



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



COORDINACIÓN DE DESARROLLO PROFESIONAL E INSTITUCIONAL

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

TESIS

ESTUDIO SOBRE LA FALLA DE SENSORES DE VELOCIDAD UN SISTEMA MULTIPAR

que para obtener el grado de
Maestro en
Ingeniería En Sistemas Hidráulicos

presenta
Marlyn de León Cárdeas

Tutor: Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa

Jiutepec, Morelos

2020

Paseo Cuaunháhuac No. 8532, Col. Progreso, CP. 62550, Jiutepec, Morelos.
Tel: (777) 329 3600 www.gob.mx/imta



2020
ASOCIACIÓN
LEONA VICARIO
BENEMÉRITA MADRE DE LA PATRIA

F.C5.02.44.1



Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “ESTUDIO SOBRE LA FALLA DE SENSORES DE VELOCIDAD DE UN SISTEMA MULTIPAR”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Marlyn de León Cárdenas

Jiutepec, Morelos. A 13 de agosto del 2020.



Dedicatoria

A José Francisco Osorio Solís

Por toda tu comprensión, amor y por creer en mí siempre.

Agradecimientos:

A Jehová he puesto continuamente delante de mí; porque estando él a mi diestra, permaneceré firme, Salmos 16:8.

Por todos esos momentos en los que me diste la fuerza y toda la paciencia que te pedí para continuar y no morir en el intento.

A mi tutor, Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa, por su apoyo incondicional y las valiosas lecciones que me abrieron los ojos en múltiples ocasiones.

A mi comité tutorial por todas sus recomendaciones y su tiempo:

Dr. Edmundo Pedroza González

M. en C. Gilberto Salgado Maldonado

Dr. J. Sergio Santana Sepúlveda

Dr. Efraín Mateos Farfán

A mis amigos.

"Uno puede devolver un préstamo de oro, pero se está en deuda de por vida con aquellos que son amables."



RESUMEN

La medición del caudal con un Aforador de Tiempo de Travesía (ATT) está referenciado en la (Norma ISO 6416, 2004) y también en la (NMX-AA-179-SCFI, 2017), en ellas se indica una incertidumbre relativa expandida del gasto instantáneo del $\pm 6\%$ con un factor de cobertura igual a 2 y un nivel de confianza de 95, en un arreglo multipar ATT4 (cuatro pares de sensores de velocidad y un sensor de nivel) funcionando apropiadamente. Sin embargo, actualmente no hay estudios que indiquen cuánto se altera la incertidumbre cuando algunos pares de sensores de velocidad fallan.

Por ello en el capítulo I se encuentran las motivaciones de la realización de esta tesis, el propósito principal es determinar la diferencia que existe en una medición con distintos escenarios de fallas en los sensores de velocidad de un ATT4 con respecto al arreglo donde SI funcionan; en el capítulo II se proporciona la normatividad, las recomendaciones del manual de usuario, las técnicas y los métodos para aforar.

En el capítulo III se explica con detalle el procedimiento, en primer lugar se instaló un ATT en un canal rectangular del laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se realizaron varias pruebas siguiendo los requerimientos que se mencionan en el Estándar de Competencia 0914 “*Asesoría en sistemas fijos de medición de gasto para canales*” registrando la información obtenida de la interfaz del equipo con formatos propuestos, después se establecieron 15 escenarios diferentes de falla en los sensores de velocidad para cada par de transductores (falla 1 par, fallan 2 pares y fallan 3 pares). También se agregan resultados de dos estaciones de medición en campo, con un equipo de la misma técnica, que son los canales “Humaya” y “Rosales” pertenecientes al DR010 en Culiacán, Sinaloa.

De acuerdo con las pruebas realizadas y analizando los resultados que se pueden encontrar en el capítulo IV, se observó que, para canales pequeños, existe una gran diferencia en la medición cuando los sensores que se ubican cerca de la superficie libre están fallando y para canales de grandes dimensiones, los sensores ubicados cerca del fondo son los que provocan la misma



diferencia en la medición (aproximadamente un 8% de diferencia con respecto al gasto de referencia).

Finalmente, en el capítulo V, se encuentran las conclusiones en donde se estima que en algunos escenarios con fallas en la medición pueden ser admitidos y como recomendaciones se sugiere realizar más pruebas con canales de diferentes dimensiones para averiguar en qué punto (ya sea en dimensión o en gasto) se presenta la traspuesta de la ubicación del par de sensores que generan la mayor diferencia en la medición del caudal. Además, al final de esta tesis, se incluyen cuatro apéndices: A (formatos y planos), B (cálculo de la incertidumbre expandida), C (álbum fotográfico) y D (resultados completos de las prácticas) que son muy útiles como tutorial para medir con un equipo ATT.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2. JUSTIFICACIÓN	12
1.3. OBJETIVO GENERAL.....	12
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.5. HIPOTESIS.....	12
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	13
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	14
2.1 MEDIDORES DE FLUJO ULTRASÓNICOS DE “TIEMPO DE TRAVESÍA”.....	14
2.1.1. TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD.....	15
2.1.2. SENSOR DE NIVEL.....	17
2.2. FÓRMULA PARA CALCULAR LA VELOCIDAD CON UN ATT.	18
2.3. CONFIGURACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD.....	20
2.4. CONSIDERACIONES PARA LA UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN DE AFORO PARA CONDUCCIONES A SUPERFICIE LIBRE:	21
2.5. DETERMINACIÓN DEL GASTO INSTANTÁNEO DE MUESTREO.	22
2.5.1. MÉTODO DE SECCIÓN INTERMEDIA	23
2.5.2. MÉTODO DE SECCIÓN PROMEDIO	24
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	26
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	26
3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	26
3.3 MÉTODOS Y TÉCNICAS DE AFORO	27
3.3.1 ELECCIÓN DEL MÉTODO Y DE LA TÉCNICA.	27
3.4. PROPUESTA SOBRE LA FALLA EN LOS SENSORES DE VELOCIDAD	27
3.5. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL	29
3.5.1. LABORATORIO.....	29
3.6. CANALES EN CAMPO DEL DR 010	30
3.6.1. CANAL DE RIEGO HUMAYA	32
3.6.2. CANAL DE RIEGO ROSALES	33
3.6. FORMATO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS.....	34
3.7. RELACIÓN DE EQUIPO Y MATERIAL.....	35



3.8. PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA FALLA DE SENSORES DE VELOCIDAD EN UN SISTEMA MULTI-PAR.....	37
CAPITULO IV: RESULTADOS	45
4.1. RESULTADOS EN EL CANAL DEL LABORATORIO.....	45
4.1.1. ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES EN EL CANAL DEL LABORATORIO	50
4.2 RESULTADOS EN EL CANAL HUMAYA.....	53
4.3. RESULTADOS EN EL CANAL ROSALES.....	56
CAPITULO V: CONCLUSIONES	59
5.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS:	59
5.2. CONCLUSIONES GENERALES:.....	61
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
7. BIBLIOGRAFÍA	63
8. ANEXOS	64
8.1. APENDICE A: FORMATOS Y PLANOS.....	64
8.1.2. PLANOS	66
8.2. APENDICE B: EVALUACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES.....	70
8.2.1. INCERTIDUMBRE TIPO A.....	71
8.2.2. INCERTIDUMBRE TIPO B	71
8.2.3. INCERTIDUMBRE $u(y)$ EN LA MEDICIÓN DEL CAUDAL	72
8.2.4. CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE FINAL (Uq).....	73
8.3. APÉNDICE C: ÁLBUM FOTOGRÁFICO.....	81
8.4. APÉNDICE D: MEDICIÓN DEL GASTO EN EL CANAL DE LABORATORIO ENZO LEVI.	88



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Canal rectangular del laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” en el IMTA.</i>	13
<i>Ilustración 2: Canal trapezoidal “HUMAYA” del DR010 en Culiacán, Sinaloa.</i>	13
<i>Ilustración 3: Canal trapezoidal “ROSALES” del DR010 en Culiacán, Sinaloa.</i>	13
<i>Ilustración 4: Equipo ATT instalado en el canal Humaya.</i>	14
<i>Ilustración 5: Sensor de nivel, montado con una base sobre un canal rectangular de laboratorio.</i>	14
<i>Ilustración 6: Transductor comercial de modelo intrusivo tipo “K MFATKx” (1 MHz, para los canales pequeños).</i>	16
<i>Ilustración 7: LED en color verde, sensor de nivel.</i>	17
<i>Ilustración 8: Vista en planta de un canal rectangular, diferencia de tiempo de la trayectoria del pulso ultrasónico.</i>	18
<i>Ilustración 9: Tipos de configuración para trayectorias de los pulsos de ultrasonido.</i>	20
<i>Ilustración 10: Arreglo en "Z" de un sistema multi par de transductores ATT.</i>	20
<i>Ilustración 11: Pantalla del módulo controlador del equipo ATT. Rittmeyer.</i>	22
<i>Ilustración 12: Transición de estado seco a húmedo de un sensor ultrasónico.</i>	22
<i>Ilustración 13: Canal dividido en dovelas con el método de la sección intermedia.</i>	23
<i>Ilustración 14: Canal dividido en dovelas con el método de la sección promedio.</i>	24
<i>Ilustración 15: Diseño de la investigación</i>	26
<i>Ilustración 16: Medición del caudal en conductos hidráulicos.</i>	27
<i>Ilustración 17: Zoom up: Simulación de una señal ultrasónica de un sensor de velocidad.</i>	28
<i>Ilustración 18: Sistema multi par de sensores de velocidad. Ubicación de cada par.</i>	28
<i>Ilustración 19: Relación: La exactitud indica la proximidad de los resultados de la medición con respecto al valor verdadero, mientras que la precisión indica la repetibilidad o reproductibilidad de la medida (GUM, 1995).</i>	28
<i>Ilustración 20: Canal rectangular de pendiente variable (“ancho de 0.60 m”, “altura de 0.70 m y largo de 18 m”).</i>	29
<i>Ilustración 21: Descarga del canal.</i>	29
<i>Ilustración 22: Vista transversal, sensores de velocidad y sensor de nivel montados sobre el canal.</i>	29
<i>Ilustración 23: Sección de aforo.</i>	29
<i>Ilustración 24: Sección de alimentación al canal.</i>	29
<i>Ilustración 25: Mapa del DR 010, Fuente: (Sirio Moreno Armenta, 2018).</i>	30
<i>Ilustración 26: Canal trapezoidal “Humaya” km 5 + 000</i>	32
<i>Ilustración 27: Equipo ATT de la caseta de medición del canal Humaya.</i>	32
<i>Ilustración 28: Puente peatonal km 2+500 del canal Humaya.</i>	32
<i>Ilustración 29: Caseta de la estación de aforo 5+ 000 Humaya.</i>	32
<i>Ilustración 30: Canal principal de forma trapezoidal “Rosales”.</i>	33
<i>Ilustración 31: Caseta de aforo del canal principal "Rosales".</i>	33
<i>Ilustración 32: Canal principal Rosales. Sección trapezoidal.</i>	33
<i>Ilustración 33: Macro localización de la sección de Aforo del canal principal "Rosales".</i>	33
<i>Ilustración 34: Formato para recolección de datos de geometría del canal y ubicación de ATT</i>	34
<i>Ilustración 35: Croquis sencillo del canal en laboratorio.</i>	38
<i>Ilustración 36: Interfaz del equipo ATT. Estado del aforador: en buen funcionamiento.</i>	43
<i>Ilustración 37: Configuración del sistema – Habilitar o desactivar los sensores de velocidad.</i>	43



<i>Ilustración 38: Señal ultrasónica recibida por el transductor cuando el sensor funciona correctamente.</i>	43
<i>Ilustración 39: Señal ultrasónica recibida por el transductor cuando el sensor se encuentra obstruido por basura o lodo.</i>	43
<i>Ilustración 40: Señal ultrasónica recibida por el transductor cuando el sensor es obstruido por burbujas de aire.</i>	43
<i>Ilustración 41: Señal ultrasónica recibida por el transductor cuando el sensor NO funciona.</i>	43
<i>Ilustración 42: Exportación de las lecturas del gasto instantáneo en una medición.</i>	44
<i>Ilustración 43: Gráfica para un gasto de referencia de 65.2 L/s. Dispersión de fallas.</i>	46
<i>Ilustración 44: Gráfica para un gasto de referencia de 63.7 L/s. Dispersión de fallas.</i>	47
<i>Ilustración 45: Gráfica para un gasto de referencia de 37.1 L/s. Dispersión de fallas.</i>	48
<i>Ilustración 46: Gráfica para un gasto de referencia de 14.1 L/s. Dispersión de fallas.</i>	49
<i>Ilustración 47: Gráfica comparativa de los gastos aforados en el canal rectangular del laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” ubicado en el IMTA:</i>	50
<i>Ilustración 48: Gráfica comparativa de los gastos aforados en el canal rectangular del laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” ubicado en el IMTA:</i>	51
<i>Ilustración 49: Representación esquemática: porcentaje de la diferencia en la medición para cada escenario de falla con un gasto de referencia de 65.20 L/s.</i>	52
<i>Ilustración 50: Grafica comparativa de los 15 escenarios de una medición con $Q=61.2$ m³/s.</i>	54
<i>Ilustración 51: Grafica comparativa de los 15 escenarios de una medición con $V_m=1.55$ m/s.</i>	55
<i>Ilustración 52: Grafica comparativa de los 15 escenarios de una medición con $Q=31.7$ m³/s.</i>	57
<i>Ilustración 53: Grafica comparativa de los 15 escenarios de una medición con $V_m=1.36$ m/s.</i>	58
<i>Ilustración 54: Un par de transductores ultrasónicos, no intrusivos, tiempo de travesía, instalados en una tubería de acero de 20” (1MHz).</i>	81
<i>Ilustración 55: Cuatro pares de transductores ultrasónicos, intrusivos, de técnica tiempo de travesía (1MHz).</i>	81
<i>Ilustración 56: Cuatro pares de transductores ultrasónicos, tiempo de travesía. Medición de la longitud del cable.</i>	81
<i>Ilustración 57: Cuatro pares de transductores ultrasónicos, tiempo de travesía, instalados en un canal de vidrio (60x70 cm).</i>	81
<i>Ilustración 58: Medición del gasto en escenario de falla simulado con un transductor cubierto para evitar la salida de la señal ultrasónica.</i>	81
<i>Ilustración 59: Medición del gasto en escenario de falla simulado con un transductor cubierto por burbujas para evitar la salida de la señal ultrasónica.</i>	81
<i>Ilustración 60: Sistema multi-par de transductores ultrasónicos, tiempo de travesía, instalados en un canal de vidrio (60x70 cm).</i>	82
<i>Ilustración 61: Sistema multi par de transductores montados en un arreglo en Z. Vista transversal.</i>	82
<i>Ilustración 62: Revisión de la carga de la fuente de corriente directa con el multímetro.</i>	82
<i>Ilustración 63: Instalación del transductor con nivel y cimbra para tener precisión en la lectura de flujo.</i>	82
<i>Ilustración 64: Instalación de un sistema multi par de transductores ultrasónicos, utilizando el equipo de protección personal adecuado.</i>	82
<i>Ilustración 65: Instalación del cable de comunicación en el modulador del equipo tiempo de travesía.</i>	82



<i>Ilustración 66: Observación del comportamiento del flujo en primera medición, después de haber instalado los transductores.</i>	83
<i>Ilustración 67: Limpieza con brocha para eliminar polvo en el equipo ATT.</i>	83
<i>Ilustración 68: Paso siguiente de la ilustración 12 del Anexo de ilustraciones.</i>	83
<i>Ilustración 69: Equipo automático Tiempo de Travesía, compuesto por sensor de nivel, modulador y controlador. Los cables de comunicación mandan la señal de lectura de los transductores.</i>	83
<i>Ilustración 70: Sensores de nivel instalados en el canal rectangular del laboratorio de hidráulica Enzo Levi, IMTA.</i>	83
<i>Ilustración 71: Canal rectangular de pendiente variable.</i>	84
<i>Ilustración 72: Vista transversal de sensores de nivel apoyados sobre la parte superior del canal con sus propios marcos.</i>	84
<i>Ilustración 73: Canal rectangular de pendiente variable con suministro y descarga de agua.</i>	84
<i>Ilustración 74: Descarga del agua.</i>	84
<i>Ilustración 75: Vista superior del canal del laboratorio de hidráulica en donde se realizaron las mediciones de la presente tesis.</i>	85
<i>Ilustración 76: Suministro del gasto con una bomba por medio de un cuello de ganso.</i>	85
<i>Ilustración 77: Estación de medición en km 5+ 000 del DR 010 Humaya. Culiacán, Sinaloa.</i>	86
<i>Ilustración 78: Sistema automático de medición Tiempo de Travesía con 6 pares de transductores (dos moduladores), todo el conjunto dentro de un gabinete de una estación.</i>	86
<i>Ilustración 79: Fotografía del momento de la medición del gasto con un escenario en donde fallan cinco pares de sensores de velocidad. El celular tiene corriendo un temporizador y la computadora se encuentra descargando la información en tiempo real.</i>	86
<i>Ilustración 80: Transductor de velocidad de 1 Mhz. En la esfera se encuentra el sensor ultrasónico que con el envío de señales calcula la velocidad dentro del sistema del modulador y posteriormente calcula el gasto.</i>	86
<i>Ilustración 81: Canal Humaya, km 5+ 000.</i>	86
<i>Ilustración 82: Gasto de 60 m³/s pasando en el Canal Humaya, km 5+ 000.</i>	86
<i>Ilustración 83: Canal Humaya.</i>	87
<i>Ilustración 84: Estación para aforar el gasto, con técnicas de medición NO fijas como el ATT de barquito, el molinete o sensores ultrasónicos Doppler no invasivos.</i>	87
<i>Ilustración 85: Vista transversal de un canal trapezoidal de campo en donde se encuentra instalado un sistema multi par de transductores Tiempo de Travesía.</i>	87
<i>Ilustración 86: Descarga de la presa Andrew Weiss (la presa fue inaugurada por el presidente de México en 1964, Adolfo López Mateos) en Culiacán Sinaloa.</i>	87
<i>Ilustración 87: Canal “HUAMAYA” perteneciente al DR 010 de CONAGUA, estación 5+000, ubicación: Culiacán, Sinaloa.</i>	87
<i>Ilustración 88: Instalación de un sistema multi par de transductores Tiempo de Travesía en un canal rectangular en campo.</i>	87



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Datos técnicos del transductor/ sensor de velocidad (Rittmeyer A. , 2012).</i>	16
<i>Tabla 2: Datos técnicos del sensor de nivel.</i>	17
<i>Tabla 3: Velocidad del sonido en agua no salina a diferentes temperaturas.</i>	19
<i>Tabla 8: Escenarios propuestos para las mediciones en laboratorio y en canales de campo.</i>	27
<i>Tabla 9: Infraestructura hidráulica del DR010 Fuente: (Sirio Moreno Armenta, 2018).</i>	31
<i>Tabla 10: Datos generales del D.R. 010. Fuente: (Sirio Moreno Armenta, 2018).</i>	31
<i>Tabla 11: Materiales.</i>	35
<i>Tabla 12: Relación de equipo y material básicos para la realización del estudio en los ATT.</i>	36
<i>Tabla 13: Información del canal de laboratorio.</i>	38
<i>Tabla 14: Cálculos para $V_m=18.95$ m/s.</i>	46
<i>Tabla 15: Cálculos para $Q=65.2$ m/s.</i>	46
<i>Tabla 16 : Cálculos para $Q=63.7$ m/s.</i>	47
<i>Tabla 17: Cálculos para $V_m=21.68$ m/s.</i>	47
<i>Tabla 18: Valores para $V_m=11.51$ m/s.</i>	48
<i>Tabla 19: Valores para $Q=37.1$ L/s.</i>	48
<i>Tabla 20: Valores para $V_m= 4.28$ m/s.</i>	49
<i>Tabla 21: Valores para $Q=14.1$ L/s.</i>	49
<i>Tabla 22: Valores para un gasto= 61.2m3s.</i>	53
<i>Tabla 23: Valores para una Velocidad media= 1.55ms.</i>	55
<i>Tabla 24 Valores para un gasto= 31.7m3s.</i>	56
<i>Tabla 25: Valores para una $V_m=1.36$ m3s.</i>	58
<i>Tabla 4: Cálculo estadístico para la medición de un gasto.</i>	74
<i>Tabla 5: Cálculo de la incertidumbre total de una medición de acuerdo con la (Norma ISO 6416, 2004).</i>	74
<i>Tabla 6: Porcentaje de incertidumbres en la medición de la velocidad media en una vertical, debido a la limitación de un número de puntos en la vertical, (Incertidumbres estándar, nivel de confianza aproximadamente 68%, ISO 6416, pág. 48).</i>	75
<i>Tabla 7: Incertidumbre para el ángulo de la trayectoria (ISO 6416, pag5.)</i>	75



INTRODUCCIÓN

La medición es una actividad diaria en la cual se involucran desde grandes organismos hasta individuos que tienen la tarea de cuantificar grandes volúmenes de agua. En México existe alrededor de 200 sistemas fijos de medición automáticos Aforadores de Tiempo de Travesía (ATT) instalados en canales de grandes dimensiones, esto de acuerdo con la publicación: (Estadísticas del Agua en México, CONAGUA, Edición 2011), también se sabe que al utilizar la técnica Tiempo de Travesía se abarcan múltiples ventajas, por ejemplo, menos mano de obra, rapidez, facilidad, almacenamiento de información segura y normalmente se tienen equipos automáticos fijos en puntos estratégicos para contabilizar el agua que se distribuye en ciertas regiones del país; no obstante, se ha comprobado que si bien la información es recibida desde la estación de medición con mucha confiabilidad, es inusual que se estime la existencia de una falla que pueda generar una diferencia significativa en la medición.

Las técnicas de medición en la infraestructura hidráulica irán cambiando continuamente a causa de la disponibilidad de medidores en el mercado, fuentes de error que se experimentan en el campo o para facilitar la instalación del equipo a los usuarios, es ahí donde esta tesis pretende aportar un estudio en la medición con estos equipos, enfocándose a la problemática real sobre la eventual falla de los sensores de velocidad en la técnica ATT. La (NMX-AA-179-SCFI, 2017) acepta una incertidumbre del 6% del gasto circulante, sin embargo, si se presentan fallas en los sensores de velocidad se puede esperar que la incertidumbre se eleve más de lo permitido, actualmente no se conoce el valor de la diferencia de una medición con sus sensores de velocidad fallando y en los manuales del fabricante de estos equipos ATT no se contemplan la incertidumbre que genera dicho escenario.

Para lograr encontrar la diferencia que existe en un escenario de falla se propone un arreglo multipar compuesto por 4 pares de transductores ultrasónicos de un equipo ATT instalado en un canal que conduce un flujo Q (L/s), se programa una medición, mientras el equipo registra la información del estatus actual del flujo, se presenta una falla en los sensores de velocidad que, se encuentra afectando al registro de información. Una vez realizada la medición, se pretende utilizar los resultados, aun cuando se haya calculado el gasto mientras alguno de sus sensores de velocidad estuviera fallando. Los transductores del equipo ATT son fáciles de programar y recopilan más rápidamente los datos de



velocidad que los instrumentos de medición de corriente tradicionales. Los sensores ultrasónicos utilizan energía eléctrica y un transductor cerámico para emitir y recibir energía mecánica en forma de ondas sonoras. Las ondas sonoras viajan a través del líquido, para medir y calcular la distancia desde el sensor hasta un objetivo especificado, van por encima de 2000 kHz, más allá del alcance de la audición humana; cualquier interferencia en el trayecto de las ondas a la que el sensor ultrasónico es receptivo, puede generar una diferencia en el cálculo de la velocidad, esto incluye ruidos agudos tales como la obstrucción en alguna de las esferas del sensor (obstrucción por basura, hojas, maleza o bien por burbujas de aire generadas por las altas velocidades del flujo), falla en algún cable de comunicación, desconexión de alguno de los transductores, la fluctuación de la temperatura, entre otras fallas. La precisión y confiabilidad de los sensores no se han probado rigurosamente y los protocolos formales para las mediciones con fallas en los sensores de velocidad no se han desarrollado. Por lo tanto, se realiza el presente estudio en donde es necesaria una comparación de las velocidades medidas con fallas en los sensores contra una medición de referencia que represente la medición “sin falla”.

Los estudios de este trabajo fueron llevados a cabo en el laboratorio de Hidráulica “Enzo Levi” del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en donde se desarrolló una metodología para mejorar la precisión en la medición con un ATT, dedicados particularmente para canales en campo. Para la instalación de los transductores se montó un arreglo de cuatro trayectorias en Z sobre las paredes del canal. El sensor de nivel está instalado en la parte superior del canal a una altura de 80 cm desde el fondo del canal. Para complementar este análisis se realizaron mediciones en dos canales de riego de grandes dimensiones (Humaya y Rosales), en el Distrito de Riego 010 de la Ciudad de Culiacán.



CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con la (Norma ISO 6416, 2004) y (NMX-AA-179-SCFI, 2017), cuando se tiene un sistema con 4 pares de sensores de velocidad y un sensor de nivel que funciona correctamente se tiene la mayor precisión, mientras se mantenga una incertidumbre de $\pm 6\%$ (factor de cobertura de 2 y un nivel de confianza de 95%) se consideran los resultados en la medición, eventualmente se presentan pérdidas de la señal de cierto número de pares de sensores en los de transductores del equipo ATT, en los manuales del fabricante del equipo no indica la forma en que esto afecta el valor del gasto calculado ni mucho menos la forma de corregirlo. Esto puede originar que la incertidumbre en la medición del gasto sobrepase lo que mencionan las normas al grado de descartar la medición. Este problema es real, y se puede resolver con experimentación en el laboratorio de hidráulica, por lo que se plantea la siguiente hipótesis, “cuando un sensor de velocidad falla, existe una diferencia del valor medido al valor de referencia, por lo tanto, debe existir un orden de diferencia correspondiente al número de pares de sensores fallando”. Si esto ocurre, ¿de qué orden será diferencia en la medición?

La condición de referencia de los cuatro pares de sensores es afectada cuando alguna de las siguientes causas se presenta durante la lectura de la medición:

- Obstrucción de las esferas del transductor por plantas, basura o lodo.
- Obstrucción de la emisión de pulsos ultrasónicos por burbujas de aire.
- Falla en la señal de comunicación de un transductor dirigida a la unidad electrónica.
- Cualquier evento o fenómeno que altere el cálculo de la velocidad del flujo y por ende el cálculo del caudal (*ver Ilustración 38 e Ilustración 40*)

Si bien se puede estimar la diferencia que cualquiera de los sucesos antes mencionados pueda causar, no hay estudios previos para partir de una referencia, y de acuerdo con los manuales de estos equipos, toda incertidumbre está evaluada con las normas antes mencionadas, únicamente, con los sensores funcionando correctamente. La motivación principal de este trabajo es verificar los equipos ATT, lo que conlleva a experimentar con pruebas en canales en el laboratorio de hidráulica, en donde se crean los escenarios de falla para poder resolver la incógnita del “orden de diferencia” en las mediciones. Si se conoce la diferencia de medición cuando un sensor falla, se puede crear una técnica para “corregir” el equipo de medición y por lo tanto disminuir la incertidumbre.



1.2. JUSTIFICACIÓN

El propósito de esta tesis es tener una referencia experimental a nivel de laboratorio y a nivel de campo, de las diferencias obtenidas en velocidad y gasto para los usuarios que tengan instalados en sus canales aforadores tiempo de travesía. Por ejemplo, en los módulos de riego de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la mejor condición de operación es cuando contabilizan todo el volumen de agua que entregan (medir el gasto sin interrupción durante cada ciclo agrícola), en esta ocasión, el escenario de referencia ocurre cuando los cuatro pares de transductores de un equipo ATT funcionan de acuerdo con la normatividad y con el manual de usuario, pero en circunstancias reales algunos sensores pueden fallar (tal y como se planteó en la problemática capítulo 1.1), para mantener las condiciones deseadas, detener la lectura de datos en campo no es una opción, entonces, se propone conocer el orden de la incertidumbre en la medición respecto a la condición de referencia.

Actualmente no hay estudios sobre criterios de corrección para estimar y corregir la diferencia entre la condición de falla y la condición de referencia. Esta investigación utilizó un equipo ultrasónico “tiempo de travesía” para la búsqueda del valor de la diferencia mediante la medición del gasto en tres canales con diferentes escenarios de falla en los sensores de velocidad.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Determinar la diferencia que existe en una medición con distintos escenarios de fallas en los sensores de velocidad de un ATT con respecto al arreglo donde funcionan los cuatro pares de sensores de velocidad.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer escenarios de falla en los sensores de velocidad que puedan generar una diferencia considerable en la medición.
- Encontrar el *orden* de falla en la medición.
- Verificar si el comportamiento de falla es similar en diferentes canales de riego.
- Proponer criterios de corrección.
- Aportar una metodología que pueda servir para el estudio de la medición del gasto en canales.

1.5. HIPOTESIS

- La diferencia en la medición, entre la condición de referencia y las condiciones de falla, dependen de la posición y el número de pares que fallan.



1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio abarca una gran variedad de condiciones de falla en los sensores de velocidad de un ATT, las mediciones del gasto se realizaron en el laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” (IMTA), en un canal rectangular de pendiente variable, en donde se tiene instalado un medidor con cuatro pares de transductores (ATT4). Las pruebas realizadas en el canal del laboratorio tienen como limitante el tamaño (0.60 m de ancho, 0.70 m de alto y 18 m de largo, ver Ilustración 1), sin embargo, posteriormente se realizaron pruebas en los canales del Distrito de Riego 010, en el canal “Humaya (Ilustración 2)” y “Rosales (Ilustración 3)” ubicados en Culiacán, Sinaloa, en ellos se tienen estaciones de aforo utilizando equipos ultrasónicos con la misma técnica de medición con la que trabaja la presente tesis.

Debido a que en campo las demandas varían constantemente, las mediciones se limitan a la metodología planteada en laboratorio y se realizaron mediciones de referencia para cada escenario de falla. Además, el período de tiempo de recolección de la información es menor que en el laboratorio.



Ilustración 1: Canal rectangular del laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” en el IMTA.

Ilustración 2: Canal trapezoidal “HUMAYA” del DR010 en Culiacán, Sinaloa.

Ilustración 3: Canal trapezoidal “ROSALES” del DR010 en Culiacán, Sinaloa.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 MEDIDORES DE FLUJO ULTRASÓNICOS DE “TIEMPO DE TRAVESÍA”.

Los Aforadores Tiempo de Travesía son dispositivos ultrasónicos que utilizan vibraciones acústicas para medir la velocidad de líquido. Para evitar errores en la medición, es importante saber qué medidor de flujo usar para su aplicación. Para esta tesis se trabajó:

- En canales a superficie libre.
- Con el método de área-velocidad.
- Con gastos que van desde los 11 L/s hasta 65 m³/s,

Por lo tanto, se optó por usar los componentes de un ATT de la marca comercial de Rittmeyer (ver *ilustración 4*), el modelo del equipo consta con:

1. Un controlador, este se debe conectar por medio de un cable Ethernet a un equipo PC portátil para configurar el sistema a través de un navegador web común (Dirección IP: 192.168.1.10).
2. Un modulador (se puede usar hasta 2 para configuraciones mayores a 4 pares de transductores)
3. Cuatro pares de transductores ultrasónicos intrusivos (8 piezas), ver *Ilustración 5*.
4. Cables de comunicación para cada uno de los transductores.
5. Cable de comunicación Ethernet.
6. Cable de conexión a una fuente de energía.
7. Fuente de alimentación de corriente (normalmente en campo se utiliza una Fuente de Corriente Continua, una batería de gran capacidad como las que usan los automóviles).
8. Transformadores de energía (para procurar no dañar el equipo electrónico, superando las cargas de energía permitida en cada accesorio, normalmente no admiten más de 12 V).
9. Un sensor de nivel, ver *Ilustración 5*.



Ilustración 4: Equipo ATT instalado en el canal Humaya.



Ilustración 5: Sensor de nivel, montado con una base sobre un canal rectangular de laboratorio.



Cabe aclarar que los elementos necesarios para realizar una medición del gasto en el canal, están descritos en la enumeración anterior, sin embargo, existen más accesorios comerciales que pueden brindar mayor facilidad, comodidad y seguridad.

La técnica de aforo “tiempo de travesía” consta de por lo menos un par de transductores, en cada transductor viene incluido un sensor de velocidad, el principio de la técnica se basa en que a partir de que se encuentran instalados en un canal emiten y reciben impulsos ultrasónicos simultáneamente, a través del líquido que pasa en la sección transversal del canal, a caudal “cero”, ambos sensores reciben las ondas transmitidas al mismo tiempo, pero cuando el líquido está en circulación, la trayectoria que posee menor velocidad absoluta es la que viaja hacia aguas arriba, en comparación a un pulso que viaje hacia aguas abajo. Si la distancia entre ambos transductores es conocida, la diferencia de tiempos de tránsito de la señal, multiplicada por una constante (velocidad del sonido/ángulo entre la trayectoria de la señal y la dirección del flujo) es proporcional a la velocidad del fluido. El área hidráulica se conoce a través del tirante de agua proporcionado por el sensor de nivel (ver *Ilustración 5*) y tomando las medidas geométricas del canal y finalmente se calcula el gasto por el método área-velocidad ($Q = V * A$).

2.1.1. TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD.

En el mercado existen diferentes marcas y modelos de transductores de velocidad, cada uno con sus características (tamaño, material, peso, y alcance de la señal entre transductores). Por ejemplo, en la *Ilustración 6*, se muestra el transductor que se empleó en este trabajo de tesis. De acuerdo con el manual de usuario (Rittmeyer A. , 2012), este modelo de transductor puede servir como transmisor o receptor alternativamente, estos llevan a cabo la medición con muy poca restricción en la anchura del canal y por lo tanto, casi no existan pérdidas de carga. La manera en la que operan los sensores de velocidad es a través de una sobretensión que provoca el oscilador (ver *Ilustración 6*). Los pulsos de sonido ultrasónico se propagan a través del transductor emisor y en todo el medio. En el lado opuesto del canal, los pulsos de sonido son recibidos, convertidos en una señal eléctrica y procesada por el modulador y el controlador del equipo (ver *ilustración 4*). Para posteriormente ser calculada la velocidad del flujo circulante. Dada la frecuencia de operación, los transductores se pueden colocar hasta una distancia máxima del módulo de tiempo de tránsito ultrasónico de 300 m.

El líquido que circule a través de la sección de aforo tiene que ser transparente para el sonido ultrasónico, es decir, no debe contener una alta concentración de partículas, burbujas de aire arrastradas o sedimentos, no deben producirse flujos estratificados, además, la temperatura y / o gradiente de salinidad (si están presentes), deben estar dentro de límites aceptables. La alta precisión está garantizada por la independencia de parámetros como temperatura, presión o conductividad eléctrica.

