



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

INFLUENCIA DE UNA ESTRUCTURA AGUAS ABAJO EN UNA SECCIÓN DE AFORO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

EDUARDO OCAMPO ACOSTA

TUTOR PRINCIPAL:

DR. VÍCTOR MANUEL ARROYO CORREA

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

JIUTEPEC, MORELOS, OCTUBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Pedroza González Edmundo
Secretario: M.I. González Verdugo José Alfredo
Vocal: Dr. Arroyo Correa Víctor Manuel
1^{er} Suplente: M. en C. Salgado Maldonado Gilberto
2^{do} Suplente: M.I. Escalante Estrada Mauricio de Jesús

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
DEPFI-UNAM, Campus Morelos
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
C.P. 62550
Jiutepec, Morelos, México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa

FIRMA

RESUMEN

Es de vital importancia conocer la cantidad de agua que se manejan en los sistemas de administración hidráulica, para así lograr un máximo aprovechamiento del recurso. Con el continuo avance tecnológico, cada vez se crean más herramientas que sirven para medir el agua que fluye a través de un punto, lo que genera un panorama de opciones más amplio del que podemos elegir como medir. Dentro de este ámbito se encuentra la tecnología basada en ultrasonido, puntualmente la de tiempo de tránsito, la cual tiene extensas áreas aplicación, donde una de ellas es la hidrometría.

Los medidores basados en tecnología ultrasónica de tiempo de travesía, trabajan bajo circunstancias particulares, las cuales pueden ser modificadas por un elemento ajeno a una condición normal de flujo. En este trabajo se estudia la influencia en una sección de control, de un obstáculo que modifica el comportamiento del flujo, generando velocidades hacia aguas arriba, provocando que los medidores registren velocidades negativas, y también pueden afectar en el cálculo del volumen totalizado del propio medidor.

Replicando el fenómeno en un modelo de un canal de pendiente variable del laboratorio Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se comparó el registro de los volúmenes totalizados del medidor ultrasónico, con un volumen conocido, medido directamente del tanque de alimentación del laboratorio. Los resultados muestran las variaciones de velocidades que se presentan en los registros y de cómo estas se reflejan en el cálculo del volumen totalizado.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Justificación	4
1.2. Objetivos	5
1.3. Hipótesis.....	5
1.4. Principios de Medición.....	5
1.4.1. Métodos y Técnicas para aforar	5
1.4.1.1. Métodos de aforo	6
1.4.1.2. Técnicas de aforo	7
1.4.2. Ultrasonido.....	10
1.4.3. Efecto Doppler	11
1.4.4. Tiempo de travesía.....	13
2. MEDICIÓN DE CAUDAL.....	15
2.1. Generalidades del ultrasonido en la hidrometría.....	15
2.2. Medición del Gasto	16
2.2.1. Método de Área Velocidad	18
2.2.1.1. Método de sección promedio	19
2.2.1.2. Método de sección media	21
2.3. Medición de la velocidad mediante tiempo de tránsito.....	23
2.3.1. Cálculo del gasto	25
2.3.1.1. Método de sección media	27
2.3.1.2. Método de sección promedio	28
3. METODOLOGÍA.....	31
3.1. Sitio de pruebas experimentales.....	31
3.1.1. Componentes del sistema de abastecimiento de agua en el laboratorio	32
3.1.2. Descripción del modelo	33
3.2. Instrumentos de medición	35
3.2.1. RIMOCTRL.....	36

3.2.2.	RIMOUSTT	36
3.2.3.	Transductores ultrasónicos de Rittmayer RISONIC tipo MFATKx ...	37
3.2.4.	Transmisor de nivel del agua tipo MPUL06	38
3.3.	Instalación	39
4.	PRUEBAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS	46
4.1.	Descripción de las pruebas	46
4.2.	Ajustes de parámetros físicos	49
4.3.	Pruebas sin compuerta	52
4.4.	Resultados	53
4.4.1.	Datos de ajuste	54
4.4.2.	Registros de pruebas	54
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
6.	CONCLUSIONES	62
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
	ANEXOS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

figura 1. Sección de control en el distrito de riego 076.	2
figura 2. Sensores ultrasónicos.....	3
figura 3. Canal Principal de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, en Sinaloa.	4
figura 4. Efecto Doppler.	12
figura 5. Instalación típica con un sensor ultrasónico de nivel.	17
figura 6. Instalación típica de un sensor de presión.	17
figura 7. Diagrama del método de sección promedio. Extraída de: International Standard ISO 748, Hydrometry, 2007.	19
figura 8. Diagrama del método de sección media. Extraída de: International Standard ISO 748, Hydrometry, 2007.	21
figura 9. Parámetros generales del principio de medición.	23
figura 10. Sección de control con parámetros del método de sección media. ..	27
figura 11. Sección de control con parámetros del método de sección promedio.	29
figura 12. Funcionamiento general de la circulación del agua en el laboratorio.	31
figura 13. Dimensiones del tanque de carga constante vista en planta; acotaciones en metros; sin escala.	32
figura 14. Apoyos para variar la pendiente del canal.....	34
figura 15. Geometría del canal de pendiente variable.....	35
figura 16. Controlador Rittmayer RISONIC Modular.....	36
figura 17. Módulo Ultrasónico de Tiempo de Travesía RISONIC Modular.	37
figura 18. Transductor ultrasónico tipo K.....	38
figura 19. Sensor de nivel ultrasónico.	38
figura 20. Limpieza de las paredes del canal.	39
figura 21. Configuración de instalación en una tubería.	40
figura 22. Arreglo 2E8P en un canal rectangular -Extraída de: RISONIC modular System Manual.	41

figura 23. Instalación de los sensores en las paredes de canal.	42
figura 24. Arreglo final de los sensores (2E4P).	44
figura 25. Parámetros de la Tabla 2 mostrados esquemáticamente en la sección	45
figura 26. Consideraciones en la instalación.	47
figura 27. Registro de tirante y velocidades mediante ultrasonido.	48
figura 28. Tanque elevado para alimentar el laboratorio.	51
figura 29. Registro de velocidades y gasto sin obstáculo.	52
figura 30. Volumen totalizado de una prueba.	53
figura 31. Variación de volumen con el vertedor abajo.	57
figura 32. Registros de los volúmenes en las cincuenta repeticiones.	59
figura 33. Diferencia entre registro de volúmenes medidos en las pruebas con obstáculo, ajustados con el resultado de la tabla 5.	60
figura 34. Registros de velocidad de la presa Josefa Ortiz de Domínguez	63
figura 35. Mediciones de velocidad registrado por cada par.	72

1. INTRODUCCIÓN

Es importante dentro de los sistemas hidráulicos determinar el caudal que pasa por una sección, ya sea en conductos a presión o en canales abiertos, principalmente para efectos administrativos y como control de la cantidad de flujo que maneja el sistema. La ley de aguas nacionales (Congreso de la Unión, 1992, última reforma 2016) indica en su tercer apartado del artículo 7 que: “Se declara de utilidad pública la instalación de dispositivos necesarios para la medición de la cantidad y calidad de las aguas nacionales y en general para la medición del ciclo hidrológico”, por lo que esta práctica ha pasado a ser recurrente y, por consiguiente, de mejora continua, ya que con el tiempo y con el desarrollo de la tecnología se van generando técnicas más efectivas, versátiles y económicas.



figura 1. Sección de control en el distrito de riego 076.

Existen muchas estaciones hidrométricas para conocer los parámetros hidráulicos de un canal, cada cual, con sus ventajas y desventajas, influyendo principalmente el factor económico, espacial y de recursos materiales.

Actualmente el uso de medidores ultrasónicos tiempo de tránsito se hace cada vez más frecuente debido a su confiabilidad como medición continua y bajo diferentes condiciones de operación donde no se necesita calibración.

Los medidores ultrasónicos de tiempo de travesía se basan en el tiempo que tarda en recorrer una cierta distancia dos pulsos acústicos entre dos sensores. Uno de ellos en el sentido del flujo y el otro en sentido contrario. La diferencia de los tiempos se relaciona con la velocidad media. Los medidores se instalan en pares, teniendo una diversidad de arreglos según las condiciones del canal o tubería.



figura 2. Sensores ultrasónicos.

Hay ciertas condiciones especiales en las que un sistema de medición a base de esta tecnología queda instalado en un canal. Por ejemplo, cuando aguas abajo de la sección de aforo hay una estructura que puede alterar las condiciones del flujo, como una compuerta, un dique o un vertedor, provocando que los patrones de velocidad cambien, generando eventualmente velocidades negativas y en casos más desfavorables, pueden generar remansos que originen el ahogamiento de la sección. Si la longitud de influencia de estas condiciones alcanza la sección de aforo donde se instalaron los sensores ultrasónicos, las mediciones generadas por éstos pueden ser afectadas. Cuando esto ocurre, los usuarios muestran mucha desconfianza en las mediciones que genera el

medidor, incluso prefiriendo el uso de técnicas más tradicionales como el uso del molinete.

1.1. **Justificación**

Existe en la literatura poca información sobre la pérdida de exactitud que un sistema de medición pueda tener cuando ocurren remansos o velocidades negativas en zonas parciales dentro del perfil del flujo.

Por lo tanto, resulta interesante desde el punto de vista hidráulico, determinar si los sistemas de medición a base de sensores ultrasónicos tiempo de tránsito, toman en cuenta en su configuración para el cálculo del caudal, las velocidades negativas en un eventual remanso, ya que si esto no ocurre puede generar grandes errores en la estimación del volumen de agua que pasa por la sección de aforo

Asimismo, muchas veces los aforadores ultrasónicos se terminan instalando en una zona del canal en la que, aguas abajo, se encuentra una estructura, ya sea compuerta, vertedor, dique, etcétera, y las velocidades negativas que resultan del remanso del flujo, llegan a presentarse en la zona de aforo.



figura 3. Canal Principal de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, en Sinaloa.

Un caso particular es el que se presenta en el canal principal “Tramo muerto” de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, en Sinaloa (figura 3), en el que aguas abajo de la sección de aforo se encuentra un dique, el cual hipotéticamente genera flujo a contracorriente y su longitud llega a la sección donde se instalaron los sensores. Los usuarios del canal aseguran que este fenómeno sí afecta las mediciones registradas. Entonces se tendrá que demostrar que tanto afecta (o no) esta condición a los medidores ultrasónicos.

1.2. Objetivos

- Determinar la influencia de las velocidades negativas que se presentan en un conducto a superficie libre generadas por una compuerta aguas abajo en una sección de aforo con tecnología ultrasónica.

1.3. Hipótesis

En un conducto, las velocidades negativas que eventualmente se presentan en una sección de aforo con tecnología ultrasónica tiempo de tránsito, afectan el cálculo del volumen totalizado.

1.4. Principios de Medición

1.4.1. Métodos y Técnicas para aforar

En la práctica podemos llegar a confundir las definiciones de método y técnica de aforo, por lo que se debe aclarar la diferencia entre los dos. Según la definición de (Tamari & Aguilar, 2010):

- *Un método de aforo es un procedimiento general basado en ciertos principios físicos, para determinar el gasto en ciertas condiciones.*

- *Una técnica de aforo es una forma particular de aforar, que se basa en la aplicación de un cierto método de aforo.*

Por lo que podríamos decir que varias técnicas de medición pueden basarse en un mismo principio físico, y describen un mismo método de aforo. Dentro del ámbito de la medición del gasto en canales a superficie libre o en tuberías a presión, es limitado el número de métodos existentes, siendo los más comunes los que se mencionan a continuación.

1.4.1.1. Métodos de aforo

El *balance volumétrico* en tanques de agua consiste en medir la variación del volumen en el tanque y el tiempo que tarda esta variación. El gasto será el total del volumen variado sobre el tiempo cronometrado de la duración del proceso. (Tamari & Aguilar, 2010)

Otra forma de aforar es mediante *trazadores*. Esta técnica es utilizada mayormente en corrientes en las que la topografía es irregular y se dificulta obtener la geometría de la sección, o se tiene un espejo de agua muy amplio, así como en corrientes impetuosas. De manera general, la técnica consiste en la inyección de un volumen conocido de una sustancia química en el agua, y aguas abajo la posterior medición de la concentración y la velocidad de la sustancia en el medio. A partir de los datos obtenidos se obtiene un gasto a partir de la ecuación de conservación de masa. (UdeV, 2005)

Aunque la presente investigación está inclinada en el aforo de flujo a superficie libre, es adecuado mencionar algún método de aforo en tuberías a presión. Tal es el caso del *método de Gibson*, en el cual se requiere la medición y monitoreo de la fluctuación de presiones dentro de la tubería, y se estima el gasto del flujo a partir de una teoría sobre los fenómenos transitorios de presión. (Urquiza, Adamkowski, Kubiak, Janicki, & Fernández, 2007)

Algunos métodos se basan en un cambio intencional de la geometría de la sección de control para facilitar la medición de la variación del tirante o la presión en el flujo. Uno de estos métodos es el de *presión-gasto* utilizados en tuberías a presión; consiste básicamente en la instalación de una contracción con la intención de generar un cambio de presión que se pueda medir en ese punto, y a partir de la ecuación de conservación de la energía se estima el gasto, considerando algunos coeficientes empíricos que dependen de los elementos físicos de la tubería y que se pueden encontrar en registros ya investigados. Este mismo principio es aplicado en canales con el método de *tirante-gasto*, en el que se hace una contracción intencional en un canal, y bajo las mismas bases se calcula el gasto. También existe el método de *pendiente-área*, muy parecido a los anteriores, solo que en éste se mide la variación del tirante en un tramo del canal cuya pendiente es conocida, en lugar de medirlo en un punto en particular, mientras que el gasto se obtiene también por el principio de conservación de la energía.

Otros métodos son los que requieren la medición de la velocidad del flujo, tal es el caso del método *área-velocidad*, en el cual es necesario contar con un tramo de canal con geometría regular, en donde se medirá la velocidad del agua, que dependiendo el caso podrá ser la velocidad representativa de una sección parcial o total. Y por el principio de continuidad se obtiene el gasto relacionando la velocidad con la sección asociada (ISO 748, 2007). En la presente investigación se utiliza este método para el cálculo del gasto e indirectamente del volumen, por lo que más adelante se profundiza en las bases de este método.

1.4.1.2. Técnicas de aforo

Al contrario de los métodos de aforo que son limitados en su existencia, se pueden encontrar una variedad considerable de técnicas para obtener el gasto, debido a que se puede aplicar el mismo método de aforo con variaciones que no

salen del principio físico. Por ejemplo, se puede aplicar un método de área-velocidad, utilizando diferentes equipos para la obtención de la velocidad (por ejemplo, molinete o medidores ultrasónicos), de tal manera que se mantiene el uso del método, pero la técnica difiere.

La selección de la técnica que se debe usar va ligada principalmente al tipo de información que se pretende obtener, aunque en la práctica los parámetros que se deben considerar son más del ámbito de los recursos materiales con que se cuentan, así como la disponibilidad de personal capacitado para el trabajo; es de esperar que la precisión de los resultados dependerá de la técnica elegida y de su correcta ejecución.

Según (Tamari & Aguilar, 2010) las técnicas pueden clasificarse por antigüedad, por forma de uso y por su precisión.

Una técnica *tradicional* hace referencia a una técnica cuyo planteamiento y aplicación data de al menos cincuenta años de antigüedad, razón por la que su efectividad ha sido probada y sus resultados avalados por normas de organismos internacionales.

Las técnicas *nuevas* indican modos de trabajar que son más recientes que las tradicionales (menos de treinta años), que están comprobadas con prácticas y estudios científicos, pero que no han sido normadas internacionalmente debido a su relativa modernidad.

Por otro lado, la continua evolución de la tecnología y la investigación, va generando técnicas *emergentes*; técnicas que aún están en proceso de desarrollo y que, aunque hayan mostrado buenos resultados en algunas aplicaciones, no tienen el suficiente sustento para considerarse una técnica efectiva, a pesar de que generalmente estas técnicas ofrecen una opción más precisa, económica,

versátil y/o rápida, se requieren más investigaciones para poder definir su trascendencia.

Otra perspectiva en la clasificación de las técnicas es la forma de uso. En los sitios donde es de continuo interés el saber el flujo que pasa por una sección, se utilizan técnicas de aforo *fijas*, para monitorear automáticamente el gasto de manera ininterrumpida durante largos periodos de tiempo.

Su contraparte son las técnicas *portátiles* en las que se usa tecnología que puede ser transportada con relativa facilidad y son útiles para comprobar el correcto funcionamiento de una técnica fija o para conocer el flujo en un cauce en el que no se tiene instalada ningún tipo de aforador.

Desde el enfoque de la precisión las técnicas se dividen en primaria y secundaria. Las *primarias* son consideradas como las más precisas, ya que se puede hacer uso de ella sin necesidad de una calibración previa; debido a la precisión de sus mediciones, son utilizadas como valor patrón para la calibración de otras técnicas.

Las técnicas *secundarias* son menos precisas que las primarias ya que algunas se basan en principios fundamentados más en la generalización que en una precisa experimentación, y pueden tomar como un hecho relaciones de parámetros que pueden no siempre ser correctas. Estas técnicas son utilizadas dependiendo de los recursos materiales y económicos con que se cuente, ya que el uso de una técnica primaria suele generar más costos y complicaciones, correspondientes a su precisión.

Algunas de las técnicas más comunes son: para un método de balance volumétrico, la medición del tirante en un tanque de concreto; para un método de tirante-gasto se puede utilizar un aforador de garganta larga o un canal Parshall; para un método de pendiente-área, se mide el tirante en dos puntos en

un mismo tramo de canal; en los métodos de área-velocidad podemos encontrar variantes como sondas electromagnéticas que cubren el ancho del canal, radares para medir la velocidad superficial del agua, aforadores acústicos Doppler, o aforadores de tiempo de travesía, de los cuales se hablará más en secciones posteriores.

En este trabajo se hará uso del método de área-velocidad y la técnica empleada será la tecnología de tiempo de tránsito para la obtención de la velocidad. El área hidráulica será obtenida de manera simultánea a través de un sensor ultrasónico.

