



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO SOBRE TURBULENCIA EN UN MODELO
FÍSICO EN LA SALIDA DE LAS ESTRUCTURAS DE
CONTROL SOBRE EL RÍO CARRIZAL EMPLEANDO
MEDIDORES ADV**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)**

P R E S E N T A:

TLACAOLEL JAVIER RICO FLORES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ.



MÉXICO, D.F.

AGOSTO DE 2010

A MIS PADRES:

Lo más importante en la vida para mi, gracias por el amor, el cariño, el apoyo incondicional brindando a lo largo de mi vida, los valores morales inculcados de respeto, solidaridad, nobleza, humildad, responsabilidad, que han hecho de mi lo que soy, y forman parte de la base que me soporta como profesionista.

A mi padre, Javier Rico Baez, una persona excelente, de gran sabiduría y una pasión por aprender y descubrir cosas nuevas. Gracias por ser una guía en mi vida profesional y demostrarme el significado de SER un Ingeniero Civil. Te quiero PADRE.

A mi mamá, Eustorgia Flores Flores, por ser una madre cariñosa, amorosa, de grandes valores de responsabilidad y sacrificio para el bienestar de la familia, sin duda una gran mujer a la que le dedico todos mis logros, siendo la mujer más importante en mi vida. Te amo MAMÁ.

A MIS HERMANOS Y SUS FAMILIAS:

Mis hermanos, José Cuauhtémoc Rico Flores (+) y Xochitl Rico Flores, les quiero agradecer el apoyo y cariño infinito que me han dado, gracias por escucharme y apoyarme.

Xochitl, mi hermanita, gracias por el tiempo que hemos compartido y darme ejemplos de madurez, de cariño a tu familia, de luchar por un hogar y de la unión familiar. Gracias a tu familia por quererme, a tu esposo Erick y a mis hermosos sobrinos Leonardo y Eunice.

Temo, aunque no estés conmigo físicamente estas en mi corazón y siempre viajas a mi lado, cuidándome. Eres un gran ingeniero del cual aprendí que la vida es corta y hay que aprovecharla al máximo y explotar el potencial que tenemos para tener una vida mejor. Gracias a tu familia por compartir momentos de felicidad, a tu esposa Gloria a tus hijos Karen y Temito.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería

Mi más profundo agradecimiento a ésta gran institución, por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría, así como la oportunidad de participar en los proyectos hidráulicos, de los cuales me enamoré y por lo cual puedo afirmar que hice la mejor elección profesional.

A mi tutor, el Doctor Jesús Gracia Sánchez, siendo una guía durante mis estudios de maestría, por la paciencia mostrada durante todo éste trabajo de investigación.

Al ingeniero FAUSTINO DE LUNA CRUZ, por su apoyo en todo el proceso de mi formación académica, desde licenciatura hasta el término de maestría. Gracias por los consejos e interés mostrado en mi vida profesional.

A la sección de laboratorios de Posgrado, por permitir hacer uso del equipo hidráulico, fundamental para la realización del apéndice de la tesis, al personal de laboratorio, Joel Carbajal y Fernando, por las facilidades otorgadas en la realización de las pruebas.

A MIS AMIGOS

Yesenia Saraí, por ser una acompañante fiel, cariñosa, amorosa y comprensiva que me apoyó en todo momento, gracias pequeña.

Amigos, agradezco los momentos compartidos, tanto felices como tristes, por las risas y experiencias que hemos pasado, que sin duda han sido parte de mi formación. Gracias Cristina, mi mejor amiga, por saber escuchar y siempre tener una respuesta adecuada, Ray, Rene, por las experiencias y la amistad.

Victor O. por las enseñanzas sobre camaradería y construcción de modelos hidráulicos.

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 3 |
| 2. Definición del problema | 9 |
| 2.1 Bifurcación y zona de interés | 9 |
| 2.2 Inundación en la ciudad de Villahermosa Tabasco, México | 11 |
| 2.2.1 Estructuras propuestas sobre el río Carrizal | 12 |
| 3. Estado del arte en uso de ADV | 17 |
| 3.1 Introducción | 17 |
| 3.2 El efecto Doppler | 18 |
| 3.3 Inicio de ADV | 18 |
| 3.4 Aplicaciones de equipo ADV | 19 |
| 3.4.1 Campo de flujo existente antes del ingreso por rejillas protectoras a las tuberías de plantas hidroeléctricas | 20 |
| 3.4.2 Uso de ADV en plantas Potabilizadoras | 21 |
| 4. Turbulencia y valores estadísticos | 25 |
| 4.1 Introducción | 25 |
| 4.2 Turbulencia | 25 |
| 4.3 Velocidad | 26 |

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 4.4 RMS (desviación estándar) | 27 |
| 4.5 Índice de turbulencia | 28 |
| 4.6 Espectro de potencia | 30 |
| 4.7 Correlación | 31 |
| 4.8 SNR (señal / ruido) | 32 |
| 5. Descripción del equipo ADV | 35 |
| 5.1 Diseño general del sistema ADV | 35 |
| 5.2 Software | 37 |
| 6. Descripción del modelo | 41 |
| 6.1 Modelo hidráulico | 41 |
| 6.2 Modelo del río Carrizal | 42 |
| 6.3 Gastos de diseño para las estructuras de control | 43 |
| 7. Plan de pruebas y resultados | 47 |
| 7.1 Plan de pruebas | 47 |
| 7.2 Puntos de aforo en el modelo | 50 |
| 7.3 Resultados | 51 |
| 7.3.1 Resultados de margen izquierda Q = 300 m ³ /s | 51 |
| 7.3.2 Resultados de margen derecha Q = 550 m ³ /s | 56 |
| 7.3.3 Resultado del funcionamiento conjunto de las estructuras para un gasto de diseño de 850 m ³ /s | 60 |

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 8. Conclusiones y recomendaciones | 67 |
| 8.1 Conclusión del estudio del funcionamiento hidráulico de las estructuras de control del río Carrizal | 68 |
| 8.1.1 Margen derecha | 68 |
| 8.1.2 Margen izquierda | 69 |
| 8.2 Conclusión al trabajo de turbulencia | 70 |
| 8.3 Conclusión al uso de ADV | 72 |
| 9. Bibliografía y referencias | 75 |
| A. Apéndice A | A1 |

RESUMEN

El trabajo de investigación realizado en la presente tesis tiene como fundamento el uso de equipo ADV, que mide velocidades en 3 dimensiones presentes en un flujo.

Con la ayuda de estos aparatos permite realizar un estudio más detallado y probabilístico a la turbulencia generada por un flujo en su conducción y en el comportamiento con las barreras físicas que lo contienen.

Las pruebas se realizaron en un modelo hidráulico a escala 1:60 de las estructuras de control colocadas sobre el río carrizal, en el estado de tabasco, México.

El estudio está enfocado en las descargas de cada una de las estructuras, estudiando los velocidades presentadas, haciendo un análisis de probabilidad a los registros, obteniendo índices de turbulencia y espectros de potencia, con la finalidad de tener un estudio más completo sobre la turbulencia presentada en las estructuras, con el objetivo de proponer mejoras para el correcto funcionamiento hidráulico.