Como recomendación al instalar los transductores, se debe cuidar que el ángulo α entre la trayectoria sónica y la dirección del flujo deba ser preferiblemente de 45° . En caso de que el canal sea de forma rectangular, se admite un ángulo α entre 35° a 70° , pero sabiéndose que la precisión en la lectura disminuirá.

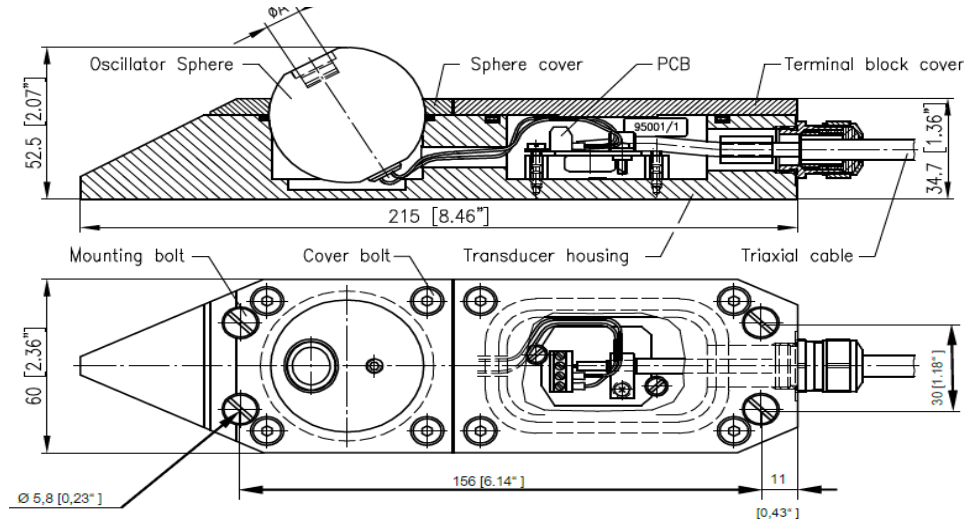


Ilustración 6: Transductor comercial de modelo intrusivo tipo “K MFATKx” (1 MHz, para los canales pequeños).

Normalmente los transductores intrusivos pueden ser empleados en diferentes geometrías de canales (rectangular, trapezoidal, circular) y en túneles de presión. Para la instalación y servicio de mantenimiento de estos sensores, es indispensable que los canales sean desaguados.

Tabla 1: Datos técnicos del transductor/ sensor de velocidad (Rittmeyer A. , 2012).

DATOS TÉCNICOS	
Clase de protección:	IP 68 (NEMA 6) Sumergible
Longitud mínima de ruta MFATK1:	0.25 m (Montaje empotrado)
Longitud máxima de ruta MFATK1:	3 m
Longitud mínima de ruta MFATK2:	1 m
Longitud máxima de ruta MFATK2:	15 m
Material de la esfera:	PVC gris
Material de la carcasa del sensor:	Acero inoxidable 361L
Material de la cubierta:	Acero inoxidable 361L
Máx. presión permitida:	10 bar/145 PSI
Temperatura de funcionamiento:	-30°C hasta 70°C/-22°F hasta 158°F
Humedad:	100%
Peso:	Aprox. 4.5 kg por par

2.1.2. SENSOR DE NIVEL

El sensor de nivel es otro tipo de transductor ultrasónico utilizado para determinar el nivel del fluido, a través de las secciones transversales ya sea en canales abiertos o cerrados. El manual de usuario del dispositivo utilizado en esta tesis (Rittmeyer Ultrasonic Level transducer, 2007), incluye en su interior un sensor de compensación de temperatura para garantizar indicaciones precisas de nivel en todo el rango de temperatura. En la *Ilustración 7* se puede apreciar que, la LED en color verde indica que, una vez realizada la calibración, el sensor de nivel funciona correctamente. Una vez instalado, los pulsos ultrasónicos que emanan del transductor están dirigidos a una superficie objetivo. Después de filtrar cualquier ruido presente, el tiempo necesario para que los pulsos reflejados golpeen la superficie del sensor se convierten en mediciones lineales y se transmiten al indicador / registrador remoto como un valor actual. Cada marca comercial tiene su propia configuración, pero en todo sensor de nivel se debe configurar el nivel mínimo “cero” y el nivel máximo “y” en el canal.



Ilustración 7: LED en color verde, sensor de nivel.

Tabla 2: Datos técnicos del sensor de nivel.

DATOS TÉCNICOS	
Rango:	250 mm / 9.8 in. A 6 m / 19.7 ft. En líquidos a 23 ° C / 73.4°F.
Salida de corriente:	De 4-20 mA directa o inversamente proporcional.
Precisión:	Mejor o igual a + -0.25% de alcance máximo a temperatura constante.
Resolución:	3 mm /0.12 in.
Ajuste de punto:	Por llave magnética, almacenamiento no volátil.
Indicación de estado:	Dos LED visibles.
Corriente de falla:	22 mA.
Carga de bucle:	$R_{max} = \frac{V_{supply} - 17}{22} k\Omega$
Ángulo de haz:	7 a -3 dB Límite
Frecuencia:	55 kHz a 60 kHz
Temperatura de almacenamiento:	-40 ° C / -40°F a 80 ° C / 176 F
Temperatura de funcionamiento:	-20 °C / -4 ° F a 60 ° C / 140 ° F
Clasificación del gabinete:	IP68 sumergible
Masa (aprox.):	1 kg /2.2 lb incluyendo integral de 7 m / 23 ft. Cabina 95 mm / 3.74 in.
Dimensiones:	Diámetro: 95 mm/3.74 in Longitud total: 122 mm / 4.80 in
Detalles de la carcasa:	ABS resistente a los rayos UV y nariz de Tefzel
Tensión de alimentación:	17 V a 30 V CC (máx.)
Certificaciones:	EEx ia IIC T6 (Tamb = -20 ° C a 60 ° C); IA No: SABS S / S828 X; IEC801-3 / EN55011.

2.2. FÓRMULA PARA CALCULAR LA VELOCIDAD CON UN ATT.

El principio de la técnica de tiempo de tránsito, consiste en determinar la velocidad del flujo por medio del sonido ultrasónico. Los pulsos ultrasónicos se envían aguas arriba y aguas abajo a través del flujo con un θ ángulo entre la dirección del flujo y la trayectoria sónica, estos se convierten en una señal eléctrica procesada por el equipo electrónico ATT. La medición se lleva a cabo con muy poca restricción de la anchura del canal abierto y por lo tanto casi no existen pérdidas de carga.

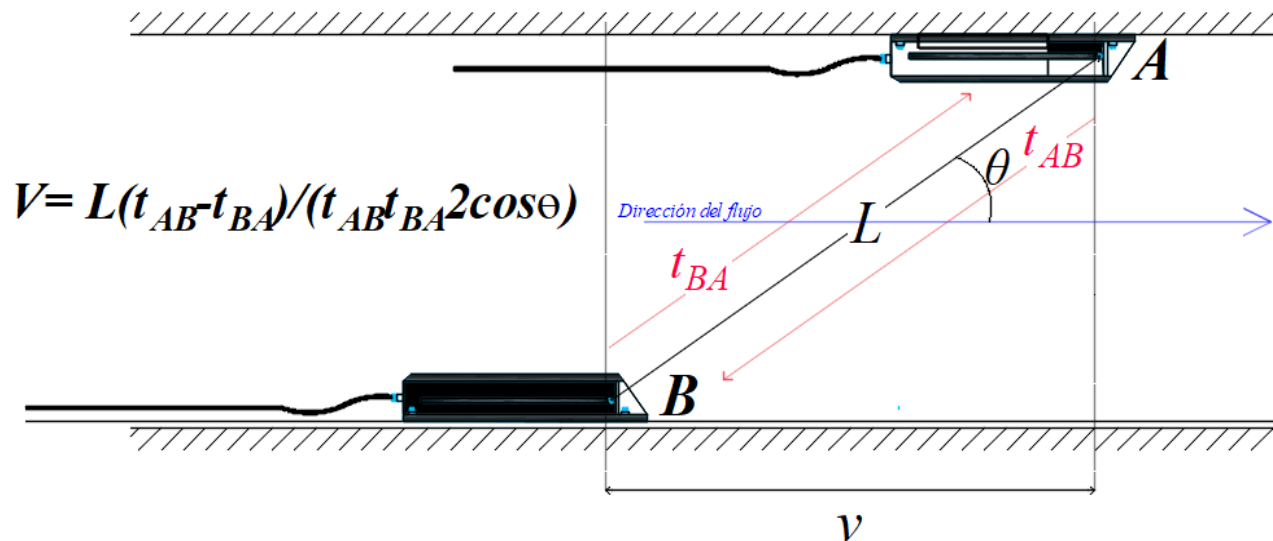


Ilustración 8: Vista en planta de un canal rectangular, diferencia de tiempo de la trayectoria del pulso ultrasónico.

$$t_{AB} = \frac{L}{c - V \cos \theta} \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$t_{BA} = \frac{L}{c + V \cos \theta} \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$V = \frac{L(t_{AB} - t_{BA})}{t_{AB} t_{BA} 2 \cos \theta} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

“ t_{AB} ”, es el tiempo de tránsito del transductor A al B, en segundos (s);

“ t_{BA} ”, es el tiempo de tránsito del transductor B al A, en segundos (s);

“ L ”, es la longitud del trayecto (distancia entre el transductor A y el transductor B), en metros (m);

“ θ ”, es el ángulo entre la trayectoria del pulso ultrasónico y la dirección del flujo, en grados ($^{\circ}$);

“ v ”, es la distancia longitudinal entre el transductor A y el B, en metros (m);



“ V ”, es la velocidad media axial que lleva el agua a través del canal, en metros por segundo (m/s).

“ c ”, es la velocidad con la que viaja el sonido en el agua, en metros por segundo (m/s); sobre el rango normal de temperatura ambiente, la velocidad del sonido en agua dulce varía de aproximadamente 1400 m / s a poco más de 1 500 m / s. En la (Norma ISO 6416, 2004) se puede encontrar algunos valores de la velocidad del sonido en relación a la temperatura si se trabaja con agua no salina, ver

Tabla 3.

Tabla 3: Velocidad del sonido en agua no salina a diferentes temperaturas.

Temperatura C°	Velocidad del sonido (aprox.) m/s
0	1 402
10	1 447
20	1 482
30	1 509
40	1 529

Además de la temperatura, la velocidad del sonido es dependiente de salinidad y presión del agua. En canales abiertos, el efecto de la presión es insignificante; entonces, la velocidad del sonido “ c ” en el agua viene dada por la Ec. 4:

$$c = 1402.4 + 5.01T - 0.0551T^2 + 0.00022 T^3 + 1.33S + 0.00013S^2 - 0.013 TS + 0.0001T^2S + 0.016d \quad [\text{Ec. 4}]$$

Dónde:

c , es la velocidad del sonido en el agua, en metros por segundo (m/s);

T , es la temperatura del agua, en grados Celsius (°C);

S , es la salinidad del agua, en gramos de sal por litro de agua (g/L);

d , es la profundidad del agua, en metros (m).

2.3. CONFIGURACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES DE VELOCIDAD.

Un medidor de flujo ultrasónico tiene tres configuraciones posibles para montar los transductores: Z, V y W. En la **Ilustración 9** se pueden observar los tres tipos de configuraciones, la salida producida por los transductores se convierte en una señal de corriente. La configuración preferida está determinada por factores tales como: tamaño del canal, espacio disponible para el montaje de los transductores, características del líquido que fluye, de las condiciones aguas arriba y aguas abajo, y del nivel de incertidumbre deseado.

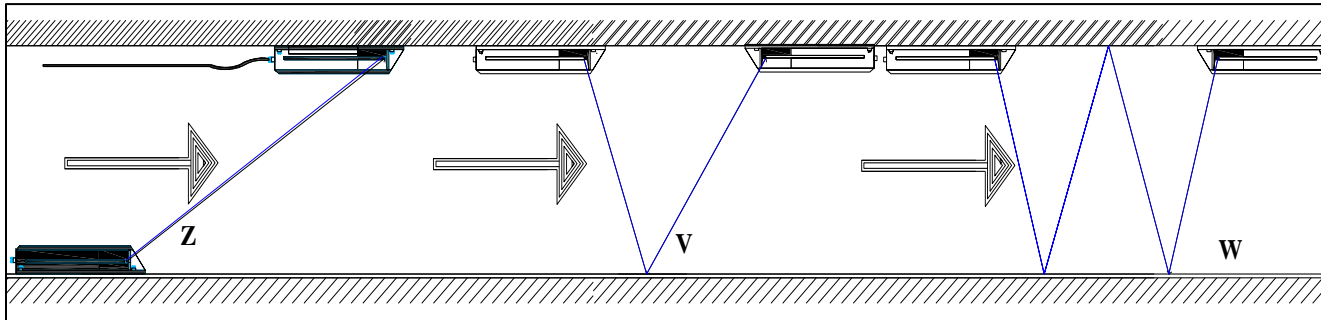


Ilustración 9: Tipos de configuración para trayectorias de los pulsos de ultrasonido.

En general, los transductores se deben instalar en una sección que cumpla por lo menos con las siguientes características: las líneas de flujo deben ser uniformes, la sección transversal del conducto debe ser de una forma geométrica definida (si es posible de sección transversal constante), el fondo del canal debe ser estable (se recomienda que la sección esté revestida). De acuerdo con la (NMX-AA-179-SCFI, 2017), se recomienda que en la sección de medición exista aguas arriba un tramo recto de 5 a 10 veces el ancho del canal, y aguas abajo de 1 a 2 veces. Las secciones donde existan remolinos o una fuerte turbulencia deben descartarse.

Para las mediciones realizadas en este trabajo de tesis se instalaron los cuatro pares de transductores (cuatro trayectorias) en un arreglo “Z”. El sensor de nivel está instalado en la parte superior del canal. La colocación de los transductores juega un papel muy importante, debido a que son los que realizan la lectura y capturan toda la información.

En la **ilustración 10**, se muestra una configuración típica de un ATT, es un arreglo de trayectoria en “Z” (canal rectangular, vista de perfil).

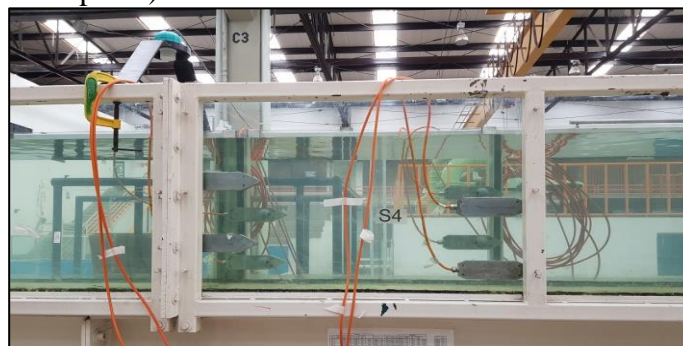


Ilustración 10: Arreglo en "Z" de un sistema multi par de transductores ATT.



2.4. CONSIDERACIONES PARA LA UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN DE AFORO PARA CONDUCCIONES A SUPERFICIE LIBRE:

El paso más importante, es la elección del lugar de aforo cuando se trabaja con un sistema de medición fijo como el ATT, para garantizar que no existan nuevas incertidumbres en las mediciones que se realizan posteriormente a la instalación. A continuación, se presenta un resumen para elegir la sección de aforo en el canal del laboratorio de hidráulica, cabe aclarar que para los canales en campo ya se tenían estaciones de aforo fijas, por lo que el procedimiento para realizar una medición solo considera la validación del funcionamiento de la instalación del equipo en el campo (basado en el Estándar de Competencia 0914).

Los requerimientos principales fueron tomados de la (NMX-AA-179-SCFI, 2017), en donde establece que para una sección de aforo se debe considerar:

a) contar con un tramo recto de canal de al menos 10 veces el ancho de la superficie libre del agua del sitio de medición;

b) para los aforadores de cambio de régimen la velocidad del gasto debe ser en régimen subcrítico con un número de Froude menor a 0,6, en el caso de los aforadores ultrasónicos a superficie el régimen de gasto es recomendable que sea subcrítico, y con una velocidad media menor a 4 m/s; cuando la instalación del aforador de cambio de régimen sea para un gasto instantáneo de muestreo mayor a cien litros por segundo ($q_n \geq 0,1 \frac{m^3}{s}$), o las características del sitio de instalación del sistema de medición presente un número de Froude mayor a 0.6 ($Fr > 0,6$), o su velocidad equivalente o que su instalación produzca un desbordamiento del canal, se debe seleccionar un aforador ultrasónico, en el caso de la presente tesis un Aforador de tiempo de travesía. Para su instalación, el canal debe tener un ancho de más de 6 m, una profundidad media mayor a 1,5 m y una velocidad del agua máxima menor a 4 m/s.

c) el fondo del canal debe ser uniforme, sin variaciones respecto a su sección transversal y su pendiente longitudinal;

d) el tramo de ubicación del sitio de medición de gasto debe ser estable y debe perdurar su configuración geométrica extraordinaria a lo largo del tiempo;

e) el fondo del canal debe tener una rugosidad uniforme y que no presente boleos más grandes a 1/20 veces el tirante, que induzcan gastos secundarios, antes o después del sitio de medición;

f) el sitio de medición debe mantenerse libre de vegetación, pero cuidando que la erosión no cambie la forma de la sección transversal;

g) las paredes de la sección deben ser lo más vertical posible, en función del material con que están construidas, a fin de asegurar que sea estable la sección de medición;

h) se requiere que no existan estructuras de control aguas abajo del sitio de aforo, que produzcan remansos.

2.5. DETERMINACIÓN DEL GASTO INSTANTÁNEO DE MUESTREO.

Una vez instalado el ATT, en la pantalla LED del controlador se muestran los datos calculados más relevantes como el gasto instantáneo de muestreo, la velocidad media, la temperatura del agua, el volumen totalizado, el tirante de la sección transversa (ver *Ilustración 11*); para el cálculo del gasto se siguen las recomendaciones de la (ISO 748, 1997), debido a que en esta tesis se trabajó con el método Área-velocidad; además de acuerdo con el manual de usuario del equipo (Risonic, 2012), la instalación de los sensores debe conformar un dovelado en la sección de aforo. Para la integración del gasto en las dovelas se pueden emplear dos técnicas de cálculo: el método de sección intermedia y el método de sección promedio como se explica más adelante en *los capítulos 2.5.1 y 2.5.2*.



Ilustración 11: Pantalla del módulo controlador del equipo ATT. Rittmeyer.

Un dato interesante que se encontró en el manual de usuario del equipo (Risonic, 2012) es que en la transición entre los métodos de cálculo individuales (el cálculo del gasto en cada dovela, es decir por cada par de transductores), se pondera si las trayectorias cambian de una mojada a un estado no húmedo (aparentemente, cuando no pasa el flujo a través de los sensores de velocidad el equipo desactiva el par correspondiente, un ejemplo claro en la *Ilustración 12*), pero de acuerdo con la (ISO 748, 1997) y la (Norma ISO 6416, 2004) en la evaluación de las incertidumbres dicha compensación afectará dependiendo del número de pares de sensores perdidos.



Ilustración 12: Transición de estado seco a húmedo de un sensor ultrasónico.

2.5.1. MÉTODO DE SECCIÓN INTERMEDIA

Para calcular el gasto con el método de la sección intermedia (NMX-AA-179-SCFI, 2017), se tienen cinco dovelas, la trayectoria de cada par de sensores define la velocidad media de la dovela. Cada dovela está situada en el centro entre dos líneas, que son las trayectorias de los pares de sensores adyacentes tanto arriba como abajo del arreglo. El ancho de la dovela debe ser el ancho del canal en la elevación de la trayectoria (*Ilustración 13*). Con base a este arreglo se distinguen tres tipos de dovela:

a) dovela de fondo (ver la dovela 0 “cero” en la *Ilustración 13*), limitada en la parte inferior por la plantilla (fondo del canal) y en la parte superior por la línea imaginaria que pasa en el medio entre la primera trayectoria activa (H_1) y la plantilla;

b) dovela superior (con altura H_5), limitada en la parte superior por la superficie libre del agua y en la parte inferior por la línea imaginaria que pasa en el medio entre la última trayectoria activa (H_4) y la trayectoria inmediata inferior a ésta (H_3);

c) dovelas intermedias, son las dovelas ubicadas entre la dovela superior y la dovela de fondo.

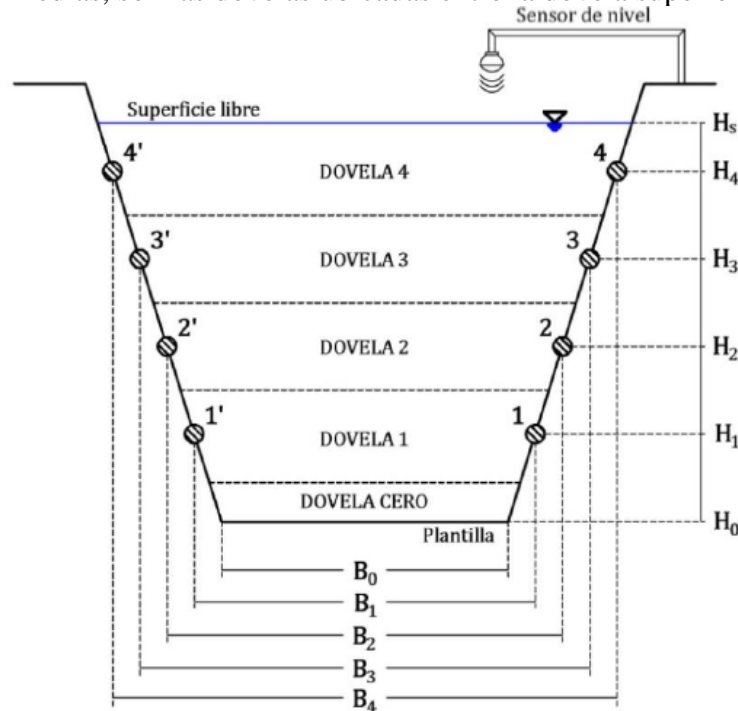


Ilustración 13: Canal dividido en dovelas con el método de la sección intermedia.

El gasto instantáneo de muestreo q_n para el método de la sección intermedia con J trayectorias es:

$$q_n = \frac{1}{2} v_1 k_0 (H_1 - H_0) B + v_J \left[H_s - \frac{1}{2} (H_J + H_{J-1}) \right] B + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{J-1} v_j (H_{j+1} - H_{j-1}) B \quad [\text{Ec. 5}]$$



DONDE:

B_J , es el ancho del canal en la elevación de la trayectoria J , (para canales rectangulares B es constante).

H_J , es la altura de cada par de sensores.

H_S , es la altura de la superficie libre con respecto a una línea arbitraria.

J , es el número de la trayectoria dada por la ubicación del par de sensores;

k_0 , es un factor de corrección del fondo cuyo valor oscila entre 0,4 y 0,8.

v_J , es la velocidad del agua dada por la trayectoria J .

2.5.2. MÉTODO DE SECCIÓN PROMEDIO

Para calcular el gasto con el método de la sección promedio (NMX-AA-179-SCFI, 2017), la velocidad media de cada dovela se define como el promedio de las velocidades medidas por dos pares de sensores. Las trayectorias de cada par de sensores representan los límites de cada dovela (*Ilustración 14*). Con base a este arreglo se distinguen tres tipos de dovela:

- dovela de fondo (ver la dovela 0 en la *Ilustración 13*), limitada en la parte inferior por la plantilla (fondo del canal) y en la parte superior por la trayectoria del primer par de sensores activos (H_1).
- dovela superior (Ver la Dovela 4 en la *Ilustración 14*), limitada en la parte superior por la superficie libre del agua y en la parte inferior por la trayectoria del último par de sensores activos;
- dovelas intermedias, son las dovelas ubicadas entre la dovela superior y la dovela de fondo.

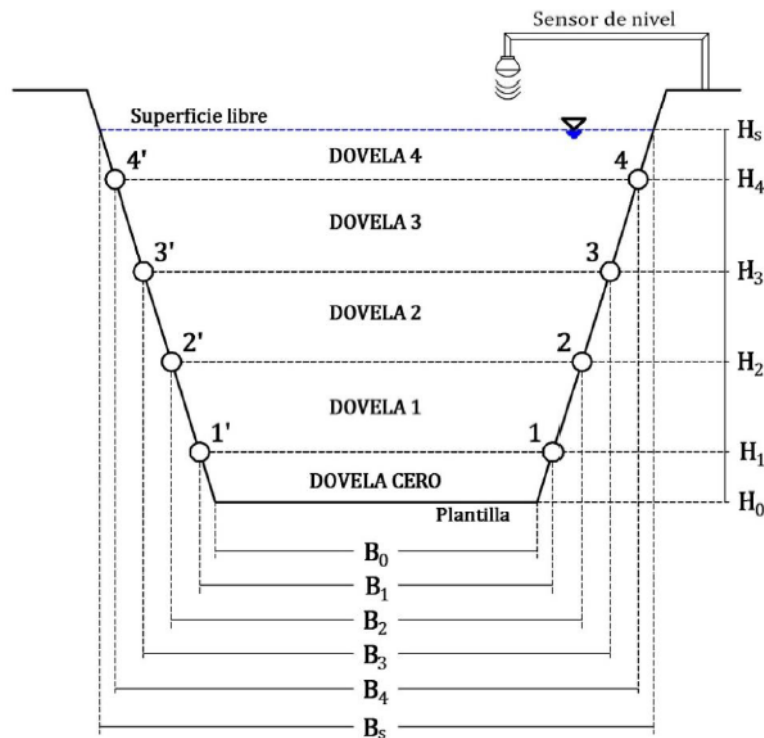


Ilustración 14: Canal dividido en dovelas con el método de la sección promedio.



El gasto instantáneo de muestreo q_n para el método de la sección intermedia con J trayectorias es:

$$q_n = q_0 + q_s + \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{J-1} (v_{j+1} + v_j)(H_{j+1} - H_j)(B_{j+1} + B_j) \quad [\text{Ec. 6}]$$

Siendo:

$$q_0 = \frac{1}{4} v_1 (1 + k_0)(H_1 - H_0)(B_1 + B_0) \quad [\text{Ec. 7}]$$

$$q_s = \frac{l}{4(I+k_s)} [(k_s v_s + v_j)(H_s - H_j)(B_s + B_j)] \quad [\text{Ec. 8}]$$

Y con:

$$v_s = v_j + \frac{H_s - H_j}{H_j - H_{j-1}} (v_j - v_{j-1}) k_s \quad [\text{Ec. 9}]$$

DONDE:

B_j , es el ancho del canal en la elevación de la trayectoria J , (para canales rectangulares B es constante).
(ver *Ilustración 14*)

H , es la altura;

J , es el número de la trayectoria dada por la ubicación del par de sensores;

k_s , es un factor multiplicativo entre 1 y 0;

k_0 , es un factor de corrección del fondo cuyo valor oscila entre 0,4 y 0,8;

q_s , es el gasto que pasa por la dovela superior:

q_0 , es el gasto que pasa a través de la dovela de fondo:

v , es la velocidad del agua dada por la trayectoria J (calculada con $V = \frac{L(t_{AB} - t_{BA})}{t_{AB} t_{BA} 2 \cos \theta}$ [Ec. 3])

en m/s;

v_s , es la velocidad del agua en la dovela superior.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tema trabajado en esta tesis es “la medición ultrasónica del gasto a superficie libre”, con enfoque al campo de la hidráulica, siendo una tesis de aplicación, que utiliza el conocimiento empírico, ya que los datos se obtuvieron con pruebas experimentales en el laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” perteneciente al *IMTA*, además se practicó con una metodología desarrollada en el *capítulo 3.8* para dos canales de riego de grandes dimensiones, para tener una comparativa de resultados y llevar el análisis a una aplicación en campo.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

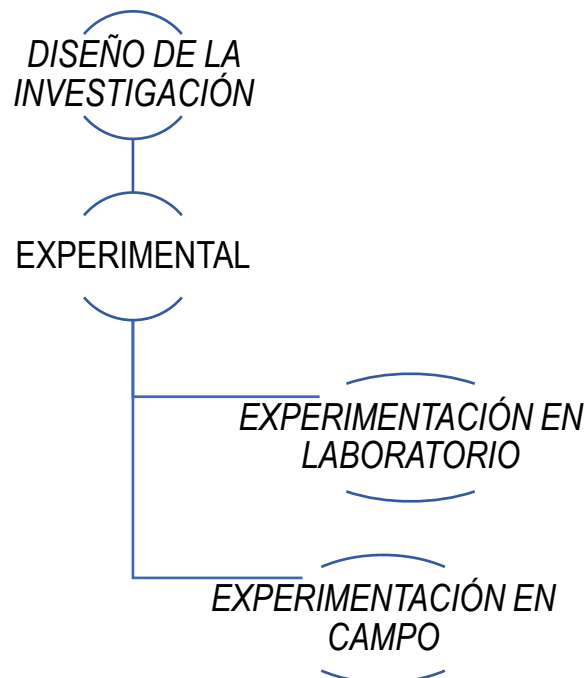


Ilustración 15: Diseño de la investigación

El diseño de este estudio se define a manera descriptiva y experimental. En su inicio parte de la cuestión: ¿qué sucede con la lectura del gasto, cuando ciertos transductores fallan? La investigación pertenece al área de hidrometría, se realiza la medición del gasto en un canal de laboratorio y posteriormente se compara la metodología desarrollada en el *capítulo 3.8* con mediciones en canales en campo.

3.3 MÉTODOS Y TÉCNICAS DE AFORO

3.3.1 ELECCIÓN DEL MÉTODO Y DE LA TÉCNICA.

Según la guía técnica de (Serge Tamari & Ariosto Aguilar, 2010), “en la práctica, son pocos los métodos de aforo, pero grande la diversidad de técnicas de aforo”; esto debido a que un mismo método puede aplicarse con equipos de medición distintos. En esta investigación de tesis se aplica el método de “área-velocidad” para un canal rectangular en laboratorio (con un área hidráulica máxima de 0.30 m^2), y dos canales de campo para el riego en sectores agrícolas (“Humaya” con un Área hidráulica de 46 m^2 y “Rosales” con un Área hidráulica de 23.2 m^2) y para el enfoque de esta tesis la técnica a utilizar es un equipo Aforador Tiempo de travesía (ATT).

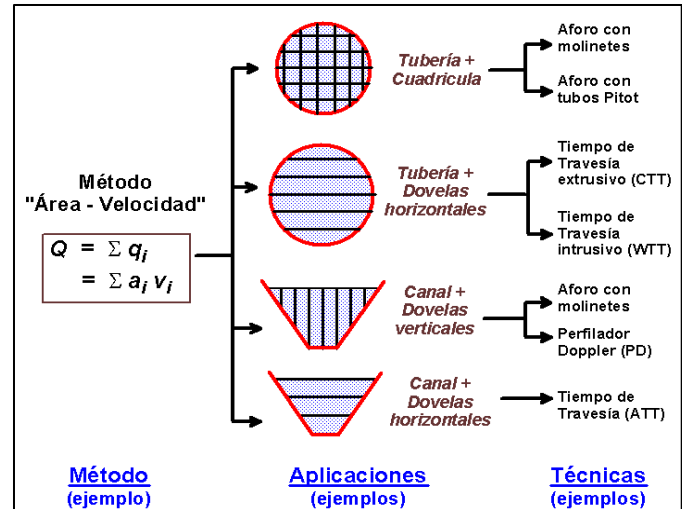


Ilustración 16: Medición del caudal en conductos hidráulicos.
(Serge Tamari & Ariosto Aguilar, 2010).

3.4. PROPUESTA SOBRE LA FALLA EN LOS SENSORES DE VELOCIDAD

Se propusieron 15 diferentes escenarios de medición con el equipo ultrasónico ATT (ver *Tabla 8*), en la instalación del equipo ATT se tomaron en cuenta todas las recomendaciones del manual del usuario del equipo, por lo tanto, para los escenarios propuestos en todas las pruebas realizadas se aseguró que los cuatro pares de sensores de velocidad estén sumergidos.

Tabla 4: Escenarios propuestos para las mediciones en laboratorio y en canales de campo.

	ESCENARIOS PROPUESTOS						
	Escenario 1 (condición ideal)	Escenarios de falla en los sensores de velocidad					
# De pares fallando	Sin falla	Fallando un par	Fallando dos pares	Fallando tres pares	Fallando tres pares	Fallando tres pares	Fallando tres pares
El número indica la ubicación del par (Ver <i>Ilustración 29</i>) que se encuentra desactivado en la medición.	1, 2, 3 y 4	Escenario 2	1	Escenario 6	1 y 2	Escenario 12	2, 3 y 4
		Escenario 3	2	Escenario 7	1 y 3	Escenario 13	1, 3 y 4
		Escenario 4	3	Escenario 8	1 y 4	Escenario 14	1, 2 y 4
		Escenario 5	4	Escenario 9	2 y 3	Escenario 15	1, 2 y 3
				Escenario 10	2 y 4		
				Escenario 11	3 y 4		

NOTA: En total son 15 escenarios diferentes de pruebas. Se tienen 14 escenarios de "falla" en las mediciones del gasto y uno para ser asignado como el de referencia. Este será repetitivo e intercalado en cada escenario de falla.



El primer escenario es la medición establecida como la condición de referencia, cada prueba iniciará con la condición de referencia (en donde los cuatro sensores funcionan correctamente), posteriormente se realizaron una serie de pruebas continuas, repitiendo los escenarios de la **Tabla 8** para cada gasto entre los rangos de $[10,70]$ L/s (Ver **Ilustración 30**), con el fin de evitar interferir con las ondas ultrasónicas de lectura del transductor (Ver **Ilustración 28**).

Una vez concluidas las pruebas se graficarán y analizarán los datos con la finalidad de encontrar los factores de error y de ajuste. Después se analizarán datos de medidores instalados en campo para comprobar si los patrones de error se comportan semejantes a los encontrados en las pruebas experimentales de laboratorio.

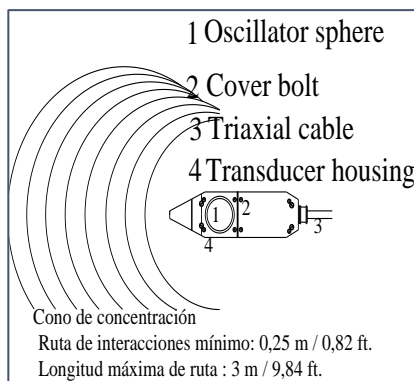


Ilustración 17: Zoom up: Simulación de una señal ultrasónica de un sensor de velocidad.

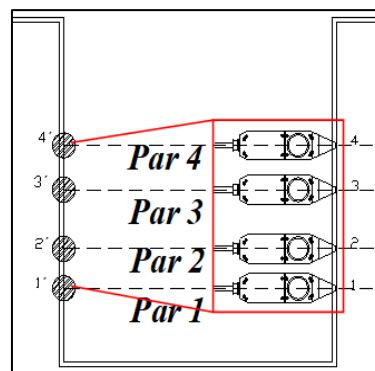


Ilustración 18: Sistema multi par de sensores de velocidad. Ubicación de cada par.

