

Uso y Beneficio de la Medición de Flujo en la Operación de Espesadores de Relaves

Americo Zuzunaga¹, Alex Van der Spek², Ramon Urquiola³ y Robert Maron⁴

1. *CiDRA Minerals Processing, EEUU*

2. *ZDoor BV, Consultor, Holanda*

3. *CiDRA Minerals Processing, EEUU*

4. *CiDRA Minerals Processing, EEUU*

RESUMEN

El control de variables de procesos es crítico para el funcionamiento efectivo de una planta de procesamiento de minerales. A nivel de espesadores existen tres variables importantes de control de procesos para un desempeño efectivo. Estas tres variables se encargan de medir la tasa de flujo en tres partes distintas del espesador, a saber: en la alimentación, la descarga en el underflow y en la salida de agua clara en el overflow.

Los instrumentos para la medición de estas variables deben de ser capaces de brindar un monitoreo y medición confiable, consistente con la realidad operacional y en atención a los desafíos asociados a la configuración de la planta, tales como: tamaño de tubería, densidad, tipo de bombeo, aire arrastrado, y acceso a la tubería, además debe tener la flexibilidad para ser incorporados al sistema de control de la planta sin mayores dificultades. Este trabajo técnico revisará el funcionamiento de los espesadores comúnmente usados en la minería, y se concentrará en describir los desafíos y soluciones para la medición de flujo en las tres aplicaciones críticas mencionadas.

INTRODUCCIÓN

Los espesadores son uno de los pilares operacionales de una planta minera de gran escala. Estos se usan para aumentar el porcentaje de sólidos en los relaves con el objetivo de rescatar el agua y reusarla. La necesidad de recuperar el agua con eficiencia se ha convertido en una parte crucial del proceso de recuperación de mineral, debido a la gran cantidad de agua que se necesita en la conminución, clasificación y el ámbito social que se vive en muchas de las faenas mineras alrededor del mundo.

La adición de floculantes sintéticos ha contribuido, en gran medida, a acelerar del proceso de sedimentación y en general a hacer la operación más eficiente. Igualmente, la modernización de los espesadores junto con el desarrollo de los floculantes ha permitido continuamente que el overflow sea más claro y la densidad de la descarga en el underflow sea más alta. Estas modernizaciones combinadas con los instrumentos actuales han permitido al operador obtener más información sobre variables críticas del espesador y poder tomar acciones de control y emergencia. Como consecuencia, la instrumentación precisa se ha convertido en una necesidad para una operación moderna y rentable.

TECNOLOGÍA SONARtrac – PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

De la misma manera que un submarino arrastra un cable con sensores en el mar para medir los campos de presión y longitud de frecuencias para determinar la distancia, velocidad y características físicas de su objetivo a través de técnicas de procesamiento de señales, similarmente la tecnología SONARtrac realiza el mismo proceso para la medición de flujo y aire arrastrado.

El procesamiento de la medición de flujo por medio del sonar pasivo emplea dos técnicas distintas para la medición. La primera técnica mide el flujo volumétrico a través de un monitoreo de “remolinos” en el flujo del proceso. La tecnología de flujo sonar pasivo proporciona una medición directa de la velocidad promedio de la masa, al igual que otros flujómetros basadas en velocidad.

Conociendo el diámetro interior de la tubería, se obtiene el flujo volumétrico. La segunda técnica mide la velocidad en que el sonido se propaga a través del líquido para entregar información de la composición. La medición de la velocidad de sonido se realiza también en tiempo real, una medición directa de donde el aire arrastrado por volumen se deriva. El flujo volumétrico tanto como el aire arrastrado se puede entregar como salidas diferentes al DCS. La medida de aire arrastrado es especialmente sinérgica con el flujo volumétrico de SONARtrac en que la medición de la velocidad de sonido puede ser usada para determinar la fracción volumétrica de la mezcla doble componente, donde el volumen total del flujo puede ser ajustado a una medición de “flujo real” de la pulpa o líquido como se muestra en la Figura 1.

