

Selección de bombas centrífugas para el transporte de pulpa de yeso en la plantas de neutralización

Felix Reinier Muñoz Dranguet

fmunoz@mecanica.ismm.edu.cu

Michel Rodríguez Ismar

mrismar@ismm.edu.cu

Alejandro Fernández Peña

afernandezp@ismm.edu.cu

Universidad de Moa (Cuba).

Resumen: Se analizó el tema de la selección de bombas centrífugas utilizadas en el bombeo de la pulpa de yeso obtenida a través de la lixiviación acida a alta presión. Se evaluó el comportamiento reológico del fluido a través de las concentraciones en peso y en volumen de la mezcla y la densidad del sólido y la pulpa, se estableció la metodología de cálculo con vista al análisis de selección de la bomba 174-PU-3D. Los resultados revelaron el comportamiento newtoniano del fluido con un porcentaje de sólido en volumen de 10,5 %. Entre otros resultados se comprobó que el grupo moto-bomba analizado trabaja cercano al rango de diseño propuesto por el fabricante, con un caudal de trabajo de 430 m³/h y una altura manométrica de 25,5 m de columna líquida, lo que demuestra que está correctamente seleccionada.

Palabras clave: caracterización reológica; tubería Pexgol; hidrotransporte; bombas centrífugas; pulpa de yeso; fluido newtoniano.

Selection of centrifugal pumps for the transport of plaster slurry in neutralization plants

Abstract: The issue of the selection of centrifugal pumps used in pumping the gypsum pulp obtained through high pressure acid leaching was analyzed. The rheological behavior of the fluid was evaluated through the concentrations by weight and volume of the mixture and the density of the solid and the pulp, the calculation methodology was established with a view to the selection analysis of the 174-PU-3D pump. The results revealed the Newtonian behavior of the fluid with a solid percentage by volume of 10.5%. Among other results, it was verified that the motor-pump unit analyzed works close to the design range proposed by the manufacturer, with a working flow rate of 430 m³/h and a manometric height of 25.5 m of liquid column, which shows that it is correctly selected.

Keywords: rheological characterization; Pexgol pipe; hydrotransportation; centrifugal pumps; plaster pulp; newtonian fluid.

Introducción

En la actualidad, la industria minero metalúrgica utiliza diversas formas de transportación de mineral, teniendo gran auge el transporte hidráulico, debido a la capacidad que tienen las bombas para el trasiego de fluidos hacia donde se desee transportar. A su vez, el crecimiento y perfeccionamiento de los procesos productivos están ligados con las mejoras de los equipos de bombeo y con un mejor conocimiento de su funcionamiento y explotación (Pérez, Garcell & Hernández, 2020; Ramírez, Muñoz & Castro, 2022). El transporte de fluidos ha demostrado ventajas ante otros tipos de transportes, pero también presentan desventajas como son, su rápido deterioro y elevado consumo energético, fundamentalmente provocados por la cavitación y las vibraciones presentes en las bombas, lo que justifica una caracterización de estos fenómenos para minimizar los daños que ocasionan (Suarez, Ortega & Abril; 2021; Cisterna, 2022; Rojas, Pabón & Orjuela, 2022; Vatandoust, Yarmohammadi & Aliyari, 2023).

En Cuba las empresas productoras de níquel, trabajan con diferentes fluidos presentes en varias partes del proceso productivo, las cuales requieren un adecuado transporte para cumplir con las exigencias operacionales. En las plantas de neutralización existen instalaciones industriales de hidrot transporte de pulpa de yeso empleando bombas centrífugas de velocidad variable. Su función es la de extraer el yeso del fondo de los sedimentadores para enviarlo a los reactores, y posteriormente a la planta de lavaderos y a su vez hacia la Planta de Lixiviación (Hernández *et al.*, 2021)

Estas instalaciones de bombeo del yeso trabajan actualmente en un régimen operacional de alto consumo de energía eléctrica debido a diferentes factores que son característicos del fluido a transportar que no se han tenido en cuenta a la hora de seleccionar estas bombas centrífugas, como son la densidad y la variedad de las propiedades físico-mecánicas de estas mezclas que les confiere propiedades específicas al fluido.

