

Eficiencia energética en sistemas de bombeo de hidromezclas

Gabriel Hernández-Ramírez
Rodney Martínez-Rojas
Cayetano Durán-Abella
Osmanis Pérez-Aballe

Resumen

Las hidromezclas lateríticas presentan características no newtonianas debido a sus propiedades físico-químicas y al contenido de sólidos requerido para su procesamiento industrial, que ocasionan problemas de transportación por su alta viscosidad a causa de la sedimentación dentro de las tuberías, lo cual demanda una mayor carga de bombeo y, por consiguiente, un elevado consumo energético. Durante las mediciones realizadas para diferentes concentraciones de sólidos se demostró que las hidromezclas provocan un gasto energético cuando se incrementa el tiempo de bombeo por no corregirse la potencia eléctrica y la velocidad de giro al cambiar las propiedades reológicas de la pulpa.

Palabras clave: hidromezclas; eficiencia energética; reología; sistema de bombeos; consumo energético.

Power efficiency in hydro-mixture pumping systems

Abstract

The lateritic hydro-mixture has non-Newtonian characteristics due to its physicochemical properties and the solids content required for it to be processed in the industry. This results in transportation problems due to its high viscosity caused by settling inside the pipelines, thereby requiring an increased pumping load with the consequent power consumption. The results obtained from the measurements completed for different solids concentrations indicate the actual effect of these properties on the driving operation as observed by increased power consumption due to an increase in the operating time. This occurs when the electric power and the turning velocity are not readjusted based on the changes of the slurry rheological properties.

Keywords: Hydro-mixtures; power efficiency; rheology; pumping system; power consumption.

1. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica prevalece sobre otras formas de consumo de la energía, ella resulta esencial para el desarrollo industrial y el bienestar de la sociedad. En el contexto mundial, el motor de inducción es calificado como elemento fundamental en la cadena productiva y un objetivo clave para el ahorro energético. De acuerdo con estudios realizados por Almeida (2010) se ha podido comprobar que a nivel mundial, entre el 40 % y el 60 % del consumo total de energía eléctrica, corresponde a los motores trifásicos de inducción.

En las aplicaciones industriales se estima que solamente en el accionamiento de bombas, ventiladores, compresores y aplicaciones de tracción mecánica, los motores de inducción consumen cerca del 70 % de la energía eléctrica (Boglietti et al. 2004; Brunner 2012; Walde y Brunner 2011). Estudios publicados entre el 2006 y 2012 (Ellis 2007; Mahla 2009; Maruszczuk et al. 2009; Bertoldi y Atanasiu 2010; Guardiola de Cabo 2011; Brunner 2012) coinciden en que los sistemas de motor eléctrico demandan entre el 43 % y el 46 % del consumo total de la electricidad mundial. Este consumo se calculó en unos 6 000 TWh en el 2005 y su aporte a la emisión de CO₂ es aproximadamente de 4 400 Mt, que constituye más o menos el 16 % de todas las emisiones relacionadas con la energía (Walde & Harrington 2011).

En Cuba, según la Unión Nacional Eléctrica (UNE) el consumo de electricidad facturado en el año 2014 fue 19,36 TWh, de ellos corresponden al sector estatal 8,39 TWh y a la industria 4,6 TWh, siendo el motor de inducción el mayor consumidor de energía (Oficina Nacional de Estadística 2014).

En todo proceso tecnológico de la industria química los sistemas de transporte de fluidos son consumidores de una parte importante de la energía utilizada con fines productivos. Según Mestizo (1994), más del 60 % de la energía total que se consume en la transportación de fluidos se deriva de los accionamientos eléctricos con motores de inducción, y de este consumo, más del 55 % se utiliza en los accionamientos de bombas. Se estima, además, que más del 20 % de la energía que se puede ahorrar está asociada con el mejoramiento del rendimiento en los motores y los subsistemas mecánicos (Rojas 2006). Es evidente la importancia que tiene atender cualquier medida que contribuya a mejorar adecuadamente los índices de rendimientos de estos sistemas.

Las nuevas tendencias relacionadas con el incremento de los niveles productivos y el vertiginoso desarrollo de este tipo de industria

demandan que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficiencia metalúrgica y energética de los mismos, a partir del conocimiento del comportamiento reológico de las suspensiones acuosas para el cálculo de los equipos y conductos que las transportan. Dicho comportamiento está relacionado con la viscosidad y la estructura que forman las partículas; en el caso específico de las suspensiones acuosas de minerales influyen el tamaño y la distribución de las partículas en suspensión (Garcel 1991; Pérez 2004; Pérez et al. 2010). El desconocimiento que existe en este sentido conlleva a que se tomen decisiones en los procesos tecnológicos que, en lugar de mejorar la operación del sistema de transporte de suspensiones, provocan anomalías que no tienen explicación aparente, o se realiza una inadecuada selección de tuberías y bombas (Madigan, Leong & Ong 2009).

