

Determinación de parámetros operacionales de transporte de cieno carbonatado con comportamiento seudoplástico

Yasmani Romero Gé romerogeyasmani446@gmail.com

Alejandro Hechavarría Güeje alejandroh12500@gmail.com

Rodney Martínez Rojas rmartinez@ismm.edu.cu

Yalina Alvarez Matos alvarezmatosyalina@gmail.com

Zuliem Galano de la Cruz zuli.galano@gmail.com

Universidad de Moa (Cuba)

Resumen: Se propuso una metodología para obtención de los parámetros operacionales y racionales de bombeo de un sistema real cuando el fluido tiene un comportamiento seudoplástico. Para ello se implementaron los estudios realizados por Martínez & Hernández (2015), los cuales plantean que para las pulpas de cieno carbonatado que presentan un contenido de sólido entre un 17–23 % pueden ajustarse al modelo de Ostwald de Waele, según su comportamiento reológico. Se estableció una propuesta metodológica de cálculo y las mediciones realizadas en el sistema real en la obtención de los parámetros operacionales y racionales de transporte de fluidos seudoplástico. Se determina que el sistema trabaja para las condiciones óptimas de diseño con un caudal en el punto de operación de 490 m³/h a una altura de operación de 6,4 m trabajando en un rendimiento de diseño con un 76 % de eficiencia.

Palabras claves: fluido no newtoniano; potencia hidráulica; reología; resistencia hidráulica; transportación del fluido

Determination of operational parameters for the transport of carbonated silt with pseudoplastic behavior

Abstract: A methodology was proposed to obtain the operational and rational pumping parameters of a real system when the fluid has pseudoplastic behavior. For this, the studies carried out by Martínez & Hernández (2015) were implemented, which propose that for carbonated sludge pulps that have a solid content between 17–23%, they can be adjusted to the Ostwald de Waele model, according to their rheological behavior. In obtaining the operational and rational parameters for the transport of pseudoplastic fluids, a methodological proposal for calculation and the measurements carried out in the real system to which it will be applied were established. It is determined that the system works for the optimal design conditions with a flow rate at the operating point of 490 m³/h at an operating height of 6.4 m working at a design performance with 76% efficiency.

Keywords: non-Newtonian fluid; hydraulic power; rheology; hydraulic resistance; fluid transportation

Introducción

El proceso tecnológico de la Empresa Moa-Nickel S. A. en Moa, se basa en la extracción del Níquel (Ni) y Cobalto (Co) contenido en el mineral laterítico mediante lixiviación ácida en autoclaves a alta presión. Para neutralizar la acidez del licor enriquecido con estos metales se emplea una suspensión acuosa de cieno carbonatado, con vistas a lograr el pH óptimo para su posterior precipitación en forma de sulfuros (Pérez, 2015). Esta pulpa es un compuesto extraído de una de las minas más grandes del mundo al oeste de Cayo Grande de Moa, donde es sometida a un proceso en la Planta de Beneficio de Cienos Carbonatados.

En los procesos tecnológicos de la industria química y metalúrgica el conocimiento del comportamiento reológico de las suspensiones de materiales es de gran utilidad para el cálculo de los equipos y conductos que las transportan. Este comportamiento está estrechamente relacionado con la viscosidad y la estructura que forman las partículas (Martínez & Hernández, 2015).

Autores como Garcell, Díaz & Surís (2011), Martínez, Izquierdo & Pompa (2014), Sablón, Rodríguez & Izquierdo (2017), Pérez, Garcell & Hernández, (2020) y Muñoz, Velázquez & Rodríguez (2022), han abordado la falta de exactitud en los métodos de cálculo de los sistemas de transporte de pulpas al tratar como fluidos newtonianos aquellos materiales que no cumplen con la ley de la viscosidad de Newton (fluidos no newtonianos), de aquí la importancia de la revisión de los estudios reológicos realizados a las pulpas de cieno carbonatado transportado por sistemas de tuberías.