Obteniendo resultados comparables con diferentes condiciones de operación, se puede definir mejoras en el flujo y generar recomendaciones.

ABSTRACT

Research work done in this thesis is like basis the use of equipment ADV, measured speed present in 3 dimensions in a flow.

With the help of these devices we can make a better probabilistic study of a turbulence generated by a flow in your driving behavior and physical barriers that contain it.

The test are performed in a hydraulic model, use a scale 1:60 in a lab of hydraulic, about structures of control into carrizal river in the state of tabasco, México.

This study focused on the download of each structure, learning made the speed, making an analysis of likelihood to records, get directions and turbulence, power spectrum, with the aim of a more comprehensive study, take on the turbulence submitted in structures with the purpose of proposed improvements to the proper hydraulic function.

Obtain comparable results with different conditions of operation, can best define the flow and generate recommendations.

1. INTRODUCCIÓN

El manejo el agua es un tema de gran importancia, ya que los asentamientos humanos tienden a estar cerca de cuerpos de agua, ya sea estático como lagunas y lagos, o en movimiento continuo, como son los ríos. Debido a los cambios que pueden presentar los cuerpos de agua es necesario construir obras de control para beneficio y protección de la población.

Para el correcto funcionamiento de algunas obras de control en ríos es necesario garantizar la estabilidad del cauce, por lo que es necesario hacer un estudio detallado del comportamiento del flujo como son las socavaciones, que ponen en riesgo la estabilidad de algunas obras de control y provoca daños al cauce aguas abajo de su descarga.

En la actualidad los estudios sobre turbulencia se pueden hacer experimentalmente y teóricamente (como un fenómeno estadístico). El flujo turbulento tiene una naturaleza aleatoria difícil de describir y predecir, aunque es posible disponer de una aproximación del mismo en base a sus propiedades estadísticas.

Es difícil obtener datos reales de flujo turbulento en las estructuras, por las magnitudes de los caudales y de difícil acceso, o simplemente solo se encuentran proyectadas para hacer una evaluación del funcionamiento hidráulico de la estructura. Por lo que se recurre a la construcción de modelos hidráulicos a escala, donde se hace una similitud de su funcionamiento con el propósito de obtener datos que permitan comprender y predecir el comportamiento del flujo en las estructuras reales.

INTRODUCCIÓN

En el capítulo 2, definición del problema, se describe la razón que da lugar a éste trabajo, mencionando el lugar de interés donde se construirá una obra hidráulica de control, conocida como obra de control Macayo, así como el impacto social y económico que impulsa la construcción de éstas estructuras con el fin de preservar la seguridad de los habitantes.

Este estudio tiene 2 partes fundamentales, una es sobre el funcionamiento hidráulico de la estructura de margen izquierda, que al presente se encuentra ya terminada y en funcionamiento, y la segunda, que es la obra de control de margen derecha, que en estos momentos se encuentra en diseño y es necesario predecir el comportamiento hidráulico.

En el capítulo 3, estado del arte, se proporciona una definición de turbulencia y la manera de ser calculada por medio de los datos estadísticos obtenidos de un registro de velocidades. El capítulo describe aparatos ADV, usados en este trabajo, algunas de las aplicaciones en diversos campos de la ingeniería hidráulica y cómo es que han ayudado a comprender mejor algunos fenómenos, gracias a una base de datos de velocidad confiable y con las herramientas estadísticas necesarias para la descripción de los fenómenos.

En el capítulo 4 se hace un resumen sobre la turbulencia de los flujos y valores estadísticos, se describen los parámetros estadísticos y la función de cada uno de éstos parámetros, por lo que en base a los valores resultantes de cada uno, se obtienen las conclusiones al estudio hidráulico varias las estructuras de control del río Carrizal en Tabasco.

En el capítulo 5 se describe el equipo ADV usado para este trabajo, sus características principales por las que es el ideal para la recolección de datos de velocidad en flujos, así como los datos estadísticos seleccionados para el estudio y definición de turbulencia. Se muestran las gráficas de espectros de potencia generadas a partir de los datos de velocidad y se hace una interpretación de ellos.

En el capítulo 6 describe el modelo físico usado para simular las condiciones de topografía del sitio, las estructuras de control propuestas que son analizadas y los gastos para las cuales fueron diseñadas.

Los modelos físicos son fundamentales en los estudios de estructuras frente al comportamiento de los fluidos, pues permiten de una manera más económica comprender las condiciones que se presentan, con el fin de hacer configuraciones que permitan hacer un diseño más eficiente de las estructuras. Todo esto con el fin de garantizar el correcto funcionamiento hidráulico de las estructuras.

En los modelos hidráulicos se muestran los puntos de aforo de velocidades en las zonas de descarga de cada una de las estructuras, y la razón de haberse colocado en dichos sitios.

El capítulo 7 contiene el plan de pruebas y resultados del estudio hecho en las estructuras de control del río Carrizal, donde se describen las diferentes condiciones con las que operarán las estructuras de control, tanto para las pruebas realizadas individualmente, como las hechas en conjunto, con diversas elevaciones, simulando las condiciones de diseño de cada una de las estructuras.

Se presentan los parámetros estadísticos obtenidos de la base de resultados y de manera fundamental los espectros de potencia de cada uno, asociando las magnitudes de los espectros de potencia con el fenómeno presentado en el modelo, desde la condición inicial hasta la propuesta de estructuras disipadoras de energía. Se asocian resultados numéricos con detalles cualitativos.

Finalmente en el capítulo 8 se incluyen las conclusiones de este trabajo, resaltando la importancia del estudio de turbulencia en estructuras hidráulicas, al ser fundamental en el estudio de socavación aguas abajo de ellos y se hacen recomendaciones sobre el funcionamiento.

INTRODUCCIÓN

Posteriormente, en el APÉNDICE A (estudios previos) se incluyen las pruebas realizadas de manera controlada en un canal rectangular de pendiente variable, con gastos definidos y secciones conocidas. Se presentan medidores ADV, y se observa el comportamiento en la toma de datos de velocidad, se estudian los datos estadísticos que derivan de ellos con la finalidad de comprender el fenómeno observado con los datos numéricos obtenidos, una relación de datos cuantitativos con situaciones cualitativas.

Los estudios en el canal rectangular son la base sobre la cual se sustenta el conocimiento del uso y los resultados que se obtienen con los aparatos ADV para esta tesis, los cuales son esenciales para la aplicación en las estructuras de control del río carrizal, lo que facilita la comprensión del fenómeno en una estructura hidráulica real y sustenta lo extenso e interesante del capítulo.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.1 BIFURCACIÓN Y ZONA DE INTERÉS

Las inundaciones en zonas urbanas afectan directamente a la población y causan estragos en la infraestructura y dañan de manera significativa a la economía, la salud, la ecología etc. Es deber de los ingenieros y sistema de gobierno el atender estas situaciones, para lo cual se diseñan obras de control de avenidas en ríos para minimizar o mitigar los daños generados por una conducción irregular de flujo a través de un río.

El sistema del río Grijalva es extenso, el segundo río más caudaloso del país, por lo que ha sido aprovechado para la generación de energía eléctrica por medio de plantas Hidroeléctricas colocadas en diversos puntos del río, que son la Presa de la Angostura o Belisario Domínguez, el mayor embalse de México, la Presa Chicoasén, que tiene la cortina de materiales graduados más alta del país, la Presa Malpaso o Netzahualcóyotl y la Presa Peñitas.

