

Hidrometría ultrasónica en las presas "Lázaro Cárdenas" y "Francisco Zarco" en México

INTRODUCCIÓN

Para conocer el gasto que escurre por una corriente, se tienen diferentes métodos y técnicas. Uno de los métodos más usados es el de "área-velocidad", se denomina así porque simplemente se multiplica la velocidad de la corriente por el área de la sección. A la forma en cómo se calcula la velocidad se le llama "técnica"; de esta manera, para medir la velocidad se tienen las técnicas del molinete, del flotador y del ultrasonido, entre otras (King 1993). Para conocer el área hidráulica en un cauce se requiere conocer la forma geométrica de la sección y medir la profundidad del agua, ya sea con una escala pintada en el talud o bien con ultrasonido o en su defecto, con una celda de presión. En la técnica de ultrasonido para medir la velocidad se usan dos formas de conocer la velocidad de la corriente: (a) con efecto Doppler y (b) por medio del tiempo de tránsito; en seguida se describen brevemente.

TÉCNICAS ULTRASÓNICAS DE AFORO

Desde los años 50' hasta los años 70', se han desarrollado equipos acústicos basados en el efecto Doppler para detectar objetos que se mueven en el mar, estudiar el flujo de la sangre en las arterias y medir las corrientes en el océano. A partir de los años 80', se empezaron a usar equipos similares para aforar en canales (Tamari 2008). Los aforadores ultrasónicos de efecto Doppler funcionan enviando una señal ultrasónica hacia aguas arriba y hacia aguas debajo de la corriente y midiendo por medio de sensores la frecuencia con que regresan las señales una vez que se reflejan en las partículas en suspensión del agua, o bien, reflejadas en pequeñas burbujas de aire. En función de las diferencias de frecuencia entre la señal emitida y las frecuencias reflejadas, el sensor calcula la velocidad del agua; después multiplica esta velocidad por el área hidráulica, obteniendo así el gasto, caudal o flujo

Resumen / Abstract

Las presas "Lázaro Cárdenas" y "Francisco Zarco", se ubican en el centro-norte de México. Para mejorar el balance hidráulico se instalaron aforadores ultrasónicos en las obras de toma y en el río que las interconecta. En la presa "Lázaro Cárdenas" se instalaron dos sensores ultrasónicos en cada uno de sus tres túneles. En el río "Nazas", que comunica ambas presas, se instalaron dos aforadores ultrasónicos con medidores redundantes de nivel y gasto. En la salida de la presa Francisco Zarco se instaló un aforador Doppler y otro medidor redundante. En el presente artículo se describe la selección de cada tipo de aforador, se explican los fundamentos y funcionamiento de cada tipo de tecnología y se muestra cómo se colocan y operan. Se comenta el favorable impacto que se comienza a observar en el mejoramiento de la administración del recurso en la zona.

Palabras Clave: hidrometría ultrasónica, balance hidráulico, mediciones.

"Lázaro Cárdenas" and "Francisco Zarco" water reservoirs are located in central-northern Mexico. In order to improve water balance, transit time and Doppler effect ultrasonic level gauges were placed in both reservoir outlets and in the river interconnecting them. In the first dam outlet two ultrasonic transit time sensors were placed in each of its three tunnels. In the "Nazas" river, communicating dams, two ultrasonic level gauges were settled, both with redundant gauges of level and discharge. In "Francisco Zarco" dam outlet a Doppler current meter was set as well as, in the river bottom, a redundant gauge of level and discharge. This paper describes the selection of each type of gauge, the basics of its technology and how they should be placed and operated. A favourable impact has been achieved in the improvement of water management in the zone.

Keywords: ultrasonic hydrometrics, water balance, measurement.

volumétrico. En este caso, se puede determinar la velocidad de un grupo de partículas con base al efecto Doppler (figura 1)

$$Vu = \frac{c}{2} \left(\frac{f - f_0}{f_0} \right) \quad (1)$$

Donde Vu es la velocidad en la dirección de la trayectoria ultrasónica; c , es la velocidad del sonido en el agua; f_0 es la frecuencia de la señal ultrasónica emitida por el sensor y f es la frecuencia de la señal reflejada en las partículas del agua (figura 1).

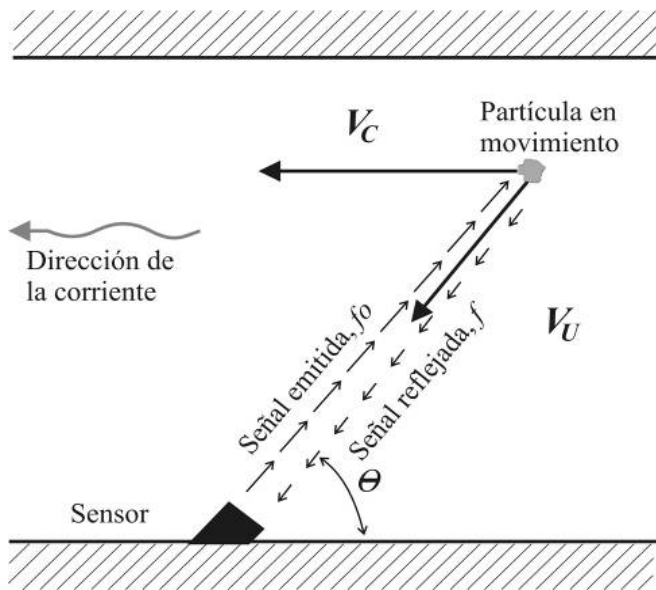


Figura 1. Funcionamiento de un aforador Doppler

Como se indicó, en función de la diferencia de frecuencias, el sensor calcula la velocidad de las partículas que se mueven en el agua; sin embargo, la velocidad calculada es la componente de la velocidad en la dirección de la señal ultrasónica, y la velocidad requerida es la que se tiene en la dirección de la corriente. Para conocer dicha velocidad, se requiere aplicar la trigonometría, la velocidad Vc , se calcula con la ecuación 2:

$$Vc = \frac{Vu}{\cos \theta} \quad (2)$$

Sustituyendo la ecuación 1 en la ecuación 2, se obtiene la ecuación 3.

$$Vc = \frac{c}{2 \cos \theta} \left(\frac{f - f_0}{f_0} \right) \quad (3)$$

Cuando se afora con la técnica del efecto Doppler se debe tener en cuenta que: (a) se asume que las partículas en las que se refleja la señal, avanzan a la misma velocidad que el agua y (b) obviamente, el agua contiene un mínimo de partículas en suspensión para que la señal se refleje. Por otro lado, el sensor del aforador se puede colocar en la orilla de la corriente o en el fondo; así se tiene un aforador Doppler horizontal en el primer caso y un aforador Doppler vertical, en el segundo.