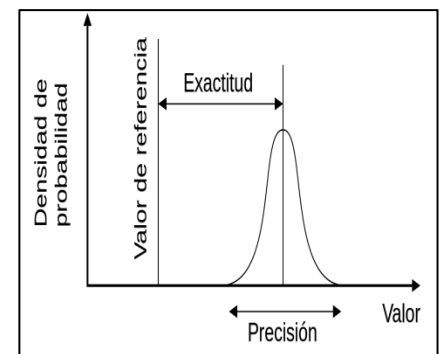


Ilustración 19: Relación: La exactitud indica la proximidad de los resultados de la medición con respecto al valor verdadero, mientras que la precisión indica la repetibilidad o reproductibilidad de la medida (GUM, 1995).

3.5. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL

3.5.1. LABORATORIO

Como se mencionó anteriormente, este trabajo de tesis se realizó principalmente en un canal rectangular de laboratorio, en la *ilustración 20* se puede observar las características principales:



Ilustración 20: Canal rectangular de pendiente variable (“ancho de 0.60 m”, “altura de 0.70 m y largo de 18 m”).



Ilustración 21: Descarga del canal.

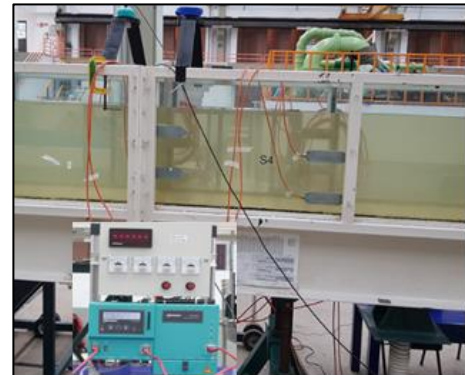


Ilustración 23: Sección de aforo.



Ilustración 22: Vista transversal, sensores de velocidad y sensor de nivel montados sobre el canal.

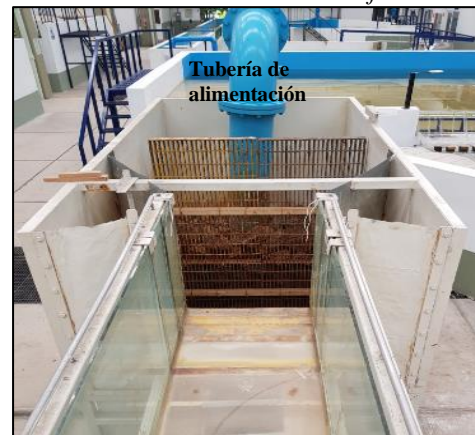


Ilustración 24: Sección de alimentación al canal.

3.6. CANALES EN CAMPO DEL DR 010

El Distrito de Riego 010 (DR010) tiene muchas áreas de operación (*En la **Tabla 9** se encuentran algunos datos generales*), está dividido en unidades que generalmente coinciden con el canal principal, para lo cual cuenta con 12 módulos de riego a cargo de la red menor y una sociedad de responsabilidad limitada, que opera la red mayor o principal. El canal más importante del distrito es el canal principal Humaya. Tiene una longitud de 156 km y cuenta con una gran cantidad de estructuras: 26 represas, un túnel de 1,310 m de longitud y 12 diques en los sitios de cruce con los arroyos. Hay 15 sifones; uno de ellos con longitud de 840 m; algunos son circulares y otros rectangulares. Los primeros tienen diámetros que oscilan entre 5 y 4 m con uno o dos conductos; los sifones rectangulares tienen entre 5 y 4 m de ancho, con uno, dos o tres conductos. El canal inicia en la cota 73.04 msnm y termina en la 44.83. En los primeros kilómetros, la pendiente tiene valores que fluctúan entre 0.0003 y 0.0002 para, posteriormente, mantener un valor de 0.00015. La sección transversal es trapecial con taludes de 1.25:1. En la parte donde se alojan las compuertas, el canal es rectangular. El canal principal Humaya riega los DR 074 y 010, y el canal Rosales al DR 010. Estos canales forman parte del Sistema hidráulico-agrícola de los ríos San Lorenzo, Culiacán y Mocerito. El distrito se abastece principalmente de la presa Adolfo López Mateos, que inició su funcionamiento en septiembre de 1963 y se ubica sobre el río Humaya a 32 km al norte de Culiacán, como se ve en la *Ilustración 22*:

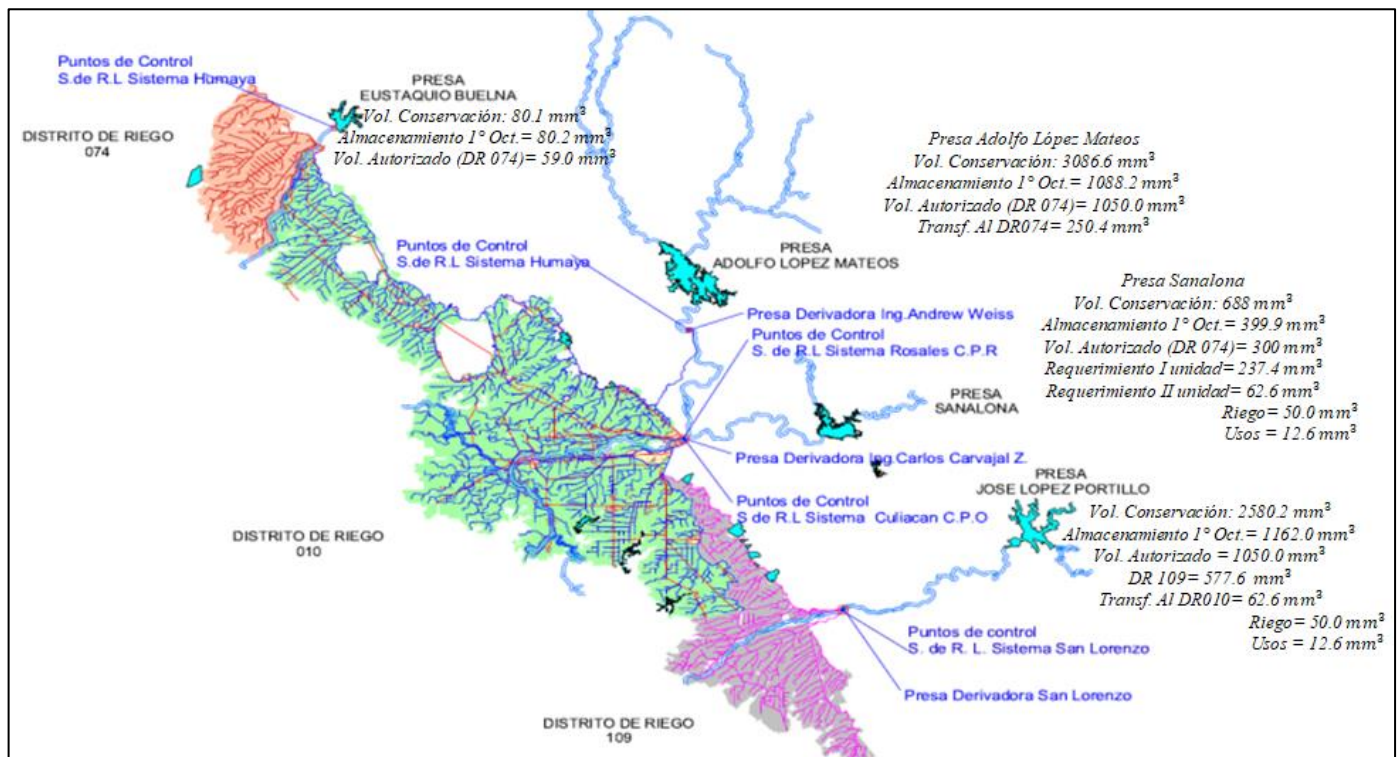


Ilustración 25: Mapa del DR 010, Fuente: (Sirio Moreno Armenta, 2018).

Tabla 5: Infraestructura hidráulica del DR010 Fuente: (Sirio Moreno Armenta, 2018).

RED DE DISTRIBUCIÓN		RED DE DRENAJE	
LONG. TOTAL:	2,787.151 km	LONG. TOTAL:	2,568.992 km
PRINCIPALES:	276.298 km	PRINCIPALES:	580.618 km
SECUNDARIOS:	2,510.853 km	SECUNDARIOS:	1,988.374 km
DERIVADORAS			
NUMERO:	5		
NOMBRE:	Andrew Weiss	CAP. ALMAC.:	1,625.00 Mm3
NOMBRE:	Carlos Carvajal	CAP. ALMAC.:	5,000.00 Mm3
NOMBRE:	Chinitos	CAP. ALMAC.:	800.00 Mm3
NOMBRE:	Cerro Bola	CAP. ALMAC.:	500.00 Mm3
NOMBRE:	El Gato	CAP. ALMAC.:	500.00 Mm3
DIQUES			
NUMERO:	10	ALMAC.:	35,068.60 Mm3
SUELOS			
CLASIFICACIÓN DE SUELOS		SALINIDAD DE SUELOS	
ARCILLOSO:	158,586.33 ha	NORMALES:	169,883.00 ha
LIMOSO:	50,565.67 ha	SALINOS	32,576.00 ha
ARENOSO:	3,222.00 ha	SALINOS-SODICOS	9,715.00 ha
TOTAL:	212,374.00 ha	SODICOS:	200.00 ha
		TOTAL:	212,374.00 ha

Tabla 6: Datos generales del D.R. 010. Fuente: (Sirio Moreno Armenta, 2018).

MODULO	SUPERFICIE (HA)			USUARIOS		
	EJIDAL	PEQ. PROP.	TOTAL	EJIDAL	PEQ. PR.	TOTAL
I-1	3,938.23	5,200.58	9,138.81	783	404	1,187
I-2	1,846.69	5,228.46	7,075.15	304	274	578
I-3	6,216.55	8,717.24	14,933.79	983	427	1,410
II-1	18,914.71	9,846.27	28,760.98	2,592	675	3,267
II-2	2,679.85	12,438.72	15,118.57	307	274	581
II-3	6,598.52	24,750.79	31,349.31	617	704	1,321
IV-1	9,162.58	6,773.80	15,936.38	1,236	431	1,667
IV-2	7,455.18	5,320.18	12,775.36	971	378	1,349
IV-3	3,483.12	6,099.99	9,583.11	408	394	802
IV-4	10,899.92	4,772.06	15,671.98	1,252	295	1,547
V-1	19,062.10	4,464.51	23,526.61	2,080	328	2,408
V-2	16,577.07	11,926.82	28,503.89	1,852	1,000	2,852
TOTAL	106,834.52	105,539.42	212,373.94	13,385	5,584	18,969

3.6.1. CANAL DE RIEGO HUMAYA

La estación de medición del Canal principal “**Humaya**” se encuentra en el km 5+000 del Distrito de Riego 010 de la CONAGUA, en Culiacán, Sinaloa. Las medidas geométricas del canal trapezoidal son: “ancho de base $b = 5.6 \text{ m}$ ”, “ancho $B = 20 \text{ m}$ ”, “altura $H = 6 \text{ m}$ ” y “pendiente de talud $k = 1.25$ ”. El canal es alimentado por la presa/derivadora *Andrew Weiss* y tiene la capacidad de llevar un gasto hasta de $100 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.



Ilustración 26: Canal trapezoidal “Humaya” km 5 + 000



Ilustración 28: Puente peatonal km 2+500 del canal Humaya.



Ilustración 27: Equipo ATT de la caseta de medición del canal Humaya.



Ilustración 29: Caseta de la estación de aforo 5+ 000 Humaya.



3.6.2. CANAL DE RIEGO ROSALES

La estación de medición del Canal principal “Rosales” se encuentra en el km 0+600 del Distrito de Riego 010 de la CONAGUA, en Culiacán, Sinaloa. Las medidas geométricas del canal trapezoidal son: “ancho de base $b = 4\text{ m}$ ”, “ancho $B = 8.90\text{ m}$ ”, “altura $H = 3.70\text{ m}$ ” y “pendiente de talud $k = 1.5\text{ m}$ ”. El canal es alimentado por la presa/derivadora *Ing. Carlos Carvajal Z.* y tiene la capacidad de llevar un gasto hasta de $100\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.



Ilustración 30: Canal principal de forma trapezoidal “Rosales”.



Ilustración 32: Canal principal Rosales. Sección trapezoidal.



Ilustración 31: Caseta de aforo del canal principal “Rosales”.



Ilustración 33: Macro localización de la sección de Aforo del canal principal “Rosales”.

3.6. FORMATO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

Antes de empezar a realizar mediciones, se requiere realizar un levantamiento de datos, por ejemplo en el (EC 0914, IMTA, 2017) se recomienda que se debe registrar en formatos la siguiente información: la geometría del canal, condiciones en las que se encuentra la sección que se definirá para aforar, calidad del agua, medidas de los transductores, medidas de los cables de comunicación, entre otros. A continuación, se presentan algunos formatos (en el capítulo 8.1 “anexos”, se podrán encontrar los formatos en blanco), que contiene la información que se recopiló para posteriormente realizar la investigación que dé solución al problema planeado (capítulo 1.1).

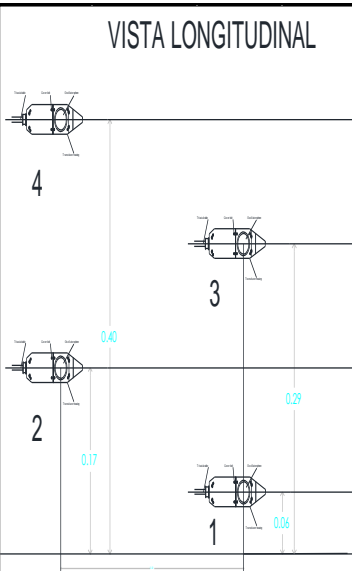
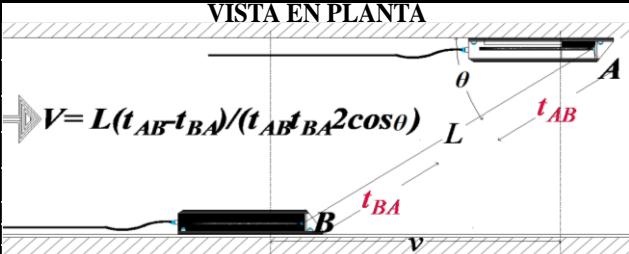
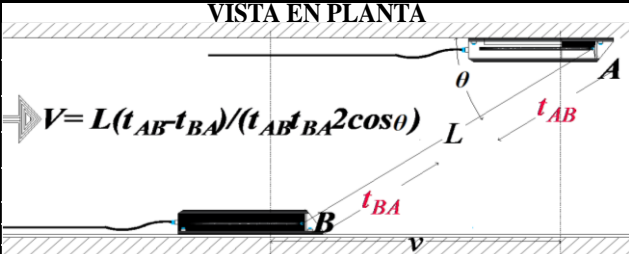
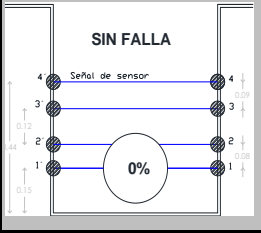
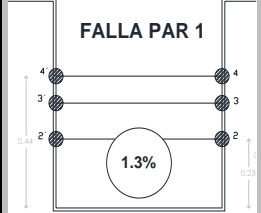
FORMATO PARA MEDICIONES EN CANALES CON AFORADOR DE TIEMPO DE TRAVESÍA									
FECHA: 06 /NOV/2019		SENSORES DE VELOCIDAD							
ELABORADO BY: MARLYN DE LEÓN	PAR 1	ÁNGULO θ	L	v					
DIRECCIÓN: LAB. IMTA		33.620	0.921	0.755					
CANAL: CANAL #2	PAR 2	ÁNGULO θ	L	v					
MATERIAL: VIDRIO		33.730	0.918	0.755					
ESTADO: REGULAR	PAR 3	ÁNGULO θ	L	v					
AZOLVES: NO		33.730	0.918	0.755					
PENDIENTE S (m): --	PAR 4	ÁNGULO θ	L	v					
ALTURA H (m): 0.700		33.780	0.916	0.755					
BASE b (m): 0.600									
BORDO LIBRE: 0.100									
LONGITUD (m): 18									
MODELO ATT: RITMEYER									
TEMPERATURA : 22.6 °C									
CALIDAD: REGULAR									
DATOS REGISTRADOS PARA EL CÁLCULO DEL GASTO INSTANTÁNEO									
N°	PAR DE SENSOR	ESCENARIO	Tirante d (m)	ÁREA (m)	Vm (m/s)	Q=V*A (m3/s)	DIFERENCIA		Observaciones
							m/s	%	
1	1	No hay falla, se establece este gasto registrado como el gasto de referencia para el próximo escenario.	0.549	0.329	0.189	0.062	0.000	0.000	
	2								
	3								
	4								
2	1	E.1. Fallando el par de la ubicación 1. Se compara con el Q de referencia.	0.549	0.329	0.192	0.063	-0.002	-1.305	
	2								
	3								
	4								

Ilustración 34: Formato para recolección de datos de geometría del canal y ubicación de ATT



3.7. RELACIÓN DE EQUIPO Y MATERIAL

En esta sección se encuentran los requerimientos básicos, instrumentación y materiales para la realización del procedimiento en la medición, estudio y análisis de los escenarios propuestos de falla en los sensores de velocidad de un equipo ultrasónico Tiempo de Travesía. A continuación, se presenta una tabla con la descripción de cada material que se utilizaron en todos los procesos de esta tesis:

Tabla 7: Materiales.

Nº	Instrumento/ material	Nombre y breve descripción	Nº	Instrumento/ material	Nombre y breve descripción	Nº	Instrumento/ material	Nombre y breve descripción
1		Cinta métrica o un flexómetro: instrumento de medida que consiste en una cinta flexible graduada y que se puede enrollar (transporte fácil).	9		Convertidor RSD32-USB: convierte un puerto USB a puerto serial RS232 DB9 para conectar, monitorear y controlar un dispositivo serial.	17		Computadora portátil: para la programación del sistema y descarga de información en la interfaz del ATT.
2		Regla: Instrumento para medir y trazar líneas rectas que consiste en una barra rectangular y plana graduada en centímetros/milímetros y Pulgadas.	10		Regulador de carga solar: se coloca entre el campo fotovoltaico y el campo de baterías y básicamente se encarga de controlar el flujo de energía que circula entre ambos equipos.	18		Fuente de corriente directa: Su uso es seguro, y se puede transportar fácilmente. Permite un uso de voltajes más bajos para transmitir electricidad por medio de cables.
3		Calculadora: dispositivo que se utiliza para realizar cálculos y operaciones (aritméticos, estadísticos, trigonométricos) para ser más flexibles.	11		Kit de herramientas básicas: martillo, clavos, destornilladores, juegos de llaves, taladro, cinta aislante, entre otros.	19		Controlador del ATT
4		Cronómetro: dispositivo que cuenta el tiempo que pasa, en milésimas de segundo, después de que haga clic en el botón Iniciar.	12		Transformador: elemento eléctrico que permite aumentar o disminuir la corriente alterna en un circuito eléctrico, manteniendo la potencia necesaria de salida.	20		Modulador del ATT
5		Escalera plegable.	13		Equipo de protección: bata, chaleco, botas, lentes, guantes, casco o sombrero.	21		Transductor, sensor de velocidad incluido.
6		Abrazadera: pieza de metal u otro material que sirve para asegurar conductos de cualquier tipo, se venden en ferreterías.	14		Voltímetro: Instrumento para medir en voltios la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito.	22		Sensor de nivel
7		Desarmador: Instrumento que se utiliza para aflojar y ajustar tornillos, se venden en ferreterías.	15		Termómetro de infrarrojos: es un medidor de temperatura de una porción de superficie de un objeto a partir de la emisión de luz infrarroja.	23		Cables de comunicación para los sensores, y computadora.
8		Lampara de mano: aparato portátil de iluminación alimentado mediante pilas o baterías eléctricas.	16		Interruptor termomagnético ó “pastillas”: elemento para la protección de los conductores y equipos conectados en una red eléctrica, se encargan de interrumpir una sobrecarga de corriente.	24		Clemas: sirve para conectar dispositivos de forma segura entre sí.

Tabla 8: Relación de equipo y material básicos para la realización del estudio en los ATT.

N°	Instrumento/ material	Nombre y breve descripción	N°	Instrumento/ material	Nombre y breve descripción	N°	Instrumento/ material	Nombre y breve descripción
25		Silicón y aplicador: Para adherir los transductores en el canal de vidrio.	33		Thinners: Para la limpieza sobre superficies del canal.	43		Mesa.
26		Cimbra: para la instalación de los transductores en el canal.	34		Marcadores de aceite: para apuntes y notas.	44		Diablo carrito: para llevar los equipos pesados de manera segura.
27		Nivel	35		Llave: herramienta que sirve para abrir o cerrar válvulas.	45		Base para sensor de nivel.
28		Trapos de limpieza	36		Tabla: para escribir.			
29		Estopa: Para la limpieza sobre superficies del canal.	37		Formatos: impresos para apuntes en campo.			
30		Brochas: para la limpieza del equipo ATT y el área de trabajo.	38		Imán Telescópico: para la calibración del sensor de nivel.			
31		Lijas: Para la limpieza de las superficies en donde se montarán los transductores.	40					CANAL CON ALIMENTACIÓN DE GASTO Y DESCARGA
32		Espátula: Para la limpieza sobre superficies del canal.	41		Cajas de cartón: para guardar o transportar los instrumentos			



3.8. PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA FALLA DE SENSORES DE VELOCIDAD EN UN SISTEMA MULTI-PAR.

Utilizando el método de área-velocidad y con el procedimiento que sugiere el *Estándar de Competencia 0914 “Asesoría en sistemas fijos de medición en canales”*, se instaló, supervisó y validó el sistema multipar de medición ATT, los sensores se instalaron en el canal rectangular (ver *Ilustración 20*), para las pruebas en el laboratorio (ver *Capítulo 3.4.1*); debido a que son dimensiones pequeñas, el gasto no es mayor a 65.2 L/s.

Una vez instalado el equipo se establecieron valores de Gastos $Q \left(\frac{L}{s}\right)$ para partir con ellos como la condición de referencia. Las mediciones realizadas van desde 14.1 L/s hasta 65.2 L/s, en los resultados se presenta un resumen de la experimentación con los gastos: 14.1, 37.1, 63.7 y 65.2 L/s, a cada uno se le asigna el gasto de referencia q_r (se encuentra en la columna 4 de los datos, ver *Tabla 14-21*) para un valor establecido en la medición con 4 pares de sensores de velocidad y 1 sensor de nivel funcionando correctamente (condición de referencia de la *Tabla 4*). Posteriormente se propone un escenario en donde se desactivan los sensores simulando una falla, esto se hace para la falla de 1, 2 y 3 pares de sensores; del total de combinaciones resultaron 16 escenarios, cada uno simulado durante un lapso de 10 minutos, para menor incertidumbre se intercala en cada escenario una medición con los 4 pares activados, con esto se tienen 14 mediciones de referencia. Los 14 valores de referencia de una misma medición se pueden promediar siempre y cuando la incertidumbre no sea mayor a $\pm 6\%$ (factor de cobertura igual a 2 y un nivel de confianza de 95, ver *Capítulo 2.6.2.*), sin embargo, para esta tesis se tiene el análisis con cada falla con su respectiva referencia. Este procedimiento descrito (un ciclo completo de la *Tabla 4: Escenarios propuestos para las mediciones en laboratorio y en canales de campo.*) toma alrededor de 5 horas para un solo gasto.

Cuando concluye cada prueba la descarga de información queda guardada en un archivo de texto en la computadora portátil, con ellos se analizaron todos los escenarios y se graficaron los datos de los diferentes gastos.

Finalmente se realizaron mediciones en campo en los canales mencionados en el *Capítulo 3.4.3*, en estos canales ya se tiene la estación de medición instalada con la misma técnica que se usó en laboratorio, por lo que solo se configuran los escenarios de falla, se toma la lectura de la medición y se descargan los datos para posteriormente comprobar si los patrones de falla se comportaron similares a las pruebas experimentales del canal en laboratorio. Con el procesamiento y análisis de datos que se obtuvieron en todas las mediciones, se clasificaron los grados de diferencia relacionándolos con la ubicación de cada uno de los pares sensores de velocidad. Dicha diferencia es calculada con la *Ec. 19*:

$$\text{Diferencia por falla } D_{falla} = V_r - V_i \quad [\text{Ec. 10}]$$

Donde:

V_r = Velocidad media promedio, calculada para el *escenario de referencia (Escenario 1, Tabla 4)* durante los 10 minutos de lectura, en m/s.

V_i = Velocidad media promedio (correspondiente al *Escenario 2-16*, de la *Tabla 4*), en m/s.

A continuación, se describe el procedimiento paso por paso para realizar mediciones del caudal con la técnica de tiempo de travesía en un canal de laboratorio de acuerdo con el *EC 0914*:

1. Antes de empezar a realizar cualquier actividad en una medición, es necesario utilizar el equipo de protección personal adecuado: bata de laboratorio, botas, guantes, cubre bocas (opcional), gafas (opcional). Es importante revisar que no presenten daños para su uso.



2. De acuerdo con la (NMX-AA-179-SCFI, 2017), se establece la sección del canal en donde se instalará y realizará la medición del caudal, se realiza un levantamiento de datos y se registra la información en formatos, los cuales deben contener la siguiente información:

- lugar en latitud y longitud (ver *Ilustración 34*),

Tabla 9: Información del canal de laboratorio.

Datos del Canal	
Nombre del canal	Canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica Enzo Levy del IMTA
Nombre de la localidad / nombre del ejido / predio	Progreso
Estado	Morelos
Municipio	Jiutepec
Código postal / kilometraje	62550
Ubicación Geográfica: Longitud	18 °52 ' 52.6" Norte
Ubicación Geográfica: Latitud	99° 09' 26.8" Oeste

- datos generales del canal (ver formato en *Capítulo 3.5.1*): condiciones, si existen problemas de azolve, si hay maleza acuática, si existe vandalismo en el sitio, los valores máximo, promedio y mínimo del tirante, los valores máximo, promedio y mínimo del gasto, geometría, base, profundidad, taludes y bordo libre, etc. elaborando un croquis de ser necesario (ver *Ilustración 35*).

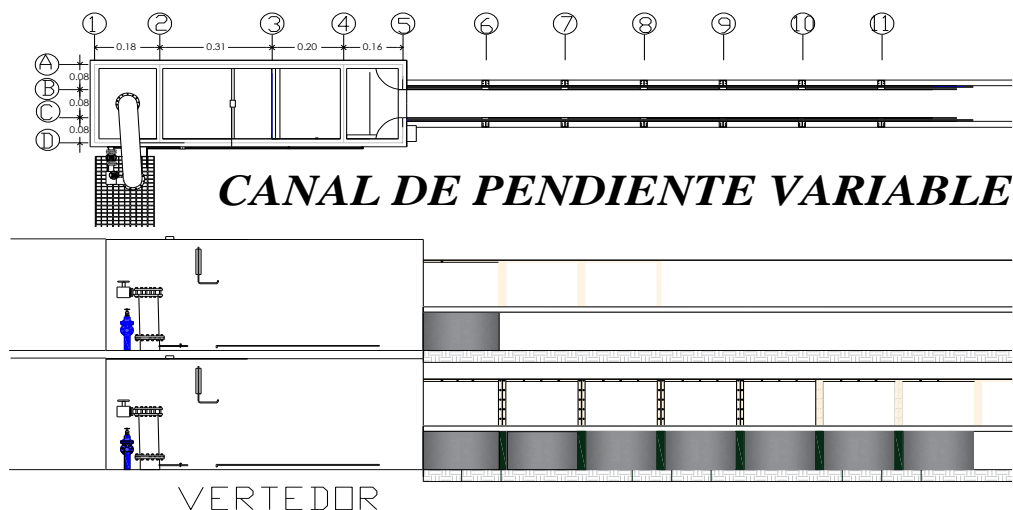


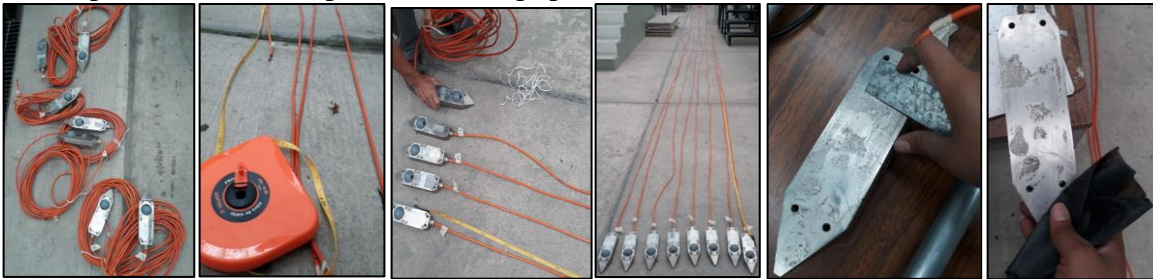
Ilustración 35: Croquis sencillo del canal en laboratorio.

Para este estudio se trabajó con un equipo de medición “tiempo de travesía” de ultrasonidos de una marca comercial (ver **Ilustración 4** del *Capítulo 2.1*). El cálculo hidráulico que realiza el equipo incluye la velocidad de flujo (v_m), el flujo por unidad de tiempo (Q) y el volumen de flujo (V_f, V_r).

3. Identificar los datos hidráulicos de operación del canal en el sitio. Establecer un gasto constante. Localizar aguas arriba y aguas abajo estructuras existentes, tomando como referencia el punto donde se propone la ubicación del sistema fijo de medición de gasto para considerar cualquier perturbación o incertidumbre en la medición. Se deberá instalar el equipo de medición en el tramo recto que cumpla con 10 veces el ancho máximo del canal aguas arriba y 5 veces el ancho máximo aguas abajo.

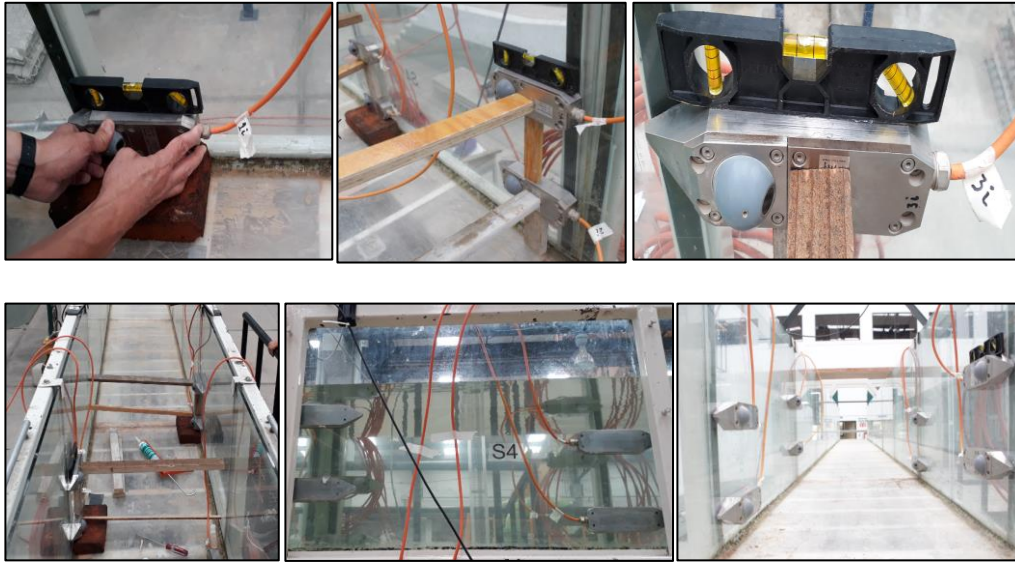


4. Se procede a montar el equipo con todos sus componentes:
- Tomar las medidas correspondientes a cada uno de los cables de comunicación,
 - verificar que pase corriente eléctrica, y que estén en condiciones para su uso (que no presenten daños),
 - limpiar todos los componentes del equipo,

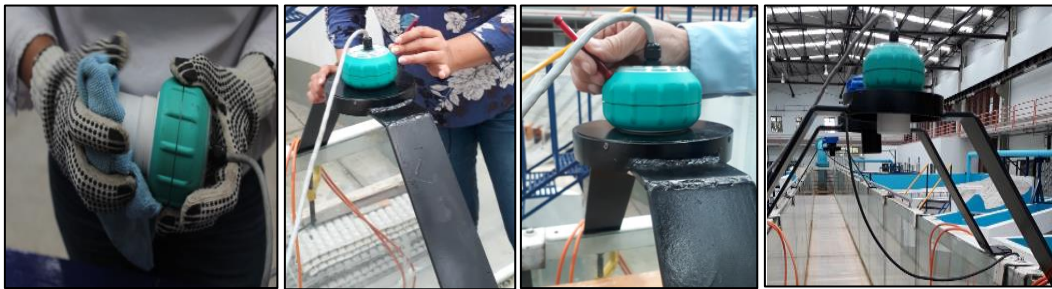


- Se procede a instalar los transductores de velocidad en el canal, se deben adherir con silicón a la pared del canal (limpiar la superficie) en las ubicaciones seleccionadas previamente en la planeación de trabajo de la tesis, deben quedar nivelados,
- se utilizan trozos de madera adecuados a las medidas, para que sirvan como soporte a los transductores mientras el silicón seca,





5. A continuación, se coloca el sensor de nivel sobre una base diseñada especialmente para evitar movimientos, de acuerdo con el manual del usuario Rittmeyer 21.210.0067720.006.02.4.4 @2007 pg. 7 se calibra con un imán por el método A “*procedimiento in situ para nivel*”

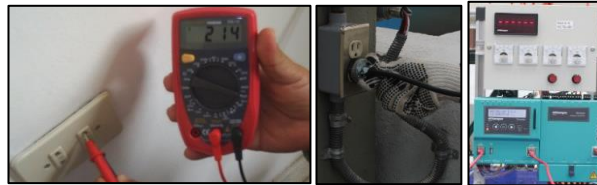


6. Ahora se conectan los cables de comunicación de los transductores y del sensor de nivel al modulador Risonic-Rittmeyer, como se observa en las imágenes






7. Antes de conectar el equipo medidor ultrasónico se realizan mediciones a la alimentación eléctrica con multímetro el voltaje y amperaje de la celda solar/ CA/batería/fuente de poder.



8. Después de que el equipo queda instalado hay que asegurar que se encuentre calibrado, programado con la información de la sección del canal y que no falte ningún elemento del hardware que sirva para la prueba. En el momento que los transductores puedan permanecer fijos sin necesidad de los apoyos de madera se puede proceder a realizar las pruebas.

