

USO DE MEDICIÓN SONAR DE FLUJO PARA MONITOREO DE FUNCIONAMIENTO Y CONDICIÓN DE LAS BOMBAS DE LODOS

A.M. van der Spek¹
R. J. Maron² (Autor Corresponsal)
P.J. Rothman³
C.V. O’Keefe⁴

¹Ingeniero Consultor

Zdoor B.V.
Sleedoorlaan 23

Rotterdam, 3053 ZN, Netherlands
+31-10-418-6989
+31-6-514-61243 cell
avanderspek@cidra.com

²Director, Desarrollo de Negocios, Ing. Aplicación,
América Latina

³V. P., Gerente General

⁴Director, Desarrollo de Negocios, Ing. Aplicación,
América Latina

CiDRA Minerals Processing
50 Barnes Park North
Wallingford, CT 06492, USA
+1-203-265-0035
+1-860-638-9928 cell
rmaron@cidra.com
prothman@cidra.com
cokeefe@cidra.com

RESUMEN

El monitoreo de funcionamiento y condición de los equipos que manejan pulpas críticas por períodos prolongados en la industria de la minería ha estado limitado por la confiabilidad de la instrumentación. Las técnicas tales como monitoreo de curva de bombeo en tiempo real, generalmente aplicadas en otras industrias, como la de generación de energía, rara vez han sido utilizadas en la minería.

Este estudio demuestra cómo una medición sonar precisa, confiable y no invasiva puede combinarse con la planta existente para producir una curva de bombeo adimensional (Carga vs. Flujo) y una curva de eficiencia (Eficiencia vs. Flujo) que puede usarse para monitorear el rendimiento y la condición de una bomba centrífuga para lodos. La técnica puede ser usada con cualquier instrumento de medición de flujo; sin embargo, un requisito esencial para el monitoreo de largo plazo es la repetibilidad y confiabilidad del instrumento, que es difícil de obtener con los instrumentos de medición de flujo con sistemas invasivos de alta exigencia que se utilizan con los flujos de pulpas abrasivas.

Por ejemplo, en el caso de bombas centrífugas de pulpa de velocidad variable, las mediciones estándares comúnmente disponibles en la mayoría de las plantas, (por ej. presión, tasa de flujo, densidad, velocidad de bomba) pueden ser utilizadas para obtener una curva adimensional de bomba (Carga Adimensional vs. Flujo Adimensional). Esto puede ser comparado con la curva del fabricante para monitorear el funcionamiento de la bomba y su desgaste en el tiempo. Así, los programas de mantenimiento basados en la condición pueden programar con mayor precisión la mantención de la bomba y evitar costosas detenciones no programadas.

Adicionalmente, el monitoreo de la eficiencia de las bombas permite calcular la pérdida de energía causada por una operación no óptima de la bomba. La energía perdida podría alcanzar hasta 100 MWh por mes. La determinación de la pérdida de energía puede conducir a importantes ahorros y puede ayudar a sostener la producción en aquellos casos en que la rejilla de potencia impone limitaciones a la cantidad máxima de energía disponible.

INTRODUCCIÓN

Monitorear el funcionamiento y predecir las necesidades de mantenimiento de las bombas de lodos de gran diámetro es una tarea que se asume con diversas herramientas y técnicas. La mantención puede realizarse tanto para prolongar la vida útil de una bomba como para aumentar la eficiencia de la misma, o ambas. Una forma típica de mantención para prolongar la vida útil corresponde al balance dinámico de los impulsores que reduce la vibración y aumenta la vida de una bomba. El reemplazo de partes desgastadas es típica de una mantención cuyo objetivo es aumentar la eficiencia.

El método preferido para monitorear la extensión del desgaste interior es el de carga-flujo que revela la condición tanto de la bomba como del sistema hidráulico conectado¹. La carga es fácilmente medida con medidores estándares de presión. Sin embargo, la medición de flujo en líneas de pulpa de alta exigencia ha sido muy compleja. En algunas cañerías que no tienen revestimiento se pueden usar medidores de ultrasonido. Pero generalmente las cañerías para trabajos de alta exigencia están revestidas con goma o cerámica lo que hace que el uso de estos medidores sea difícil o imposible. La reciente introducción de la tecnología de medición de flujo basada en sistema sonar no invasivo hace posible actualmente la medición de flujo con precisión en cañerías de alta exigencia con, virtualmente, todo tipo de revestimiento y sin sufrir degradación de la medición en el tiempo por causa de desgaste abrasivo de las partes húmedas.^{2,3} Dado que el desgaste interno reducirá la eficiencia de la bomba, sería interesante monitorear los cambios en la eficiencia de la bomba por períodos prolongados de tiempo. La eficiencia de la bomba también se ve afectada por las tolerancias internas entre las secciones de alta y baja presión en la bomba, donde tolerancias amplias llevan a una mayor recirculación y, por lo tanto, a menor eficiencia. Las bombas centrífugas de lodos típicas y de gran tamaño tienen tolerancias ajustables para compensar el desgaste aumentando así la eficiencia y compensando el desgaste de otros componentes internos como las superficies del impulsor. Los efectos del desgaste abrasivo en las partes internas no ajustables como los impulsores y las partes ajustables, como los anillos de sello, implican que las tendencias en el tiempo podrían ser más bien complejas y no monotónicamente descendentes con respecto del desgaste abrasivo.