El comportamiento pseudoplástico de las pulpas de cieno carbonatado influye en los parámetros operacionales del sistema real de bombeo donde se aplique, ya que al presentar tal comportamiento es un fluido que disminuye su viscosidad al aumentar la velocidad de deformación aplicada. Esto hace que las distintas capas del fluido se muevan con diferente rapidez en respuesta a un esfuerzo cortante. Es necesario el establecimiento de una metodología de cálculo utilizando los correctos modelos matemáticos para la determinación de los parámetros operacionales y racionales.

Materiales y métodos

Caracterización de la pulpa (cieno carbonatados)

Las pulpas de cieno carbonatados según las muestras analizadas por Martínez & Hernández (2015) contienen de 17 a 50 % de sólidos. A través de análisis de laboratorio se obtuvieron las características químicas de la pulpa (Tabla 1).

Tabla 1. Características de las pulpas de cieno carbonatado durante la preparación y transporte

Indicadores	Unidad de medida	Proceso	Muestra
Densidad en Pulpa	Kg/m ³	1320-1400	1310-1412
Densidad del sólido	Kg/m ³	2410-2580	2476
Contenido de sólido	%	35-48	30-50
Temperatura	°C	28,7	27,3
Contenido de carbonato de calcio	%	≥87	85,5
pH	adimensional	8-9	8,4

Se obtuvieron las curvas de flujo para pulpas de cieno carbonatado entre 17-50 % de sólido.

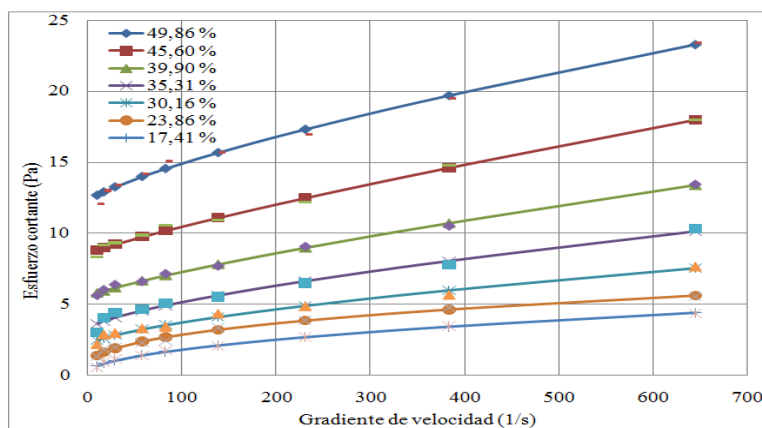


Figura 1. Curvas de flujo de las pulpas de cieno carbonatado.

Martínez & Hernández (2015) infiere que el comportamiento reológico para pulpas de cieno carbonatado inferiores a un 25 % puede ser ajustado al modelo seudoplástico, mientras que para pulpas superiores a 30 % pueden ajustarse al modelo de Herschel-Bulkley y de las cuales se obtienen los parámetros esfuerzo cortante inicial (τ_0), índice de consistencia (k) e índice de flujo (n). Los resultados presentan un comportamiento típico de las suspensiones no newtonianas, lo que le permitió establecer expresiones de ajuste por regresión del comportamiento reológico de las suspensiones en las pulpas de cieno carbonatado, así como de los parámetros reológicos correspondientes, según se muestra en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Correlaciones de esfuerzo cortante en función del gradiente de velocidad

Concentración de sólidos (%)	Modelo ajustado	R ²
17	$\tau = 0,2298(\gamma)^{0,459}$	0,9979
23	$\tau = 0,6023(\gamma)^{0,344}$	0,9942
30	$\tau = 2,4074 + 0,05478(\gamma)^{0,715}$	0,9922
35	$\tau = 3,2583 + 0,07435(\gamma)^{0,667}$	0,9906
40	$\tau = 4,7763 + 0,33196(\gamma)^{0,495}$	0,9984
45	$\tau = 8,5194 + 0,38345(\gamma)^{0,471}$	0,9964
50	$\tau = 10,579 + 0,55547(\gamma)^{0,457}$	0,9956

