

I. INTRODUCCIÓN

En noviembre de 2016, SonTek lanzó una sonda de velocímetro Doppler acústico (ADV) FlowTracker2 mejorada con un sensor de presión integrado. Durante una medición de descarga, un usuario típico leerá la profundidad del agua a partir de las marcas de la varilla de vadeo. Con un sensor de presión, la profundidad del agua se puede medir automáticamente, lo que reduce el error humano sobre el terreno y proporciona una mayor precisión. Además, al configurar la profundidad de la sonda durante una medición, el sensor de presión determina con precisión la profundidad de medición adecuada (0,6, 0,2, 0,8, etc.) y guía al usuario a la profundidad de medición correcta en tiempo real. En lugares de medición donde es difícil o poco práctico obtener una lectura de profundidad precisa con una varilla de ajuste superior (desde un puente alto, dentro de un pozo o tubería, etc.), el sensor de presión será fundamental para proporcionar una lectura precisa de la profundidad del agua.

Añadir un sensor de presión al FlowTracker2 puede parecer un concepto sencillo, pero durante su desarrollo se tuvieron que tener en cuenta muchos factores para obtener una lectura adecuada de la profundidad del agua. Esta nota técnica sirve para explicar la implementación del hardware del sensor de presión, así como para describir las diversas correcciones de presión realizadas para obtener medición automática de la profundidad del agua más fiable y precisa.

II. SENSOR DE PRESIÓN FLOWTRACKER2 IMPLEMENTACIÓN

El sensor de presión en sí está integrado en la base del cabezal del sensor acústico del FlowTracker2. En la Figura 1 se pueden ver pequeños orificios de ventilación en la parte inferior y los lados de la sonda y permiten que el sensor lea la presión del agua de manera efectiva. El sensor está ubicado físicamente aproximadamente 1 cm por encima de la parte inferior de la sonda, y esta compensación se mide en la fábrica de SonTek y se incorpora a los cálculos durante el proceso de calibración.

En lugar del sensor de presión ventilado convencional, se utiliza un sensor de presión no ventilado. Un sensor de presión sin ventilación es más duradero y menos susceptible al ingreso de humedad. Se requerirá que el usuario tome una medida de la presión. Este proceso se describe en detalle en el software portátil y en el manual FlowTracker2.



Figura 1. El cabezal de la sonda SonTek FlowTracker2 mostrando orificios de ventilación al sensor de presión.

III. PRESIÓN DINÁMICA PENDIENTE DE PATENTE CORRECCIÓN

Cuando se coloca un sensor de presión en agua corriente, la presión medida se ve afectada por el principio de Bernoulli y se produce una desviación dependiente de la velocidad. La falta de una corrección adecuada para este efecto ha afectado a otras soluciones de instrumentación que los usuarios pueden haber encontrado en el pasado. A continuación, se explica la corrección pendiente de patente del FlowTracker2 para compensar adecuadamente el efecto Bernoulli.

A. Presión dinámica y principio de Bernoulli

El Principio de Bernoulli es un concepto estándar en dinámica de fluidos y se aplica ampliamente en los campos de la aviación, la hidráulica y la termodinámica. Para los fluidos, se deriva de las ecuaciones generales de movimiento y se puede generalizar mediante

$$[1] \quad \frac{\rho v^2}{z} + \rho gh + P = Constant,$$

Dónde ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad del fluido, g aceleración gravitacional, h es la coordenada vertical a lo largo de una línea de corriente con respecto a un dato elegido, y P es la presión medida en un punto determinado. El primer término representa la presión dinámica y puede considerarse como la energía cinética del fluido en movimiento. El segundo término es la presión hidrostática y puede considerarse como la energía potencial del fluido en reposo. El tercer término es simplemente la presión medida por el sensor. El principio de Bernoulli dicta que, en un sistema cerrado,

la suma de las presiones dinámica, hidrostática y las presiones medidas deben permanecer constantes. Esto implica que un aumento en la velocidad del fluido debe corresponder a una disminución en la presión medida, dada una profundidad de agua constante (o presión hidrostática).