Industrias de procesos en todo el mundo se han percatado del valor agregado que entrega una medición de aire arrastrado en tiempo real para la optimización de procesos y aumento en las eficiencias. La medición pasiva de aire arrastrado se usa en varias industrias para corregir la medición del cálculo de la densidad desde un medidor nuclear de densidad cuando el aire arrastrado está presente, lo que posibilita un cálculo correcto de flujo másico. Dependiendo de la gravedad específica del material del proceso, hasta la presencia más pequeña de aire arrastrado en un líquido o pulpa puede causar grandes errores en la medición de densidad como se ve en la Figura 2. Tal como fue mencionado anteriormente, los ingenieros de procesos, metalurgistas y profesionales de operaciones combaten diariamente con una gama de variables que convierten la previsibilidad y control de los procesos desafiantes, por decir lo menos. Con la utilización de la tecnología de flujo de SONARtrac, dos de estos variables, flujo y aire arrastrado, ya pueden ser usados con confianza cuando uno está calculando el balance de masas en el monitoreo diario y en el control de procesos.

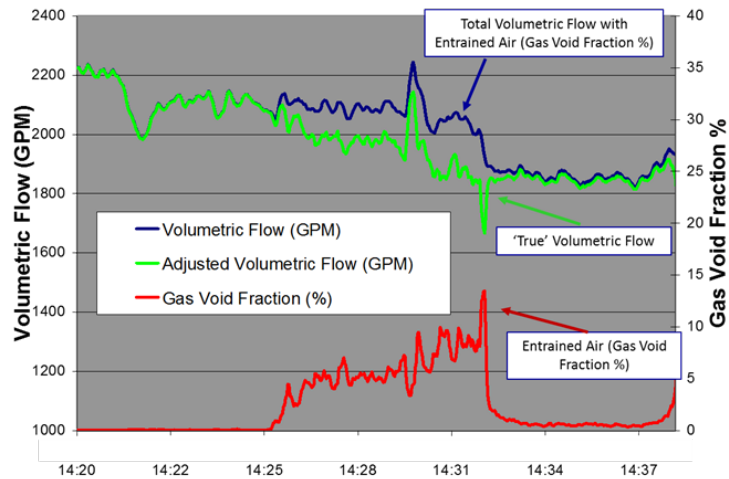


Figura 1: Medición de volumen de aire y corrección de flujo volumétrico

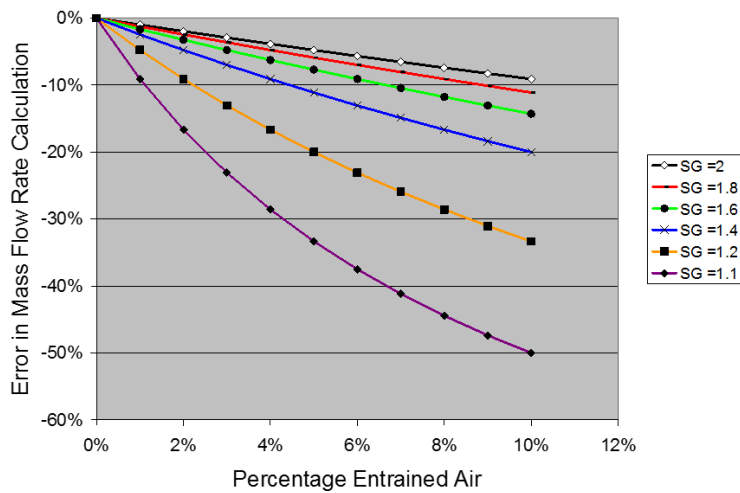


Figura 2: Medición de aire arrastrado corrige errores en densidad causado por la presencia de aire arrastrado.

OPERACIÓN DE ESPESADORES

La operación del espesador cumple la función de obtener agua clara y material espesado. Cuando se opera el espesador el material a recuperar se separa por el proceso de decantación y sedimenta al fondo del tanque, mientras que el agua clara se mantiene al tope del tanque, creando capas de separación. Los floculantes y coagulantes se utilizan para aumentar la tasa de decantación de los sólidos y aclarar el agua más rápido.