Tabla 3. Valores de los parámetros reológicos de las pulpas de cieno carbonatado

Concentración de sólidos (%)	Esfuerzo de corte	Índice de consistencia	Índice de flujo
	τ_0	k	n
17	-	0,2298	0,459
23	-	0,6023	0,344
30	2,4074	0,05478	0,715
35	3,2583	0,07435	0,667
40	4,7763	0,33196	0,495
45	8,5194	0,38345	0,471
50	10,579	0,55547	0,457

Metodología para el cálculo de los parámetros operacionales y racionales

A través de los estudios realizados por Martínez & Hernández (2015) las pulpas de cieno carbonatados presentan un comportamiento pseudoplástico con un contenido de sólido entre un 17–23 %, ajustándose el modelo de Ostwald de Waele $\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)^n$, (para $n < 1$).

Por ello se realizará una propuesta metodológica, basándose en estos estudios a través de la reología del fluido, a partir de un caudal de operación que satisface los parámetros de bombeo a evaluar.

La metodología de cálculo brinda las expresiones necesarias para la obtención de la curva que caracteriza el comportamiento del fluido a lo largo de la red hidráulica. Teniendo en cuenta el caudal en función de la altura de carga de la red, permite establecer los parámetros operacionales del sistema.

Se plantea las ecuaciones matemáticas, para determinar los valores correspondientes tanto para la succión, como para la descarga del sistema hidráulico. A través de los valores obtenidos se puede determinar los parámetros operacionales de la red:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

Dónde:

v : velocidad del fluido en succión y en descarga (m/s);

Q : Capacidad o caudal (m³/s);

D : Diámetro interior en succión y en descarga (m).

Cálculo del número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) válido para fluidos pseudoplásticos que permite establecer el régimen de trabajo según la naturaleza reológica del fluido se determina por la ecuación propuesta por Shashi (2004).

$$Re_m = 8 \cdot \left(\frac{n}{6 \cdot n + 2} \right)^n \cdot \rho \cdot D^n \cdot \left(\frac{V^{2-n}}{K} \right)$$

Dónde:

Re_m : Número de Reynolds modificado;

n : índice de flujo;

ρ : densidad del fluido (kg/m³);

K : índice de consistencia (Pa·s);

Cálculo del coeficiente de resistencia hidráulica

Para el factor de fricción en el caso de los fluidos no newtonianos, no existe suficientes evidencias del efecto de la rugosidad de la pared del tubo sobre el coeficiente Fanning en flujo turbulento, dado que la subcapa laminar es más gruesa en los fluidos no newtonianos que en los newtonianos. Es por ello que la mayoría de autores desprecian el efecto de la rugosidad en el flujo no newtoniano, y consideran como si el flujo tuviera lugar a través de tubos lisos (Garcell, 2001).

Dodge y Metzner (1959) han propuesto una relación de f vs Re para fluidos pseudoplástico y dilatantes de tipo de la ecuación de Blasius, cuyos coeficientes y exponentes están función del índice de flujo n como se muestra en la ecuación:

$$f = \frac{A}{Re_m^B}$$

Dónde:

A : coeficiente que se selecciona en función al índice de flujo 3;

B : coeficiente que se selecciona en función al índice de flujo (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficientes que dependen del índice de flujo del material

n	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
A	0,0647	0,071	0,074	0,076	0,079	0,081	0,083
B	0,35	0,306	0,28	0,264	0,25	0,24	0,23

Factor de fricción

El factor de fricción se determina por la ecuación $\lambda = 4 \cdot f$

Longitud equivalente de accesorios en la tubería

Se determina la longitud equivalente de cada accesorio en la red de tubería estableciendo la sumatoria de cada longitud equivalente obtenida tanto para succión como para descargas través de la ecuación:

$$L_{eq} = \left(\frac{L}{D}\right) \cdot D$$

Dónde:

$\left(\frac{L}{D}\right)$: longitud equivalente del accesorio de tubería dado por el fabricante.