1.4.2. Ultrasonido

El uso del término “ultrasónico” en el ámbito de la medición del caudal, hace referencia a que la velocidad del flujo se mide por medio de ultrasonidos, es decir “ondas acústicas, vibraciones mecánicas que se propagan por todos los medios materiales mediante el movimiento armónico de sus moléculas”. El término parte de que las frecuencias manejadas están fuera de los rangos de la audición humana, es decir, superiores a los 20kHz, consideradas como sónicas, mientras que las ondas que operan en rangos superiores a los 500 kHz son frecuencias ultrasónicas.

Actualmente el espectro de aplicaciones de esta tecnología es muy amplio, como por ejemplo en el ámbito de la medicina, donde se utilizan con fines terapéuticos; o en la industria, donde se utiliza para activar procesos de la naturaleza física, como filtros, aglomerantes, eliminación de aire de burbujas en procesos de embotellamiento de bebidas gaseosas, etcétera; en la industria química, en el control de aceleración de reacciones, así como en la limpieza y soldadura de piezas. Realmente esta tecnología tiene un campo de aplicación ilimitado, entrando en el área de control de calidad en las industrias aeroespacial, nuclear,

siderúrgica, naval, automotriz y de construcciones civiles. Otra aplicación común es el trazo de mapas de fondo marino por medio de los SONARES, utilizados también para detectar bancos de peces y otros objetos en el mar. (Veca & Accolti, 2016).

El principio del ultrasonido lo podemos encontrar en la naturaleza, en donde algunas especies de animales utilizan el ultrasonido como medio de comunicación o para subsistir. Algunos animales, como los murciélagos, cuentan con un sistema neuronal que les permite emplear ultrasonidos modulados de acuerdo a sus necesidades. Las ballenas y delfines, utilizan el ultrasonido como sonar dentro de su medio y para comunicación entre su especie.

Aunque esta es la base de la medición, el caudal se mide en realidad por alguna de las técnicas siguientes:

- Por efecto Doppler.
- Por tiempo de tránsito de señal.

1.4.3. Efecto Doppler

Nombrado así por el físico Christian Doppler en 1842, se puede describir de manera general como un aparente cambio de frecuencia de onda, producido por el movimiento del generador de ésta, respecto a un receptor particular.

El ejemplo clásico para describir este fenómeno, es el sonido que genera la sirena de una ambulancia (representado gráficamente en la figura 4); cuando el receptor del sonido se encuentra en reposo y el emisor se mueve de izquierda a derecha respecto al receptor, las ondas que genera el emisor en un tiempo 1, se siguen extendiendo de manera que se acercan a las ondas generadas en un tiempo 2, y estas a su vez a las generadas a un tiempo 3, y así respectivamente, de manera que la frecuencia en que el receptor percibe las ondas de sonido es

mayor a la frecuencia que realmente el emisor las genera, por lo que el sonido cuando la ambulancia se acerca al receptor es más agudo; en cambio, si la ambulancia se aleja del receptor, el sonido se hace menos agudo, debido a que las ondas se van alejando una de otra y a frecuencia de recepción es menor a la emitida.



figura 4. Efecto Doppler.

En la práctica pueden presentarse cuatro casos dependiendo del comportamiento del emisor respecto al receptor, los cuales se mencionan en términos generales a continuación.

- Cuando las partes emisora y receptora se mueven en la misma dirección y sentido
- Cuando las partes emisora y receptora se mueven en sentidos contrarios
- Cuando el emisor se encuentra en reposo y el receptor en movimiento
- Cuando el receptor se encuentra en reposo y el emisor en movimiento

Los medidores de caudal Doppler se basan, como su nombre lo indica, en el efecto Doppler para medir la velocidad de las partículas del flujo. En general, se manda un impulso por un emisor, el cual se propaga en el flujo, chocando con las partículas en suspensión, con lo que se genera un reflejo de la onda, que es captado por una parte de la instrumentación, la cual relaciona los tiempos de los pulsos con el desplazamiento de las partículas, y estima la velocidad media del flujo. Por lo anterior, el uso de esta tecnología para la medición del caudal está condicionada a que el fluido en cuestión, contenga partículas en suspensión, burbujas u otras heterogeneidades que generen reflejo en las ondas de ultrasonido. Para esta metodología se asume que la velocidad de las partículas en suspensión es la misma que la velocidad del flujo.

1.4.4. Tiempo de travesía

Los medidores de caudal que usan tecnología acústica de tiempo de tránsito o travesía, se basan en el principio de que el tiempo en que un pulso de sonido tarda en recorrer una trayectoria conocida, es constante y solo puede ser modificado por la velocidad del fluido en el que se desplaza.

Para entender mejor este principio, podemos utilizar el ejemplo de a continuación: Un río fluye de un punto X a un punto Y, si una persona nada en el río desde X a Y, tardará en tiempo t_1 y requerirá un esfuerzo f_1 ; si la persona nada de Y a X, tardará un t_2 y requerirá un esfuerzo f_2 ; t_2 y f_2 son mayores que t_1 y f_1 debido a que al nadar a contracorriente necesitará más esfuerzo y tiempo para recorrer la misma distancia en comparación a si nadara en dirección del flujo.

Dicho en otras palabras, al moverse en dirección de la corriente, la componente de la fuerza del flujo se agrega a la fuerza del nadador, aumentando su velocidad de movimiento y por consiguiente el tiempo del recorrido es menor; por el

contrario, cuando nada en dirección contraria, la componente del movimiento del flujo, se resta al esfuerzo del nadador, lo que reduce su velocidad y aumenta el tiempo en el que recorre la misma distancia.

Este mismo principio se aplica en la ingeniería hidráulica para estimar la velocidad media del agua en conductos a presión o en flujo a superficie libre, cuyo procedimiento se describe en las siguientes secciones.

2. MEDICIÓN DE CAUDAL

2.1. Generalidades del ultrasonido en la hidrometría

Como se ha mencionado anteriormente, el conocimiento del volumen de agua que se maneja dentro de un sistema, es información necesaria para su correcta administración. La tecnología ultrasónica en aforadores de tiempo de tránsito puede considerarse adecuada para su uso en canales abiertos y ríos debido a la versatilidad en cuanto al lugar de su instalación, a diferencia de otras técnicas utilizadas para el mismo fin. Esta técnica no exige una sección natural de control o una particularmente diseñada para su operación, debido a que su funcionamiento no está basado en una correlación característica entre el nivel del agua y el gasto.

Es adecuado mencionar, en temas un poco más ambientales, que algunas especies de fauna acuática puede resultar sensible a ciertas frecuencias de señal ultrasónica; exceptuando esto, este método no crea ningún tipo de obstrucción en la navegación, en otros usos del canal, ni en ninguna actividad de interés en la ribera del cauce.

En ocasiones, en los lugares donde se propone instalar los sensores no se tiene disponibilidad de una instalación de energía directa al servicio público; esta situación es cubierta con la instalación de una batería o un acumulador de energía, muchas veces alimentado con energía solar mediante celdas instaladas dentro del perímetro del módulo de cálculo y registro de información.

No es recomendable utilizar este método en condiciones extremas, por ejemplo, en lugares donde la temperatura se maneja en niveles tan bajos que los canales se cubren de hielo, ya que esta condición dificulta la correcta determinación de la sección transversal.

Otras aplicaciones de esta técnica en la medición del gasto, es cuando existe una separación del gasto en dos o más partes, debido a alguna estructura o alguna

división intencional, pudiendo considerarlo como dos caudales independientes y posteriormente combinarlos para obtener un solo dato del gasto.

También se utiliza el método ultrasónico para mediciones en conductos cerrados, desde agua potable, conductos pluviales, hasta aguas negras, ya sea en condiciones de tubo lleno o como flujo a superficie libre.

2.2. Medición del Gasto

Considerando la definición de gasto como la cantidad de volumen de un líquido que pasa a través de una sección en un tiempo determinado, se podría decir también que es el producto del área de la sección transversal con la componente de la velocidad media perpendicular a dicha sección.

Para medir el gasto se puede utilizar un método directo; utilizando un contenedor con un volumen conocido y calibrado, y midiendo el tiempo que tarda en llenarse. También se puede utilizar un método indirecto, en el cual se miden las componentes de velocidad en diferentes puntos de una sección, considerando un área característica de influencia. A estos métodos se les llama de *área velocidad*.

Los sensores de tiempo de tránsito, utilizan el método de área velocidad para la estimación de la descarga; estos miden la componente de velocidad en cada par, en su respectiva área de influencia, y obtienen un promedio a lo largo de varias líneas usual pero no necesariamente horizontales.

Una instalación típica para un conducto a superficie libre se muestra a continuación.

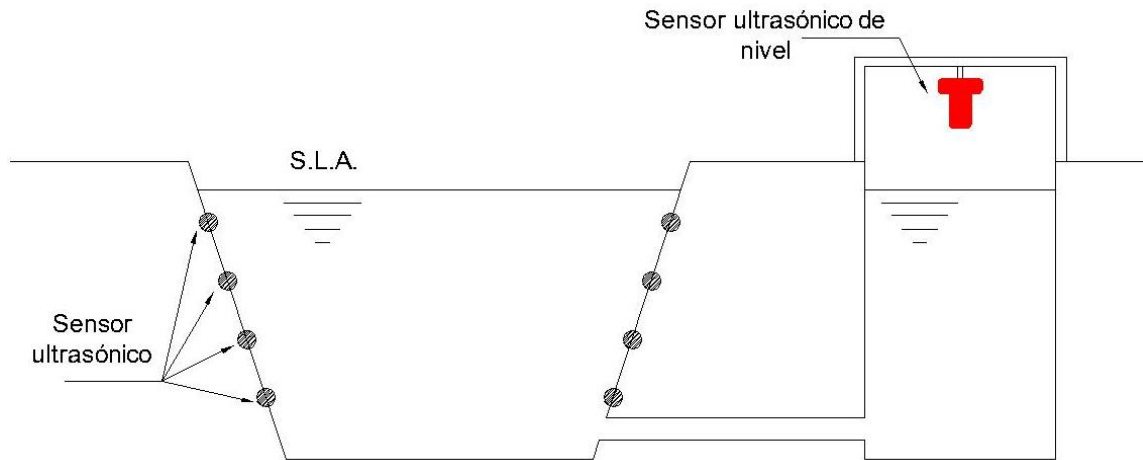


figura 5. Instalación típica con un sensor ultrasónico de nivel.

En la figura 5 se muestra el esquema de una configuración básica de una sección de aforo con sensores ultrasónicos usando un sensor ultrasónico de nivel para definir el área hidráulica. Se tiene un pozo lateral donde el flujo está estabilizado para que el sensor de nivel funcione correctamente.

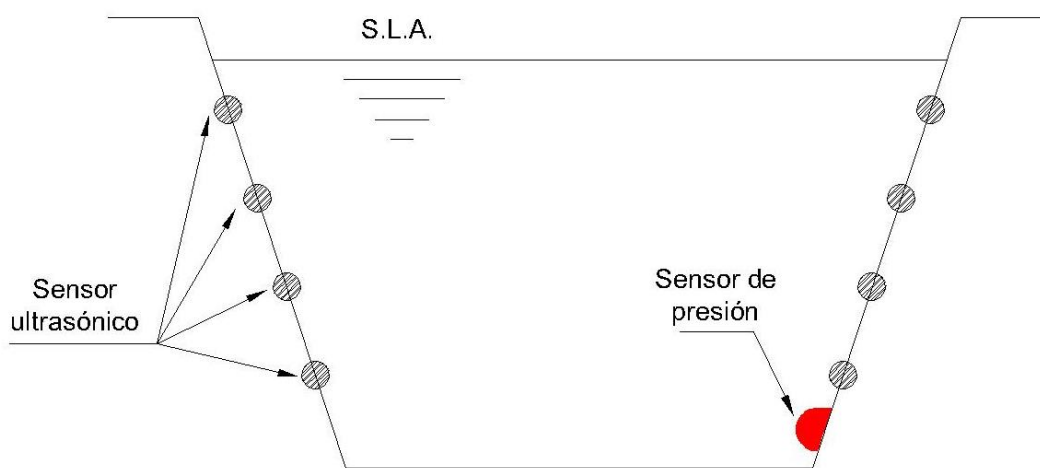


figura 6. Instalación típica de un sensor de presión.

En algunos casos no es posible usar un pozo para instalar el sensor de nivel ultrasónico, por lo que se recurre a un sensor de presión para obtener el tirante del canal, como se muestra en la figura 6.

2.2.1. Método de Área Velocidad

Aforar una corriente mediante el método de área-velocidad, consiste en obtener el área de la sección transversal del cauce y la velocidad media que fluye por dicha sección, así mediante la ecuación de continuidad, que a su vez se basa en el principio de conservación de masa, se puede obtener la magnitud del caudal de la corriente.

El lugar donde se realizarán las mediciones, se elige siguiendo las siguientes recomendaciones, que se especifican en la norma (ISO 748, 2007). El tramo del canal donde se realizarán las mediciones debe ser recto, con estabilidad en el lecho y en los márgenes, y su sección transversal y pendiente deberán ser lo más uniforme posible, para evitar una distribución de velocidades inestable. La dirección del flujo debe ser perpendicular a la sección de control en todos los puntos. El sitio de medición debe de estar alejado de puntos donde se generen vórtices o haya bombas en funcionamiento, ya que podrían generar condiciones inestables a la hora de la medición. La sección debe de estar ubicada en un sitio de fácil acceso, y debe estar libre de árboles y vegetación u otros obstáculos.

Para obtener el perfil de la sección transversal, se divide el ancho en un número suficiente de puntos, de manera que se pueda establecer la forma del lecho; a estas divisiones se les conoce como verticales o dovelas. En una orilla se debe tener un punto de referencia, que servirá como origen para ubicar cada vertical, y, por consiguiente, servirá para el cálculo del área de las secciones independientes, definidas por las verticales.

El número de puntos en los que la velocidad es medida para obtener una media, depende de los lineamientos del proyecto, respecto a la precisión que se quiera obtener, así como los recursos temporales y económicos con los que se cuente; pueden ser un punto, dos, tres o incluso más en el caso que se requiera.

Para medir el ancho del canal y de cada subdivisión se utilizan métodos directos, cuando las longitudes lo permitan, utilizando una cinta graduada o su equivalente. De lo contrario, cuando el canal es demasiado ancho se utilizan medidores electrónicos o mediante posicionamiento global.

Para las mediciones realizadas en campo, se utiliza comúnmente el método aritmético, por la naturaleza del comportamiento de los datos registrados en la práctica, el cual se describe a continuación.

2.2.1.1. Método de sección promedio

Como se mencionó anteriormente, la sección transversal de estudio está dividida virtualmente en segmentos separados por líneas verticales contiguas, generalmente equidistantes, lo que sirve de guía para el cálculo independiente de áreas, en representación del área total. La particularidad de este método, es la consideración de la velocidad media en ambas verticales de la sección seleccionada, haciéndose un promedio de ambas.

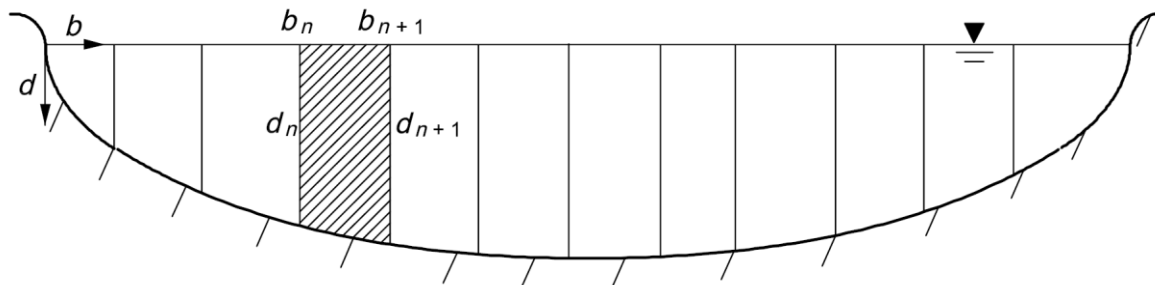


figura 7. Diagrama del método de sección promedio. Extraída de: International Standard ISO 748, Hydrometry, 2007.

Si consideramos la subsección sombreada como el área puntual de estudio, podemos obtener el gasto que pasa por esa sección utilizando la siguiente ecuación.

$$q = (b_{n+1} - b_n) \left(\frac{d_{n+1} + d_n}{2} \right) \left(\frac{\bar{v}_{n+1} + \bar{v}_n}{2} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

q , gasto que pasa por la sección sombreada.

d_n , profundidad en la primer vertical considerando la dirección del cálculo.

d_{n+1} , profundidad de la segunda vertical.

b_n , distancia horizontal a la primer vertical desde el punto de referencia.

b_{n+1} , distancia horizontal a la segunda vertical desde el punto de referencia.

\bar{v}_n , velocidad promedio en la primer vertical.

\bar{v}_{n+1} , velocidad promedio en la segunda vertical.

Para las subsecciones pegadas al margen del cauce, es decir, entre el punto de referencia y la primera vertical, y la segunda vertical y la otra orilla, puede estimarse el gasto utilizando de igual manera la ecuación (1), haciendo la consideración de que la velocidad en los bancos es cero. Si el gasto es de magnitud significativa en este punto respecto al flujo total, entonces se utiliza la siguiente ecuación para calcular la velocidad media \bar{v} en un punto entre el banco y el último punto de medición, en este caso la primer vertical (o la última, según sea el caso):

$$\bar{v} = \left(\frac{m}{m+1} \right) v_a \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde m es un coeficiente que generalmente se encuentra entre 5 y 7, aunque puede variar en un rango más amplio de acuerdo a la resistencia hidráulica. Se utiliza $m = 4$ para lechos rugosos y $m = 10$ para lechos lisos, (ISO 748, 2007).

El flujo de la sección completa, es decir la de todas las subsecciones, se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$Q = \sum (b_{n+1} - b_n) \left(\frac{d_{n+1} + d_n}{2} \right) \left(\frac{\bar{v}_{n+1} + \bar{v}_n}{2} \right)$$

Ecuación 3

2.2.1.2. Método de sección media

Tomando en cuenta que la sección transversal está dividida en varios segmentos de área representativa, como se describió en el método anterior, para obtener por separado el valor del gasto en un área de influencia. Para este método, se considera solo una vertical por cada subsección, y se encuentra a la mitad del polígono, justo donde se conoce la velocidad media obtenida por medio de mediciones. La siguiente imagen ilustra lo antes mencionado.