Dos mediciones de flujo, la de alimentación y la de descarga de underflow, son variables independientes comúnmente utilizadas para el control del proceso. Las variables dependientes son usadas en estrategias de control para controlar las variables independientes como por ejemplo usar la densidad para controlar la tasa de flujo en el underflow [1]. En la Figura 3 se ilustra un espesador común junto a variables dependientes e independientes.

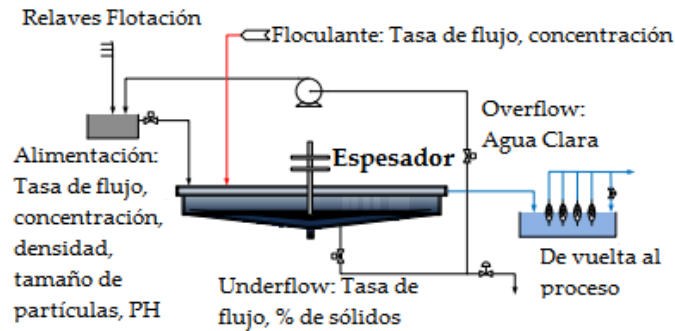


Figura 3: Espesador Común con Variables Independientes y Dependientes

ALIMENTACIÓN DE ESPESADORES

Normalmente la línea de alimentación del espesador viene de un tanque de distribución. Esta línea tiene una leve inclinación y es impulsada por gravedad, por lo tanto, es posible que la línea de alimentación este parcialmente llena. Un control de procesos adecuado conlleva la medición de flujo en la alimentación, especialmente cuando ésta se combina con la medición de densidad. La medición de densidad y la tasa de flujo volumétrico en conjunto se utilizan para calcular la tasa de flujo másico al espesador la cual es crucial para optimizar la utilización de floculante. Adicionalmente, la tasa de flujo másico de alimentación se puede usar para controles anticipados en los que se monitorea la dosificación de floculantes y coagulantes.

En general se intenta medir la tasa de flujo de alimentación con sensores de nivel en secciones donde la tubería está parcialmente llena. Con esta metodología se asume una medición de correlación con la tasa de flujo volumétrico. Como alternativa, con un flujómetro convencional se podría medir la tasa de flujo de manera precisa, confiable y sin necesidad de cálculos adicionales. Un flujómetro no invasivo de tecnología sonar puede ser utilizado en una sección de tubería llena ya que estos equipos son fáciles de instalar y livianos, lo cual es importante en esta aplicación dado el nivel de acceso y los grandes diámetros de las tuberías comúnmente usadas.

Descripción de la Aplicación

Para poder determinar la sección en la cual la tubería está llena el objetivo es calcular la distancia L para determinar en qué punto el flujo pasa de ser lleno a parcialmente lleno. En la Figura 4 se esquematizan estas variables en una configuración común. En este ejemplo hay tuberías de venteo que están abiertas a la atmósfera al igual que el tanque de distribución.

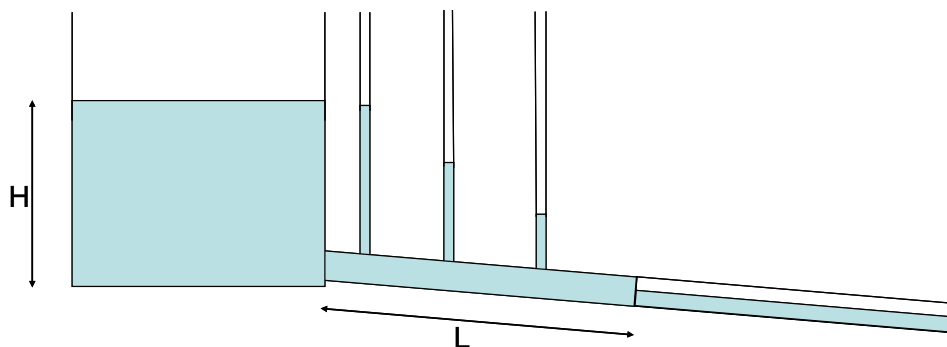


Figura 4: Alimentación de Espesador por Gravedad

Este esquema expresado de manera simple y en términos de L es una ecuación de balances [2], donde θ representa el ángulo máximo de llenura en la tubería:

$$\pi^2 \left(\frac{H}{L} + \sin \alpha \right) = \frac{\sin \alpha (\theta - \sin \theta)^3}{4 \theta}$$