Poseer conocimientos necesarios sobre cómo está compuesto esta pulpa de yeso, así como de sus propiedades de explotación cuando se utiliza a escala industrial es un tema de mucho interés en este estudio investigativo. La selección correcta de modelos matemáticos apropiados para la evaluación técnica del yeso depende en específico de la granulometría, la densidad y las características reológicas, entre otras (Martínez, Izquierdo & Pompa, 2014; Rodríguez *et al.*, 2021).

Materiales y métodos

Caracterización del material a transportar (pulpa de yeso)

Como fluido a transportar se utiliza la pulpa de yeso, donde se extrajo una muestra representativa de la línea de descarga de la bomba en estudio. Este fluido proviene directamente del fondo de los clarificadores con una concentración de sólido en peso de alrededor de 19 a 22 %.

Con vista a la selección de las bombas, se muestran a continuación los parámetros operacionales del fluido en la tabla 1.

Tabla. 1 Características de la pulpa de yeso.

Densidad de la pulpa	1,32:1,34 g/cm ³
Densidad del sólido	2,39 g/cm ³
% de sólido	40:45 % Se han registrado valores inferiores al 30 %
% de arena	10 % (máximo)
Corrosión	0,5 g/l Ácido sulfúrico y 0,04 g/l de cloro
Viscosidad dinámica	0,085 Pa*s

Determinación de la concentración de sólido en peso y en volumen de la pulpa de yeso

Para la determinación del porcentaje de sólido en peso de la pulpa de yeso se analizó en un analizador de humedad RAD WAG donde la muestra tiene un peso de hasta 50 g.

Para la determinación del porcentaje de sólido en volumen se utilizó la ecuación 1.

$$C_v = C_w \cdot \frac{\rho_m}{\rho_s} \quad (1)$$

Dónde:

ρ_m : densidad de la pulpa de yeso, (kg/m³);

ρ_s : densidad del sólido, (kg/m³);

C_w : concentración de sólido en peso, (%).

Metodología empleada para el cálculo hidráulico en la instalación de bombeo de la pulpa de yeso

Considerando la pulpa de yeso como un fluido newtoniano y utilizando los parámetros para las condiciones actuales de la bomba instalada se calculan las pérdidas para un

caudal controlado de 284 m³/h (1250 GPM) que fue registrado en el flujómetro instalado en el Tren 1, perteneciente a una planta de Neutralización. Los cálculos teóricos se realizarán con el funcionamiento de una bomba.

La velocidad media representa el gasto que tiene el líquido que pasa a través de la sección de flujo de una corriente líquida y se determina por la expresión 2 que se muestra a continuación:

$$v_m = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Dónde:

v_m : velocidad media, (m/s);

Q : caudal transportado por las bombas, (m³/s);

A : área de la sección transversal de la tubería, m².

La determinación del área de la sección circular de la tubería por donde circula el fluido, se puede realizar según la expresión 3:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3)$$

Dónde:

D: diámetro interior de la tubería, (m).

Cálculo del número de Reynolds

El número de Reynolds (Re), que permite establecer el régimen de trabajo según la naturaleza reológica del fluido se determina por la ecuación 4:

$$R_e = \frac{v \cdot D \cdot \rho_m}{\mu_p} \quad (4)$$

Dónde:

μ_p : viscosidad plástica del fluido, (Pa·s);

v: velocidad de transportación del fluido, (m/s);

Cálculo del factor de fricción

Para el cálculo del factor de fricción se determina auxiliándose por el diagrama de Moody (Reza 2000), para tuberías rugosas según el número de Reynolds.

Cálculo de las pérdidas por rozamiento en las tuberías

Cálculo de las pérdidas por rozamiento en la tubería de impulsión h_1 (m), (Nekrasov 1986; Mott, 2006) por la ecuación 5:

$$h_1 = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (5)$$

Dónde:

f : factor de fricción;

L : longitud de la tubería de succión, (m);

g : aceleración de la gravedad (9,81m/s²).