En el tratamiento de las hidromezclas incide, además, una baja eficiencia operacional cuya causa se requiere precisar para disminuir los costos e incrementar su fiabilidad. Se hace necesario investigar los factores que inciden en la variación de las propiedades de las hidromezclas en los parámetros operacionales y, en particular, factores tales como: concentración de sólidos, porcentaje de arena y gravilla, densidad, número de mineral y otras. En cualquiera de los procesos de las industrias metalúrgicas las características del fluido y de los sistemas pueden variar en dependencia de la tecnología empleada: lixiviación carbonato amoniacal (proceso CARON) y lixiviación ácida a presión (LAP). El presente trabajo tiene como objetivo investigar cómo influye la concentración de sólido de las hidromezclas en el rendimiento de las bombas centrífugas para el proceso de lixiviación ácida a presión.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron pulpas lateríticas extraídas del fondo de un sedimentador convencional (TK-E) y de otro (TK-F) al que se adiciona un floculante para provocar la formación de agregados de partículas de mayor tamaño y peso que las partículas individuales, con el fin de incrementar la velocidad de sedimentación y, por consiguiente, disminuir el tiempo de residencia en el sedimentador.

2.1. Concentración y densidad de la pulpa

El contenido de sólidos de la pulpa, expresado el porcentaje en peso, es una de las variables de mayor control, sobre todo a la salida de los tanques de almacenaje de donde es bombeado a la Planta de Lixiviación,

decide la eficiencia del proceso de extracción, así como el consumo de ácido requerido para ello.

El estudio se realizó con muestras de pulpa laterítica con concentraciones de 41 % y 44 % (Tabla 1). La materia prima fundamental del proceso LAP son las lateritas de típico color amarillo-pardusco que se extraen de los yacimientos ferroniquelíferos de la región de Moa. La densidad de la pulpa se obtiene a partir del cálculo establecido por la planta referida. En esta metodología se divide el volumen de agua y de pulpa para obtener la densidad de la pulpa (Pavlov, Romankov & Noskov 1981).

Tabla 1. Condiciones de trabajo y propiedades de las suspensiones utilizadas

Suspensión	pH	T (°C)	Concentración de sólido (%)	Densidad de la suspensión, ρ (g/cm ³)	Gravedad específica del sólido, Gs
Pulpa TK-E	6,10	28	44	1,508	3,37
Pulpa TK-F	6,16	28	41	1,325	3,4

En la Tabla 1 se demuestra que la mayor concentración de sólido en la suspensión de laterita está dada por el incremento de interacción entre partículas y, por consiguiente, una mayor estructuración de la fase sólida, un aumento en el valor de la diferencia entre el pH de la pulpa y su correspondiente punto de carga cero; como se aprecia, a medida que aumenta la diferencia de pH disminuye la densidad de la pulpa.

2.2. Composición química del mineral en la pulpa

La composición química de la pulpa laterítica se determinó con un espectrómetro secuencial de fluorescencia de rayos X (FRX), Phillips PW 1480, se utilizó radiación de rayos X con Rn tipo PW2182/00, con un régimen de 3 000 W y 100 kV al vacío con colimador fino.

Para las determinaciones mineralógicas se empleó la difracción de rayos-X (DRX), según método policristalino y el difractómetro Philips, modelo PW 3710. Se determinó el número de mineral para predecir el comportamiento de la pulpa en la sedimentación (Iglesias 2010) mediante la ecuación 1; se decidió utilizarlo como variable representativa de la composición química en la presente investigación:

$$N_{\text{Mineral}} = \frac{\%Mg + \%SiO_2}{\%Co + \%Mn} \quad (1)$$

2.3. Granulometría del mineral en la pulpa

El análisis granulométrico de las suspensiones industriales se realizó a través del tamizado convencional para determinar la granulometría mayor de 0,045 mm (325 mesh), por tamizado vía húmeda, se empleó un juego de tamices de la serie ASTM con las siguientes aberturas: 0,85; 0,3; 0,15; 0,06; 0,09; 0,075 y 0,045 mm.

2.4. Características de las bombas

Se analizaron dos bombas centrífugas cuyos accionamientos poseen las características siguientes:

Tabla 2. Características de las bombas de pulpa de fondo de los espesadores E y F

Código	114-PU-I/L
Capacidad de operación	116 m ³ /h
Presión de descarga de la bomba	272 kPa
Carga total de operación	19 m
Capacidad máxima	450 m ³ /h
Presión máxima a la descarga de la bomba	458 kPa
Carga total de la bomba	32 m
Temperatura de la pulpa	27 °C

Tabla 3. Características del motor PU-3I y J

Corriente	234 A
Potencia	200 HP = 160 kW
Frecuencia	60 Hz
Velocidad de rotación	1 786 rpm
Cos ϕ	0,90

Tabla 4. Características del motor PU-3K y L

Corriente	230 A
Potencia	200 HP = 160 kW
Frecuencia	60 Hz
Velocidad de rotación	1 785 rpm
Cos ϕ	0,90

2.5. Medición de parámetros energéticos

Criterios básicos para el cálculo de los puntos de operación de la bomba:

Temperatura de la pulpa: 27 °C

Densidad $\rho_{sólido\ seco} = 3\,550\text{ kg/m}^3$

Densidad $\rho_{Agua} = 996,55\text{ kg/m}^3$

Porcentajes de sólido

Caudal máximo

Diámetro y longitud de las tuberías

Diferencial de altura entre la descarga y la succión

Número de accesorios

Cotas de ubicación de la descarga y la succión con respecto al eje de la bomba.