Una forma de hacer un seguimiento a la eficiencia de la bomba es comparar, en el tiempo, la potencia hidráulica generada por la bomba y la potencia consumida por el motor que acciona la bomba. Asumiendo que los cojinetes y sellos estén bien mantenidos y lubricados cuando sea necesario, el desgaste de ellos podría ser insignificante comparado con el desgaste de las partes húmedas de la bomba sujetas a flujo abrasivo interno. Si esta hipótesis se puede mantener, entonces la razón de la potencia hidroeléctrica podría ser un buen número para rastrear pues podría permitir alcanzar un balance entre eficiencia y desgaste de la bomba de manera de poder predecir de mejor manera las necesidades de mantención y evitar las detenciones imprevistas que resultan de tan alto costo. Este informe describe una forma de hacer seguimiento a la eficiencia de la bomba en un período bastante largo (238 días) a dos bombas centrífugas de pulpa de gran tamaño que alimentan una batería de separadores ciclónicos. El método puede ser claro en teoría, pero en la práctica requiere atención detallada con respecto de la calidad de los datos.

METODOLOGÍA

Hidráulica de la Bomba

El objetivo de una bomba es aumentar la presión del fluido a una cierta tasa de flujo. Las bombas centrífugas logran esto impartiendo energía cinética al fluido por medio de un impulsor rotatorio y luego, desacelerando el fluido en la voluta o cuerpo de caracol de la bomba, se aumenta la presión. La teoría de

¹ **Beebe, R.S. (2004)** *Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring*, Elsevier, UK.

² **O'Keefe C. V., Maron R.M., Gajardo L., (2007)**, Application of passive sonar technology to minerals processing applications. MAPLA 2007

³ **O'Keefe C.V., Maron R.J., Rothman P.J., Poplawski J.,** *Description of Non-Intrusive Sonar Array-Based Technology and its Application to Unique and Difficult Slurry and Paste Flow Measurements*, Presentado en PASTA 2008, Kaskane, Botswana, Mayo 2008.

la maquinaria hidrocínética, incluyendo las bombas centrífugas, está bien explicada en Walshaw y Jobson.⁴

Números Adimensionales

En este análisis es recomendable utilizar números adimensionales que sirven para representar de mejor manera diversas métricas importantes de bombas en términos de parámetros básicos de bomba y permiten el uso de datos obtenidos de bombas de velocidad variable, como aquellas que comúnmente se encuentran en operaciones de circuito cerrado de molienda. Los seis números adimensionales utilizados son los siguientes:

Como una medición de la eficiencia de la bomba, a menudo se usa el coeficiente de carga C_H que se define como número adimensional de la siguiente manera:

$$C_H = \frac{\Delta p}{\rho(\omega D)^2} \quad (1)$$

En esta ecuación Δp es la presión diferencial creada, ρ es la densidad del fluido, ω la frecuencia de círculo del impulsor y D , el diámetro del impulsor. Bajo condiciones ideales, el fluido en la punta del impulsor sale de él a la velocidad tangencial del impulsor que es igual al producto de la frecuencia de círculo y el radio del impulsor. Así, el denominador en la ecuación (1) mide la carga dinámica del fluido que sale del impulsor, mientras que el numerador mide la carga estática. La razón de los dos corresponde a cuán bien convierte la bomba la energía cinética del impulsor en presión.

Las condiciones ideales sólo se aplican cuando el fluido ingresa a la bomba sin componentes de velocidad axial o tangencial y cuando el fluido sale del impulsor sin componentes de velocidad radial o axial. Para considerar las condiciones no ideales es útil e instructivo relacionar el coeficiente de carga con un valor adimensional de la tasa de flujo sostenido:

$$C_Q = \frac{Q}{\omega D^3} \quad (2)$$

Donde Q es la tasa de flujo volumétrico. El denominador en la ecuación (2) es proporcional al volumen arrastrado por el impulsor por unidad de tiempo. Por lo tanto, el coeficiente C_Q relaciona la tasa de flujo que pasa a través de la bomba con el tamaño y velocidad de la bomba.