Cálculo de las pérdidas locales en la tubería de impulsión h_2 (m), (Nekrasov 1986; Mott, 2006) por la ecuación 6:

$$h_2 = \xi_t \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (6)$$

Dónde:

ξ_t : Sumatoria de los coeficientes de pérdidas locales para accesorios y las tuberías comerciales nuevas, de acero, con flujo en la zona de total turbulencia (Reza, 2000).

La sumatoria de los coeficientes de pérdidas locales se calcula por la ecuación 7, teniendo en cuenta los accesorios existentes en el sistema de tuberías:

$$\xi_t = 1\xi_{val} + 3\xi_{codo} + 3\xi_{tefde} + \xi_{cs} \quad (7)$$

En la tabla 2 se muestran los valores de los coeficientes de pérdida locales para los accesorios instalados en el sistema de tuberías.

Tabla 2. Coeficientes de pérdidas locales para la línea de impulsión de DN 200.

Accesorios en la línea de Impulsión de DN 200	Cantidad	Coefficiente de resistencia ξ
Válvula de mariposa DN 100	1	0,63
Codo 90°	3	0,42
Te	3	0,84
Coeficiente a la entrada al tanque	1	1

Las pérdidas totales en el tramo de tubería y accesorios se calculan por la ecuación 8.

$$h = h_1 + h_2 \quad (8)$$

En la tabla 2 se muestran los valores de los coeficientes de pérdidas locales para los accesorios instalados en el sistema de tuberías.

El cálculo de las pérdidas primarias y secundarias por rozamiento en la tubería de impulsión del material Pexgol figura 2 en metros de columna líquida (mH₂O), se determina por el nomograma para la clase 24, considerando una longitud de tubería recta equivalente de 100 m (Pexgol, 2013). La longitud existente de tubería de Pexgol en la instalación hasta el Tren 1 es de 16 metros y un diámetro nominal de tubería de 200 mm (8 pul).



Figura 2. Tubería de la impulsión de la bomba de material Pexgol.

Las pérdidas totales en la tubería de impulsión de la bomba es la suma de las pérdidas en la tubería de titanio y las pérdidas en la tubería de Pexgol (ecuación 9).

$$h_{imp} = h_{itan} + h_{pexgol} \quad (9)$$

Dónde:

h_{itan} : Pérdidas en la tubería de titanio, (m);

h_{pexgol} : Pérdidas en la tubería de Pexgol, (m);

h_{imp} : Pérdidas en la tubería de impulsión, (m).

En la succión de la bomba

Cálculo de las pérdidas por rozamiento en la tubería de succión (m) para el material de la tubería de titanio (Nekrasov 1986; Mott, 2006) por la ecuación 10:

$$h_1 = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (10)$$

Dónde:

v : velocidad de transportación del fluido, (m/s).

El cálculo de las pérdidas locales en la tubería de succión en metros de columna líquida se realiza por la ecuación 11 (Nekrasov 1986; Mott, 2006):

$$h_2 = \xi_l \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (11)$$

La sumatoria de los coeficientes de pérdidas locales en la succión de la bomba se calcula teniendo en cuenta los accesorios existentes en el sistema de tuberías (Ecuación 12).

$$\xi_l = \xi_{\text{codo}90} + \xi_{\text{sal}} \quad (12)$$

En la tabla 3 se muestran los valores de los coeficientes de pérdidas locales para los accesorios instalados en el sistema de tuberías perteneciente a la línea de DN 200.

Tabla 3. Coeficientes de pérdidas locales para la línea de succión de DN 200

Accesorios en la línea de Succión de DN 200	Cantidad	Coeficiente de resistencia ξ
Codo 90°	1	0,42
Coeficiente a la salida del tanque	1	0,78

Las pérdidas totales en ese tramo de tubería se calculan por la ecuación 13.

$$h = h_1 + h_2 \quad (13)$$

Para la línea de DN 300 (12 pul) se utilizan las mismas ecuaciones con estas consideraciones.

En el caso de la sumatoria de los coeficientes de pérdidas locales para accesorios y tuberías comerciales nuevas, de acero, con flujo en la zona de total turbulencia se utiliza la ecuación 14:

$$\xi_t = \xi_{val} + 3\xi_{tefde} + \xi_{codo45} \quad (14)$$

En la tabla 4 se muestran los valores de los coeficientes de pérdidas locales para los accesorios instalados en el sistema de tuberías perteneciente a la línea de DN 300.

