

## **MEDICION DE FRACCION DE VOLUMEN DE GAS Y TASA DE FLUJO CON SISTEMA DE ABRAZADERA Y DETECCION SONAR EN APLICACIONES INDUSTRIALES**

Daniel L. Gysling, CiDRA Corporation  
Douglas H. Loose, CiDRA Corporation  
Alex M. van der Spek, ZDoor BV

---

### **1 RESUMEN**

Se describe una tecnología de medición de tipo abrazadera y de detección sonar para la medición simultánea de la tasa de flujo volumétrico y la velocidad del sonido del flujo. La tecnología expuesta utiliza técnicas de procesamiento de generación sonar para realizar dos mediciones independientes que caracterizan el flujo del proceso, cada una de ellas adecuada para flujos únicos y de multifase. Primeramente el medidor entrega el flujo volumétrico midiendo la velocidad a la que las presiones generadas por el flujo en condiciones normales convectan en un arreglo de sensores abrazados a la cañería de proceso. Por otra parte, el medidor entrega información de composición al medir la velocidad a la que se propagan las ondas de sonido normalmente a través del flujo de proceso utilizando los mismos sensores de abrazadera. Medir la velocidad del sonido de un flujo de proceso utilizando esta técnica sonar es análogo a medir la densidad del flujo de proceso y además tiene muchas aplicaciones basadas en su composición. Un ejemplo básico de esto es utilizar la velocidad de sonido del proceso para medir con precisión la cantidad de gases atrapados en mezclas continuas de líquido.

La capacidad de medir el flujo volumétrico y la velocidad del sonido del proceso en forma confiable y precisa en aplicaciones únicas y de multifases con un instrumento no invasivo y de abrazadera mejora de manera significativa la observabilidad de muchos procesos industriales. La información se presenta a partir de mediciones del flujo volumétrico obtenidas a través de técnica sonar y de mediciones de composición obtenidas a partir de la velocidad del sonido para un amplio rango de aplicaciones industriales, desde las de aplicaciones líquidas de fase única a aplicaciones de gran diámetro y abrasivas de multifase, que son reconocidas como complejas y que representan un gran desafío a las técnicas de medición de flujos mayores.

### **2 INTRODUCCIÓN**

La medición del flujo volumétrico es crítica en el control de proceso y la optimización de la mayoría de los procesos industriales. El mercado industrial actual de medición de flujo se clasifica a menudo en dos categorías basadas en las tecnologías empleadas: la de tecnología antigua y la categoría de nueva tecnología. Los flujómetros de antigua tecnología incluyen tecnologías de medición que han estado en uso por más de 70 años, entre ellas, la medición por turbinas, placas de orificios y flujómetros de área variable. Los flujómetros de nueva tecnología incluyen tecnologías emergidas durante los últimos 30 a 50 años. Estas últimas ofrecen generalmente ventajas sobre las antiguas en rendimiento, funcionalidad y confiabilidad. Los flujómetros principales que han incorporado la nueva tecnología incluyen los medidores de ultrasonido, flujómetros electromagnéticos, medidores de flujo de vórtice y flujómetros de Coriolis. Cada tipo ha evolucionado para poder cubrir las necesidades de los muy diversos rangos de aplicaciones dentro del campo de la medición de flujo industrial.

Este ensayo describe la tecnología de flujómetro que utiliza técnicas<sup>1</sup> sonares para escuchar e interpretar los campos de presión generados por la turbulencia del flujo en la cañería. La tecnología de medición de flujo sonar representa una nueva clase de flujómetros industriales

que utilizan principios de medición distintos de las tecnologías existentes. Los flujómetros sonares fueron introducidos a la industria del gas y petróleo en 1998 para ser utilizados en las mediciones de flujos de perforaciones descendentes de multifase<sup>2 3</sup>. La tecnología de medición sonar de flujo se usa actualmente en otras industrias como pulpa y papel, minería y minerales, hidrotransporte, químicos y generación de energía.

El proceso de aeración, a menudo un fenómeno no deseado pero inevitable, impacta negativamente la calidad del producto o la habilidad de determinar la tasa de flujo con precisión. Por ejemplo, el aire atrapado en el delgado flujo a la caja de anclaje de una máquina elaboradora de papel puede provocar pequeñas perforaciones en el papel producido o, lo que es peor, puede causar roturas que obliguen a una pérdida de producción. El aire atrapado constituye un problema tan generalizado en la industria del papel<sup>4</sup> que se utilizan medios mecánicos y químicos para eliminarlo del proceso. Asimismo, en la producción de crudo, el arrastre de gas en la salida de líquido de un separador de dos fases daña la medición de la tasa neta del flujo de petróleo ya que el cortador de agua se ve afectado por la presencia de gas libre. Es bien sabido que los errores que resultan en la tasa neta de petróleo pueden ser causados casi en un 100% por un pequeño error en el corte de agua.

Muy a menudo, sin embargo, la aireación es una parte integral del proceso de producción y el contenido de aire o gas debe ser mantenido dentro de ciertos límites. A modo de ejemplo, la inyección de una pequeña cantidad de aire en las cañerías de hidrotransporte del procesamiento de arenas asfálticas inicia la separación de petróleo y arena. Asimismo, en la separación de roca y minerales en las celdas de flotación, el gas es aspersado al fondo de la celda y el gas retenido en las celdas debe ser controlado para optimizar la separación por gravedad de la roca y el mineral.

Las técnicas sonares que permiten la interpretación de las presiones de ocurrencia natural en los campos interiores de una cañería también son apropiadas para determinar la velocidad de propagación de campos de presión acústica. La velocidad del sonido determinada así es un indicador muy sensible del proceso de aireación y ofrece una alternativa superior a los analizadores mecánicos de toma de muestras existentes actualmente.