9. Una vez encendido el equipo, se identifican los parámetros en la pantalla del sistema fijo de medición de gasto con sus unidades (fecha y la hora, identificar la velocidad, el gasto, el tirante, el volumen totalizado y los mensajes de error / el buen funcionamiento del sistema de medición), para asegurar que todo quede registrado con información obtenida en sitio:



Controller Sistema

ESTÁNDAR ESTÁNDAR - Estado

Estado: OK

Hora de sistema: 2019-07-15 12:13:58

Tiempo operación de sistema: 0d 01:36:05


Refresco automático: OFF OK

Sección 1 : CANAL

Estado: OK

RISONIC modular: MEAN-SECTION (ISO 748)

VOLUMEN DIRECTO	Vf	m ³	1308.9499	HAZ	Estado	VELOCIDAD v [m/s]
VOLUMEN INVERSO	Vr	m ³	0.4245	1	OK	0.11
CAUDAL	Q	m ³ /s	0.031	2	OK	0.13
TEMPERATURA MEDIA	T _m	°C	23.0	3	OK	0.12
VELOCIDAD MEDIA	v _m	m/s	0.12	4	OK	0.10
ALTURA EXT. MEDIA	H _{ext}	m	0.439			



Controller Sistema

ESTÁNDAR EXPERTO - Parámetros de medida - Sección 1 HAZ 1 - Editar

Estado: OK Desechar

enable: VERDADERO

L [m]: 0.921

L_T [m]: -0.162654

L_C [m]: 12.630

b [m]: 0.600

phi [°]: 33.620

z [m]: 0.085

z_U [m]: 0.343

z_L [m]: 0.143

map_module: 0

map_path: A



The screenshot shows the Rittmeyer software interface. On the left is a navigation menu with categories: ESTÁNDAR, EXPERTO, and OTROS. The main area is titled 'Sistema' and shows 'ESTÁNDAR - Registro datos - Tarea de registro de datos - Agregar tarea de registro de datos: Prueba1 - Diagnóstico'. It includes fields for 'Sección', 'Intervalo', and 'Duración'. To the right, there is a list of HAZ sensors:

- HAZ 1 : RIMOUSTT ID 0 HAZ A
- HAZ 2 : RIMOUSTT ID 0 HAZ B
- HAZ 3 : RIMOUSTT ID 0 HAZ C
- HAZ 4 : RIMOUSTT ID 0 HAZ D

Each sensor has an 'Editar ...' button with a blue checkmark. Below this, another screenshot shows the 'Agregar' task configuration screen with 'Identificador: Prueba1' and 'Tipo: Diagnóstico'.

10. Para la medición, se registra toda la información en el formato mencionado en el paso 2, en donde se colocan notas y observaciones con lujo de detalle en cada escenario de falla en prueba, además de la grabación del software del equipo que se descarga desde el navegador web en el que se encuentra conectada la computadora.

This screenshot shows the 'Datos registrados' section of the Rittmeyer software. It includes a table with columns for 'No filtrado', 'Filtrado (ON)', and 'Eliminar'. The table lists two files:

No filtrado	Filtrado (ON)	Eliminar
LOG-20190711102000-Prueba1A.txt 36.1 kB	LOG-20190711102000-Prueba1A.txt	Eliminar
LOG-20190715111000-Prueba1-diag.txt 1.4 kB	LOG-20190715111000-Prueba1-diag.txt	Eliminar

Below the table, it shows 'Espacio libre para registro datos (Compact Flash): 99.1% (100.9 MB del total 101.9 MB)'. The interface also includes a 'Agregar ...' button and a 'Estado' dropdown menu.

- ❑ Es importante verificar que los datos extraídos queden guardados e identificar la ubicación del almacenamiento.
- ❑ Se debe comparar que la información contenida en el archivo de configuración coincida con la geometría de instalación de acuerdo al proyecto.

11. El paso siguiente es en donde se realizan pruebas simulando fallas para cada transductor de velocidad, la combinación de fallas está descrita a continuación, (nótese que el intervalo de tiempo de cada escenario de prueba es de 10 minutos) por cada escenario de falla programado en el software desde la interfaz web, se vuelve a tomar lectura con los 4 pares de transductores funcionando correctamente.



Sección 1 : C_P_Humaya_5+000				
Estado:		OK		
RISONIC modular: MEAN-SECTION (ISO 748)				
VOLUMEN DIRECTO	Vf	k m³3	2732108.9	
VOLUMEN INVERSO	Vr	k m³3	0.0	
CAUDAL	Q	m³3/s	61.408	
TEMPERATURA MEDIA	T_m	°C	24.5	
VELOCIDAD MEDIA	v_m	m/s	1.55	
ALTURA EXT. MEDIA	H_ext	m	3.781	
				HAZ Estado VELOCIDAD v [m/s]
				1 OK 1.46
				2 OK 1.65
				3 OK 1.60
				4 OK 1.55
				5 NO MOJADO na
				6 NO MOJADO na

Ilustración 36: Interfaz del equipo ATT. Estado del aforador: en buen funcionamiento.

Sección 1		C_P_Humaya_5+000	
RISONIC modular CANAL, 1E06P, TRAPEZIO, MFATB05			
General	[Editar...]		
Geometría	[Editar...]		
Valores límite	[Editar...]		
Filtro de Valores Fuera de Límites:	[Editar...]		
Capa 1	[Editar...]	HAZ 1 / nc	
Capa 2	[Editar...]	HAZ 2 / nc	
Capa 3	[Editar...]	HAZ 3 / nc	
Capa 4	[Editar...]	HAZ 4 / nc	
Capa 5	[Editar...]	HAZ 5 / nc	
Capa 6	[Editar...]	HAZ 6 / nc	
HAZ 1	[Editar...]	RIMOUSTT ID 0 HAZ A	
HAZ 2	[Editar...]	RIMOUSTT ID 0 HAZ B	
HAZ 3	[Editar...]	RIMOUSTT ID 0 HAZ C	
HAZ 4	[Editar...]	RIMOUSTT ID 0 HAZ D	
HAZ 5	[Editar...]	RIMOUSTT ID 1 HAZ A	
HAZ 6	[Editar...]	RIMOUSTT ID 1 HAZ B	

Ilustración 37: Configuración del sistema – Habilitar o desactivar los sensores de velocidad.

Se establecen escenarios de falla para 1, 2 y 3 pares (ver **Tabla 4**), se calcula el gasto y estos se comparan con el valor de referencia. Se realiza este paso para gastos de 15, 35 y 65 litros por segundo.

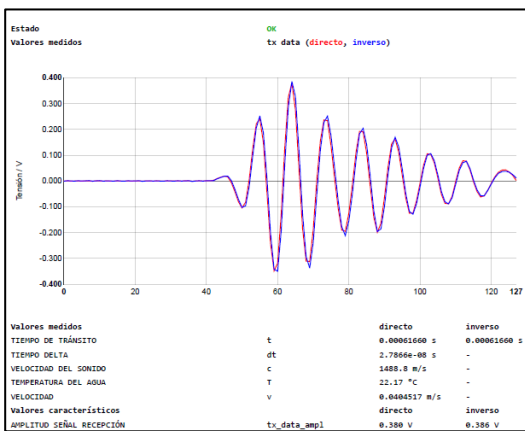


Ilustración 38: Señal ultrasónica recibida por el transductor cuando el sensor funciona correctamente.

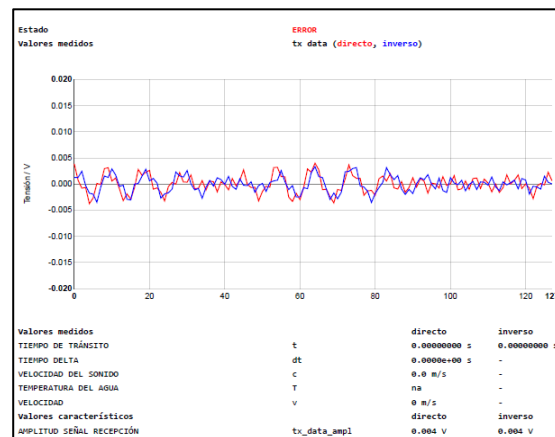


Ilustración 40: Señal ultrasónica recibida por el transductor cuando el sensor es obstruido por burbujas de aire.

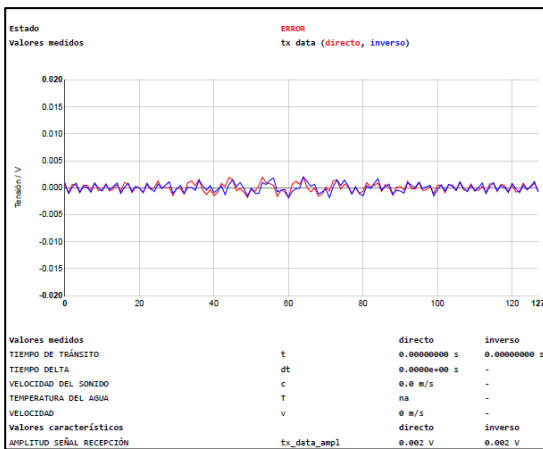


Ilustración 39: Señal ultrasónica recibida por el transductor cuando el sensor se encuentra obstruido por basura o lodo.

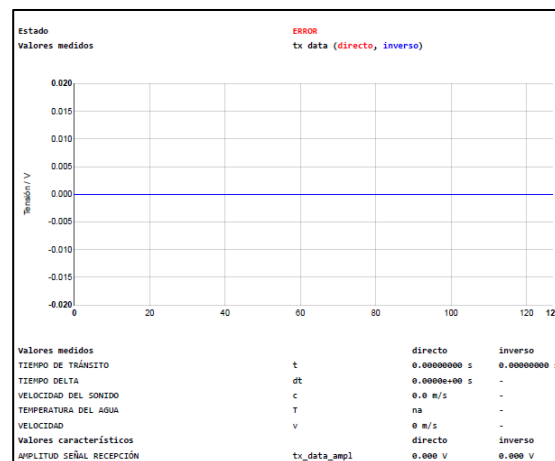


Ilustración 41: Señal ultrasónica recibida por el transductor cuando el sensor NO funciona.

- Una vez que se terminó de tomar lectura de la medición con todos los escenarios propuestos de la **Tabla 8**, se procede a exportar los datos de la interfaz web del equipo utilizado; cada lectura se exporta a un archivo *.txt:

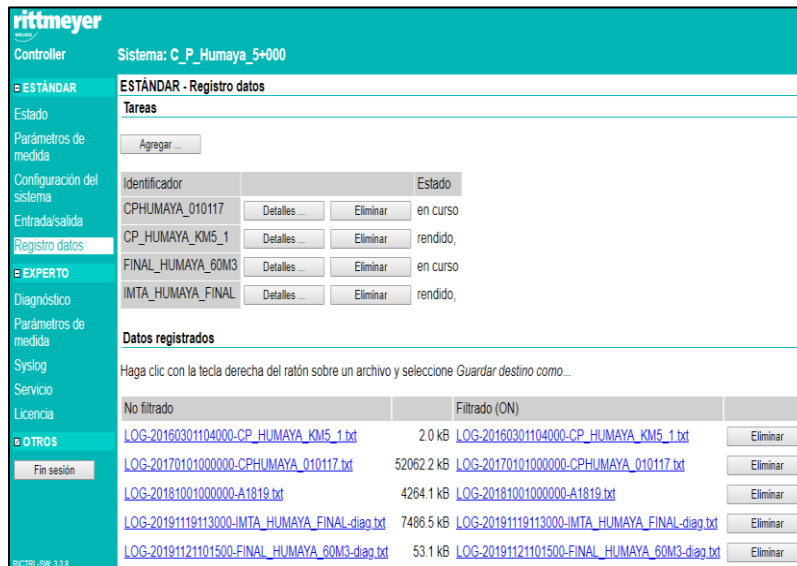


Ilustración 42: Exportación de las lecturas del gasto instantáneo en una medición.

- Posteriormente realiza un análisis estadístico, considerando la incertidumbre expandida de cada variable promediada con el método de incertidumbre tipo A, y posteriormente la incertidumbre total de la medición calculada con la (Norma ISO 6416, 2004). Con este análisis será posible llegar a una conclusión referente al coeficiente que se desea encontrar para corregir datos que varían de la condición de referencia en el cálculo de la velocidad con un sensor ATT.
- Después del análisis-procesamiento de datos se obtiene la diferencia de cada escenario de falla para la ubicación de cada uno de los pares sensores.

12.- Finalmente, cuando se obtiene toda la información de las pruebas, se procede a graficar los gastos, velocidades, comparativas para la observación de resultados y llegar a conclusiones finales.

Para poder establecer los criterios de corrección encontrados, se realizaron mediciones en los canales mencionados en el *Capítulo 3.4.3*, pero a diferencia de las pruebas experimentales, en los canales de riego ya se tiene la estación de medición instalada, para lo cual solo se realizó la última etapa del EC 0914, la cual es verificar el equipo ATT para realizar la lectura con el mismo procedimiento desde el paso 8 de la presente enumeración del procedimiento. Finalmente se comparan los resultados para comprobar si la hipótesis es aceptada en más de un caso.



CAPITULO IV: RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de todas las mediciones, estos vienen dados en dos opciones: las tablas de gasto y las tablas de velocidad para cada gasto correspondiente. Las tablas presentadas de gasto y velocidad pertenecientes a las mediciones en el canal del laboratorio (14.1 L/s, 37.1 L/s, 63.7 L/s y 65.2 L/s) son el breve resumen de las propuestas para crear escenarios de falla, ver **Tabla 4: Escenarios propuestos para las mediciones en laboratorio y en canales de campo**. Sin embargo para establecer 16 escenarios distintos, se realizaron múltiples propuestas, finalmente comparando las diferencias de falla, no se encontró ningún aumento significativo en el efecto de falla cuando se desactivan los sensores en la configuración de la interfaz del equipo ATT que, cuando la señal ultrasónica de los sensores es interrumpida con un efecto físico; para las mediciones realizadas en los canales en campo, ciertas áreas del distrito solicitaban disminuir la demanda mientras se realizaba el registro, lo que generaba incertidumbre, entonces aquellas que rebasaron el 3% se descartaron, debido a que no eran óptimas para comparar los escenarios.

4.1. RESULTADOS EN EL CANAL DEL LABORATORIO.

Comenzando por la medición del gasto más alto, de 65.2 L/s, se presenta la Tabla número 15 en donde se tienen los gastos calculados con la velocidad media de la tabla número 14, hay una columna llamada “diferencia” y representa el cálculo con la Ec. 19, en donde:

Diferencia, es la resta de $q_r - q_i$, se presenta en L/s y en porcentaje % en la última columna.

q_r , es el gasto de referencia, es el dato correspondiente al promedio del gasto en la medición durante 10 minutos con lectura del gasto de muestreo instantáneo a cada segundo,

q_i , es el gasto medido con un escenario de falla en sus sensores de velocidad.

Para esta medición se tiene la gráfica de la Ilustración 43, cada número representa un escenario de medición, el número 1 representa al escenario 1 de la Tabla 14 o 15, el número 2 representa al escenario 2, el número 3 representa al escenario 3 y así sucesivamente. La línea vertical es la división de los resultados que subestimaron el gasto y los que sobre estimaron el gasto, esta línea siempre será el valor de lectura con la condición de referencia de medición (todo funciona bien), y los puntos (los números) que se dispersan representan la diferencia que hay entre el valor medido y el valor de referencia.



Tabla 10: Cálculos para $V_m=18.95$ m/s

RESUMEN DE PRUEBAS EN LABORATORIO						
ESCENARIOS DE FALLA			Velocidad		Diferencia	
#	RANGO	CONCEPTO	V_r (cm/s)	V_i (cm/s)	cm/s	%
1	SIN FALLA	SIN FALLA	18.95	18.95	0.00	0.0
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	18.95	19.20	-0.25	-1.3
3		FALLA PAR 2	18.95	18.92	0.02	0.1
4		FALLA PAR 3	18.95	18.94	0.01	0.1
5		FALLA PAR 4	18.95	14.70	4.25	22.4
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	18.95	18.65	0.30	1.6
7		FALLA 1 y 3	18.95	19.44	-0.49	-2.6
8		FALLA 1 y 4	18.95	14.62	4.33	22.9
9		FALLA 2 y 3	18.95	19.68	-0.73	-3.8
10		FALLA 2 y 4	18.95	14.55	4.40	23.2
11		FALLA 3 y 4	18.95	12.47	6.47	34.2
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	18.95	11.30	7.65	40.4
13		FALLA 1, 3 y 4	18.95	11.89	7.06	37.3
14		FALLA 1, 2 y 4	18.95	12.66	6.29	33.2
15		FALLA 1, 2 y 3	18.95	17.53	1.42	7.5

Tabla 11: Cálculos para $Q=65.2$ m/s.

PRUEBAS EN LABORATORIO CON $Q=65$ L/s							
ESCENARIOS DE FALLA			GASTO		Diferencia		
#	RANGO	CONCEPTO	q_r (L/s)	q_i (L/s)	L/s	%	
1	SIN FALLA	SIN FALLA	65.2	65.2	0.0	0.0	
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	65.2	66.1	0.9	1.3	
3		FALLA PAR 2	65.2	65.1	0.1	0.1	
4		FALLA PAR 3	65.2	65.2	0.0	0.1	
5		FALLA PAR 4	65.2	50.6	14.6	22.4	
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	65.2	64.2	1.0	1.6	
7		FALLA 1 y 3	65.2	66.9	1.7	2.6	
8		FALLA 1 y 4	65.2	50.3	14.9	22.9	
9		FALLA 2 y 3	65.2	67.7	2.5	3.8	
10		FALLA 2 y 4	65.2	50.1	15.1	23.2	
11		FALLA 3 y 4	65.2	42.9	22.3	34.2	
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	65.2	38.9	26.3	40.4	
13		FALLA 1, 3 y 4	65.2	40.9	24.3	37.3	
14		FALLA 1, 2 y 4	65.2	43.5	21.7	33.3	
15		FALLA 1, 2 y 3	65.2	60.2	5.0	7.6	

En estos resultados se tiene que los escenarios que subestiman el gasto es cuando los sensores más cercanos a la superficie fallan, estos mismos sensores son los que provocan la mayor diferencia en la medición y, al contrario, los sensores que sobreestiman el gasto pertenecen a los escenarios con los sensores cercanos al fondo del canal fallando, y con la menor diferencia en la medición.

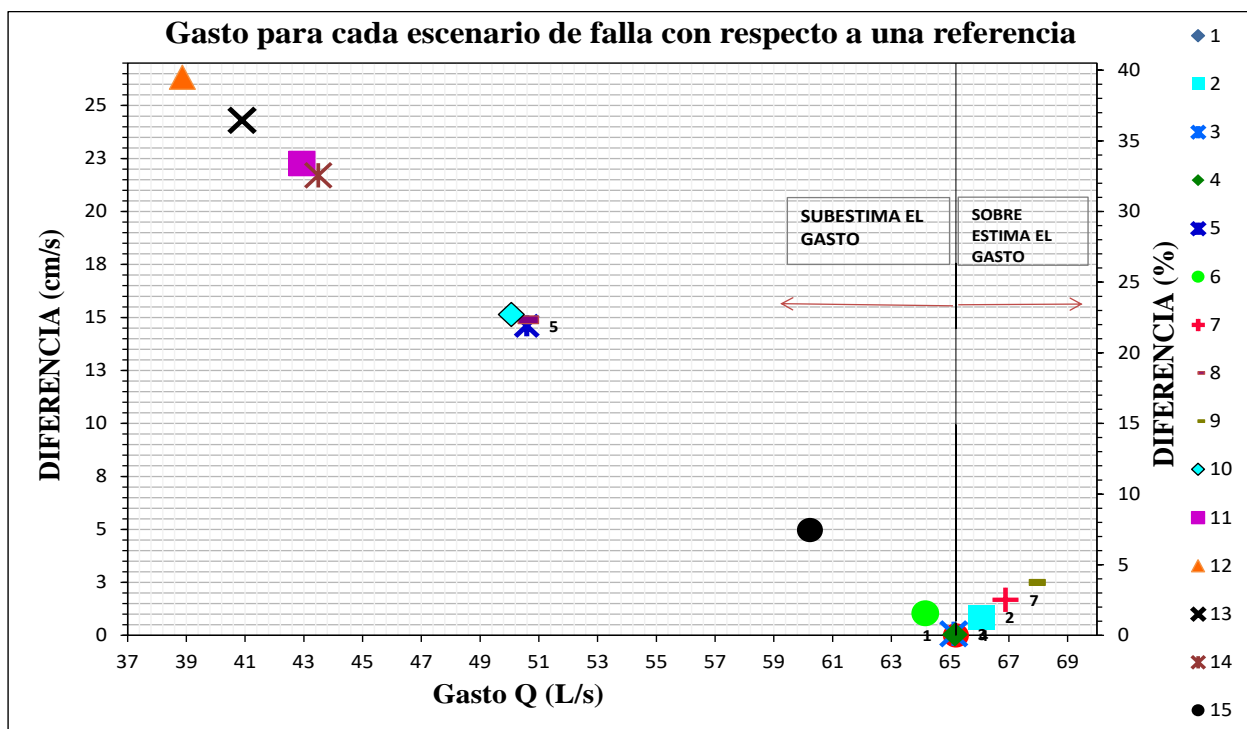


Ilustración 43: Gráfica para un gasto de referencia de 65.2 L/s. Dispersión de fallas.



Continuando con el resultado de las mediciones en laboratorio para un gasto de 63.7 L/s:

Tabla 13: Cálculos para $V_m=21.68$ m/s.

RESUMEN DE PRUEBAS EN LABORATORIO						
ESCENARIOS DE FALLA			Velocidad		Diferencia	
#	RANGO	CONCEPTO	V_r (cm/s)	V_i (cm/s)	cm/s	%
1	SIN FALLA	SIN FALLA	21.68	21.68	0.00	0.0
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	21.68	21.83	-0.15	-0.7
3		FALLA PAR 2	21.68	21.52	0.16	0.7
4		FALLA PAR 3	21.68	21.58	0.10	0.5
5		FALLA PAR 4	21.68	19.96	1.71	7.9
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	21.68	20.87	0.81	3.7
7		FALLA 1 y 3	21.68	22.19	-0.52	-2.4
8		FALLA 1 y 4	21.68	20.12	1.56	7.2
9		FALLA 2 y 3	21.68	23.02	-1.35	-6.2
10		FALLA 2 y 4	21.68	19.88	1.79	8.3
11		FALLA 3 y 4	21.68	18.94	2.73	12.6
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	21.68	19.36	2.32	10.7
13		FALLA 1, 3 y 4	21.68	19.18	2.49	11.5
14		FALLA 1, 2 y 4	21.68	18.19	3.48	16.1
15		FALLA 1, 2 y 3	21.68	19.90	1.77	8.2

Tabla 12 : Cálculos para $Q=63.7$ m/s.

RESUMEN DE PRUEBAS EN LABORATORIO							
ESCENARIOS DE FALLA			GASTO		Diferencia		
#	RANGO	CONCEPTO	q_r (L/s)	q_i (L/s)	L/s	%	
1	SIN FALLA	SIN FALLA	63.7	63.7	0.0	0.0	
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	63.7	64.1	-0.4	-0.7	
3		FALLA PAR 2	63.7	63.2	0.5	0.7	
4		FALLA PAR 3	63.7	63.4	0.3	0.5	
5		FALLA PAR 4	63.7	58.6	5.0	7.9	
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	63.7	61.3	2.4	3.7	
7		FALLA 1 y 3	63.7	65.2	-1.5	-2.4	
8		FALLA 1 y 4	63.7	59.1	4.6	7.2	
9		FALLA 2 y 3	63.7	67.6	-4.0	-6.2	
10		FALLA 2 y 4	63.7	58.4	5.3	8.3	
11		FALLA 3 y 4	63.7	55.6	8.0	12.6	
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	63.7	56.9	6.8	10.7	
13		FALLA 1, 3 y 4	63.7	56.4	7.3	11.5	
14		FALLA 1, 2 y 4	63.7	53.5	10.2	16.0	
15		FALLA 1, 2 y 3	63.7	58.6	5.1	8.0	

Y para esta medición la Ilustración 48, demuestra un resultado con el mismo comportamiento que el gasto de la medición anterior. El escenario 14 es cuando fallan los sensores de la ubicación uno, dos y cuatro, y es el escenario más alejado del valor exacto. Después se tiene un pequeño grupo de valores similares en el escenario 11, 12 y 13, que representa la falla en tres pares de sensores, en otro grupo de valores más cercanos con los escenarios número 5, 8, 10 y 15, y finalmente los valores que se mantuvieron precisos al valor exacto fueron los escenarios número 2, 3, 4 y 7.

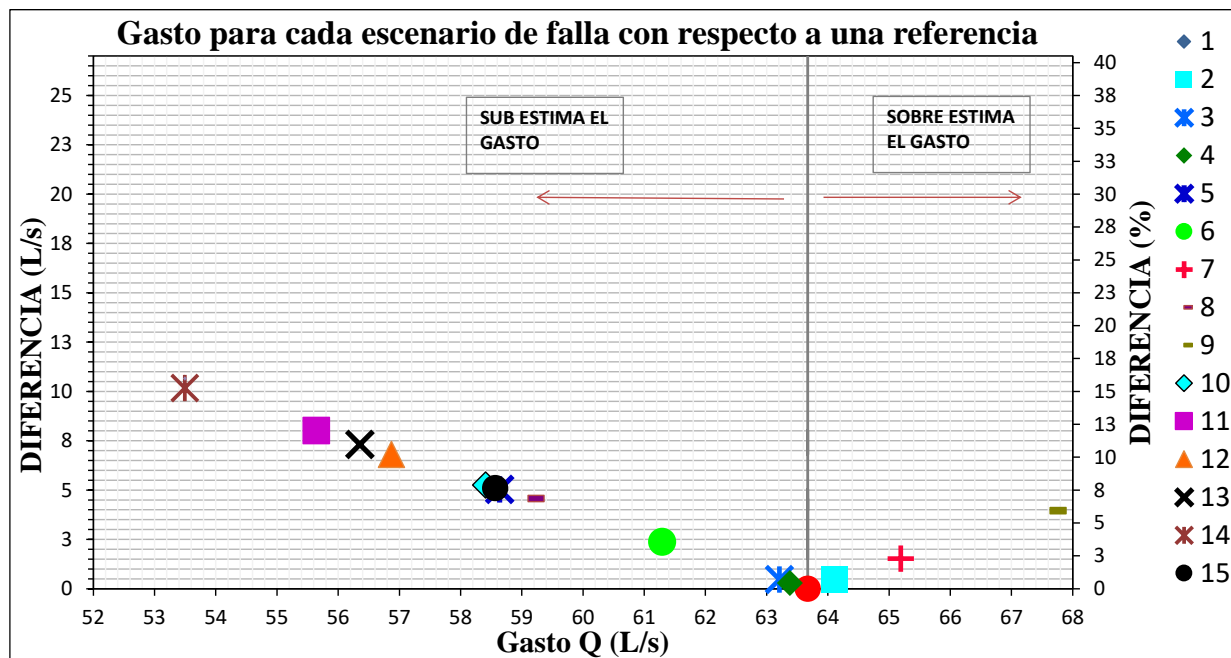


Ilustración 44: Gráfica para un gasto de referencia de 63.7 L/s. Dispersión de fallas.

A continuación, los valores de cada escenario siguen comportándose similar a pesar de ir disminuyendo su gasto. Se nota que en los escenarios 11, 12, 13, 14 y 15 van alejándose un poco más del valor exacto. En la Tabla número 19 se presentan los gastos calculados con la velocidad de la tabla número 18, para un gasto de 37.7 L/s se tienen las siguientes diferencias de medición:

Tabla 14: Valores para $V_m=11.51$ m/s.

RESUMEN DE PRUEBAS EN LABORATORIO						
ESCENARIOS DE FALLA			Velocidad		Diferencia	
#	RANGO	CONCEPTO	V_r (cm/s)	V_i (cm/s)	cm/s	%
1	SIN FALLA	SIN FALLA	11.51	11.51	0.00	0.0
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	11.51	11.54	-0.04	-0.3
3		FALLA PAR 2	11.51	11.36	0.15	1.3
4		FALLA PAR 3	11.51	11.36	0.15	1.3
5		FALLA PAR 4	11.51	9.45	2.06	17.9
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	11.51	11.12	0.38	3.3
7		FALLA 1 y 3	11.51	11.93	-0.43	-3.7
8		FALLA 1 y 4	11.51	9.75	1.75	15.2
9		FALLA 2 y 3	11.51	11.96	-0.45	-3.9
10		FALLA 2 y 4	11.51	9.58	1.93	16.7
11		FALLA 3 y 4	11.51	8.65	2.86	24.9
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	11.51	8.46	3.05	26.5
13		FALLA 1, 3 y 4	11.51	8.57	2.94	25.6
14		FALLA 1, 2 y 4	11.51	8.45	3.05	26.5
15		FALLA 1, 2 y 3	11.51	10.45	1.06	9.2

Tabla 15: Valores para $Q=37.1$ L/s.

RESUMEN DE PRUEBAS EN LABORATORIO						
ESCENARIOS DE FALLA			GASTO		Diferencia	
#	RANGO	CONCEPTO	q_r (L/s)	q_i (L/s)	L/s	%
1	SIN FALLA	SIN FALLA	37.1	37.1	0.0	0.0
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	37.1	37.3	-0.1	-0.3
3		FALLA PAR 2	37.1	36.7	0.5	1.3
4		FALLA PAR 3	37.1	36.7	0.5	1.3
5		FALLA PAR 4	37.1	30.5	6.6	17.9
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	37.1	35.9	1.2	3.3
7		FALLA 1 y 3	37.1	38.5	-1.4	-3.7
8		FALLA 1 y 4	37.1	31.5	5.7	15.2
9		FALLA 2 y 3	37.1	38.6	-1.5	-3.9
10		FALLA 2 y 4	37.1	30.9	6.2	16.7
11		FALLA 3 y 4	37.1	27.9	9.2	24.9
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	37.1	27.3	9.8	26.5
13		FALLA 1, 3 y 4	37.1	27.6	9.5	25.6
14		FALLA 1, 2 y 4	37.1	27.3	9.9	26.5
15		FALLA 1, 2 y 3	37.1	33.7	3.4	9.2

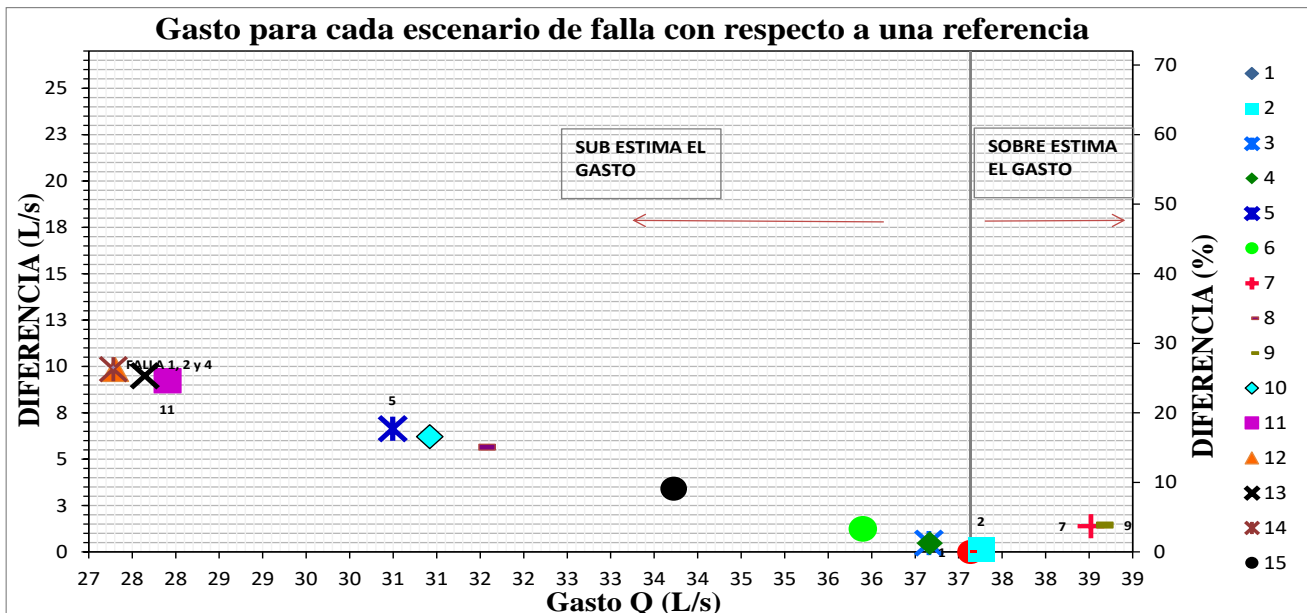


Ilustración 45: Gráfica para un gasto de referencia de 37.1 L/s. Dispersión de fallas.



Y finalmente para el gasto de 14.1 L/s se tiene:

Tabla 16: Valores para $V_m = 4.28$ m/s.

RESUMEN DE PRUEBAS EN LABORATORIO						
ESCENARIOS DE FALLA			Velocidad		Diferencia	
#	RANGO	CONCEPTO	V_r (cm/s)	V_i (cm/s)	cm/s	%
1	SIN FALLA	SIN FALLA	4.28	4.28	0.00	0.0
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	4.28	4.37	-0.09	-2.1
3		FALLA PAR 2	4.28	4.29	-0.01	-0.3
4		FALLA PAR 3	4.28	4.41	-0.13	-3.1
5		FALLA PAR 4	4.28	3.65	0.64	14.9
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	4.28	4.07	0.21	4.9
7		FALLA 1 y 3	4.28	4.58	-0.30	-7.0
8		FALLA 1 y 4	4.28	3.69	0.59	13.8
9		FALLA 2 y 3	4.28	4.57	-0.29	-6.7
10		FALLA 2 y 4	4.28	3.62	0.67	15.6
11	FALLA 3 y 4	4.28	3.39	0.89	20.9	
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	4.28	3.24	1.04	24.3
13		FALLA 1, 3 y 4	4.28	3.38	0.90	21.1
14		FALLA 1, 2 y 4	4.28	3.07	1.22	28.4
15		FALLA 1, 2 y 3	4.28	3.79	0.49	11.4

Tabla 17: Valores para $Q = 14.1$ L/s.

PRUEBAS EN LABORATORIO CON $Q = 14$ L/s							
ESCENARIOS DE FALLA			GASTO		Diferencia		
#	RANGO	CONCEPTO	q_r (L/s)	q_i (L/s)	L/s	%	
1	SIN FALLA	SIN FALLA	14.1	14.1	0.0	0.0	
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	14.1	14.4	-0.3	-2.1	
3		FALLA PAR 2	14.1	14.1	0.0	-0.3	
4		FALLA PAR 3	14.1	14.5	-0.4	-3.1	
5		FALLA PAR 4	14.1	12.0	2.1	14.9	
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	14.1	13.4	0.7	4.9	
7		FALLA 1 y 3	14.1	15.0	-1.0	-7.0	
8		FALLA 1 y 4	14.1	12.1	1.9	13.8	
9		FALLA 2 y 3	14.1	15.0	-0.9	-6.7	
10		FALLA 2 y 4	14.1	11.9	2.2	15.6	
11	FALLA 3 y 4	14.1	11.1	2.9	20.9		
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	14.1	10.6	3.4	24.3	
13		FALLA 1, 3 y 4	14.1	11.1	3.0	21.1	
14		FALLA 1, 2 y 4	14.1	10.1	4.0	28.4	
15		FALLA 1, 2 y 3	14.1	12.4	1.6	11.4	

Con la Ilustración 50 se tiene que si el gasto es mínimo los valores de la medición con sensores de velocidad fallando se irán alejando más, puesto que en un valor pequeño el porcentaje de falla aumenta considerablemente en comparación de un % de falla en un gasto grande.