Tabla 4. Coeficientes de resistencia para la línea de succión de DN 300

Accesorios en la línea de Succión de DN 300	Cantidad	Coefficiente de resistencia ξ
Válvula de mariposa	1	0,455
Te flujo desviado 90°	3	0,78
Codo 45°	1	0,2

Se calculan las pérdidas totales en la tubería de succión de la bomba (Ecuación 15).

$$h_{suc} = h_{200} + h_{300} \quad (15)$$

El cálculo de las pérdidas totales dinámicas para la condición de trabajo planteada, se determinan por la ecuación 16:

$$h_{din} = h_{imp} + h_{suc} \quad (16)$$

Cálculo de la altura estática

Para el cálculo de la altura estática se plantea la condición del nivel máximo del líquido en el tanque (Ecuación 17).

$$\Delta Z = H_{imp} - H_{suc} \quad (17)$$

Para la condición del máximo nivel del líquido en el tanque se emplearon las siguientes alturas estáticas:

$$H_{imp} = 10m \quad H_{succ} = 3,15m$$

El cálculo de las pérdidas totales en el sistema se realizó por la expresión 18.

$$h_t = h_{din} + \Delta Z \quad (18)$$

Característica de la red

La característica de la red del sistema de tuberías en la instalación de hidrotransporte se recomienda calcular por la ecuación 19 (Nekrasov, 1986).

$$H_{red} = \Delta Z + R_c \cdot Q^2 \quad (19)$$

Dónde:

R_c : Coeficiente generalizado de resistencia de la red exterior de la instalación de transporte hidráulico, (s²/m⁵);

ΔZ : Altura estática, (m);

Q : Caudal transportado por la bomba, (m³/s).

$$R_c = \left(f \cdot \frac{L}{D} + \sum \zeta_t \right) \cdot \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D^4} \quad (20)$$

Dónde:

$\sum \zeta_t$: Coeficiente de resistencia total en la instalación.

Metodología de cálculo para el balance energético de la bomba centrífuga 174-PU-3D

El balance energético de una bomba se sustentará en el cálculo del rendimiento total de la bomba y en la potencia real que consume el motor, porque estos aspectos caracterizan energéticamente la instalación. La metodología a utilizar se establece a continuación según Nekrasov (1986).

Potencia consumida por la bomba

La potencia hidráulica (N_b) se determina por la expresión 21:

$$N_b = \rho_m \cdot Q \cdot g \cdot H \quad (21)$$

Dónde:

ρ_m : Densidad del fluido a transportar, (kg/m³);

H : Pérdida o carga a que está impuesta a vencer la bomba, (m);

Potencia útil que se le entrega al eje de la bomba

La potencia útil que se le entrega al eje de la bomba depende del rendimiento de la misma y se calcula por la expresión 22.

$$Ne_{je} = \frac{\rho \cdot Q \cdot g \cdot H}{1000 \cdot \eta} \tag{22}$$

Dónde:

η : Eficiencia de la bomba, (de $0 \leq 1$), la eficiencia de la bomba 174:PU:3D se encuentra en la propuesta de selección facilitada por el fabricante de aproximadamente 0,67 figura 5.

Ne_{je} : Potencia útil que se le entrega al eje de la bomba, (kW).