La metodología implica la caracterización de la velocidad a la cual las ondas coherentes de presión, ya sea en estructuras vortiginosas o campos de presión acústica, convectan en un arreglo axial de sensores utilizando técnicas de formación de haz desarrolladas a lo largo de varias décadas para aplicaciones acústicas submarinas. Dado que las estructuras vortiginosas coherentes son una característica inherente a las capas limítrofes turbulentas, no se requiere de geometría interna para generar estas estructuras. De la misma manera, en la mayoría de los procesos industriales, la proximidad de bombas, compresores, válvulas o tubos acodados asegura que no sea necesario contar con una fuente de sonido. Por lo tanto, la medición sonar es totalmente pasiva y puede ser realizada utilizando un arreglo de sensores montado en el exterior de la cañería. Al no necesitar elementos soldados, la tecnología de medición sonar de flujo es muy apropiada para las puplas abrasivas y corrosivas que se encuentran tan frecuentemente en muchas aplicaciones.

### **3 MEDICION DE LA TASA DE FLUJO**

La gran mayoría de los flujos existentes en los procesos industriales involucran flujos turbulentos. Las fluctuaciones de turbulencia dentro del flujo del proceso gobiernan muchas de las propiedades de flujo que son de interés práctico, incluyendo la caída de presión, transferencia de calor y mezcla. Por estas razones, los flujos turbulentos en las cañerías han sido estudiados a través de los años, remontándose sus inicios a Osbourne Reynolds y Lord Rayleigh a fines del siglo 19<sup>5</sup>.

### 3.1 Flujo Turbulento en Cañería

En aplicaciones de ingeniería, la sola consideración de las propiedades promedio de los flujos turbulentos es generalmente insuficiente para efectos de diseño. En la tecnología de medición sonar de flujo, la comprensión del tiempo promedio del perfil de velocidad del flujo turbulento proporciona un medio de interpretar la relación entre la velocidad y la convección

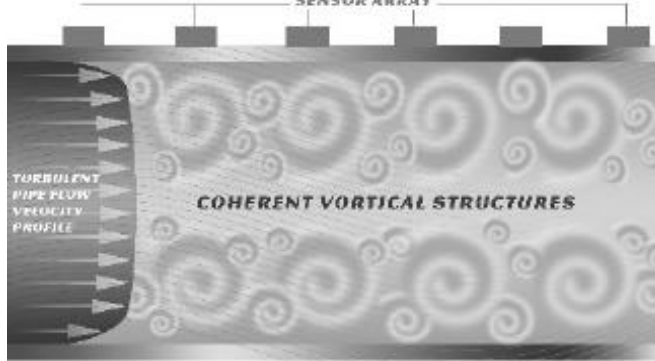


Figura 1: Estructuras coherentes en flujos turbulentos.

de las estructuras coherentes y la tasa volumétrica promedio del flujo dentro de una cañería. En los flujos turbulentos, el tiempo promedio de la velocidad axial varía con la posición radial desde cero en la pared a un máximo en la línea central de la cañería. El flujo cercano a la pared se caracteriza por altas gradientes de velocidad y transiciones a flujos relativamente uniformes en el núcleo cuando se aproxima al centro de la cañería.

La Figura 1 muestra un perfil de velocidad y las estructuras de flujo vorticales coherentes presentes en un flujo turbulento completamente desarrollado en la cañería.

Las estructuras vorticales se superponen sobre el tiempo promedio del perfil de velocidad dentro de la cañería y contienen fluctuaciones temporales y aleatorias de espacio con magnitudes típicamente menores que el 10% de la velocidad media del flujo. El número de Reynolds (Re), que se basa en el diámetro de la cañería (D), caracteriza muchas de las propiedades de ingeniería del flujo. El número de Reynolds es una razón no dimensional que representa la importancia relativa de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas dentro de un flujo: Los flujos en la cañería con números de Reynolds que excedan un valor crítico, generalmente 2300, son turbulentos. Aquéllos con números de Reynolds por debajo de este valor, son considerados flujos laminares. La gran mayoría de los flujos en los procesos industriales resulta turbulento, con valores de número de Reynolds que exceden por mucho el valor crítico.

Además de demarcar un límite entre los sistemas de flujo laminar y turbulento, el número de Reynolds es un parámetro de similitud para los flujos, es decir, los flujos en cañerías geoméricamente similares, escaladas con el radio, que tengan un mismo número de Reynolds, son dinámicamente similares. Algunos estudios empíricos han demostrado que los perfiles de velocidad en los flujos turbulentos en cañerías quedan bien representados por 1 elevado a  $n$  de la ley de potencias

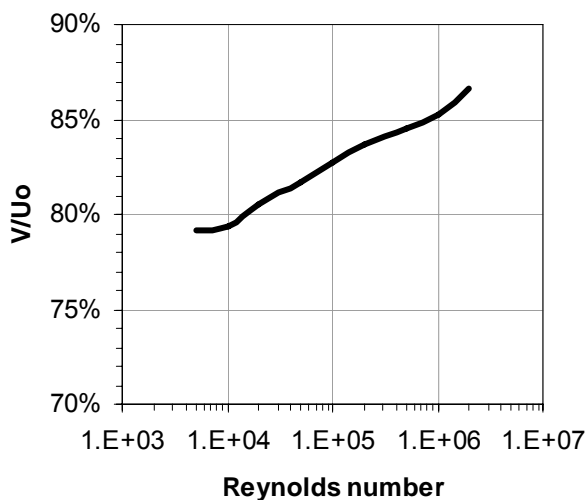


Figura 2: Velocidad media normalizada por la Velocidad Máxima vs Número de Reynolds.

$$\frac{u(r)}{U_0} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n}$$

con un valor de  $n$  entre 6 y 10 como función débil del número de Reynolds. Desde la perspectiva de la medición, el promedio volumétrico de la velocidad de flujo,  $V$  (significa Velocidad), o la tasa del volumen dividido por el área seccional cruzada interna de la cañería, resultan muy interesantes. En la Figura 2 se muestra la relación entre la razón  $V/U_0$  y el número de Reynolds, la que se basa en la ley de potencias (1).