Para que un aforador Doppler funcione, se requieren de otros componentes, relacionados con el suministro de energía, la recopilación de la información y con la seguridad contra el vandalismo; entonces se tiene lo que puede llamarse un "conjunto de medición". Los componentes básicos de estos conjuntos son: (a) sensor; (b) cable; (c) componentes electrónicos de análisis de la información, (d) componentes eléctricos de suministro energía (panel, centro de carga y batería) y (e) caseta de protección (ver figura 2). El funcionamiento es el siguiente: el sensor obtiene la velocidad del flujo y la profundidad del agua; el panel fotovoltaico proporciona la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de todos los componentes; el centro de carga controla la energía del panel manteniendo cargada la batería para que ésta alimente al sensor y al data logger; finalmente el data logger almacena información y presenta los datos en una pantalla para tal efecto. Dentro de la caseta se tienen el gabinete y la batería, mientras que en el techo se tiene la celda fotovoltaica.

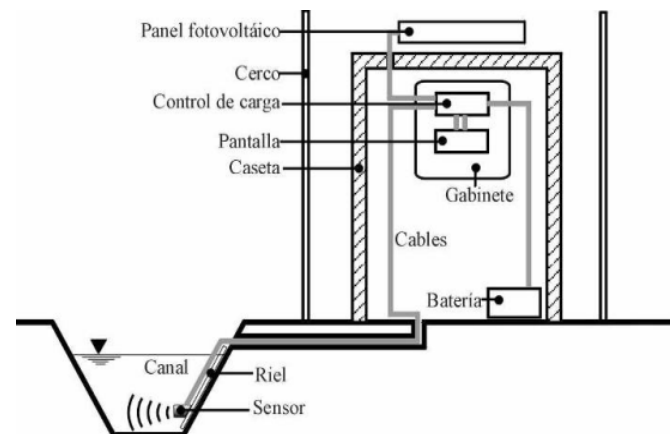


Figura 2. Conjunto de medición del aforador Doppler

Es necesario aclarar otro aspecto cuando se utiliza un aforador Doppler: el caudal se calcula, como ya se mencionó anteriormente, multiplicando la velocidad por el área; pero ambos valores tienen adjetivos importantes: la velocidad debe ser la *velocidad media* y el área debe ser el *área hidráulica*. La velocidad media se localiza al 60% de la profundidad total con una confianza de 95% (King 1993), por lo tanto, el aforador debe colocarse a dicha altura. El aforador estimará aceptablemente el gasto mientras se mantenga a 60% de la profundidad; pero se tendrán difi-

cultades si el nivel del agua varía porque el aforador no estará fijo en la profundidad deseada. Para estos casos se debe calibrar el aforador. Dicha calibración se logra con aforos de referencia realizados con molinete o con un aforador Doppler portátil. El método utilizado se denomina *Velocidad Índice* que consiste en encontrar una relación funcional entre las diferentes velocidades (con diferentes gastos) que proporciona el aforador (V) y las velocidades medias (V_m) proporcionadas por el aforador de referencia. Cuando se tienen varios valores de las dos velocidades se busca una relación empírica que las relacione funcionalmente. Se puede utilizar alguna de las siguientes relaciones:

$$V = a_1 V_m \tag{4}$$

$$V = a_0 + a_1 V_m \tag{5}$$

$$V = a_0 + (a_1 + a_2 Y) V_m \tag{6}$$

donde V es la velocidad medida por el aforador Doppler y V_m es la velocidad media, proporcionada por el medidor de referencia. Las variables a_0 , a_1 y a_2 son coeficientes de ajuste y Y es la profundidad del agua.

En cuanto a la técnica de tiempo de tránsito también se utiliza el ultrasonido, al igual que la técnica de efecto Doppler, pero se tiene diferente funcionamiento; un pulso ultrasónico viaja más rápido en la dirección de la corriente del agua que en sentido contrario. La velocidad de un pulso de sonido que viaja en una diagonal a través de la corriente en la dirección de ésta, se incrementará en virtud de la componente de la velocidad de la corriente. Por el contrario, un pulso de sonido viajando aguas arriba se retrasará. La diferencia en el tiempo de tránsito en las dos direcciones puede usarse para la velocidad del sonido en el agua y la componente de la velocidad del agua a lo largo de la trayectoria por la que viajan los pulsos ultrasónicos.

En la figura 3, V_t es la componente de la velocidad en la dirección de la trayectoria del pulso ultrasónico; V_L es la velocidad en la dirección de la corriente y θ es el ángulo que se forma entre la trayectoria del pulso ultrasónico y la dirección de la corriente. El tiempo de tránsito de la señal ultrasónica entre los sensores A y B está dado por las ecuaciones 7 y 8.

$$t_{AB} = \frac{L}{(c - V \cos \theta)} \tag{7}$$

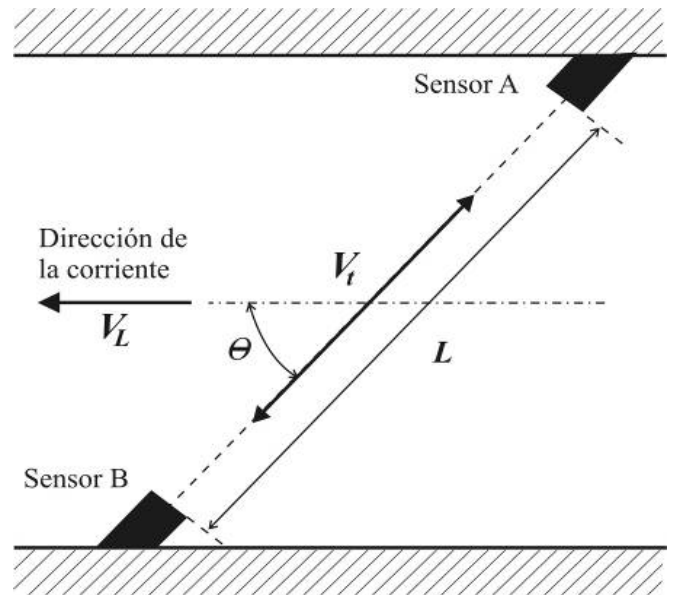


Figura 3. Funcionamiento de un aforador de tiempo de tránsito

$$t_{BA} = \frac{L}{(c + V \cos \theta)} \tag{8}$$

donde t_{AB} es el tiempo de tránsito del sensor A hacia el sensor B, en segundos; t_{BA} es el tiempo de tránsito del sensor B hacia el sensor A, en segundos; L es la longitud de la trayectoria entre los transductores, en metros y c es la velocidad del sonido en el agua, en metros sobre segundo. Resolviendo para la velocidad en la dirección de la corriente V_L se obtiene la ecuación 9.

$$V_L = \frac{L(t_{AB} - t_{BA})}{2 \cos \theta t_{AB} t_{BA}} \tag{9}$$

En la técnica de tiempo de tránsito se puede utilizar el método de la "Sección Intermedia" para estimar el gasto utilizando la ecuación 10.

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_i \tag{10}$$

donde Q , es el gasto o caudal total que escurre por la sección y q_n , es el gasto en cada una de las franja ilustradas en la figura 4, en esta misma figura se observa cómo debe calcularse cada gasto parcial.