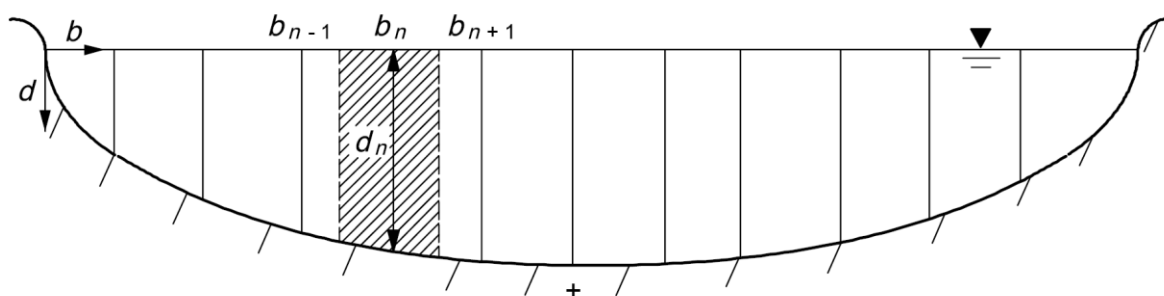


figura 8. Diagrama del método de sección media. Extraída de: International Standard ISO 748, Hydrometry, 2007.

Para calcular el gasto en la subsección seleccionada, se multiplica la velocidad media \bar{v} obtenida por medio de mediciones, por la profundidad d_n , medida en la mitad de la subsección; estos dos valores son multiplicados a su vez por el ancho correspondiente medido sobre la superficie del agua. Este valor del ancho de la subsección debe tomarse como la suma de la mitad del ancho desde la vertical contigua para la cual la velocidad media ha sido medida, más la mitad del ancho desde esta vertical hasta la vertical siguiente que corresponde de acuerdo a la dirección del cálculo. Para el caso de los paneles que son contiguos a la orilla, el producto de $\bar{v} \cdot d_n$ puede considerarse como cero; por esta razón,

para este método, la primera y la última vertical deben tomarse lo más cerca que sea posible de la orilla.

Para el cálculo del caudal en cada subsección se utiliza la siguiente ecuación.

$$q = \bar{v}_n d_n \left(\frac{b_{n+1} - b_n}{2} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

\bar{v}_n , velocidad promedio en la vertical.

d_n , profundidad en la mitad de la subsección.

Cuando el lecho del cauce es irregular, y se cuenta con recursos económicos y de tiempo, se pueden tomar mediciones de la profundidad en los puntos intermedios entre las verticales que aparecen en la figura 8, para obtener un dato más preciso. (Kennedy Pérez, Fragoza Díaz, Peña Peña, & Moreno Bañuelos, 1992) recomiendan un cierto ancho de dovela en función del ancho del cauce, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Ancho de franja vertical según ancho de corriente, según Kennedy et al (1992).

Anchos (m)	
De la corriente	De la franja vertical
Hasta 1.2	0.2 – 0.3
1.2 - 2.5	0.3 – 0.5
5 – 10	0.5 – 1.0
10 – 50	1.0 – 5.0
50 – 100	5.0 – 10.0
Más de 100	10.0 – 20.0

El gasto total que pasa por la sección, se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$Q = \sum \bar{v}_n d_n \left(\frac{b_{n+1} - b_n}{2} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

2.3. Medición de la velocidad mediante tiempo de tránsito

Como se mencionó en la sección 1.4.4., un impulso ultrasónico se desplazará más rápido cuando la dirección del movimiento sea en sentido del flujo, y un impulso similar reducirá su velocidad con dirección contraria al flujo. Un pulso sónico que transita de manera diagonal a través del flujo en una dirección aguas abajo aumenta su velocidad debido a la componente de la velocidad del agua. Por el contrario, un pulso sónico en dirección contrario, reducirá su velocidad.

La diferencia entre los tiempos de tránsito aguas arriba y abajo, puede usarse para obtener la celeridad, así como la componente de la velocidad del agua tomado en dirección del trayecto del pulso ultrasónico.

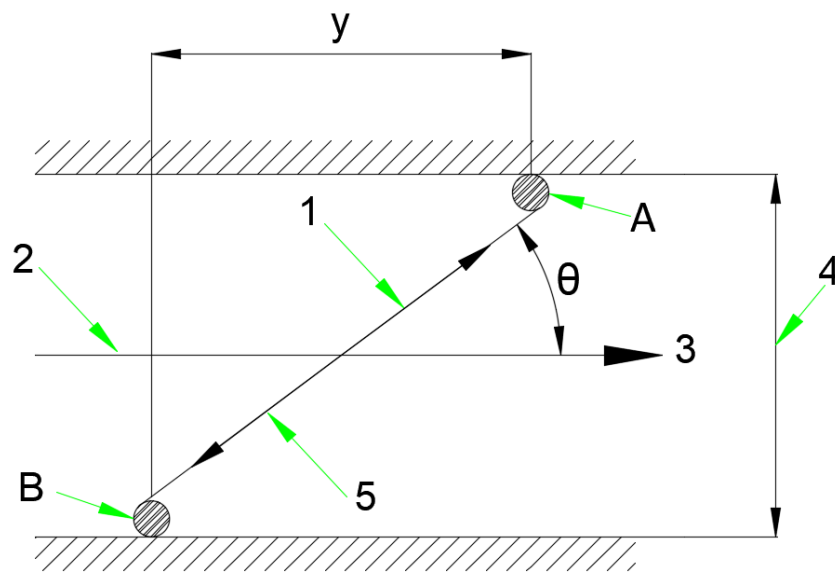


figura 9. Parámetros generales del principio de medición.

En la figura 9 se observa un esquema del principio general de medición, con los parámetros que se toman en cuenta. En donde:

- 1, indica la componente de la velocidad del agua en dirección del trayecto.
- 2, indica la componente de la velocidad del agua e dirección del flujo.
- 3, indica el sentido del flujo.

- 4, es el ancho del canal.
- 5, es el trayecto del ultrasonido.
- A, B, son los transductores.
- θ , es el ángulo entre el trayecto del ultrasonido y la dirección del flujo.
- y, es la distancia aguas abajo entre transductores.

Para calcular el tiempo que tarda en llegar el pulso ultrasónico entre el transductor A y el B (tiempo de tránsito) de la figura 9, se utiliza la siguiente ecuación.

$$a) t_{AB} = \frac{L}{c - v \cos\theta} \quad b) t_{BA} = \frac{L}{c + v \cos\theta} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- t_{AB} , es el tiempo de tránsito en segundos del transductor A al B.
- t_{BA} , es el tiempo de tránsito en segundos del transductor B al A.
- L, es la longitud del trayecto en metros. Distancia entre los transductores A-B.
- c, representa la velocidad del sonido en el agua en m/s.
- v, es la velocidad media del agua en dirección del flujo en m/s.
- θ , el ángulo entre el trayecto del ultrasonido y la dirección del flujo.

Si de las ecuaciones 6a y 6b resolvemos el sistema para la velocidad media, obtenemos la siguiente ecuación.

$$v = L * \frac{t_{AB} - t_{BA}}{(t_{AB} * t_{BA} * 2 \cos\theta)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Cabe mencionar que los parámetros t_{AB} y t_{BA} de la ecuación 7, hacen referencia únicamente al tiempo de travesía de la señal ultrasónica en el agua y no incluye los retardos debido a los tiempos de recorrido a través de los transductores y cables, ni de las posibles distorsiones de la señal que puedan presentarse en la medición. Estas condiciones son especialmente importantes en canales donde

se requieren largos recorrido de cable de los transductores al receptor de la información. Los tiempos de retardo para los cables es generalmente de 1 μ s por cada 200 m de cable (ISO 6416, 2004). El efecto del retardo se reduce en proporción a la longitud de la trayectoria, por lo que pueden ser insignificantes. Además, se recomienda que los transductores tengan la misma longitud de cable para amagar esta situación. Para la investigación de este documento, la información entre los transductores y el receptor viaja a través de 12 m de cable, por lo que no existe ningún tiempo de retardo a considerar.

Como generalización para flujo a superficie libre debemos considerar que los transductores de una trayectoria están instalados en bancos fijos y opuestos del curso del agua, y la línea que los une debe estar entre un ángulo de 30 y 65° respecto a la dirección del flujo; esto debido a que si el ángulo supera los 65°, la diferencia del tiempo de tránsito de aguas abajo y arriba, puede llegar a ser tan pequeña que la falta de certeza sería muy grande. En cambio, con ángulos menores a los 30° la longitud de tramo de la sección de control puede llegar a ser muy grande, y la medición del tirante podría no ser representativo, además de que la dirección del flujo relativa podría ser no constante.

2.3.1. Cálculo del gasto

En los sistemas ultrasónicos, no se requiere una relación única del tirante con el gasto, ya que estos sistemas miden la velocidad del flujo y calculan el caudal indirectamente. Para la técnica de tiempo de tránsito, se pueden utilizar configuraciones con un solo par de sensores, es decir, un trayecto único, o una configuración con trayectos múltiples. Por generalidad, cuatro pares son suficientes para tener una medición aceptable.

En situaciones en donde se utilizan un trayecto, el gasto es calculado por medio de la ecuación de caudal, que parte del principio de continuidad, multiplicando

la velocidad estimada por el área de la sección, y ajustando el resultado multiplicándolo por un coeficiente que dependerá de la altura a la que esté instalado el par de sensores respecto al tirante total, y la forma en que esta se relaciona con la profundidad representativa de la velocidad media. Generalmente el valor de este coeficiente se encuentra en la literatura para diferentes casos, obtenidos de manera experimental. Cuando la profundidad de instalación es justo la que en la literatura se generaliza como donde se encuentra la velocidad media, este coeficiente de variación puede considerarse como la unidad.

Para un sistema de múltiples trayectos, debe haber al menos dos pares de sensores instalados a diferentes alturas por debajo del tirante; se puede considerar que los trayectos se instalan por paneles, como las dovelas mencionadas en la sección 2.2 pero en una dirección horizontal, una encima de otra, cuyas dimensiones pueden deducirse de la geometría fija de la sección de control del canal, de donde la elevación del panel está determinada por la altura de instalación de los pares de sensores; el ancho del panel se define por la diferencia de las elevaciones de los trayectos. Para el cálculo del caudal se puede utilizar el método de sección media o el de sección promedio, vistos anteriormente de manera general.

Como ya se mencionó, mientras más trayectos activos haya en la sección, la certeza de que la medición se acerca al dato real es mayor, y si estos están cerca del lecho y de la superficie, las mediciones se acercarán aún más a la realidad. En algunas ocasiones se pueden presentar variaciones en el tirante, obstrucciones en el trayecto o incluso daño físico del sensor, que provocará la no operación de dicho trayecto, aun así, la velocidad media se puede seguir estimando con los trayectos restantes, con una incertidumbre ligeramente mayor.

2.3.1.1. Método de sección media

Para el método de la sección media la velocidad estimada en cada trayecto se considera como la velocidad media en el panel o dovela horizontal, la cual se delimita por dos líneas imaginarias situadas a la mitad de la distancia del trayecto superior y del inferior inmediato. El ancho de la dovela se delimita por el ancho del canal en la elevación de las líneas imaginarias mencionadas, como se muestra en la figura 10. Para el caso de la dovela que está en el tope de la columna, se limita en el lado inferior por la línea entre los dos trayectos más altos, y el lado superior se limita por la superficie del agua.

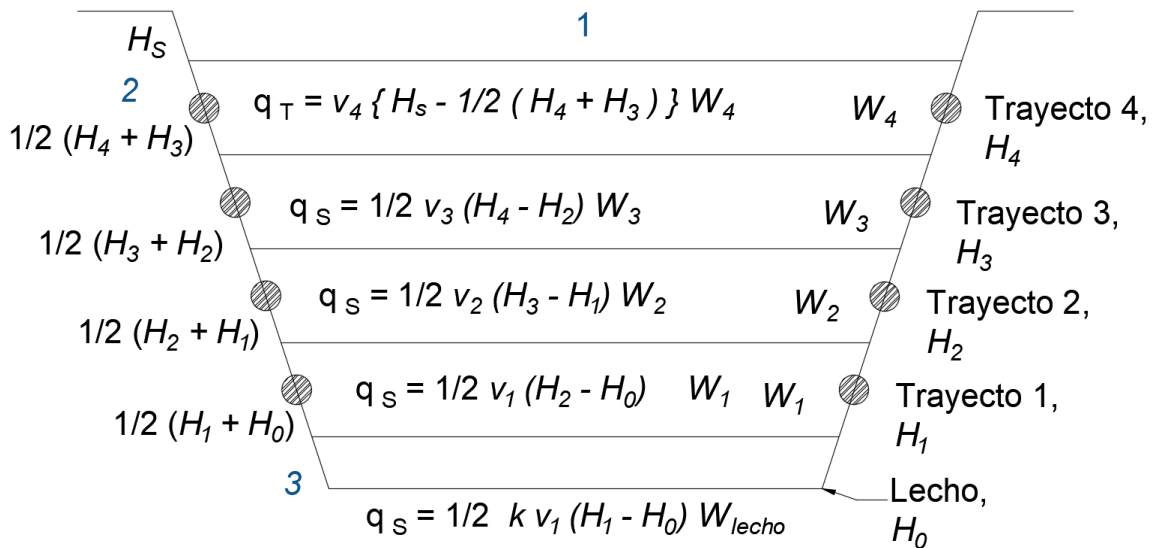


figura 10. Sección de control con parámetros del método de sección media.

De la figura 10:

- 1, indica la superficie libre del agua.
- 2, indica el panel superior.
- 3, indica el panel inferior.
- H , es altura a partir de un punto definido, en metros.
- W , es el ancho de la sección transversal a la altura correspondiente, en metros.

v , es la velocidad estimada por la trayectoria correspondiente, en metros sobre segundo.

k , es un factor que relaciona la velocidad media del panel inferior con la estimada por el trayecto, normalmente se encuentra entre 0.4 y 0.8.

q_S , es el gasto en el panel correspondiente.

q_T , es el gasto en el panel superior, donde el trayecto es más largo.

Para el ejemplo general de la figura 10, los paneles individuales forman una figura trapezoidal debido a que la geometría del canal del ejemplo tiene la misma forma. La base mayor del trapecio formado por cada panel es la medida del ancho del canal en el punto medio entre el trayecto superior y el inmediato inferior. Mientras que la base menor es el ancho de la sección a la altura de la línea imaginaria a la mitad del trayecto inferior y el superior inmediato. El espesor o altura del panel es la diferencia de alturas de las líneas imaginarias entre los trayectos correspondientes.

2.3.1.2. Método de sección promedio

A diferencia del método de sección media, en el método de sección promedio un trayecto tiene injerencia en el cálculo del gasto de los dos paneles contiguos a los sensores. Para obtener la velocidad media en cada panel se hace un promedio de la velocidad registrada en los dos trayectos, los cuales a su vez limitan el panel por ambos lados como se muestra en la figura 11.

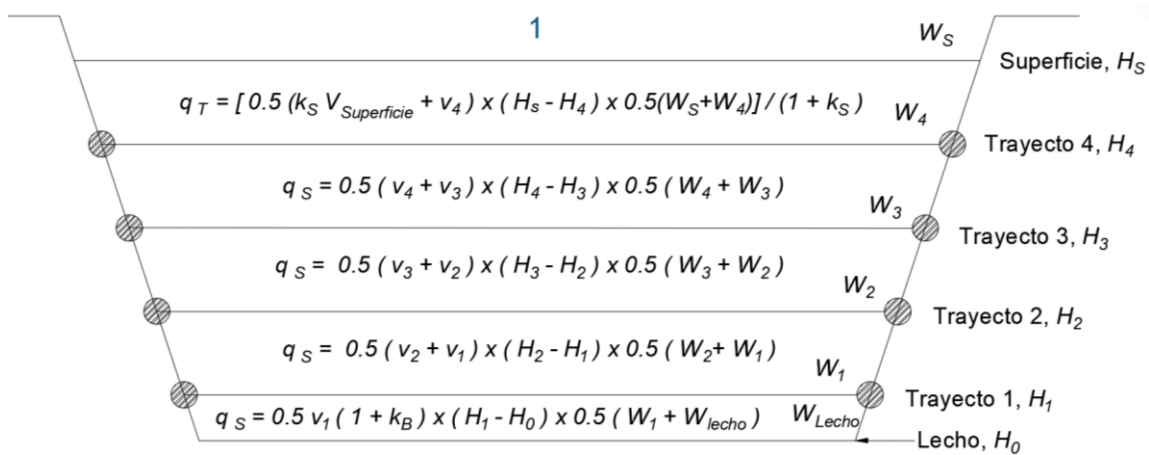


figura 11. Sección de control con parámetros del método de sección promedio.

De la figura 11:

1, indica la superficie libre del agua.

H , es la altura a partir de un punto definido, en metros.

W , es el ancho de la sección transversal a la altura correspondiente, en metros.

v , es la velocidad estimada por la trayectoria correspondiente, en metros sobre segundo.

$V_{Superficie}$, es la velocidad en la superficie, en metros sobre segundo.

k_B , es el factor que describe la velocidad en el fondo que interviene en el primer trayecto, normalmente se encuentra entre 0.4 y 0.8.

q_S , es el gasto en el panel correspondiente.

q_T , es el gasto en el panel superior, donde el trayecto es más largo.

En la figura 11 podemos apreciar que, para el panel superior de la sección de control, las velocidades parciales que intervienen para el cálculo del gasto en dicho panel, son la velocidad medida en el trayecto superior y la velocidad del agua en la superficie, la cual se obtiene utilizando los parámetros de la sección mediante la ecuación 8. Cabe mencionar que según (Ávila, Hidráulica de Canales, 2016), “La sección de un canal en la que sea posible establecer una

relación definida entre el nivel de la superficie libre del agua y el gasto correspondiente, se conoce como sección de control”.

$$V_{superficie} = v_4 + (v_4 - v_3)k_s \frac{H_s - H_4}{H_4 - H_3} \quad \text{Ecuación 8}$$

De donde k_s es un factor de corrección entre 0 y 1, pero limitado a un valor de $v_4 + (v_4 - v_3)$ en caso de que $H_s - H_4$ sea más grande que $H_4 - H_3$.