Con la longitud equivalente determinada para cada accesorio de la red hidráulica se calcula la longitud equivalente de la red completa tanto para la succión como para la descarga del sistema (Tabla 5).

$$L_{eqT} = L_{tub} + L_{eq}$$

Dónde:

L_{eqT} : longitud equivalente total de la red (m);

L_{tub} : longitud de tuberías (m);

L_{eq} : longitud equivalente (m).

Tabla 5. Longitud equivalente de los accesorios de tuberías

Tipo	$(L/D)_{eq}$
Válvula de globo abierta por completo	340
Válvula de ángulo abierta por completo	150
Válvula de compuerta abierta por completo	8
$\frac{3}{4}$ abierta	35
$\frac{1}{2}$ abierta	160
$\frac{1}{4}$ abierta	900
Válvula de verificación tipo giratoria	100
Válvula de verificación tipo bola	150
Válvula de mariposa abierta por completo (2 a 8 pulg)	45
10 a 14 pulg	35

Tipo	(L/D) _{eq}
16 a 24 pulg	25
Válvula de pie tipo disco de vástago	420
Válvula de pie tipo disco de bisagra	75
Codo estándar de 90	30
Codo de 90 de radio largo	20
Codo roscado a 90	50
Codo estándar a 45	16
Codo roscado a 45	26
Vuelta cerrada en retorno	50
Te estándar con flujo directo	20
Te estándar con flujo en el ramal	60

Resistencia mecánica de la red hidráulica

Las resistencias mecánicas que ofrece la tubería por la cual es transportado el fluido se puede calcular mediante la ecuación:

$$R = \left(\lambda \cdot \frac{L_{eqT}}{D} \right) \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4}$$

Dónde:

R : coeficiente de resistencia mecánica de la red (s^2/m^5);

g : coeficiente de aceleración de la gravedad (m/s^2);

λ : factor de fricción.

Para obtener la resistencia de la red completa es necesario calcular la succión y la descarga del sistema.

Cálculo de la altura estática

Para el cálculo de la altura estática se plantea la condición del nivel máximo del líquido.

$$\Delta z = H_{des} - H_{succ}$$

Dónde:

H_{des} : altura de descarga del fluido (m);

H_{succ} : altura de succión del fluido (m).

Característica de la red

La característica de la red del sistema de tuberías en la instalación de hidrotransporte se recomienda calcular por la ecuación de Nekrasov (1986).

$$H_{red} = \Delta Z + R \cdot Q^2$$

Dónde:

ΔZ : altura estática del sistema (m).

Condición de cavitación de la bomba

Durante la entrada del flujo en el rodete de una bomba se produce una aceleración que, cuando la presión es suficientemente baja, genera la formación de burbujas de vapor. Esto tiene dos efectos sobre el funcionamiento de la bomba. En primer lugar, la cavitación erosiona el rodete y, con el tiempo, lleva a su destrucción. En segundo lugar, cuando la cavitación es fuerte disminuye la altura de elevación

Para evitar la cavitación es necesario mantener una presión por encima de la presión de vapor, en la entrada de la bomba. El valor necesario es calculado por el fabricante como NPSHr (Net Positive Suction Head requerido), este valor es dado por el fabricante, se refleja en la curva de cavitación en el catálogo. Desde el punto de vista de la utilización, hay que asegurarse de que el NPSHd (disponible) en el sistema sea superior al NPSHr, como lo expresa la siguiente condición de ausencia de cavitación en la ecuación: $NPSH_d > NPSH_r + 0,5$.