Para mayor claridad en la figura 4, se informa que H_n es la altura de cada uno de los pares de sensores; V_n es la velocidad calculada con la ecuación 9 en cada una de las franjas horizontales y W_n es el ancho de cada una de estas mismas franjas.

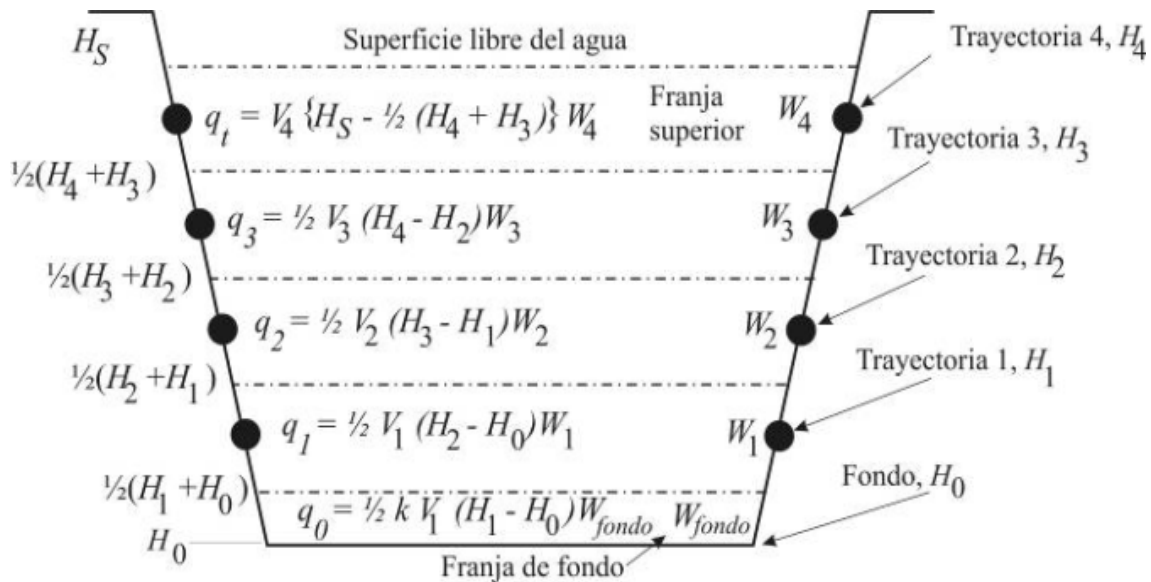


Figura 4. Método de la "Sección Intermedia" para estimación del gasto

De la misma manera que para el aforador Doppler, en el caso del aforador de tiempo de tránsito se tiene un "conjunto de medición" consistente en: (a) sensores; (b) cables de conexión entre el sensor y la unidad electrónica; (c) unidad electrónica; (d) sensor de nivel (para calcular el área); (e) caseta de protección; (f) gabinete; (g) pozo de lectura; (h) celda o panel fotovoltaico; (i) batería y (j) caseta de protección; el arreglo general se muestra en la figura 5.

Se aclara que el arreglo anterior se ocupa para el caso de un aforador de tiempo de tránsito colocado en una corriente a superficie libre. Si se tiene un conducto a pre-

sión, se utiliza comúnmente un par de sensores, si el conducto tiene una longitud de tramo recto suficiente para que el patrón de flujo sea adecuado para lograr una medición aceptable. En este caso, la velocidad se calcula con la ecuación 9 y el área hidráulica se calcula con la fórmula geométrica para calcular el área de un círculo.

COLOCACIÓN DE UN AFORADOR ULTRASÓNICO DE TIEMPO DE TRAVESÍA EN LA PRESA LÁZARO CÁRDENAS

La presa Lázaro Cárdenas, también llamada "El Palmito" se ubica hacia el norte y oeste de país (ver figuras 6 y

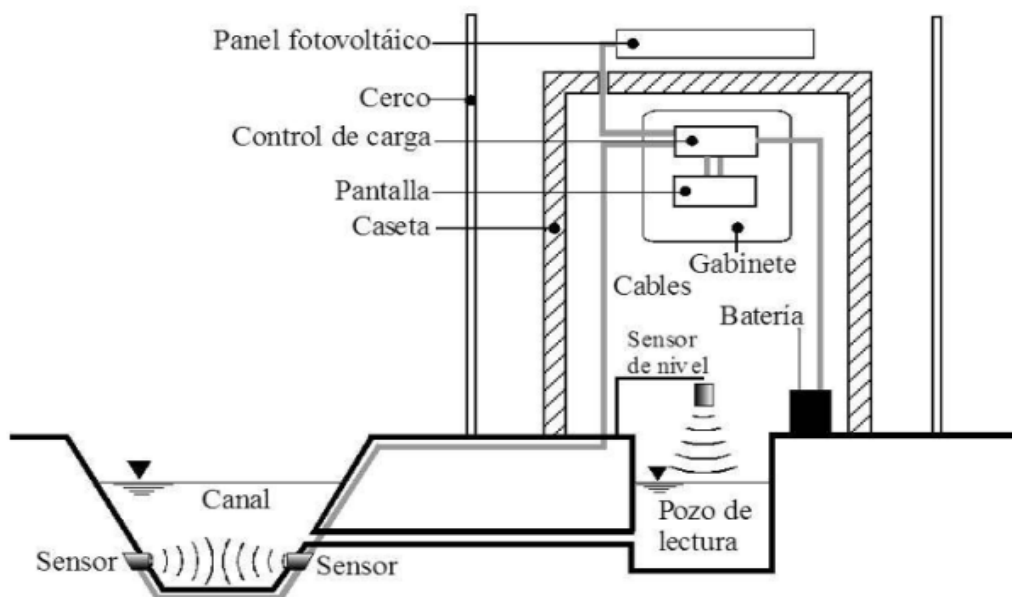


Figura 5. Conjunto de medición para el aforador de tiempo de tránsito

7) en el estado mexicano de Durango; dentro de este estado la presa se ubica al norte y al centro del mismo. La parte que interesa para este caso es la obra de toma, consta de tres túneles de sección circular, de 6.00 m de diámetro, revestidos con concreto simple; tienen longitudes diferentes de 561, 592 y 621 m. En la parte media de los túneles, se colaron tapones de concreto simple de 17.94 m de longitud. En ellos se empotraron tres líneas de tubería de acero, de 3.708 m (146") de diámetro y de 15.84 m de longitud. En esta parte se colocaron sendas válvulas de operación de tipo mariposa de 2.18 m (86") de diámetro.

Inicialmente se intentó medir colocando aforadores de efecto Doppler colocados en la parte superior de los túneles (figura 8), aguas abajo de las válvulas de operación y donde el agua escurre a superficie libre. Sin embargo, no se obtuvieron buenos resultados porque las velocidades y turbulencia eran tan altas que los aforadores no funcionaron.

Posteriormente, se decidió colocar un par de sensores ultrasónicos de tiempo de travesía aguas arriba de las válvulas de operación, en la parte presurizada de los túneles; dichas válvulas de operación son del tipo "mariposa" en cada uno de los tres túneles.