El río Carrizal toma su nombre en la bifurcación Mezcalapa-Samaria-Carrizal, donde por la secuencia de nombres, el río principal es el Mezcalapa, que se bifurca en 2 ríos que toman trayectoria diferente, uno es el río Samaria, y el otro el río Carrizal, éste ultimo atraviesa la ciudad de Villahermosa, Tabasco, que es la capital de dicho estado, las imágenes muestran una vista satelital y una vista aérea donde se localiza la bifurcación mencionada (Ver imagen 2.1.1 y 2.1.2).

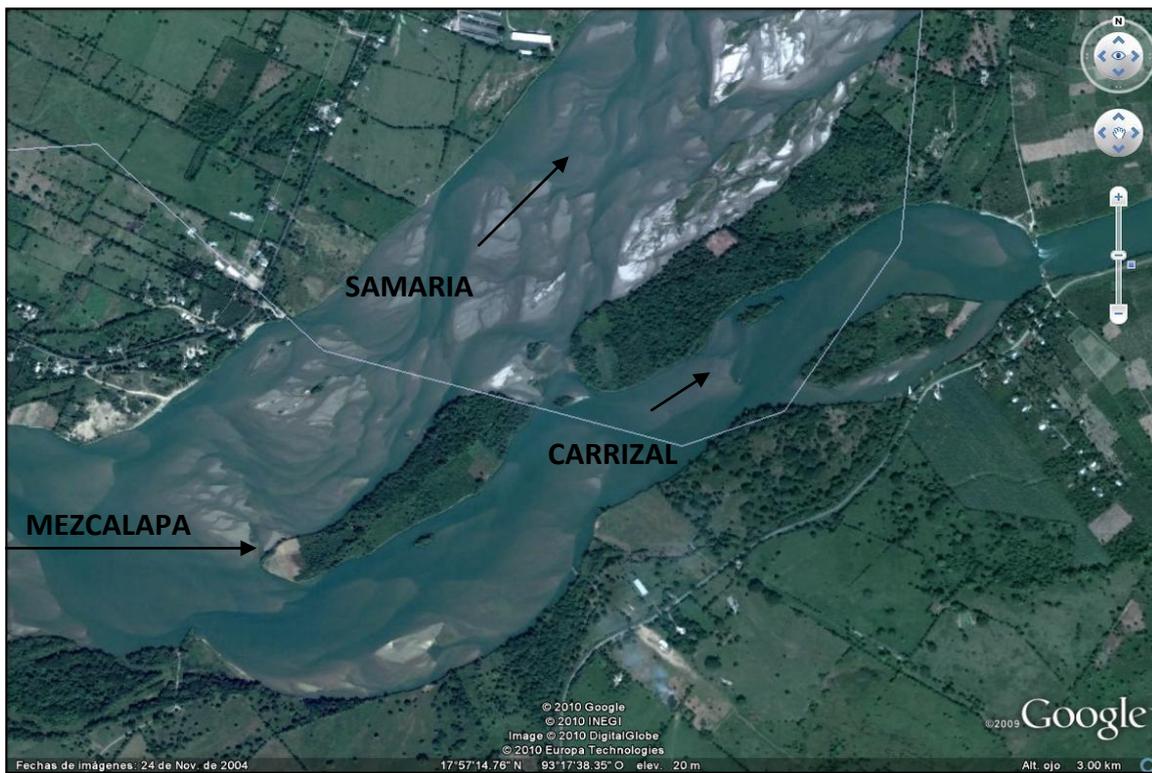


Imagen (2.1.1). Vista satelital de la bifurcación Mezcalapa – Samaria – Carrizal

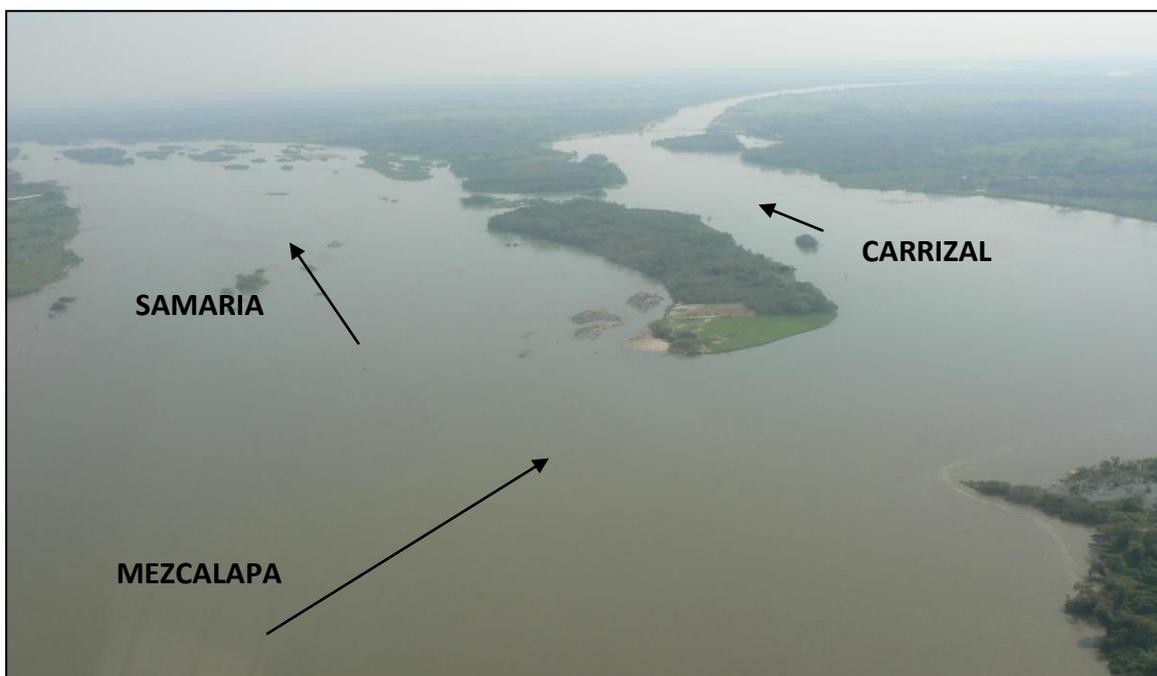


Imagen (2.1.2). Vista aérea de la bifurcación

2.2 INUNDACIÓN EN LA CIUDAD DE VILAHERMOSA TABASCO, MEXICO.

En octubre de 2007 debido a las intensas lluvias presentadas en la cuenca del río Grijalva, los niveles de agua se elevaron de manera considerable provocando que la capacidad de las presas se viera comprometida, por lo que se tuvo la necesidad de operar la obra de excedencias de la presa Peñitas, lo que generó un incremento súbito de caudal hacia el río Mezcalapa, que provocaron un mayor aporte de agua hacia el río Carrizal, viéndose éste seriamente afectado y sobrepasado en su capacidad hidráulica de conducción, por lo que éste desbordo y provocó la peor inundación de los últimos años registrada en la ciudad de Villahermosa. (ver imagen 2.2.1)



Imagen 2.2.1 Inundación en la ciudad de Villahermosa, Tabasco

2.2.1 ESTRUCTURAS DE CONTROL PROPUESTAS SOBRE EL RÍO CARRIZAL

Estas estructuras se encuentran cerca de la bifurcación del río Mezcalapa, y es un sistema de 2 obras de control de avenidas, una por margen izquierda y una por margen derecha, unidas por una escotadura, lo que propone crear una obra de control por toda la parte perpendicular al río Carrizal. (Imagen 2.2.1.1)

La obra de margen izquierda ya está construida, y consta de un canal de llamada que encauza el flujo hacia 3 compuertas radiales, con las cuales se pretende controlar el gasto que pase por la estructura, y así limitando la descarga al río carrizal aguas abajo, que es el lugar donde cruza a la ciudad de Villahermosa.