La potencia hidráulica generada por la bomba es simplemente el producto de la tasa de flujo y el diferencial de presión creado. Al comparar esto con la potencia consumida por el motor (eléctrico) que acciona el eje de la bomba, se puede definir la eficiencia general de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\Delta p Q}{VI \cos \varphi} \quad (3)$$

Esta definición de eficiencia supone que el motor es un motor de una fase con un factor de potencia igual al coseno del cambio de fase entre la corriente I y el voltaje V .

Utilizando la misma ecuación para la potencia hidráulica, se puede definir un coeficiente de potencia adimensional que es independiente de la velocidad de la bomba.

$$C_P = \frac{C_Q}{\sqrt{C_H}} = \frac{P}{\Delta p D^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}} \quad (4).$$

Un coeficiente de velocidad adimensional se deriva del coeficiente de carga como:

$$C_S = \frac{1}{\sqrt{C_H}} = \frac{\omega D}{\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}} \quad (5).$$

⁴ Walshaw, A.C., Jobson, A.D. (1967) *Mechanics of Fluids*, 3ra impresión, Longmans, Londres.

Claramente esto está relacionado con la velocidad tangencial del impulsor y la velocidad del fluido en la salida de la bomba.

Todas las cantidades adimensionales así definidas se relacionan de alguna manera con el tamaño de la bomba expresado en términos de diámetro del impulsor. Una velocidad específica N_s puede ser definida como:

$$N_s = \frac{C_H^3}{C_Q^2} = \frac{\Delta p^3}{\rho^3 \omega^4 Q^2} \quad (6),$$

Que ahora es un número que será el mismo para bombas geoméricamente similares y será constante en el punto máximo de eficiencia.

Mejor Punto de Eficiencia (BEP)

La máxima eficiencia de una bomba se puede calcular ajustando la información real de la bomba a la curva. La ecuación modelo que se usa para el coeficiente de carga con respecto del coeficiente de flujo es un cuadrático:

$$C_H = a + bC_Q - cC_Q^2 \quad (7).$$

En la ecuación (7) a, b y c son coeficientes positivos. Este modelo cuadrático es ampliamente utilizado en la teoría hidrocínética de las bombas y expresa el incremento en la carga con el aumento del flujo y los efectos de la fricción. Como resultado de la ecuación (7), la ecuación para la eficiencia será cúbica, el máximo de la cual puede encontrarse analíticamente. Ahora, las cantidades correspondientes a la carga, velocidad, coeficientes de potencia y velocidad específica en el BEP pueden ser derivadas fácilmente.

Datos de Bomba y Consistencia

La información fue obtenida de los datos históricos de una planta, como se muestra en la Tabla 1 y está generalmente disponible en cualquier planta concentradora moderna.

Tabla 1. Ítemes de datos de bomba

Ítem	Unidad	Nemónica	Rango
Tasa de flujo de la bomba	gpm	f	0 – 20000
Presión de batería	psi	p	0 – 15
Densidad de pulpa (por peso)	%	d	-20 – 100
Velocidad de motor de la bomba	rpm	s	200 – 400
Amperaje de motor de la bomba	A	a	200 – 1500
Nivel en estanque de sumidero	%	l	-1 – 101
Número de ciclones abiertos al flujo		c	1 – 10

La consistencia de los datos debe ser considerada para resolver problemas con datos faltantes, valores poco realistas, fallas de instrumentación y comunicación. Esto resultó en el uso de filtro de datos automáticos que redujeron el volumen de información en un 20%. Después de filtrar adecuadamente los datos, las correlaciones por pareja se obtienen como se muestra en la Figura 1. Nótese la alta correlación entre la corriente de bomba (a) y el flujo (f).

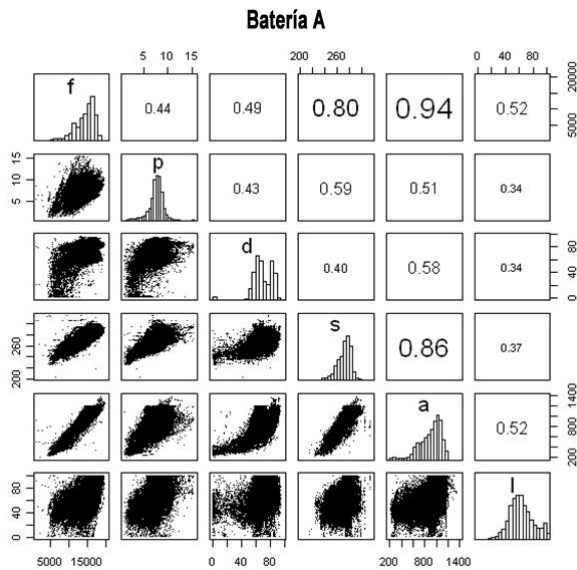


Figura 1. Correlaciones de datos por parejas.