Tabla 5. Condiciones de diseño de la red

Tramo	Dn (mm)	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Re	f	H _f (m)	H _{ACC}	H _d (m)	P _d (KPa)
0-1	203,2	456	3,93	79 881,8	0,0377	0,064	8,06	30	430

A partir de los puntos de operación de la bomba podemos calcular la potencia desarrollada por esta para diferentes porcentajes de sólido, así como su rendimiento y con la potencia de entrada del motor, medida con un analizador de red Multilin PQM II, calcular el rendimiento del conjunto motor-bomba. Para esto utilizaremos:

GE Multilin PQM II

Variador de velocidad Yaskawa F7

Flujómetros ENDRESS-HAUSER electromagnéticos

Manómetros ASHCROFT diferenciales

Valores provistos por el Citect SCADA v7.10 sp3

Software de cálculo Microsoft Excel 2010

Potencia consumida por la bomba:

$$N_b = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H ; W \quad (2)$$

Donde:

ρ - densidad del fluido a transportar, (kg/m³)

g - aceleración de la gravedad, (m/s²)

H- pérdida o carga a que está impuesta a vencer la bomba, (m)

Q- caudal que transporta la bomba, (m³/s)

Potencia útil que se le entrega al eje de la bomba:

$$N_{eje} = \frac{\rho \cdot Q \cdot g \cdot H}{1000 \cdot \eta} ; kW \quad (3)$$

Donde:

ρ - densidad del fluido a transportar, (kg/m³)

g - aceleración de la gravedad, (m/s²)

H- pérdida o carga que está impuesta a vencer a la bomba, (m)

Q- caudal que transporta la bomba, (m³/s)

η - eficiencia de la bomba, (de $0 \leq 1$)

Potencia real que consume el motor:

$$N_m = (1,05 \div 1,1) \cdot N_{eje} ; kW \quad (4)$$

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

El rendimiento del motor:

$$\eta_m = \frac{N_b}{N_{eje}} * 100 \quad (5)$$

Donde:

N_{eje} :Potencia de entrada a la bomba

N_b :Potencia hidráulica

El costo de bombeo se expresa mediante la ecuación (Laurencio 2012):

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \times t_t}{\eta_m \times \eta_b \times L} \times P_H \times 10^{-3} \quad (6)$$

Donde:

C_{bom} : Costo de bombeo de la instalación, (CUC/año*m)

P_H : Potencia hidráulica, (W)

t_{el} : Tarifa eléctrica, (CUC/ kWh)

t_t : Tiempo de trabajo del equipo, (h/año)

η_b : Rendimiento de la bomba, (adim)

η_m : Rendimiento del motor eléctrico, (adim)

L: Longitud total de la tubería, (m)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Composición química del mineral en la pulpa

Los resultados demostraron que la laterita es una mezcla de minerales de hierro, donde la goethita es la fase mineralógica principal, con maghemita, hematita, gibbsita y serpentina como secundarias. En la Tabla 6 se muestra que esta posee valores promedio de alrededor de un 45 % de hierro, además de otros metales.

Tabla 6. Composición química de la pulpa cruda

Componentes	Rango de contenido (%)
Ni	0,8 – 1,87
Co	0,053 - 1,08
Fe	35,5 – 53,4
Mg	0,1 – 3,3
Mn	0,078 – 1,44
Cu	0,007 – 0,15
Al	2,23 – 5,99
Zn	0,01 – 3,031
Cr	0,81 – 3,59

Los compósitos de materia prima mineral que ingresan al proceso LAP poseen contenidos de Fe en el orden de 35,5 % a 53,4 %, incluyendo otros componentes como el Al (de 2,23 % a 5,99 %) y el Mg (de 0,1 % a 3,3 %), esto confirma la naturaleza ferruginosa de las muestras de laterita.

3.2. Granulometría del mineral en la pulpa

En la Figura 1 se muestra la distribución de las clases de tamaño de las partículas.

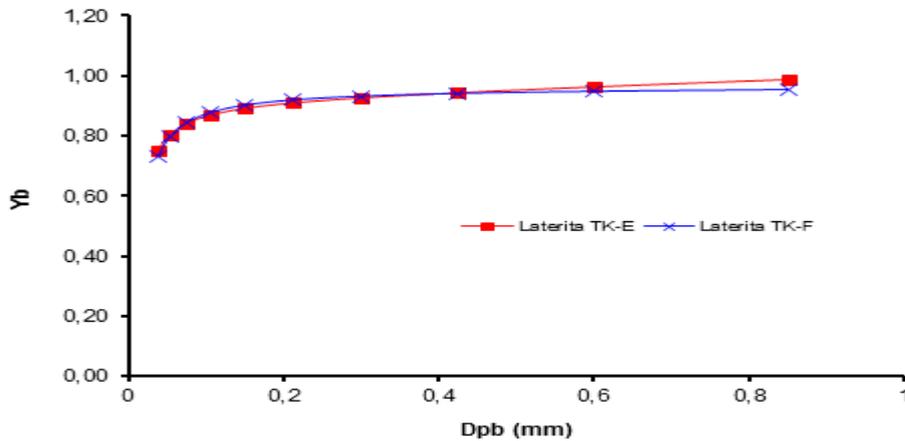


Figura 1. Distribución del tamaño de las partículas.

Como puede observarse, la distribución granulométrica en las suspensiones de la pulpa laterítica es muy similar, con un comportamiento propio de sistemas polidispersos. Se pudo determinar que la pulpa cruda de laterita posee un 30 % de partículas mayores de 0,045 mm; por tanto, las partículas más finas son mayoritarias y determinan la velocidad de sedimentación de este mineral, así como su comportamiento reológico.

