carbonatados, fue realizado aplicando el programa profesional STATGRAPHICS Plus 5.1.

Este análisis se desarrolló con el fin de evaluar el efecto de los factores presión, contenido de sólidos y contenido de arenas en la eficiencia de separación de las partículas gruesas que se necesitan remoler. Para ello, se realizó un análisis de la variable respuesta eficiencia de separación sólidos recuperados en el producto de fondo (h), tomando como base los resultados de la eficiencia de trabajo del hidrociclón.

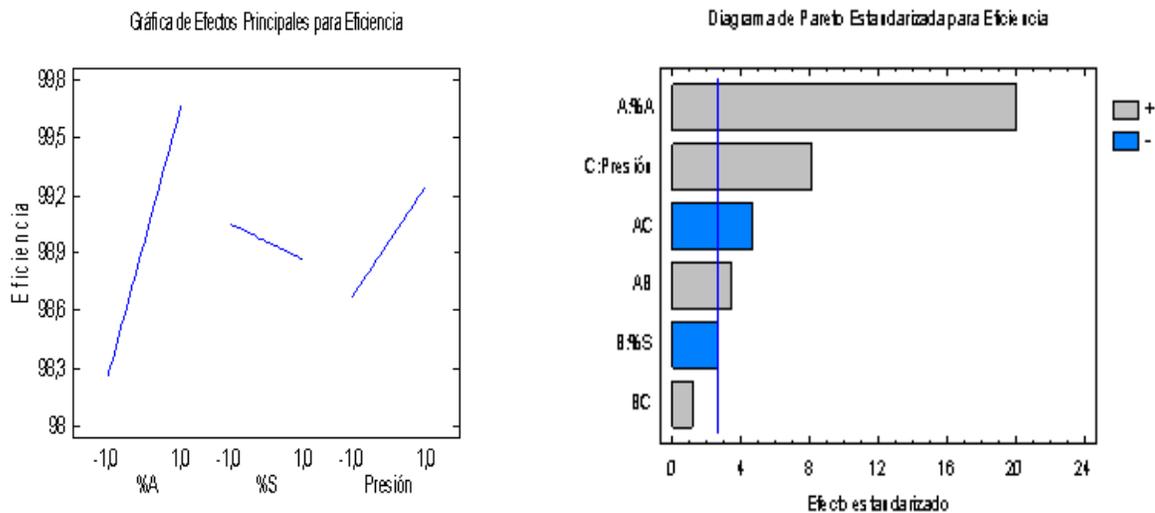
En el procesamiento estadístico se fijó un nivel de confianza de 95 %.

Para una mejor comprensión de cómo influyen las variables, se muestran los diagramas de Pareto y los gráficos de los efectos principales. De estos resultados se puede concluir, a manera de resumen, que:

1. El factor que influyó más significativamente en la eficiencia de separación fue el contenido de

arena. Este parámetro es directamente proporcional a la eficiencia de separación y la presión de trabajo (Ver figura 6).

2. El contenido de sólidos no tuvo una influencia significativa en la eficiencia de separación de las partículas más gruesas en los niveles fijados (Ver figura 6).



Figs. 6 Diagrama de Pareto y gráfico de los efectos principales para la variable respuesta eficiencia de separación.

En la tabla 4 se muestra el análisis de varianza para la eficiencia de separación de las partículas más gruesas. Los valores que en esta aparecen corroboran el análisis anterior.

A continuación se presenta el modelo estadístico resultante de todo el procesamiento estadístico teniendo en cuenta el factor que realmente es significativo en la eficiencia de separación, luego de la realización de la calidad del ajuste.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Eficiencia} = 98,047 + 0,0540683 * \% \text{ Arena} - 0,160729 * \% \text{ sólidos} + 0,0402604 * \text{Presión} + 0,00505208 * \% \text{ Arena} * \% \text{ sólidos} - 0,0015162 * \% \text{ Arena} * \text{Presión} + 0,000572917 * \% \text{ sólidos} * \text{Presión}$$

donde
% Arena: contenido de Arena, en por ciento

Presión: presión a la entrada del hidrociclón

% Sólido: contenido de sólido en la pulpa, en por ciento

El modelo obtenido para el cálculo de la eficiencia de separación de las partículas -100 +325 cumple con el rango de valores que se muestra en la tabla 3.

La tabla 5 muestra las estimaciones para cada uno de los efectos y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Nótese también que el factor de inflación de varianza (V.I.F., Variante Inflation Factor) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Errores estándares basados en el error total con cinco grado de Libertad.