Figura 6. Vista de la cortina de la presa Lázaro Cárdenas



Figura 8. Medidor Doppler tipo radar



Figura 7. Ubicación geográfica de la zona de trabajo

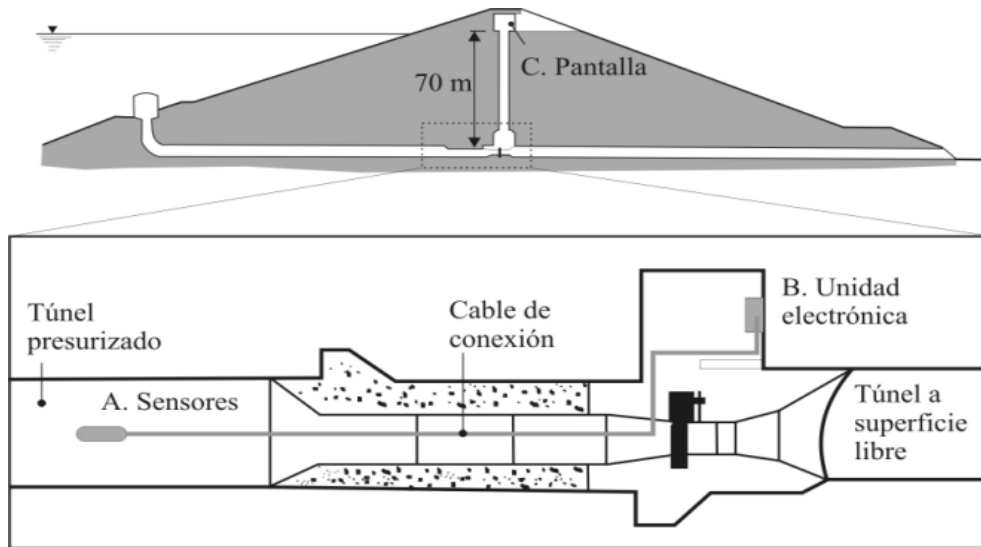


Figura 9. Ubicación de los sensores ultrasónicos en la presa "Lázaro Cárdenas"

Para la colocación de los sensores fue necesario cerrar las compuertas de servicio para poder acceder al túnel. En las cercanías de las válvulas de mariposa se tiene una "escotilla" por la que el personal técnico se introdujo al túnel. Los sensores se anclaron a la pared primeramente con unos taquetes epóxicos a los que se sujetó el soporte de los sensores. Una vez colocados en dichos soportes, fue necesario alinearlos para que la señal ultrasónica emitida por un sensor sea correctamente recibida por el sensor contrario; a saber, el ultrasonido viaja en línea en un fenómeno parecido al de la luz de alta frecuencia que viaja como un rayo perfectamente alineado (un ejemplo de dicha luz son los "apuntadores laser"). Ello obliga a que los sensores estén alineados aceptablemente; dicho procedimiento se realizó con un dispositivo creado por el mismo personal del instituto. Una vez colocados los sensores se colocó un tubo de acero también anclado a la pared del túnel y se llevó hasta la zona de las válvulas de mariposa, justo un poco antes de éstas se perforó la tubería y se colocó una válvula tipo "glándula". En el interior del tubo de acero y de la mencionada válvula tipo glándula se insertó el cable de conexión entre los sensores y la unidad electrónica. La unidad electrónica (figura 10) se colocó en una galería que se encuentra justo encima de la válvula de mariposa.

A partir de la unidad electrónica, se colocó otro tubo por el que se conectó dicha unidad con una pantalla de respaldo ubicada en la entrada de la galería. Esto es muy útil porque el operador de la presa tendría que bajar hasta donde se encuentra la unidad electrónica y como se observa en la figura 9, letra C, los sensores están colocados a más de 70 m de profundidad respecto de la corona de la cortina. Se tiene tanto un elevador como una escalera, pero en caso de falla del elevador el descenso y ascenso por la escalera es sumamente agotador. Cerca de la pan-

talla de respaldo y ya en el exterior, se colocaron las fotoceldas y el módem satelital (figura 11). Cabe mencionar que esta presa, dada su importancia y su lejanía de las oficinas centrales, está monitoreada vía satélite.



Figura 10. Colocación de la unidad electrónica



Figura 11. Fotoceldas y transmisor satelital de la presa "Lázaro Cárdenas"

COLOCACIÓN DE UN AFORADOR DE EFECTO DOPPLER EN LA ESTACIÓN DE AFORO

AGUSTÍN MELGAR

Como se ha mencionado, se colocó un aforador en la estación de aforos "Agustín Melgar" (figura 12) y otra estación un poco más abajo en un sitio que se denomina "Paso Nacional". Entre estas dos estaciones se tiene una extracción importante desde el río y hacia el Módulo de Riego Número 2 "Nazas". Dicha extracción se realiza por medio de diferentes canales y un bombeo, por lo que resulta más fácil aforar en "Agustín Melgar" y "Paso Nacional" y por diferencia de gasto, estimar la extracción hacia el citado Módulo de Riego.

La sección del río en esta parte está muy tendida en la margen derecha y bastante escarpada en la margen izquierda. Como se puede ver en la Figura 9, se tiene un cauce irregular con las profundidades mayores cargadas hacia una de las márgenes. Fue por ello que la mejor opción era un Aforador Doppler Lateral colocado precisamente en la margen con mayores profundidades.

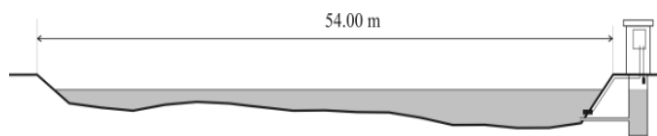


Figura 12. Sección transversal en el río en "Agustín Melgar"

Adicionalmente, se colocó un sensor de nivel en un pozo de lectura ubicado en la caseta y comunicado por medio de un tubo al cauce del río. Este medidor está ajustado con la información histórica que se obtuvo con el aforador Doppler. Este tipo de medidor se le designa como "redundante" y cumple una labor importante como respaldo del aforador principal, ya que cuando se tienen niveles de agua inferiores a la altura del sensor del aforador Doppler, se sigue teniendo una estimación del gasto por medio del medidor de nivel.



Figura 13. Sensor de efecto Doppler colocado en la estación de aforo "Agustín Melgar"

Para colocar los sensores se revistió con concreto un pequeño tramo del talud, donde se colocó el sensor. Se colocó además una caseta, un pozo de lectura, con su tubo de conexión al río, y un cerco de malla ciclónica. El sistema se energiza con celdas fotovoltaicas (figuras 13, 14 y 15).