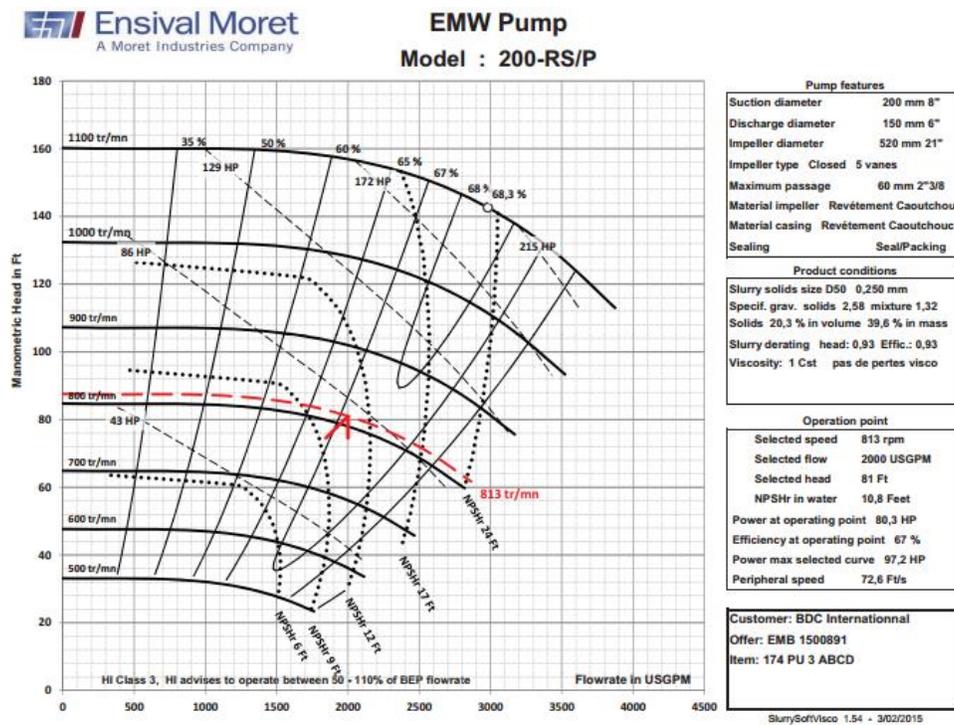


Figura 5. Curvas características de la bomba centrífuga 174-PU-3D.

Potencia real que consume el motor

La potencia que consume el motor (Nm) tiene que ser mayor que la potencia suministrada por el eje de la bomba, la cual es expresada por la ecuación 23:

$$Nm = (1,05...1,1) \cdot Ne_{je} \tag{23}$$

El valor del coeficiente (1,05...1,1) es la reserva de energía del motor según los estándares de fabricación del mismo.

Resultados y discusión

Resultados del comportamiento del pH y la temperatura de la pulpa de yeso

El monitoreo de la temperatura de la pulpa de yeso que se encuentra en el fondo de los Sedimentadores o Clarificadores y la medición del pH se realizó en el tanque clarificador 174:TK:6B (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados de las mediciones de temperatura y pH de la pulpa de yeso

Día	Temperatura del flujo del canal de rebosos °C	pH
8/04/21	65	2
9/04/21	64	2,1
10/04/21	64,5	2
11/04/21	65	2,2
12/04/21	64	2

Los resultados del monitoreo obtenido de temperatura y pH demuestran la elevada temperatura que se maneja el fluido, dando como consecuencia una disminución de la viscosidad dinámica del mismo, facilitando su hidrot transporte, elemento que influye directamente en la potencia consumida por la bomba. El resultado del pH en los rangos de 2 a 2,3 en todas las mediciones, demuestra el comportamiento ácido del fluido dando valores por debajo de 7 que corresponde a un pH neutro.

Resultados de la concentración de sólidos en peso

Para la determinación de la concentración de sólidos en peso, se realizó en un analizador de humedad RAD WAG, con una capacidad de la muestra de hasta 50 g de peso. Los resultados de la muestra tomada en la tubería de impulsión de la bomba resultaron ser de 19 % de sólido, utilizando la ecuación 1 se pudo comprobar que el porcentaje de sólido en volumen es de 10,5 %, lo que demuestra según Shashi (2004) que este fluido puede comportarse de forma newtoniana, refirmando lo planteado por este autor donde expresa que las pulpas que tienen hasta 10 % de concentración en volumen pueden considerarse de forma newtoniana.

Análisis del sistema de bombeo utilizando la bomba 174-PU-3D

Para realizar el análisis del sistema de bombeo existente en la instalación con el transporte de la pulpa de yeso, se debe tener en cuenta las características de la

instalación. Por lo que es necesario obtener el punto de trabajo de la bomba al máximo nivel del líquido en el tanque.

En este caso se analiza el sistema de bombeo de la pulpa de yeso que incluye la bomba 174-PU-3D hasta el tren 1.