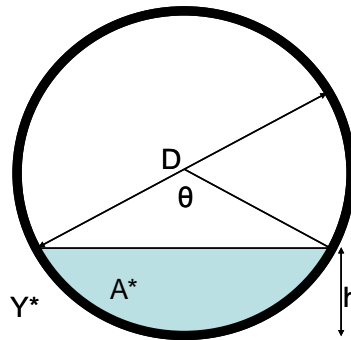


Figura 5: Variables en Tubería Parcialmente Llena

En la expresión algebraica se obtiene la relación entre H y L en la cual se observa que son proporcionales y que tienen una relación lineal. Adicionalmente, se muestra que no se necesita de otras variables desconocidas que varían de aplicación a aplicación, como el flujo volumétrico, el diámetro de la tubería, el factor de fricción y la densidad. Finalmente, el único valor desconocido es el ángulo θ . Para contrarrestar el efecto del valor desconocido se asume el ángulo θ como el “peor escenario”, es decir, el valor θ máximo que ocasiona que la distancia L sea lo menor posible, lo cual daría menos espacio para instalar el flujómetro.

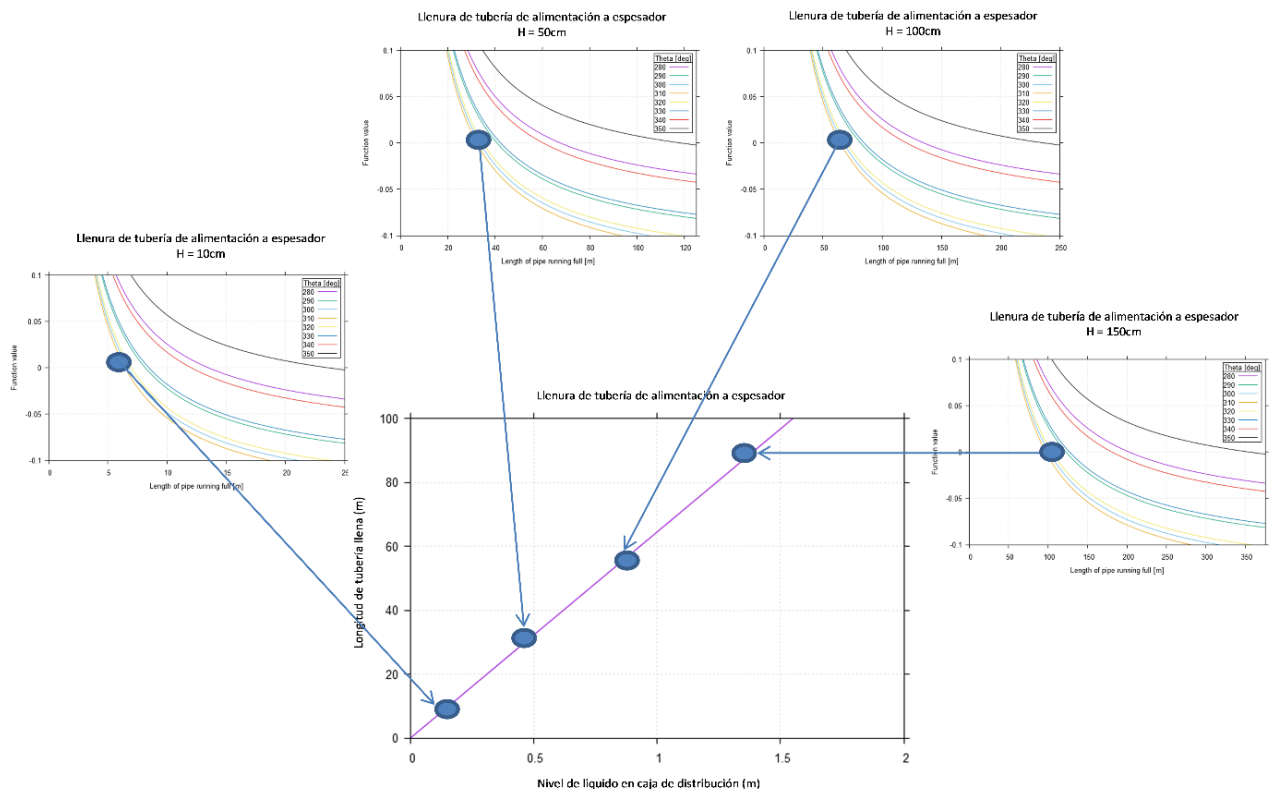


Figura 6: Soluciones para la ecuación de balance Hidráulico

Luego de establecer el “peor escenario” se procede a calcular la distancia L con diferentes niveles de llenura en el cajón de alimentación (considerando como punto cero el tope de la tubería de alimentación), dadas por el valor H. En el gráfico central se aprecia que con valores H entre 10-150 cm hay un rango de distancia L entre 10-90 metros. El resultado indica que aun asumiendo valores de

presión bajos (bajo H) hay más que suficiente distancia de tubería llena para instalar un flujómetro sonar de abrazadera.

Experiencia en Terreno

La teoría expresada anteriormente se aplicó en una mina en el centro de Chile donde se instalaron tres flujómetros de 30 pulgadas en la aplicación de alimentación de espesador. Estas tres líneas vienen de la misma caja de distribución y cada una fue instrumentada con el flujómetro SONARtrac™. La experiencia en campo permitió demostrar que es un hecho que la tubería está llena ya que el equipo sonar de abrazadera solo funciona en condiciones de tubería llena, donde se propagan los campos de presión generados por el flujo en la circunferencia completa de la tubería.