Aparentemente la razón de la velocidad media del flujo a la máxima velocidad aumenta levemente desde un valor cercano al 80% exactamente sobre el número de Reynolds crítico para que un flujo sea turbulento hasta valores por sobre 85% a un número de Reynolds por sobre un millón. Esta situación debe ser destacada ya que dado el perfil de velocidad (1), muy poco fluido fluye realmente a velocidad media.

### 3.2 Estructuras Coherentes Turbulentas

Los flujos turbulentos son altamente complejos. La predicción de los detalles de cualquier flujo turbulento es uno de los mayores problemas sin resolver que nos presenta la naturaleza. Sin embargo, mucho se sabe acerca de las propiedades estadísticas del flujo. Por ejemplo, los flujos turbulentos en las cañerías contienen remolinos autogenerados, estructuras vorticales coherentes. La máxima longitud de estos remolinos escala con respecto del diámetro de la cañería. Estas estructuras permanecen coherentes durante varios diámetros de la cañería en flujo descendente, eventualmente disgregándose en remolinos progresivamente más pequeños hasta que la energía es disipada por los efectos de la viscosidad. Las investigaciones experimentales han establecido que los remolinos generados dentro de las capas límite convectan a un 80% de la velocidad máxima de flujo<sup>6</sup>. En los flujos de cañerías esto implica que los remolinos turbulentos harán convección a aproximadamente el promedio volumétrico de la velocidad del flujo dentro de la cañería. La relación precisa entre la velocidad de convección de los remolinos turbulentos y la tasa de flujo de cada clase de medidor puede ser calibrada empíricamente según se describe más adelante.

### 3.3 Determinación de las características de un campo de presión inestable

La metodología de medición sonar de flujo usa la velocidad de convección de la estructura coherente con los flujos turbulentos en la cañería para determinar la tasa de flujo volumétrico. La velocidad de convección de estos remolinos se determina aplicando las técnicas de procesamiento de generadores sonares para definir la velocidad a la que los remolinos convectan el generador axial de las mediciones distribuidas a lo largo de la circunferencia exterior de la cañería. Los algoritmos basados en la técnica sonar determinan la velocidad de los remolinos al caracterizar la frecuencia temporal y espacial del campo de flujo. En una cadena de remolinos coherentes haciendo convección a través de un arreglo de sensores fijos, la frecuencia temporal y espacial del contenido de fluctuación de presiones se relaciona de la siguiente manera:

$$\omega = kv \quad (2).$$

Este es el número de onda, definido como  $k=2\pi/\lambda$  (1/m), donde  $\omega$  es la frecuencia temporal (rad/s) y  $v$  es la velocidad de convección de las fluctuaciones de presiones inestables. Así, mientras más corta la longitud de la onda, mayor será  $k$  y más alta la frecuencia temporal.

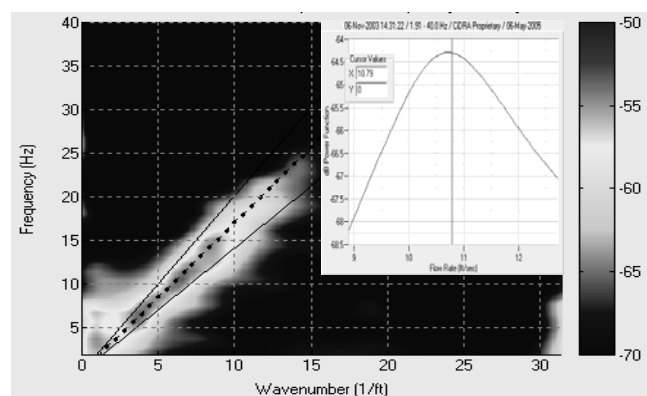


Figura 3: Campo k-w mostrando la cresta convectiva

relación de dispersión desarrollada más arriba. Esta región se conoce como la “cresta convectiva”<sup>7</sup> y la declinación de esta cresta a un campo k-w indica la velocidad de

En el procesamiento del arreglo sonar, el contenido espacial – temporal de tiempo estacionario de los campos de sonido generalmente se indica como “campos k-w”. Los campos k-w son esencialmente dos espectros de potencia dimensional en los que la potencia de un campo de presión está descompuesta en parcelas más pequeñas que corresponden a números específicos de ondas espaciales y frecuencias temporales. En un campo k-w, la potencia asociada con un campo de presión que convecta con el flujo se distribuye en regiones que satisfacen la

convección del campo de presión. Esto sugiere, por lo tanto, que la velocidad de convección de los remolinos turbulentos y por lo tanto de la tasa de flujo dentro de una cañería, puede determinarse construyendo un campo k-w desde la salida de un arreglo de sensores de fases e identificando entonces el declive de la cresta de convección. La Figura 3 muestra un ejemplo de un campo k-2 generado a partir de un arreglo de transductores de fase escuchando el flujo de agua de una cañería de 16 pulgadas a aproximadamente 350 l/s. Los contornos de potencia muestran una cresta de convección bien definida. Se utilizó un método de optimización de parámetros para determinar la línea más representativa de la declinación de la cresta. En este caso se determinó un declive de 3,2 m/s. El resultado intermedio del procedimiento de optimización se muestra en el inserto, indicando que el valor optimizado es único y constituye un máximo muy bien definido.