3.3. Comportamiento del accionamiento

En la Figura 2 se muestra que los accionamientos con bombas representan una considerable parte del consumo de esta planta por lo que mejorar la eficiencia en estos reportaría un importante ahorro económico para la planta y la empresa, en general.

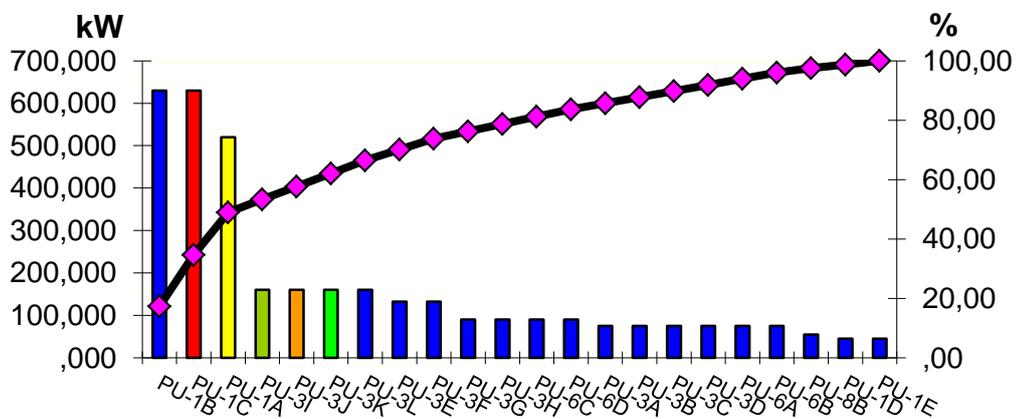


Figura 2. Diagrama de Pareto que representa las cargas instaladas en la planta.

Los accionamientos con bombas representan un 98,09 % de la potencia total instalada en la planta, los mecanismos de los tanques un 1,85 % y otros accionamientos un 0,05 %. Los accionamientos que se abordarán en cuestión se encuentran ubicados en los Centros de Control de Motores 2 (114-PU-3I y 114-PU-3K) y 3 (114-PU-3J y 114-PU-3L).

El trabajo se orientó hacia los tanques E y F de la Planta de Espesadores de Pulpa y al comportamiento reológico de las suspensiones lateríticas debido a los problemas de alta viscosidad de la pulpa a temperatura ambiente que ocasionan problemas de fluidez, lo que trae consecuencias negativas en los accionamientos instalados para su transporte (bombas de flujo inferior y motores eléctricos acopladas a esta 114-PU-3J/K).

En las Figuras 3 y 4 se muestra el consumo de corriente del motor de las bombas 114-PU-3J y 114-PU-3K para diferentes concentraciones de sólido.

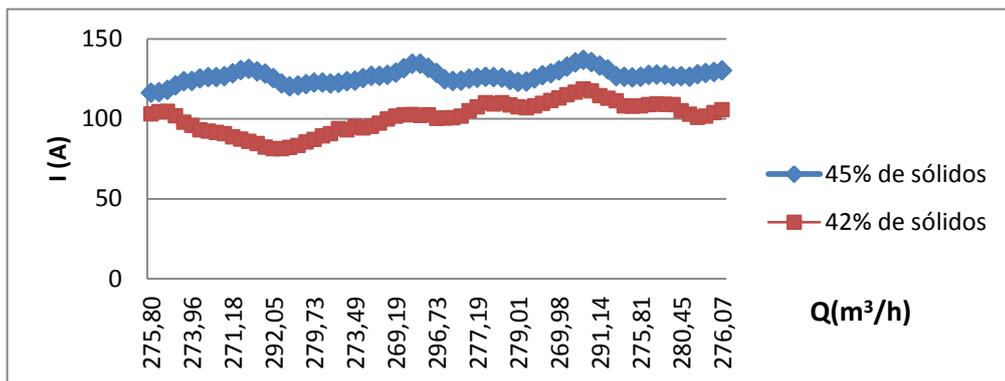


Figura 3. Corriente contra flujo volumétrico 114-PU-3J.

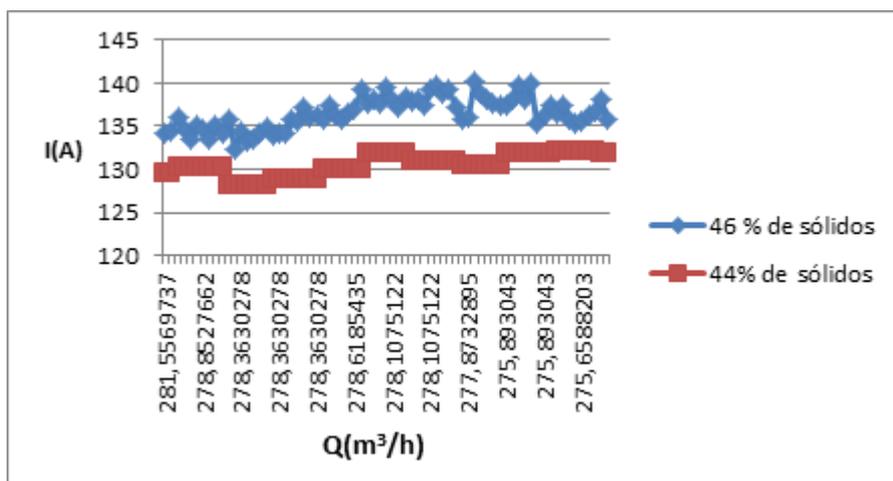


Figura 4. Corriente(A) contra caudal en 114-PU-3K.