Con esta experiencia se confirmó que dado el nivel adecuado de altura de fluido en el tanque la tubería va a tener una sección llena suficientemente larga para instalar el equipo, incluso con niveles relativamente bajos en el tanque. Esta medición de flujo en tiempo real le permite al operador establecer una estrategia de monitoreo para controlar la dosificación de floculantes y coagulantes en el espesador.

Medición de Aire Arrastrado

El aire arrastrado forma parte del flujo de proceso de manera intencional o no intencional, dependiendo de la aplicación. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos la medición de flujo volumétrico se ve afectada por la presencia de aire. En algunos casos el aire arrastrado causa desviaciones en la medición mientras que en otros causa la pérdida total de la lectura. Los sensores de arreglo sonar son capaces de medir el flujo con altos niveles de aire arrastrado; adicionalmente, éstos pueden medir el porcentaje de aire arrastrado en la línea, lo cual en algunas aplicaciones puede ayudar a controlar el proceso.

Una mina en el noroeste de Canadá implementó el uso de la Fracción de Aire Arrastrado del medidor de arreglo sonar SONARtrac con el objetivo de evitar ineficiencias y cavitación en las bombas. El volumen de aire arrastrado junto a la medición de flujo volumétrico brinda al operador dos herramientas de control con el mismo instrumento. En esta aplicación, el porcentaje de aire arrastrado se mantiene entre el 6% y 8% y estos cambios coinciden con fluctuaciones en la tasa de flujo volumétrico. La relación entre estos dos parámetros indica que el aire arrastrado impacta la operación de la bomba.