Figura 14. Nicho para colocar el sensor y ductos de comunicación con el pozo de lectura de nivel



Figura 15. Caseta de la estación de aforo "Agustín Melgar"

En el interior del gabinete de la estación de aforo (ver figura 16), se observa en la parte superior la unidad electrónica del medidor de nivel (A); en esta unidad se puede observar la lectura del nivel del agua y se tiene así mismo un teclado por medio del cual se programa la unidad. Los fabricantes llama a este proceso "parametrizar"; ello significa que se introducen a la programación del medidor los datos necesarios para que pueda realizar la medición de nivel y la estimación del gasto. También se le indica la profundidad del río en la parte más baja para que a partir de allí calcule la profundidad del agua.

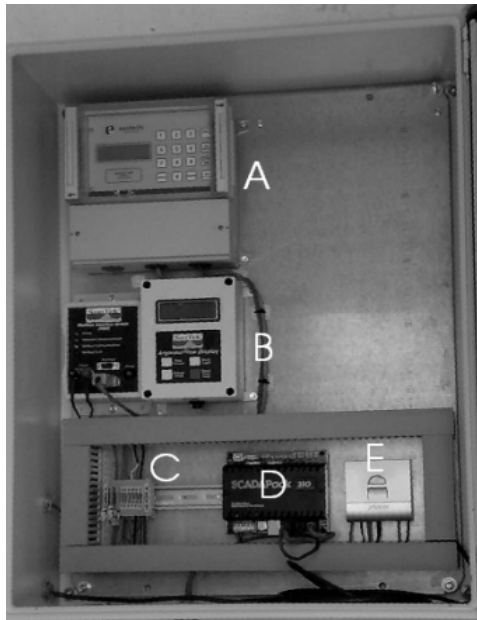


Figura 16. Interior del gabinete de la estación de aforo "Agustín Melgar"

En el caso de la estación de aforo "Agustín Melgar" se programó el medidor con una ecuación de ajuste obtenida con niveles y gastos los gastos y niveles del aforador Doppler. El gasto se tomó de las estimaciones del aforador Doppler (ver figura 17).

En la misma figura 16 anterior, se observa la unidad electrónica del aforador Doppler (B). De manera similar al caso de la unidad electrónica del medidor de nivel, en

esta unidad se programa el aforador Doppler. Principalmente se introduce la sección transversal, por medio de puntos XY en un sistema coordinado. Otro valor importante es la altura del sensor de nivel respecto del punto más bajo de la sección. Así mismo, se revisan y configuran parámetros relacionados con la tecnología Doppler, por ejemplo se debe asegurar que la señal ultrasónica se mantenga dentro del área hidráulica de la sección; o bien, sucede que en algunos casos las celdas de lectura no tienen buena calidad, lo que redundaría en la eliminación de dichas celdas.

Adicionalmente se observan otros componentes en el gabinete, se trata de elementos de control y protección eléctrica; en el lado derecho se encuentra una pequeña caja con fusibles para proteger el equipo de picos en el voltaje (ver figura 16, letra C). En la parte media inferior del gabinete se encuentra una memoria no volátil, también conocido como *data logger*, (letra D, en la misma figura 16); este elemento cumple labores de intercambio entre la unidad electrónica del aforador y un módem satelital que posteriormente se colocará; así mismo se utiliza como almacenador adicional de información y para descargar la misma en una memoria portátil de las denominadas "USB". Finalmente, se tiene un control de carga, mismo que regula la energía eléctrica proveniente de la fotocelda, ya sea para cargar la batería cuando esta se baje, como para detener la carga una vez que la batería está cargada. En este caso, alimenta directamente el medidor y regula que el voltaje sea adecuado.

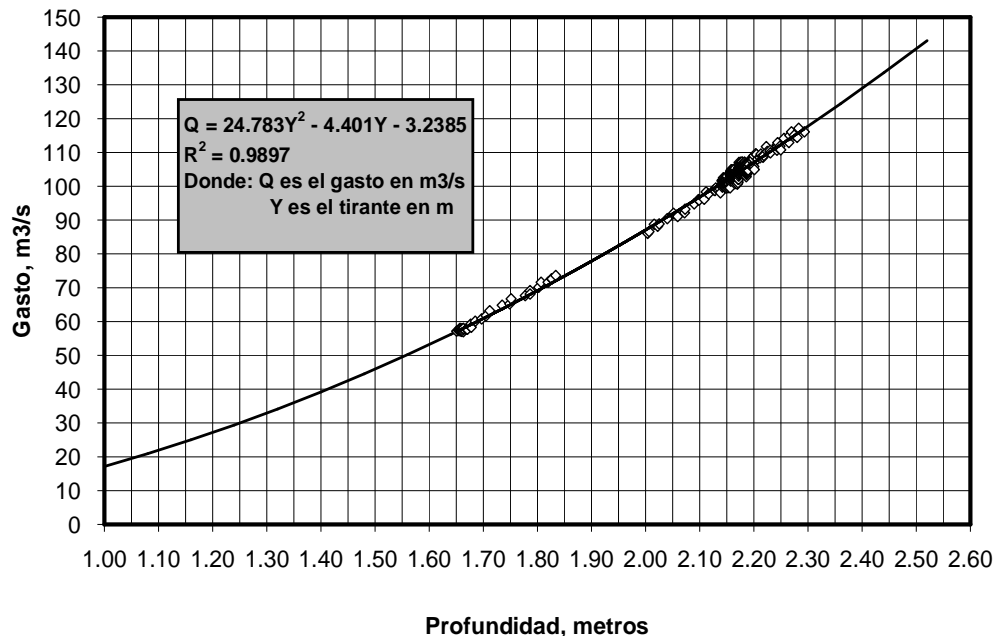


Figura 17. Ecuación de ajuste para el medidor de nivel.

COLOCACIÓN DE UN AFORADOR ULTRASÓNICO DE TIEMPO DE TRÁNSITO EN LA ESTACIÓN DE AFORO "PASO NACIONAL"

Esta sección de aforo estaba programada en otro sitio denominado "Santa Teresa de la Uña" (ver figura 18), pero debido a una avenida extraordinaria en el río, se modificó el cauce provocando que en dicho tramo el agua quedara estancada con una profundidad mayor a los 2 metros, lo que hacía muy complicada la colocación de los sensores y particularmente el tendido de los cables por el fondo del río desde una margen hasta la orilla contraria.

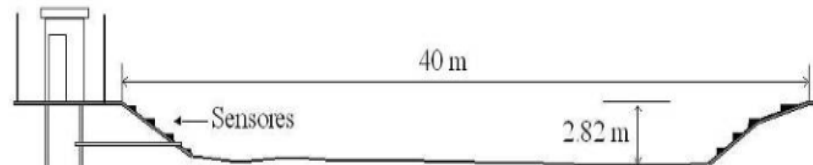


Figura 18. Sección del río en el sitio denominado "Santa Teresa" (no utilizado)

De esta manera, se decidió colocar el aforador en un sitio cercano llamado "Paso Nacional"; en este nuevo sitio aún se tiene agua en época de estiaje, pero los niveles son lo suficientemente bajos como para trabajar en la colocación de los postes donde se ubicaron los sensores de velocidad y en el tendido del ducto por el fondo del cauce desde una orilla hasta la otra.