La obra de margen derecha está en fase de reingeniería de diseño, pues su planteamiento ha sufrido varios cambios y diversas adaptaciones a lo largo de las pruebas en los modelos, como se mencionara en dicho estudio.



Imagen 2.2.1.1 Vista lateral de las estructuras propuestas para control de avenida

Las obras de control han sido estudiadas en un modelo para conocer su funcionamiento y cómo es posible mejorar el flujo a través de las estructuras para evitar problemas en prototipo, ya sea por un ingreso no uniforme que provocaría vibraciones y vórtices en las compuertas radiales. Por otra parte, la salida del flujo es de manera desordenada, con altas velocidades que provocan daños a la descarga, socavaciones y dañan las márgenes del río aguas abajo.

El tema de investigación abordado en esta tesis tiene como finalidad hacer el estudio de la turbulencia presentada en las descargas de las obras de control del río Carrizal, comprenderlas y dar una descripción de sus características mediante la medición de velocidades en sus descargas. Para las condiciones de diseño de cada una de las estructuras, se presentan los datos estadísticos que describen el fenómeno. Para ello se obtienen los espectros de potencia de velocidad.

Cabe mencionar que en estructuras similares, el mal funcionamiento de la descarga provoca socavaciones excesivas en los lechos del río, lo que provoca inestabilidad en las márgenes del río, por lo que es necesario encontrar la manera más eficiente de descargar el flujo.

3. ESTADO DEL ARTE EN USO DEL ADV

3.1 INTRODUCCIÓN

ADV, por sus siglas en ingles (Acoustic Doppler Velocimeter), es un aparato electrónico que usa la teoría del efecto acústico doppler para obtener datos de velocidad de un flujo.

En este capítulo se presenta información importante acerca del uso de los sistemas ADV, que permiten en estudios de laboratorio o en campo, definir y comprender comportamiento de velocidad de algún fluido.

Las mediciones de velocidad, precisas y fiables se han convertido en un aspecto fundamental para las decisiones de gestión del agua. Por lo que los ADV pueden apoyar siendo sistemas de medición más precisos, en menor tiempo y con una base de datos tan extensa como uno quiera, para hacer análisis estadísticos que permitan definir y comprender un fenómeno en conjunto.

Ya sea para la medición de velocidad del agua en ríos, arroyos o canales, modelos de laboratorio, los más versátiles son los instrumentos de la marca SonTek, ya que tienen ventajas por su facilidad de uso, practicidad, transportabilidad y gran calidad en el muestreo de datos de velocidad.

En los estudios en laboratorios de hidráulica, muchas veces interesa el detalle de los fenómenos de dinámica de fluidos como la turbulencia, en pequeñas escalas espaciales y temporales, con las altas tasas de muestreo y los pequeños volúmenes de muestreo. Existe una abundancia de opciones de equipos y configuraciones, el MicroADV SonTek y el ADV brindan un gran apoyo a los experimentos de investigación.

3.2 EL EFECTO DOPPLER

Los equipos de medición SONTEK han empleado el efecto Doppler en sus aparatos, y estos funcionan por medio de un transmisor acústico produce pequeñas y cortas pulsaciones acústicas periódicas, las que al viajar a través del flujo, interaccionan con las micro burbujas, el sedimento o el material suspendido y llegan como un efecto de eco a los receptores acústicos lo que define el volumen de control, es decir, que generan un espacio definido que contiene el fluido y se analiza la característica de la frecuencia, para después mediante el receptor enviar la señal al procesador de información y finalmente al software que mostrará la información procesada, obteniendo datos de velocidad instantánea y parámetros de calidad de muestreo.

En síntesis, el efecto Doppler se genera mediante ondas sonoras y su transporte por el medio que lo contiene. A partir de él se obtiene la relación de velocidades según el medio donde se esté ocupando. El aparato ADV hace uso de éste efecto, genera ondas sonoras en un volumen de control (imaginario), que capta el receptor del aparato para medir las variaciones de la velocidad en el medio líquido.

3.3 INICIOS DE ADV

Los velocímetros acústicos Doppler fueron diseñados y desarrollados por la unidad experimental de ingeniería hidráulica de la armada de Estados Unidos en conjunto a la empresa SONTEK, como herramienta de medición de velocidades de flujo en 3 direcciones (x, y, z) para laboratorio y en entornos de campo, en la actualidad es comercial y está sustituyendo viejos aparatos de medición de caudal que solo logran tomar el dato en una sola dirección, como son propelas o molinetes. La ventaja fundamental de los equipos ADV es el hacer un estudio del flujo en un punto seleccionado y hacerlo de manera espacial, es decir, conocer su comportamiento en un volumen de control, y con ello

interpretar el comportamiento del paso del flujo con el fenómeno completo, indica las velocidades en las 3 direcciones del flujo, y se obtienen datos estadísticos sobre sus fluctuaciones, promedios, resultantes, controles de calidad y demás datos estadísticos que se desprenden de un registro de velocidades en un tiempo dado.

3.4 APLICACIONES DE EQUIPO ADV

Dentro del departamento de investigación de la armada de los Estado Unidos se realizan estudios sobre el flujo del agua, el comportamiento, su velocidad, y la variación de sus características físicas. Con el fin de incorporar los resultados a diseño de obras con una mejor respuesta hidráulica, ya sea en pruebas de modelo o para fines de prototipo directamente. Por consiguiente el cuerpo de investigación cuenta con diversos sistemas de medición como lo son propelas, micro propelas, sistemas electromagnéticos, tubos de pitot y velocímetros Doppler.

Los resultados obtenidos por medio de los velocímetros de efecto Doppler (ADV) son los más confiables, pues permiten realizar captura de datos de velocidad en las 3 direcciones del flujo (x, y, z), es decir, se obtiene un estudio de velocidad en 3 dimensiones, además de generar archivos electrónicos y con una tasa de muestreo bastante amplia, que permite hacer estudios sobre las fluctuaciones que presenta el flujo. La gran cantidad de datos de velocidad permite hacer estudios mas complejos, como es el espectro de potencia que presenta el flujo en dicho punto, lo que es de gran importancia cuando es necesario determinar la energía con la que el flujo actúa sobre sus barreras físicas o la energía contenida en el flujo.