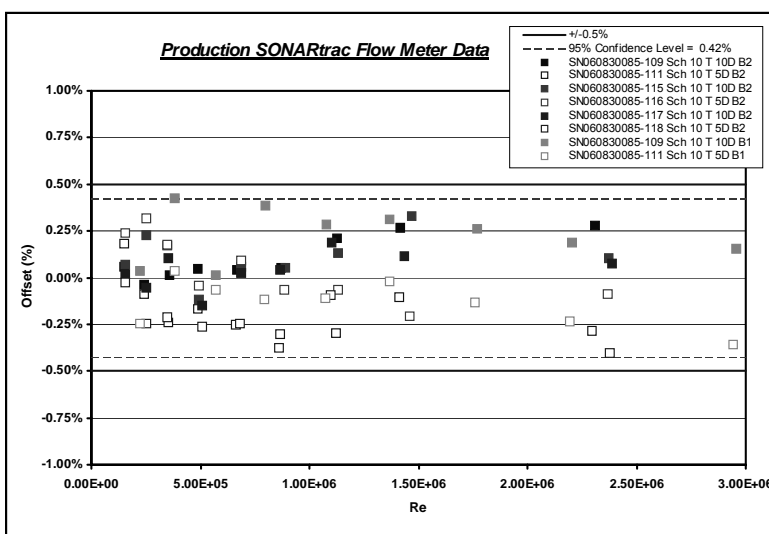
### 3.4 Calibración del Flujómetro Sonar

El campo k-w que se muestra en la Figura 3 ilustra el principio fundamental que yace detrás de las mediciones sonares de flujo, principalmente que los arreglos axiales de transductores pueden usarse junto con las técnicas de procesamiento sonar para determinar la velocidad en la que los remolinos turbulentos que ocurren en forma natural dentro de una cañería convectan. El siguiente paso es cuantificar la relación entre la velocidad de los remolinos turbulentos y la tasa promedio de flujo volumétrico dentro de la cañería.

Para evaluar cuantitativamente esta relación, se probaron varios flujómetros sonares similares con diámetros entre 4 y 16 pulgadas con agua a una calibración de flujo entre un rango de 1,5 a 1500 l/s. La velocidad de convección se determina utilizando técnicas sonares, normalizada por la tasa de flujo volumétrica promedio suministrada por la calibración como una función del número de Reynolds entre un rango de 99% a 102% de la tasa de flujo volumétrico promedio sobre el rango completo de la prueba. Una calibración basada en un número de Reynolds de bajo orden se desarrolló a partir de esta información para esta clase de medidores. La ecuación de calibración se desarrolla en términos de ajuste relativo del medidor sonar a partir del medidor de referencia. El ajuste relativo  $\Delta$  es único para cada tamaño de medidor sonar dado por (3), en términos del número de Reynolds  $Re$  y un conjunto de tres coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ .

$$\Delta = C_1 + \frac{C_2}{Re^{C_3}} \quad (3).$$

La Figura 4 muestra la diferencia relativa de la tasa de flujo volumétrico medido por el medidor sonar calibrado y el flujo de referencia parcelado versus el flujo de referencia. La información de calibración fue registrada para los flujómetros sonares con las velocidades volumétricas promedio en un rango de 1-10 m/s. Utilizando un número de calibración de Reynolds único (4) extendiendo el rango de operación de los tres flujómetros de diferentes



tamaños, el flujómetro sonar midió la tasa de flujo volumétrico a una precisión dentro del 0,5%. Es importante destacar que una medición de flujo con esta aproximación no tiene limitaciones de tamaño fundamentales y debería ser aplicable a flujos turbulentos en cañerías de todos los tamaños y con todo tipo de números de Reynolds. Aun más, la ley de la similitud sugiere, como lo ratifica la información de la Figura 4, que la

Figura 4: Información de calibración.

relación entre la velocidad de convección y la tasa de flujo entre medidores geoméricamente similares de cualquier tamaño será gobernada por la calibración basada en el mismo número de Reynolds. Puede concluirse de la información presentada que el 95% de nivel de confianza de las mediciones de flujo sonares equivale al 0,42%.

### 3.5 Aplicaciones Industriales

Por un período de más de dos años, se han venido desarrollando muchas aplicaciones industriales de las mediciones sonares de flujo en estrecha cooperación con los usuarios finales. Las aplicaciones industriales deben encontrarse donde las capacidades del medidor de principios sonares en términos del sistema de abrazadera, la no intrusión y la capacidad de actuar en perforaciones de gran tamaño, resulten en ventajas indiscutibles con respecto del costo del ciclo de vida útil, confiabilidad o la imposibilidad de hacer que cualquier otro instrumento realice la medición. Se pueden nombrar algunos ejemplos como:

- Hidrotransporte de arena asfáltica<sup>8</sup>.
- Flujos gruesos en la industria de pulpa y papel<sup>9</sup>.
- Transporte aéreo de material particulado.
- Flujo de agua y aceite de dos fases<sup>10 11</sup>.
- Procesamiento de aguas servidas.
- Flujo de pastas de revestimiento.
- Flujo de magnetita en el procesamiento de minerales.

Todos estos ejemplos de flujos industriales se caracterizan por su naturaleza abrasiva y/o corrosiva. En muchos casos esto obliga al uso de materiales especiales en la construcción de las cañerías o bien el revestimiento de las mismas (Teflón, goma, concreto). El fenómeno de la fluctuación de presiones inducida por la elongación de la circunferencia de las cañerías es universal e independiente de la naturaleza precisa del material de la cañería o su revestimiento. Como resultado, una medición sonar puede, en la mayoría de los casos, ser aplicada sin detener el proceso, sin cortar la cañería y sin elaborar procedimientos operacionales o medidas adicionales de seguridad.