Para los dos métodos, sección media y sección promedio, el gasto calculado de la sección de control se obtiene sumando los gastos parciales calculados en los paneles o dovelas horizontales mediante la ecuación 9.

$$Q = q_0 + q_1 + q_2 \dots q_T \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde q es el gasto parcial calculado en cada panel de acuerdo a la numeración particular de cada caso.

3. METODOLOGÍA

3.1. Sitio de pruebas experimentales

Las pruebas experimentales del presente documento, se realizaron en el laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), ubicado en el municipio de Jiutepec, en el estado de Morelos. Este cuenta con un sistema de circulación de agua en el cual, se bombea agua desde una cisterna hasta un tanque, de donde se extrae agua para los modelos del laboratorio. Cuando la cantidad extraída es menor que la bombeada, se genera un exceso de agua que se redirige a la cisterna, de manera que el tanque siempre mantiene una carga hidráulica constante. En la figura 12 podemos observar un diagrama representativo del movimiento del agua en el sistema de recirculación del laboratorio de hidráulica, y los elementos que intervienen en el funcionamiento.

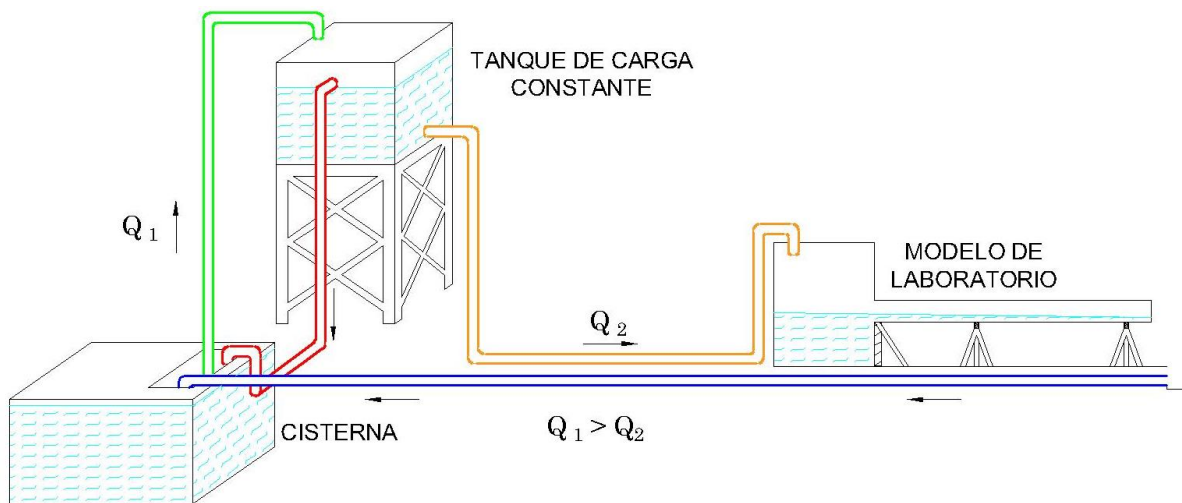


figura 12. Funcionamiento general de la circulación del agua en el laboratorio.

3.1.1. Componentes del sistema de abastecimiento de agua en el laboratorio

Al noroeste del laboratorio de hidráulica, se encuentra el tanque elevado, construido en la parte superior de una torre estructural, donde posteriormente se adaptaron oficinas de certificación; se eleva 12 m respecto al firme del edificio, y tiene una capacidad de 128 m³. Como se mencionó anteriormente, su función principal es abastecer los modelos hidráulicos del laboratorio con una descarga con carga constante. Las dimensiones del tanque se observan en la figura 13, donde se presentan la forma geométrica del tanque y sus respectivas medidas.

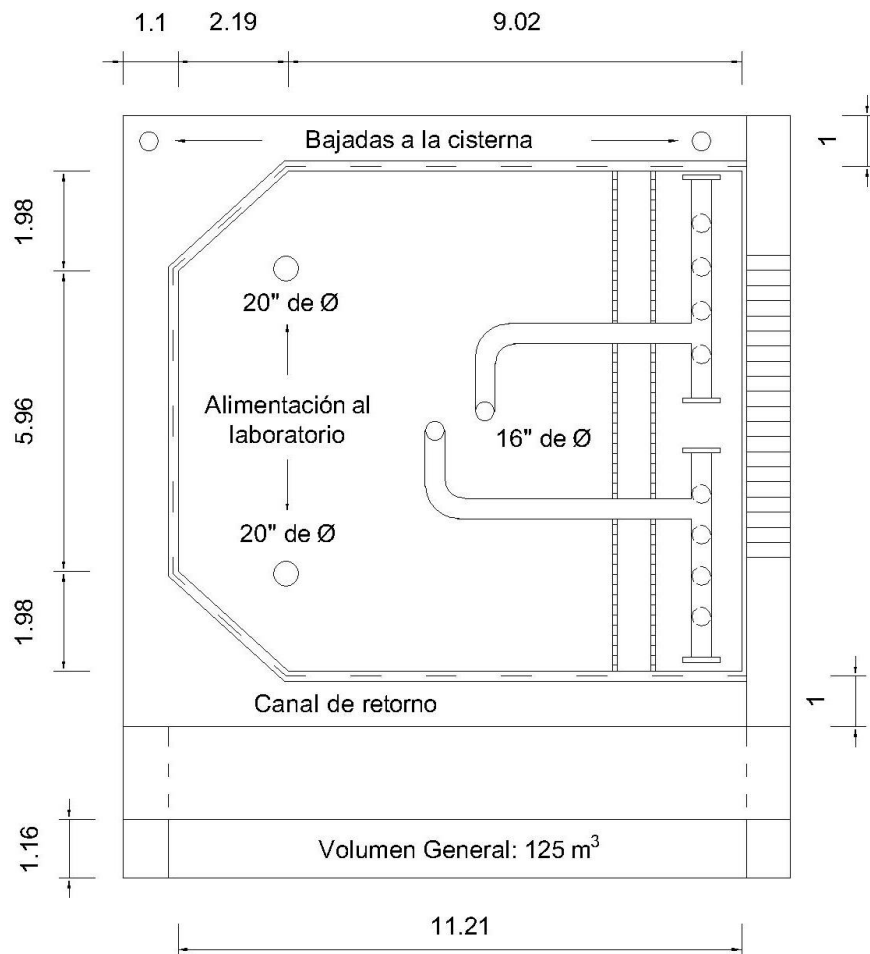


figura 13. Dimensiones del tanque de carga constante vista en planta; acotaciones en metros; sin escala.

En la figura 13 se puede apreciar la configuración de los elementos del tanque; en el lado derecho del croquis está el pasillo de acceso que viene del piso anterior, llega a una escalera de mano, donde se entra al canal de retorno. La estructura central es el contenedor principal, donde llegan las tuberías por donde se bombea el agua desde la cisterna, y también donde se dirige el agua hacia el laboratorio. Cuando ese contenedor alcance el nivel máximo, el agua empieza a rebosar, dando al canal de retorno, que la dirige hacia las tuberías de bajada que van a dar a la cisterna, formando un ciclo continuo.

3.1.2. Descripción del modelo

Como sabemos, algunos fenómenos que ocurren en la naturaleza son difíciles de estudiar cuando suceden en sus condiciones naturales, por lo que se tiene que recurrir a algunas técnicas experimentales con tal de reproducir el fenómeno en condiciones controladas. Para estos casos se utilizan modelos a escala que asemejan las condiciones hidráulicas que se presentan cuando ocurre un evento que sea objetivo de estudio.

El modelo en el que se realizaron las pruebas, es un canal de pendiente variable, que está ubicado en el laboratorio de hidráulica Enzo Levi, el cual se encuentra dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en el municipio de Jiutepec, del estado de Morelos; este modelo fue diseñado para el estudio de fenómenos hidrodinámicos y problemas de hidrometría en flujos a superficie libre. El canal cuenta un sistema de mecanismos hidráulicos que permiten variar su pendiente, apoyados en tres puntos, que permiten un movimiento uniforme del sistema.

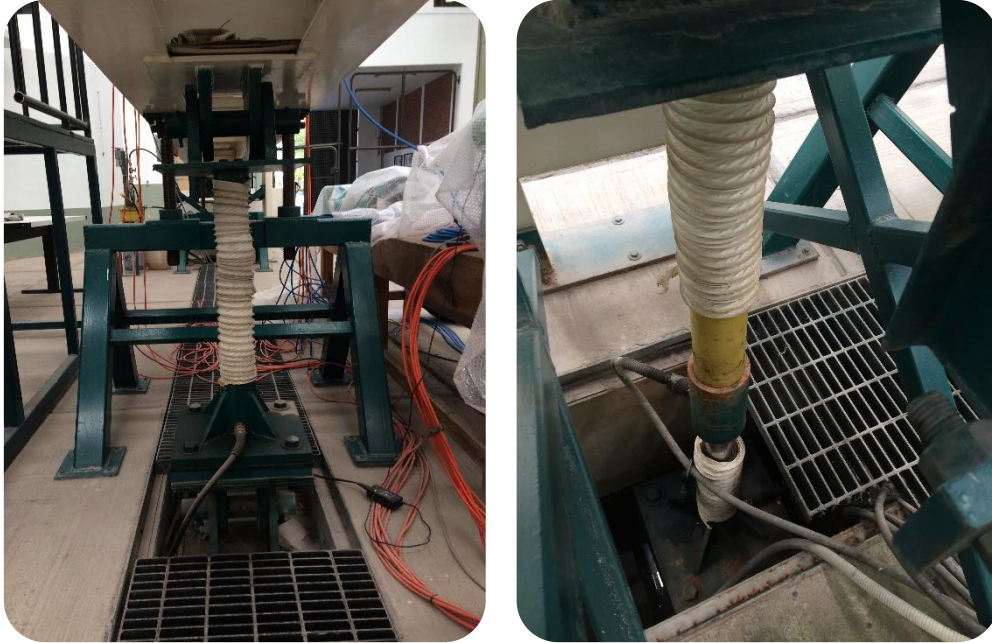


figura 14. Apoyos para variar la pendiente del canal.

Cuenta con una sección rectangular de 60 cm de base por 70 cm de altura, y tiene una longitud de 18 m. Se tiene a la entrada un taque de alimentación que sirve de amortiguador de energía para el flujo de llegada. A la salida, se tiene un tanque de descarga de acero inoxidable, que sirve para contener la descarga y dirigirla al sistema que recircula el agua.

El cuerpo del canal está soportado en dos vigas de acero, que transmiten la carga uniformemente a los apoyos que regulan la pendiente.

A la salida del canal, se cuenta con una placa metálica conectada a un sistema que regula la altura de esta, lo que permite que pueda funcionar como vertedor o como compuerta, según las necesidades de investigación.



figura 15. Geometría del canal de pendiente variable.

3.2. Instrumentos de medición

El equipo utilizado es un “RISONIC modular” Ultrasonic Transit Time Flow Measurement, de la marca austriaca Rittmeyer, el cual está diseñado para realizar mediciones de flujo ultrasónico en tuberías y canales. Los componentes que integran el equipo que se utilizó para la medición son los siguientes.

- RIMOCTRL: RISONIC Controller
- RIMOUSTT: RISONIC Ultrasonic Transit Time
- Transductores ultrasónicos de Rittmeyer RISONIC tipo MFATKx
- Transmisor de nivel del agua tipo MPUL06

Además de todo el sistema de energía, y comunicación de los transductores al controlador, así como un ordenador para visualizar los resultados al momento y configurar la sección.

3.2.1. RIMOCTRL

El RIMOCTRL es el controlador del sistema que realiza y supervisa las diversas aplicaciones de la medición; tiene un display instalado donde muestra los datos relacionados a la medición, los cuales también pueden ser vistos y modificados mediante una interfaz de conexión de área local por medio de un cable ethernet, el cual se conecta a un ordenador en el que se accede a la dirección local del RIMOCTRL.



figura 16. Controlador Rittmeyer RISONIC Modular.

3.2.2. RIMOUSTT

El RIMOUSTT es el receptor principal de la información, es decir, en él se conectan los transductores de tiempo de tránsito, realiza las mediciones crudas

de la velocidad y se conecta con algún equipo auxiliar, como un transmisor de presión o un sensor de nivel, como el que se menciona más adelante. Tiene la capacidad de calcular indirectamente el gasto y el volumen, presentando este último en un parámetro de “forward” para referirse al volumen de agua en dirección del flujo, y “reverse” para el volumen calculado en dirección contraria.



figura 17. Módulo Ultrasonico de Tiempo de Travesía RISONIC Modular.

3.2.3. Transductores ultrasónicos de Rittmeyer RISONIC tipo MFATKx

Es el elemento que sirve para recibir, medir y transmitir los parámetros de la velocidad del flujo del cauce. Estos transductores vienen instalados en pares, de manera que uno sirve de emisor y el otro de receptor para un pulso ultrasónico, después se invierten los roles, siendo un proceso cíclico durante el periodo de medición. La información se transmite a través de cables de igual longitud hasta el módulo ultrasónico y al controlador.



figura 18. Transductor ultrasónico tipo K.

3.2.4. Transmisor de nivel del agua tipo MPUL06

Este sensor consta de un transductor de tecnología ultrasónica que sirve para medir y transmitir los niveles del flujo en el canal. En general, incluye el transductor con sensor de nivel, un transductor de compensación de temperatura para garantizar la precisión en las mediciones sin importar el rango de temperatura, y los circuitos electrónicos, todo dentro de una cápsula hermética e inerte. Su correcto funcionamiento está señalado por unos leds en la parte superior, que sirven de indicadores en el proceso imprescindible de calibración y configuración del rango de operación.



figura 19. Sensor de nivel ultrasónico.

3.3. Instalación

Se requieren condiciones adecuadas de instalación de los transductores en el canal, y de características del flujo, para que su funcionamiento sea apropiado. Cuando en la práctica se instalan este tipo de medidores en canales con un ancho considerable y no es posible el empotramiento de estos en los laterales del cauce, se utiliza una estructura metálica en la que se aseguran los transductores, y posteriormente esta se empotra a las paredes del canal. Para el caso de las pruebas del laboratorio, y considerando el ancho del canal de pendiente variable, los transductores se instalaron directamente en las paredes de vidrio del canal, para evitar la reducción de la sección transversal.

Antes de iniciar la instalación, se debe asegurar que las paredes del canal se encuentran libres de impurezas y suciedad, considerando que el canal suele utilizarse para pruebas de diferentes tipos, pueden quedar residuos en las paredes de alguna otra instalación. Con una espátula se eliminan los residuos de silicón, pegamento o algún sólido que se encuentra sobre el vidrio de la pared. Posteriormente con estopa y un solvente se limpia la superficie para eliminar cualquier suciedad que impida la sujeción de los transductores.

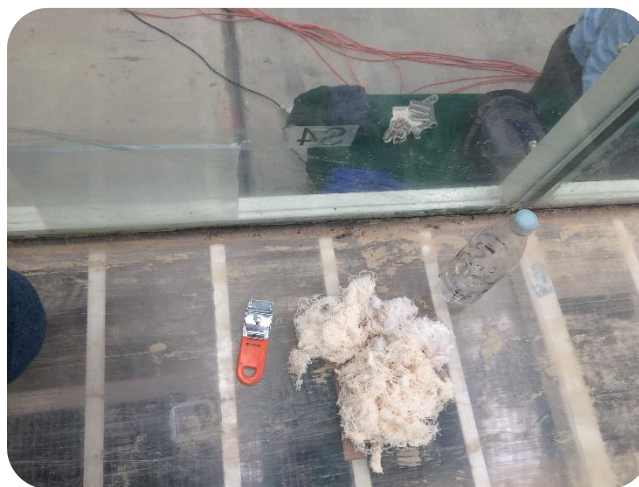


figura 20. Limpieza de las paredes del canal.

El RISONIC modular está diseñado de tal manera que permite varias formas de arreglos entre las trayectorias de los transductores, combinando la cantidad de trayectos en cada punto de medición (hasta 16), con el número de secciones con el mismo arreglo (hasta 4).

En la figura 21 se muestra la forma en que se instalan en una tubería; en esta, las líneas representan las trayectorias entre transductores, los paneles rojo y azul son los planos verticales que, dependiendo de las necesidades y condiciones del caso, pueden ser una o dos, y estas agrupan las trayectorias correspondientes; la parte de sombreado verde representa las capas de medición, que agrupa los trayectos horizontalmente, para la imagen de ejemplo son cuatro.

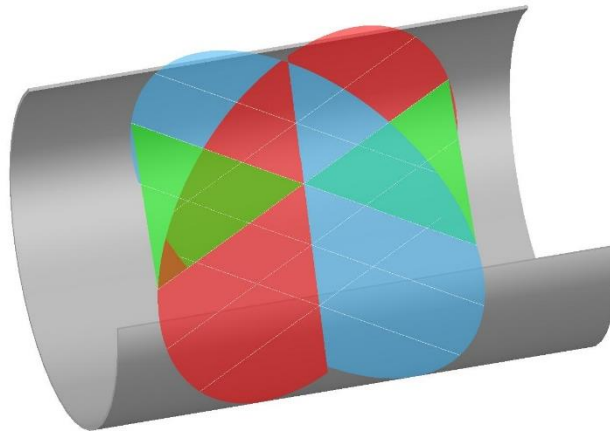


figura 21. Configuración de instalación en una tubería.

En este caso, tenemos un canal abierto con sección rectangular, aunque el sistema acepta secciones circulares, trapezoidal e incluso formas irregulares; por las condiciones del canal del laboratorio, en donde tenemos una dimensión de altura pequeña, la configuración de instalación de los sensores se hará en un solo punto de medición, en dos planos con cuatro pares (abreviado por el fabricante como 2E4P, donde la E hace referencia al número de planos y la P al número de pares de sensores).

Existe una singularidad en el arreglo final de la sección de aforo (figura 24), ya que los sensores de cada pared no están instalados en la misma vertical, si no que tienen un desfase en dirección del eje del canal; esto hace que visualmente sean, como se mencionó anteriormente, dos planos y cuatro pares (2E4P, presentado en la figura 24), pero la configuración en el RISONIC no interpreta este desfase como un parámetro a considerar, ya que solo se introducen datos de elevación y separación entre pares, por lo que virtualmente tenemos un arreglo de un plano y cuatro pares (1E4P).