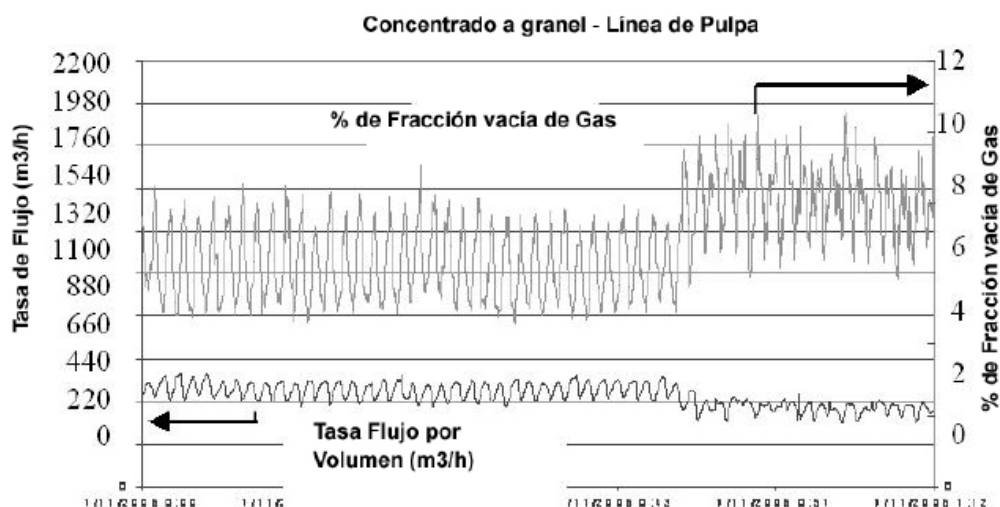


Figura 7: Relación Entre Aire Arrastrado y Tasa de Flujo Volumétrico

Para la alimentación de espesadores, la medición de aire arrastrado puede ayudar al operador en el cálculo del flujo másico que alimenta al espesador, donde se descarta el porcentaje de aire y se dosifica el floculante basado estrictamente en el flujo másico.

DESCARGA DE ESPESADOR

Los sólidos luego de ser separados se sedimentan al centro del espesador. Estos sólidos normalmente son removidos del tanque por bombas centrífugas, bombas de desplazamiento positivo o en otras ocasiones por gravedad. El flujo espesado presenta características que son difíciles de medir con medidores de flujo convencionales, características tales como la abrasividad y el alto porcentaje de sólidos. La abrasividad es problemática desde el punto de vista de mantenimiento para medidores intrusivos. Adicionalmente, el alto porcentaje de sólidos causa problemas en otros medidores no intrusivos (Ej. Ultrasónicos), dado que la densidad no permite que se reciban las señales correctamente [5].

Importancia de la Medición de Flujo Volumétrico en el Underflow del Espesador

La medición del underflow es muy útil cuando es combinada con la medición de densidad ya que permite obtener el flujo másico real en la salida del espesador. Consecuentemente, un balance de masa permite controlar el nivel de floculante que se añade al espesador, lo cual es un factor que se vuelve cada vez más importante en las nuevas generaciones de espesadores de alta densidad y tasa (High Rate Thickeners).

La medición de flujo se puede usar en estrategias de control para optimizar la operación combinada con otras variables como el nivel de la cama, la presión de la cama, la adición del polímetro y la densidad del underflow. Esto permite una estrategia de control más avanzada que lidia con múltiples variables de manera preventiva, a diferencia de control más genérico donde solo se responde a la situación de más alta prioridad [1]. La siguiente tabla ejemplifica una estrategia basada en este concepto:

<i>Underflow Density</i>	<i>Bed Level</i>	<i>Bed Pressure</i>	<i>Polymer Addition</i>	<i>Underflow Rate</i>
above target	above target	Rising	increase	increase
above target	above target	Steady	increase	increase slightly
above target	above target	Falling	no action	increase slightly
above target	on target	Rising	no action	increase
above target	on target	Steady	no action	increase slightly
above target	on target	Falling	no action	no action
above target	below target	Rising	decrease	increase
above target	below target	Steady	decrease	increase slightly
above target	below target	Falling	decrease slightly	no action
on target	above target	Rising	increase	increase
on target	above target	Steady	increase slightly	no action
on target	above target	Falling	increase slightly	no action
on target	on target	Rising	no action	no action
on target	on target	Steady	decrease slightly	no action
on target	on target	Falling	decrease slightly	decrease slightly
on target	below target	Rising	decrease	increase
on target	below target	Steady	decrease	no action
on target	below target	Falling	decrease slightly	no action
below target	above target	Rising	increase	no action
below target	above target	Steady	increase	decrease
below target	above target	Falling	decrease slightly	decrease
below target	on target	Rising	no action	no action
below target	on target	Steady	no action	decrease
below target	on target	Falling	decrease slightly	decrease
below target	below target	Rising	no action	decrease slightly
below target	below target	Steady	decrease slightly	decrease
below target	below target	Falling	decrease	decrease