La sección transversal del río en la estación de aforo "Paso Nacional" está muy tendida en sus orillas, por lo que la colocación de los sensores en los taludes fue prácticamente imposible. Se propuso por parte de la empresa encargada de colocar el sistema, un par de postes anclados al piso cerca de las orillas de manera que cuando el nivel del agua subiera, se cubrieran todos los sensores (figuras 19, 20 y 21).



Figura 19. Postes de sensores para la estación hidrométrica "Paso Nacional"



Figura 20. Sitio antes de la colocación de sensores.

En esta sección también se construyó de una caseta donde se ubicaron el gabinete con los componentes eléctricos, electrónicos y la unidad electrónica; así como las baterías. La fotocelda se colocó en el techo. Cabe mencionar que la fotocelda se coloca con una inclinación de 35 grados respecto de la horizontal y con orientación preferencial hacia el sur, para aprovechar al máximo la luz solar. La orientación hacia el sur se debe a que en el hemisferio norte el sol no pasa por el zenit sino que siempre está inclinado hacia el sur. Por otro lado, la inclinación de 35 grados depende de la altitud del sitio.



Figura 21. Sensores ya colocados e inundados por el río.



Figura 22. Construcción de la caseta de la estación de aforo "Paso Nacional".

La caseta se "sobreelevó" (figura 22) dado que en el río Nazas se tienen avenidas extraordinarias no controladas provenientes de la cuenca intermedia entre la presa Lázaro Cárdenas y la presa Francisco Zarco. Cabe mencionar que con anterioridad se han tenido avenidas extraordinarias con una periodicidad de entre 17 y 20 años; sin embargo, en el año 2010 y en el 2008 ya se han tenido dos inundaciones del río. En la figura 23 se aprecia la ventaja de la sobre elevación, ya que el agua no alcanzó los componentes eléctricos en el interior de la caseta. El gasto que está escurriendo en este caso es cercano a los 400 m³/s.

En esta estación no se colocó medidor redundante de nivel puesto que el aforador tiene la capacidad de autocalibrarse y estimar el gasto únicamente a partir de la medición de nivel. Ello apoya a la medición en caso de que por alguna contingencia los sensores de ultrasónicos de velocidad no estén funcionando, de cualquier manera se tenga una estimación del gasto. Para que tal facilidad funcione se requiere el análisis de la información de niveles y gastos que el propio aforador vaya arrojando; con estos datos se realiza el ajuste de la curva y a partir de ésta, es posible calcular el gasto a partir de la ecuación de ajuste.



FIGURA 23. Nivel alcanzado por el agua durante una avenida extraordinaria

COLOCACIÓN DE UN AFORADOR DE EFECTO DOPPLER DE FONDO EN LA ESTACIÓN DE AFORO "CAÑÓN DE FERNÁNDEZ"

La presa "Francisco Zarco" también conocida como "Las Tórtolas" se localiza a unos 80 Km al suroeste de la ciudad de Torreón, sobre el río Nazas en el sitio denominado "Cañón de Fernández", en los municipios de Nazas y Cuencamé de Ceniceros, Estado de Durango. Para llegar a ella se toma la carretera estatal No 40, Torreón Durango, a 60 Km de la ciudad de Torreón, se inicia el camino que conduce al sitio de la presa, que tiene una

longitud de 10 Km aproximadamente, en su totalidad asfaltados. La presa se construyó para el almacenamiento de los escurrimientos de las cuencas media y baja del río Nazas, mayor aprovechamiento de las extracciones de la presa Lázaro Cárdenas para completar el riego de 90 000 Ha de la Región Lagunera y control de avenidas. Tiene una capacidad para riego y control de avenidas de 369 Millones de m³ y de 70 para azolves, lo que resulta en una capacidad total de 438 Millones de m³.

La obra de toma consiste en una estructura que funciona como obra de toma y vertedor de demasías; está alojada en la margen derecha del río; cuenta con un canal de llamada revestido de concreto que termina en la estructura de entrada, la cual está constituida por dos vertedores con perfil tipo Creager, sobre los cuales se controlan las descargas mediante compuertas radiales, y una torre localizada entre ambos vertedores, que aloja 2 vanos de entrada, con sus rejillas de protección correspondientes, cuyo fin es el de controlar gastos del orden de 50 m³/s por medio de compuertas deslizantes. La descarga de los vertedores se hace a través de 2 túneles perforados en la ladera. La descarga de los gastos menores se hace por medio de dos conductos que terminan aguas arriba del portal de entrada de los túneles. La estructura de salida está constituida por deflectores dentados de concreto reforzado.

Dada la conformación de la obra de toma, que como ya se mencionó, está unida a la obra de excedencias y su salida son dos túneles, ello significa que por dichos túneles circularán los gastos de operación que son de unos 150 m³/s como máximo, así como los gastos de excedencias que pueden llegar a los 3,000 m³/s. Este aspecto hace prácticamente imposible la colocación de aparatos en los túneles porque las avenidas máximas destruirían cualquier dispositivo colocado en los túneles, y aunque dicha destrucción fuera improbable, no se tienen las condiciones hidráulicas necesarias para una medición de calidad por lo corto de los tramos rectos, casi inexistentes, y por la presencia de los dentellones que disminuyen la energía del flujo antes de su salida al río, creando una turbulencia mayor que obstaculiza totalmente el buen funcionamiento cualquier medidor colocado en el interior de los túneles (figura 24).

Por lo anterior, este aforador se colocó aguas abajo de la salida de la presa a unos 800 m, justo en el sitio donde actualmente se realizan los aforos con molinete. En este sitio el río entra en un cañón que justamente se llama "Cañón de Fernández"; la estación hidrométrica adaptó este nombre.

El aforador de la presa "Francisco Zarco" es un Doppler de fondo (en inglés *ADF, acoustic Doppler flowmeter*) colocado al centro del cauce. La estación de aforo completa



Figura 24. Vista de una de las compuertas de la presa Francisco Zarco. Se aprecia el inicio del túnel

consta de dos medidores, el primero es el mencionado aforador Doppler de fondo y el segundo es un medidor de nivel y gasto. El aforador Doppler se considera como el aforador principal y el de nivel y fondo se colocó por redundancia del aforo. De igual manera que en la estación de aforo "Agustín Melgar" se instaló el medidor redundante para que en caso de falla del aforador principal se tuviera una estimación de apoyo del gasto.

El arreglo de los componentes se puede apreciar en la figura 25. Sobre la margen derecha del río ya se tenía construida una caseta que usa el personal de aforo. En el interior de la caseta se colocó un gabinete con las unidades electrónicas de ambos medidores y en el techo de la misma se ubicó la fotocelda. También se tiene ya construido un pozo de lectura de nivel en el que se había colocado con anterioridad un medidor automático y mecánico de nivel que se encuentra inservible. Dicho pozo sirvió para la colocación del nuevo medidor de nivel que funciona en base al ultrasonido.