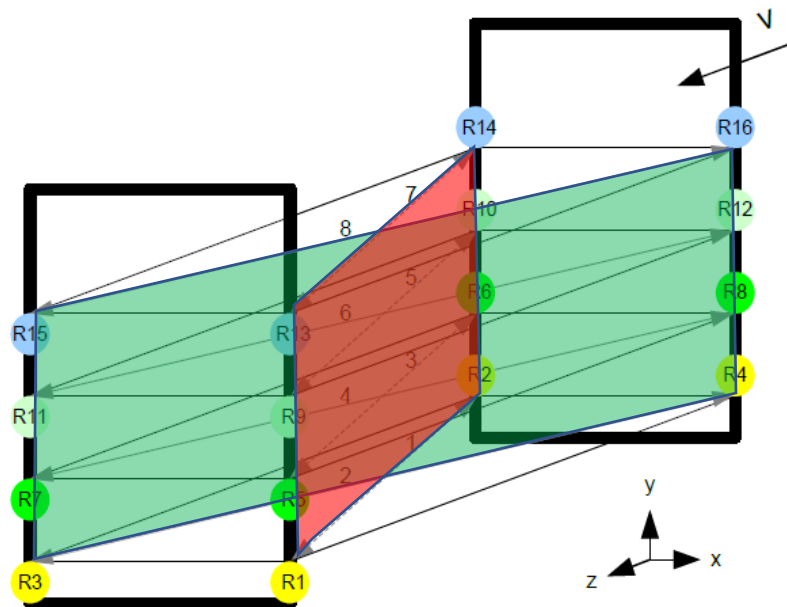


figura 22. Arreglo 2E8P en un canal rectangular -Extraída de: RISONIC modular System Manual.

La figura 22 ilustra la configuración general en un canal rectangular, una sección de medición con dos planos y ocho pares; por lógica tenemos que por cada par hay una trayectoria, la cual está enumerada en dicha figura. La configuración en la sección del canal del laboratorio se presenta en la figura 24.

La altura del canal es un parámetro importante a la hora de instalar los sensores, por lo que se tiene que adecuar de manera que su funcionamiento no se vea

comprometido por la geometría. Es por esta razón que el arreglo es de dos planos, lo que permite dos pares en cada plano, y que la separación entre los sensores de la misma vertical sea de 20 cm aproximadamente. Se instalaron con ayuda de un nivel de mano y un flexómetro graduado, colocando apoyos sólidos debajo de ellos para alcanzar la altura deseada (figura 23). La unión con la pared de vidrio, se hizo con pegamento industrial, el cual ha mostrado eficiencia en ocasiones anteriores. El ángulo de deflexión entre la trayectoria de los pares y el eje del canal es aproximadamente de 33° , lo que arroja una distancia entre transductores de 0.93 m en promedio. Aunque algunas horas son suficientes para que el pegamento fragüe, se dejó reposar con apoyos haciendo presión entre el sensor y la pared durante un día completo.



figura 23. *Instalación de los sensores en las paredes de canal.*

Los cables que conectan los transductores con el módulo ultrasónico de control, tienen la misma longitud para los cuatro pares, por lo que el retardo producido por la telecomunicación es la misma para todos los transductores; este retardo es corregido por el sistema solo introduciendo la longitud del cable.

Aunque las distancias de separación entre sensores, el ángulo de la trayectoria y las elevaciones a partir del fondo se determinan de acuerdo a la geometría del

canal, en la práctica, y por los trabajos de instalación, puede que estas dimensiones lleguen a variar, por lo que una vez que quedó instalado el sistema en el canal, se vuelven a medir estas longitudes para corroborar la información que se introduce al sistema. La Tabla 2 presenta las dimensiones reales obtenidas una vez instalados los sensores.

Tabla 2. Dimensiones reales de instalación. Magnitudes en metros. Phi en grados.

	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4
Longitud de la trayectoria	0.928	0.924	0.932	0.931
Ancho de instalación	0.598	0.598	0.598	0.598
Ángulo Phi	33.18 °	33.34°	33.05°	33.09°
Altura de instalación	0.084	0.176	0.292	0.379
Longitud del cable	12.700	12.700	12.700	12.700

De la Tabla 2, la longitud de la trayectoria se refiere a la distancia alineada entre el centro del sensor con su respectivo par. El ancho de instalación es la distancia perpendicular respecto a la pared del canal entre el eje del sensor y la pared contraria a la que está instalado. El ángulo Phi, es el ángulo que se forma entre la trayectoria y el eje del canal. La altura de instalación es la longitud medida desde el fondo del canal hasta el eje del sensor. Estas longitudes se midieron con un distanciómetro electrónico y se corroboró con una cinta graduada.



figura 24. Arreglo final de los sensores (2E4P).

En la figura 24 se muestra el arreglo final de los sensores ultrasónicos, donde las líneas punteadas de colores representan las trayectorias de los cuatro pares instalados y los rectángulos amarillo y morado, los planos de medición en donde se agrupan las trayectorias.

Los parámetros de la Tabla 2 se representan de manera esquemática en la figura 25.

4. PRUEBAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS

4.1. Descripción de las pruebas

Las pruebas experimentales consisten en pasar un volumen conocido por la sección de control y comparar este volumen con el calculado por el medidor; el flujo que pasa por el canal se verá modificado por la compuerta al final del canal, de manera que se generará flujo inverso, con velocidades negativas cuya influencia llega a la sección de control.

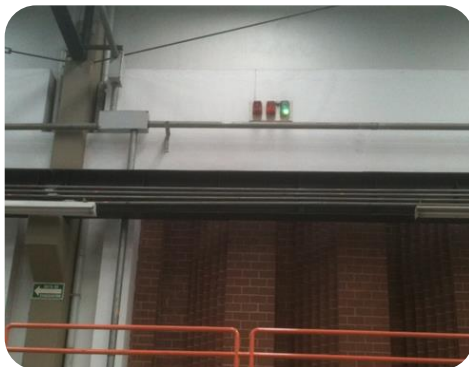
De manera general, la experimentación se llevó a cabo siguiendo las siguientes actividades listadas.

- *Acondicionamiento de la estación experimental.* Como se mencionó en el capítulo anterior, antes de instalar los sensores, se hizo una limpieza general del canal; se instalaron los sensores siguiendo el procedimiento mencionado en la sección 3.3, y se calibró el sensor de nivel de acuerdo a la altura instalada. Se estableció la pendiente del canal en 0 como configuración general de las pruebas (figura 26a).
- *Alimentación al modelo.* Para iniciar una serie de pruebas, se encienden los sistemas de bombeo del laboratorio para alimentar el tanque elevado; el laboratorio cuenta con un sistema de aviso cuando el tanque llega a su nivel máximo, en donde empieza a desbordar, mediante luces (figura 26b) verde (lleno), naranja (carga caída o en proceso de llenado), rojo (advertencia de error o mal funcionamiento).
- *Configuración de registro.* El RISONIC modular ofrece tres opciones para el registro de la información medida; para estas pruebas se elige el registro tipo “Diagnóstico”, que permite elegir la duración de la prueba, y los datos medidos se presentan a cada segundo, lo que permite mejor el análisis de los datos.

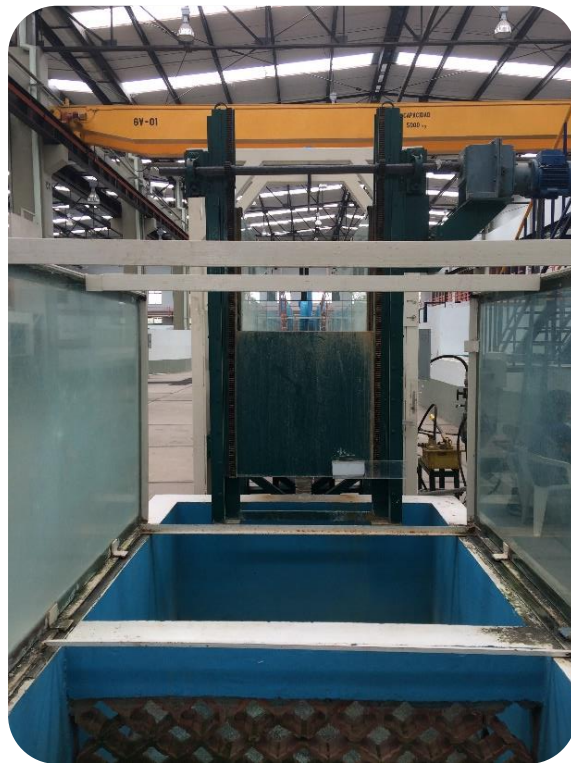
- *Medición de parámetros.* Antes de abrir la válvula para que el agua fluya a través de la sección de control, se apagan las bombas para que el agua no se recircule, se mide el tirante inicial y final al tanque. Mientras se realizan las pruebas, la compuerta se utiliza para generar flujo inverso en la sección (figura 26c).
- *Exportación de datos.* Los datos registrados se exportan en un documento de texto y posteriormente se copian a una hoja de cálculo para su análisis.



a) Alineación a pendiente 0



b) Indicadores de funcionamiento



c) Compuerta a la salida del canal

figura 26. Consideraciones en la instalación.

Las etapas de cada prueba se pueden apreciar claramente en la figura 27, donde se grafican las velocidades registradas por los sensores ultrasónicos en un

periodo de tiempo suficiente para cubrir una repetición en el proceso de usar la compuerta como obstáculo.

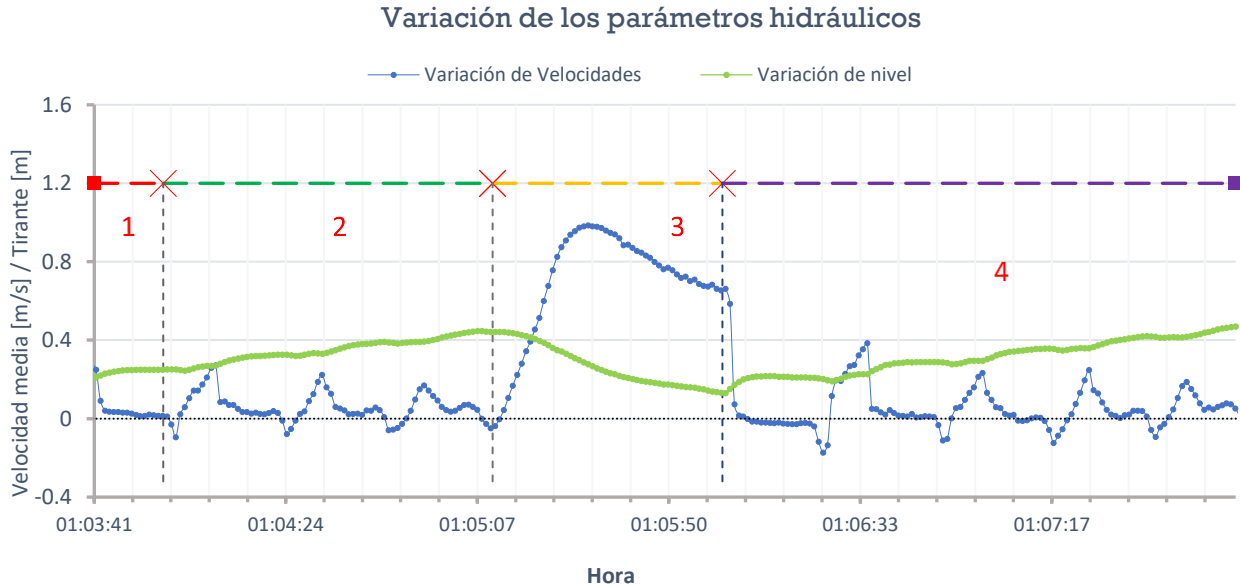


figura 27. Registro de tirante y velocidades mediante ultrasonido.

De la figura 27, la zona numerada como 1 representa el agua fluyendo de manera estable, cuando el vertedor está abajo y no representa ningún obstáculo, el excedente de agua almacenado en el tanque de la entrada del canal fluye a través del cauce, y después de un corto periodo, el flujo se estabiliza y comienza a correr de manera regular.

La zona 2 (figura 27) inicia en el momento justo en el que el vertedor es levantado; el flujo estable choca contra la pared metálica y genera movimiento del líquido aguas arriba, donde la sección de control registra velocidades a contraflujo como velocidades negativas; el flujo inverso llega al tanque de regulación y refleja la energía de regreso, con lo que la velocidad del flujo se ve aumentada; este proceso transitorio se repite hasta que el volumen del flujo es suficiente para superar la elevación de la compuerta y verter sobre ella.

El periodo de la zona 3 en la figura 27 inicia cuando se empieza a verter sobre la compuerta, ya que en ese momento las velocidades negativas ya no se presentan y es necesario generarlas de nuevo. El remanso genera un volumen de agua que al bajar la compuerta a su posición inicial fluye a través de la sección con una velocidad superior a cualquier otro momento en el experimento. Este periodo dura lo que tarda en desahogar el exceso de agua que se generó, finalizando en el inicio de la estabilización del flujo.

En la zona 4 inicia el nuevo ciclo del mismo proceso, el flujo se estabiliza, se sube el vertedor y al verter se baja nuevamente.

La línea verde de la figura 27 representa la variación del tirante en cada etapa, y se puede apreciar que los cambios de nivel corresponden a cada etapa de la prueba.

4.2. Ajustes de parámetros físicos

Una serie de primeras pruebas en las que se aplicaron las condiciones iniciales planeadas, sirvieron para detectar y afinar algunos detalles para mejorar el experimento, lo más importantes se enlistan a continuación.

- Debido al considerable volumen del tanque de regulación que se encuentra al inicio del canal de pendiente variable, este debe llenarse mientras el sistema de bombeo sigue en funcionamiento y el agua sigue recirculándose en el sistema, ya que al final de cada prueba, el volumen de agua que queda en el tanque no es medido por los sensores ultrasónicos, y obtenerlo mediante las dimensiones es un proceso poco práctico debido a las rocas que se encuentran dentro del tanque que funcionan como obstáculo para la turbulencia; por esto, el llenado del tanque se realiza antes de iniciar con la serie de pruebas.
- Para que desde el inicio de las pruebas quede registrado en el medidor el volumen de agua que pase por la sección, la compuerta debe de estar

a la altura aproximada de 15 cm, para que se genere un tirante de agua suficiente para cubrir el primer par de sensores. El volumen de agua necesario para cubrir esta condición se obtiene, al igual que el tanque de regulación, mientras el sistema de recirculación sigue en funcionamiento.

- La válvula de regulación del gasto se abrirá de manera que reparta alrededor de 30 l/s para que la velocidad del flujo sea la suficiente para generar las velocidades negativas cuando la compuerta esté arriba, pero no tanta como para que el fenómeno dure muy poco.
- Tomando como base la figura 13, el volumen del tanque elevado es de 125 m³, por lo que con una velocidad promedio aproximada de 30 l/s, cada prueba debería durar poco más de una hora. Esto no es así debido a las estructuras dentro del tanque (figura 28a) que reducen el volumen total de agua, por ejemplo, la tubería de bajada que alimenta el laboratorio, cuenta con una estructura que no se aprecia a simple vista al estar cubierta de agua, esta llega a los 50 cm de altura, por lo que de un inicio tenemos 50 cm de tirante de agua sin usar para este experimento. Las tuberías que alimentan el tanque, pasan por encima del espejo de agua y están soportadas por una serie de columnas que fungen de atraque (figura 28b y figura 28d); también hay un par de vallas construidas a lo ancho del canal que sirven para atrapar objetos que puedan llegar al tanque por medio del bombeo (figura 28c). Se obtuvieron medidas de todos estos objetos que reducen el volumen funcional del tanque y el resultado se restó al volumen general.



a) Vista general



b) Tubería de llegada



c) Muros de retención



d) Estructura de apoyo

figura 28. Tanque elevado para alimentar el laboratorio.

El volumen resultante de la resta del volumen general y el volumen de los elementos dentro del tanque, se dividió entre el tirante máximo en el tanque (117 cm), para obtener una especie de área unitaria, de tal manera que se generaliza este valor para que cuando se realice una repetición, para conocer el volumen de agua utilizado del tanque solo se necesite medir el tirante inicial y el tirante final de la prueba. El área unitaria se estimó en 101.81 m^2 .

Estas condiciones se siguieron en el procedimiento de todas las repeticiones y se aseveró que un total de 50 repeticiones serían suficientes para representar el comportamiento de las mediciones bajo las condiciones mencionadas.

4.3. Pruebas sin compuerta

A la par de que se realizaron las pruebas, los registros se fueron graficando para poder detectar alguna variación irregular y poderla corregir, así se evitarán los errores debido al operador.

A pesar de las medidas tomadas, las dimensiones en el tanque no son exactas, ya que las condiciones del tanque no permitían medir con exactitud los elementos que se encuentran debajo del agua. Debido a esto, los volúmenes registrados en el tanque podrían estar sobreestimados. Para compensar esta situación, se realizaron otra serie de pruebas con el mismo procedimiento, pero quitando la variable de la compuerta, es decir, el gasto que pasa por la sección, no se verá afectado por velocidades contrarias al flujo; los registros no tendrán velocidades en dirección aguas arriba, por lo que el volumen hacia adelante calculado mediante las velocidades registradas en los sensores, tendrá que ser muy similar a lo registrado en el tanque.