3.4.1 CAMPO DE FLUJO EXISTENTE ANTES DEL INGRESO POR REJILLAS PROTECTORAS A LAS TUBERIAS DE PLANTAS HIDROELÉCTRICAS

Los medidores de velocidad con base en el efecto Doppler han sido utilizados para mediciones en las entradas del flujo a las tuberías de plantas hidroeléctricas, antes de pasar por las rejillas de protección contra basura o elementos de gran tamaño. Con la integración de las mediciones en diversos puntos y los tiempos de descarga, fueron calculadas las pérdidas locales y se integraron a todas las pérdidas del sistema. Como complemento se realizó un estudio estadístico y de intensidad de turbulencia al flujo que ingresó por las tuberías. Los resultados obtenidos son de gran importancia y ayuda para conocer el comportamiento del flujo dentro de la tubería y de la turbina, además de permitir optimizar el rendimiento de las turbinas, por ejemplo proyectos de mantenimiento y rehabilitación. Estas mediciones fueron realizadas en una pequeña planta hidroeléctrica localizada en EMMENWEID in LUCERNE, construida en 1934

Se realizaron 117 mediciones, en 9 posiciones diferentes y con 13 profundidades en cada posición, las mediciones fueron distribuidas más densamente cerca de las paredes y de la superficie de flujo. El tiempo de muestreo se realizó por periodos de 1 minuto, con 25 muestreos por segundo, es decir que resultaron 1500 datos de velocidad por cada muestra en cada uno de los puntos de medición.

Para el análisis de los datos de velocidad se usó el programa de cómputo LABVIEW, como paso inicial del estudio se revisaron los valores del parámetro de correlación, que es calculado con el valor normalizado de la covarianza provocado por el eco que producen las partículas del fluido que pasan por el volumen de control, donde al detectar valores inferiores a 0.7 en los datos de velocidad, éstos fueron reemplazados por los valores medios de velocidad.

En general la calidad de los datos de éste trabajo fueron buenas, solo un pequeño porcentaje de las correlaciones presentaron calores inferiores a ése límite.

Los resultados obtenidos del estudio revelaron que la toma por donde ingresa el flujo tiene un diseño deficiente, pues muestra un déficit de velocidad en la parte central, lo que define una zona de mayor turbulencia que provoca un reflujo. Los vórtices son parte de una turbulencia generada en el flujo, y se incrementan en mayor grado en las zonas más cercanas a las barreras físicas y en las recirculaciones en el flujo.

Como conclusiones de la investigación se hizo notar la gran ayuda de los sistemas Doppler, al estimar de buena manera las velocidades que se presentan en zonas de descarga o ingreso de flujo para una turbina sin un gran esfuerzo de instalación. Los datos obtenidos con estos sistemas serán de gran interés al preparar proyectos de rehabilitación, y con mayor detalle en los resultados para tomar decisiones básicas en la manera de construcción.

Las mediciones de la sonda proveen información detallada del campo de flujo, zonas de recirculación, características de turbulencia y fenómenos determinados como la presencia periódica de vórtices

3.4.2 USO DE ADV EN PLANTAS POTABILIZADORAS

La aplicación de los aparatos ADV en plantas potabilizadoras permiten obtener un perfil completo de velocidades a través del recorrido que hace el flujo para poder potabilizarse, éste debe ser comparado con los requerimientos específicos de cada una de las secciones de tratamiento con el cual deben de cumplir para el correcto funcionamiento del sistema de potabilización.

Así pues, se presenta una gran velocidad en las entradas al sistema por medio de los canales parshall, el cual permite hacer un cálculo inicial del volumen que ingresa al sistema, la consecuencia de colocar los canales parshall, es que al reducir el área hidráulica incrementamos la velocidad del flujo, éste, en la descarga tiende a ser mas turbulento, por lo que el ingreso a los demás canales de tratamiento se realiza de manera desordenada.

En los procesos primarios, donde es necesario que los componentes químicos de la primera etapa sean mezclados de manera homogénea, es necesario un nivel de turbulencia y velocidad en el mezclado del líquido considerable. Pero, para las demás etapas no deben presentarse fluctuaciones de velocidad ni de índice de turbulencia, ya que los agentes químicos de estas fases necesitan mayor tiempo de reacción, e inclusive ciertas sustancias necesitan depositarse.

Es por lo que las mediciones son de gran importancia al momento de diseñar y valorar la eficiencia del sistema, comparando los valores obtenidos con los valores necesarios para el correcto funcionamiento. Se obtienen velocidades, fluctuaciones de velocidad, índices de turbulencia y otros valores de carácter numérico que permiten interpretar el funcionamiento de los procesos, lo que permite tomar decisiones con mayor grado de confiabilidad en cuanto a estructuras que mejoren el comportamiento del flujo.

4 TURBULENCIA Y VALORES ESTADÍSTICOS

4.1 INTRODUCCIÓN

El régimen turbulento es caótico. Las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se entrecruzan formando pequeños remolinos aperiódicos. Fluctuando la velocidad continuamente en cada punto.

La turbulencia puede generarse por el paso del fluido sobre las fronteras, o bien por el flujo de capas de fluido de diferentes velocidades, dando lugar a esfuerzos cortantes entre las mismas capas de fluido, por lo que se reconocen 2 tipos de turbulencia, una provocada por los efectos viscosos debido a las barreras físicas; llamada turbulencia de pared, y otra que se produce por el movimiento de las capas de fluido unas sobre otras de diferentes velocidades; llamada turbulencia libre. Definición propuesta por Taylor y Kármán. Un ejemplo de turbulencia de pared es la acción del flujo al pasar o estar en contacto con estructuras, mientras que para la turbulencia libre corresponde a chorros turbulentos y estelas en zonas de mezclado.

4.2 TURBULENCIA

En la dinámica de fluidos, la turbulencia o flujo turbulento muestra un régimen no permanente, caracterizado como caótico, las propiedades estocásticas cambian de manera rápida, incluyendo el bajo momento de difusión como el alto momento de convección, la súbita variación de presión y la velocidad en espacio y tiempo, por lo que solo puede estudiarse de manera experimental y estadística.

4.3 VELOCIDAD

Las velocidades que se obtienen por medio del aparato ADV dependen de su colocación, así es necesario ubicar al sensor del eje X en la dirección del flujo predominante, así obteniendo los resultados positivos mayores. Las velocidades quedarán orientadas y con sus signos siguiendo el sistema de eje coordenado de espacio, es decir los cuadrantes generados por los ejes X, Y, Z. Así, en lugares donde se presente recirculación de flujo puede presentarse en el mismo registro valores positivos como negativos, en el caso de existir turbulencia, el eje donde las variaciones son mayores son las presentadas en el eje Z.

En valores de Z, los datos positivos se presentan hacia arriba y los negativos se presentan en dirección del fondo del río, es decir hacia el lecho. La hipótesis inicial es que mientras la velocidad sea positiva, permite que las partículas del río se sustenten y exista una posibilidad de ser transportada, mientras que para signo negativo es que en esa línea de flujo se dirige hacia el lecho del río, provocando una compactación, o que al chocar con el lecho del río, y debido a la velocidad predominante del flujo genere una fuerza de arrastre, aunque no se puede descartar que si la velocidad de la componente Z es demasiado alta, puede provocar una mayor erosión en el sitio de choque.