En la tabla 6 se muestran los resultados de las velocidades que alcanza el fluido a la hora de su transportación para los diferentes diámetros de tuberías. Se utiliza un caudal de 284 m³/h para los cálculos teóricos de acuerdo a lo referido y explicado en el capítulo anterior.

Tabla 6. Resultados de los cálculos de las áreas y velocidades en los conductos de la instalación.

Líneas	Resultados de las v (m/s)	Resultados de las áreas (m²)
Tubería de DN 200	2,43	0,032
Tubería de DN 300	1,08	0,072
Tramo de tubería Pexgol	4,87	0,016

En la tabla 6 los resultados de las velocidades que alcanza la pulpa de yeso a lo hora de su transportación para los diferentes diámetros de tuberías son elevadas por lo que confirma el régimen de flujo turbulento que experimenta. Entre otros resultados se muestran las áreas resultantes evaluadas según la sección circular de las tuberías.

La tabla 7 muestra los valores de Reynolds obtenidos en la instalación para los diámetros de conductos utilizados.

Tabla 7. Resultado de los cálculos del número de Reynolds en los diferentes tramos de tuberías.

Líneas	Reynolds Re	Ecuación
Tubería de DN 200	7 680	4
Tubería de DN 300	5 137	4

Los números de Reynolds demuestran un comportamiento turbulento del fluido, superando los límites establecidos en la zona de transición en los regímenes evaluados alrededor de 4 000.

La tabla 8 muestra los valores del factor de fricción en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa, obtenidos por el diagrama de Moody.

Tabla 8. Resultados del factor de fricción en los diferentes tramos de tuberías para la condición de trabajo

Líneas	Factor de fricción f
Tubería de DN 200	0,034
Tramo de tubería de DN 300	0,036

Como se muestra en la tabla anterior el factor de fricción es bastante pequeño, lo que demuestra la poca viscosidad del fluido analizado en este caso la pulpa de yeso, un fluido newtoniano de poca viscosidad y que generalmente se transporta a valores de Reynolds superiores a 4 000.

En la tabla 9 se muestran los valores de las pérdidas por rozamiento lineal y local, para la tubería y accesorios empleados en la instalación de bombeo de pulpa de yeso. Los cálculos se realizaron para la condición de trabajo utilizando la bomba 174-PU-3D hasta el tren 1.

Tabla 9. Resultado de los cálculos de las pérdidas por rozamiento y locales en la tubería de succión y la tubería de impulsión.

Parámetros (m)	Impulsión	Succión	Ecuación
Pérdida por rozamiento: tubería DN 200 (h1)	2,03	0,4	5
Pérdidas locales: tubería de DN 200 (h2)	1,62	0,36	6
Sumatoria del coeficiente de pérdida local en la tubería DN 200 (ξ_t)	5,41	1,2	7
Pérdida por rozamiento: tubería de DN 300 (h1)		0,11	5
Pérdidas locales: tubería de DN 300 (h2)		0,17	6
Sumatoria del coeficiente de pérdida local en la tubería DN 300 (ξ_t)		2,9	14
Pérdidas totales del sistema (himp y hsuc)	1,04	0,76	9 y 15
Pérdidas dinámicas (hdin)	4,69		16
Altura estática para el máximo nivel del líquido en el tanque (ΔZ)	6,85		17
Pérdida total en el sistema (ht)	11,54		18

Como indican los resultados en la tabla 9, las pérdidas en la instalación resultan de 11,54 metros de columna de líquido para el máximo nivel del líquido en el tanque, estas pérdidas consideran las ocurridas en la tubería de titanio y la de pexgol.

Características de la red para el sistema trabajando en la condición del máximo nivel del líquido en el tanque

Las tablas 10 y 11 muestran los valores de las características de la red de tuberías y accesorios en función del caudal de trabajo de la bomba y la curva de la bomba a 813 rev/min, esta característica de la red depende fundamentalmente de la resistencia que existe en la misma.

Tabla 10. Característica de la red para el sistema trabajando con el máximo nivel del líquido en el tanque

Q(m ³ /h)	0	150	250	350	450	550	650
H(m)	6,85	9,08	13,16	19,32	27,55	37,46	49,78

Tabla 11. Curva característica de la bomba 174-PU-3D (carga-capacidad).