La Figura 2 muestra el efecto Bernoulli en la medición de presión de una sonda FlowTracker2 remolcada a velocidades establecidas en un tanque de remolque.

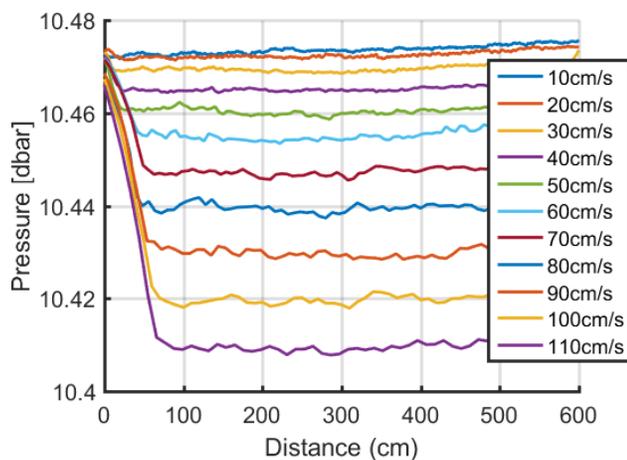


Figura 2. Datos de presión de la sonda FlowTracker2 al ser remolcada a varias velocidades.

La sonda en sí se fijó a una profundidad constante durante todos los recorridos de velocidad. Como lo predice la Ecuación 1, el aumento de la velocidad del flujo produce una disminución de la presión medida. A una velocidad de 1 m/s, la presión medida es aproximadamente 0,05 dbar más baja que cuando no hay flujo, lo que produce un desplazamiento equivalente de la profundidad del agua de aproximadamente 5 cm. Esta compensación depende de la velocidad y debe compensarse para medir la profundidad del agua con precisión. El FlowTracker2 está en una posición única para aplicar la compensación debido a su medición de velocidad altamente precisa.

B. Derivación del coeficiente de corrección de presión

La presión medida, P_m , debe corregirse a P_c , la presión corregida. Suponiendo que P_m se incluye el término de presión hidrostática en la ecuación 1, podemos escribirla presión corregida como

[2]

$$P_c = P_m + b\rho v^2,$$

Dónde b es el coeficiente de corrección de presión para tener en cuenta el efecto Bernoulli.

C. Compensación de densidad para temperatura, salinidad y altitud

El último término de la Ecuación 2 representa la corrección de presión dinámica, que depende de la densidad del fluido ρ . Normalmente, la densidad del fluido depende de la temperatura y la salinidad. Las mediciones de temperatura del sensor de temperatura incorporado de la sonda FlowTracker2 se utilizan para calcular ρ , a menos que se proporcione una temperatura introducida por el usuario.

Asimismo, si el usuario introduce una salinidad, este valor se incluirá en el cálculo de la densidad. De lo contrario, la salinidad predeterminada es 0 (agua dulce). La densidad de un fluido sobre el terreno también varía con la variación gravitacional del geode en una ubicación geográfica específica; Usando la función GPS del FlowTracker2, si se registra una ubicación GPS, el valor de densidad final compensará la latitud y altitud donde se toma la medida. De esta manera, el FlowTracker2 calcula un valor de densidad preciso que es necesario para calcular b y también para determinar la velocidad del sonido durante una medición real sobre el terreno.

D. Cálculo a partir de datos del tanque de remolque

Para obtener b en la Ecuación 2, adoptamos un enfoque empírico utilizando datos recopilados de tanques de remolque que tienen una velocidad de referencia conocida para ajustar un coeficiente de corrección específico a la geometría del cabezal de la sonda. P_c de la Ecuación 2 es el valor de la presión medida cuando la sonda no está en movimiento, y P_m es la presión medida registrada por la sonda cuando está siendo remolcada. Esperamos que la corrección de presión varíe con la forma de la sonda, por lo que la formulación de b en un coeficiente de corrección global tiene en cuenta este aspecto. Diferentes cabezales de sonda (2D o 3D) tendrán un valor b diferente asociado.