En general, en las Figuras 3 y 4 se aprecia un comportamiento similar en ambas bombas, donde se incrementan las cargas para mayor porcentaje de sólidos. Como se observa, para menores concentraciones de sólidos

(42 % y 44 %) la corriente de trabajo trifásica promedio es menor, no sucede así cuando las concentraciones de sólidos son mayores (45 % y 46 %). Ello se atribuye a que se incrementa la concentración de sólidos y ocurre un sobreesfuerzo del accionamiento debido a que no se corrige la velocidad para esas nuevas condiciones, que requieren un poco más de esfuerzo para lograr el mismo flujo volumétrico.

En las Tablas 7, 8, 9 y 10 se muestran parámetros medidos y calculados de la bomba 114-PU-3K para diferentes condiciones en el primer tramo de la red hidráulica.

Tabla 7. Condiciones normales de operación

Tramo	Dn (mm)	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Re	f	H _f (m)	H _{ACC}	Hd (m)	Pd (KPa)
0-1	203,2	116,1	1,00	10802,6	0,0566	0,006	1,50	7,29	358

Tabla 8. Máximo caudal de las bombas 114-PU-03 K/L para las condiciones actuales

Tramo	Dn (mm)	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Re	f	H _f (m)	H _{ACC}	Hd (m)	Pd (KPa)
0-1	203,2	162	1,39	30789,9	0,0508	0,011	2,099	41	568

Tabla 9. Condiciones para el caudal máximo en la línea de conducción

Tramo	Dn (mm)	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Re	f	H _f (m)	H _{ACC}	Hd (m)	Pd (KPa)
0-1	203,2	144	1,24	26174,5	0,0532	0,009	2,10	8,6	600

Tabla 10. Condiciones para el caudal y porcentajes de sólidos promedio

Tramo	Dn (mm)	Q (m ³ /h)	V (m/s)	Re	f	H _f (m)	H _{ACC}	Hd (m)	Pd (KPa)
0-1	203,2	90	0,77	10307,6	0,0657	0,004	1,01	16,2	566

El cálculo de los puntos de operación será realizado para estas bombas que operan en paralelo, para diferentes concentraciones de sólidos que se manejan en esta planta, con el modelo reológico existente. El objetivo es determinar el rendimiento de la bomba y conocer la potencia hidráulica de la misma y con la potencia eléctrica medida del motor, acoplada a cada una de ellas, encontrar el rendimiento del accionamiento, en general (motor-bomba).

3.4. Cálculo del rendimiento del sistema

El rendimiento de las bombas está relacionado con la velocidad específica (n_s), el tamaño de la bomba, la carga neta positiva de succión (NPSH), el tipo de bomba seleccionada para las condiciones de servicio y las características del fluido a transportar en cuestión. Existen gráficas (normas ANSI/HI 2010) que son de gran ayuda para predecir la eficiencia de equipos de bombeo, pero en ocasiones en estas no se incluyen otros efectos perjudiciales, como el manejo de mezclas viscosas, aspecto que se aborda en este trabajo.

Las mediciones fueron realizadas con un mes de diferencia en el cabezal de descarga de la bomba 114-PU-3K, que pertenece al espesador F; se observó un comportamiento similar al presentado por la bomba 114-PU-3J (del espesador E) con una mayor carga para mayores porcentajes de sólidos. Tal comportamiento fue similar al mostrado en la bomba 114-PU-3J, correspondiente al tanque E. Al aumentar la corriente de trabajo también aumentan las pérdidas en el cobre ya que estas varían con el cuadrado de la misma.

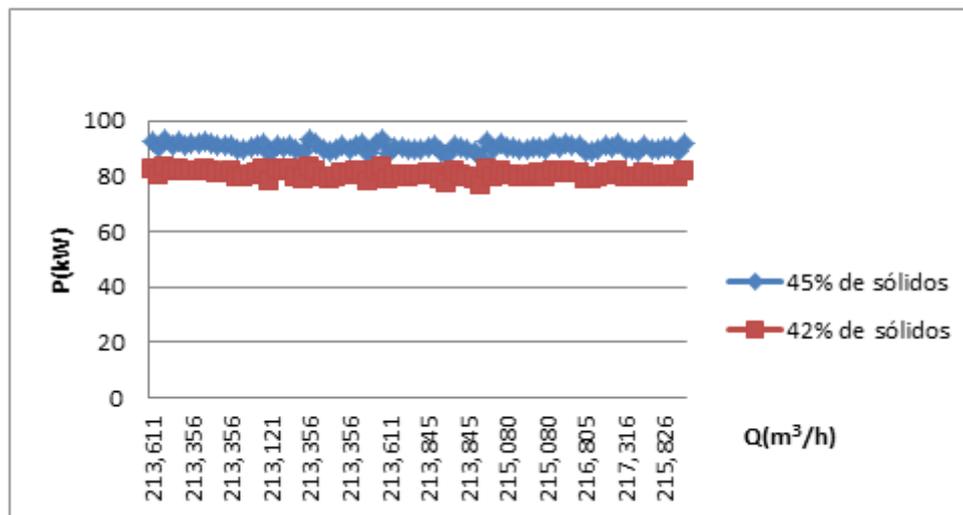


Figura 5. Potencia activa trifásica contra flujo volumétrico.