Figura 8: Ejemplo de Estrategia de Control Utilizando Tasa de Flujo en el Underflow

Solución Probada en Faena Minera

Es importante elegir la instrumentación adecuada para mantener la disponibilidad de la medición. Los equipos de arreglo sonar no tienen partes móviles y no entran en contacto directo con el proceso

lo cual hace que la necesidad de mantenimiento sea prácticamente nula. Adicionalmente, este equipo no requiere que se añada gel de acoplamiento, por lo que mantiene la integridad de la señal por largos periodos de tiempo. En un estudio de distintos flujómetros no invasivos y semi-invasivos para aplicaciones en la minería se determinó que equipos de tecnología sonar de abrazadera son ideales para aplicaciones abrasivas y de alta densidad de sólidos debido a que éstos no son invasivos y requieren muy bajo mantenimiento [5].

El medidor de arreglo sonar ha mostrado la capacidad de medir en pulpas de alto porcentaje de sólidos y no-Newtonianas. En la siguiente experiencia en una faena minera del norte de Chile se muestra una secuencia en la que el flujómetro SONARtrac mide una transición de agua a pulpa de alta concentración que empieza a 2 m/s, luego bajando a 1.2 m/s hasta que la disminución en la velocidad obstruyó la tubería a 0.5 m/s. Luego que se tapó la cañería se procedió a destapar con flujo de agua clara. En esta prueba en particular se contrastó la medición de flujo con un aforo midiendo el nivel del estanque con el objetivo de verificar la precisión de la lectura. La Figura 9 muestra los resultados de la prueba:

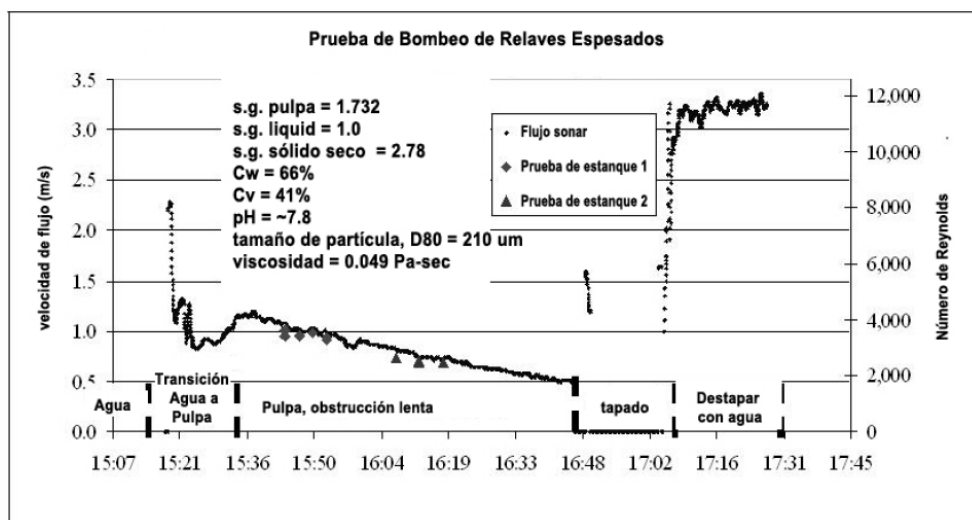


Figura 9: Medición de Flujo de Relaves Espesados

SALIDA DE AGUA CLARA EN EL OVERFLOW

El agua recuperada de los relaves se retira por un canal en el área periférica alrededor de la circunferencia del espesador. Esta agua recuperada luego sale del espesador y normalmente se transporta a un tanque o va directamente de vuelta al proceso.



Figura 10: Salida de Agua Clara en Espesador por Canal Periférico

La combinación del alto uso de agua en el proceso metalúrgico junto con la ubicación remota de muchas de las minas hoy en día hace que la recuperación de agua sea un parámetro importante para la operación. Consecuentemente muchos operadores instrumentan esta línea con una medición de flujo para obtener información a tiempo real de uno o más espesadores.