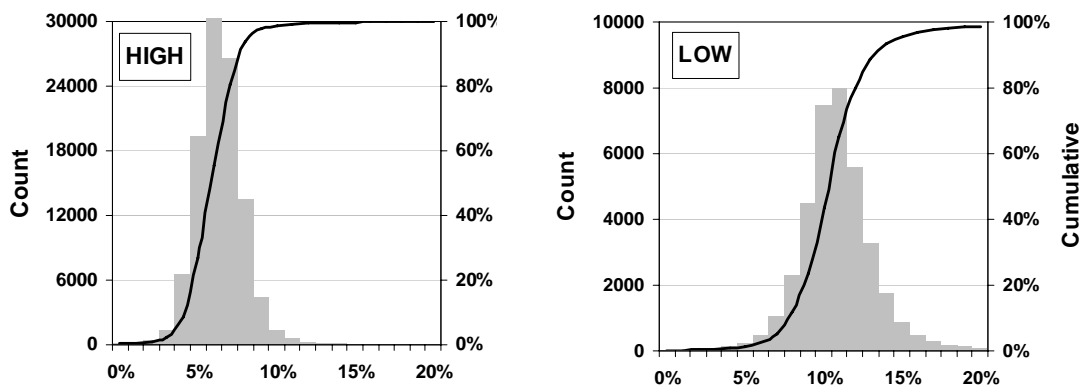


Figura 5: Distribución de frecuencia del ajuste relativo del sonar versus medidor magnético.

En algunos casos particulares el principio de operación del medidor sonar presenta una dificultad de calibración inherente al principio de medición tradicional. Por ejemplo, en la medición de flujo de suspensiones de magnetita realizada por medidores electromagnéticos, la naturaleza ferromagnética de las partículas suspendidas afecta la calibración del medidor. Como resultado el medidor puede descalibrarse por la concentración de magnetita. La Figura 5 muestra dos distribuciones de frecuencia relativamente diferentes entre una medición sonar de flujo y una electromagnética para suspensiones con alta densidad de magnetita ( $1,70 \text{ kg/dm}^3$ ) y para suspensiones con baja densidad de magnetita ( $1,65 \text{ kg/dm}^3$ ) en el flujo de alimentación de una serie de celdas de flotación reversa. Como en este ejemplo específico ninguno de los medidores fue anulado con respecto del otro, tanto el histograma de alta densidad como el de baja densidad pueden ser utilizados como referencia para el otro. Se observa que la diferencia entre los dos medidores, sonar y electromagnético, se ha

modificado en un 5% con la variación de la concentración de magnetita. Se cree que esto se debe al hecho de que la calibración del flujómetro electromagnético depende de la concentración real de magnetita en el flujo. Un flujómetro que no sea afectado por la acumulación de fluidos fluyendo y cualquier particulado contenido constituye realmente una clara ventaja. Debe indicarse que en otros casos comparables, donde había material particulado no magnético suspendido en el fluido, la diferencia entre el medidor sonar y el electromagnético no fue afectada por la densidad.

#### 4 MEDICION DEL CONTENIDO DE GAS

Usando una plataforma metálica similar, y en algunos casos la misma, es posible medir la velocidad de sonido de las ondas acústicas que se propagan en la cañería de proceso. La propagación de ondas acústicas ocurre a frecuencias muy por sobre el dominio de frecuencia de las fluctuaciones de presiones vorticales, por lo tanto, el mismo proceso sonar puede aplicarse para determinar la velocidad acústica y la velocidad vortical, al mismo tiempo. La relación entre la velocidad del sonido en una mezcla de dos fases y la fracción de fase volumétrica es bien conocida en el caso que la longitud de onda del sonido sea mayor que el diámetro de la cañería y, por lo tanto, significativamente mayor que cualquier proceso de homogeneidad, como es el caso de las burbujas.

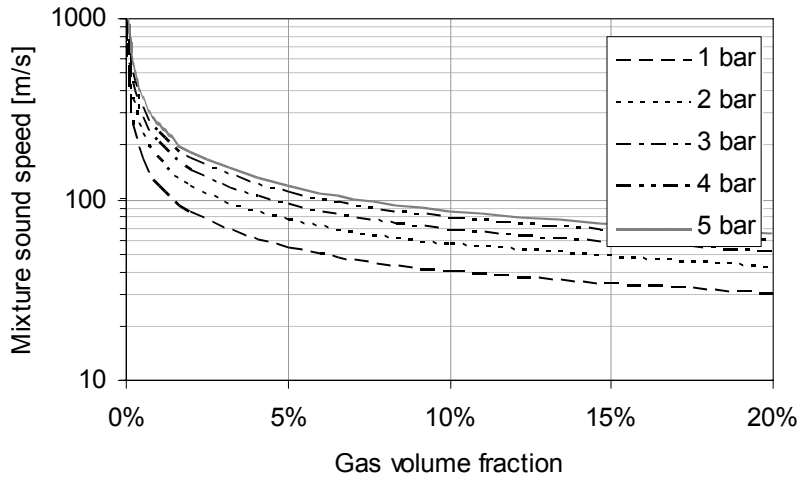
##### 4.1 Velocidad del sonido en mezclas de líquido/gas

La regla de mezclado<sup>12</sup>, conocida como la ecuación de Wood<sup>13</sup>, expresa el hecho que en una mezcla la compresibilidad de la mezcla es igual a la compresibilidad volumétrica promedio de los componentes puros. Para la densidad de la mezcla rige una regla similar: La densidad de la mezcla es igual al promedio de las densidades de los componentes puros. Dado que la velocidad del sonido en un fluido es igual a la raíz cuadrada de la compresibilidad sobre la densidad, las dos reglas de la mezcla pueden escribirse de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\rho c^2} = \frac{\varphi}{\rho_g c_g^2} + \frac{1-\varphi}{\rho_l c_l^2} \quad (4).$$
$$\rho = \varphi \rho_g + (1-\varphi) \rho_l$$

Aquí  $\varphi$  es la fracción de volumen de gas existente en las condiciones de la cañería,  $c$  es la velocidad del sonido,  $\rho$  la densidad y los subíndices  $g$  y  $l$  se refieren a las fases de gas y líquido respectivamente. La Figura 6 ilustra la relación entre la velocidad del sonido de la mezcla y el contenido de gas en una mezcla de aire agua. En la mayoría de los procesos industriales, a temperatura moderada y a condiciones de presión de la tubería, la compresibilidad de la fase gaseosa es de mayor magnitud que la compresibilidad de la fase líquida. Inversamente, la densidad está dominada por la densidad del líquido. Así, será necesario medir la presión del proceso (cuando varíe) ya que tanto la densidad del gas como la densidad del líquido son significativas al momento de determinar la fracción de volumen de gas a partir de la velocidad del sonido de la mezcla.