En la Figura 5 se puede constatar que la demanda de potencia activa por el motor es mayor para un 45 % de concentración que para un 42 %. Se puede definir que el coeficiente de carga para este accionamiento es de un 50 % aproximadamente. Estos resultados corroboran lo investigado por Pérez (2010) donde se demostró que las bombas que manejan fluidos no newtonianos requieren de una mayor potencia para garantizar el mismo flujo que las bombas que manejan un fluido con características newtonianas y que, para el caso de los primeros, la viscosidad y la

potencia necesarias aumentan al incrementarse los sólidos en suspensión.

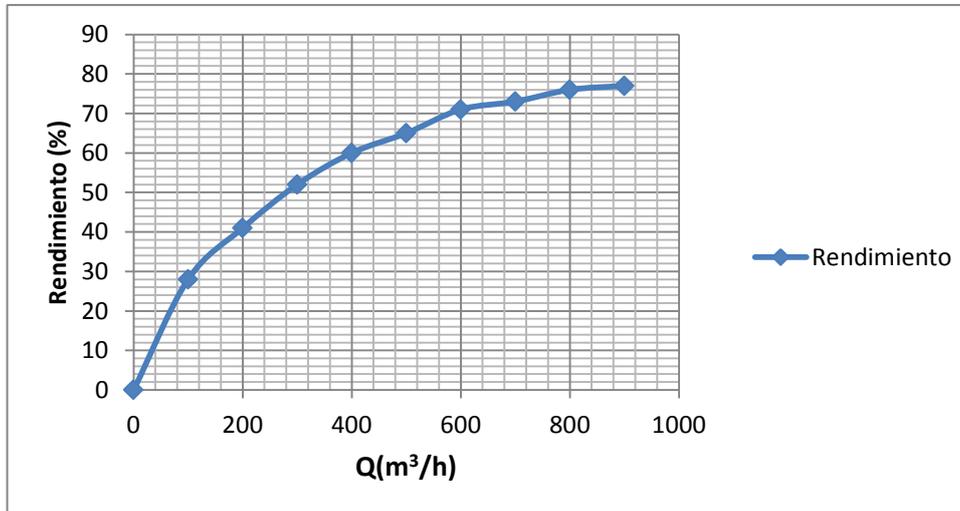


Figura 6. Rendimiento contra flujo volumétrico.

Comparando el rendimiento de la Figura 6, que resulta de la red, se obtiene el rendimiento de la bomba para diferentes caudales de operación, lo cual es clave para conocer si la bomba está operando o no cerca del punto de mayor eficiencia (76 %).

A través de las curvas de comportamiento del sistema obtenemos el rendimiento de la bomba. Según la curva de la red, para un 44 % (promedio en este año), este es de un 61 % y calculamos la potencia de entrada a la bomba pues la de salida se calculó mediante la ecuación 2.

La potencia hidráulica es de 38 kW y la de entrada es de 62 kW. Con estos datos y la obtenida con el analizador de red a la entrada del motor se pudo calcular el rendimiento del motor, tal como se muestra en la ecuación 5.

El rendimiento del motor se comporta en un 69 %. El rendimiento total del sistema es de 42,2 %, inferior a lo recomendado en la norma ANSI/HI (2010), que establece un mínimo de 55 % para accionamientos que operan con bombas centrífugas. Por su parte, el rendimiento de la bomba es de 57 %, que se encuentra en la región permisible de trabajo, según la hoja de datos del fabricante, que determina el punto de máxima eficiencia entre 50 % hasta 120 %.

En la Figura 7 se muestra la curva de rendimiento del sistema para 44 % de sólidos, de donde se obtienen los puntos de operación requeridos para el trabajo eficiente de la bomba.

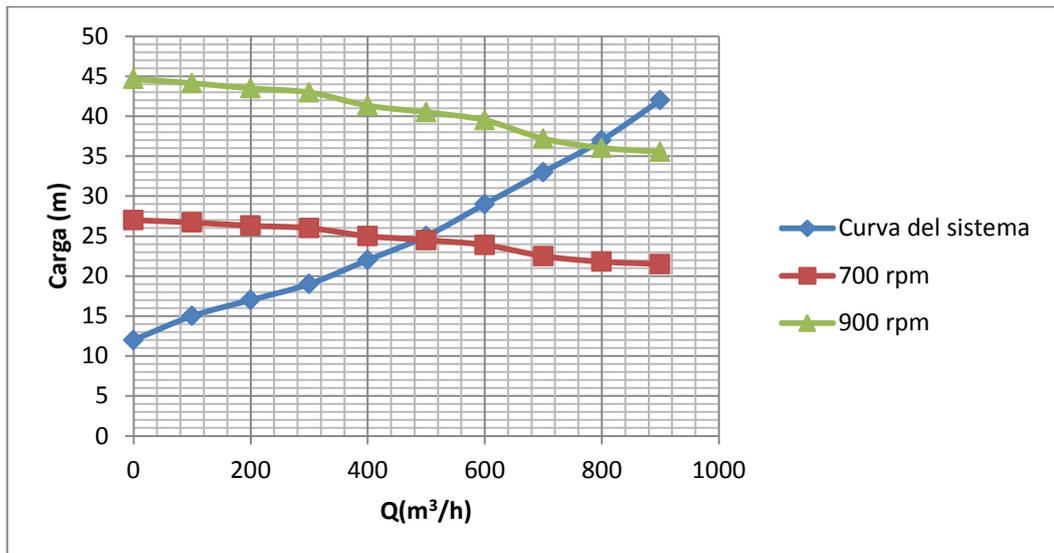


Figura 7. Curva de rendimiento del sistema calculada para 44 % de sólidos.