$NPSH_d$ se puede determinar por la ecuación:

$$NPSH_d = \frac{P_{atm}}{\gamma} \pm h_s - h_L - \frac{P_v}{\gamma}$$

Dónde:

El signo de \pm en la altura de succión h_s (m), indica que (+) cuando es de succión positiva y (-) cuando es de succión negativa;

P_{atm} : presión estática (Pa);

γ : peso específico del agua a temperatura de bombeo;

h_s : elevación desde el nivel del fluido en el depósito a la línea de entrada de succión de la bomba en (m) (altura de succión);

h_L : pérdida de energía por unidad de peso de fluido en la succión de la bomba (m).

La pérdida de energía por unidad de peso se determina:

$$h_l = \lambda_s \left(\frac{L_{eqT}}{D_s} \right) \cdot \frac{u_s^2}{2 \cdot g}$$

Potencia hidráulica del sistema

La potencia hidráulica es la relación entre el trabajo realizado (fuerza por distancia) dividido por el tiempo que se tarda en realizar el trabajo. Se calcula por:

$$N_h = Q_{op} \cdot H_{op} \cdot \gamma$$

Dónde:

N_h : potencia hidráulica (W);

Q_{op} : Capacidad en el punto de operación del sistema (m³/s);

H_{op} : altura de operación del sistema (m).

Metodología de determinación del costo de explotación de la instalación para la transportación del fluido a través del sistema hidráulico

El análisis de los costos de operación del sistema de transporte bajo los factores mencionados, conduce a la determinación de los parámetros racionales de operación, ya sea, la velocidad racional, el diámetro económico de la tubería o el porcentaje de sólido racional de transporte, para el caso del trasiego de hidromezclas bifásicas como es el caso del cieno carbonatado (Pérez, 2015).

El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido se expresa por la ecuación:

$$C_b = \frac{t_{elec} \cdot t_t}{\eta_b \cdot \eta_m} \cdot N_h \cdot 10^{-3}$$

Dónde:

C_b : costo de bombeo de la instalación (CUP/h);

t_{elec} : tarifa eléctrica (CUP/kW·h);

t_t : tiempo de trabajo del equipo (h/año);

η_b : rendimiento de la bomba (adimensional);

η_m : rendimiento del motor (adimensional).

Costo total de la transportación

El costo total en la transportación del fluido se puede determinar a través de la expresión:

$$C_{Tb} = \frac{C_b}{Q \cdot L_{eqT}}$$

Dónde:

C_{Tb} : costo total de bombeo (CUP/m³);

Evaluación del sistema de bombeo de la Torre de Coral-Espesador 264-TK-01 ubicado en la Planta de Beneficio de Cienos Carbonatados

La moto-bomba centrífuga 264-PU-7 (Denver SRL-C), se encarga de la impulsión para el transporte del fluido, en el trasiego de la pulpa de cienos (Tabla 6).

Tabla 6. Características de la moto-bomba centrífuga 264-PU-7 (Denver SRL-C)

Características del motor		Características de la bomba	
Diferencia de potencial (volt.)	460	Impelente cerrado de goma	-
Intensidad de corriente (A)	63	Carcasa revestida de goma en el interior	-
Potencia (hp)	50		
Frecuencia (Hz)	60	Capacidad (m ³ /h)	454,25
Velocidad de rotación (rpm)	1184	NPSHr (m.c.a)	5

Para ello se parte de los datos preliminares para el cálculo tomados de la instalación de bombeo el cual se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Condiciones de diseño del sistema de bombeo

Parámetros para el cálculo	
Altura de succión de la bomba (Hsucc)	1,6 m
Altura de descarga de la bomba (Hdes)	3,6 m
Longitud de succión (Lsucc)	0,8 m
Longitud de descarga (Ldes)	444,7 m
Diámetro de succión (Dsucc)	0,35 m
Diámetro de descarga (Ddes)	0,3 m

Accesorios en la succión y descarga del sistema de bombeo

El sistema succiona directamente del embudo colector de la torre, por lo que únicamente cuenta con la longitud en la succión en el sistema de bombeo. Los accesorios en la descarga del sistema se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Accesorios en la descarga del sistema de bombeo

Accesorios de la tubería	Cant.	Diámetro del accesorio (mm)	Diámetro del accesorio (pulg)	(L/D)
Codos de 90°	7	300	12	20
Válvulas de compuerta	2	300	12	8
Válvula de mariposa	1	300	12	45
Flujómetro	1	300	12	45
T	1	300	12	20

Según Martínez & Hernández (2015), se utilizan los parámetros de flujo y consistencia para un 17 % de contenido de sólidos en la pulpa. Según las muestras analizadas se utiliza una densidad de la pulpa de 1310 kg/m³.