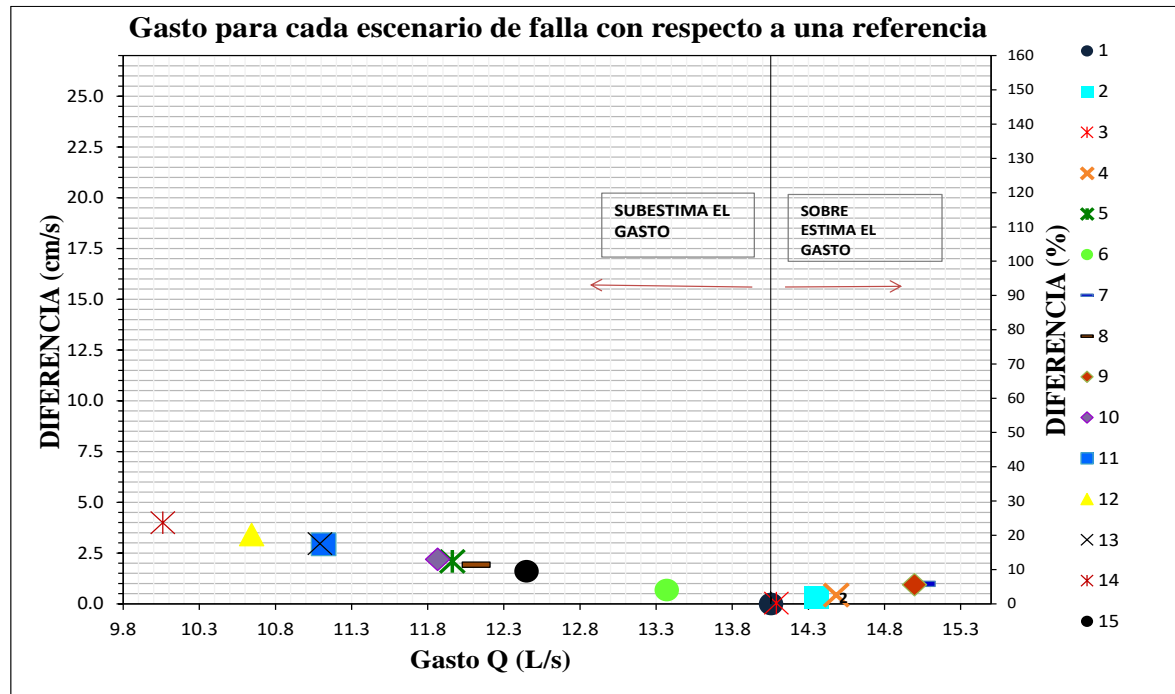


Ilustración 46: Gráfica para un gasto de referencia de 14.1 L/s. Dispersión de fallas.

4.1.1. ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES EN EL CANAL DEL LABORATORIO

En la *Ilustración 47* se tiene un resumen de los resultados en los aforos que se realizaron en el canal rectangular del laboratorio de hidráulica (ver la *Ilustración 1*), en ella se presentan los 4 diferentes gastos, a cada uno se le asignó un color diferente y un símbolo: para un $Q=14.10$ L/s el símbolo en color verde ▲, para un $Q=37.10$ L/s el símbolo en color rojo ■, para un $Q=63.7$ L/s el símbolo en color azul ◆ y para $Q=65.20$ L/s el símbolo en color púrpura ✕, a cada uno de estos gastos se les asigna como el gasto de referencia con las líneas horizontales, cada color de representan el valor de referencia respectivamente, los símbolos (▲ ■ ◆ ✕) que rebasen las líneas horizontales representan a los escenarios de falla que sobreestiman el gasto (miden más volumen del que realmente está pasando en la sección de aforo), por lo contrario, los símbolos (▲ ■ ◆ ✕) que estén por debajo de la línea horizontal corresponden a los escenarios de falla que subestiman el gasto que realmente está pasando.

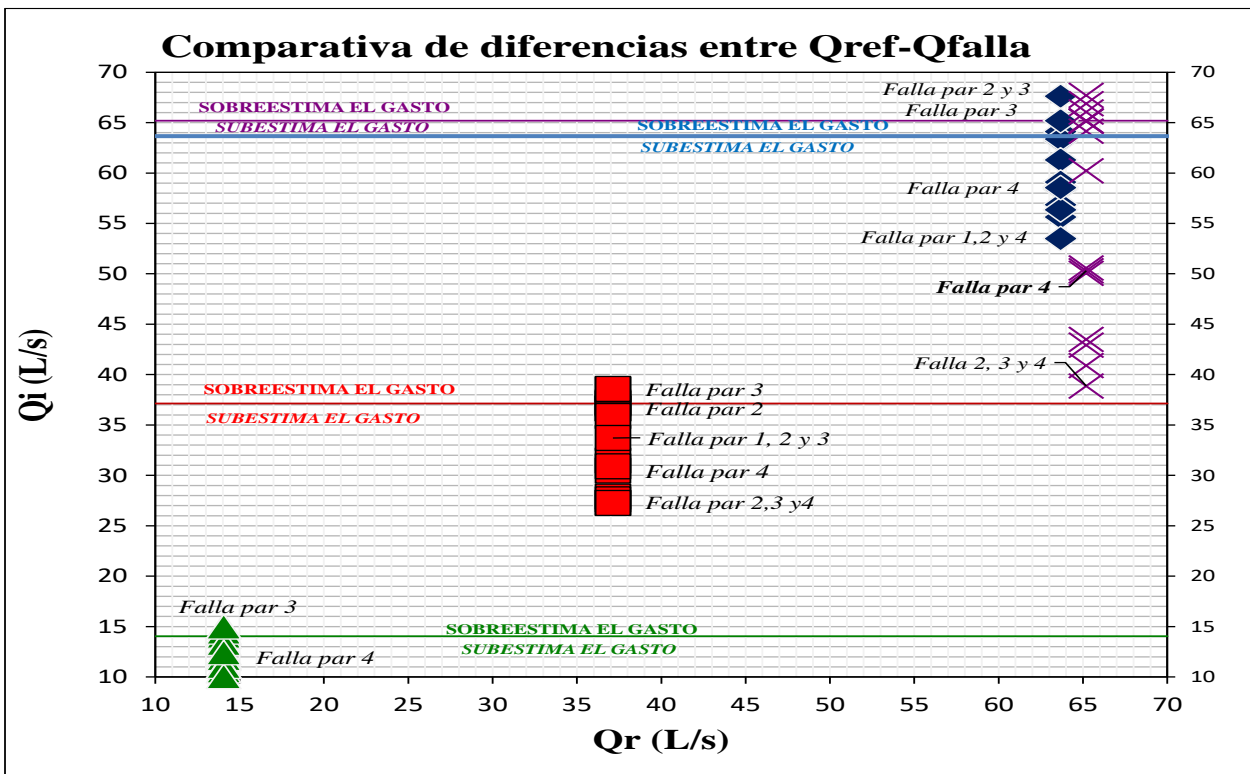


Ilustración 47: Gráfica comparativa de los gastos aforados en el canal rectangular del laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” ubicado en el IMTA:

- ✕ Para un gasto de 65.20 L/s se aforo con los 15 escenarios diferentes propuestos en la **Tabla 8**
— Representa el escenario de referencia para un gasto de 65.20 L/s.
- ◆ Para un gasto de 63.70 L/s se aforo con los 15 escenarios diferentes propuestos en la **Tabla 8**
— Representa el escenario de referencia para un gasto de 63.70 L/s
- Para un gasto de 37.10 L/s se aforo con los 15 escenarios diferentes propuestos en la **Tabla 8**
— Representa el escenario de referencia para un gasto de 37.10 L/s
- ▲ Para un gasto de 14.10 L/s se aforo con los 15 escenarios diferentes propuestos en la **Tabla 8**
— Representa el escenario de referencia para un gasto de 14.10 L/s.



En la **Ilustración 48**, se tienen los mismos resultados de las mediciones en el laboratorio de hidráulica, los gastos 14.1, 37.1, 63.7 y 65.20 L/s con sus 15 escenarios de falla respectivamente. La línea diagonal representa el estado de una lectura bien hecha, los puntos (▲ ■ ◆ ✕) que rebasen la diagonal representan a los escenarios que sobreestiman el gasto (miden más volumen del que realmente está pasando en la sección de aforo), y los puntos que se encuentran debajo de la línea diagonal representan a los escenarios que subestiman al gasto (miden menos del agua que está pasando a través de la sección de aforo).

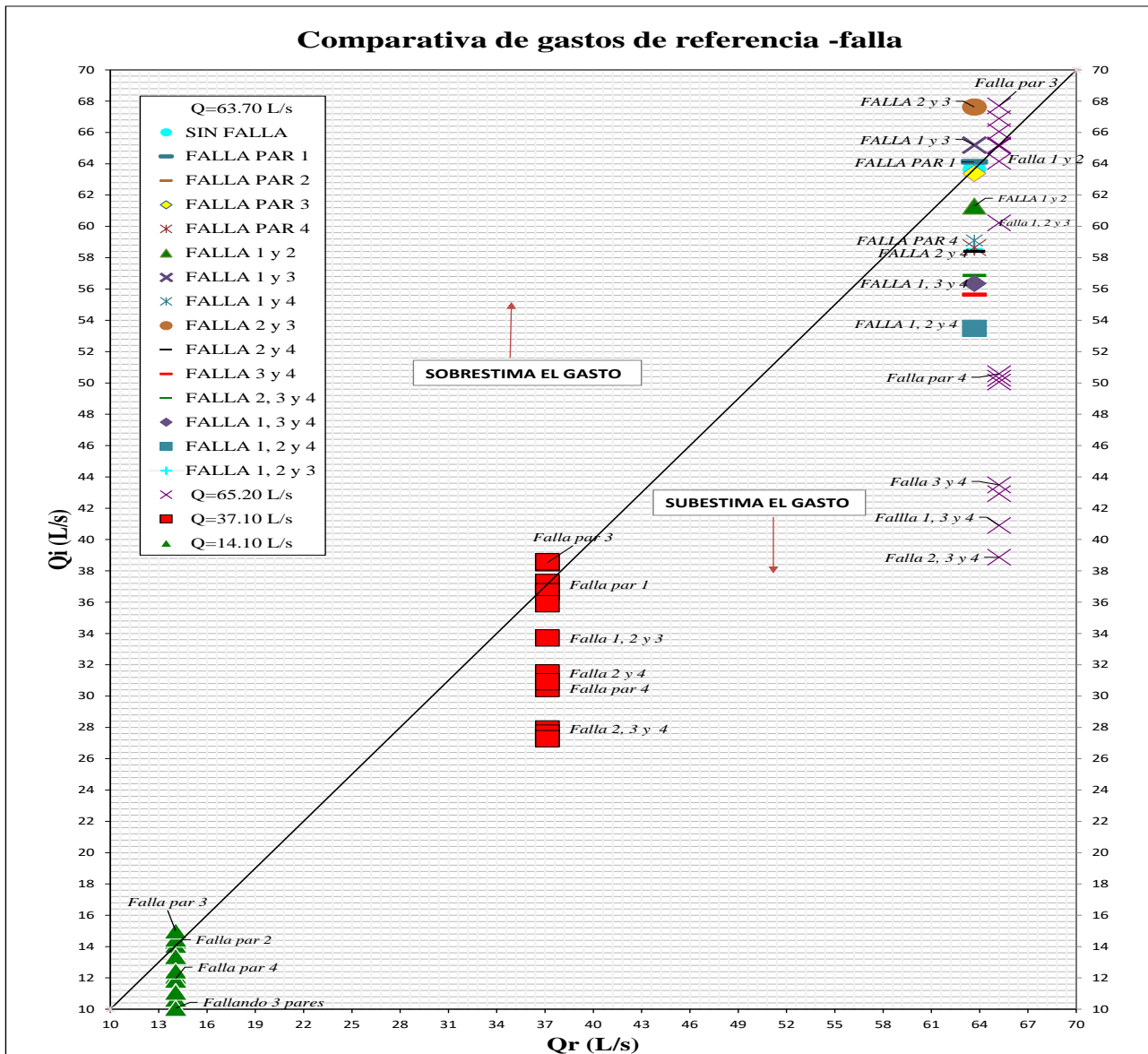


Ilustración 48: Gráfica comparativa de los gastos aforados en el canal rectangular del laboratorio de hidráulica "Enzo Levi" ubicado en el IMTA:

- ✕ Para un gasto de 65.20 L/s se aforo con los 15 escenarios diferentes propuestos en la **Tabla 8**
- Para un gasto de 37.10 L/s se aforo con los 15 escenarios diferentes propuestos en la **Tabla 8**
- ▲ Para un gasto de 14.10 L/s se aforo con los 15 escenarios diferentes propuestos en la **Tabla 8**
- Representa el escenario de referencia para cualquier gasto entre 14.10 – 65.20 L/s.

A continuación, se presenta un esquema que representa la diferencia (en porcentaje), que los escenarios de falla midieron con respecto a un gasto de referencia de $Q= 65.2 \text{ L/s}$, en la **Ilustración 49** se tienen 15 cuadros del mismo canal rectangular (con medidas de $b=60$, $h=70 \text{ cm}$) representando a cada escenario de medición correspondientes a la **Tabla 4**, en cada escenario se ausentará la línea de color azul la cual representa la señal ultrasónica del número de ubicación del sensor de velocidad.

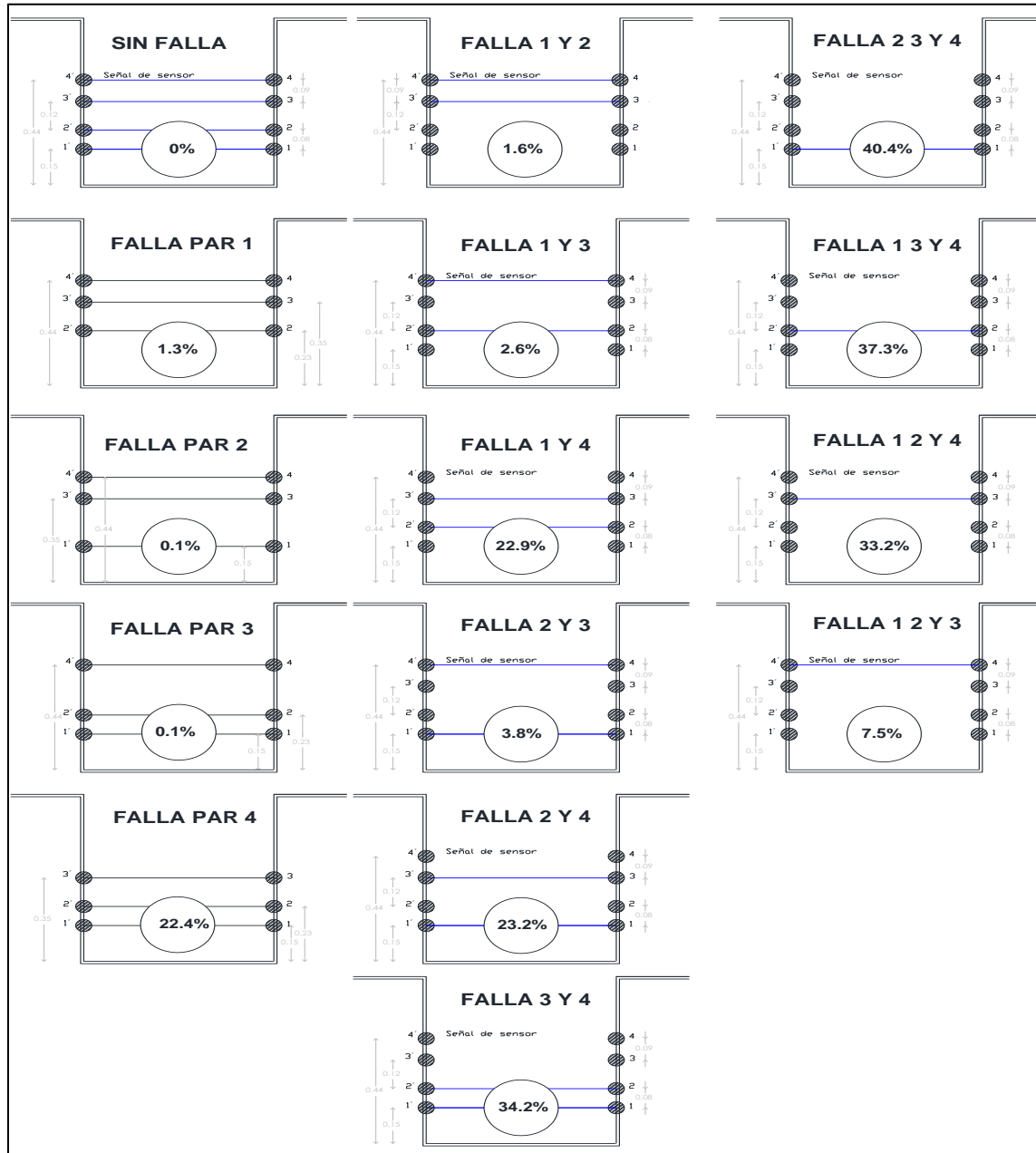





Ilustración 49: Representación esquemática: porcentaje de la diferencia en la medición para cada escenario de falla con un gasto de referencia de 65.20 L/s .

-  ubicación del sensor de velocidad.
-  porcentaje de diferencia en la medición correspondiente al escenario de falla.
-  señal ultrasónica.



4.2 RESULTADOS EN EL CANAL HUMAYA.

Gracias a la participación del DR 010, se realizaron aforos en la estación de medición fija que se encuentra en el km 5+ 000 del canal trapezoidal “Humaya”, se estableció un gasto de $Q = 61.2m^3/s$, algunos registros se descartaron cuando los gastos variaban, porque en la operación del canal no había un gasto permanente, en los canales de campo es común que el gasto instantáneo pueda variar de un momento a otro (algunos motivos pueden ser: cambio en la demanda, apertura y cierres de válvulas, conexiones clandestinas), esto incrementa la incertidumbre, tanto como para descartar la medición con fines de análisis. La **Tabla 22** muestra un resumen del registro de datos en una medición que se adaptó al estudio de esta tesis; para realizar el procedimiento bastó con fijar el gasto de referencia, el cual se encuentra en la columna q_r de la **Tabla 22**, se tiene que para cada escenario de falla se registra durante 10 minutos un gasto instantáneo, con cuatro pares de sensores funcionando correctamente, para evitar cualquier incremento de la incertidumbre por algún cambio.

Los resultados de esta medición se obtuvieron satisfactoriamente, presentando una ligera correlación a las pruebas en laboratorio, la diferencia en las mediciones en canales de campo es que las mayores diferencias vienen provocadas por las fallas en los sensores de las ubicaciones contrarias que las del canal en el laboratorio.

Tabla 18: Valores para un gasto= $61.2 \frac{m^3}{s}$.

PRUEBA 1 HUMAYA DR010						
ESCENARIOS DE FALLA			GASTO		Diferencia	
#	RANGO	CONCEPTO	q_r (m ³ /s)	q_i (m ³ /s)	m ³ /s	%
1	SIN FALLA	SIN FALLA	61.2	61.2	0.0	0.0
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	61.2	63.2	-2.0	-3.3
3		FALLA PAR 2	61.2	60.3	0.9	1.5
4		FALLA PAR 3	61.2	60.9	0.3	0.5
5		FALLA PAR 4	61.2	61.4	-0.2	-0.4
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	61.0	61.4	-0.4	-0.7
7		FALLA 1 y 3	61.0	63.1	-2.1	-3.3
8		FALLA 1 y 4	61.0	63.1	-2.1	-3.4
9		FALLA 2 y 3	61.0	59.6	1.4	2.4
10		FALLA 2 y 4	61.0	61.1	-0.1	-0.2
11	FALLA TRES PARES	FALLA 3 y 4	61.0	66.5	-5.5	-9.1
12		FALLA 2, 3 y 4	61.0	62.8	-1.8	-2.9
13		FALLA 1, 3 y 4	61.0	64.1	-3.1	-5.0
14		FALLA 1, 2 y 4	61.0	62.0	-1.0	-1.6
15		FALLA 1, 2 y 3	61.0	57.0	4.0	6.5

Graficando los valores de cada escenario de la **Tabla 22** en la **Ilustración 50**, es fácil apreciar la traspuesta de las diferencias que generan las fallas en los sensores con respecto a la ubicación del sensor de velocidad. Para los resultados en el canal Humaya se tiene que cuando los sensores cercanos al fondo del canal fallan, se genera la mayor diferencia en la medición y, además, miden más volumen de lo que realmente está pasando. A diferencia de los resultados en laboratorio, en donde se tiene que los sensores ubicados cerca de la superficie libre (la ubicación del par cuatro) son los que subestiman el gasto (miden menos volumen del que realmente pasa), estos mismos sensores son los que provocan la mayor diferencia en la medición.

En resumen, se observó que la medición en el canal Humaya, se tiene que los sensores de la ubicación 4 miden con la menor diferencia (0.4%), pero si falla el par de la ubicación uno se genera una diferencia de 3.3% entonces se puede decir que, para gastos grandes, la ubicación del sensor que se debe atender para corregir, es el par de la ubicación uno (fondo del canal).

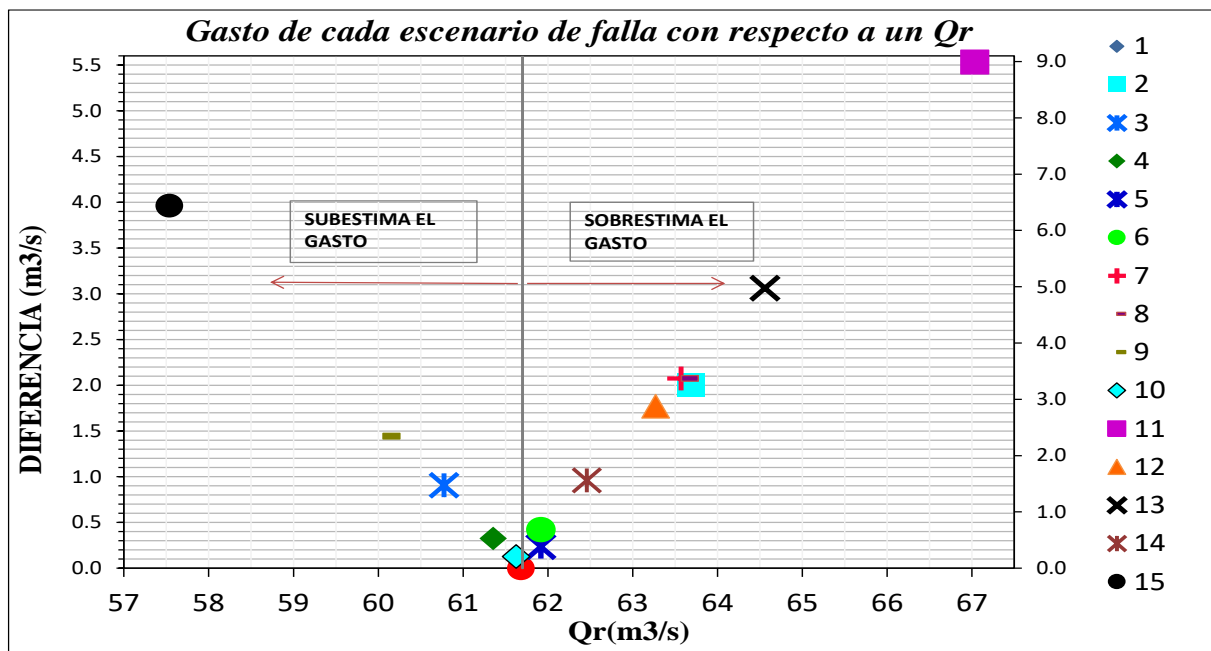


Ilustración 50: Grafica comparativa de los 15 escenarios de una medición con $Q=61.2$ m3/s.

En la **Tabla 23**, se presentan los datos de las velocidades medidas con el Aforador Tiempo de Travesía en el canal Humaya (con las velocidades medidas el modular del ATT realiza el cálculo del gasto, **Tabla 22**), se tiene que los sensores de la ubicación 4 miden con la menor diferencia (0.4%), pero si falla el par de la ubicación uno se genera una diferencia de 3.3% por lo tanto, la mayor diferencia la provoca una falla en el par de la ubicación uno (fondo del canal).

Tabla 19: Valores para una Velocidad media= $1.55 \frac{m}{s}$.

RESUMEN DE PRUEBA 1 EN DR010 HUMAYA						
ESCENARIOS DE FALLA			Velocidad		Diferencia	
#	RANGO	CONCEPTO	Vr (m/s)	Vi (m/s)	m/s	%
1	SIN FALLA	SIN FALLA	1.55	1.55	0.00	0.0
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	1.55	1.60	0.05	3.3
3		FALLA PAR 2	1.55	1.53	0.02	1.5
4		FALLA PAR 3	1.55	1.54	0.01	0.5
5		FALLA PAR 4	1.55	1.56	0.01	0.4
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	1.55	1.56	0.01	0.7
7		FALLA 1 y 3	1.55	1.60	0.05	3.3
8		FALLA 1 y 4	1.55	1.60	0.05	3.4
9		FALLA 2 y 3	1.55	1.51	0.04	2.4
10		FALLA 2 y 4	1.55	1.55	0.00	0.2
11		FALLA 3 y 4	1.55	1.68	0.14	9.1
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	1.55	1.59	0.04	2.8
13		FALLA 1, 3 y 4	1.55	1.62	0.08	4.9
14		FALLA 1, 2 y 4	1.55	1.49	0.05	3.7
15		FALLA 1, 2 y 3	1.55	1.44	0.10	6.4

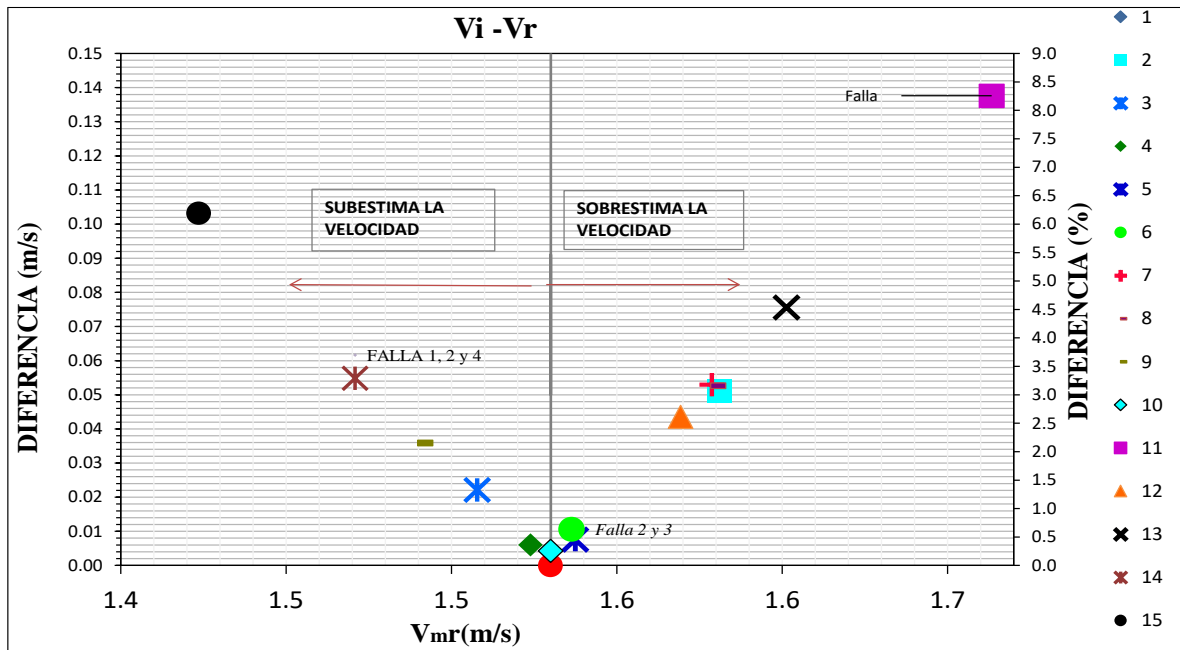


Ilustración 51: Grafica comparativa de los 15 escenarios de una medición con $V_m=1.55$ m/s



4.3. RESULTADOS EN EL CANAL ROSALES.

Bajo las mismas condiciones que en el canal “Humaya”, y gracias al apoyo del DR 010, se realizó una medición en el canal trapezoidal “Rosales” para comparar resultados en gastos grandes, este último canal es de menor dimensión (ver *Capítulo 3.6.2*), la cantidad de agua que pasa en este canal no varía mucho, por lo tanto, en condiciones controladas se estableció un gasto de $31.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Los valores en la **Tabla 24** confirman que la mayor diferencia se presenta en la falla del par de la ubicación uno (escenario número 2):

Tabla 20 Valores para un gasto= $31.7 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.

PRUEBA 1 CANAL ROSALES DR010						
ESCENARIOS DE FALLA			GASTO		Diferencia	
#	RANGO	CONCEPTO	q _r (m ³ /s)	q _i (m ³ /s)	m ³ /s	%
1	SIN FALLA	SIN FALLA	31.7	31.7	0.0	0.0
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	31.7	32.8	-1.1	-3.4
3		FALLA PAR 2	31.7	31.9	-0.2	-0.6
4		FALLA PAR 3	31.7	31.5	0.2	0.5
5		FALLA PAR 4	31.5	32.0	-0.4	-1.4
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	31.7	32.8	-1.1	-3.6
7		FALLA 1 y 3	31.7	32.8	-1.2	-3.5
8		FALLA 1 y 4	31.9	33.1	-1.2	-3.8
9		FALLA 2 y 3	31.6	31.3	0.3	0.9
10		FALLA 2 y 4	31.8	32.2	-0.5	-1.4
11		FALLA 3 y 4	31.7	33.2	-1.5	-4.7
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	31.6	31.5	0.0	0.1
13		FALLA 1, 3 y 4	31.6	32.5	-0.9	-2.7
14		FALLA 1, 2 y 4	31.6	31.2	0.4	1.4
15		FALLA 1, 2 y 3	31.6	28.8	2.7	8.7

Los escenarios 2, 6, 7, 8 y 15 representan las diferencias mayores en la medición, y se puede observar que el comportamiento sigue siendo similar al canal anterior porque en dichos escenarios siempre está presente la falla del par de sensores de velocidad de la ubicación uno (el más cercano al fondo del canal). Sin embargo, se puede observar alteraciones del porcentaje en la diferencia de medición para la ubicación cuatro, debido que a diferencia del canal Humaya, el canal Rosales lleva menos de la mitad del gasto que se utilizó para realizar el registro de datos.

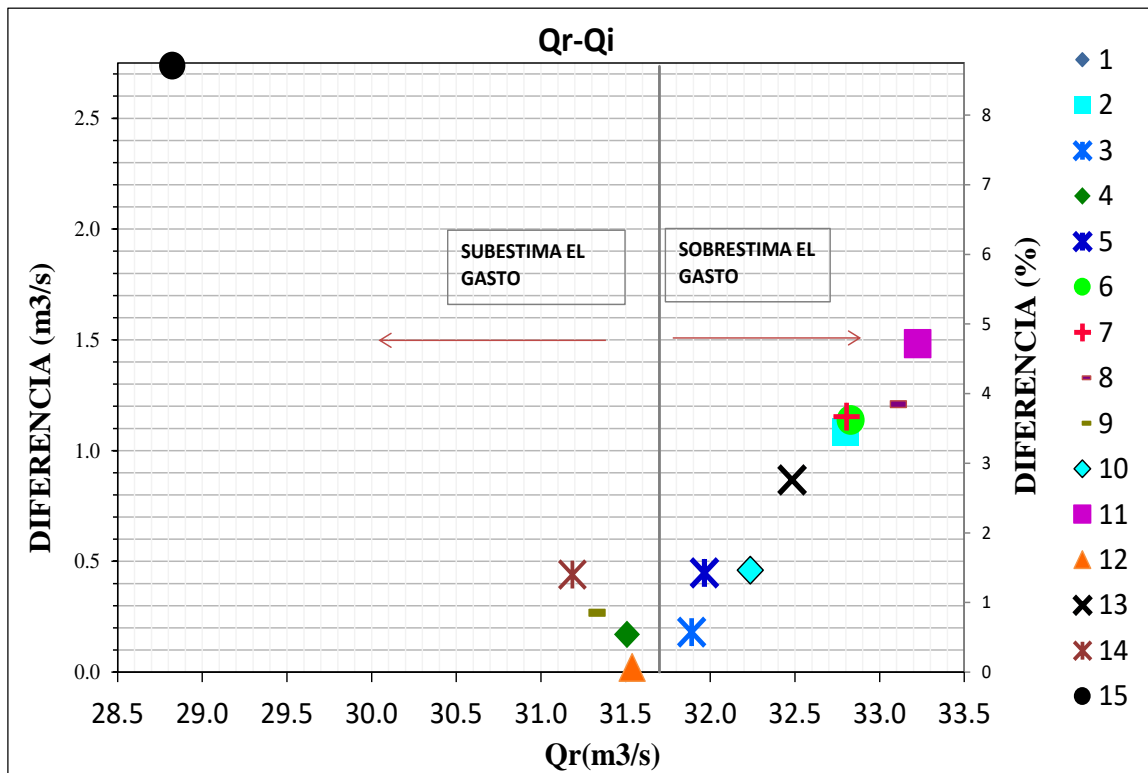


Ilustración 52: Grafica comparativa de los 15 escenarios de una medición con $Q=31.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para dar mayor claridad en las diferencias que provocó la ubicación del par uno, se agrega la **Tabla 25** y la **Ilustración 59**, en donde se observan los mismos valores de diferencias en la velocidad registrada durante la medición en el canal Rosales.

Tabla 21: Valores para una $V_m=1.36 \frac{m^3}{s}$.