Análisis de Rendimiento de Bomba

Para evaluar el rendimiento de la bomba de alimentación del ciclón en forma cuantitativa utilizando la dependencia de la eficiencia de la bomba en el coeficiente de flujo, es necesario calcular primeramente la presión diferencial sobre la bomba. A continuación se muestra un diagrama de la disposición de cañerías. Los ciclones que se alimentan desde la batería no se muestran, sólo se diagrama una cañería de entrada del ciclón (de un total de 10).

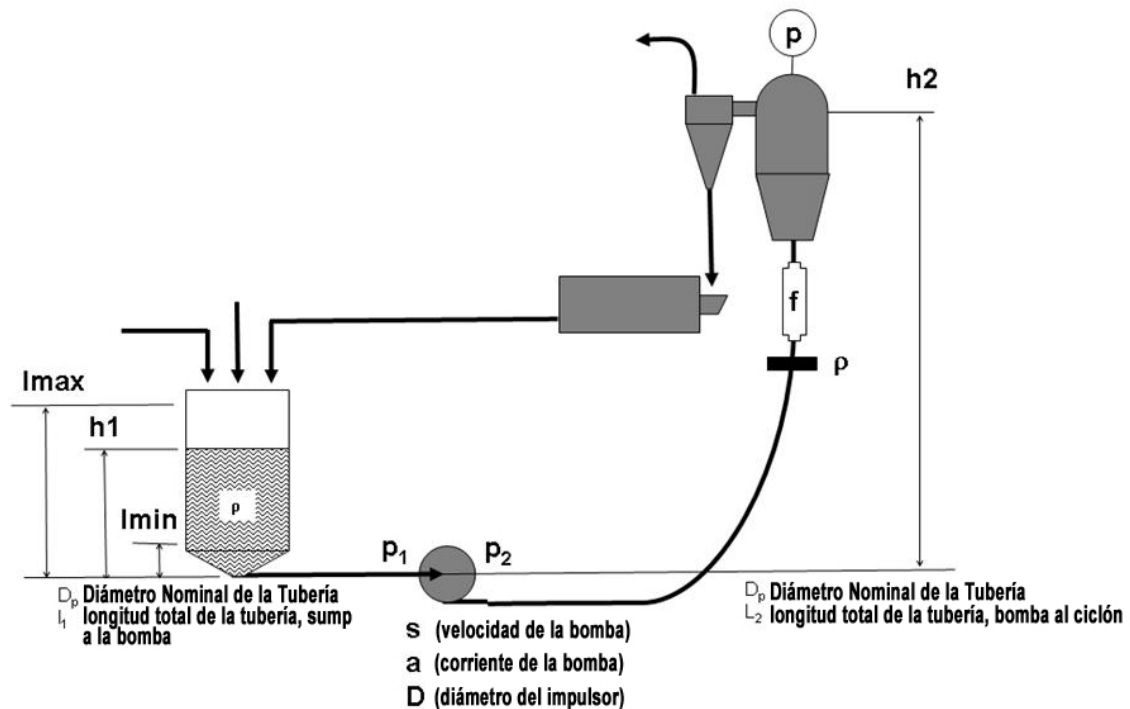


Figura 2. Disposición de bomba, estanque sumidero, batería cañerías.

El nivel de referencia para la presión (hidrostática) es la línea de centro de la bomba. Todas las distancias verticales se miden a partir de este nivel. La presión de la batería de ciclones se mide en la parte superior de la batería con un medidor de presión relativa de la atmósfera. El nivel del sumidero en el estanque produce una presión positiva de entrada que también depende de la presión barométrica. Por lo tanto, la

diferencia no es dependiente de la presión barométrica. Los medidores de flujo con tecnología sonar instalados en el tubo ascendente a la batería miden la tasa de flujo de descarga de la bomba.

Presión Diferencial de la Bomba

Las pérdidas en las curvas no son tomadas en cuenta porque los radios de las curvas son muy amplios. Las pérdidas de aceleración dependen de la tasa del aumento de diámetro desde la cañería a la batería que es pequeña. Las pérdidas hidrostáticas, sin embargo, son, con mucho, las mayores. Una estimación de los otros términos muestra que a máxima tasa de bombeo, las pérdidas por aceleración, curvas pronunciadas o desborde de estanque sumidero son, cada una, menores que un 3% de la pérdida hidrostática. Nótese que la densidad no tiene impacto en esta estimación porque todas las pérdidas se escalan linealmente con la densidad. Debido a la falta de mediciones precisas, varios valores se estiman como se muestra en Tabla 2.