Por el contrario, ni la velocidad del sonido del líquido ni la del gas constituyen un factor significativo en las mezclas donde una de las fases es gaseosa. De hecho, el denominador del primer término de la ecuación de Wood es igual al producto de la presión del proceso y al exponente politrópico del gas, demostrando así que el contenido de gas en condiciones de tubería puede ser determinado utilizando la velocidad del sonido independientemente del peso molecular o la temperatura del gas. Así, la determinación del contenido de gas utilizando la velocidad del sonido de la mezcla, es independiente del tipo de gas y su precisión no tendrá relación con el tipo de gas, que puede ser aire, dióxido de carbono o cualquier otra mezcla.



**Figura 6: Velocidad de sonido de mezcla vs. volumen de gas**

ecuación de (4).

La distensibilidad de las cañerías de paredes delgadas sin uniones está dada por:

$$D = \frac{2R}{Et} \quad (5).$$

Donde R es el radio interno de la cañería, t es el espesor de la pared y E el valor del módulo Young (módulo de elasticidad) de los materiales de la cañería. En la cañería de acero, la distensibilidad es muy pequeña dado el alto valor del módulo Young del acero. En el caso del aluminio, vidrio e incluso las cañerías de plástico, se debe considerar la distensibilidad. El efecto de la distensibilidad de la cañería es menor que la velocidad aparente medida del sonido. Por ejemplo en una cañería plástica de 4" llena de agua con un espesor de pared de 5,5 mm y un módulo de 3,5 Gpa, la velocidad de sonido será de 420 m/s con aireación cero. Esta es una gran diferencia con respecto de la velocidad de espacio libre del sonido en el agua de 1480 m/s.

#### 4.2 Medición de la velocidad del sonido

Como se describe, la relación entre la velocidad del sonido de la mezcla y el aire atrapado en líquidos con burbujas está muy establecida. Sin embargo, como se desarrollará a continuación, en los flujos con burbujas estas relaciones son sólo aplicables para la propagación de sonidos de extensa longitud de ondas y baja frecuencia. Aunque esta restricción no presenta obstáculos significativos para el medidor sonar, sí representa desafíos importantes para los instrumentos de medición de velocidad con ultrasonido.

Los medidores de ultrasonido generalmente operan a 100 kHz a varios rangos de frecuencia de MHz. Para estos medidores, las burbujas de aire arrastradas tienen escalas de longitud en mismo orden que las ondas generadas por los medidores de ultrasonido. Esto crea varios problemas a los instrumentos de medición de ultrasonido. Primeramente, las burbujas dispersan las ondas ultrasónicas dañando la capacidad del medidor para realizar la medición de la velocidad del sonido. Por otra parte, los medidores de ultrasonido descansan en la información derivada de una pequeña fracción del área eficaz de la cañería que sea representativa de toda la sección cruzada, una presunción que desmorona frente a flujos con distribuciones no uniformes de homogeneidades tales como la estratificación de aire atrapado hacia la parte superior de las líneas de proceso.

Los medidores sonares de flujo usan una aproximación desarrollada y comercializada específicamente para medición de flujos de multifase en la industria del gas y petróleo, en la que los desafíos de las aplicaciones en multifases descritos anteriormente son parte de la rutina. Los medidores sonares miden la velocidad de propagación del sonido generado operacionalmente en el rango de frecuencia de ~100 a 1000 Hz. En este rango de

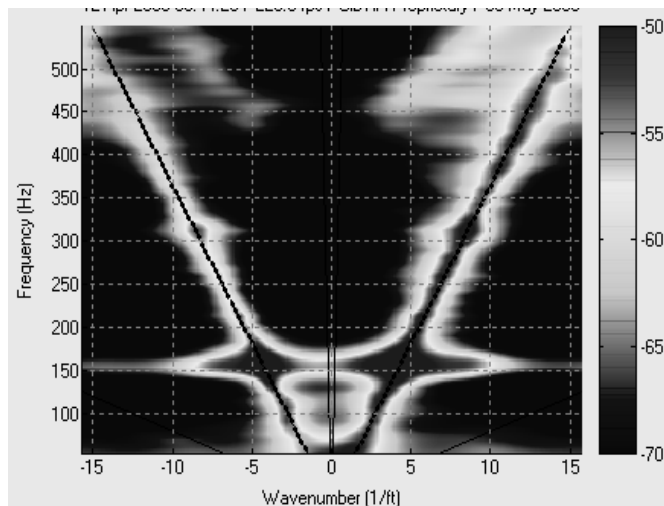
Para las mezclas confinadas a una cañería, es necesario hacer una corrección a la fórmula (4) para poder considerar el cambio relativo del área de sección cruzada (área eficaz) al momento de producirse la variación de presión interna. La llamada distensibilidad<sup>14</sup>, D, es un término de adición para la primera

frecuencia el sonido se propaga como una onda uni-dimensional utilizando la cañería de proceso como una guía de onda. La longitud de onda del sonido en este rango de frecuencia (>1 m) es generalmente varias veces de mayor magnitud que la escala de longitud de las burbujas o no uniformidades del flujo. La acústica de ondas de gran longitud se propagan a través de las mezclas de multifase sin dificultad, proporcionando una medición consistente y representativa de las propiedades volumétricas promedio del flujo.