Las mediciones para la determinación b se realizaron en tanques de remolque tanto en la fábrica de SonTek como en la Instalación de Instrumentación Hidrológica (HIF) del USGS. Para obtener más detalles sobre la instalación del tanque de remolque HIF, consulte el Informe de verificación del tanque de remolque FlowTracker2 (comuníquese con SonTek para obtener más detalles). Como se menciona en este documento, era fundamental realizar recorridos de velocidad sobre la misma sección del tanque para cada recorrido de velocidad para eliminar la variabilidad causada por influencias físicas del tanque (geometría de la trayectoria del tanque, respiraderos de aire superiores, etc.). Los recorridos del tanque de remolque se realizaron a velocidades cubiertas por HIF de 0,3 pies/s (~0,1 m/s) a 13,2 pies/s (~4,1 m/s) en incrementos de 0,3 pies/s (~0,1 m/s). Se eligió este rango de velocidad porque cubre el rango completo de la capacidad de medición de velocidad del FlowTracker2. Sólo se utilizan en el análisis los datos de presión procedentes de remolques que circulan en dirección de avance (con respecto a la sonda).

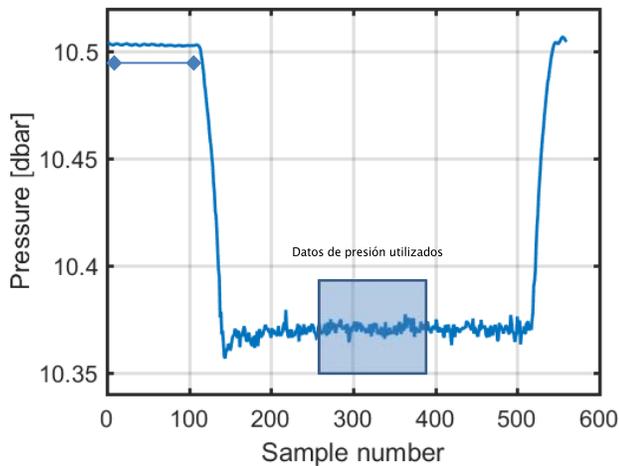


Figura 3. Datos de presión para una velocidad de funcionamiento de 6 pies/s (1,88 m/s).

El objetivo es utilizar los datos del tanque de remolque para desarrollar una relación entre la presión medida y la velocidad de remolque. La Figura 3 muestra un ejemplo de datos de presión de un recorrido remolcado a 6 pies/s (1,88 m/s). La presión corregida, P_c , es el valor promedio de la presión cuando la sonda no está en movimiento y es igual a la Presión Hidrostática. Para eliminar los efectos de rampa ascendente y descendente durante cada remolque, el 1/3 central de los datos de presión para calcular la media P_m asociada a esa velocidad. Estas mediciones de presión media se representan frente a la velocidad del carro de remolque con círculos amarillos en la Figura 4.

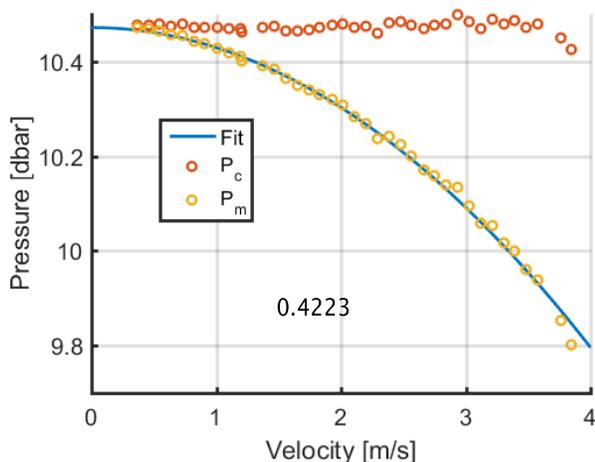


Figura 4. Presión media versus velocidad del carro de remolque para recorridos del tanque de remolque HIF. Los círculos amarillos representan medidas reales (P_m). La línea azul es la Ecuación 2 trazada con una regresión lineal para determinar b . Los círculos rojos representan la presión corregida P_c .