Tabla 4
Análisis de varianza para la variable respuesta eficiencia de separación de las partículas más gruesas

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:%A	3, 99 031	1	3, 99 031	400,50	0,0000
B:%S	0, 0 703 125	1	0, 0 703 125	7,06	0,0451
C:Presión	0, 655 512	1	0, 655 512	65,79	0,0005
AB	0, 117 613	1	0, 117 613	11,80	0,0185
AC	0, 214 513	1	0, 214 513	21,53	0,0056
BC	0, 0 136 125	1	0, 0 136 125	1,37	0,2951
Error total	0, 0 498 167	5	0,0 099 633		
Total (corr.)	5,11 169	11			
R-cuadrada = 99,0 254 porciento					
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 97,856 porciento					
Error estándar del est. = 0,0 998 165					
Error absoluto medio = 0,0 463 889					
Estadístico Durbin-Watson = 0,892 899 (P=0,0637)					
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0, 530 096					

Tabla 5
Efectos estimados para Eficiencia (%)

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	98,9 608	0,0 288 145	
A:%A	1,4 125	0,0 705 809	1,0
B:%S	-0,1 875	0,0 705 809	1,0
C:Presión	0,5 725	0,0 705 809	1,0
AB	0,2 425	0,0 705 809	1,0
AC	-0,3 275	0,0 705 809	1,0
BC	0,0 825	0,0 705 809	1,0

Errores estándares basados en el error total con 5 grado de Libertad.

Conclusiones

1. Los resultados experimentales obtenidos, a partir de la instalación constituida por una bomba centrífuga y un hidrociclón de diámetro aproximado de 0.15 m, demostraron que estos equipos pueden ser utilizados para el control de la separación de la pulpa de cienos carbonatados, garantizando una eficiencia para la separación de las arenas (clase - 0,84 + 0,15 mm) con efectividad superior al 97 %. En el experimento 7 desarrollado a 18 % de sólidos, 25 % de arenas y 46 PSIA (317.8 kPa) de presión se alcanzaron los mejores resultados de eficiencia de separación de la pulpa de cieno carbonatado.
2. Los resultados de un programa de experimentos considerando como factores: el contenido de arenas (% Arena) y el contenido de sólidos (% sólidos) en el mineral alimentado; y la presión (Presión) de alimentación de la pulpa al hidrociclón, brinda la ecuación ajustada para determinar la eficiencia de separación.

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia} = & 98.047 + 0.0540683 * \% \text{ Arena} - \\ & 0,160729 * \% \text{ sólidos} + 0.0402604 * \text{Presión} + \\ & 0,00505208 * \% \text{ Arena} * \% \text{ sólidos} - \\ & 0,0015162 * \% \text{ Arena} * \text{Presión} + \\ & 0,000572917 * \% \text{ sólidos} * \text{Presión} \end{aligned}$$

Bibliografía

1. ANON. *The Sizing of hidrociclones*. Krebs Engeneering, California, 1977.
2. ARTERBURN, R.A. "Chapter 32, Design and Installation of Comminution Circuits". A. Mular and G. Jergersen, eds. , SME-AME, New York, 1982, 592-607.
3. CASTILLO, D. "Informe sobre problemas de extracción y utilización de la materia prima de Cieno Carbonatado". Archivo Empresa Pedro Sotto Alba, 1988.
4. CAMPOS, G. M. "Nuevos datos acerca de la naturaleza y génesis de los sedimentos del yacimiento de Cieno Carbonatado en la bahía de Cayo Moa Grande". Archivo Empresa Pedro Sotto Alba. Holguín. 2001.
5. CABALLERO, Y. "Caracterización de las pulpas de Cienos Carbonatados para su utilización como neutralizante". Archivos de CEPRONIQUEI. 2008.
6. CORREA, F. "Estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al oeste de Cayo Moa Grande". Archivo Empresa Pedro Sotto Alba. 1957.
7. CONTRERAS, E.; FERNÁNDEZ, V. "Una nueva metodología para la evaluación de proyectos de inversión: las opciones reales". *Revista de Ingeniería de Sistemas*. julio, Volumen XVII:(1), 2003.
8. DEL TORO, Dania. "Modelo para un proceso de neutralización "fluido-sólido" en una batería de reactores continuos con agitación". *Tecnología Química*. Volumen1, enero 2014.
9. MULAR, A.L.; BHAPPU, R.B. *Diseño de planta de proceso de minerales*. Editorial Rocas y Minerales. Segunda Edición. 1986
10. ROBERTS ALLEY, E. *Manual de control de la calidad del aire*. McGraw-Hill. México, 2001.
11. BOUSO, J. L. *Equipos y Procesos*. Américas Mining, 1998.
12. KING P. *Principles of Flotation, Institute of Mining and Metallurgy*. South African. 1982, p. 215-224.
13. LYNCH, A.; RAO T.; BRADLEY, C. "The influence of design and operating variables on the capacities of hidrociclón classifiers", *Int. J. Min. Proc.* 2, 1986.
14. NÁPOLES, E. "Informe exploración orientativa de Cienos Carbonatados al Sur de Cayo Moa Grande". Biblioteca Moa-Níckel. 1992.
16. NEDVED, M. "Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al sur de Cayo Moa Grande". Biblioteca Moa-Níckel. 1966.
17. PIERSON, H.G.W. "The selection of solid – liquid separation equipment". *Solid-liquid separation* Ed. L. Svarovsky. Butterworth – Heinemann, Oxford, 2000, p. 512–525.
18. ROSABAL, V. J. *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. Editorial Pueblo y Educación, 1988.
19. VIERA, L.C.; PONS, A. *Introducción a la ingeniería Química*. Editorial pueblo y educación. La Habana, 1985, tomos I y II.