Para el estudio se presentan el promedio de las velocidades obtenidas por la recolección de datos del equipo ADV, en cada una de las direcciones del espacio X, Y, Z (4.3.1 a 4.3.3), y para el caso de la velocidad total o velocidad característica de flujo se uso el generado por el equipo, que es el resultado obtenido de la resultante de la velocidad del flujo. (4.3.4)

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} u_i \quad (4.3.1)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} v_i \quad (4.3.2)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} w_i \quad (4.3.3)$$

$$V' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{u_i^2 + v_i^2 + w_i^2} \quad (4.3.4)$$

Las velocidades presentan unidades de cm/s, que es el formato inicial de muestreo del software del ADV, las cuales se pueden modificar dentro de las opciones del software que maneja el aparato, para fines más completos y que los valores se presentaran en formato de números enteros con decimales se optó por usar éstas unidades.

4.4 RMS (Desviación estándar)

ROOT MEAN SQUARE, por sus siglas en inglés significa la media cuadrática de las velocidades presentes durante las mediciones del flujo, es decir, la desviación estándar de la velocidad, sus dimensiones son iguales a las de la variable de estudio.

Los valores de RMS se obtienen de manera individual (4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3), mientras que para el valor resultante es de manera similar al utilizado en la velocidad.

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} (u_i - \bar{u})^2} \quad (4.4.1)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} (v_i - \bar{v})^2} \quad (4.4.2)$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} (w_i - \bar{w})^2} \quad (4.4.3)$$

Los valores generados con esta herramienta estadística, son de gran utilidad cuando se observa una muestra, pues es un dato que asocia las fluctuaciones del flujo sobre el promedio, lo que permite tener una idea de la magnitud de las fluctuaciones.

4.5 ÍNDICE DE TURBULENCIA

El índice de turbulencia permite disponer de un parámetro en el estudio de turbulencia, es un parámetro que permite relacionar las fluctuaciones de velocidad en el espacio con la velocidad resultante del flujo, lo que permite hacer comparaciones entre las diferentes condiciones que se pueden presentar en un sitio, o bien, para probar diversas estructuras y comprender el comportamiento ante ciertas situaciones, por lo que además del análisis cualitativo también se obtiene un dato cuantitativo que permita observar y tomar como referencia para conocer la evolución de los datos.

Para definir el Índice de Turbulencia se utiliza la desviaciones estándar de cada uno de las componentes del flujo, entre la resultante de velocidad.

El nivel de turbulencia (Naudascher, 1994) está definido por

$$= \frac{V'rms}{V_0} \quad (4.5.1)$$

V_0 velocidad resultante del flujo

$V'rms$ fluctuación en la dirección V_0

$$It = \frac{\sqrt{\frac{1}{3(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)}}}{V_0} \quad (4.5.2)$$

El índice de turbulencia se relaciona directamente con la magnitud de las velocidades, así pues permite comparar índices de turbulencia entre sí cuando las magnitudes de velocidades son similares en los muestreos realizados. Esto puede ser de gran magnitud en sistemas de intercambio de calor, dentro del sistema de rotación de turbinas y compresores, descargas de obras de excedencia, y en un grado medio en tuberías, conexiones de las mismas, conducción de ríos, descargas en deltas. Y de menor magnitud de velocidades en conducciones de procesos industriales, procesos de potabilización, etcétera.

Un índice de turbulencia cercano a cero, indica que la turbulencia es baja y que el flujo se mantiene estable sin demasiadas fluctuaciones. Lo que ofrece una comparación en el recorrido del flujo para determinar las zonas donde se presentan variantes en el comportamiento del flujo, para tomar medidas de control para estos puntos.

Cabe mencionar que el índice de turbulencia y su interpretación está ligado con la velocidad predominante en el flujo, así un flujo lento con muchas fluctuaciones puede generar un índice de turbulencia alto, mientras que un flujo de mayor velocidad genera un índice de turbulencia más bajo.

Por lo mencionado no es posible comparar índices de turbulencia entre flujos de diferentes velocidades.

Ejemplos donde es importante conocer el índice de turbulencia en modelos o prototipos son en zonas de descargas, ya sea de presas, escotaduras u obras de excedencias. Ya que ellas se debe de garantizar un buen funcionamiento hidráulico del desfogue y protección de márgenes y taludes aguas abajo de la obra. Una excesiva turbulencia provocar que aguas abajo de la estructura, las márgenes del río se deterioren y sufran modificaciones adversas, por lo que es necesario proponer y diseñar sistemas de disipación de energía y ordenamiento de flujo, para que sea correcto el funcionamiento de la descarga y recorrido del flujo sobre el río aguas abajo de la estructura.

4.6 ESPECTRO DE POTENCIA

El espectro de potencia puede ser obtenido mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) de un registro de datos, en éste caso de velocidades.

Para no requerir filtros y correcciones en el cálculo de la FFT es necesario que la cantidad de datos sea igual a una potencia entera de 2 (32, 64, 128, 256, 512, etc.)

El espectro de potencia obtenido para éste estudio es el generado durante el procesamiento de datos del aparato ADV, éstos espectros han sido comparados con los calculados con el programa MATHCAD, con la función de generación de espectros de la transformada rápida de Fourier (FFT), siendo los resultados idénticos para cada unos de los registros de velocidades obtenidos en un archivo data sustraído del aparato ADV, usando los primeros 512 datos de la serie de velocidades.

Obtener el espectro de potencia de una señal en el tiempo responde a la pregunta “¿en cuáles componentes de frecuencia está contenida las mayores amplitudes de la señal?”

En el capítulo 7 llamado plan de pruebas y resultados, se muestra los espectros de potencia más significativos para las pruebas realizadas, tanto para valores de resultante como para valores individuales de las componentes en el espacio, con el fin de observar el comportamiento de cada una y dar una explicación del comportamiento gráfico con respecto a los demás resultados y a lo observado.

4.7 CORRELACIÓN

La correlación es una relación lineal entre los valores de dos variables directa de la calidad de muestreo de las velocidades y su relación entre sí.

Los valores de correlación son expresados en porcentaje, iniciando con un 100% como una correlación perfecta entre todos los valores de la serie de datos, así para correlaciones con valores entre 70% y 100% son considerados típicamente buenos.

Para correlaciones más bajas del 70% indican que ya existen perturbaciones en el medio, es decir, problemas relacionados con excesiva turbulencia, burbujas de aire excesivas que interfieran en la captación de la señal, inclusive alguna falla con el equipo. Es por eso que éste es uno de los indicadores de mayor importancia dentro del estudio, pues es un factor que permite obtener la relación de la calidad entre las mediciones, es decir que muestra perturbaciones considerables que hacen que la correlación sea inferior a la de un flujo de poca turbulencia o sin ella, por consiguiente se tendrá un factor más de ayuda, que acerque al diagnóstico de flujo turbulento, sólo con observar la serie de datos y visualizar la variación durante el perfil de muestras.

4.8 SNR (signal to noise ratio)

Es la relación señal / ruido, y se define como el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que corrompe, las unidades de medición son en Decibelios (db). Éste parámetro forma parte de la calidad de muestreo, lo que permite corroborar que los datos obtenidos de alguna prueba han sido realizados de manera correcta.