Vm en CANAL ROSALES DR010						
ESDENARIOS DE FALLA			VeloDidad		DiferenDia	
#	RANGO	DONDEPTO	Vr (m/s)	Vi (m/s)	m/s	%
1	SIN FALLA	SIN FALLA	1.366	1.366	0.00	0.0
2	FALLA UN PAR	FALLA PAR 1	1.366	1.413	0.05	3.5
3		FALLA PAR 2	1.366	1.375	0.01	0.6
4		FALLA PAR 3	1.365	1.358	0.01	0.5
5		FALLA PAR 4	1.359	1.378	0.02	1.4
6	FALLA DOS PARES	FALLA 1 y 2	1.366	1.415	0.05	3.6
7		FALLA 1 y 3	1.364	1.414	0.05	3.7
8		FALLA 1 y 4	1.373	1.425	0.05	3.8
9		FALLA 2 y 3	1.360	1.349	0.01	0.8
10		FALLA 2 y 4	1.370	1.391	0.02	1.5
11	FALLA 3 y 4	1.370	1.433	0.06	4.7	
12	FALLA TRES PARES	FALLA 2, 3 y 4	1.362	1.361	0.00	0.1
13		FALLA 1, 3 y 4	1.365	1.402	0.04	2.8
14		FALLA 1, 2 y 4	1.365	1.346	0.02	1.4
15		FALLA 1, 2 y 3	1.362	1.244	0.12	8.7

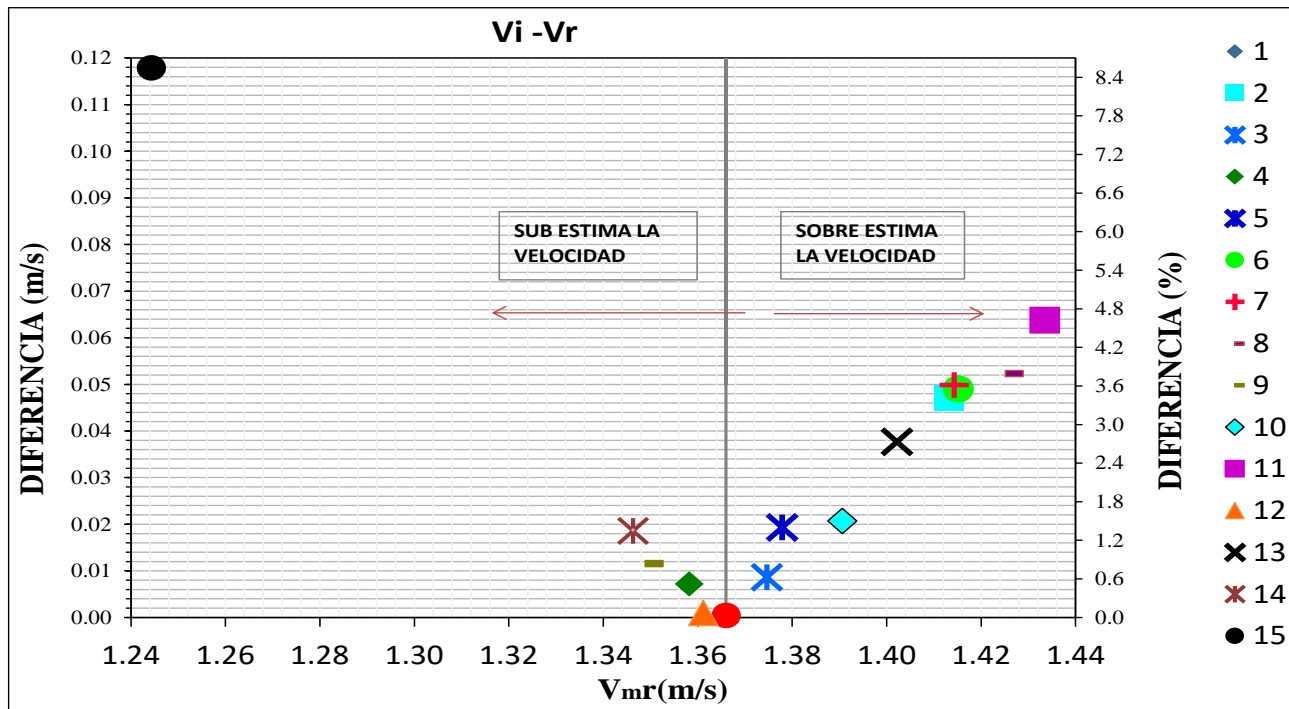


Ilustración 53: Grafica comparativa de los 15 escenarios de una medición con $V_m=1.36 \text{ m/s}$.



CAPITULO V: CONCLUSIONES

5.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS:

Con los resultados presentados, se cierran los objetivos de esta tesis, que fueron **evaluar la importancia de la medición** cuando un Aforador de Tiempo de Travesía funciona correctamente y cuando falla en la señal de sus sensores de velocidad,

Los resultados de las mediciones en el laboratorio, optimizó el análisis de las fallas en canales en campo; contrariamente a lo esperado, la problemática aplicada en campo no se relaciona con el mismo orden de falla por ubicación de los sensores.

Sin embargo, es posible afirmar que existe una diferencia *en la medición, y dependen de la posición del sensor de velocidad que falla*, esto se valida con los **resultados obtenidos tanto en el laboratorio como en campo**, en ellos se observó:

- ❑ Que, *en canales a nivel laboratorio*, los sensores ubicados cerca de la superficie libre (**par 4**), están relacionados con la mayor diferencia de la medición (**subestimando el gasto con un 7.9-22.4 % de diferencia**).
- ❑ Cuando el **par 3** se encuentre fallando, la diferencia será la menor (**sobrestimando el gasto con menos del 3.8%**).
- ❑ Evidentemente, a partir del escenario 12, con *3 pares fallando*, evidentemente se tienen los valores más alejados con relación al gasto de referencia, estos van del 8% a un 40.2% de diferencia, las propuestas con tres pares fallando se realizaron con el fin de comparar las demás propuestas y así encontrar una clasificación de fallas.
- ❑ **La falla del par 4** es del mismo orden que con el escenario de falla 9 (*dos pares fallando* para todos los gastos probados en esta tesis que va del **3.9 al 6.7% de diferencia**) y también al escenario 15 (*tres pares fallando*) **que va del 8% al 11.4%**.

- ❑ En *el canal Humaya*, el **par 4**, **sobrestima** el gasto con un 0.4% de diferencia.
- ❑ El **par 3** (escenario 4) **subestima el gasto con 0.5%** de diferencia, Sin embargo, se pueden despreciar las diferencias ya que no rebasan lo establecido por la ISO 6416.
- ❑ El **par 1** (escenario 2) **sobreestima el gasto**, es la mayor diferencia con **3.3%**.

- ❑ Para el *canal Rosales* se estableció un $Q = 31.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ya que es de menor dimensiones, y al igual que en el canal Humaya, la mayores diferencias están en el par 1.

- ❑ En el **par 1** (escenario 2), **sobrestima el gasto** que está pasando (se tiene la mayor diferencia con un **3.4%**).
- ❑ El **par 3** (escenario 4) **subestima el gasto con 0.5%** de diferencia, Sin embargo, se pueden despreciar las diferencias ya que no rebasan lo establecido por la ISO 6416.
- ❑ El **par 4** (escenario 5) **sobreestima el gasto** con menos del **1.4%** de diferencia.



Al comparar los resultados de laboratorio con las mediciones en el *canal Humaya* y en el *canal Rosales*, se evidencia que la condición de falla traspone las ubicaciones de los sensores de velocidad, es decir, si para el canal del laboratorio *se subestima* el gasto porque el **par 4 se encuentra fallando**, en canales de *campo se sobrestima* la misma diferencia, pero con el **par 1 fallando**. Las diferencias traspuestas de los canales podrían explicarse por las bajas velocidades que maneja un canal de pequeñas dimensiones, ya que en el inciso primario 5.2.3 “Aforadores ultrasónicos” de la norma NMX-AA-179-SCFI-2018, se especifican dimensiones de por lo menos 6 m de ancho de canal.

Se debe tener en cuenta de que a pesar de la traspuesta de las ubicaciones que generan diferencias, el orden de falla es el mismo para el par que genera la mayor diferencia tanto en laboratorio como en canales en campo.

Con esta investigación se tiene que las ubicaciones relevantes son: *el par cercano al fondo (par 1, escenario 2) y la superficie libre (par 4, escenario 5)*, por lo que es posible plantear una nueva hipótesis que relaciona una falla del algoritmo del equipo ATT al realizar los cálculos del gasto, al momento de aplicar los métodos que se encuentran en la ISO 6416, método de la sección intermedia o método de la sección promedio.

Es interesante observar que en varios de los casos de este estudio se pueden *aceptar los datos recolectados de una medición aun cuando existió una falla en los sensores de velocidad, siempre y cuando la incertidumbre esté por debajo del 6% (como establece la norma).*

Estas diferencias pueden ser interpretadas como una sobre instrumentación de los equipos ultrasónicos debido a la mínima diferencia en varios escenarios en el estudio. El resultado sugiere, contrario al manual de usuario del equipo (Rittmeyer A. , 2012) y al inciso 6.5.1 de la NMX-AA-179-SCFI-2018, que los equipos de esta especificación pueden medir con un par de sensores de velocidad sin diferencias considerables, siempre que se elija la ubicación correcta.

Hay poca evidencia que sugiera que los proveedores recomienden instalar más equipo del necesario, sin embargo, los resultados son consistentes con descartar alteraciones en las mediciones cuando hay fallas en los sensores que no rebasen el 3-6% de diferencia. Existen varias explicaciones posibles para estos resultados que se pueden esclarecer contactando al proveedor del equipo y proponer un estudio en su algoritmo de cálculo. El mecanismo por el que opera el sistema de cálculo del equipo ATT no se comprende totalmente, debido a que la programación del algoritmo del fabricante son un enigma.



5.2. CONCLUSIONES GENERALES:

En la práctica siempre se busca es reducir fallas, para evitar PARA los registros en las estaciones de medición.

Gracias a la comparativa de mediciones en el laboratorio con los dos canales pertenecientes al DR 010, se logró determinar la diferencia que existe en una medición con escenarios de fallas en los sensores de velocidad de un ATT. También se demostró que en campo no siempre se puede cumplir con los requerimientos de las normas o de las guías existentes para las mediciones del gasto, por ello la importancia de proponer mejoras en la medición no solo de carácter científico, más correctamente técnico.

Con los diferentes escenarios de falla propuestos, se logró encontrar un orden de falla en la medición con respecto a cada ubicación y se verificó que, efectivamente el comportamiento de falla es similar en diferentes canales de riego.

Además, es posible avanzar hacia otro estudio para establecer el límite de las diferencias en las mediciones con falla, introduciendo nuevos factores, desde un nuevo enfoque, por ejemplo, se puede presentar una propuesta de corrección independiente del algoritmo del equipo, o bien proponer posibles correcciones al proveedor utilizando esta tesis como estado del arte.

Para desarrollar nuevos objetivos, por decir, más científicos, se puede corregir el algoritmo del equipo. Bastaría empezar aplicando los valores de velocidad al algoritmo de la ISO 6416, tratando de predecir cómo funciona la programación de las marcas del ATT. Para el flujo de fondo se propone construir un modelo logarítmico y generar el primer coeficiente, con este análisis calcular el gasto del algoritmo del equipo.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ❑ W. Schmid y R.Lazos. (mayo de 2000). *Centro Nacional de Metrología Mexico*. Obtenido de Guía para estimar la incertidumbre de la medición: <http://www.cenam.mx>
- ❑ EC 0914, IMTA. (2017). *EC 0914 Asesoría en sistemas fijos de medición de gasto para canales*. Jiutepec, Morelos: CONAGUA.
- ❑ Estadísticas del Agua en México, CONAGUA. (Edición 2011). *Estadísticas del Agua en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- ❑ G., S. A. (2009). *Hidráulica de canales*. México, D.F.: Facultad de ingeniería, UNAM.
- ❑ GUM. (1995). *Guide to the Expression of uncertainty in Measurement* (3 ed.). (I. I. BIPM, Ed.) España, España: BIPM.
- ❑ ISO 748. (1997). *Medición del flujo de líquido en canales abiertos - Métodos de área de velocidad*.
- ❑ ITM. (2007). *Estadística Básica*. ISBN 9789589831410. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Instituto Tecnológico Metropolitano.
- ❑ Jiménez, a. j. (s.f.). Empleo de la técnica “tiempo de tránsito ultrasónico” para la medición de flujo sanguíneo en vasos: resultados obtenidos.
- ❑ Lázaro Redondo¹*, A. R. (2017)). Ruido subacuático: fundamentos, fuentes, cálculo y umbrales de contaminación ambiental/Underwater Noise: Fundamentals, Sources, Assessments and Acoustic Contamination Thresholds.
- ❑ Mackenzie, K. V. ((1981)). “Nine-term equation for sound speed in the oceans”. *J. Acoust. Soc. Am.* 70, 807-12.
- ❑ NMX-AA-179-SCFI. (2017). “Medición de volúmenes de aguas nacionales usados, explotados o aprovechados”.
- ❑ Norma ISO 6416. (2004). “Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method (3 ed.)
- ❑ Risonic. (2012). *Risonic modular open channel measurement, Evaluation of uncertainties Rittmeyer* (Vol. 22.040.0006100.001.02.4.4).
- ❑ Rittmeyer. (2016). *Rittmeyer Instrumentation Controller (RICTRL) User Manual by Rittmeyer AG, CH-6341 Baar* ([21.730.0067760.001.01.4.5] ed.).
- ❑ Rittmeyer Ultrasonic Level transducer. (2007). *Manual MPUL06* . 21.210.0067720.006.02.4.4.
- ❑ Rittmeyer, A. (2012). *Instrumentation RISONIC modular Channel Transducer Type K [22.210.006680x.001.04.4.4], CH-6341 Baar*.
- ❑ Serge Tamari & Ariosto Aguilar. (2010). *Guía: Aforo en canales y presas. Selección de una técnica*. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- ❑ Sirio Moreno Armenta, A. S. (16 de Octubre de 2018). *Análisis comparativo de la operación del Distrito de Riego 010 Culiacán Humaya en 6 ciclos agrícolas*. (C. N. Drenaje, Editor) Recuperado el 19 de 11 de 2020, de COMEII: <http://www.comeii.com/comeii2018/assets/ponencias/presentacion/18021.pdf>
- ❑ V Arroyo & Cesia Millán. (2010). Adaptación de métodos de integración de medición con sistemas acústicos multipares: un caso de geometría asimétrica. *XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*, 3-6.
- ❑ Victor Arroyo, Mauricio Escalante, Cesia Millán & Victor Mejía. (2009). Medición del flujo volumétrico en un canal de riego utilizando un medidor ultrasónico. *IX CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA*, 12.



7. BIBLIOGRAFÍA

- ❑ Lord Rayleigh, John William Strutt (1896), MacMillan & Co, *The Theory of Sound* 2 (2 edición), Pg. 154-160.
- ❑ Ryer, A. (1997). *Manual de medición de luz*, Newburyport, MA: International Light. Pg. 42-45
- ❑ Harry Ku (1966). *Notas sobre el uso de fórmulas de propagación de errores*, J Research of National Bureau of Standards-C. Ingeniería e Instrumentación, vol. 70C, No.4 , págs. 263-273.
- ❑ Cervates, J. (2007). *Dinámica de fluidos*. México D.F. Facultad de ingeniería UNAM.
- ❑ Chow Ven Te, (1959), *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, Kogakusha, Japón.
- ❑ Freeman, L.A. Carpenter, M.A. Roseberry, D.O., Rousseau, J.P., Unger, R, Mclean, J.S. (2004), *Use of Submersible Pressure Transducers in Water-Resources Investigations*, Chapter A- Section A Book 8, U.S Geological Survey, Reston Virginia.
- ❑ French R (1992), *Hidráulica de canales abiertos*, MacGraw-Hil Inc. D.F. México.
- ❑ Grant D.M., Dawson B.D. (2001). *ISCO open channel flow measurement handbook*. ISCO (ed.) Lincoln (Nebraska), EEUU.
- ❑ ISO 1985^a *Liqui flow measumerement in open channels – Velocity area methods- Colletion and processing of data for determination of error in measurement (ISO 1088-1985)*, International Organizatio of Standardization (ISO), Genève.
- ❑ ISO 1997 c. *Measurement of liquid flow in open channel – General guidelines for selection of method (ISO/TR 8363:1997)* International Organization for Standardization (ISO), Genève.
- ❑ Kennedy A., Fragoza F., Peña E., Eduardo. J, (2000), *Manual de Aforos*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.
- ❑ Sotelo Ávila G, (2002), *Hidráulica de canales*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México.
- ❑ Tamari Serge, Aguilar Ariosto, Mejía Víctor, Álvarez R., Ortega S., (2006), *Instrumentación de la estación hidrométrica “Los Aldamas”*, Nuevo León. En: Gómez-Balandra M.A. et al (ed.), *Anuario IMTA*.
- ❑ U.S. Department of interior Bureau of Reclamation (1997), *Water Measurement Manual*, U. S. Government Printing Office, Washington, EEUU.

8. ANEXOS

8.1. APENDICE A: FORMATOS Y PLANOS.

Formato utilizado para la descripción de sitio para la medición del gasto en canales.
Estudio sobre la falla de sensores de velocidad en un sistema multipar.
Maestría en Ingeniería en Sistemas Hidráulicos.
Mayo, 2020.

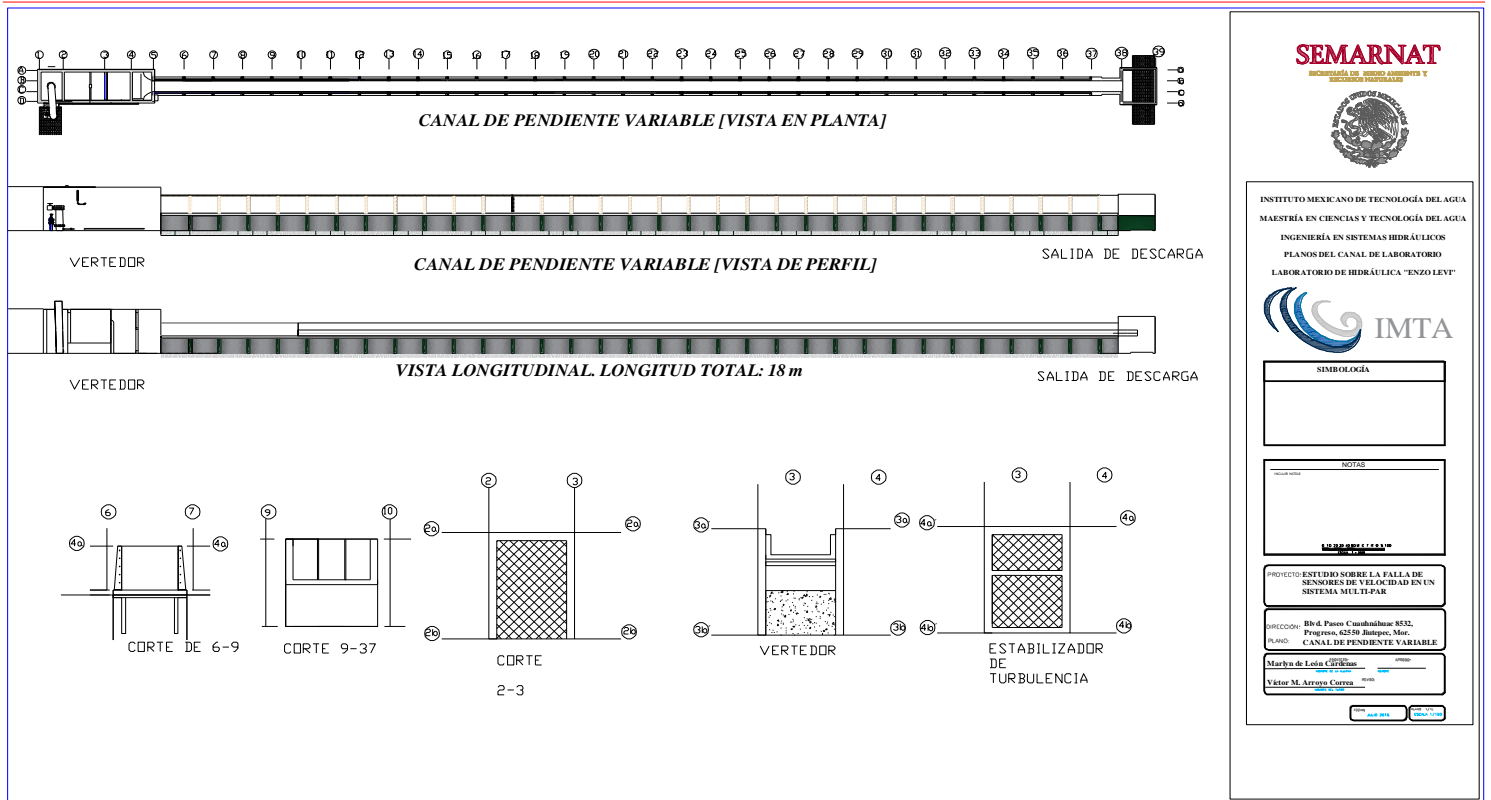
FORMATO PARA PRUEBAS DE AFORO CON AFORADOR DE TIEMPO DE TRAVESÍA									
FECHA:						SENSORES DE VELOCIDAD			
ELABORADO POR:						PAR 1	ÁNGULO θ	A	Lizq-der:
UBICACIÓN:						PAR 2	ÁNGULO θ	B	Lizq-der:
NOMBRE DEL CANAL:						PAR 3	ÁNGULO θ	A	Lizq-der:
MATERIAL DEL CANAL:						PAR 4	ÁNGULO θ	B	Lizq-der:
ESTADO DEL CANAL:									
Ancho de canal b (cm):									
Ancho B (m):									
PENDIENTE S(m):									
ALTURA H(m):									
BORDO LIBRE:									
LONGITUD:									
MODELO ATT:									
TEMPERATURA DEL AGUA:									
EXISTEN AZOLVES:									
CALIDAD DEL AGUA:									
DATOS OBTENIDOS									
#			PROFUNDIDAD d (m)	AREA HIDRÁULICA (m ²)	VELOCIDAD V (m/s)	Gasto Q=V*A (m ³ /s)	DIFERENCIA DE VELOCIDAD		Observaciones
							m/s	%	
1									
2									
3									



CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																													
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA																													
MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS DEL AGUA (ISH)																													
"ESTUDIO SOBRE LA FALLA DE TRANSDUCTORES, EN UN SISTEMA MULTI-PAR".																													
MARLYN DE LEÓN CÁRDENAS 2018108-0164																													
GENERACIÓN: 2018-2020												TUTOR : DR. VÍCTOR MANUEL ARROYO CORREA																	
HORARIO: LUNES-VIERNES DE 9:00-18:00 HRS												AGO-DIC 2018				ENE-JUL 2019				AGO-DIC 2019				ENE-JUL 2020					
Número de actividad	ACTIVIDAD	P	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
1	INTRODUCCIÓN	Selección del tema de tesis	P	R																									
2	VISITA DE INDUCCIÓN	Recorrido en las instalaciones del IMTA (Posgrado, laboratorios, biblioteca).	P	R																									
3		Reconocimiento de los equipos y materiales en el laboratorio de hidráulica.	P	R																									
4		Obtención de literatura, (manuales, artículos y normas) proporcionada por el tutor.	P	R																									
5	PRIMERA INTERACCIÓN CON LOS EQUIPOS ULTRASÓNICOS	Preparar: geometría del canal, alimentación eléctrica, alimentación de agua, herramientas y equipo necesario.	P	R																									
6		Calibración de equipo, instalación, y realización de pruebas.	P	R																									
7		Captura e interpretación de datos obtenidos en el laboratorio.	P	R																									
8	USO DE SOFTWARES.	Uso de AutoCAD para dibujo del canal con su línea de alimentación, vertedor y demás componentes.	P	R																									
		Configuración en PC mediante la pag. Web de "Rittmeyer" para la adquisición y procesamiento de datos que la unidad electrónica RITMOUSTT captura.	P	R																									
		Planeación: escenarios de prueba, fallas de los sensores, ubicaciones, incertidumbre, investigación de literatura y normas.	P	R																									
9	PLAN DE TRABAJO	Planeación: escenarios de prueba, fallas de los sensores, ubicaciones, incertidumbre, investigación de literatura y normas.	P	R																									
10	PRIMER ESCENARIO DE UNA MEDICIÓN EN UN CANAL CON EL EQUIPO ULTRASÓNICOS	Instalación del módulo tiempo de tránsito con sus componentes en un canal de pendiente variable.	P	R																									
11		Instrumentación, pruebas de hermeticidad, reparación de fugas o problemas electricos.	P	R																									
12		Realización de pruebas sin ningun error	P	R																									
13		Captura y análisis de resultados.	P	R																									
14		Desinstalación	P	R																									
15	SEGUNDO ESCENARIO DE UNA MEDICIÓN EN UN CANAL CON EL EQUIPO ULTRASÓNICOS	Instrumentación, pruebas de hermeticidad, reparación de fugas o problemas electricos.	P	R																									
16		Realización de pruebas con la falla de un par de sensores de velocidad a una altura "h1"	P	R																									
17		Captura y análisis de resultados.	P	R																									
18	TERCER ESCENARIO DE UNA MEDICIÓN EN UN CANAL CON EL EQUIPO ULTRASÓNICOS	Instrumentación, pruebas de hermeticidad, reparación de fugas o problemas electricos.	P	R																									
19		Realización de pruebas con la falla del segundo par de sensores de velocidad a una altura "h2".	P	R																									
20		Captura y análisis de resultados.	P	R																									
21	CUARTO ESCENARIO DE UNA MEDICIÓN EN UN CANAL CON EL EQUIPO ULTRASÓNICOS	Instrumentación, pruebas de hermeticidad, reparación de fugas o problemas electricos.	P	R																									
22		Realización de pruebas con la falla del tercer par de sensores a una altura "h3".	P	R																									
23		Captura y análisis de resultados.	P	R																									
24	QUINTO ESCENARIO DE UNA MEDICIÓN EN UN CANAL CON EL EQUIPO ULTRASÓNICOS	Instrumentación, pruebas de hermeticidad, reparación de fugas o problemas electricos.	P	R																									
25		Realización de pruebas con la falla del cuarto par de sensores a una altura "h4".	P	R																									
26		Captura y análisis de resultados.	P	R																									
27	SEXTO ESCENARIO DE UNA MEDICIÓN EN UN CANAL CON EL EQUIPO ULTRASÓNICOS	Instrumentación, pruebas de hermeticidad, reparación de fugas o problemas electricos.	P	R																									
28		Realización de pruebas con un factor de corrección para la falla de cualquier par de sensores de velocidad.	P	R																									
29		Captura y análisis de resultados.	P	R																									
30	PRUEBAS EN CANALES EN CAMPO.	Instalación del equipo tiempo de tránsito en campo, en un canal de pendiente variable.	P	R																									
31		Realización de pruebas	P	R																									
32		Realización de pruebas, corrigiendo la técnica con los resultados de la tesis.	P	R																									
33		Captura y análisis de resultados.	P	R																									
34		Desinstalación	P	R																									
35	INFORME	Elaboración de tesis con los métodos ya utilizados	P	R																									
		Análisis y comparación de los resultados	P	R																									
		Creación de un factor de corrección	P	R																									
	Conclusiones	P	R																										



8.1.2. PLANOS



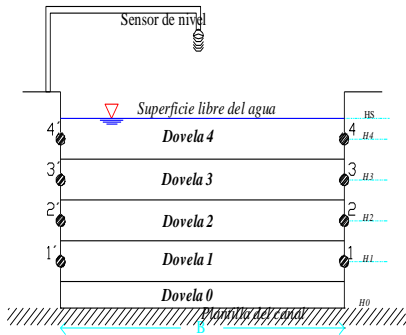


FIG. H2 DOVELADO CON EL MÉTODO DE LA SECCIÓN INTERMEDIA

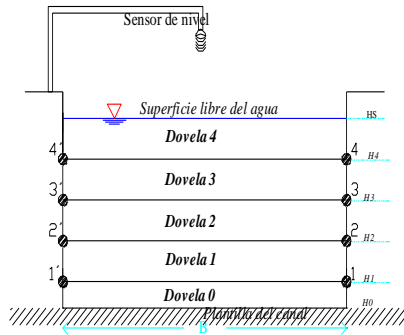
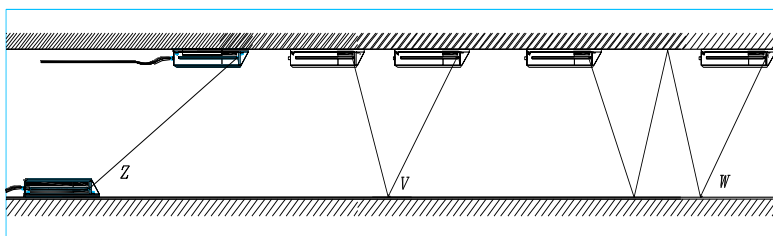
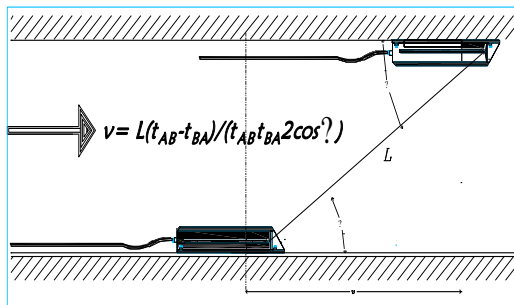
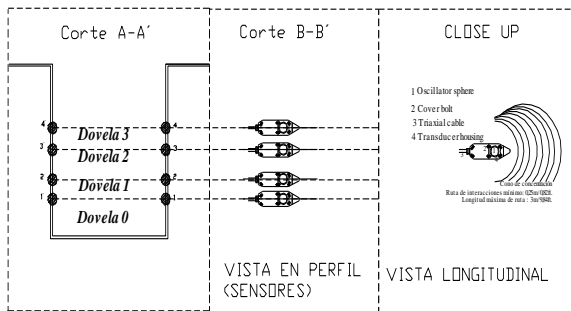


FIG. H3 DOVELADO CON EL MÉTODO DE LA SECCIÓN PROMEDIO



INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
 MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA
 INGENIERÍA EN SISTEMAS HIDRÁULICOS
 PLANOS DEL CANAL DE LABORATORIO
 LABORATORIO DE HIDRÁULICA "ENZO LEVI"



SIMBOLOGÍA

NOTAS
INCLUIR NOTAS

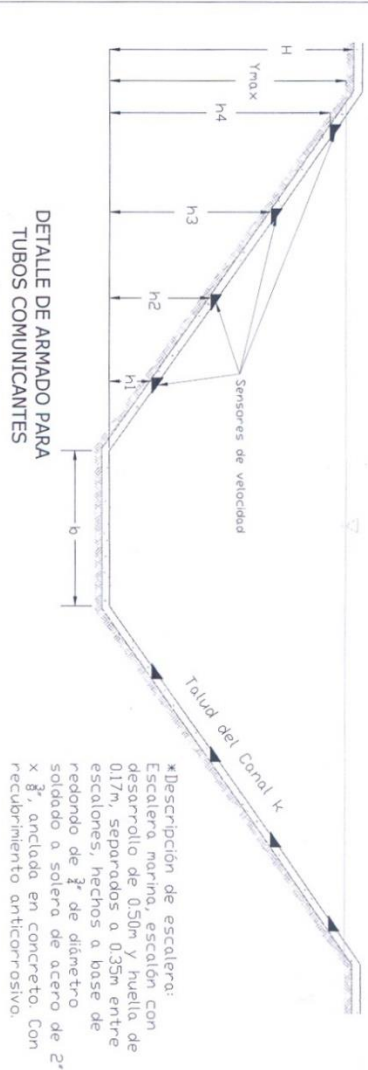
PROYECTO: ESTUDIO SOBRE LA FALLA DE SENSORES DE VELOCIDAD EN UN SISTEMA MULTI-PAR

DIRECCIÓN: Blvd. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, 62550 Jiutepec, Mor.
 PLANO: CANAL DE PENDIENTE VARIABLE

Elaborado por: **Marlyn de León Cárdenas** #P0303
 Revisado por: **Victor M. Arroyo Correa**

FECHA: JULIO 2018 PUNTO: 1/1 ESCALA: 1/100

CANAL A LA ALTURA DE LOS SENSORES DE VELOCIDAD (ESQUEMÁTICO)



*Descripción de escalera:
Escalera marina, escalón con desarrollo de 0.50m y huella de 0.17m, separados a 0.35m entre escalones, hechos a base de redondo de 3" de diámetro soldado a solera de acero de 2" x 3", anclada en concreto. Con recubrimiento anticorrosivo.

TABLA DE DATOS

Variable	Valor
h_1 (m)=	0.56
h_2 (m)=	1.12
h_3 (m)=	1.68
h_4 (m)=	2.24
P (m)=	3.95

Forma del Canal:	Trapezoidal
Tipo de Medidor:	ATT 4
Nombre:	Canal Principal Rosales km 0+600
Districto de Riego:	DR 010 Culiacán-Humaya
Organismo de Cuenca:	Región III Pacífico-Norte
Ancho de la Base:	b (m)= 4.00
Pendiente del Talud:	k (m)= 1.50
Altura del Canal:	H (m)= 3.70
Tirante máximo:	y_{max} (m)= 2.80
Gasto máximo:	Q_{max} (m ³ /s)= 32.2
Tirante medio:	y_{med} (m)= 2.17
Gasto medio:	Q_{med} (m ³ /s)= 20.187
Tirante mínimo:	y_{min} (m)= 0.40
Gasto mínimo:	Q_{min} (m ³ /s)= 1.00
Pendiente del Canal:	S (m/m)= -- --
Coefficiente de Manning:	n (-)= 0.015

NOTA: las dimensiones son en metros, excepto las indicadas. Las dimensiones y parámetros son aproximados. Estos datos serán ajustados por el Distrito de Riego.

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

PROYECTO EJECUTIVO PARA EL MEDORAMIENTO DE LA MEDICIÓN			
DR 010 Culiacán-Humaya			
Canal Principal Rosales km 0+600			
Plano del Medidor ATT y Sensor de Nivel			
ACOT.: m	ESCALA: S/E	FECHA: 22/06/2015	1/3
DIENAJE:	REVISó:	AUTOREZ:	Vo.Bo.
Dr. Víctor M. Arroyo Carrón	Dr. Carlos E. Murrieta R.	Ing. Six Méndez Aguado	Ing. Jorge Angueta



8.2. APENDICE B: EVALUACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES

Para evaluar la incertidumbre con un ATT se debe tener en cuenta lo que dicen las normas mencionadas anteriormente (NMX-AA-179-SCFI, 2017) y (Norma ISO 6416, 2004), además de realizar los cálculos con la guía para estimar la incertidumbre (GUM, 1995). Existen varios factores en la medición que pueden alterar los resultados o bien pueden causar una incertidumbre mayor a la permitida en un análisis de datos. Las principales fuentes de incertidumbre que se consideran en este trabajo son:

- Determinación de la sección transversal del canal (incluyendo el cambio de la sección transversal del canal debido a la sedimentación).
- Medición de los tiempos de propagación del sonido.
- Dependencia de la temperatura del número de Reynolds, y / o de la viscosidad cinemática.
- Perfil de velocidad perturbada o flujo sesgado.
- Determinación del nivel de agua.
- Usar un ángulo en la instalación de transductores fuera del rango de 45° a 60°.
- Determinación de la longitud del camino del pulso ultrasónico (trayectoria de tránsito).
- Lo más relevante es el número de trayectorias perdidas durante la medición del gasto, ya que, dependiendo del rango de incertidumbre, se puede concluir si la hipótesis de esta tesis se acepta o se descarta.