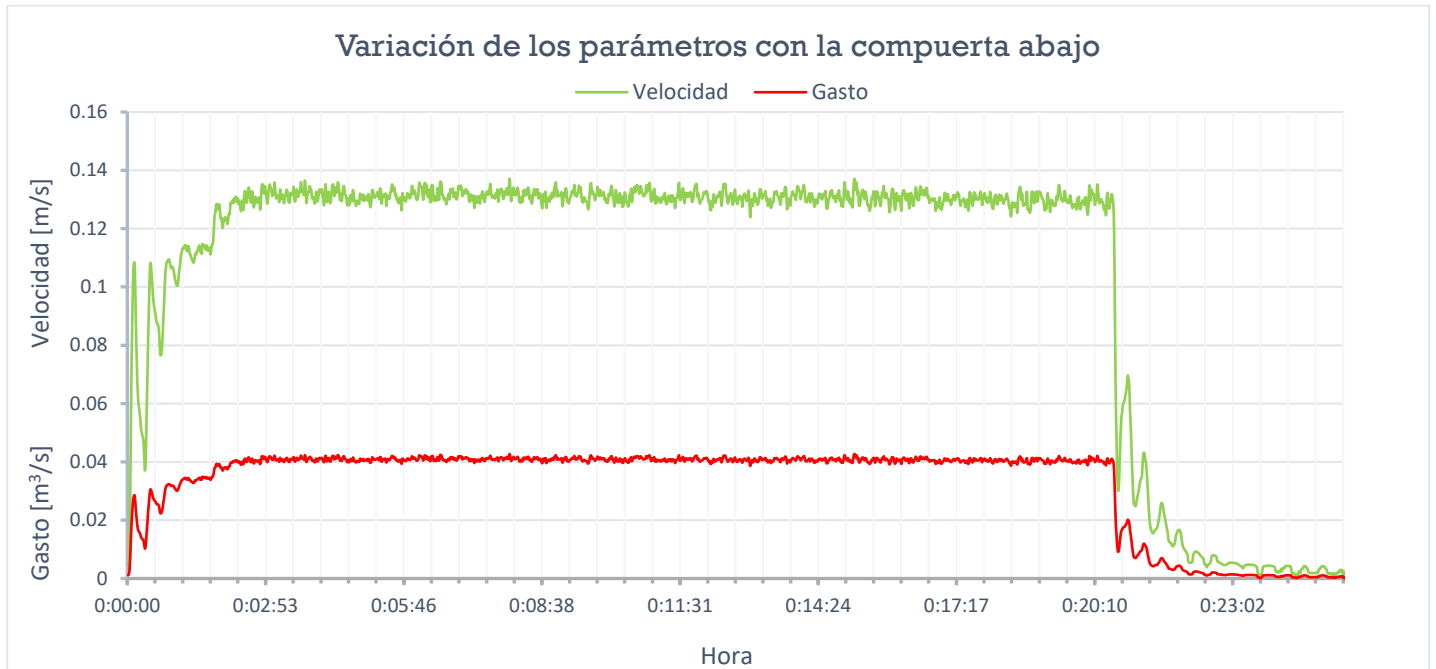


figura 29. Registro de velocidades y gasto sin obstáculo.

En la figura 29 se muestran los registros de la velocidad del flujo que se presentó en el caso donde no se tenía el obstáculo; a diferencia de la figura 27, en la figura 29 se puede apreciar la estabilidad de los valores de la velocidad medida y del gasto, ya que no se encuentra el vertedor funcionando. El periodo de tiempo que se grafica cubre toda una prueba y esta tendencia de regularidad se repite en todas las repeticiones creadas, por lo que estos registros nos servirán para calibrar las mediciones donde se compara el volumen del tanque con lo registrado por los medidores ultrasónicos.

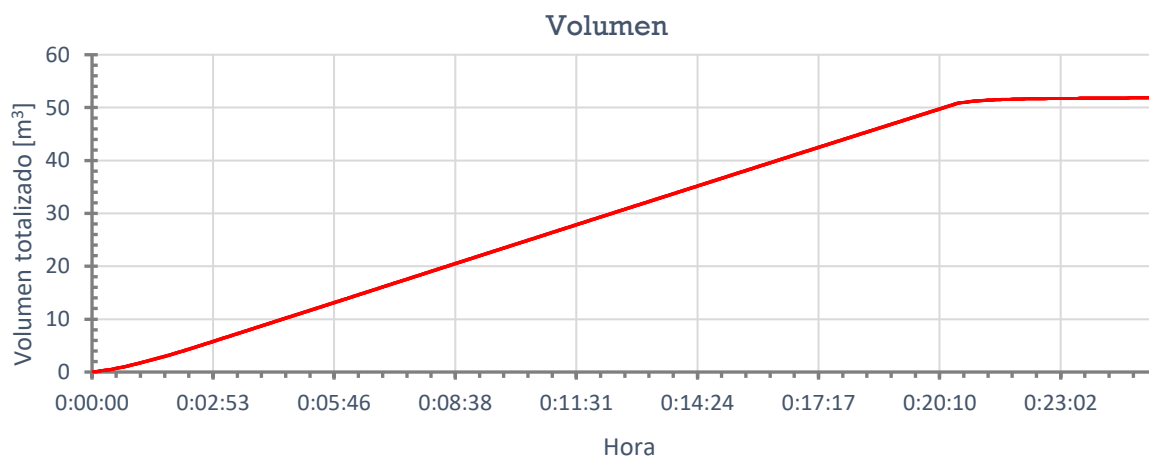


figura 30. Volumen totalizado de una prueba.

En la figura 30 se presenta el aumento lineal del volumen totalizado en una de las pruebas.

4.4. Resultados

En esta sección se presentan los datos obtenidos, resumiendo a la información que más concierne a la investigación.

4.4.1. Datos de ajuste

En la Tabla 3 se presentan los resultados de las pruebas en las que no se agregó la variable de la compuerta, y que servirán para ajustar los registros de las pruebas originales. La primera columna enlista el número de prueba; la segunda y tercera enlistan el valor del tirante en el tanque al inicio y al final de cada prueba respectivamente; la cuarta columna muestra el tirante total utilizado en cada repetición; la quinta columna, el volumen utilizado en el tanque, calculado con el tirante utilizado y el área unitaria; la sexta y séptima presentan el volumen que el medidor calculó, en dirección aguas abajo y en dirección aguas arriba respectivamente; la última columna enlista las diferencias entre el volumen calculado en el tanque contra el volumen calculado por los sensores ultrasónicos.

Tabla 3. Datos registrados con la compuerta abajo.

N° de prueba	Tirante [cm]			Volumen por prueba [m³]	Registros con ATT [m³]			Diferencia de volumen en %
	Inicial	Final	Utilizado		Volumen adelante	Volumen atrás	Volumen por prueba	
1	116	57	59	60.07	51.84	0.00	51.84	13.71
2	116	60	56	57.02	100.80	0.00	48.96	14.13
3	116	59	57	58.03	151.49	0.00	50.69	12.65
4	116	57	59	60.07	204.66	0.00	53.17	12.97
5	116	58	58	59.05	255.96	0.00	51.30	13.13
6	116	64	52	52.94	301.56	0.00	45.60	13.87
7	116	54	62	63.13	356.67	0.00	55.11	12.70
8	116	65	51	51.93	401.00	0.00	44.33	14.63
9	116	57	59	60.07	451.15	0.00	50.15	15.08
10	116	58	58	59.05	502.16	0.00	51.02	13.61

4.4.2. Registros de pruebas

De los registros obtenidos, se calcularon los volúmenes del tanque y se agruparon en un solo archivo los datos registrados por los sensores, para

visualizar los volúmenes particulares de cada prueba y facilitar su posterior análisis.

Tabla 4. Registro de datos de pruebas de volumen.

N° de prueba	Tirante en el tanque [cm]			Volumen por prueba [m³]	Volumen medido con ATT [m³]					Diferencia de volumen en %
	inicial	final	Utilizado		Volumen Adelante	Volumen Atrás	Adelante por prueba	Atrás por prueba	Volumen por prueba	
1	103	54	49	49.89	48.20	2.71	48.20	2.71	45.49	8.82
2	116	65	51	51.93	98.06	5.30	49.86	2.59	47.27	8.97
3	116	60	56	57.02	53.56	2.63	53.56	2.63	50.93	10.67
4	116	65	51	51.93	102.76	5.91	49.21	3.29	45.92	11.57
5	116	60	56	57.02	155.35	8.52	52.59	2.60	49.98	12.34
6	116	67	49	49.89	199.76	10.52	44.41	2.00	42.42	14.98
7	116	55	61	62.11	258.86	11.70	59.09	1.19	57.91	6.76
8	116	45	71	72.29	68.19	2.27	68.19	2.27	65.92	8.81
9	116	56	60	61.09	127.91	5.53	59.72	3.25	56.47	7.57
10	116	57	59	60.07	184.09	7.73	56.18	2.20	53.98	10.14
11	116	49	67	68.22	250.25	10.69	66.16	2.96	63.20	7.35
12	116	62	54	54.98	299.04	12.47	48.79	1.78	47.01	14.49
13	116	57	59	60.07	355.04	14.17	55.99	1.70	54.29	9.63
14	116	65	51	51.93	400.56	15.60	45.53	1.43	44.10	15.08
15	116	67	49	49.89	43.13	2.52	43.13	2.52	40.61	18.59
16	116	49	67	68.22	106.53	4.61	63.41	2.10	61.31	10.13
17	116	62	54	54.98	157.69	6.77	51.16	2.15	49.00	10.88
18	116	67	49	49.89	203.19	8.92	45.50	2.16	43.35	13.11
19	116	56	60	61.09	257.88	10.90	54.68	1.98	52.70	13.73
20	116	67	49	49.89	302.95	12.49	45.08	1.59	43.49	12.83
21	116	58	58	59.05	357.31	14.74	54.36	2.25	52.11	11.76
22	116	61	55	56.00	407.46	16.39	50.15	1.65	48.50	13.40
23	116	66	50	50.91	454.46	18.17	47.00	1.78	45.22	11.17
24	116	55	61	62.11	57.05	2.43	57.05	2.43	54.62	12.06
25	116	63	53	53.96	106.28	4.71	49.24	2.28	46.95	12.99
26	116	65	51	51.93	151.96	6.57	45.68	1.86	43.83	15.60

N° de prueba	Tirante en el tanque [cm]			Volumen por prueba [m³]	Volumen medido con ATT [m³]					Diferencia de volumen en %
	inicial	final	Utilizado		Volumen Adelante	Volumen Atrás	Adelante por prueba	Atrás por prueba	Volumen por prueba	
27	116	60	56	57.02	201.94	8.92	49.98	2.35	47.63	16.46
28	116	50	66	67.20	263.67	11.47	61.73	2.55	59.17	11.94
29	116	70	46	46.84	303.88	12.95	40.21	1.48	38.73	17.30
30	116	59	57	58.03	355.39	15.08	51.51	2.13	49.37	14.92
31	116	63	53	53.96	51.10	2.22	51.10	2.22	48.88	9.42
32	116	56	60	61.09	106.26	4.20	55.16	1.98	53.18	12.95
33	116	67	49	49.89	150.15	6.12	43.89	1.91	41.97	15.87
34	116	60	56	57.02	201.01	8.26	50.86	2.15	48.72	14.55
35	116	59	57	58.03	253.66	10.28	52.65	2.02	50.63	12.76
36	116	68	48	48.87	296.93	11.95	43.27	1.67	41.60	14.88
37	116	60	56	57.02	350.18	13.63	53.25	1.68	51.57	9.55
38	116	61	55	56.00	401.35	15.89	51.17	2.26	48.91	12.66
39	116	52	64	65.16	459.95	18.22	58.61	2.33	56.27	13.64
40	116	62	54	54.98	509.04	20.11	49.08	1.89	47.19	14.16
41	116	60	56	57.02	51.76	2.28	51.76	2.28	49.49	13.20
42	116	56	60	61.09	105.65	4.55	53.89	2.28	51.61	15.52
43	116	60	56	57.02	156.15	5.97	50.50	1.42	49.08	13.93
44	116	60	56	57.02	52.55	1.99	52.55	1.99	50.57	11.32
45	116	55	61	62.11	110.18	4.65	57.62	2.67	54.96	11.51
46	116	73	43	43.78	147.25	6.29	37.07	1.63	35.44	19.06
47	116	58	58	59.05	201.90	8.34	54.65	2.05	52.60	10.93
48	116	67	49	49.89	249.58	10.38	47.68	2.04	45.65	8.50
49	116	72	44	44.80	289.62	11.88	40.03	1.50	38.53	13.99
50	116	53	63	64.14	347.93	13.89	58.32	2.01	56.31	12.21

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo los datos de volumen medidos de dos formas diferentes, el siguiente paso es comparar la información con la que se cuenta. El Aforador de Tiempo de Travesía en un canal rectangular sin la existencia de un obstáculo como en este caso la compuerta, registra un volumen por abajo del medido en el tanque (figura 31), lo que nos prueba que el volumen en el tanque está sobreestimado. Este aumento se atribuye como se mencionó en apartados anteriores, a la falta de exactitud de la medición del volumen que ocupan los elementos que se encuentran dentro del tanque elevado.

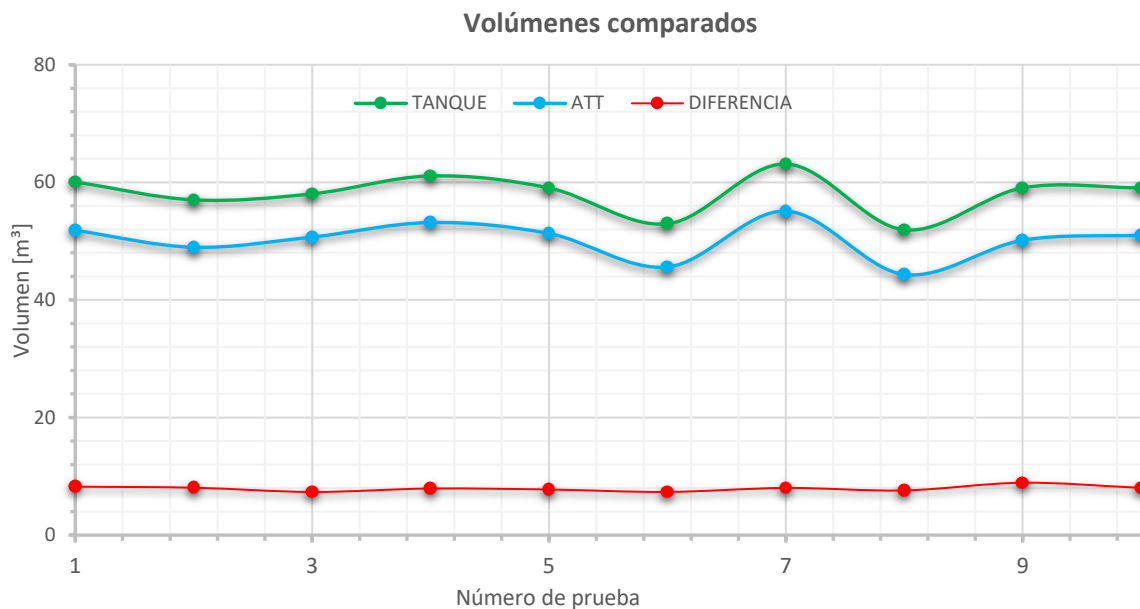


figura 31. Variación de volumen con el vertedor abajo.

A pesar de la diferencia de magnitudes del volumen mostrados en la figura 31, la tendencia de los registros comparados en los dos medios, tiene un comportamiento relativamente regular, lo cual se puede apreciar de mejor manera con la línea roja de la misma figura 31, la cual representa la diferencia entre los dos registros; podemos notar que estos datos tienen un comportamiento casi lineal, por lo que de los datos numéricos podemos obtener un promedio de

los valores de prueba para encontrar una aproximación del desfase entre el volumen en el tanque y lo registrado en los ATT.

Tabla 5. Resumen de volúmenes sin obstáculo y promedio de diferencia de valores.

Volumen [m ³]			%
Tanque	ATT	Diferencia	
60.07	51.83	8.24	15.9
57.02	48.96	8.06	16.5
58.03	50.69	7.34	14.5
61.09	53.17	7.92	14.9
59.05	51.30	7.75	15.1
52.94	45.60	7.35	16.1
63.13	55.11	8.02	14.5
51.93	44.33	7.60	17.1
59.05	50.15	8.91	17.8
59.05	51.02	8.04	15.8
Promedio →		7.92	15.8

En la Tabla 5 se presenta los datos resumidos de los volúmenes registrados en condiciones regulares sin obstáculo, en donde se obtiene la diferencia entre valores para aproximar el desfase entre los dos medios de medición del volumen; el resultado es que los valores obtenidos en el tanque son, en promedio 15.8% mayores que los registrados en los sensores; esto se hace con la premisa de que la técnica de medición con tecnología ultrasónica tienen un funcionamiento pleno en condiciones regulares.

Con esta información se analizarán los datos registrados agregando la variable del vertedor, los cuales son el resultado de las pruebas planeadas originalmente y que se describen en la sección 4.1.

En la figura 32 podemos apreciar la comparación entre los registros de volumen entre los registrados con los sensores ultrasónicos (línea naranja) y el que se utilizó del tanque (línea azul), calculado midiendo los tirantes.

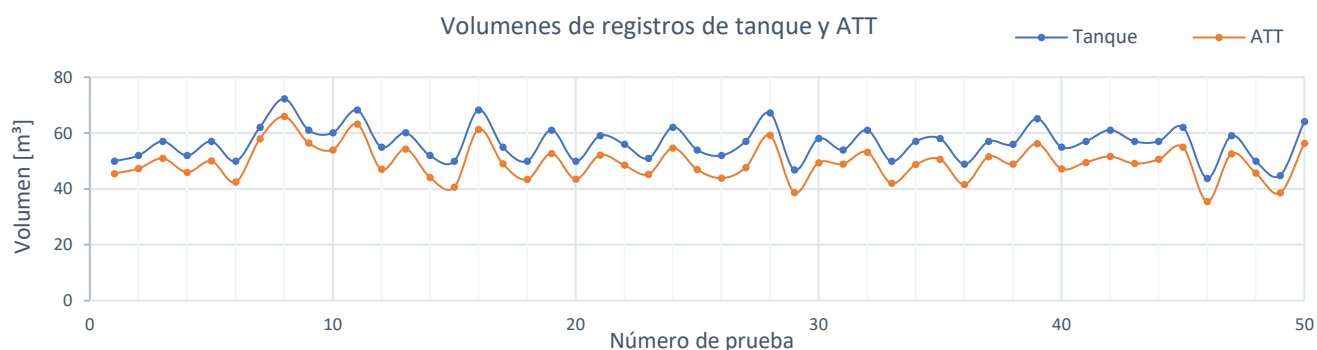


figura 32. Registros de los volúmenes en las cincuenta repeticiones.

En un primer y rápido análisis de la figura 32, se puede observar que, en todos los registros del tanque elevado, se tiene una magnitud por encima de los valores que los sensores ultrasónicos registraron, de tal forma que existe una sobreestimación en los valores del tanque debido a los factores mencionados en el apartado 4.3.

Tabla 6. Datos de volumen de las pruebas con vertedor, ajustados con los resultados de la tabla 5.