Cuando las bombas trabajan en paralelo, a un caudal de 450 m³/h y a velocidad máxima (900 rpm) alcanzan una altura de carga en la línea de 34 m. En la curva proporcionada por el fabricante, para las mismas condiciones, la altura de carga en la línea es menor (32 m).

En la Tabla 11 se refleja la desproporción de caudal entregado por bombas idénticas que operan a velocidades similares con una diferencia de 3 % de concentración de sólido en la pulpa.

Tabla 11. Comparación del funcionamiento de las bombas a distintas concentraciones de sólidos

	Bomba 114-PU-3J	Bomba 114-PU-3L
Sólidos	44 %	41 %
Caudal	72 m ³ /h	187 m ³ /h
Velocidad	891 rpm	879 rpm
Corriente de trabajo	150 A	122 A

Bajo estas condiciones de funcionamiento ninguna de las dos bombas podrá alcanzar su caudal de diseño máximo de 450 m³/h para estas velocidades. Sin embargo, la medición del motor constató que este se encontraba trabajando aproximadamente al 50 % de su capacidad. El fabricante de la bomba recomienda en la hoja de datos que el motor para este tipo de bomba sea de 110 kW (150 HP), el instalado actualmente es de 160 kW (200 HP) lo que demuestra un bajo coeficiente de carga y un incremento de pérdidas de energía.

Por su parte la Tabla 12 muestra que cuando el porcentaje de sólido es de 44% se requiere un mayor tiempo de bombeo, por lo que el consumo de energía aumenta.

Tabla 12. Comparación del incremento del tiempo de bombeo y el consumo

Sólidos	44 %	41 %
Velocidad	891 rpm	873 rpm
Tiempo de bombeo	6 h 15 min	2 h 10 min
Caudal	450 m ³ /h	450 m ³ /h
Consumo	565,8 kWh	173,2 kWh

El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido con una variación del 3 % de sólido, sin regular la velocidad de giro y la potencia, se expresa mediante la ecuación 5. Bajo las condiciones de más carga evaluada el costo asciende a 219 040 CUC/año. Para un 41 % de sólido el costo por consumo en el accionamiento de bombeo es de 96 300 CUC/año.

Con los resultados obtenidos se propone ubicar una bomba reforzadora en la línea, que supla el déficit existente en la altura de carga para el porcentaje de sólido promedio, así como emplear algunas de las bombas que se encuentran de reserva en estos tanques para alcanzar el caudal deseado y disminuir el tiempo de bombeo.

El costo total de compra, instalación y montaje es de 251 850 USD. El costo de la energía ahorrada se puede determinar a partir de la diferencia obtenida entre el costo por consumo de estas bombas, para un 41 %, donde la altura de carga no supera la de diseño, y para un 44 % de sólido, donde es relativamente superior y el tiempo de bombeo es mayor. Este costo asciende aproximadamente a 122 740 CUC al año. El tiempo de amortización de esta inversión es de 2,06 años.

Otra solución que se puede aplicar es la sustitución de las bombas de flujo inferior existentes por bombas de mayor capacidad (hasta 140 kW) que cumplan con los requisitos de altura de descarga y caudal calculado, ya que no es necesario cambiar el motor eléctrico (160 kW) acoplado a estas. Para esta variante no es preciso cambiar el variador ni el motor eléctrico instalado, pues estos se encuentran actualmente subcargados (bomba de 86,5 kW, motor de 160 kW y variador de velocidad de 200 kW). Los accesorios tampoco requieren ser cambiados, por lo que se tomará únicamente el valor de la bomba. El valor unitario de una bomba

con las características requeridas (Metso Minerals HR250 C5) es de 190 000 USD, incluyendo gastos de mano de obra en el montaje, transporte y subcontrato de las cuatro bombas. El costo total de la inversión ascendería a 760 000 USD, aproximadamente, y se amortiza en 6,2 años.

4. CONCLUSIONES

El análisis de los resultados y la comparación de las mediciones permitió concluir que al incrementar el contenido de sólidos en la pulpa cruda aumenta la viscosidad aparente de la suspensión, debido a que en las suspensiones concentradas las partículas se encuentran cerca unas de otras y prevalecen las fuerzas de Van der Waals, lo que contribuye a la formación de flóculos y agregados que dan lugar a estructuras mucho más fuertes y viscosas que incrementan la potencia de bombeo necesaria para transportar la pulpa cruda a un contenido de sólido de 44 %.

En las condiciones actuales de operación el sistema es ineficiente, alcanzando sólo un 42,2 % de rendimiento; esto está dado por el aumento de la concentración de sólidos en suspensión y de la altura de carga, ambos por encima de los parámetros de diseño. De este modo se pierden unos 122 740 pesos convertibles en un año por concepto de tiempo de bombeo.