Tabla 2. Valores de bomba y motor hidráulicos

Cantidad	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro de impulsor de bomba	D	54	pulgada
Densidad fluido del portador	ρ_f	1000	kg/m ³
Densidad de sólidos	ρ_s	2750	kg/m ³
Viscosidad fluido del portador	ν_f	1	mPa.s
Altura vertical a parte superior de la batería	h_2	50	ft
Altura vertical a entrada de la bomba	h_1	5 + 10*1	ft
Aceleración gravitacional	g	9.81	m/s ²
Diámetro de línea de flujo	D_p	24	pulgadas
Irregularidad de flujo absoluto de la línea	ϵ	0.4	mm
Voltaje de motor	V	460	V
Factor de potencia de motor	$\cos\varphi$	0.7	
Longitud de cañería aguas abajo	l_2	50	ft
Longitud de cañería aguas arriba	l_1	30	ft
Nivel en estanque de sumidero	l	0 – 100	%

Utilizando estos valores hidráulicos (convertido a unidades si fuera necesario) podemos calcular la densidad de la pulpa que está siendo bombeada de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{\rho_f}{1 - \phi \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)} \quad (8)$$

La fracción de sólidos por volumen continúa a partir de la densidad de pulpa calculada por

$$\phi = \frac{\rho - \rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (9)$$

Lo que a su vez da la viscosidad de la pulpa, de acuerdo con la fórmula Einstein

$$\nu = \nu_f \left(1 + \frac{5}{2} \phi \right) \quad (10).$$

La presión de entrada de la bomba sigue como:

$$p_1 = \rho g h_1 - f \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{\pi D_p}{\frac{1}{4} \pi D_p^2} l_1 \quad (11)$$

La presión de salida de la bomba es igual a:

$$p_2 = p + \rho g h_2 + f \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{\pi D_p}{\frac{1}{4} \pi D_p^2} l_2 \quad (12)$$

En ambos el factor de fricción de Fanning puede calcularse a partir del número Reynolds Re utilizando la ecuación de Churchill⁵, que cubre tanto las cañerías lisas como irregulares por todo el rango de números Re , incluyendo la región de transición de flujo laminar a turbulento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados del Ejemplo

Después de calcular la presión de entrada y salida de la bomba, la presión diferencial puede encontrarse fácilmente. Esto permite el cálculo de las seis cantidades adimensionales presentadas anteriormente. El coeficiente de carga y la eficiencia se representan como una función del coeficiente de flujo. El coeficiente de potencia y la velocidad específica se representan versus el coeficiente de velocidad. Esto entrega una representación de cuatro diferentes vistas del funcionamiento de la bomba, cada una de las cuales tiene sus propios méritos.

1. La curva C_H , C_Q . Muestra el aumento/disminución de la carga de la bomba con el incremento del flujo y se modela como una parábola invertida con la punta en cero o una descarga baja.
2. La curva η , C_Q . Esta curva define el Punto de Mayor Eficiencia (BEP) como el máximo.
3. La curva C_p , C_S . El coeficiente de potencia es una función lineal del coeficiente de velocidad.
4. La curva N_s , C_S . La velocidad específica, mientras es independiente del tamaño de la bomba, es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la velocidad.

El conjunto de datos (casi un año) está desglosado en períodos de un día (1440 minutos). La información de dos días es representada en forma cruzada y ajustada de acuerdo con las fórmulas indicadas anteriormente. Se determina el BEP y se representa como un punto único en los cuatro gráficos de rendimiento. Las líneas empíricas, ajustadas, así como los intervalos de predicción del 95% también son representados. Los puntos de información son valores grises codificados por el número de ciclones abiertos al flujo.

Esta representación cruzada se repite para cada par de días avanzando en el tiempo un día a la vez. El BEP determinado puede así ser visto como un promedio de 2 días de información. Nótese que los “días” de acuerdo con el uso que se le da aquí, no necesariamente son días calendarios consecutivos pues el conjunto de datos debe ser rigurosamente filtrado para eliminar los datos no representativos o erróneos. En la Figura 3 se muestra un excelente ejemplo del análisis. Los puntos negros en el panel inferior están exactamente en la parte superior de las líneas ajustadas, mostrando buena consistencia pues los puntos son calculados a partir del BEP y no de los datos de ajustados en esos paneles.

⁵ Churchill, S.W., (1977) *Friction Factor Equation Spans all Fluid Flow Regimes*, Chem. Eng., Noviembre 1977, p 19

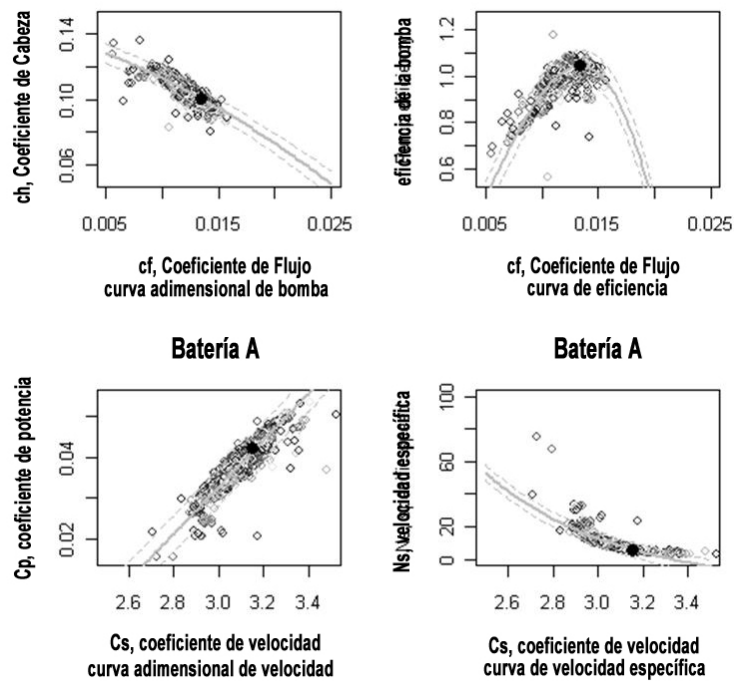


Figura 3. Cuatro representaciones de números hidráulicos adimensionales.

Aun más, los datos de $C_p - C_s$ de hecho siguen una línea directa como debe ser de acuerdo con los números dimensionales introducidos. De manera similar, la necesidad específica N_s , con excepción de algunas desviaciones extremas, tiende hacia la inversa de la cuarta potencia del coeficiente de velocidad.

Resultados Finales

El resultado principal, por supuesto, es el valor del BEP. Si representamos el valor BEP versus el día calendario real para ambas bombas, vemos que para la Batería esto resulta en una tendencia descendente de BEP, mientras que para la Batería B no se puede discernir una tendencia clara. La Figura 4 a continuación muestra ambas representaciones de tendencia una junto a la otra. Dado el hecho de que ciertos parámetros tuvieron que ser estimados, por ej., el factor de potencia del motor se estimó en 0,7, es posible que la eficiencia sea levemente mayor que uno. Los cálculos para ambas baterías fueron hechas con el mismo juego de parámetros. Por lo tanto, las diferencias de eficiencia entre bombas son correctas, igualmente que la tendencia de eficiencia en el tiempo.

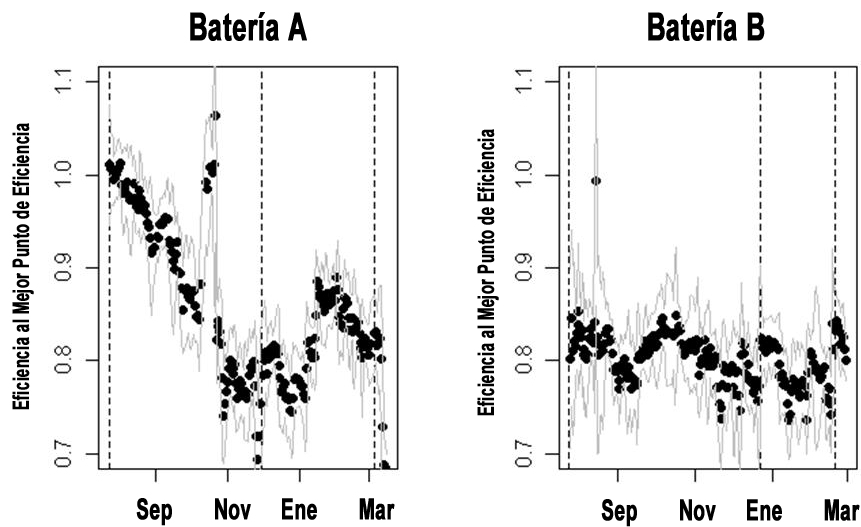


Figura 4. Punto de Mayor Eficiencia (BEP) vs. Tiempo

Las líneas verticales punteadas marcan los días en que se realizó la mantención de la bomba. La línea en mitad del período indica solamente un reemplazo de impulsor, las otras dos líneas en el exterior del período representan una mantención completa. Las líneas grises representan la evolución del 95% del intervalo de predicción del valor de BEP. La información relacionada con la sincronización de los ajustes de la bomba no estaba disponible. El poco usual valor de punta de la información relacionada con la Batería A en Octubre se cree que se asocia con el sensor de corriente del sensor ya que la anomalía apareció sólo en una de las cuatro representaciones que contenían la medición.

Pérdidas de Energía

La bomba bien puede ser el tipo más común de equipo industrial después de los motores. Se ha estimado que las bombas usan un 25% del total de la electricidad generada por los motores en el mundo⁶. Esto equivale al 6,5% de la producción mundial de electricidad. La operación ineficiente de las bombas conduce a pérdidas de energía que podrían haber sido prevenidas. Existen al menos tres razones distintas para monitorear el uso de la energía en las operaciones de minería.

1. *El costo de la energía.* Monitorear el uso de la energía y maximizar su eficiencia puede traer ahorros sustanciales.
2. *Limitaciones de la rejilla de potencia.* En áreas remotas la rejilla de potencia puede estar limitada en su capacidad de entregar energía. En tales casos la producción puede verse restringida por las limitaciones de potencia. La optimización del uso de energía puede así llevar a un aumento de producción.
3. *Recorte de situaciones punta.* Durante las horas punta es no poco común que los servicios generales recarguen un valor por uso de energía por sobre un máximo contratado. Esto ha llevado al recorte de “situaciones punta” donde el equipo es temporalmente detenido para mantenerse por debajo del máximo contratado. Al conocer qué dispositivos con los más ineficientes en términos de energía se podrá decidir qué bombas detener para minimizar el impacto en la producción.

El cuadro a continuación muestra una pérdida de energía acumulativa porque las bombas de las Baterías A y B operan por debajo de cierto máximo obtenible (elegido aquí para igualar a 1). En un caso ideal, donde la mantención puede restaurar la eficiencia a un máximo cada día o cada semana, la pérdida acumulativa de energía sería insignificante. Nótese que las barras blancas en las representaciones corresponden a períodos donde no había información disponible con respecto del funcionamiento de la bomba.

⁶ Beebe, R.S., comunicación personal.

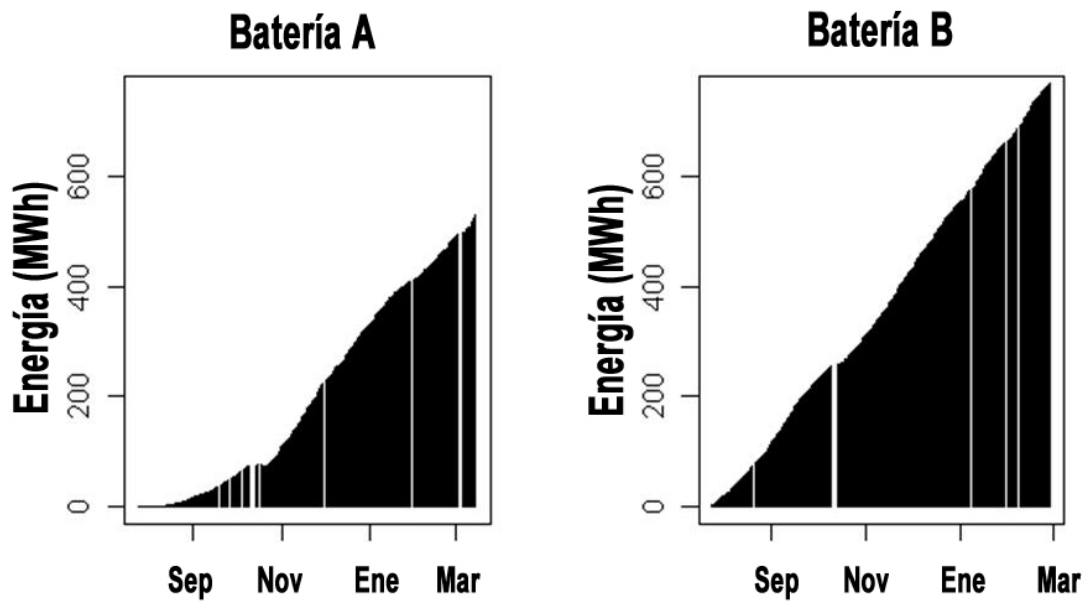


Figura 5. Pérdidas de energía.

La pérdida de energía causada por falta de eficiencia de la bomba se calculó utilizando el consumo de potencia calculado y la media diaria de consumo de potencia del motor de la bomba. Al acumular la pérdida de energía por día se producen pérdidas sustanciales de energía tan altas como 100 MWh por mes.

CONCLUSIONES

Los datos históricos de la bomba recopilados en largos períodos son suficientemente consistentes como para usar un análisis estadístico que conduzca a inferir los cambios del rendimiento de la bomba. La información puede ser filtrada en forma confiable para eliminar las desviaciones. Donde se esperan pares correlacionados éstos ocurren efectivamente, como es el caso entre la corriente del motor y la tasa de flujo.

Es posible estimar la diferencial de presión generada en la bomba retrocalculándola a partir de una presión descendente medida (presión de batería) y un nivel aguas arriba medido en el estanque desde el cual la bomba extrae los fluidos (estanque sumidero).

Teniendo una medición directa del diferencial de presión de la bomba se aumentará la confiabilidad y la precisión. Actualmente se estiman las pérdidas de presión por causa de fricción, mientras que las pérdidas de presión por causa de las curvaturas y cambios de diámetro de las cañerías no se consideran. Las ecuaciones modelo para la carga y eficiencia en la mayoría de casos describen el rendimiento del bomba en forma adecuada. Cuando el rango de tasas de flujo cubiertas dentro de un período de análisis es demasiado pequeño, puede ser necesario cambiar el procedimiento de ajuste de curvas.

Los coeficientes adimensionales eliminan el efecto de variar la velocidad de la bomba permitiendo, entonces, que el análisis prosiga sin importar la velocidad de la bomba. Los datos que no se superponen entonces sólo pueden deberse a datos de mediciones que no están actualmente en línea con los datos pasados, posiblemente por causa de reparación del instrumento o recalibración.

En casos muy poco comunes el análisis adimensional muestra propiedades no superpuestas en la curva de eficiencia. Dado que la no superposición ocurre solamente en la curva de eficiencia donde el instrumento sospechoso será la tenaza de corriente que se utiliza para monitorear la corriente del motor pues es la única medición en la eficiencia.

El resultado final para la Batería A muestra una muy clara tendencia descendente en la eficiencia de la bomba desde un período de mantenimiento hacia el próximo. Desde ahí en adelante la eficiencia varía, pero no se puede discernir una clara tendencia en el tiempo. Sin embargo, a mediados del segundo período, la eficiencia aumenta de modo considerable. Esto podría deberse al ajuste de la tolerancias de la bomba. De ahí en adelante la eficiencia tiende a descender nuevamente.

El resultado final de la Batería B no muestra una tendencia descendente en la eficiencia. Un leve aumento en la eficiencia se observa, sin embargo, inmediatamente después del período de mantención. Basados en la eficiencia y el consumo diario promedio de potencia de los motores de la bomba, se puede calcular la energía perdida por una bomba con rendimiento inferior al óptimo. El seguimiento de la energía perdida puede ayudar a ahorrar costos y a mantener o aumentar los resultados. Para mejorar la interpretación y utilidad de este procedimiento de análisis para el monitoreo de la bomba, se requieren más datos detallados de la mantención, como el tiempo y alcance de los ajustes de tolerancias y el estado de los instrumentos asociados. Las técnicas de análisis que se han aplicado aquí se sostienen en una instrumentación de planta confiable y cuyo rendimiento no cambie en el tiempo. A la fecha, la medición del flujo ha estado más sujeta a la degradación en el tiempo por causa del uso de medidores invasivos que sufren la acción de las pulpas abrasivas. El uso de un medidor de flujo no invasivo basado en tecnología sonar mejora de manera importante el eslabón más débil existente en la cadena de la instrumentación y surge para hacer que este tipo de rendimiento de larga duración sea realmente posible.

REFERENCIAS

- ¹ **Beebe, R.S. (2004)** *Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring*, Elsevier, UK.
- ² **O'Keefe C. V., Maron R.M., Gajardo L., (2007)**, *Application of passive sonar technology to minerals processing applications*. MAPLA 2007.
- ³ **O'Keefe C.V., Maron R.J., Rothman P.J., Poplawski J.,** *Description of Non-Intrusive Sonar Array-Based Technology and its Application to Unique and Difficult Slurry and Paste Flow Measurements*, Presentado en PASTA 2008, Kaskane, Botswana, Mayo 2008.
- ⁴ **Walshaw, A.C., Jobson, A.D. (1967)** *Mechanics of Fluids*, 3ra impresión, Longmans, London.
- ⁵ **Churchill, S.W., (1977)** *Friction Factor Equation Spans all Fluid Flow Regimes*, Chem. Eng., Noviembre 1977, p 19.
- ⁶ **Beebe, R.S.,** comunicación personal.