Q(m ³ /h)	0	113,56	227,12	340,68	458,24	567,81	649,57
H(m)	26,51	26,48	26,36	26,21	24,99	21,94	18,89

En la tabla 11 se pudo comprobar que los valores de las pérdidas totales a vencer por la bomba se encuentran dentro del rango de trabajo de la misma. En el caso de la curva característica de la bomba carga-capacidad se extrajo del catálogo técnico de la máquina para el número de revoluciones de 813 rev/min, facilitado por el fabricante.

La figura 6 muestra el comportamiento de la curva característica carga- capacidad de la bomba obtenida anteriormente, igualmente se encuentra interceptada con la curva de la red del sistema de tuberías a partir de las tablas 10 y 11 para el máximo nivel del líquido en el tanque. Resultando en el punto de operación para el número de revoluciones analizado.

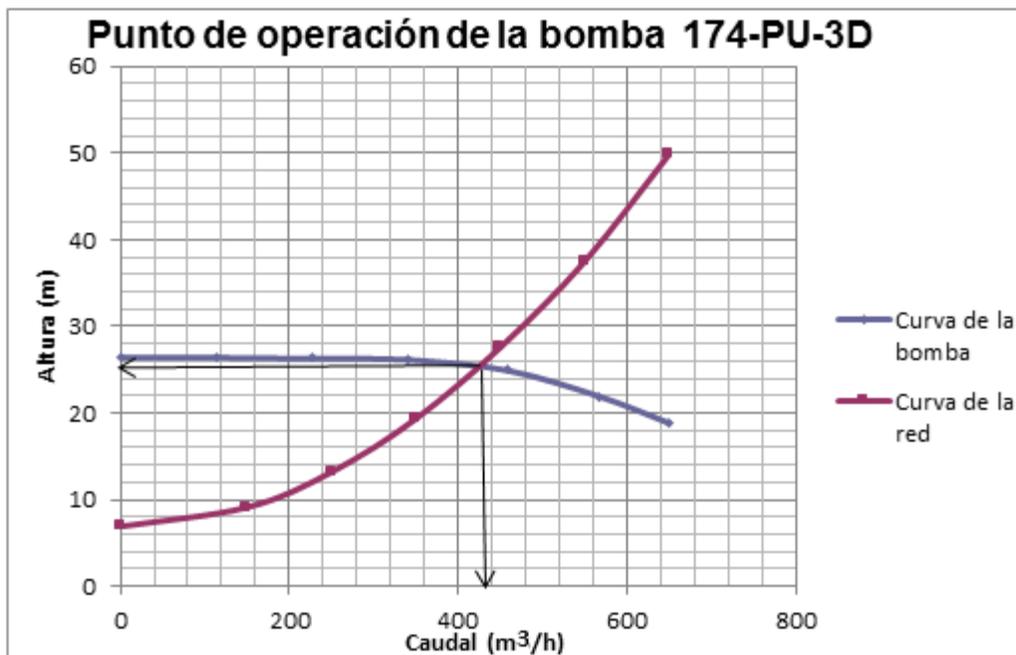


Figura 6. Curva característica del sistema y la bomba para el máximo nivel del líquido en el tanque.

Según la figura 6 el punto de operación de la bomba que es donde se interceptan las curvas características carga-capacidad y el sistema muestra un $Q_t=430 \text{ m}^3/\text{h}$ y una altura $H_t=25,5 \text{ m}$, comparando con los parámetros de selección o de diseño propuesto

por el fabricante con respecto a la curva establecida por el fabricante como se muestra en la tabla 5 los valores calculados están en el rango de diseño de la bomba, es decir que la bomba 174:PU:3D trabaja satisfactoriamente para las condiciones operacionales del sistema analizado en función de la característica del fluido.

En la tabla 12 se dan los resultados de la potencia consumida por la bomba para el máximo nivel del fluido en el tanque, que es al nivel de la canal de reboso de los mismos, con un valor de 36 500 W (36,5 kW), resultando ser inferiores a la potencia que realmente caracteriza al motor instalado de 58,37 kW, siendo este valor igual al de diseño propuesto por el fabricante.