Volumen [m³]				Diferencia en %
Tanque Original	Tanque Ajustado	ATT	Diferencia	
49.89	42.01	45.49	3.48	8.29
51.93	43.72	47.27	3.55	8.12
57.02	48.01	50.93	2.92	6.09
51.93	43.72	45.92	2.20	5.02
57.02	48.01	49.98	1.97	4.11
49.89	42.01	42.42	0.41	0.97
62.11	52.29	57.91	5.61	10.73
72.29	60.87	65.92	5.05	8.30
61.09	51.44	56.47	5.03	9.78
60.07	50.58	53.98	3.40	6.72
68.22	57.44	63.20	5.76	10.03
54.98	46.29	47.01	0.72	1.55
60.07	50.58	54.29	3.71	7.33

Volumen [m³]				Diferencia en %
Tanque Original	Tanque Ajustado	ATT	Diferencia	
51.93	43.72	44.10	0.37	0.86
49.89	42.01	40.61	1.39	3.32
68.22	57.44	61.31	3.87	6.74
54.98	46.29	49.00	2.71	5.85
49.89	42.01	43.35	1.34	3.20
61.09	51.44	52.70	1.27	2.46
49.89	42.01	43.49	1.48	3.53
59.05	49.72	52.11	2.39	4.80
56.00	47.15	48.50	1.34	2.85
50.91	42.86	45.22	2.36	5.50
62.11	52.29	54.62	2.32	4.44
53.96	45.44	46.95	1.51	3.33
51.93	43.72	43.83	0.10	0.24

Volumen [m ³]				Diferencia en %
Tanque Original	Tanque Ajustado	ATT	Diferencia	
57.02	48.01	47.63	0.38	0.78
67.20	56.58	59.17	2.59	4.58
46.84	39.44	38.73	0.70	1.79
58.03	48.87	49.37	0.51	1.04
53.96	45.44	48.88	3.44	7.58
61.09	51.44	53.18	1.74	3.39
49.89	42.01	41.97	0.03	0.08
57.02	48.01	48.72	0.71	1.48
58.03	48.87	50.63	1.76	3.61
48.87	41.15	41.60	0.45	1.09
57.02	48.01	51.57	3.56	7.42
56.00	47.15	48.91	1.76	3.73

Volumen [m ³]				Diferencia en %
Tanque Original	Tanque Ajustado	ATT	Diferencia	
65.16	54.87	56.27	1.41	2.56
54.98	46.29	47.19	0.90	1.94
57.02	48.01	49.49	1.48	3.09
61.09	51.44	51.61	0.17	0.33
57.02	48.01	49.08	1.07	2.22
57.02	48.01	50.57	2.56	5.33
62.11	52.29	54.96	2.66	5.09
43.78	36.86	35.44	1.43	3.87
59.05	49.72	52.60	2.88	5.78
49.89	42.01	45.65	3.64	8.66
44.80	37.72	38.53	0.81	2.15
64.14	54.01	56.31	2.30	4.26

Con los datos obtenidos y ajustados, se puede apreciar la variación de los volúmenes en la figura 33, donde los datos, a comparación de los presentados en la figura 31, tienen una desviación mayor, de manera que en general, los datos obtenidos del tanque ahora son menores que en los sensores. Se graficaron los valores absolutos de las diferencias.

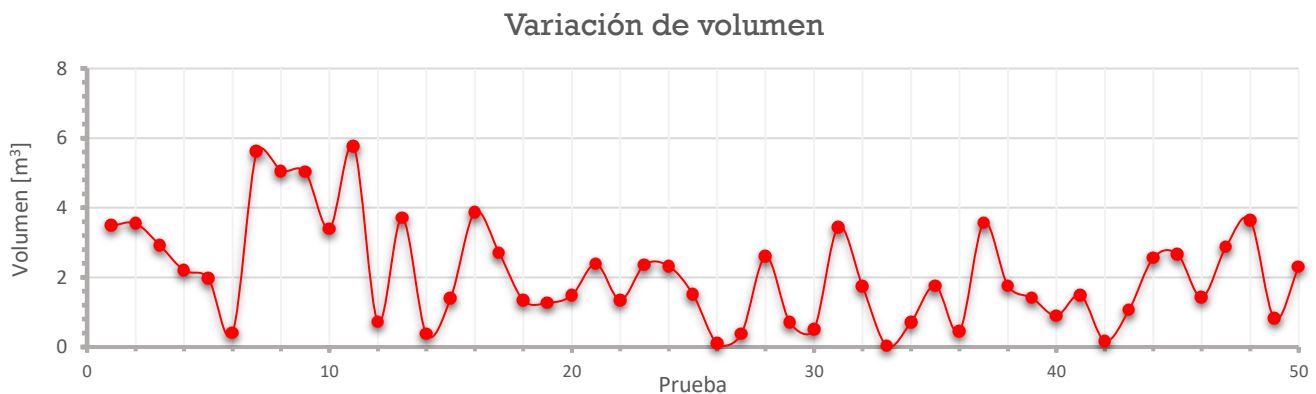


figura 33. Diferencia entre registro de volúmenes medidos en las pruebas con obstáculo, ajustados con el resultado de la tabla 5.

Los valores de volumen se desvían en promedio menos del 5% del volumen total que fluyó por la sección, así que, aunque es un valor diferente a el caso flujo continuo (sin vertedor), el pequeño porcentaje puede no llegar a afectar en situaciones donde el volumen de agua manejado por el sistema es mucho mayor y el flujo no está expuesto a parámetros que modifiquen la dirección del flujo de manera continua.

6. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos podemos concluir que el funcionamiento del aforador de tiempo de travesía instalado en un canal en condiciones regulares, se ve modificado cuando se le agrega un obstáculo en alguna parte del trayecto del cauce, en este caso una placa metálica que funge como vertedor para el flujo, ya que la sección de control está instalada a una distancia relativamente corta respecto al vertedor. Esta alteración en la medición no genera un cambio sustancial el registro del volumen totalizado.

La velocidad del flujo, el gasto, la distancia entre el obstáculo y la sección, entre otros, son parámetros que afectan el comportamiento del flujo, por lo que los resultados presentados en el presente documento podrían diferir en algún caso particular.

El Aforador de Tiempo de Travesía funciona correctamente, la influencia de las velocidades negativas no son determinantes en el volumen de agua que pasa a través del canal, por lo que considerando que el aforador tiene como principal función medir el gasto que pasa a través de una sección se puede concluir que el aforador no proporciona datos incorrectos.

El aforador tiempo de tránsito si toma en cuenta el flujo inverso, siempre y cuando sea en condiciones de operación.

El volumen totalizado será la diferencia entre el volumen hacia adelante (“forward”) y el volumen inverso (“reverse”)

Variación de velocidad

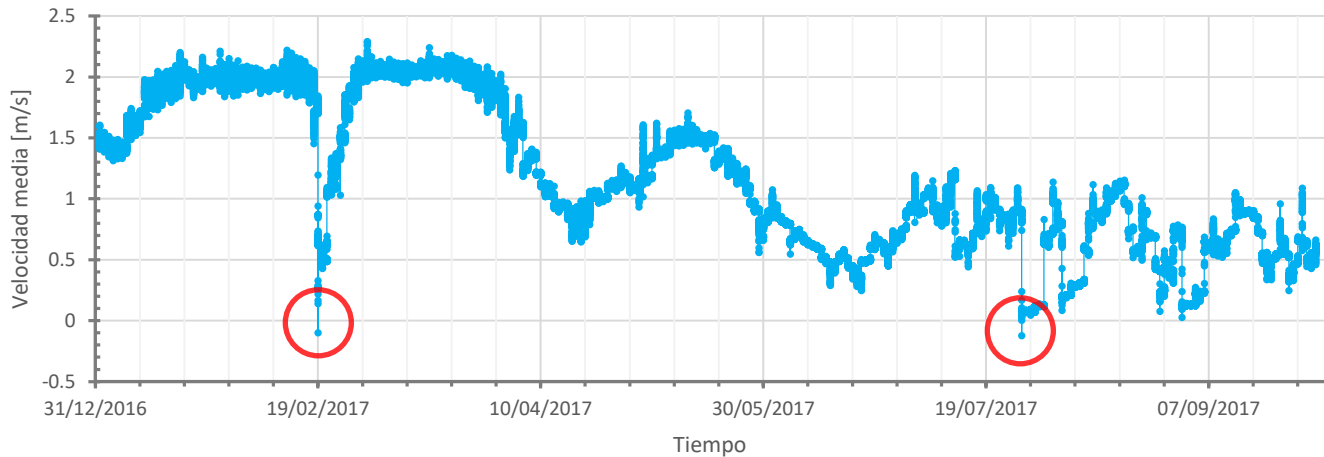


figura 34. Registros de velocidad de la presa Josefa Ortiz de Domínguez

En la figura 34 se presentan los registros de velocidad de la presa Josefa Ortiz de Domínguez de un periodo aproximado de diez meses; podemos apreciar que los registros siguen un comportamiento regular, en el que las velocidades se mantienen positivas, exceptuando en los casos señalados con círculos rojos. Estos puntos, son los únicos valores negativos en todo el registro, y generan velocidades negativas en un periodo de tiempo de aproximadamente una hora, pero al ser dos casos puntuales y que no muestran un comportamiento repetitivo, se llega a la conclusión de que representan dos eventualidades o cambios en las condiciones de operación que generaron estos casos particulares, por lo que se mantiene la aseveración sobre que las velocidades negativas no interfieren en el *correcto funcionamiento de los sensores ultrasónicos* en condiciones de operación, además de que el fenómeno presentado en este caso particular no presenta condiciones de comportamiento de velocidades tan adversas como en el caso experimental, pero queda fundamentado, en el caso de presentarse, los sensores siguen funcionando correctamente

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ávila, G. S. (2015). *Hidráulica General I : Fundamentos*. México, D.F.: Limusa.
- Ávila, G. S. (2016). *Hidráulica de Canales*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- CFE. (1981). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. México D.F.: Instituto de Investigaciones Eléctricas
- CNA-IMTA. (2000). *Protección y Control de Cauces*. México D.F.: CONAGUA.
- Congreso de la Unión. (1992, última reforma 2016). Ley de aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación.
- Fischer, S. (2011). Transit time flow measurement in open channels Optimization of measurement accuracy by using optimized path positions. *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen*.
- Gijsberthus Bos, M., A. Replogle, J., & J. Clemmens, A. (1986). *Flow measuring flumes for open channels systems*. Wageningen, The Netherlands: Jhon Wiley & Sons.
- Giles, R. V., B. Evett, J., & Cheng Liu. (1994). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. McGraw-Hill.
- González, E. P. (2017). *El molinete, importancia, fundamentos y buenas practicas*. Jiutepec, Morelos: IMTA.
- ISO 6416. (01 de Julio de 2004). *Hydrometry - Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) methods*. International Organization for Standardization.
- ISO 748. (15 de octubre de 2007). *Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats*. International Organization for Standardization.
- Kennedy Pérez, A., Fragoza Díaz, F., Peña Peña, E., & Moreno Bañuelos, E. (1992). *Manual de aforo*. Jiutepec, Morelos: IMTA.
- Molina, L. S. (1988). *Manual de diseño de estructuras de aforo*. México, D.F.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pedroza González, E., Millán Barrera, C., Arroyo Correa, V. M., Mejía Astudillo, V. G., Sergio Santana, J., & Aguilar Chávez, A. (2016). *Medición de flujo volumétrico en presas, canales y pozos*. Jiutepec, Morelos: IMTA.
- Rittmeyer. (2010). System Manual RISONIC modular.

- Rittmeyer. (2010). User Manual RISONIC modular.
- Rodríguez Pérez, A. (2015). Estudio comparativo de dos sistemas medición de aforo (tiempo de travesía, efecto doppler). Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Tamari, S., & Aguilar, A. (2010). Aforo en canales y presas: Selección de una técnica. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Tapia Rodríguez, G., Molina Aguilar, J. P., Pérez Morales, G. B., & Torres Acosta, A. A. (2012). Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico. Sanfandila, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.
- UdeV. (2005). *Manual de Procedimientos Hidrométricos*. Santiago de Cali: Corporación Autónoma Regional del Valle de Cauca - CVC.
- Urquiza, G., Adamkowski, A., Kubiak, J., Janicki, W., & Fernández, M. (2007). Medición del flujo de una turbina hidráulica de 170 MW utilizando el método Gibson. *Ingeniería Hidráulica en México*, 125-137.
- Veca, Á. C., & Accolti, E. (2016). *Ultrasonido para ingenieros y estudiantes de ingeniería*. San Juan: Edición argentina.

ANEXOS

Anexo A

Datos de la configuración utilizada en el controlador

ULTRASONIC MODULES (RIMOUSTT)		
Parámetro	Valor	Descripción
enable	TRUE	Activar o desactivar el módulo ultrasónico
port	6091	Puerto de mantenimiento UDP/IP
remote	FALSE	Si el RIMOUSTT es manejado remotamente
wd_timer	20	Temporizador de watchdog
wd_dout	OFF	Salida digital de watchdog
wd_aout	56714	Salida analógica de watchdog
hw_tx	1MHz-High power	Características del transmisor
lv_tx_data_dc	82	Límite de valor máximo para el desplazamiento de cd
lv_loc_mm	820	Límite de diferencia mínima entre el mínimo local y el máximo
lv_kal_level	7	
kal_phi	410	
kal_g11	19348	
kal_g12	-14057	
kal_g21	19261	
kal_g22	26510	
meas_application	Transit-Time wet	
n_cycles	12	Número de ciclos de procesamiento para la tabla de medidas
msg_timeout	250	Tiempo de espera en LAN2 para este módulo ultrasónico en ms
msg_retry_timeout	1	Número de reintentos después de un tiempo de espera en LAN2 para este módulo ultrasónico
msg_retry_nak	0	Número de reintentos después de un NAK en LAN2 para este módulo ultrasónico
ai_grad	1	Ajuste fino de la entrada analógica de este módulo ultrasónico, gradiente de entrada analógica
ai_ofs	0	Ajuste fino de la entrada analógica de este módulo ultrasónico, desplazamiento de entrada analógica
ao_grad	1	Ajuste fino de la salida analógica de este módulo ultrasónico, gradiente de salida analógica
ao_ofs	0	Ajuste fino de la salida analógica de este módulo ultrasónico, offset de salida analógica

PARÁMETROS DE MEDICIÓN POR PAR					
	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	DESCRIPCIÓN
enable	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	Activar y desactivar el trayecto
time_wait	52	52	52	52	Espere hasta el inicio de la ventana de adquisición de datos
n_rx_data	2540	2529	2551	2548	Longitud de la ventana de adquisición de datos
gain	Auto gain VALUE:0				Ganancia nominal
n_burst	1 BURST	1 BURST	1 BURST	1 BURST	Cantidad de ráfagas
pos_max_tx_data	64	64	64	64	Posición del máximo en la ventana de transmisión del bus
pos_begin_kalman	20	20	20	20	
max_kal_pos_buf	350	350	350	350	
lv_agc_hi	6963	6963	6963	6963	Valor límite superior para el nivel de señal OK
lv_agc_lo	5734	5734	5734	5734	Umbral de señal más bajo para AGC
agc_dec_exp_norm	3	3	3	3	Exponente del factor de diezmado (duración media) de la adaptación AGC para señales normales
agc_dec_exp_of	1	1	1	1	Exponente del factor de decimación (duración promedio) de la adaptación AGC para señales de desbordamiento
agc_step_norm	2	2	2	2	Número de pasos de ganancia que se cambian para las señales normales en cada paso de adaptación
agc_step_of	12	12	12	12	Número de pasos de ganancia que se cambian para las señales de desbordamiento en cada paso de adaptación
lv_sig_lo	2048	2048	2048	2048	Valor límite para el nivel de señal OK
Lv_sig_not	1228	1228	1228	1228	Valor límite para ningún nivel de señal
POR CAPA					
enable	TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	
b_axial	0.598	0.598	0.598	0.598	
z_axial	0.084	0.176	0.292	0.379	
map_path_0	1	2	3	4	
map_path_1	Not mapped	Not mapped	Not mapped	Not mapped	
POR PAR					

L	0.928	0.924	0.932	0.931	
L_T	-0.164	-0.164	-0.164	-0.164	
L_C	12.7	12.7	12.7	12.7	
b	0.598	0.598	0.598	0.598	
phi	33.18	33.34	33.05	33.09	
z	0.084	0.176	0.292	0.379	
z_U	0.1	0.196	0.312	0.399	
z_L	0.09	0.186	0.302	0.389	
map_module	0	0	0	0	
map_path	A	B	C	D	

SECCIONES - SECCIÓN 1	
Parámetro	Valor
enable	TRUE
description	2
n_loc_mm	80
n_corr_sig	7
n_zero_cross	7
n_variance	10
dt_damp	1
t_damp	1
v_damp	OFF
Q_damp	OFF
protrusion	OFF
path_failure	ON
layer_failure	ON
GEOMETRÍA	
B	0.598
altitude	relative - 0.000
channel_law	LOG_LAW
K_s	60
K_karm	0.4
K_es	0.003
K_top	-0.1
K_bot	0.8
K_shape	1
c_s	2800
L_s	0.0035
VALORES LÍMITE	
lv_Q_cutoff	0.00
lv_Q_raw_min	0.00

SECCIONES - SECCIÓN 1	
lv_Q_raw_max	10000000
lv_d_Q_raw	10000000
lv_d_pos_min	3
lv_d_pos_max	7
lv_d_max	2
lv_min_g_max	10
lv_d_corr_pos	15
lv_d_corr_max	5
lv_corr_loc_mm	5
lv_asym_lo	0.9
lv_asym_hi	1.1
lv_d_t_interp	1
lv_d_t_cutoff	5
lv_t_d_min	15
lv_t_d_max	25
lv_c_lo	1390
lv_c_hi	1565
lv_v_lo	-20
lv_v_hi	20
lv_d_dt_calc	2
lv_d_v	25
lv_v_dir	0.5
OUTLER FILTER	
buffer_size	256
filter_size	11
n_mean_value	5
n_min_value	3
valid_time	5000000

Anexo B

Registro de velocidades por par para un mismo periodo de tiempo.

Tabla 7. Registro de velocidades por par.