Para la colocación del sensor se utilizó un contrapeso de concreto de unos 200 kg de peso (ver figura 26) y para sujetar el ducto que conduce en su interior el cable de conexión, se utilizaron otros contrapesos a los que se ancló el ducto. Es importante señalar que esta parte del río nunca se queda sin agua, lo que dificultó enormemen-

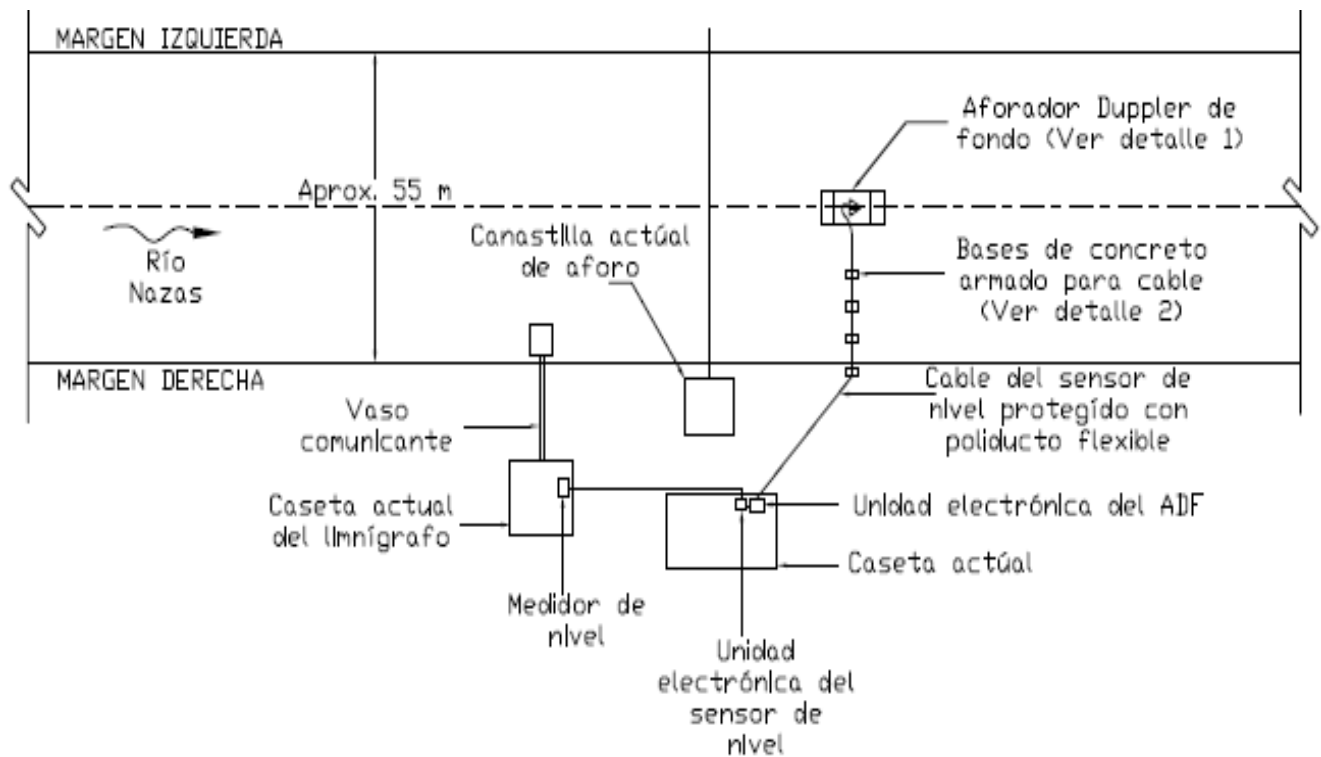


Figura 25. Vista general en planta del sitio de colocación del aforador en "Cañón de Fernández"

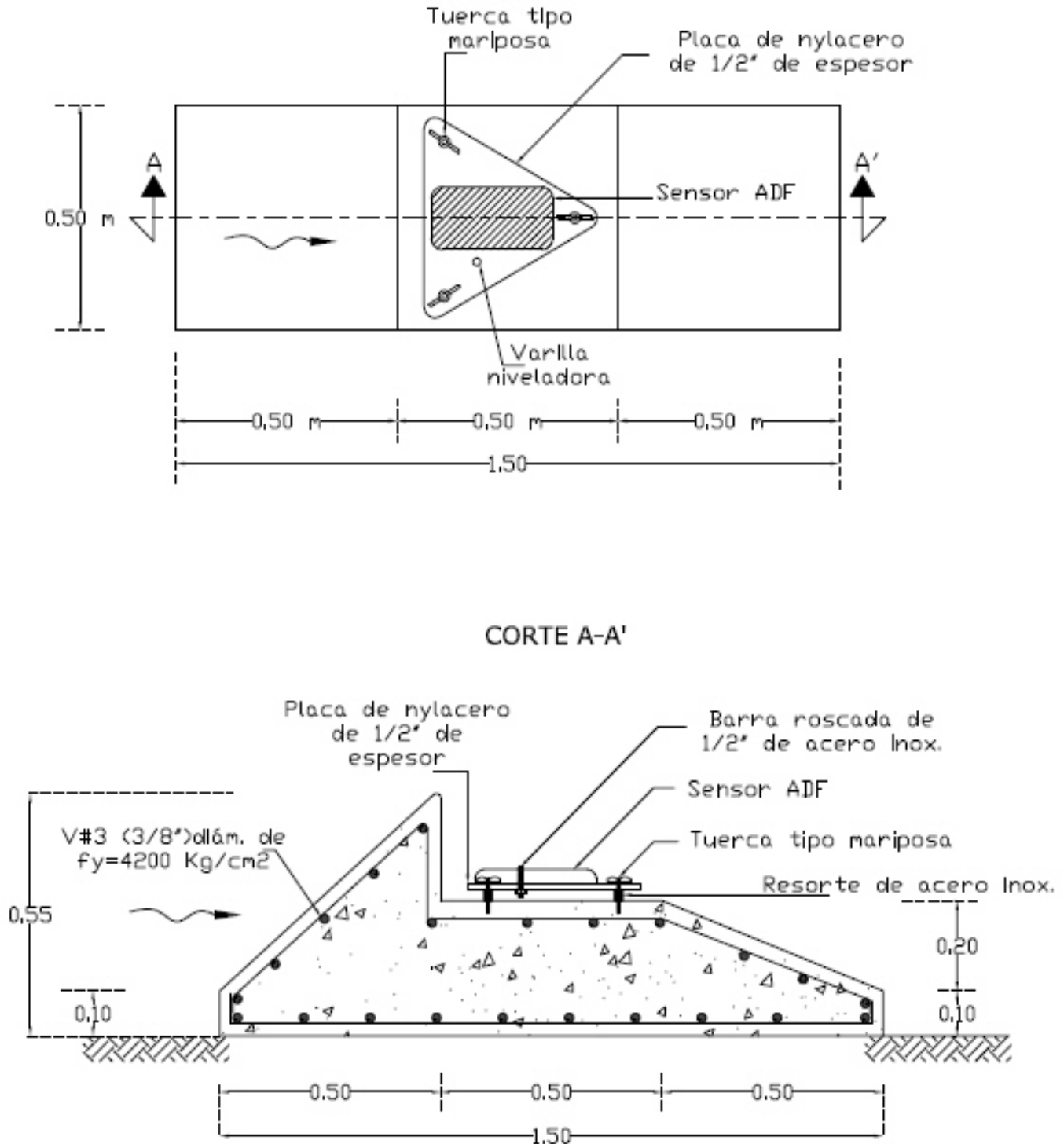


Figura 26. Croquis constructivos del contrapeso de concreto para el sensor en la estación "Cañón de Fernández"