En aparatos de la marca SONTEK, que basa su proceso en el efecto Doppler, es recomendable mantener un valor por encima de los 15db, con el fin de valorar la recolección de datos como fiable y con buena calidad de muestreo, para valores inferiores representa ruidos excesivos que afectan el proceso de muestreo, por lo que los valores obtenidos no serán fiables.

5 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO ADV

5.1 DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA ADV

El equipo usado para la recolección de datos de velocidad esta basado en la teoría del fenómeno de efecto Doppler, el cual permite mediante la refracción de las ondas de sonido obtener distancias de objetos, y si éstas se encuentran en movimiento cruzando por una zona de control se logra obtener la velocidad que presenta el flujo.

Los principales componentes se muestran en la Imagen 5.1.1

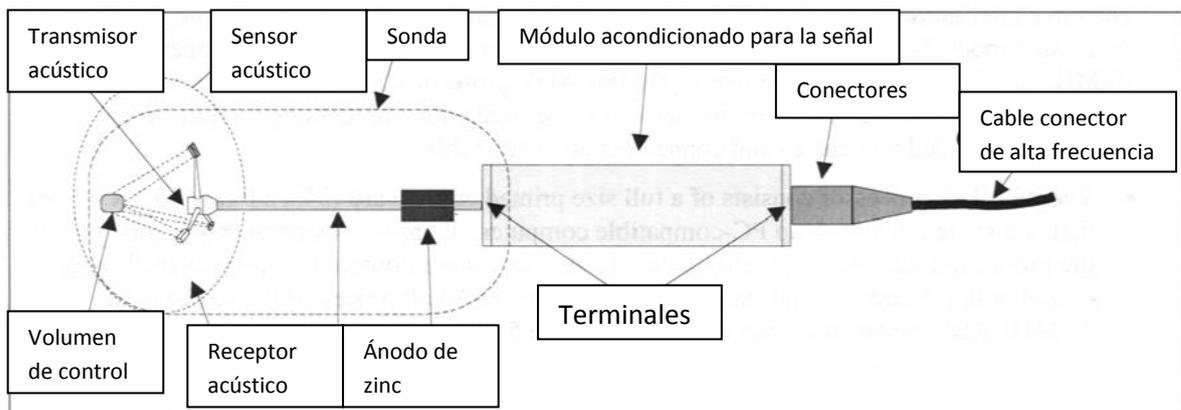


Imagen 5.1.1 Componentes del esquivo ADV seleccionado

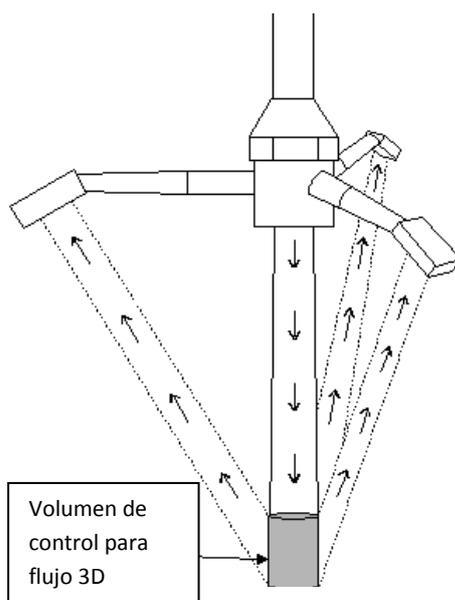


Imagen 5.1.2 Volumen de control

En el diagrama se muestra el cómo se genera el volumen de control del sistema por parte de los sensores (Imagen 5.1.2).

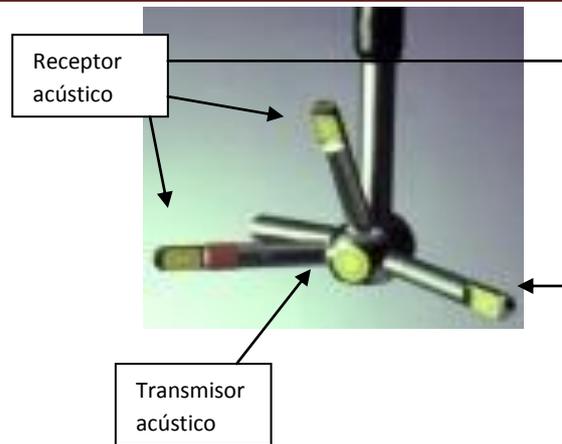


Imagen 5.1.3 Transmisor receptores de señal

Las partes fundamentales del equipo son el transmisor y el receptor de la señal (Imagen 5.1.3), y es necesario mantenerlos en excelentes condiciones, cabe mencionar que las terminales de los sensores y receptor se tendrán que orientar en dirección al flujo predominante, y manteniendo la pendiente del terreno, es decir sin inclinaciones diferentes al movimiento del fluido, ya que al tomar datos en las 3 componentes del eje coordenado se incurriría en un error humano de muestreo. Para la orientación, cada sistema tiene un indicador en color rojo o amarillo en los extremos de un sensor, que indica que el flujo deberá de estar paralelo a ésta marca para obtener datos correctos.

El equipo usado en las mediciones es el mostrado en las Imagenes 5.1.4 y 5.1.5, el cual permite movilidad y un muestreo de datos de velocidad confiable, previamente comprobado.



Imagen 5.1.4 Equipo ADV



Imagen 5.1.5 Equipo usado para recolección de datos

5.2 SOFTWARE

Todo el sistema necesita estar controlado por una computadora, con el software necesario para el arranque del sistema y la exposición de los datos para el usuario, este software está incluido en el sistema o se pueden descargar desde la página de soporte de cada uno de los equipos ADV.

Mediante el software Horizon ADV (Imagen 5.2.1), se identifica el modelo de la sonda y sus configuraciones para el correcto funcionamiento donde se indican los parámetros iniciales del sistema. Posteriormente, se inicia la recolección de datos y se presentan los datos capturados en tiempo real, donde se especifica el tiempo de muestreo, y al finalizar el ciclo, se genera el archivo total de las mediciones tomadas, el cuál será explicado con mayor detalle en la sección del apéndice anexo.



Imagen 5.2.1 Software Horizon ADV

El software que permite visualizar y procesar los datos generados por la sonda es el llamado WIN ADV, que como herramienta complementaria obtiene los datos estadísticos del registro completo de velocidades, muestra gráficos asociados a ellos y permite exportarlos a procesadores de datos externos, en los cuales se permite manipular para obtener un resumen más completo (Imagen 5.2.2).