Curva característica de la bomba centrífuga 264-PU-7 (Denver SRL-C)

Según el catálogo aportado por el fabricante se muestra en la figura 2, las curvas de la bomba según el diseño.

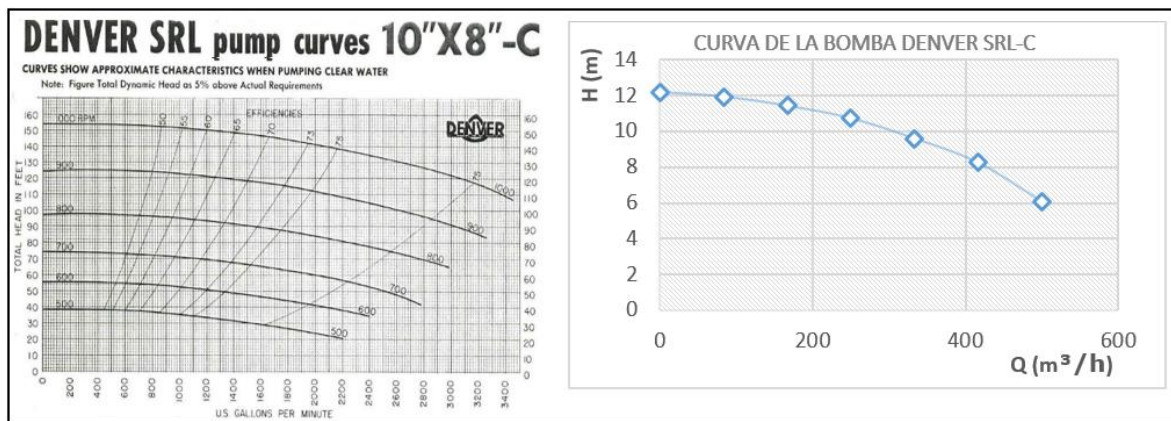


Figura 2. Curvas características de la bomba Denver SRL-C.

Resultados y discusión

Al emplear la metodología expuesta en el sistema de bombeo de cienos carbonatados, que incluye la bomba centrífuga 264-PU-7 que trasiega la pulpa desde la torre de coral hasta el Espesador 264-TK-1. En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos de la evaluación del sistema para el caudal de diseño.

Tabla 9. Resultados de la evaluación del sistema de bombeo para las condiciones de diseño dadas

Succión en el sistema (DN 300)		Descarga en el sistema (DN 300)	
Velocidad (m/s)	1,785	Velocidad (m/s)	1,785
Reynolds	219118,96	Reynolds	219118,96
Factor de fricción	0,015	Factor de fricción	0,015
Resistencia mecánica (s ² /m ⁵)	0,397	Resistencia mecánica (s²/m⁵)	254,49
Caudal de diseño (m ³ /s)	0,126		
Resistencia mecánica total	254,89		

Los números de Reynolds mostrados para el transporte de la pulpa de cieno carbonatado en la tabla 9 demuestran un comportamiento turbulento del fluido,

superando los límites establecidos en la zona de transición en los regímenes evaluados de alrededor de 4 000.

Por último, el factor de fricción es pequeño, lo que demuestra la poca viscosidad del fluido analizado en este caso la pulpa de cieno carbonatado.

La figura 3 se muestra la curva característica de la red obtenida a través de la tabla 10.