5. REFERENCIAS

- ALMEIDA, A. 2010: Standards for Super-Premium Efficiency Class for Electric Motors. *Motor Summit*.
- BERTOLDI, P. & ATANASIU, B. 2010: Energy Efficiency in Motor Driven Systems. Proceedings of the 6th International Conference EEMOODS 2009. Nantes, France.
- BOGLIETTI, A.; CAVAGNINO, A.; LAZZARI, M. & PASTORELLI, M. 2004: International standards for the induction motor efficiency evaluation: a critical analysis of the stray-load loss determination. *Industry Applications, IEEE Transactions on* 40(5): 1 294-1 301.
- BRUNNER, C. U. 2012: *Efficient Electric Motor Systems*. EMSA, Stockholm, Swedish.
- DE KEULENAER, H.; BELMANS, R.; BLAUSTEIN, E.; CHAPMAN, D.; DE ALMEIDA, A.; DE WACHTER, B. & RADGEN, P. 2004: Energy Efficient Motor Driven Systems. Brussels, Belgium: European Copper Institute.
- ECI 2007: Refined copper usage reached an all time record in 2007. Cooper annual report 2007. European Copper Institute, Brussels, Belgium.

- ELLIS, M. 2007: Experience with energy efficiency regulations for electrical equipment. Paris, France: International Energy Agency.
- GARCELL, L. 1991: Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. *Minería y Geología* 8(1-3): 19-23.
- GUARDIOLA DE CABO, L. 2011: Análisis de la norma IEC 60034-2-1. Aplicación en la determinación de las pérdidas y el rendimiento de motores de inducción trifásicos. Consulta: 2 marzo 2012. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/5455/1/resumen.pdf>
- GUZMÁN, O. 2009: Eficiencia energética. Un panorama regional. *Nueva Sociedad*: Documentos. Buenos Aires.
- HORTA, L. 2011: Elementos-Clave de una política eficaz en eficiencia. En: II Diálogo Político sobre Eficiencia Energética. Santo Domingo.
- LAURENCIO, A. H. 2012: *Método para la determinación de parámetros racionales de transporte por tuberías del combustible cubano crudo mejorado 650*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- MAHLA, A. I. 2009: Proyecto piloto de reemplazo de motores eléctricos en la minería de cobre - Chile. Santiago de Chile: Hernán Sierralta Wortsman - International Copper Association, Ltd.
- MADIGAN, C.; LEONG, Y. K. & ONG, B. C. 2009: Surface and rheological properties of as-received colloidal goethite (α -FeOOH) suspensions: pH and polyethylenimine effects. *International Journal of Mineral Processing* 93(1): 41-47.
- MARUSZCZYK, J.; LHENRY, M.; HELINKO, M. & KORENDO, Z. 2009: En armonía. Definición de normas mundiales de eficiencia energética. *Revista ABB* (3): 50-55.
- MCNEIL, M.; CAVA, M.; BLANCO, J.; QUIROS, K. & LUTZ, W. 2007: Reference Document for MEPs en Central América. CLASP/BUN-CA.
- MESTIZO, C. J. 1994: Evaluación energética sobre el empleo del variador de frecuencia como método de regulación de flujo en bombas centrífugas accionadas por motor eléctrico de corriente alterna. Centro Azúcar.
- NEMA STANDARDS PUBLICATION ANSI/NEMA. 2010: Motors and Generators. Rosslyn, USA: National Electrical Manufacturers Association.
- PAVLOV, K. F; ROMANKOV, P. G. & NOSKOV, A. A. 1981: *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. Editorial Abril, La Habana.
- PÉREZ, L. 2004: *Efecto de la temperatura y de la distribución de tamaño de las partículas sobre la correlación entre las propiedades reológicas*

y coloides de las suspensiones lateríticas. Tesis de maestría. Universidad de Oriente.

- PÉREZ, L; GARCELL, L; ROJAS, A; & SIMOES, R. 2010: Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba. *Minería y Geología* 26(4): 16-35.
- PÉREZ, G. L. 2010: Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Tesis doctoral. Universidad de Oriente.
- ROJAS, L. D. 2006: Accionamiento eléctrico asincrónico para el transporte eficiente de pulpa laterítica. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- RUCHANSKI, B. & ACQUATELLA, J. 2010. Eficiencia energética y desarrollo sustentable: Una propuesta metodológica para la evaluación de las políticas públicas en eficiencia energética. En: III Seminario Latinoamericano y del Caribe de Eficiencia Energética. Panamá.
- RUCHANSKY, B.; DE BUEN, O.; JANUZZI, G. & ROMERO, A. 2011: Eficacia institucional de los programas nacionales de eficiencia energética: los casos del Brasil, Chile, México y el Uruguay. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- WALDE, P. & BRUNNER, C. 2011: Energy efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. International energy agency-OECD/IEA, France.
- WALDE, P. & HARRINGTON, L. 2011: Success and CO2 Savings from Appliance Energy Efficiency Harmonisation. Part 2. Collaborative Labeling and Appliance (CLAPS), London, UK.

Gabriel Hernández-Ramírez ghdezr@ismm.edu.cu

Ing. Eléctrico. Máster en Electromecánica. Profesor Auxiliar.
Facultad Metalurgia y Electromecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba.

Rodney Martínez-Rojas rmartinez@ismm.edu.cu

Ing. Mecánico. Máster en Electromecánica. Profesor Asistente.
Facultad Metalurgia y Electromecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba.

Cayetano Durán-Abella cduran@ismm.edu.cu

Ing. Electromecánico. Profesor Asistente.
Facultad Metalurgia y Electromecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba.

Osmanis Pérez-Aballe operez@ismm.edu.cu

Ing. Eléctrico. Máster en Electromecánica. Profesor Asistente.
Facultad Metalurgia y Electromecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba.