

Sobre el uso de técnicas estadísticas comunes en problemas de larga data en las operaciones mineras

Bob Maron*, Américo Zuzunaga & Paul Rothman

CiDRA Minerals Processing, CiDRA, USA

Alex van der Spek

Consultor, ZDoor BV, Países Bajos

RESUMEN

Los historiadores de datos actuales entregan gran abundancia de información operacional de una planta. La "extracción" de esos datos utilizando métodos estadísticos puede sacar a la superficie información valiosa sobre el proceso. Tradicionalmente, la información proporcionada por instrumentos se ha considerado estar demasiado comprometida por los valores faltantes, o por una respuesta poco confiable del instrumento a la cantidad física real subyacente. Sin embargo, los instrumentos se han vuelto cada vez más confiables y particularmente cuando el instrumento en sí mismo ya no contiene partes móviles o húmedas. Más aún, los métodos estadísticos permiten la exploración gráfica de la información, sus tendencias e interrelaciones, seguida de un análisis detallado robusto incluso cuando existe una gran cantidad de puntos de referencia/puntos de dato faltantes. Dos conocidos métodos se aplican a tres problemas de larga data en operaciones mineras, primero en forma aislada y luego, en el tercer problema, en combinación.

El análisis de regresión es una técnica estadística común bastante adecuada para determinar la eficiencia representativa de las bombas de pulpa operando en un amplio rango de carga y estados de desgaste. La eficiencia representativa en el Punto de Mejor Eficiencia (BEP por su sigla en inglés) se calcula incluso si la bomba nunca operó cerca de su BEP. Se aplica el análisis factorial para encontrar la distribución de combinación de ciclones operando en una batería de 14 ciclones. La distribución resulta ser sorprendentemente asimétrica en contraposición al número promedio de ciclones abiertos o cerrados que es uniforme. Un análisis de varianza-covarianza de tales distribuciones trajo a la luz una ya olvidada propiedad del algoritmo de control de la válvula de compuertas del ciclón. Se encontró que la combinación del análisis de regresión y el análisis factorial eran útiles para derivar las características de tuberías dependientes del estado y ubicación en una tubería de concentrado de gran longitud.

INTRODUCCIÓN

Existe una cantidad de asuntos pendientes de larga data en las operaciones mineras que pueden ser potencialmente resueltos utilizando el gran número de datos archivados en los registros de los historiadores de datos modernos en conjunto con técnicas estadísticas comunes. Uno de estos asuntos es la pérdida de la calidad funcional de la bomba de pulpa por causa del desgaste. La eficiencia de la bomba en tiempo real así como la razón de la potencia de la bomba eléctrica o la potencia de la bomba hidráulica no son buenos indicadores de la condición de la bomba. Dado que la bomba no siempre está operando en el mismo punto de su curva de bombeo, la eficiencia varía independiente de la condición de la bomba o el estado de desgaste. En este caso se puede aplicar la técnica estadística de modelo lineal para derivar la forma de la bomba y la curva de eficiencia desde la cual se puede encontrar por interpolación el Punto de Mejor Eficiencia (BEP) aun cuando la bomba no haya realmente operado a su Punto de Mejor Eficiencia. La tendencia del BEP en el tiempo es un buen indicador de la condición de la bomba. Así se puede aplicar el análisis de tendencia para realizar la mantención preventiva.

La distribución del flujo de pulpa dentro de una batería de ciclones es altamente influenciada por el ordenamiento de ciclones abiertos y cerrados al flujo. En una batería de 10 ciclones operada con un promedio de 6 ciclones abiertos, el número de combinaciones posibles de 6 de 10 es igual a 210. Mientras los algoritmos de control de la válvula de compuerta intentan promediar las horas de operación de cada ciclón, generalmente no consideran el ordenamiento de los ciclones abiertos y cerrados. Así entonces es posible que algunos ciclones reciban pulpa de mayor o menor densidad mientras la pulpa comienza a asentarse en el múltiple de distribución como resultado de la disminución de las velocidades de flujo. En este caso se puede aplicar la técnica estadística de análisis factorial para derivar las frecuencias relativas de ciclones abiertos y cerrados por su orden en el distribuidor. Sorprendentemente, algunas combinaciones de ciclones abiertos ocurren mucho más frecuentemente y tales combinaciones observadas se correlacionan en alto grado con el algoritmo de control de la válvula de compuerta del ciclón. Entonces se puede desarrollar un algoritmo de control mejorado para distribuir en forma más uniforme el flujo con una secuencia distinta de las válvulas de compuerta del ciclón.

Las características hidráulicas de operación de una tubería, por ejemplo la relación de la carga hidráulica y la tasa de flujo (curva HQ), depende de la densidad del fluido, la longitud de la tubería y la trayectoria a través de terreno ondulado. En el caso en que la tubería tenga la longitud suficiente como para retener partidas de productos de diferentes densidades, no resultará entonces verdadero que la pérdida de carga hidrostática se recupera. En las operaciones mineras con tuberías que descienden desde áreas montañosas a la costa, es una práctica común reducir la presión en las tuberías abriendo o cerrando las válvulas disipadoras. Así, la curva HQ característica de la tubería será diferente para cada combinación de válvulas disipadoras en operación. La tubería también puede ser operada en el modo de alimentación por gravedad o en el modo asistido introduciendo en la curva HQ una mayor dependencia de factores externos. En tales casos se puede aplicar una combinación de análisis factorial y modelo lineal para derivar las características de la curva HQ de la tubería para cada combinación posible con que opere la estación disipadora y sus bombas. El conocimiento de la curva HQ permite una planificación más eficiente de la tubería y ayuda a mantener su operación dentro de límites seguros.

METODOLOGÍA

Aunque los conceptos de técnicas estadísticas son bastante conocidos, el poder de análisis de tales técnicas queda revelado sólo cuando se usa un sistema de software igualmente poderoso. En este trabajo se utiliza el sistema R (R Development Core Team, 2012). R proporciona:

- Manejo efectivo y almacenamiento de datos incluyendo los datos faltantes.
- Visualización intuitiva, facilidades gráficas para análisis de datos y despliegue.
- Un conjunto de herramientas coherentes para el análisis de datos.

- Un lenguaje de programación simple y efectivo.

Este documento describe, a partir de la amplia gama de técnicas estadísticas disponibles en R, el uso del análisis de regresión lineal, el uso de análisis factorial y varianza y la combinación de estos dos.

Eficiencia representativa de bomba por modelo lineal

Las bombas de pulpa se desgastan, lo que causa desmejoramiento de la eficiencia. Hacer seguimiento a la eficiencia de una bomba es complicado por el hecho de que es necesario establecer una línea de base común. Hipotéticamente, si la bomba estuviera operando a su Punto de Mejor Eficiencia (BEP), el seguimiento de una eficiencia representativa de la bomba resultaría fácil. En la práctica, sin embargo, rara vez una bomba opera en su BEP. Dada la variación de la carga puede incluso operar muy lejos de su BEP. La aplicación del análisis de regresión resulta en la capacidad de inferir la eficiencia en el BEP incluso cuando la bomba no ha operado en su Punto de Mejor Eficiencia.

Curvas de bomba por número de ciclones operando

En las bombas de alimentación a ciclones el problema resulta exacerbado por el hecho de que la bomba sirve a una batería de ciclones donde el número de ciclones operando puede variar en el tiempo. Así, no sólo la tasa de flujo de la bomba varía sino también la curva del sistema que describe la pérdida de presión con el aumento de flujo. Esto se ilustra en la Figura 1 donde la presión de la batería en psi se grafica versus la tasa de flujo de alimentación de la batería en gpm.

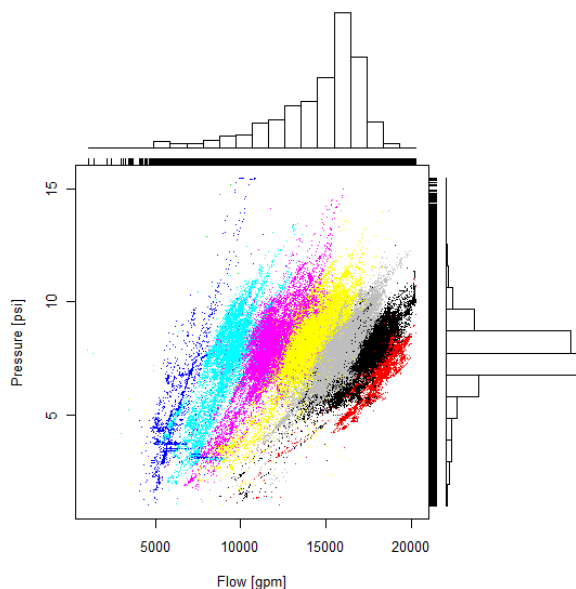


Figura 1 Curvas de bomba por número de ciclones operando

Claramente las curvas, marcadas por colores para indicar el número de ciclones abiertos en la batería, son similares pero diferentes. Dado que los ciclones se operan en paralelo, la resistencia al flujo que debe superar la bomba cae cuando hay una mayor cantidad de ciclones abiertos. Esto resulta claramente visible con 10 ciclones abiertos (rojo) la curva es la más plana, 9 (negro), 8 (gris), 7 (amarillo), 6 (magenta), 5 (turquesa), y 4 (azul) siendo la curva más empinada con la mayor resistencia.

Características adimensionales de la bomba

Se pueden derivar fácilmente los números adimensionales para caracterizar las bombas centrífugas independientemente del tamaño o tipo (Walshaw & Jobson, 1967). La interrelación entre estos números adimensionales también queda bien establecida (Van der Speck et al., 2009). Usando los mismos datos de la bomba que se muestran en la Figura 1 es entonces fácil derivar las cuatro curvas características principales de una bomba. La Figura 2 muestra un ejemplo.

- Curva de altura de la bomba, coeficiente de altura C_H versus coeficiente de flujo C_Q . Esta curva es o una línea recta en declive indicando pérdida de altura con aumento de tasa de flujo o, al incluir las pérdidas por fricción de la bomba, parte de una parábola invertida.
- Curva de eficiencia de bomba, eficiencia de bomba η versus coeficiente de flujo C_Q . La forma de esta curva depende de la forma de la curva de altura pero generalmente muestra un máximo que se identifica como el Punto de Mejor Eficiencia (BEP) de la bomba.
- La curva de potencia de la bomba, coeficiente de potencia de la bomba C_P versus coeficiente de velocidad de la bomba C_s . Esta curva es siempre una línea recta.
- La velocidad específica N_s versus velocidad de bomba C_s . En teoría la velocidad específica varía inversamente con la cuarta potencia del coeficiente de velocidad.

Por análisis de regresión de los datos de la bomba por un período de 2 días, se encontró el mejor ajuste de curva de altura (línea continua de color naranja, con un intervalo de confianza de 95% indicado con líneas punteadas). Asimismo, el gráfico de eficiencia en forma de pico puede ajustarse al modelo teórico que inmediatamente arroja el BEP. Al representar este punto BEP en la curva de altura se muestra que cae exactamente en la punta de la curva de altura. Nótese que en los conjuntos de datos individuales correspondientes a cierto número de ciclones en operación (como lo indican los colores) la bomba operaba lejos del BEP.

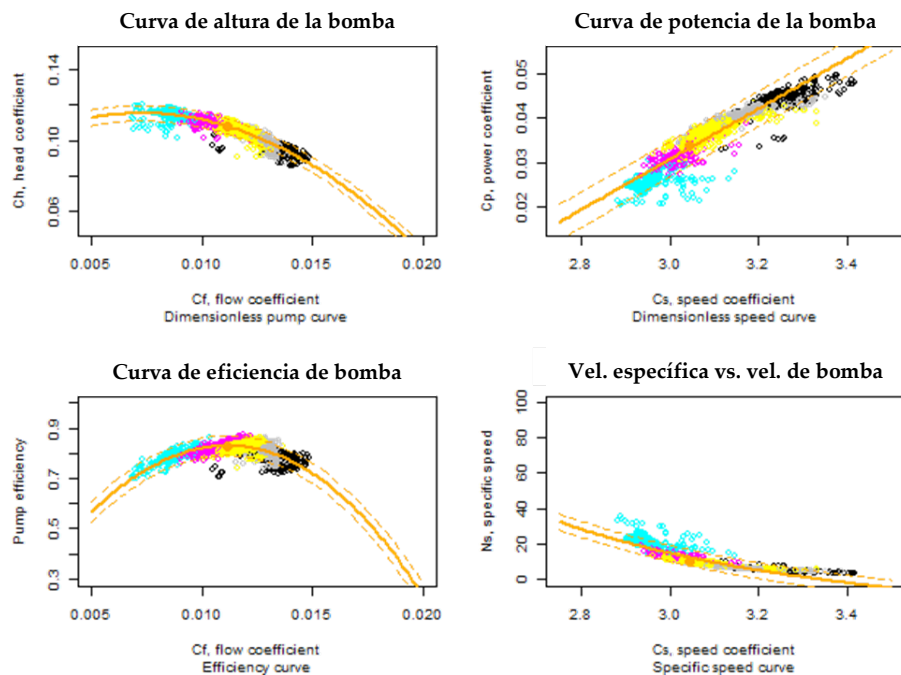


Figura 2 Cuatro representaciones de funcionamiento de la bomba

Los últimos dos gráficos a mano derecha proporcionan un buen control del análisis de regresión que se aplica sólo a los dos primeros. El BEP se determina como el máximo de la curva de eficiencia y se marca como tal con un punto de color naranja. Entonces el BEP puede representarse en la curva de altura, la curva de potencia y la curva de velocidad específica y debería caer dentro de las líneas punteadas.

Ordenamiento de ciclones en operación por análisis factorial

El control de la válvula de compuerta de la batería de ciclones generalmente se configura para mantener una presión constante de batería mientras se distribuye la utilización de ciclones lo más equitativamente posible de tal manera que no se desgaste ninguno de los ciclones en forma excesiva. La combinación particular de los ciclones abiertos no es un factor en el diseño del algoritmo de control. El distribuidor de ciclones, que distribuye el flujo de alimentación a los ciclones abiertos al flujo, es necesariamente de un tamaño mucho mayor que la tubería de alimentación. Así, el flujo disminuye dentro del distribuidor antes de ingresar a las tuberías de alimentación individual de los ciclones. En general el distribuidor no está equipado con deflectores, filtros, rompe vórtices o algún otro mecanismo que ejerza alguna influencia sobre la distribución del flujo. Así, la combinación particular de ciclones abiertos determina el patrón de flujo dentro del distribuidor, que puede llevar a que uno o más ciclones se vean confrontados a materiales más densos o menos densos o más gruesos o más finos, dependiendo de la velocidad de fluido local dentro del distribuidor. Aun cuando la tasa promedio de flujo alimentado a cada ciclón pueda ser constante, no hay garantía de que, en promedio, cada ciclón sea alimentado con material de la misma densidad o grosor.

Cálculo de combinaciones

Al tratar la posición de la válvula de compuerta como factor es posible llegar a comprender las combinaciones de los ciclones abiertos durante, por ejemplo, un período de 2 días de operación. En una batería con 14 ciclones, con 10 de ellos abiertos, existen 1001 formas distintas de distribuir el flujo dentro del distribuidor.

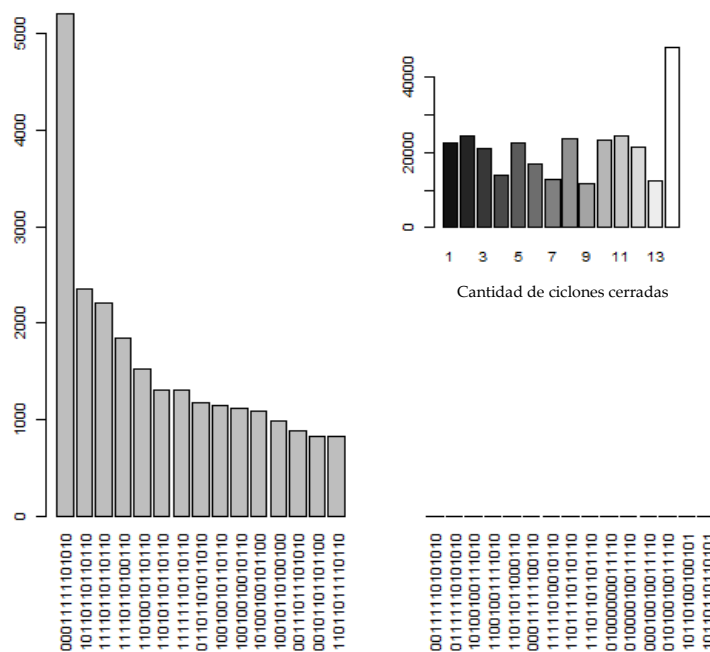


Figura 3 Contabilización de combinación de ciclones

Con un número variable de ciclones abiertos, el número de diferentes combinaciones aumenta rápidamente. Por lo tanto es extraño que la ocurrencia de algunas combinaciones de ciclones resulte mucho más probable que la de otras. Y esto es exactamente lo que el cálculo de factor muestra en la Figura 3. El gráfico muestra que, en promedio, el control de la válvula de compuerta se ajusta para distribuir en forma equitativa la carga entre los 14 ciclones, haciendo que cada uno permanezca cerrado tan a menudo como el otro con la posible excepción del ciclón #14. Sin embargo, la distribución en ciertas combinaciones es muy asimétrica. La combinación indicada por 0001111101010 ocurre unas 5000 veces en este período de 2 días, más de dos veces más a menudo que la siguiente combinación probable. Cada posición de dígito indica un ciclón del 1 al 14, un '0' indica un ciclón cerrado y un '1' un ciclón abierto. Debido a la gran cantidad de combinaciones posibles sólo se grafica la parte superior (costado mano izquierda) y la parte inferior (costado mano derecha). Nótese que el número contabilizado de veces que una combinación ocurre equivale al momento en que la combinación estaba en servicio cuando la información fue registrada por el historiador, que exportaba el informe de los ajustes de la válvula a cada minuto.

Análisis de covarianza

El análisis factorial puede llevarse un poco más lejos que a un simple cálculo de ocurrencias. Dado que para cada combinación de ciclones en operación la presión de la batería y el flujo de alimentación también están disponibles, puede entonces desglosarse la varianza de la relación entre presión y flujo por cada combinación de ciclón operando.

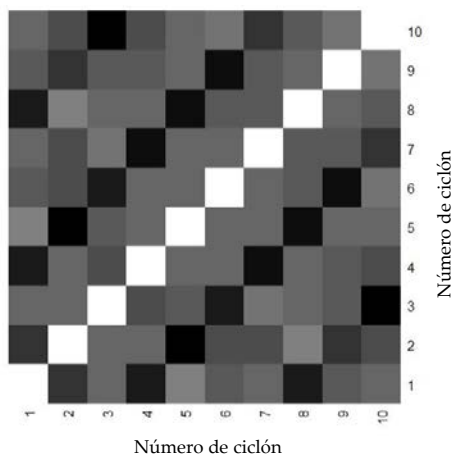


Figura 4 Covarianzas de combinaciones de ciclones.

En una batería de 10 ciclones el gráfico de "tablero de damas" que se muestra más arriba (Figura 4) muestra la covarianza escalada por la varianza, es decir, el coeficiente de correlación de las combinaciones de ciclones graficado como una matriz de niveles de gris. Los coeficientes de correlación están en el rango de +1 (blanco) a -1 (negro). La apariencia de las diagonales laterales es una característica sorprendente que se explica en este caso por el algoritmo de control de la válvula de compuertas que trata de abrir el siguiente ciclón disponible saltándose 3. Además de aumentar la confiabilidad del método de análisis factorial, el análisis de varianza covarianza puede aplicarse constructivamente ya sea para aleatorizar la distribución de las combinaciones de ciclones abiertos o para asegurar el patrón de certeza diseñado para promover un patrón de flujo en la caja de distribución que equipare la densidad y grosor de la alimentación de los ciclones individuales.

Características de la tubería

La característica hidráulica de una tubería es de primordial importancia para operarla en forma eficiente. Mientras que para una tubería de agua esta característica es una representación de la altura (H) versus el flujo volumétrico (Q), llamado por lo tanto representación HQ, en las tuberías que transportan concentrados o relaves de densidad variable se excluye el uso de la altura. En su lugar se utiliza la presión (P) y el flujo (Q).

Correlación de presión y flujo por estación

En la Figura 5 a continuación se muestra una representación de matriz de dispersión de las tasas de flujo y presión al comienzo y final de la tubería y todas las presiones de las 9 Estaciones de Medición de Presión (PMS).

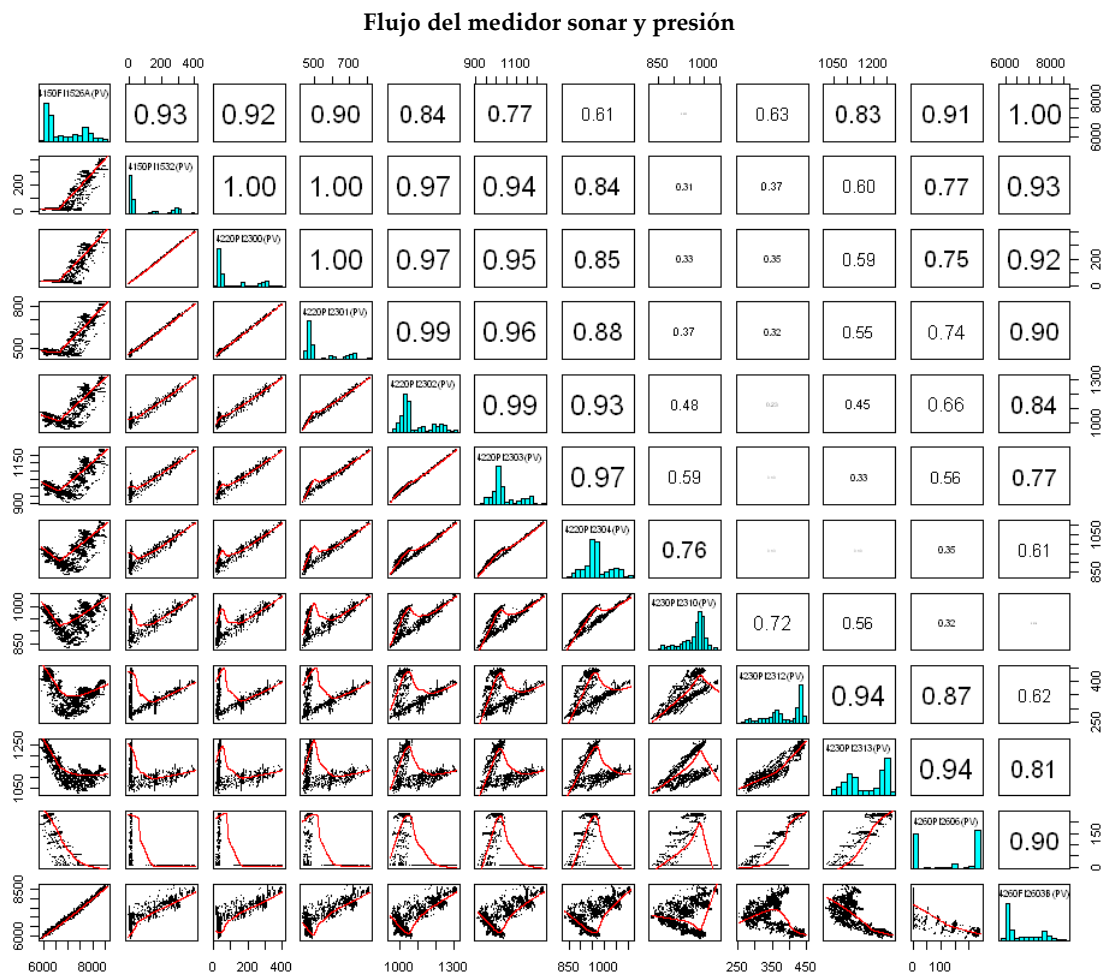


Figura 5 Matriz de dispersión de flujo y presión de tubería

El triángulo inferior de la matriz de dispersión hace un cruce de cada medición con respecto de la otra. La diagonal principal es un histograma de distribución de valores de esa variable y el triángulo superior representa el valor absoluto del coeficiente de correlación entre cada uno de ellos. La primera y última columnas de la matriz de dispersión corresponden a la tasa de flujo al comienzo y final de la tubería. Todas

las demás son presiones en diferentes estaciones PMS. El ordenamiento está en la misma secuencia que en la tubería real. A primera vista esta es una representación bastante confusa por todas las correlaciones en V de las presiones. Claramente cada línea distinta indica un modo distinto de operación en la tubería, por ejemplo, alimentación por gravedad, asistido por bomba, o a través de las distintas configuraciones de válvulas en operación de la estación disipadora. Separar los conjuntos de datos por modo de operación, muy similar a los datos de ciclón, para derivar la relación presión versus flujo por secciones de la tubería entre PMS es ahora posible.

Derivación de características de la tubería por estación

La característica de la tubería puede desglosarse por PMS y por modo de operación. En la Figura 6 a continuación se muestra la característica de cada sección entre estaciones PMS con colores para los puntos de datos individuales que indican el mismo modo de operación. La característica general de la tubería es muy similar, pero en los subgrupos PMS7 y PMS9 se revelan detalles importantes.

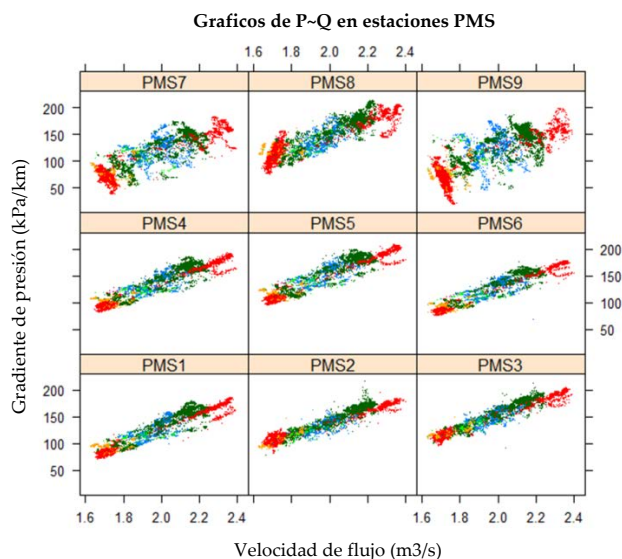


Figura 6 Características de tubería por PMS

En PMS7 y PMS9 el grupo rojo en el extremo inferior de la tasa de flujo rota fuera del plano con respecto de la tendencia general de la característica. Estas son las secciones en subida de la tubería donde durante la operación de alimentación por gravedad domina la altura como característica, produciendo un comportamiento local completamente diferente pero dependiente del modo de operación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al aplicar conocidas técnicas estadísticas en la gran cantidad de datos proporcionados por los historiadores de datos actuales se obtuvo un número de resultados que parecían "imposibles".

- Se puede hacer un seguimiento de la eficiencia representativa del punto BEP de las bombas de pulpa incluso si la bomba nunca operó en BEP.

- La distribución asimétrica de las combinaciones de ciclones en operación en contraposición a los ciclones individuales requiere ser balanceada para ayudar en el control del patrón de flujo en la distribución de la batería.
- Se detectó que la característica de una tubería de concentrado de gran longitud dependía tanto de la ubicación como del modo de operación.

Este conocimiento y comprensión de las operaciones es extremadamente valioso y puede conducir a mejorar la calidad del producto, reducir los costos de mantención y disminuir los problemas o alteraciones del proceso. Creemos que la información disponible en los historiadores de datos actuales no está del todo aprovechada. Con los avances en las técnicas de visualización de los métodos estadísticos y con la disponibilidad de instrumentos confiables para poblar los historiadores de datos, tales como los medidores de flujo no invasivos, basados en arreglo sonar con una excelente estabilidad a largo plazo, mucho puede aprenderse y ponerse en buena práctica para mejorar las operaciones.

CONCLUSIÓN

La combinación de métodos estadísticos y su visualización, la creciente confiabilidad de los datos medidos a través de instrumentos avanzados no sujetos a desgaste o roturas, y el uso de la gran cantidad de información existente en los historiadores de datos permiten lograr una comprensión sin precedentes de las operaciones mineras.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de Susan McCullough de CiDRA Minerals Processing.

NOMENCLATURA

| | |
|--------|---------------------------------|
| BEP | Punto de Mejor Eficiencia |
| PMS | Estación de Medición de Presión |
| CH | Coeficiente de altura |
| CQ | Coeficiente de flujo |
| CS | Coeficiente de velocidad |
| CP | Coeficiente de potencia |
| NS | Velocidad específica |
| η | Eficiencia |

REFERENCIAS

R Development Core Team (2012), *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Van der Spek, A.M., Maron, R.J., Rothman, P.J. and O'Keefe, C.V. (2009), 'Use of sonar flow measurement for performance and condition monitoring of slurry pumps' ("Uso de medición de flujo sonar para monitoreo de funcionamiento y condición de bombas de pulpa"), *VI International Mining Plant Maintenance Meeting (VI Encuentro Internacional de Mantenedores de Plantas) – MAPLA*, Gecamin, Santiago.

Walshaw, A.C., Jobson, A.D. (1967), *Mecánica de Flujos*, 3^{ra} edición, Longmans, Londres.