La relación parabólica entre la presión medida y la velocidad que se muestra en la Figura 4 justifica nuestro uso de la Ecuación 2, que predice que el efecto Bernoulli sobre la presión medida aumentará a medida que la velocidad se eleva al cuadrado. El coeficiente de corrección de presión b se determina mediante la regresión lineal de la Ecuación 2. El ajuste se muestra mediante la línea azul en la Figura 4. En este conjunto de recorridos del tanque de remolque, $b = 0,4223$. Se calculó el promedio de los valores b de diferentes conjuntos de recorridos del tanque de remolque en el HIF y en la fábrica SonTek. Para verificar la corrección modelada, P_c se calcula y se representa con círculos rojos en la Figura 4. Los valores de presión corregidos ahora no muestran dependencia de la velocidad y el efecto Bernoulli se elimina para obtener la medición de profundidad adecuada. Durante una medición real, el término $b\rho v^2$ en la Ecuación 2 se calcula en tiempo real para producir la presión corregida, P_c .

IV. MEDICIONES DE FLOWTRACKER2 CON SENSOR DE PRESIÓN FRENTE A LA MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD CON VARILLA

Para mostrar la validez de la corrección y el uso del sensor de presión, mostramos una medición de descarga que incorporó tanto lecturas manuales de varilla de vadeo como una lectura del sensor de presión. Se tomó una medición en el sitio 09522600 del USGS cerca de Yuma, AZ (en la figura 5).



Figura 5. Sitio de aforo del USGS 09522600

En cada ubicación de la estación, la profundidad se registró utilizando el sensor de presión y la varilla de vadeo. Los perfiles de profundidad obtenidos durante el transecto se representan en la Figura 6. Las profundidades a través del transecto usando ambos métodos son las mismas dentro del margen de error de una lectura de profundidad manual con varilla de vadeo.

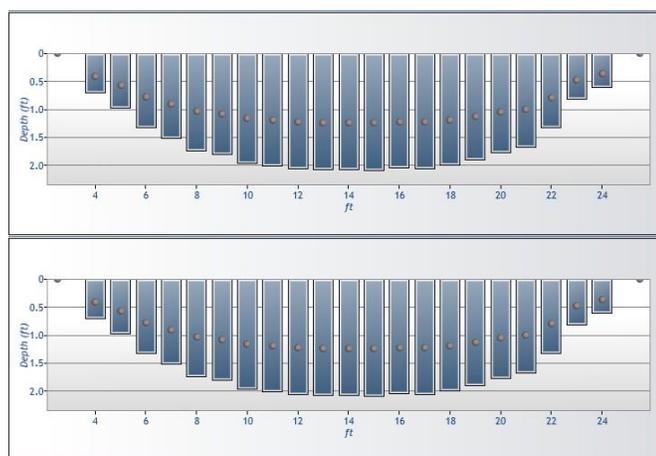


Figura 6. Profundidad en cada estación del emplazamiento 09522600 del USGS. El gráfico superior representa las profundidades registradas por la presión sensor. El gráfico inferior utiliza profundidades leídas manualmente con la vara de vadeo.

Las descargas calculadas con los dos métodos se comparan con la descarga nominal registrada en este lugar de la estación de aforo del USGS, y se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de los valores de descarga obtenidos de la clasificación USGS, FT2 usando sensor de presión y FT2 usando vara de vadeo.

	Índice de descarga USGS	FT2 usando sensor de presión	FT2 usando varilla de vadeo
Descarga (SFC)	58	57.0438	57.1779

Los valores de descarga están dentro del 2% entre sí, lo que demuestra que la sustitución de la varilla de vadeo con el sensor de presión para una medición de profundidad es un método preciso para tomar mediciones de descarga utilizando el FlowTracker2.

V. CONCLUSIÓN

Esta nota técnica sirve para explicar cómo se implementaron la opción del sensor de presión FlowTracker2 y la corrección de presión dinámica pendiente de patente.

La opción del sensor de presión proporciona una lectura automática de la profundidad del agua y de la sonda que puede estandarizar y agilizar las mediciones sobre el terreno.

También ofrece una lectura precisa de la profundidad en situaciones en las que la lectura manual de la profundidad con una varilla de vadeo resulta poco práctica o imposible.