te la colocación del sensor y el tendido del ducto. En la figura 27, se puede apreciar apenas el contrapeso donde se ancló el sensor, así como los contrapesos a los que se sujetó el ducto con el cable de conexión en su interior. En cuanto a la programación del medidor de nivel y gasto se puede decir que se calibró con información de los aforos que personal de la estación viene realizando con molinete ya desde hace varios años.

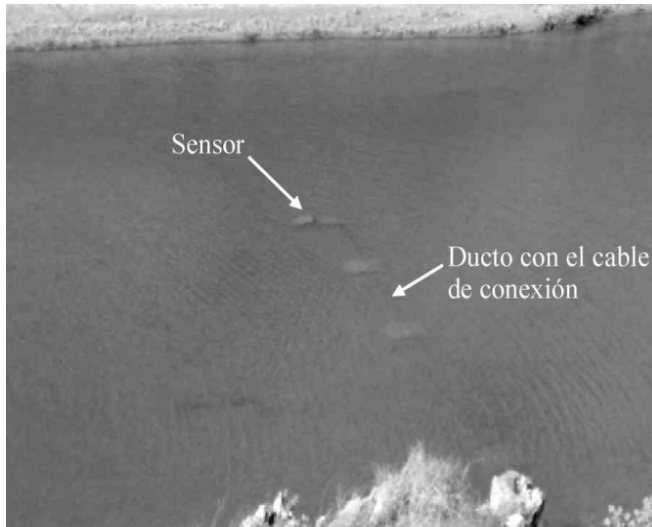


Figura 27. Sensor ya colocado en el fondo del río, en época de estiaje.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

A la fecha se han tenido tanto buenos resultados como malos. Una de las ventajas de este tipo de medición es que está funcionando las 24 horas por lo que cualquier cambio en el gasto o caudal, es contabilizado. Ello ha resultado en gran conveniencia para la estimación de las pérdidas de conducción en el tramo de río entre ambas presas. Cabe mencionar que son aproximadamente 190 km de longitud del río.

Una de las intenciones para la colocación de los aforadores, fue la necesidad de mejorar la calidad de las mediciones de caudal, dado que cada periodo de riego se tenían pérdidas muy altas y dada su magnitud se tenía incertidumbre sobre la causa de dichas pérdidas, que estaban fuera de estimaciones razonables.

El mejoramiento de la medición se logró principalmente en la estación "Agustín Melgar" y en la de "Paso Nacional". En el primer caso, se notó que el aforo con molinete tenía una sobreestimación del gasto y por otro lado, al ser discreto en el tiempo (se afora dos veces por día) no se detectan correctamente algunos importantes cambios en el gasto que escurre por el río. Ello se debe a que entre las dos presas se tienen algunos ríos afluentes del Nazas que descargan volúmenes aportados por las cuencas hidrográficas intermedias. Por otro lado, con la estación

de "Paso Nacional" fue posible tener una mejor estimación de las extracciones que se realizan hacia una zona de riego aledaña y que resultaron mayores a las estimaciones que se tenían anteriormente.

La problemática encontrada tiene que ver con, por un lado, la presencia inesperada de avenidas extraordinarias en el río que provocaron daños en las instalaciones de las estaciones de "Paso Nacional" y "Cañón de Fernández" (aguas abajo de la presa "Francisco Zarco"). En el primer caso, el paso de objetos flotantes, generalmente ramas y troncos, se van deteniendo en el poste de sensores de la margen derecha y eventualmente obstaculizan la señal entre los sensores más bajos; y lo más grave fue que el ducto que conduce y protege los cables de conexión entre los sensores y las unidad electrónica, quedó al descubierto. Dicho ducto se había enterrado en el fondo del río, pero con la erosión de la corriente quedó a al vista lo que lo hace presa fácil del vandalismo.

En cuanto a la estación hidrométrica de "Cañón de Fernández" se tuvo un problema generado por la misma razón. Al parecer, el peso de los elementos de concreto que sostienen el ducto por cuyo interior se tienen los cables de conexión, no fue suficiente y fueron movidos de su lugar. Al momento de la redacción del presente artículo se tiene el reporte que desde hace varias semanas el aforador Doppler de fondo instalado en dicha estación, no presenta información; por lo que se teme que el movimiento de los contrapesos de concreto haya sido lo suficientemente grande como para dañar el cable. Los problemas anteriores se consideran normales dado que este tipo de tecnología ha sido usada ampliamente en canales de riego y es la primera ocasión en que se colocan en un cauce natural como lo es el río Nazas.

Otros problemas menores se han tenido con la correcta programación (o "parametrización", como lo llaman los distribuidores), de los equipos. Por ejemplo, el aforador de la estación "Agustín Melgar" se programó para funcionar hasta una cierta profundidad del río, sin embargo, dicha profundidad fue rebasada y consecuentemente, el aforador no registró el caudal en ese periodo. La profundidad del río superó los 2.3 m y a partir de dicha profundidad el aforador dejó de registrar; cuando el nivel descendió volvió a funcionar correctamente.

Otro problema de programación se tiene en el medidor de nivel y gasto (aforador redundante) de la estación "Cañón de Fernández". En este caso, se tiene un bordo aguas abajo que cumple las funciones de presa derivadora para elevar y mantener el nivel del agua en un cárcamo de bombo que extrae agua para riego en la zona. Dicho bordo no es estable y varía en altura; ello hace que el nivel del agua sea diferente para un mismo gasto. Claramente ello es un obstáculo para determinar la curva de ajuste carga-

gasto para programar el medidor de nivel y gasto.

CONCLUSIONES

Ya se plantean soluciones para toda la problemática presentada, dado que se han tenido ventajas tangibles derivadas del uso de la tecnología de ultrasonido para la medición continua de caudales en el sistema de presas "Lázaro Cárdenas" "Francisco Zarco" y su interconexión.

REFERENCIAS

- Tamari, W. S.** (2008). "Metodología de calibración de un perfilador acústico fijo de efecto Doppler", Apuntes del curso "Mantenimiento y operación de sistemas de medición en canales y presas", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Nov.
- King, H. W.** (1993). "Manual de Hidráulica", Editora Uteha, Noriega Editores, Ciudad de México.

Recibido: diciembre del 2010
Aprobado: marzo del 2011