Siempre será necesario proporcionar un intervalo en torno al resultado, el método seguido para el cálculo de la incertidumbre en esta tesis se basa en la incertidumbre tipo A. La expresión de las incertidumbres agrupa a sus componentes en dos categorías, que es por su método de evaluación “A” y “B”. De acuerdo con la (GUM, 1995) *“la incertidumbre de una corrección por efecto sistemático conocido puede obtenerse en algunos casos mediante una evaluación Tipo A, mientras que en otros casos puede obtenerse mediante una evaluación Tipo B; lo mismo puede decirse para una incertidumbre que caracteriza a un efecto aleatorio. El propósito de la clasificación en Tipo A y Tipo B es indicar las dos formas diferentes de evaluar las componentes de incertidumbre, a efectos únicamente de su análisis; la clasificación no trata de indicar que exista alguna diferencia de naturaleza entre las componentes resultantes de ambos tipos de evaluación. Los dos tipos de evaluación se basan en distribuciones de probabilidad, y las componentes resultantes tanto de uno como del otro tipo de evaluación se cuantifican mediante varianzas o desviaciones típicas”*.



8.2.1. INCERTIDUMBRE TIPO A

La incertidumbre típica tipo A se obtiene a partir de una función de densidad de probabilidad derivada de una distribución de frecuencia observada, para estimar la incertidumbre de una variable (“y”), se puede conseguir una serie de datos sobre esta. Asumiendo una distribución de probabilidad “normal”, se hace lo siguiente:

1. Se hacen repeticiones para conseguir n valores y_i ($i = 1..n$)
2. Se estima el valor de “y” como el promedio aritmético de los valores y_i
3. Se estima la incertidumbre estándar como la desviación estándar de los valores y_i

- Promedio (aritmético) $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ [Ec. 11]

- Desviación estándar $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ [Ec. 12]

- Varianza $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ [Ec. 13]

8.2.2. INCERTIDUMBRE TIPO B

Una incertidumbre típica tipo B se obtiene a partir de una función de densidad de probabilidad supuesta o asumida, basada en el grado de confianza que se tenga en la ocurrencia del suceso [a menudo denominada probabilidad subjetiva]. Tanto el tipo A como la B se basan en interpretaciones admitidas de la probabilidad, pero normalmente la incertidumbre tipo B se usa cuando no se cuenta con una serie de datos para poder estimar la incertidumbre de una variable (“y”), con base a lo anterior, se puede hacerlo con una revisión de la literatura disponible:

- Mediciones realizadas antes, bajo condiciones similares
- Conocimientos generales sobre el tipo de medición realizado
- Especificaciones de los fabricantes
- Certificados de calibración.

Dependiendo de los datos que se encuentran en la literatura sobre lo que se está midiendo, se elige la forma de estimar la incertidumbre total $U(y)$:

- 1• Dato de desviación estándar (σ)

$$u(y) = \sigma \quad [\text{Ec. 14}]$$

- 2• Intervalo de confianza ($I_p(y)$), Asumiendo una distribución *normal*:

$$u(y) = \frac{I_p}{k_p} \quad [\text{Ec. 15}]$$



K_p : Factor de cobertura	$k_p \approx 1.65$	para $\rho = 0.90$
$k_p \approx 0.68$	para $\rho = 0.50$	$k_p \approx 1.96$
$k_p \approx 1.00$	para $\rho = 0.68$	$k_p \approx 2.58$
		para $\rho = 0.99$

8.2.3. INCERTIDUMBRE $u(y)$ EN LA MEDICIÓN DEL CAUDAL

Es una recomendación de la (GUM, 1995) utilizar la incertidumbre en la medición a la hora de expresar los resultados, ya sea por referencia a documentos publicados, tesis de experimentación, creación de patentes, entre otros ejemplos. Si bien existen numerosas mediciones sin ningún informe explícito de incertidumbre, lo que da confianza al resultado es validar si el trabajo realizado cumple con la normatividad vigente, de ser así se pueden tomar conclusiones importantes y relevantes como es el caso de esta tesis. Así como con el equipo ATT utilizado para las mediciones de las pruebas del presente trabajo, existen muchos instrumentos sujetos a calibración periódica o a inspección legal; si se admite que los instrumentos cumplen sus especificaciones u otros documentos normativos existentes que les sean de aplicación, pueden deducirse las incertidumbres de sus indicaciones a partir de dichas especificaciones o de dichos documentos normativos.

“Aunque en la práctica, la cantidad de información necesaria para documentar un resultado de medida depende de la utilización prevista, se mantiene el principio básico de que cuando se indica el resultado de medida y su incertidumbre, es mejor pecar por exceso de información que por defecto” (GUM, 1995).

El manual de usuario del ATT utilizado para todas las pruebas de esta tesis (Risonic, 2012) señala que se puede realizar una cuantificación con respecto al error de medición que va desde 2.4% a 4.9% [Ec. 15]. La siguiente cuantificación se realizó con el método de cálculo de la incertidumbre tipo B (ver tema 2.6.2), y estimando errores que pudieron existir en la medición en cada uno de los siguientes aspectos:

- La longitud de la trayectoria de sonido se puede medir con mucha precisión dentro de $\pm 1,5$ mm / 100 m y el ángulo de trayectoria de sonido dentro de **0,2%**.
- Determinación de la sección transversal del canal puede ser bastante incierto debido a la forma del canal inferior / borde. El rango típico (sin sedimentación tomada en cuenta): **0,5% a 4,5%**.
- Aunque la temperatura del medio que fluye se calcula y el número de Reynolds es compensado en temperatura de forma continua, un error residual permanece en el orden de alrededor de **0,1%**.
- Con el fin de evitar errores de medición debido al perfil de velocidad perturbado puede adicionar un número trayecto del sonido. La disposición en la práctica depende de las perturbaciones del flujo de agua en el lugar con un error no más de **2%**.



- El nivel de agua puede medirse con bastante precisión, pero puede verse afectada por las ondas de superficie, los efectos del viento y la deriva a largo plazo del transductor de nivel aplicado. El rango típico: **0,1% a 0,3%**.

De acuerdo con la ley de los mínimos cuadrados (Estadística básica, ver (ITM, 2007)), cuando se quiere calcular una magnitud que depende de varias incertidumbres, estas se suman en cuadratura, por lo que aplicando el método para las incertidumbres ya descritas, da un error del sistema total en el rango de:

$$u(y) = \sqrt{\text{longitud de trayectoria}^2 + \text{sección } t^2 + \text{temperatura}^2 + \text{perfil de velocidades}^2 + \text{nivel}^2} \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$\sqrt{0.2^2 + 0.5^2 + 0.1^2 + 2^2 + 0.1^2} = 2.1\% \quad \text{a} \quad \sqrt{0.2^2 + 4.5^2 + 0.1^2 + 2^2 + 0.3^2} = 4.9\%$$

$$u(y) \in [2.1\%, 4.9\%]$$

Este método puede ser derivado de la ecuación de Gauss de los errores distribuidos normalmente (ITM, 2007), pero no se espera que sean capaces de derivar de ellos, es por eso que en esta tesis se realizó el cálculo de la incertidumbre de acuerdo con la (Norma ISO 6416, 2004), en un procedimiento que utilizó tanto el método de incertidumbre tipo A, como el B; la metodología propuesta de esta tesis brindó todos los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo de la incertidumbre en todos los aspectos que pudieran causar una diferencia en las mediciones. En resumen, aun teniendo en cuenta las recomendaciones del manual de usuario del equipo ATT se trabajó una incertidumbre estándar con la **Ecuación 11**, para el gasto instantáneo del $\pm 6\%$ con un factor de cobertura igual a 2 y un nivel de confianza de 95, para admitir los datos que se obtuvieron en los resultados se nombró a la incertidumbre estándar al cálculo de la desviación estándar $u(y) = \sigma$, **Ecuación 13**.

8.2.4. CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE FINAL (Uq)



De acuerdo con los temas abordados, se tiene una incertidumbre estándar ($u(y) = \sigma$) para cada valor promedio (\bar{y}) correspondientes de: gasto, velocidad media V_m , velocidad del par 1, velocidad del par 2, velocidad del par 3, velocidad del par 4, áreas; debido a que se tienen las mediciones de referencia para el estudio de la falla en los sensores de velocidad el equipo ATT, se debe calcular la incertidumbre expandida (o incertidumbre final U_q) para cada valor promediado de cada variable, y así poder admitir o descartar qué escenarios de fallas pueden ser comparados con los escenarios de referencias, para el procedimiento de esta tesis, se descargó un *.txt, con la información del registro en la medición realizada con el equipo ultrasónico, posteriormente se exportó a una hoja de cálculo, para realizar el análisis estadístico de los datos, este análisis es el cálculo de $u(y)$ y de (\bar{y}) por el método de *incertidumbre tipo A*, con estos datos se puede calcular la incertidumbre final U_q , como a continuación se muestra:

La *Tabla 4* representa el resumen de la estadística para el gasto Q , Y la *Tabla 5* representa el resumen del cálculo de la incertidumbre expandida/final (U_q). El resultado final es la media aritmética \pm la incertidumbre expandida, $Q = 0.011 \pm 6.2\%$.

Tabla 22: Cálculo estadístico para la medición de un gasto.

ESCENARIO 1		
SIN FALLA (10 min)		
$Q = 0.0105 \pm 0.0002 \text{ m}^3/\text{S}$		
n	578	Cantidad de datos
\bar{y}	0.0105	Media aritmética
σ	0.0002	Desviación estándar
S	0.0002	Desviación típica muestral
$\sum x$	6.0966	suma de los "n" datos
$\sum x^2$	0.0643	suma de los cuadrados
Mín.	0.0101	valor mínimo de los datos
Q_1	0.0104	cuartil 1
Mediana	0.0105	Mediana ó cuartil 2
Q_3	0.0107	cuartil 3
Max.	0.0111	valor máximo de los datos

Tabla 23: Cálculo de la incertidumbre total de una medición de acuerdo con la (Norma ISO 6416, 2004).

RESUMEN DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO			
ESCENARIO 1: SIN FALLA			
Numero de trayectorias ó pares (P)		4	
VARIABLE	SÍMBOLO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	TIPO
Incertidumbre en el número efectivo de pares	Up	2.900	B
Incertidumbre en la Velocidad	Ulv	0.247	A
Incertidumbre en el ancho de canal a la altura de cada par de sensores	Uw	0.247	A
Incertidumbre en la medición del tirante	Ud	0.290	A
Incertidumbre en la longitud de trayectoria	UL	0.217	A
Incertidumbre en la diferencia de tiempo	UdT	0.000001	A
Incertidumbre en el tiempo de tránsito	UT	0.000001	A
Incertidumbre en el ángulo de (path-flujo) (interpolación, tabla 1 ISO:6416)	Ucosθ	0.117	B
Incertidumbre de medición (k=1)	Uq	3.10	
Incertidumbre de medición (k=1)	Uq	6.20	
Caudal=	Q	0.011	$\pm 0.0007 \text{ m}^3/\text{s}$ $\pm 6.2 \%$

Para este resumen, se realizó previamente una medición con todos los componentes del equipo ATT funcionando eficientemente (desde el punto de vista mecánico), en donde, se tiene un gasto de 10.5 L/s, la lectura se realizó durante un lapso de 10 minutos, con un intervalo de registro a cada segundo, sin embargo se tienen 578 datos (n), esto es debido a que se descartaron algunos valores que se consideraron "ruidosos" para el cálculo de la desviación estándar (σ); en el *capítulo 2.6.3* la nomenclatura de la incertidumbre expandida es la desviación estándar $u(y)$ [Ec. 13]. Para calcular la incertidumbre total de la medición U_q , se utiliza la fórmula de la Ec. 16, dicha fórmula viene dada por la (Norma ISO 6416, 2004):

$$U_q = \left[U_p^2 + \frac{1}{P} (U_{IV}^2 + U_W^2 + U_d^2) \right]^{1/2} \quad [\text{Ec. 17}]$$

En donde:



- U_p , es la incertidumbre en la integración que consiste en el número limitado de caminos efectivos utilizado la **Tabla 24**:

Tabla 24: Porcentaje de incertidumbres en la medición de la velocidad media en una vertical, debido a la limitación de un número de puntos en la vertical, (Incertidumbres estándar, nivel de confianza aproximadamente 68%, ISO 6416, pág. 48).

MÉTODO DE MEDICIÓN	INCERTIDUMBRE %
Distribución de velocidad	0.5
5 puntos	2.5
2 puntos	3.5
1 punto	7.5
Superficie	15

- P , es el número de trayectorias;
- U_{IV} , es la incertidumbre en la velocidad;
- U_w , es la incertidumbre promedio en la determinación del ancho del canal; es el ancho promedio de la sección de medición al nivel de cada par de transductores:

$$U_w = (U_L^2 + U_{\cos\theta}^2)^{1/2} \quad [\text{Ec. 18}]$$

- U_d , es la incertidumbre en la medición de la profundidad;
- U_{IV} , se encuentra en la sección 14.3.3 de la (Norma ISO 6416, 2004)

$$U_{IV} = (U_L^2 + U_{\Delta T}^2 + 4U_T^2 + U_{\cos\theta}^2)^{1/2} \quad [\text{Ec. 19}]$$

En donde:

U_L , es la incertidumbre en la longitud de la trayectoria;

$U_{\Delta T}$, es la incertidumbre en la diferencia del tiempo de tránsito;

U_T , es la incertidumbre en el tiempo de tránsito;

$U_{\cos\theta}$, es la incertidumbre en el ángulo de la trayectoria que permite un flujo oblicuo (**Tabla 25**);

Tabla 25: Incertidumbre para el ángulo de la trayectoria (ISO 6416, pag5.)

ÁNGULO DE TRAYECTORIA θ GRADOS	ERROR DE VELOCIDAD PARA 1° DE DIFERENCIA ENTRE DIRECCIÓN DE FLUJO REAL Y SUPUESTA %
30	1.0
45	1.7
60	3.0

Se realizaron lecturas del gasto instantáneo a cada segundo, el lapso de medición para todas las pruebas fue de 10 minutos, por lo que se tienen aproximadamente 600 datos de la lectura de cada gasto para cada escenario de prueba. Sin embargo se realiza un análisis estadístico para posteriormente calcular la incertidumbre de la medición, para poder admitir las deducciones que se abordaron al obtener los resultados



de todas las evaluaciones de los escenarios de falla en los sensores de velocidad. A continuación se anexan los ejemplos del cálculo de la incertidumbre tipo A de los escenarios cuando falla un par de sensores de velocidad:

SIN FALLA (10 min)		
$Q = 0.0583 \pm 0.0009 \text{ m}^3/\text{S}$		
n	578	Cantidad de datos
Media	0.0583	Media aritmética
σ	0.0009	Desviación estándar
S	0.0009	Desviación típica muestral
$\sum x$	33.7097	suma de los "n" datos
$\sum x^2$	1.9665	suma de los cuadrados
Min.	0.0560	valor mínimo de los datos
Q1	0.0577	cuartil 1
Mediana	0.0583	Mediana ó cuartil 2
Q3	0.0590	cuartil 3
Max.	0.0609	valor máximo de los datos

El cálculo de la tabla anterior es realizado con estadística básica, (para mayor información de las fórmulas de la estadística ver (ITM, 2007) y (GUM, 1995)). Después de obtener el valor promedio (cálculo de incertidumbre tipo A) se procede a calcular la incertidumbre expandida y final. En la siguiente tabla se utilizaron las fórmulas de la (Norma ISO 6416, 2004), dichas fórmulas vienen explicadas en el capítulo 2.

RESUMEN			
ESCENARIO 1: SIN FALLA (10:00-10:10 hrs)			
Numero de trayectorias ó pares (P)		4	
VARIABLE	SÍMBOLO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	TIPO
Incertidumbre en el número efectivo de pares	U_p	2.900	B
Incertidumbre en la Velocidad	U_v	0.247	A
Incertidumbre en el ancho de canal a la altura de cada par de sensores	U_w	0.247	A
Incertidumbre en la medición del tirante	U_d	0.290	A
Incertidumbre en la longitud de trayectoria	U_L	0.217	A
Incertidumbre en la diferencia de tiempo	U_{dT}	0.000001	A
Incertidumbre en el tiempo de tránsito	U_T	0.000001	A
Incertidumbre en el ángulo de (path-flujo) (interpolación, tabla 1 ISO:6416)	$U_{\cos\theta}$	0.117	B
Incertidumbre de medición (k=1)	U_q	3.10	
Incertidumbre de medición (k=1)	U_q	6.20	
Caudal=	Q	0.058	$\pm 0.0036 \text{ m}^3/\text{s}$ $\pm 6.2 \%$

Así sucesivamente se realizan los mismos pasos para cada gasto y para cada escenario de prueba. Por ejemplo las siguientes tablas son para el cálculo de las incertidumbres de una medición en la que el sensor de velocidad del par superior, el más cercano a la superficie libre, se encuentra fallando.



HAZ 1,2 Y 3 OFF (10 min)		
$Q = 0.0537 \pm 0.0016 \text{ m}^3/\text{S}$		
n	489	Cantidad de datos
Media	0.0537	Media aritmética
σ	0.0016	Desviación estándar
S	0.0016	Desviación típica muestral
$\sum x$	26.2716	suma de los "n" datos
$\sum x^2$	1.4127	suma de los cuadrados
Min.	0.0493	valor mínimo de los datos
Q 1	0.0528	cuartil 1
Mediana	0.0537	Mediana ó cuartil 2
Q 3	0.0548	cuartil 3
Max.	0.0588	valor máximo de los datos

De acuerdo con sus características de incertidumbre expandida se obtiene una diferencia a la medición realizada con los cuatro pares de sensores de velocidad funcionando correctamente.

RESUMEN			
ESCENARIO 2: FUNCIONANDO PAR 4 (10:10-10:20 hrs)			
Numero de trayectorias ó pares (P)		1	
VARIABLE	SÍMBOLO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	TIPO
<i>Incertidumbre en el número efectivo de pares</i>	U_p	7.500	B
<i>Incertidumbre en la Velocidad</i>	U_{iv}	0.247	A
<i>Incertidumbre en el ancho de canal a la altura de cada par de sensores</i>	U_w	0.247	A
<i>Incertidumbre en la medición del tirante</i>	U_d	0.290	A
<i>Incertidumbre en la longitud de trayectoria</i>	U_L	0.217	A
<i>Incertidumbre en la diferencia de tiempo</i>	U_{dT}	0.000001	A
<i>Incertidumbre en el tiempo de tránsito</i>	U_T	0.000001	A
<i>Incertidumbre en el ángulo de (path-flujo) (interpolación, tabla 1 ISO:6416)</i>	$U_{\cos\theta}$	0.117	B
<i>Incertidumbre de medición (k=1)</i>	U_q	7.82	
<i>Incertidumbre de medición (k=1)</i>	U_q	15.63	
Caudal=	Q	0.054	$\pm 0.0084 \text{ m}^3/\text{s}$ $\pm 15.63 \%$

A continuación, se tiene el cálculo de la incertidumbre tipo A, para un escenario con el par de sensores en la ubicación central del canal de laboratorio.



HAZ 1,2 Y 4 OFF (10 min)		
Q = 0.0455 ± 0.0012 m3/S		
n	577	Cantidad de datos
Media	0.0455	Media aritmética
σ	0.0012	Desviación estándar
S	0.0012	Desviación típica muestral
Σx	26.2267	suma de los "n" datos
Σx²	1.1930	suma de los cuadrados
Min.	0.0417	valor mínimo de los datos
Q1	0.0447	cuartil 1
Mediana	0.0455	Mediana ó cuartil 2
Q3	0.0463	cuartil 3
Max.	0.0501	valor máximo de los datos

Y su respectivo análisis de la incertidumbre final:

RESUMEN			
ESCENARIO 4: FUNCIONANDO PAR 3 (10:30-10:40 hrs)			
Numero de trayectorias ó pares (P)		1	
VARIABLE	SÍMBOLO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	TIPO
Incertidumbre en el número efectivo de pares	U _p	7.500	B
Incertidumbre en la Velocidad	U _v	0.247	A
Incertidumbre en el ancho de canal a la altura de cada par de sensores	U _w	0.247	A
Incertidumbre en la medición del tirante	U _d	0.290	A
Incertidumbre en la longitud de trayectoria	U _L	0.217	A
Incertidumbre en la diferencia de tiempo	U _{dT}	0.000001	A
Incertidumbre en el tiempo de tránsito	U _T	0.000001	A
Incertidumbre en el ángulo de (path-flujo) (interpolación, tabla 1 ISO:6416)	U _{cosθ}	0.117	B
Incertidumbre de medición (k=1)	U _q	7.82	
Incertidumbre de medición (k=1)	U _q	15.63	
Caudal=	Q	0.045	± 0.0071 m3/s ± 15.63 %

Y así respectivamente...



HAZ 1, 3 Y 4 OFF (10 min)		
$Q = 0.0469 \pm 0.0014 \text{ m}^3/\text{S}$		
n	546	Cantidad de datos
Media	0.0469	Media aritmética
σ	0.0014	Desviación estándar
S	0.0014	Desviación típica muestral
$\sum x$	25.6281	suma de los "n" datos
$\sum x^2$	1.2041	suma de los cuadrados
Min.	0.0424	valor mínimo de los datos
Q₁	0.0459	cuartil 1
Mediana	0.0470	Mediana ó cuartil 2
Q₃	0.0479	cuartil 3
Max.	0.0502	valor máximo de los datos

Para un escenario del sensor de la ubicación 2 en el canal del laboratorio:

RESUMEN			
ESCENARIO 6: FUNCIONANDO PAR 2 (10:50-11:00 hrs)			
Numero de trayectorias ó pares (P)		1	
VARIABLE	SÍMBOLO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	TIPO
Incertidumbre en el número efectivo de pares	U_p	7.500	B
Incertidumbre en la Velocidad	U_{iv}	0.247	A
Incertidumbre en el ancho de canal a la altura de cada par de sensores	U_w	0.247	A
Incertidumbre en la medición del tirante	U_d	0.290	A
Incertidumbre en la longitud de trayectoria	U_L	0.217	A
Incertidumbre en la diferencia de tiempo	U_{dT}	0.000001	A
Incertidumbre en el tiempo de tránsito	U_T	0.000001	A
Incertidumbre en el ángulo de (path-flujo) (interpolación, tabla 1 ISO:6416)	$U_{\cos\theta}$	0.117	B
Incertidumbre de medición (k=1)	U_q	7.82	
Incertidumbre de medición (k=1)	U_q	15.63	
Caudal=	Q	0.047	$\pm 0.0073 \text{ m}^3/\text{s}$ $\pm 15.63 \%$

Así como se presentaron los cálculos de las incertidumbres en forma de resumen para cuando un par de sensores de velocidad de cualquier zona se encuentre fallando, desactivado o “no húmedo”, se realizaron para los 15 diferentes escenarios que se propusieron en la metodología del capítulo 5.



AZ 2, 3 Y 4 OFF (10 min)		
$Q = 0.0465 \pm 0.0017 \text{ m}^3/\text{S}$		
n	586	Cantidad de datos
Media	0.0465	Media aritmética
σ	0.0017	Desviación estándar
S	0.0017	Desviación típica muestral
$\sum x$	27.2331	suma de los "n" datos
$\sum x^2$	1.2674	suma de los cuadrados
Min.	0.0412	valor mínimo de los datos
Q₁	0.0453	cuartil 1
Mediana	0.0464	Mediana ó cuartil 2
Q₃	0.0477	cuartil 3
Max.	0.0521	valor máximo de los datos

RESUMEN			
ESCENARIO 8: FUNCIONANDO PAR 1 (11:10-11:20 hrs)			
Numero de trayectorias ó pares (P)		1	
VARIABLE	SÍMBOLO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%)	TIPO
Incertidumbre en el número efectivo de pares	U_p	7.500	B
Incertidumbre en la Velocidad	U_{lv}	0.247	A
Incertidumbre en el ancho de canal a la altura de cada par de sensores	U_w	0.247	A
Incertidumbre en la medición del tirante	U_d	0.290	A
Incertidumbre en la longitud de trayectoria	U_L	0.217	A
Incertidumbre en la diferencia de tiempo	U_{dT}	0.000001	A
Incertidumbre en el tiempo de tránsito	U_T	0.000001	A
Incertidumbre en el ángulo de (path-flujo) (interpolación, tabla 1 ISO:6416)	$U_{\cos\theta}$	0.117	B
Incertidumbre de medición (k=1)	U_q	7.82	
Incertidumbre de medición (k=1)	U_q	15.63	
Caudal=	Q	0.046	$\pm 0.0073 \text{ m}^3/\text{s}$ $\pm 15.63 \%$



8.3. APÉNDICE C: ÁLBUM FOTOGRÁFICO.



Ilustración 54: Un par de transductores ultrasónicos, no intrusivos, tiempo de travesía, instalados en una tubería de acero de 20” (1MHz).



Ilustración 57: Cuatro pares de transductores ultrasónicos, tiempo de travesía, instalados en un canal de vidrio (60x70 cm).



Ilustración 55: Cuatro pares de transductores ultrasónicos, intrusivos, de técnica tiempo de travesía (1MHz).



Ilustración 58: Medición del gasto en escenario de falla simulado con un transductor cubierto para evitar la salida de la señal ultrasónica.



Ilustración 56: Cuatro pares de transductores ultrasónicos, tiempo de travesía. Medición de la longitud del cable.



Ilustración 59: Medición del gasto en escenario de falla simulado con un transductor cubierto por burbujas para evitar la salida de la señal ultrasónica.

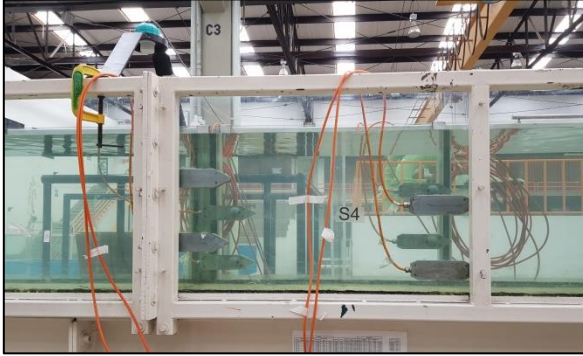


Ilustración 60: Sistema multi-par de transductores ultrasónicos, tiempo de travesía, instalados en un canal de vidrio (60x70 cm).



Ilustración 61: Sistema multi par de transductores montados en un arreglo en Z. Vista transversal.



Ilustración 62: Revisión de la carga de la fuente de corriente directa con el multimetro.



Ilustración 63: Instalación del transductor con nivel y cimbra para tener precisión en la lectura de flujo.

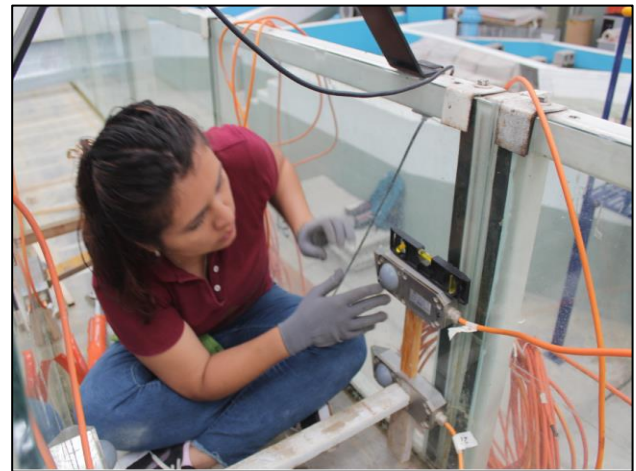


Ilustración 64: Instalación de un sistema multi par de transductores ultrasónicos, utilizando el equipo de protección personal adecuado.



Ilustración 65: Instalación del cable de comunicación en el modulador del equipo tiempo de travesía.



Ilustración 66: Observación del comportamiento del flujo en primera medición, después de haber instalado los transductores.

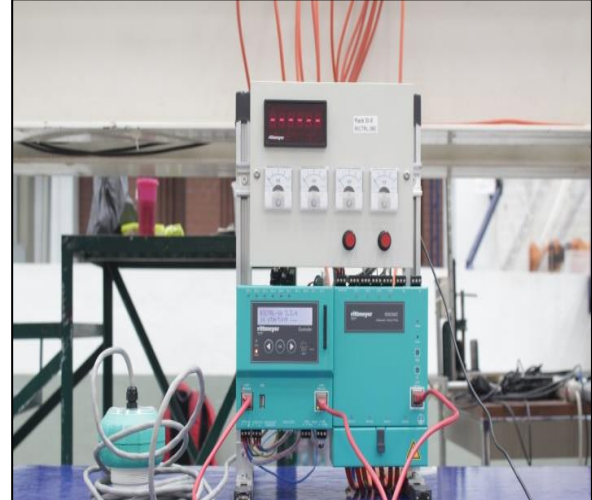


Ilustración 69: Equipo automático Tiempo de Travesía, compuesto por sensor de nivel, modulador y controlador. Los cables de comunicación mandan la señal de lectura de los transductores.

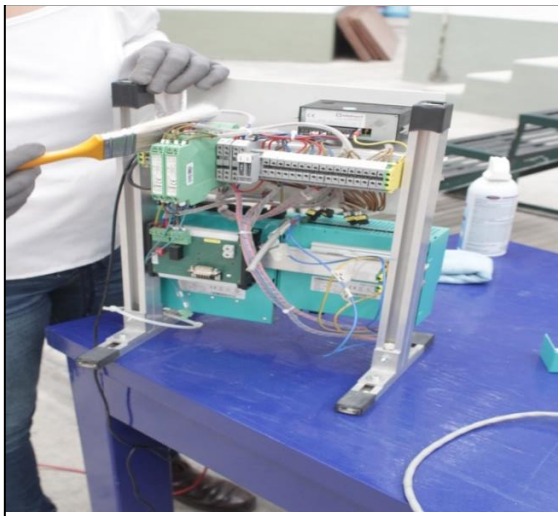


Ilustración 67: Limpieza con brocha para eliminar polvo en el equipo ATT.



Ilustración 70: Sensores de nivel instalados en el canal rectangular del laboratorio de hidráulica Enzo Levi, IMTA.

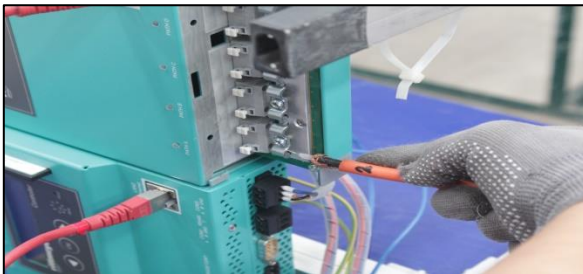


Ilustración 68: Paso siguiente de la ilustración 12 del Anexo de ilustraciones.



Ilustración 71: Canal rectangular de pendiente variable.



Ilustración 73: Canal rectangular de pendiente variable con suministro y descarga de agua.



Ilustración 74: Descarga del agua.



Ilustración 72: Vista transversal de sensores de nivel apoyados sobre la parte superior del canal con sus propios marcos.



Ilustración 75: Vista superior del canal del laboratorio de hidráulica en donde se realizaron las mediciones de la presente tesis.



Ilustración 76: Suministro del gasto con una bomba por medio de un cuello de ganso.



Ilustración 77: Estación de medición en km 5+ 000 del DR 010 Humaya. Culiacán, Sinaloa.



Ilustración 80: Transductor de velocidad de 1 Mhz. En la esfera se encuentra el sensor ultrasónico que con el envío de señales calcula la velocidad dentro del sistema del modulador y posteriormente calcula el gasto.



Ilustración 78: Sistema automático de medición Tiempo de Travesía con 6 pares de transductores (dos moduladores), todo el conjunto dentro de un gabinete de una estación.



Ilustración 81: Canal Humaya, km 5+ 000.



Ilustración 79: Fotografía del momento de la medición del gasto con un escenario en donde fallan cinco pares de sensores de velocidad. El celular tiene corriendo un temporizador y la computadora se encuentra descargando la información en tiempo real.



Ilustración 82: Gasto de 60 m³/s pasando en el Canal Humaya, km 5+ 000.



Ilustración 83: Canal Humaya.



Ilustración 86: Descarga de la presa Andrew Weiss (la presa fue inaugurada por el presidente de México en 1964, Adolfo López Mateos) en Culiacán Sinaloa.



Ilustración 84: Estación para aforar el gasto, con técnicas de medición NO fijas como el ATT de barquito, el molinete o sensores ultrasónicos Doppler no invasivos.



Ilustración 87: Canal "HUAMAYA" perteneciente al DR 010 de CONAGUA, estación 5+000, ubicación: Culiacán, Sinaloa.



Ilustración 85: Vista transversal de un canal trapezoidal de campo en donde se encuentra instalado un sistema multi par de transductores Tiempo de Travesía.

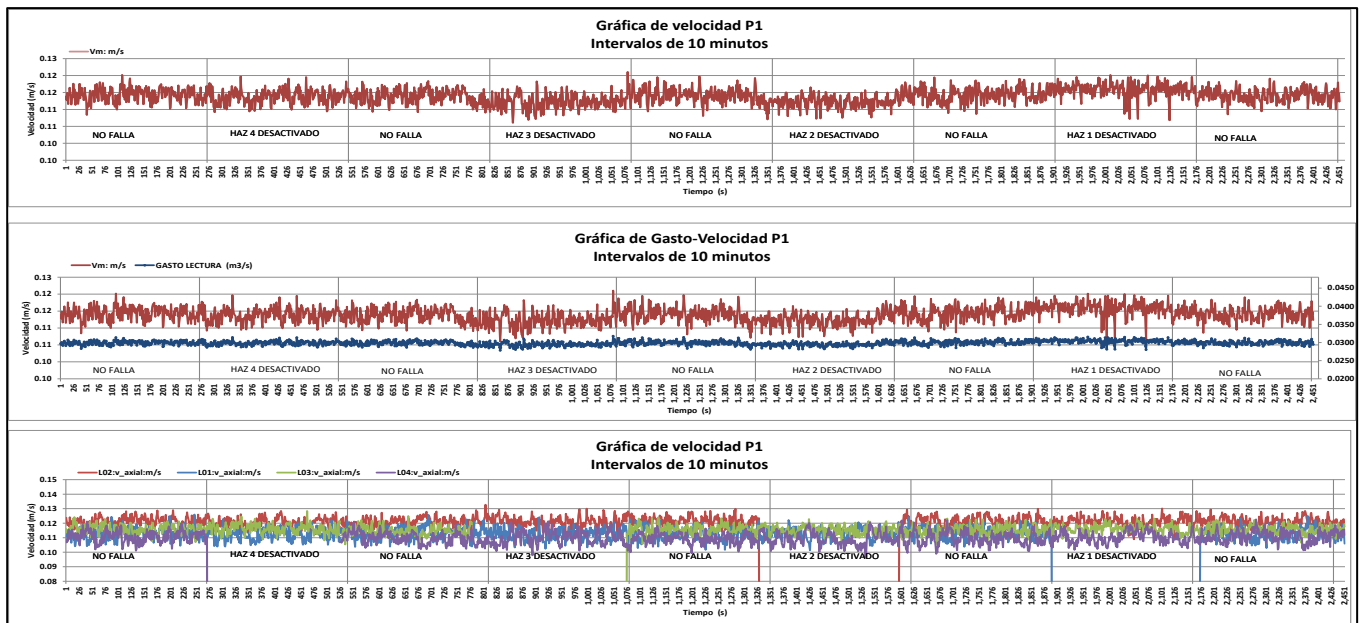


Ilustración 88: Instalación de un sistema multi par de transductores Tiempo de Travesía en un canal rectangular en campo.