Tabla 10. Tabla de valores de cálculo de la curva característica de la red

Q(m ³ /h)	Q(m ³ /s)	V _s (m/s)	V _d (m/s)	Re _s	Re _d	λ _s	λ _d	R _s	R _d	R _t	Hn(m)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,0
250	0,07	0,98	0,98	8732,81	8732,81	0,019	0,019	0,52	334,89	335,41	3,6
454	0,13	1,79	1,79	21918,96	21918,96	0,015	0,015	0,40	254,49	254,89	6,1
550	0,15	2,16	2,16	362234,57	29432,51	0,006	0,013	0,17	233,07	233,24	7,4
650	0,18	2,55	2,55	1110458,72	38073,95	0,005	0,012	0,12	215,84	215,96	9,0

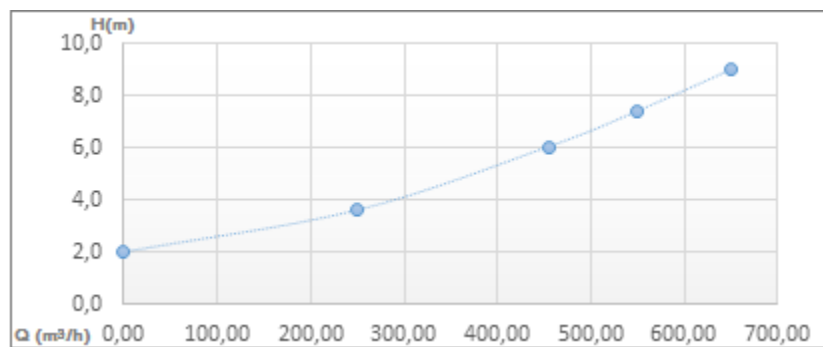


Figura 3. Curva característica de la red hidráulica.

A través de los cálculos realizados se obtiene, que para los caudales evaluados la curva característica de la red tiene un comportamiento acorde a las condiciones de diseño del sistema de bombeo para un caudal de 454,25 m³/s y una altura de 6,1 m. Además, se obtuvo el punto de operación en el cual trabaja el sistema, esto se obtiene haciéndose coincidir la curva característica de la red con la curva de la bomba como se muestra en la figura 4, obteniéndose los parámetros de operación del sistema.

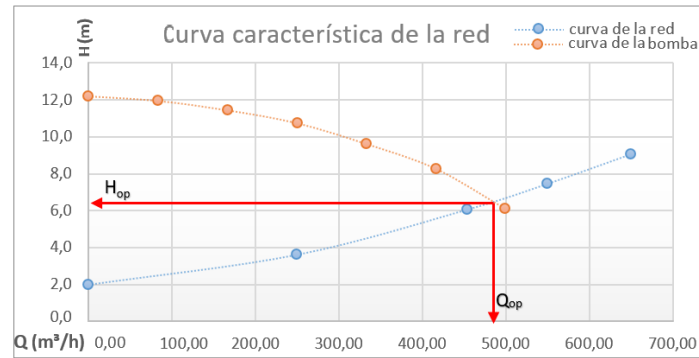


Figura 4. Punto de operación del sistema de bombeo.

Se determinó que el sistema trabaja en el punto de operación con un caudal de 490 m³/s, una altura de operación de 6,4 m, un rendimiento de operación de 76 %.

La potencia hidráulica obtenida es de 109,82 kW, para las condiciones dadas del sistema.

Condición de cavitación

Con el cálculo de las alturas netas positiva de succión, disponible y la requerida aplicada a través de la metodología de los cálculos hidráulicos planteada para este tipo de fluido y su instalación, se obtiene los valores de los parámetros cuantitativos de su comportamiento comprobando que no se cumple con la condición de ausencia de cavitación ya que $(NPSH)_r = 5 \text{ m}$ (Martínez & Hernández, 2015). Por lo que se determina que por datos del fabricante el $NPSH_r = 5 \text{ m}$ y $NPSH_d = 9,47 \text{ m}$ por lo que la bomba no cavita, para los parámetros operacionales calculados.