VELOCIDAD MEDIA [M/S]				VELOCIDAD MEDIA [M/S]				VELOCIDAD MEDIA [M/S]				VELOCIDAD MEDIA [M/S]			
PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4
0.000	0.000	0.000	0.000	0.213	0.234	0.000	0.000	0.030	0.046	0.000	0.000	0.028	0.048	0.039	0.000
0.008	0.000	0.000	0.000	0.220	0.228	0.000	0.000	0.033	0.044	0.000	0.000	0.018	0.040	0.029	0.000
0.010	0.000	0.000	0.000	0.210	0.226	0.000	0.000	0.029	0.041	0.000	0.000	0.021	0.044	0.037	0.000
0.012	0.000	0.000	0.000	0.212	0.232	0.000	0.000	0.028	0.042	0.000	0.000	0.014	0.035	0.033	0.000
0.022	0.000	0.000	0.000	0.224	0.233	0.000	0.000	0.020	0.037	0.000	0.000	0.015	0.033	0.027	0.000
0.085	0.000	0.000	0.000	0.203	0.212	0.000	0.000	0.014	0.031	0.000	0.000	0.020	0.046	0.029	0.000
0.176	0.000	0.000	0.000	0.175	0.177	0.000	0.000	0.003	0.028	0.000	0.000	0.024	0.057	0.046	0.000
0.232	0.000	0.000	0.000	0.213	0.221	0.000	0.000	0.000	0.035	0.000	0.000	0.017	0.045	0.034	0.000
0.262	0.000	0.000	0.000	0.223	0.222	0.000	0.000	0.008	0.039	0.000	0.000	-0.023	0.002	-0.007	0.000
0.284	0.000	0.000	0.000	0.230	0.242	0.000	0.000	0.005	0.036	0.000	0.000	-0.094	-0.066	-0.071	0.000
0.300	0.000	0.000	0.000	0.240	0.250	0.000	0.000	0.000	0.034	0.000	0.000	-0.052	-0.033	-0.076	0.000
0.314	0.000	0.000	0.000	0.259	0.254	0.000	0.000	0.000	0.031	0.000	0.000	-0.015	0.000	-0.015	0.000
0.323	0.000	0.000	0.000	0.271	0.266	0.000	0.000	0.000	0.024	0.000	0.000	0.020	0.036	0.022	0.000
0.332	0.000	0.000	0.000	0.281	0.286	0.000	0.000	-0.043	-0.020	0.000	0.000	0.033	0.049	0.041	0.000
0.336	0.000	0.000	0.000	0.281	0.289	0.000	0.000	-0.108	-0.079	0.000	0.000	0.079	0.105	0.107	0.000
0.339	0.000	0.000	0.000	0.288	0.300	0.000	0.000	0.008	0.042	0.000	0.000	0.119	0.144	0.133	0.000
0.327	0.000	0.000	0.000	0.316	0.303	0.000	0.000	0.051	0.080	0.000	0.000	0.183	0.209	0.196	0.000
0.248	0.000	0.000	0.000	0.301	0.288	0.000	0.000	0.101	0.128	0.000	0.000	0.219	0.239	0.233	0.000
0.251	0.000	0.000	0.000	0.297	0.305	0.000	0.000	0.140	0.168	0.000	0.000	0.158	0.169	0.163	0.000
0.243	0.000	0.000	0.000	0.291	0.292	0.000	0.000	0.140	0.162	0.000	0.000	0.123	0.136	0.135	0.000
0.240	0.000	0.000	0.000	0.294	0.294	0.000	0.000	0.172	0.195	0.000	0.000	0.056	0.072	0.066	0.000
0.233	0.000	0.000	0.000	0.285	0.287	0.000	0.000	0.207	0.236	0.000	0.000	0.052	0.066	0.051	0.000
0.232	0.231	0.000	0.000	0.304	0.285	0.000	0.000	0.256	0.281	0.000	0.000	0.039	0.056	0.045	0.000
0.228	0.234	0.000	0.000	0.290	0.297	0.000	0.000	0.272	0.288	0.000	0.000	0.015	0.034	0.024	0.000
0.232	0.226	0.000	0.000	0.285	0.295	0.000	0.000	0.082	0.099	0.000	0.000	0.015	0.032	0.031	0.000
0.229	0.227	0.000	0.000	0.283	0.291	0.000	0.000	0.088	0.094	0.000	0.000	0.013	0.033	0.035	0.000
0.222	0.231	0.000	0.000	0.252	0.252	0.000	0.000	0.069	0.078	0.000	0.000	0.007	0.025	0.029	0.000
0.222	0.229	0.000	0.000	0.089	0.115	0.000	0.000	0.069	0.087	0.000	0.000	0.032	0.050	0.055	0.000
0.222	0.229	0.000	0.000	0.040	0.054	0.000	0.000	0.043	0.062	0.061	0.000	0.031	0.051	0.048	0.000
0.222	0.231	0.000	0.000	0.034	0.046	0.000	0.000	0.028	0.045	0.041	0.000	0.045	0.067	0.069	0.000

VELOCIDAD MEDIA [M/S]				VELOCIDAD MEDIA [M/S]				VELOCIDAD MEDIA [M/S]				VELOCIDAD MEDIA [M/S]			
PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4
0.032	0.054	0.056	0.040	0.459	0.464	0.454	0.454	0.741	0.000	0.000	0.000	0.229	0.238	0.000	0.000
-0.002	0.014	0.014	0.003	0.522	0.532	0.522	0.464	0.750	0.000	0.000	0.000	0.269	0.276	0.000	0.000
-0.071	-0.050	-0.056	-0.005	0.599	0.612	0.603	0.464	0.729	0.000	0.000	0.000	0.275	0.287	0.000	0.000
-0.067	-0.050	-0.050	-0.060	0.677	0.686	0.682	0.464	0.722	0.000	0.000	0.000	0.329	0.320	0.000	0.000
-0.058	-0.039	-0.046	-0.060	0.758	0.767	0.762	0.464	0.724	0.000	0.000	0.000	0.364	0.348	0.000	0.000
-0.039	-0.015	-0.028	-0.060	0.824	0.837	0.830	0.500	0.738	0.000	0.000	0.000	0.388	0.390	0.000	0.000
-0.008	0.014	0.001	-0.057	0.874	0.889	0.879	0.000	0.718	0.000	0.000	0.000	0.052	0.051	0.000	0.000
0.033	0.057	0.042	0.040	0.916	0.920	0.906	0.000	0.711	0.000	0.000	0.000	0.052	0.047	0.000	0.000
0.093	0.113	0.104	0.092	0.941	0.949	0.947	0.000	0.721	0.000	0.000	0.000	0.038	0.027	0.000	0.000
0.146	0.156	0.157	0.157	0.961	0.972	0.947	0.000	0.624	0.000	0.000	0.000	0.028	0.015	0.000	0.000
0.159	0.162	0.188	0.184	0.979	0.984	0.947	0.000	0.077	0.000	0.000	0.000	0.046	0.042	0.000	0.000
0.138	0.147	0.154	0.151	0.989	0.986	0.947	0.000	0.020	-0.005	0.000	0.000	0.028	0.034	0.000	0.000
0.116	0.117	0.119	0.115	0.995	0.992	0.948	0.000	0.017	0.007	0.000	0.000	0.012	0.023	0.000	0.000
0.092	0.096	0.099	0.093	0.981	0.997	0.000	0.000	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.012	0.019	0.000	0.000
0.062	0.059	0.064	0.060	0.990	0.986	0.000	0.000	-0.032	0.005	0.000	0.000	0.011	0.015	0.000	0.000
0.043	0.042	0.046	0.047	0.980	0.984	0.000	0.000	-0.036	0.007	0.000	0.000	0.024	0.029	0.000	0.000
0.033	0.032	0.039	0.041	0.969	0.965	0.000	0.000	-0.038	-0.001	0.000	0.000	0.002	0.012	0.000	0.000
0.037	0.039	0.042	0.051	0.957	0.955	0.000	0.000	-0.036	-0.002	0.000	0.000	0.002	0.016	0.000	0.000
0.050	0.059	0.058	0.068	0.956	0.939	0.000	0.000	-0.039	-0.005	0.000	0.000	0.003	0.024	0.000	0.000
0.060	0.075	0.077	0.081	0.939	0.914	0.000	0.000	-0.046	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.025	0.000	0.000
0.063	0.080	0.081	0.077	0.898	0.886	0.000	0.000	-0.045	0.006	0.000	0.000	-0.002	0.018	0.000	0.000
0.054	0.072	0.070	0.063	0.901	0.891	0.000	0.000	-0.048	0.000	0.000	0.000	-0.049	-0.022	0.000	0.000
0.037	0.054	0.055	0.047	0.887	0.871	0.000	0.000	-0.049	-0.002	0.000	0.000	-0.119	-0.103	0.000	0.000
-0.009	0.007	0.004	0.000	0.867	0.860	0.000	0.000	-0.052	-0.002	0.000	0.000	-0.111	-0.094	0.000	0.000
-0.038	-0.018	-0.024	-0.032	0.858	0.859	0.000	0.000	-0.050	-0.005	0.000	0.000	-0.008	0.011	0.000	0.000
-0.056	-0.035	-0.045	-0.054	0.848	0.859	0.000	0.000	-0.044	-0.002	0.000	0.000	0.048	0.068	0.000	0.000
-0.043	-0.030	-0.034	-0.044	0.843	0.859	0.000	0.000	-0.041	-0.003	0.000	0.000	0.057	0.072	0.000	0.000
-0.010	0.000	0.000	0.000	0.827	0.859	0.000	0.000	-0.041	-0.008	0.000	0.000	0.094	0.108	0.000	0.000
0.035	0.050	0.052	0.052	0.810	0.000	0.000	0.000	-0.061	-0.023	0.000	0.000	0.128	0.150	0.000	0.000
0.096	0.120	0.117	0.112	0.793	0.000	0.000	0.000	-0.120	-0.117	0.000	0.000	0.158	0.168	0.000	0.000
0.164	0.185	0.173	0.171	0.803	0.000	0.000	0.000	-0.174	-0.183	0.000	0.000	0.212	0.224	0.000	0.000
0.223	0.233	0.232	0.218	0.790	0.000	0.000	0.000	-0.138	-0.165	0.000	0.000	0.240	0.232	0.000	0.000
0.277	0.288	0.288	0.282	0.771	0.000	0.000	0.000	0.119	0.120	0.000	0.000	0.138	0.130	0.121	0.000
0.346	0.355	0.346	0.338	0.754	0.000	0.000	0.000	0.198	0.199	0.000	0.000	0.091	0.099	0.112	0.000
0.394	0.411	0.406	0.373	0.762	0.000	0.000	0.000	0.194	0.206	0.000	0.000	0.050	0.073	0.067	0.000

VELOCIDAD MEDIA [M/S]				VELOCIDAD MEDIA [M/S]				VELOCIDAD MEDIA [M/S]				VELOCIDAD MEDIA [M/S]			
PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4	PAR 1	PAR 2	PAR 3	PAR 4
0.040	0.072	0.063	0.000	0.014	0.023	0.023	0.019	-0.050	-0.046	-0.053	-0.045	0.923	0.939	0.000	0.000
0.013	0.036	0.033	0.000	0.015	0.030	0.023	0.026	-0.043	-0.037	-0.045	-0.038	0.918	0.927	0.000	0.000
0.007	0.023	0.022	0.000	0.031	0.048	0.040	0.057	-0.011	-0.004	-0.012	-0.012	0.891	0.905	0.000	0.000
0.013	0.022	0.030	0.000	0.035	0.048	0.040	0.058	0.053	0.062	0.040	0.044	0.882	0.895	0.000	0.000
-0.016	-0.003	-0.010	0.000	0.030	0.044	0.043	0.053	0.129	0.136	0.128	0.130	0.852	0.876	0.000	0.000
-0.018	0.000	-0.020	0.000	0.000	0.017	0.017	0.020	0.205	0.214	0.209	0.215	0.852	0.870	0.000	0.000
-0.017	0.004	-0.014	0.000	-0.074	-0.058	-0.060	-0.022	0.278	0.291	0.298	0.302	0.822	0.864	0.000	0.000
-0.007	0.011	0.002	0.000	-0.101	-0.096	-0.097	-0.071	0.346	0.345	0.357	0.362	0.824	0.864	0.000	0.000
0.004	0.012	0.007	0.000	-0.056	-0.042	-0.041	-0.032	0.395	0.398	0.405	0.404	0.818	0.864	0.000	0.000
0.007	0.009	0.000	0.000	-0.040	-0.023	-0.019	-0.017	0.463	0.464	0.462	0.468	0.806	0.864	0.000	0.000
-0.009	-0.008	-0.018	0.000	-0.006	0.010	0.018	0.020	0.516	0.535	0.527	0.523	0.804	0.861	0.000	0.000
-0.057	-0.047	-0.064	0.000	0.041	0.057	0.048	0.058	0.591	0.586	0.590	0.562	0.798	0.000	0.000	0.000
-0.131	-0.113	-0.125	0.000	0.103	0.112	0.107	0.112	0.670	0.679	0.673	0.562	0.789	0.000	0.000	0.000
-0.095	-0.077	-0.087	0.000	0.164	0.175	0.168	0.174	0.749	0.766	0.754	0.562	0.788	0.000	0.000	0.000
-0.060	-0.045	-0.057	0.000	0.181	0.191	0.184	0.214	0.835	0.847	0.830	0.562	0.771	0.000	0.000	0.000
-0.018	0.002	-0.012	0.000	0.145	0.153	0.158	0.169	0.893	0.902	0.882	0.561	0.768	0.000	0.000	0.000
0.016	0.033	0.025	0.000	0.115	0.119	0.118	0.128	0.924	0.932	0.922	0.000	0.760	0.000	0.000	0.000
0.073	0.085	0.079	0.000	0.078	0.076	0.073	0.088	0.947	0.959	0.958	0.000	0.745	0.000	0.000	0.000
0.130	0.139	0.135	0.000	0.048	0.046	0.036	0.057	0.971	0.973	0.972	0.000	0.727	0.000	0.000	0.000
0.190	0.199	0.206	0.000	0.057	0.055	0.048	0.070	0.987	0.994	0.974	0.000	0.728	0.000	0.000	0.000
0.240	0.251	0.263	0.000	0.046	0.046	0.044	0.056	0.991	0.990	0.974	0.000	0.724	0.000	0.000	0.000
0.136	0.139	0.164	0.000	0.056	0.062	0.060	0.072	0.988	0.991	0.974	0.000	0.731	0.000	0.000	0.000
0.121	0.126	0.146	0.000	0.068	0.071	0.069	0.073	0.989	1.005	0.978	0.000	0.725	0.000	0.000	0.000
0.077	0.087	0.093	0.000	0.081	0.087	0.073	0.076	0.983	0.994	0.000	0.000	0.727	0.000	0.000	0.000
0.043	0.054	0.047	0.000	0.075	0.080	0.074	0.073	0.972	0.975	0.000	0.000	0.720	0.000	0.000	0.000
0.017	0.026	0.022	0.028	0.053	0.054	0.052	0.054	0.956	0.972	0.000	0.000	0.419	0.000	0.000	0.000
0.005	0.018	0.010	0.037	0.011	0.013	0.008	0.016	0.965	0.980	0.000	0.000	0.021	0.000	0.000	0.000
0.000	0.007	0.005	0.005	-0.034	-0.032	-0.036	-0.025	0.938	0.957	0.000	0.000				

Variaciones de velocidad por par

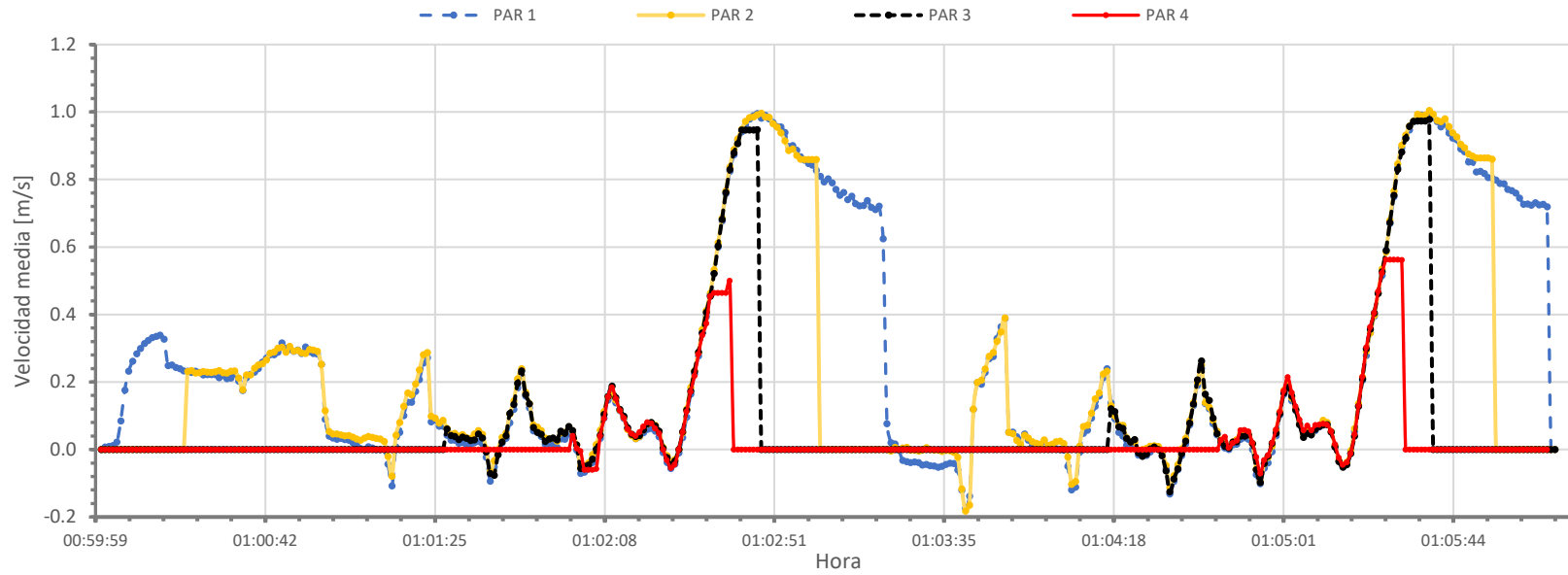


figura 35. Mediciones de velocidad registrado por cada par.

Dedicada a mi familia.

Eterna gratitud a las personas que compartieron esta etapa conmigo.