8.4. APÉNDICE D: MEDICIÓN DEL GASTO EN EL CANAL DE LABORATORIO ENZO LEVI.

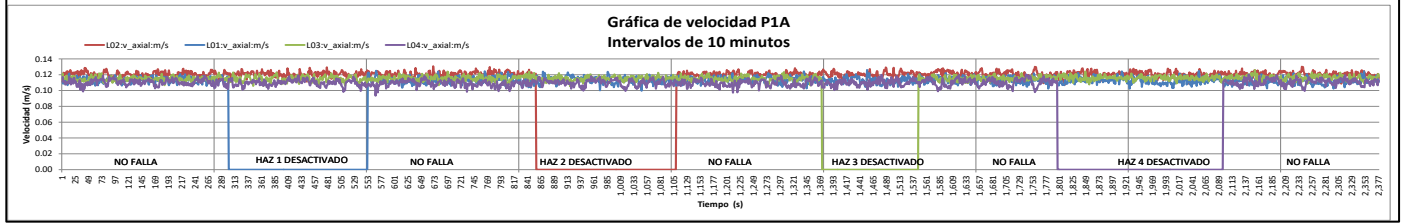
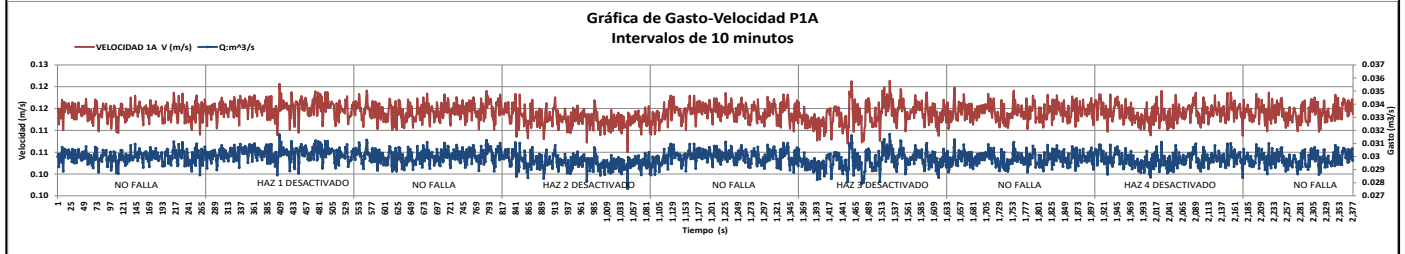
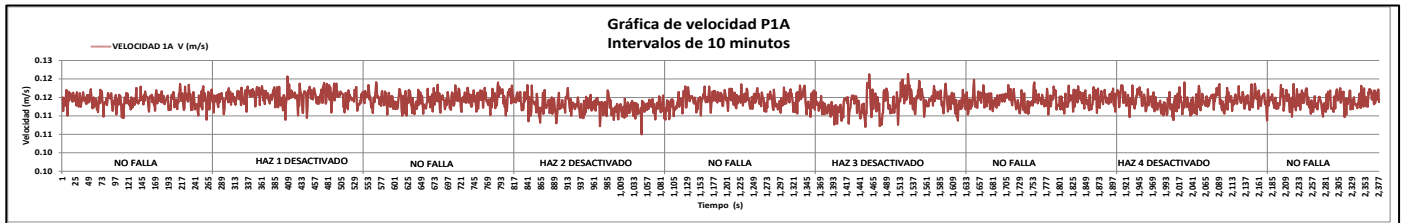
A continuación se anexan las gráficas que representan los valores de lectura instantánea correspondiente a Gasto (Q en L/s) y a la Velocidad media (V_m en m/s) de cada escenario simulando una falla, en dichas gráficas se puede observar que valor del Q/V_m va midiendo en cada momento del tiempo, también se puede calcular el volumen totalizado realizando una simple suma de áreas bajo la línea que representa el gasto a través del tiempo (el eje de las ordenadas, representa el tamaño del Q en L/s en un segundo del tiempo).

15-jul-19												
Nº DE MEDICIÓN	HORA	TRANSDUCTOR EN FALLA	Tipo de falla	Temperatura	PROFUNDIDAD d (m)	AREA HIDRÁULICA (m2)	VELOCIDAD V (m/s)	$Q=V*A$ (m³/s)	GASTO LECTURA (m³/s)	n	Observaciones	DIAGNOSTICO
1	11:10:00 a. m.	1	No falla_1	22°4'	0.435	0.2610	0.110	0.0287	0.030	0.011		LOG-2019_07_15_Prueb a1-diag, RITMEYER
	11:20:00 a. m.	2										
2	11:20:00 a. m.	1	Haz 4, desactivado	23°4'	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.029			
	11:30:00 a. m.	2										
3	11:30:00 a. m.	1	No falla_2	22°9'	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.029			
	11:40:00 a. m.	2										
4	11:40:00 a. m.	1	Haz 3 desactivado	22° 4'	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.029			
	11:50:00 a. m.	2										
5	11:50:00 a. m.	1	No falla_3	23°	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.029			
	12:00:00 p. m.	2										
6	12:00:00 p. m.	1	haz 2, desactivado	23°	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.029			
	12:10:00 p. m.	2										
7	12:10:00 p. m.	1	No falla_4	23°	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.030			
	12:20:00 p. m.	2										
8	12:20:00 p. m.	1	haz 1, desactivado	23° 1'	0.437	0.2622	0.120	0.0315	0.031			
	12:30:00 p. m.	2										
9	12:30:00 p. m.	1	No falla_5	23°	0.437	0.2622	0.120	0.0315	0.031			
	12:40:00 p. m.	2										



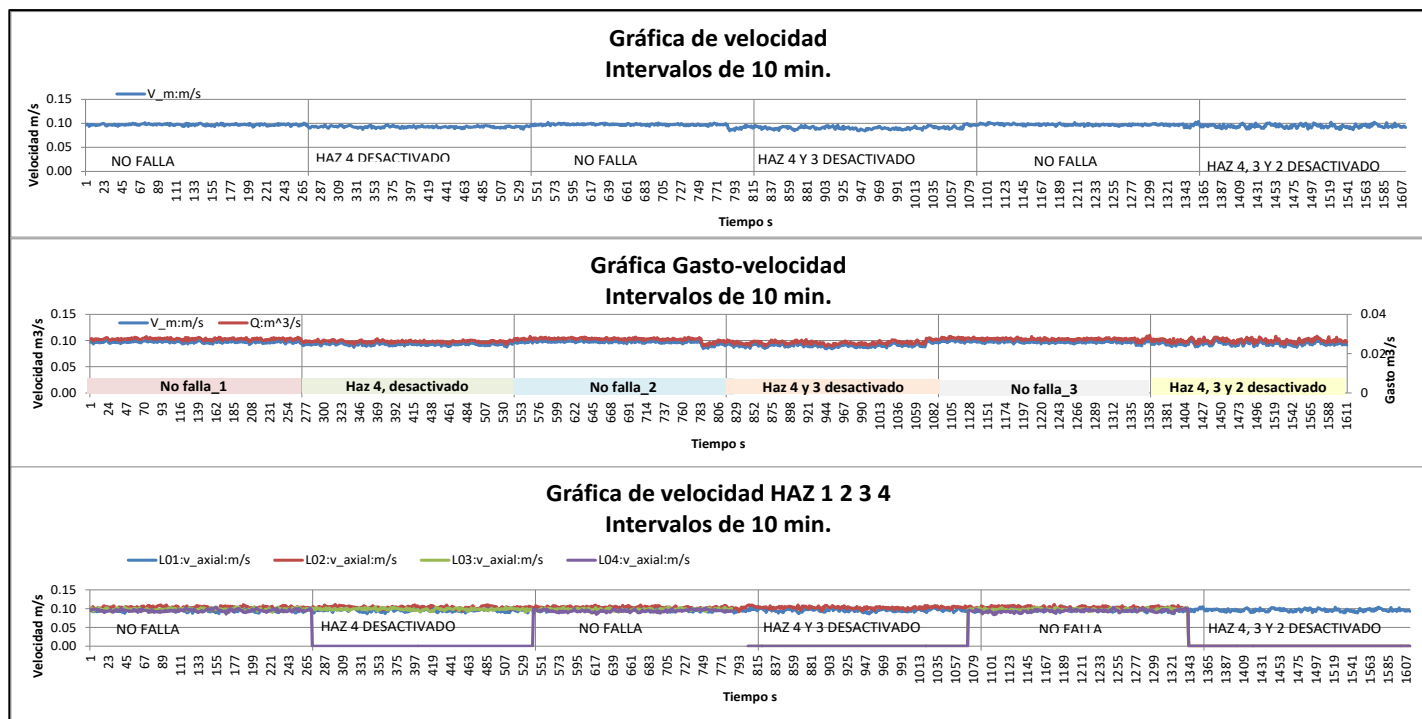


2019_07_15												
N° DE MEDICIÓN	HORA	TRANSDUCTOR EN FALLA	Tipo de falla	Temperatura	PROFUNDIDAD d (m)	AREA HIDRÁULICA (m2)	VELOCIDAD 1A V (m/s)	Q=V*A (m³/s)	GASTO LECTURA 1A (m³/s)	n	Observaciones	DIAGNOSTICO
1	13:55:00 p. m.	1	No falla	23.100	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.300	0.011	haz= par	LOG-2019_07_15_Prueba1A-diag, RITTMEYER
	14:05:00 p. m.	2										
2	14:05:00 p. m.	1	Haz 1, desactivado	23.200	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.300			
	14:15:00 p. m.	2										
3	14:15:00 p. m.	1	No falla	23.100	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.300			
	14:25:00 p. m.	2										
4	14:25:00 p. m.	2	Haz 2, desactivado	23.100	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.290			
	14:35:00 p. m.	2										
5	14:35:00 p. m.	1	No falla	23.100	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.300			
	14:45:00 p. m.	2										
6	14:45:00 p. m.	1	Haz 3, desactivado	23.000	0.437	0.2622	0.110	0.0288	0.250			
	14:55:00 p. m.	2										
7	14:55:00 p. m.	1	No falla	23.100	0.435	0.2610	0.120	0.0313	0.310			
	15:05:00 p. m.	2										
8	15:05:00 p. m.	1	haz 4, desactivado	23.400	0.435	0.2610	0.110	0.0287	0.300			
	15:15:00 p. m.	2										
9	15:15:00 p. m.	1	No falla	23.100	0.435	0.2610	0.110	0.0287	0.300			
	15:25:00 p. m.	2										



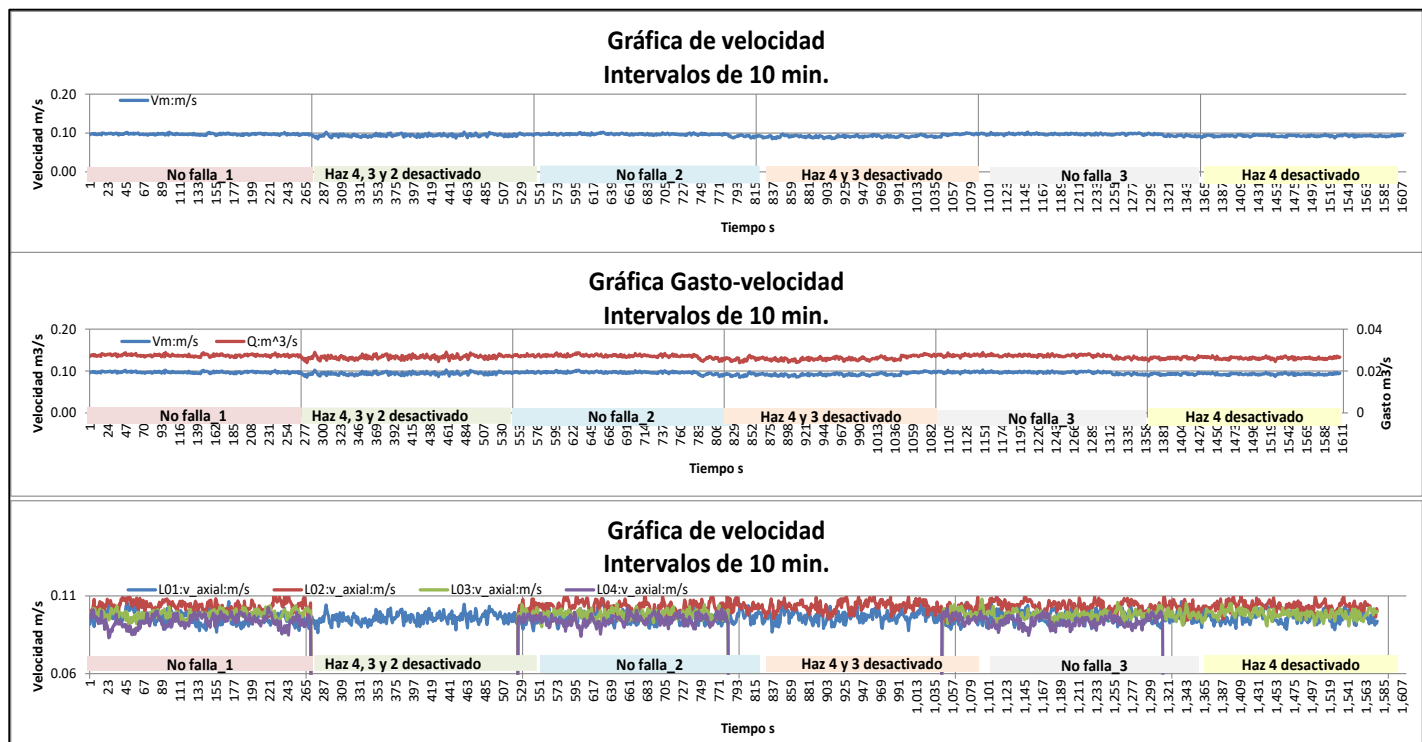


DATOS OBTENIDOS DEL 16 JULIO 2019												
N° DE MEDICIÓN	HORA	TRANSDUCTOR EN FALLA	Tipo de falla	Temperatura	PROFUNDIDAD d (m)	AREA HIDRÁULICA (m2)	VELOCIDAD V (m/s)	Q=V*A (m³/s)	GASTO LECTURA (m³/s)	n	Observaciones	DIAGNOSTICO
1	11:50:00 a. m.	1	No falla_1	23.000	0.471	0.2826	0.096	0.0271	0.027	0.011		LOG-20190716115000- PRUEBA2-diag, RITTMAYER
	12:00:00 p. m.	2										
2	12:00:00 p. m.	1	Haz 4, desactivado	23.500	0.471	0.2826	0.090	0.0254	0.026			
	12:10:00 p. m.	2										
3	12:10:00 p. m.	1	No falla_2	23.000	0.471	0.2826	0.100	0.0283	0.028			
	12:20:00 p. m.	2										
4	12:20:00 p. m.	1	Haz 4 Y 3 desactivado	23.000	0.471	0.2826	0.090	0.0254	0.026			
	12:30:00 p. m.	2										
5	12:30:00 p. m.	1	No falla_3	23.100	0.471	0.2826	0.100	0.0283	0.027			
	12:40:00 p. m.	2										
6	12:40:00 p. m.	1	haz 4, 3 Y 2, desactivado	22.900	0.471	0.2826	0.090	0.0254	0.027			
	12:50:00 p. m.	2										





DATOS OBTENIDOS DEL 16 JULIO 2019												
N° DE MEDICIÓN	HORA	TRANSDUCTOR EN FALLA	Tipo de falla	Temperatura	PROFUNDIDAD d (m)	AREA HIDRÁULICA (m ²)	VELOCIDAD V (m/s)	Q=V*A (m ³ /s)	GASTO LECTURA (m ³ /s)	n	Observaciones	DIAGNOSTICO
1	01:00:00 p. m.	1	No falla_1	23.100	0.471	0.2826	0.090	0.0254	0.027	0.011		PRUEBA 2A DIAG, RITTMAYER
	01:10:00 p. m.	2										
2	01:10:00 p. m.	1	haz 4, 3 y 2, desactivado	23.100	0.471	0.2826	0.090	0.0254	0.027			
	01:20:00 p. m.	2										
3	01:20:00 p. m.	1	No falla_2	23.100	0.471	0.090	0.0254	0.027				
	01:30:00 p. m.	2										
4	01:30:00 p. m.	1	Haz 4 Y 3 desactivado	23.100	0.471	0.2826	0.090	0.0254	0.027			
	01:40:00 p. m.	2										
5	01:40:00 p. m.	1	No falla_3	23.100	0.470	0.090	0.0254	0.026				
	01:50:00 p. m.	2										
6	01:50:00 p. m.	1	Haz 4, desactivado	23.700	0.470	0.2820	0.090	0.0254	0.026			
	02:00:00 p. m.	2										

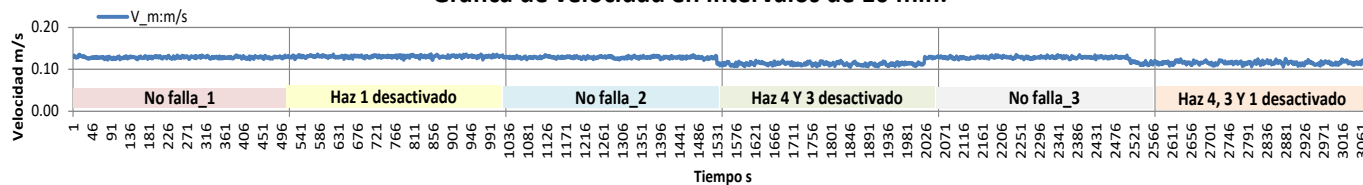




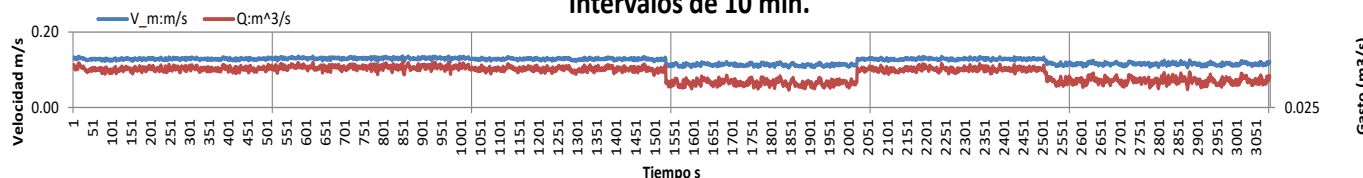
DATOS OBTENIDOS 17 JULIO 2019

N° DE MEDICIÓN	HORA	TRANSDUCTOR EN FALLA	Tipo de falla	Temperatura	PROFUNDIDAD d (m)	AREA HIDRÁULICA (m2)	VELOCIDAD V (m/s)	Q=V*A (m³/s)	GASTO LECTURA (m³/s)	n	Observaciones	DIAGNOSTIGO
1	11:10:00 a. m.	1	No falla_1	23.000	0.489	0.2934	0.130	0.0381	0.038	0.011	25 S en aplicar. Los primeros minutos no establecido el flujo.	LOG-20190717111000-PRUEBA3-diag, RITTMEYER
		2										
		3										
		4										
2	11:20:00 a. m.	1	Haz 1, desactivado	23.100	0.489	0.2934	0.130	0.0381	0.038			
		2										
		3										
		4										
3	11:30:00 a. m.	1	No falla_2	23.000	0.489	0.2934	0.130	0.0000	0.038			
		2										
		3										
		4										
4	11:40:00 a. m.	1	Haz 4 Y 3 desactivado	23.000	0.489	0.2934	0.130	0.0381	0.038			
		2										
		3										
		4										
5	11:50:00 a. m.	1	No falla_3	23.000	0.489	0.2934	0.130	0.0381	0.037	ME ADELANTE 1 MIN		
		2										
		3										
		4										
6	12:00:00 P. m.	1	haz 4, 3 Y 1, desactivado	23.100	0.489	0.2934	0.120	0.0352	0.034			
		2										
		3										
		4										

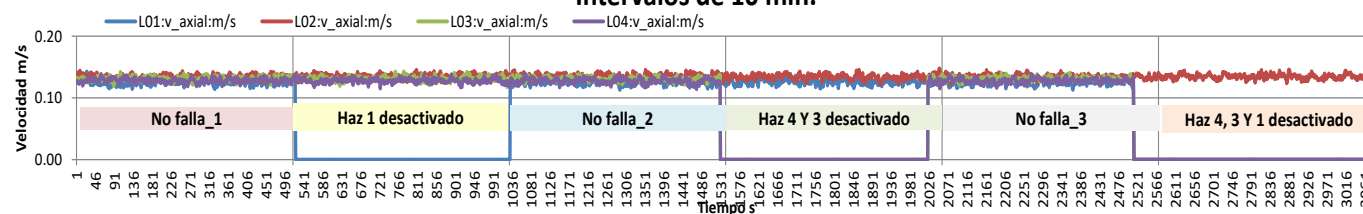
Gráfica de velocidad en intervalos de 10 min.



Gráfica Gasto-velocidad Intervalos de 10 min.



Gráfica de velocidad (HAZ 1 2 3 4) Intervalos de 10 min.

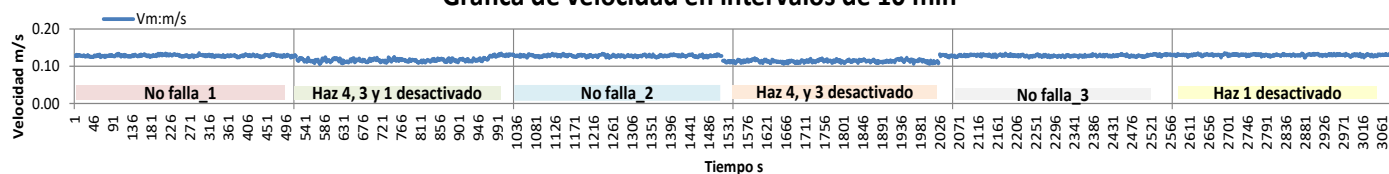




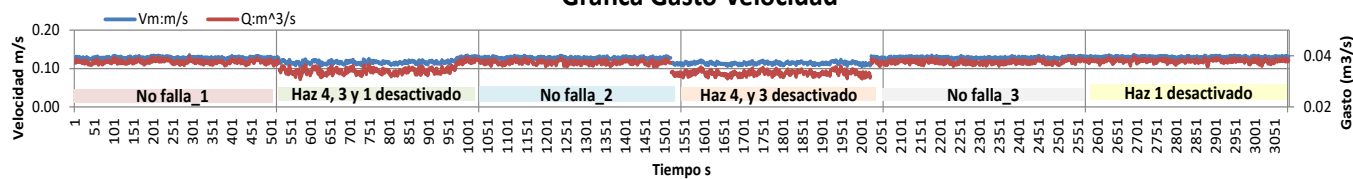
DATOS OBTENIDOS 17 JULIO 2019

N° DE MEDICIÓN	HORA	TRANSDUCTOR EN FALLA	Tipo de falla	Temperatura	PROFUNDIDAD d (m)	AREA HIDRÁULICA (m2)	VELOCIDAD V (m/s)	Q=V*A (m³/s)	GASTO LECTURA (m³/s)	n	Observaciones	DIAGNOSTIGO
1	12:20:00 P. m.	1	No falla_1	23.000	0.489	0.2934	0.130	0.0381	0.038	0.011		LOG-20190717122000-PRUEBA3A-diag, RITTMAYER
		2										
		3										
		4										
2	12:30:00 P. m.	1	haz 4, 3 y 1, desactivado	23.100	0.475	0.2850	0.120	0.0342	0.034			
		2										
		3										
		4										
3	12:40:00 P. m.	1	No falla_2	23.000	0.475	0.2850	0.130	0.0371	0.037			
		2										
		3										
		4										
4	12:50:00 P. m.	1	Haz 4 Y 3 desactivado	23.000	0.475	0.2850	0.110	0.0314	0.033			
		2										
		3										
		4										
5	13:00:00 P. m.	1	No falla_3	23.100	0.475	0.2850	0.130	0.0371	0.038			
		2										
		3										
		4										
6	13:10:00 P. m.	1	Haz 1, desactivado	23.200	0.470	0.2820	0.130	0.0367	0.038			
		2										
		3										
		4										

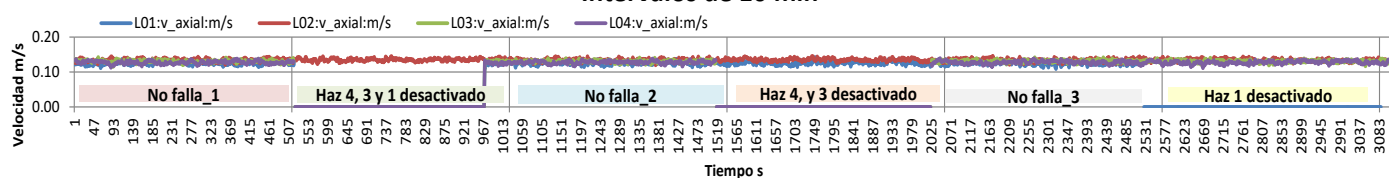
Gráfica de velocidad en intervalos de 10 min



Gráfica Gasto-velocidad

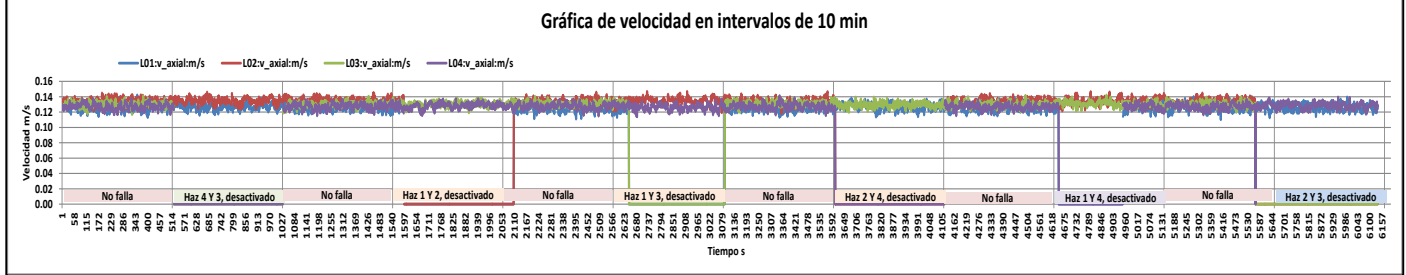
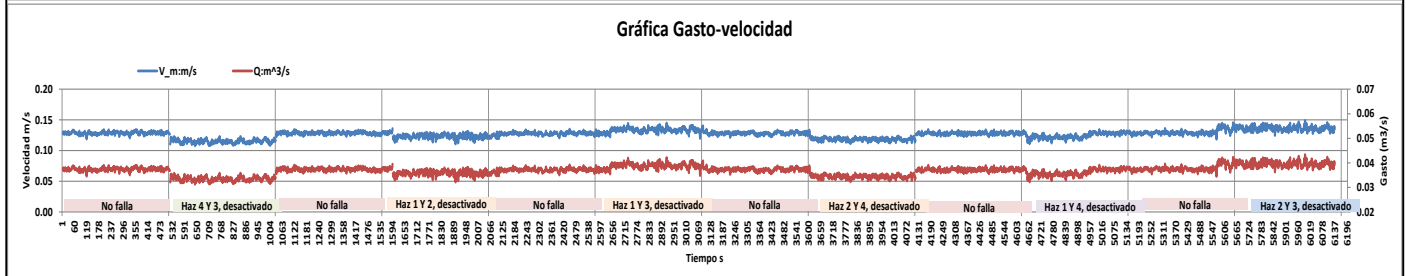
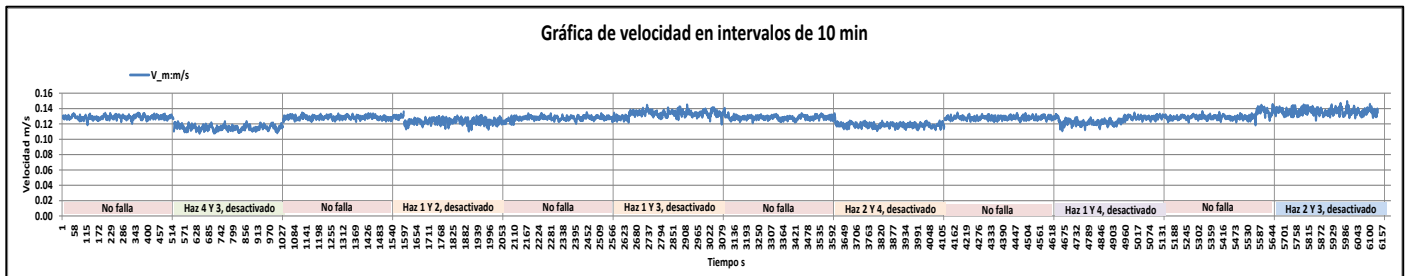


**Gráfica de velocidad (HAZ 1 2 3 4)
Intervalos de 10 min**





DATOS OBTENIDOS 17 JULIO 2019												
Nº DE MEDICIÓN	HORA	TRANSDUCTOR EN FALLA	Tipo de falla	Temperatura	PROFUNDIDAD d (m)	AREA HIDRÁULICA (m2)	VELOCIDAD V (m/s)	Q=V*A (m³/s)	GASTO LECTURA (m³/s)	n	Observaciones	DIAGNOSTIGO
1	14:00:00 P. m.	1	SIN FALLA	23.100	0.480	0.2880	0.120	0.0346	0.037	0.011		LOG-20190717122000-Prueba4-diag, RITTMAYER
	14:10:00 P. m.	2										
	14:20:00 P. m.	3										
2	14:10:00 P. m.	1	FALLA 3 Y 4	23.100	0.480	0.2880	0.120	0.0346	0.034			
	14:20:00 P. m.	2										
	14:30:00 P. m.	3										
3	14:20:00 P. m.	1	SIN FALLA	23.100	0.480	0.2880	0.130	0.0374	0.037			
	14:30:00 P. m.	2										
	14:40:00 P. m.	3										
4	14:30:00 P. m.	1	FALLA 1 Y 2	23.300	0.480	0.2880	0.120	0.0346	0.035			
	14:40:00 P. m.	2										
	14:50:00 P. m.	3										
5	14:40:00 P. m.	1	SIN FALLA	23.200	0.480	0.2880	0.130	0.0374	0.037			
	14:50:00 P. m.	2										
	15:00:00 P. m.	3										
6	14:50:00 P. m.	1	FALLA 1 Y 3	23.200	0.480	0.2880	0.130	0.0374	0.037			
	15:00:00 P. m.	2										
	15:10:00 P. m.	3										
7	15:00:00 P. m.	1	SIN FALLA	23.200	0.480	0.2880	0.130	0.0374	0.037			
	15:10:00 P. m.	2										
	15:20:00 P. m.	3										
8	15:10:00 P. m.	1	FALLA 2 Y 4	23.900	0.470	0.2820	0.120	0.0338	0.034			
	15:20:00 P. m.	2										
	15:30:00 P. m.	3										
9	15:20:00 P. m.	1	SIN FALLA	23.200	0.475	0.2850	0.130	0.0371	0.037			
	15:30:00 P. m.	2										
	15:37:00 P. m.	3										
10	15:30:00 P. m.	1	FALLA 1 Y 4	24.000	0.475	0.2850	0.120	0.0342	0.035			
	15:37:00 P. m.	2										
	15:47:00 P. m.	3										
11	15:37:00 P. m.	1	SIN FALLA	23.200	0.475	0.2850	0.130	0.0371	0.036			
	15:47:00 P. m.	2										
	16:00:00 P. m.	3										
12	15:47:00 P. m.	1	FALLA 2 Y 3	23.300	0.480	0.2880	0.130	0.0374	0.038			
	16:00:00 P. m.	2										
	16:00:00 P. m.	3										





DATOS OBTENIDOS 19 JULIO 2019												
N° DE MEDICIÓN	HORA	TRANSDUCTOR EN FALLA	Tipo de falla	Temperatura	PROFUNDIDAD d (m)	AREA HIDRÁULICA (m2)	VELOCIDAD V (m/s)	Q=V*A (m³/s)	GASTO LECTURA (m³/s)	n	Observaciones	DIAGNOSTIGO
1	10:00:00 a. m.	1	No falla_1	22.400	0.520	0.3120	0.190	0.0593	0.058	0.011		LOG-20190719100000- PRUEBAS-diag, RITTMAYER
		2										
		3										
		4										
2	10:10:00 a. m.	1	Haz 4, funcionando	22.900	0.520	0.3120	0.190	0.0593	0.059			
		2										
		3										
		4										
3	10:20:00 a. m.	1	No falla_2	22.900	0.520	0.3120	0.190	0.0000	0.059			
		2										
		3										
		4										
4	10:30:00 a. m.	1	Haz 3 funcionando	22.900	0.520	0.3120	0.145	0.0452	0.450			
		2										
		3										
		4										
5	10:40:00 a. m.	1	No falla_3	22.900	0.520	0.3120	0.190	0.0593	0.058			
		2										
		3										
		4										
6	10:50:00 a. m.	1	haz 2 funcionando	22.900	0.520	0.3120	0.150	0.0468	0.048			
		2										
		3										
		4										
7	11:00:00 a. m.	1	No falla_4	23.000	0.520	0.3120	0.180	0.0562	0.058			
		2										
		3										
		4										
8	11:10:00 a. m.	1	haz 1 funcionando	23.000	0.520	0.3120	0.180	0.0562	0.058			
		2										
		3										
		4										
9	11:20:00 a. m.	1	No falla_5	23.000	0.520	0.3120	0.190	0.0593	0.058			
		2										
		3										
		4										
10	11:30:00 a. m.	1	haz 4 funcionando	21.500	0.520	0.3120	0.170	0.0530	0.053			
		2										
		3										
		4										
11	11:40:00 a. m.	1	No falla_6	23.000	0.520	0.3120	0.180	0.0562	0.058			
		2										
		3										
		4										
12	11:50:00 a. m.	1	haz 3 funcionando			0.0000		0.0000				
		2										
		3										
		4										