Para la medición de la velocidad del sonido, el medidor sonar de flujo utiliza algoritmos de proceso similares a los usados en la medición del flujo volumétrico. Como ocurre con las perturbaciones de convección, la frecuencia temporal y espacial de la propagación del sonido dentro de la cañería de proceso se relaciona a través de una relación de dispersión.

$$\omega = kc \quad (6).$$

Como se indicó anteriormente,  $k$  corresponde al número de onda, definido como  $k=2\pi/\lambda$  (1/m),  $\omega$  es la frecuencia temporal (rad/s), y  $c$  es la velocidad a la que el sonido se propaga dentro de la cañería de proceso. A diferencia de distorsiones que convectan con el flujo, el sonido generalmente se propaga en ambas direcciones con y contra flujo medio. En estos casos, la potencia acústica se ubica a lo largo de dos crestas acústicas, una para el sonido que viaja con el flujo a una velocidad de  $c + V$  y otra para el sonido que viaja contra flujo a una velocidad de  $c - V$ .



**Figura 7:** área k-w plot para un 3% de aire arrastrado en el agua

La Figura 7 muestra un área  $k-\omega$  generada para el campo acústico registrado a partir del agua quieta que contiene ~3% de aire de arrastre por volumen en una cañería Plexiglas de 8", Sch 80, orientada verticalmente. El área  $k-w$  se construyó utilizando la información proveniente de un conjunto de sensores abrazados al exterior de la cañería. Dos crestas acústicas se hacen claramente evidentes. Basados en la inclinación de las crestas acústicas, la velocidad de sonido medida para esta mezcla fue de 70 m/s, consistente con lo predicho por la ecuación de Wood. Nótese que al agregar 3% de aire por volumen se reduce la velocidad del sonido en la mezcla con burbujas

a menos del 10% de la velocidad del sonido del líquido que sólo contiene agua.

### 4.3 Aplicaciones Industriales

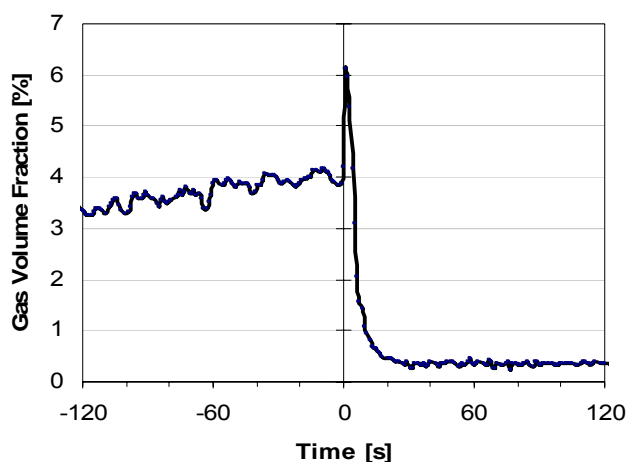
Como se mencionó en la introducción, existen dos aplicaciones para la medición de gas de arrastre de características distintas y diferenciadoras. Primero están aquellas donde el proceso de aireación debe ser controlado o donde debe ser, además, evitado. Se pueden nombrar algunos ejemplos como:

- Flujos de espuma natural de lubricación.
- Dispersión de gas en las celdas de flotación.
- Disolución de dióxido de carbono en bebidas.
- Aire de arrastre en el flujo delgado a una caja de anclaje de una máquina de elaboración de papel<sup>15</sup>.
- Aire de arrastre en las estaciones de llenado de electrodomésticos.

También existen las aplicaciones donde los gases arrastrados afectan negativamente el proceso y por lo tanto, indirectamente, los otros tipos de medidores. Algunos ejemplos de éste son:

- Errores en la consistencia de la medición de producción de papel<sup>16</sup>.
- Errores en la determinación del petróleo neto cuando se utilizan medidores de corte de agua<sup>17</sup>.
- Errores en la determinación del flujo de volumen de Coriolis como resultado de la aireación del producto<sup>18</sup>.
- Errores en la medición de cesión de gas resultante de la intermitencia de producto o la aireación.

La medición sonar de la aireación del proceso utilizando la velocidad del sonido cubre casi 5 niveles u órdenes de magnitud, de 0,01% a más de 20% y es, por lo tanto, universalmente aplicable a una amplia gama de condiciones de proceso diferentes. A modo de ejemplo, la



**Figura 8: Dosificación de anti-espuma**

Figura 8 entrega la cantidad de aire arrastrado en un volumen de producción de papel antes y exactamente después de dosificar un químico anti-espuma comercial. Dado el carácter continuo de la medición y dado el hecho de que esta medición integral es, a diferencia del sistema de muestreo, representativa del contenido real del aire, la habilidad de controlar la dosificación de anti-espuma se demuestra por sí misma. Tal control de dosificación no sólo ayudará a reducir el volumen de anti-espuma sino también a reducir la variabilidad del proceso. Así, la calidad del producto se afecta positivamente mientras, al mismo tiempo, se reduce el costo. Contrariamente, en aquellas aplicaciones donde la cantidad de aire o gas en un proceso debe ser mantenida en un nivel estable en presencia de consumo de gas por reacción química, esta medición sonar puede proporcionar también información de composición inexistente incluso en recipientes de reactores de gran diámetro. Con sólo revertir la escala de tiempo de la Figura 8 se puede probar esta afirmación.