Tabla 12. Resultados de la potencia consumida por la bomba en el sistema de tuberías.

Parámetros evaluados	Resultados	Unidad	Ecuación
Potencia para el máximo nivel (Nb)	36,5	kW	21
Potencia útil que se le entrega al eje (Neje)	54,56	kW	22
Potencia real que consume el motor (Nm)	58,37	kW	23

Conclusiones

Se caracterizó el sistema de tuberías y accesorios perteneciente al grupo moto-bomba 174-PU-3D al tren 1, así como sus características de diseño.

Se realizó una caracterización reológica y de densidad de la pulpa de yeso, dando un comportamiento newtoniano con un porcentaje de sólido en volumen de 10,5 %.

Se evaluó el punto de operación de la bomba 174-PU-3D, mostrando un valor de $Q_t=430 \text{ m}^3/\text{h}$ y una altura manométrica de $H_t=25,5 \text{ m}$, lo que demuestra que la bomba trabaja en los rangos de diseño propuestos por el fabricante.

Referencias bibliográficas

CISTERNA, L. H. (2022). Termosifones Bifásicos: Tecnología para el uso eficiente y racional de la energía. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 30(3), 420-421. Disponible en: https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art5_No4_2021.

HERNÁNDEZ, G., ARMAS, Y. R. D., MARTÍNEZ, R., PELEGRÍN, E. & PÉREZ, L. (2021). Influencia de la concentración de sólidos en el coeficiente de corrección de carga-capacidad del transporte de hidromezclas lateríticas. *Minería y Geología*, 37(4), 445-460. Disponible en: https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art5_No4_2021.

- 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. Disponible en: <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/612>.
- MOTT, R. L. (2006). *Applied fluid mechanics* (Vol. 1). Pearson Educación.
- NEKRASOV, B. (1986). *Hidráulica*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 432 p.
- PÉREZ, L., GARCELL, L. R. & HERNÁNDEZ, G. (2020). Modelo de viscosidad relativa que describe el comportamiento reológico de suspensiones lateríticas. *Tecnología Química*, 40(2), 356-375. Disponible en: scielo.sld.cu/pdf/rtq/v40n2/2224-6185-rtq-40-02-356.pdf.
- PEXGOL (2013). *Guía de diseño e ingeniería*. Sistemas de tuberías para usos de infraestructura e industria. Disponible en: <https://www.ecomexperu.com/PEXGOL%20-%20Engineering%20Guide%20Spa%204-2013.pdf>.
- RAMÍREZ, A. Á., MUÑOZ, R. R. & CASTRO, A. R. S. (2022). Tecnología de recuperación del árbol de la bomba centrífuga k-45/30a en la refinería de Cienfuegos. *Tlatemoani: Revista académica de investigación*, 13(41), 94-120. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8793607>.
- REZA, G. 2000: *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw:Hill, New York, 215 p.
- RODRÍGUEZ, M., SABLÓN, L. E., ANGULO, H. J. & HERNÁNDEZ, C. (2021). Validación de nuevo modelo de gradiente de presión en el hidrot transporte laminar de pulpa laterítica. *Tecnología Química*, 41(1), 22-33. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-d1852021000100022.
- ROJAS, J. P., PABÓN, A. & ORJUELA, S. (2022). Alternativas de recuperación residual, contribución desde la ingeniería mecánica. *Revista Boletín Redipe*, 11(1), 509-515. Disponible en: <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/1658>.
- SHASHI, M. 2004: *Piping calculation manual*. Mc Graw:Hill, New York, 659 p.

SUAREZ, J. P. R., ORTEGA, M. V. & ABRIL, S. O. (2021). Investigaciones con CFD aplicadas a bombas centrífugas. *Revista Boletín Redipe*, 10(9), 515-525. Disponible en: <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/1458>.

VATANDOUST, H., YARMOHAMMADI, H. & ALIYARI, T. (2023). Investigation of Hydraulic conditions and shape of flip bucket spillways on Cavitation phenomenon by considering dynamic pressures. *Journal of Energy Resources Technology*, 145(4). Disponible en: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=HJP0N6EAAAAJ&citation_for_view=HJP0N6EAAAAJ:roLk4NBRz8UC.