Costo de bombeo de la instalación

El gasto de energía eléctrica constituye la mayor parte de los gastos capitales en el proceso de hidrotransporte. Con la correcta selección y organización en la explotación del equipamiento de bombeo en régimen económico, permite el ahorro de la energía eléctrica y aumentar la efectividad del transporte hidráulico, teniendo siempre presente los problemas que esta puede causarle al medio circundante. En la determinación del costo de bombeo de la instalación la planta consta con una tarifa eléctrica de 2,574 CUP/kW·h y, además, dependiendo del tiempo de trabajo del equipo en este caso la bomba 264-PU-7 (Denver SRL-C) con 8640 h/año.

El valor de costo de bombeo de la instalación para las condiciones de diseño dadas es de 3 455 470,4 CUP/año.

Los resultados obtenidos permiten ver el comportamiento del costo por transportar un metro cúbico de cieno carbonatado, para el funcionamiento de las bombas en las distintas condiciones, lo que permitirá tener un control de dichos costos a partir de la demanda existente en la planta.

Conclusiones

Se propuso una metodología para fluidos pseudoplásticos basándose en los estudios reológicos realizados por Martínez & Hernández (2015), con la caracterización reológica y de densidad de la pulpa de cienos carbonatados. Se determinó su comportamiento pseudoplástico para una concentración de sólido de un 17-23 %, lo que permite la utilización de los parámetros adecuados en la metodología propuesta.

Se evaluó el punto de operación de la bomba 264-PU-7 (Denver SRL-C), mostrando un valor de $Q_{op} = 490 \text{ m}^3/\text{h}$ y una altura manométrica de $H_{op} = 6,4 \text{ m}$ y que el rendimiento se encuentra en un 76 % concluyendo de que la bomba trabaja a un nivel de óptima eficiencia, lo que demuestra que la bomba trabaja en los rangos de diseño propuestos por el fabricante.

Referencias bibliográficas

- DODGE, D.W. Y METZNER, A.B. (1959). Turbulent flow of non-newtonian systems. *The global Home of Chemical Engineers AIChE Journal*, 5(2), 189-204. <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.690050214>.
- GARCELL, L. (2001). Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. *Apuntes para una monografía*, 2, 1-40.
- GARCELL, L.; DÍAZ, A. & SURÍS, G. (2011). *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. 2ed. Félix Varela, 345 p.
- MARTÍNEZ, R. & HERNÁNDEZ, G. (2015). Caracterización reológica de las pulpas de cieno carbonatado. *Minería y Geología*, 31(4), 70-83. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/126>.

- MARTÍNEZ, R., IZQUIERDO, R. & POMPA, M. (2014). Pérdida de carga durante el transporte en régimen laminar de pulpas de cieno carbonatado. *Minería y Geología*, 30(1), 80-94. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1015>.
- MUÑOZ, F.R., VELÁZQUEZ, O. R. & RODRÍGUEZ, M. (2022). Cavitación en bombas centrífugas en el trasiego de licor producto en la planta de neutralización. *Ciencia & Futuro*, 12 (3), 292-311. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/view/2186>.
- NEKRASOV, B. (1986). *Hidráulica*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 432 p.
- PÉREZ, R. (2015). *Modelación de las pérdidas y descargas del transporte de cieno carbonatado por tubería*. (Trabajo de diploma). Universidad de Moa, Cuba.
- PÉREZ, L., GARCELL, L. R. Y HERNÁNDEZ, G.L. (2020). Modelo de viscosidad relativa que describe el comportamiento reológico de suspensiones lateríticas. *Tecnología Química*, 40(2), 356-375. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5153>.
- SABLÓN, L.E., RODRÍGUEZ, M. & IZQUIERDO, R. (2017). Cálculo del gradiente de presión en el hidrot transporte de agua cruda en régimen turbulento a través de una tubería horizontal. *Ciencia & Futuro*, 7(3), 11-24. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/view/1426>.
- SHASHI, M. (2004). *Piping calculation manual*. McGraw-Hill.