Figura 8 entrega la cantidad de aire arrastrado en un volumen de producción de papel antes y exactamente después de dosificar un químico anti-espuma comercial. Dado el carácter continuo de la medición y dado el hecho de que esta medición integral es, a diferencia del sistema de muestreo, representativa del contenido real del aire, la habilidad de controlar la dosificación de anti-espuma se demuestra por sí misma. Tal control de dosificación no sólo ayudará a reducir el volumen de anti-espuma sino también a

## 5 CONCLUSIONES

El monitoreo sonar de flujo permite la medición directa de la velocidad de transporte convectivo de remolinos turbulentos en los flujos de las cañerías y permite además la medición directa de la velocidad del sonido que se propaga a través de la cañería. Ambas mediciones pueden realizarse utilizando un arreglo de sensores abrazados al exterior de la cañería de proceso.

Se presenta evidencia que prueba que la velocidad de transporte convectivo de los remolinos turbulentos es proporcional al promedio de la velocidad volumétrica media. Se entrega una calibración empírica basada en un número de Reynolds que proporciona una precisión de 0,5% para fluidos Newtonianos. Así, una nueva técnica basada en un fenómeno natural que ocurre en los flujos de una cañería, permite la realización de un flujómetro calibrado.

Se revisan las aplicaciones industriales del flujómetro sonar en flujos abrasivos y corrosivos. Se entrega un ejemplo relacionado con los flujos de magnetita donde la naturaleza pasiva del sonar probó ofrecer una ventaja distintiva.

Se muestra cómo la velocidad del sonido en un medio de dos fases puede usarse para derivar información de la composición tal como fracción de gas en volumen. Se desarrolla

entonces la corrección del efecto de la cañería que contiene el fluido. Se discute el efecto de las propiedades de gas y fluido en el contenido de gas calculado. Ni la temperatura del gas ni el peso molecular tienen influencia, sólo es necesario conocer la densidad del líquido y la presión del proceso.

Se presenta una aplicación industrial de la medición de fracción de gas por volumen. Este ejemplo de dosificación de anti-espuma es uno de los muchos que han sido encontrados.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Los resultados que se presentan en este trabajo se han obtenido gracias a los esfuerzos realizados a lo largo de muchos años y a la colaboración para desarrollar la medición sonar de flujos. Los autores agradecen a muchos colegas y colaboradores que han contribuido al logro de los resultados presentados aquí.

## 7 REFERENCIAS

---

<sup>1</sup> NIELSEN, R.O., Sonar signal processing, Artech House Inc, Norwood, MA, 2001, ISBN 0-89006-453-9

<sup>2</sup> KRAGAS, T. K., et al., “ Downhole, Fiber Optic Multiphase Flow Meter: Field Installation” Presented at the Society of Petroleum Engineers Annual Conference, SPE Paper #77654, September, 2002.

<sup>3</sup> KRAGAS, T. K., et al., “Downhole Fiber-Optic Multiphase Flowmeter: Design, Operating Principle, and Testing,” Presented at Society of Petroleum Engineers Annual Conference, SPE Paper #77655, September, 2002.

<sup>4</sup> MATULA, J. P. and KUKKAMAKI, E., “New findings of entrained air and dissolved gases in pm wet end: mill case study,” TAPPI JOURNAL, April 2000, Vol. 83.

<sup>5</sup> LANDAU M.T., MOLLO-CHRISTENSEN, E., Turbulence and Random Processes in Fluid Mechanics, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN 0-521-42213-2, 1992.

<sup>6</sup> SCHLICHTING, H., Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, New York, ISBN 0-07-055334-3, 1979.

<sup>7</sup> BERANEK, L.L., VER, I.S.,” Noise and Vibration Control Engineering,” Section 14.6, John Wiley and Sons, New York, ISBN 0-471-61751-2, 1992.

<sup>8</sup> GYSLING, D.L., MUELLER, E., Application of sonar based, clamp on flow meter in oil sand processing, ISA 2004 Exhibit and Conference, Edmonton section, April 2004.

<sup>9</sup> GYSLING, D.L., LOOSE, D.H., Sonar based volumetric flow meter for pulp and paper applications, CiDRA Corporation, Wallingford, CT, 2003, unpublished work.

<sup>10</sup> GYSLING, D.L., VAN DER SPEK, A.M., Fiber optic downhole multiphase flow meter: flow loop evaluation for oil/water mixtures, Downhole Instrumentation seminar, North Sea Flow Metering Workshop, Glasgow, Scotland, 23 October 2000.

<sup>11</sup> GYSLING, D.L., VANDEWEIJER, T., VAN DER SPEK, A.M., Development of a permanent downhole twophase flow meter, SRI multiphase metering and pumping conference, Houston TX, February 2000

<sup>12</sup> MC WILLIAM, D. DUGGINS, R.K., Speed of sound in bubbly liquids, Proc Instn Mech Engrs, Vol 184, Part 3C, 1969-1970.

<sup>13</sup> WOOD, A., A textbook of sound, New York, NY, 1st edition, 1930

<sup>14</sup> LIGHTHILL, J., Waves in Fluids, Cambridge University Press, Cambridge, 1980, ISBN 0-521-29233-6

<sup>15</sup> GYSLING, D.L., LOOSE, D.H., Sonar based volumetric flow and entrained air measurement for pulp and paper applications, TAPPI Spring Technical Conference, paper 58-1, Chicago, IL, May 2003.

<sup>16</sup> STOOR, T., ÄMMÄLÄ, A. NIINIMÄKI, J., Measurement of air content of pulp suspension – sonar method, APPITA 2005 pulp and paper conference, Auckland 16 – 19 May 2005.

<sup>17</sup> GYSLING, D.L., LOOSE, D.H., Using sonar based gas volume fraction meter for improved net oil rate measurement, Canadian School of Hydrocarbon Management, Toronto, 2005.

<sup>18</sup> GYSLING, D.L., BANACH, T. Accurate liquid phase density measurement of aerated liquids using speed of sound augmented Coriolis meters, ISA, Houston, October 2004.