Medición de Flujo Volumétrico

La medición de flujo en esta aplicación tiene dos características distintivas que están relacionadas y que afectan directamente la elección del instrumento adecuado, son ellas el volumen y el tamaño de la tubería. Debido a que el tamaño normal de los espesadores usados en la minería puede llegar a ser hasta más de 125 metros de diámetro, el volumen de agua clarificada en el proceso es alta. En plantas de alta capacidad es común que haya múltiples espesadores que alimentan un tanque del cual se transporta el agua clara de vuelta al proceso. Para procesar este alto volumen se llegan a usar tuberías de hasta 54 pulgadas. Por lo tanto, además de la precisión del instrumento, se debe considerar el peso y la facilidad de la instalación como un factor importante para elegir el flujómetro. Basado en estas características, los flujómetros de arreglo sonar tienen las características de ser ligeros y fáciles de instalar [5] al igual que altamente precisos, lo cual los hace óptimos para esta aplicación.

Experiencia en Terreno

Flujómetros de arreglo sonar han sido instalados en varias faenas mineras para líneas de agua de gran diámetro. Una instancia relevante fue la instalación de un flujómetro SONARtrac de 48 pulgadas en una mina ubicada en el sur de Perú. Este flujómetro en particular fue en su momento el más grande instalado en el Perú y dada la criticidad del balance de agua que alimenta esta planta, el equipo se instaló en una línea de agua recuperada. El agua recuperada viene de cuatro espesadores y se transporta a un tanque distribuidor. En esta aplicación, seis bombas trabajan dependiendo de la necesidad de agua para alimentar las líneas. El agua luego procede a ser redistribuida en los molinos y la flotación.

Una característica importante en esta experiencia fue que no hubo necesidad de perforar la tubería o parar el proceso para instalar el equipo, lo cual hubiese sido necesario con otros flujómetros comunes. Como consecuencia, fue la primera vez que se instrumentó esta aplicación con medición de flujo.

CONCLUSIONES

1. La medición de la tasa de flujo volumétrico permite al operador controlar otras variables y monitorear el desempeño del espesador.
2. Cada aplicación tiene desafíos distintos que afectan la decisión sobre el instrumento a utilizar, en particular para los flujómetros, ya que hay parámetros claves que varían entre las aplicaciones tales como: la densidad, el nivel de llenura, el flujo mínimo/máximo, el tamaño de la tubería, el acceso al punto de instalación y la necesidad de mantenimiento.
3. A nivel del espesador se observan diferentes parámetros en las tres mediciones de flujo comúnmente usadas. Considerando las características de los flujómetros de arreglo sonar, estos muestran buena compatibilidad con las aplicaciones, observándose en la teoría y en las pruebas en campo.

REFERENCIAS

- [1] F. Schoenbrunn, F. Hales, L. and D. Bedell (2002). Mineral Processing Plant Design, Practice and Control, volume 2, chapter Strategies for instrumentation and control of thickeners and other solid-liquid separation circuits, pp. 2164–2173. SME.
- [2] Van der Spek A., Maron R., Zuzunaga A. (2016), 'Thickener Feed Flow Measurement in Partially Full Pipe', CiDRA Minerals Processing.

- [3] Wills B., Finch J (2015), 'Mineral Processing Technology', *Dewatering*, Eight Edition, pp. 417-437.
- [4] Ojeda P., Torres L. (2014), 'Intelligent Control of an Industrial Thickener'. Santa Maria University.
- [5] Zuzunaga A., Maron R. (2013), 'A survey of non-invasive and semi-invasive flow meters for mining applications: Understanding and selecting the right technology for the application', CiDRA Minerals Processing.
- [6] O' Keefe C., Maron R., Rothman P., Poplawski J. (2008), 'Descripción de la Tecnología Basada en Arreglo Sonar No Invasivo y su Aplicación a Medición de Flujo en Pulpas y Pastas Únicas y Complejas', CiDRA Minerals Processing.
- [7] Feeding a Thickener for Good Settling and Underflow Density & Overflow Clarity. (2017, March 17). Retrieved October 27, 2017, from <https://www.911metallurgist.com/blog/feeding-thickener-settling-underflow-density-overflow-clarity>.