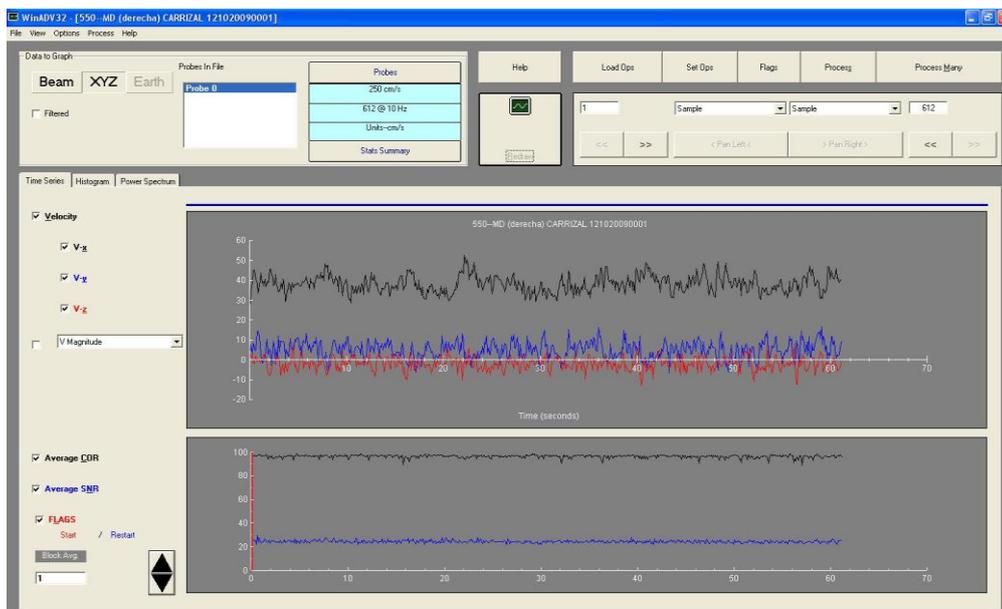


Imagen 5.2.2 software WIN ADV

6. DESCRIPCIÓN DEL MODELO.

6.1. MODELO HIDRÁULICO

Muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la hidráulica son tan complejos que no es fácil tratarlos únicamente con métodos matemáticos. Por lo anterior es conveniente recurrir al empleo de técnicas experimentales, como herramientas en la obtención de soluciones prácticas.

En hidráulica, el término modelo corresponde a un sistema que simula un objeto real, llamado prototipo, aplicando escalas y leyes de similitud.

Dentro de los modelos físicos se presentan los de fondo fijo y de fondo móvil. De fondo fijo se refiere a modelos los cuales las características topográficas y batimétricas no cambian con el paso de los fluidos. Mientras que los modelos de fondo móvil presentan variaciones en su conformación al paso de los fluidos, para lo cual para cada prueba es necesario conformar nuevamente la batimetría del modelo, con el propósito de mantener condiciones similares para cada una de las pruebas.

El modelo físico del río Carrizal es de fondo móvil, puesto que es necesario conocer los efectos producidos por el paso del agua por las estructuras y por el cauce del río, conocer el efecto en las márgenes y obtener datos de socavación en cada una de las descargas.

6.2 MODELO DEL RÍO CARRIZAL

Para el modelo del río Carrizal se empleó un modelo de fondo móvil, usando una escala 1:60, donde se representa la topografía del sitio y las condiciones que se presentan en la zona donde está ubicada la estructura de margen izquierda y donde se desea colocar la estructura de margen derecha. En la Imagen 6.2.1 se muestra un diagrama general del modelo realizado en el laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

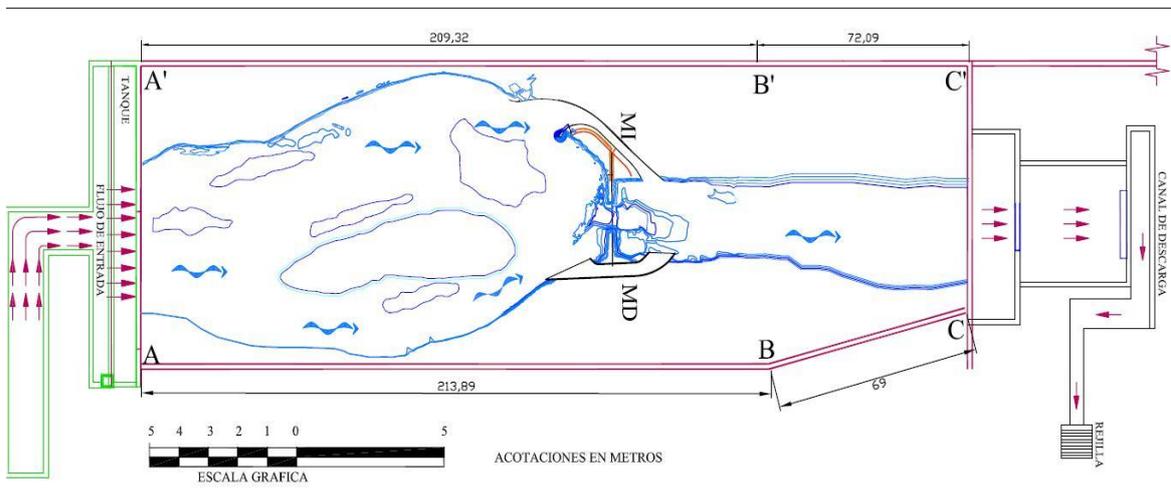


Imagen 6.2.1 Modelo hidráulico del río Carrizal en la zona de obra

En la Imagen 6.2.2 se muestran las estructuras propuestas sobre el río Carrizal, se encuentran construidas a escala 1:60, que es la de modelo y son las estructuras donde se realizó el estudio de la presente tesis. Las estructuras fueron construidas y trazadas según los planos de proyecto.



Imagen 6.2.2 Estructuras sobre el río Carrizal

6.3 GASTOS DE DISEÑO PARA LAS ESTRUCTURAS DE CONTROL

El gasto de diseño de la obra de margen Izquierda es de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el gasto de diseño para la de margen derecha será de $550 \text{ m}^3/\text{s}$, que al funcionar conjuntamente se obtendrá un gasto máximo de $850 \text{ m}^3/\text{s}$, que es el máximo de diseño que podrán derivar hacia el río Carrizal, para mitigar las inundaciones que se puedan presentar en la ciudad de Villahermosa (Imagen 6.3.1).



Imagen 6.3.1 Gastos de diseño en cada una de las estructuras

La obra de margen izquierda está compuesta por 3 compuertas radiales, dicha estructura se encuentra construida en el sitio, y las pruebas realizadas en éste estudio son para predecir el comportamiento del flujo al momento que empiece a funcionar.

La obra de margen derecha aún no está construida, pues está en diseño, y es la razón por la cual es de gran importancia estudiar el comportamiento de la estructura de manera individual, y en conjunto con la de margen izquierda se logrará dar recomendaciones de mejora en las descargas o comprobar que el diseño sea el adecuado.

7. PLAN DE PRUEBAS Y RESULTADOS

7.1 PLAN DE PRUEBAS

El objetivo de las pruebas realizadas era conocer el comportamiento hidráulico de cada una de las estructuras propuestas para el gasto de diseño, en su forma individual y conjunta.

Las pruebas se llevaron a cabo en el modelo hidráulico escala 1:60 de la zona del río Carrizal donde se alojarán las estructuras de control de avenidas hacia la zona de la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Las pruebas contemplan el estudio de las velocidades que se presentan en las descargas de cada una de las estructuras, los valores de probabilidad asociados a la determinación de turbulencia, el índice de turbulencia y los espectros de potencia generados en cada uno de los casos.

En cada una de las estructuras se localizaron puntos de aforo en las descargas. Se definieron 3 puntos de medición, en forma transversal al flujo y son en la margen izquierda, zona centro y margen derecha, con el fin de obtener las velocidades en la misma sección en diferentes puntos del canal.

La estructura de margen izquierda ya se encuentra terminada, por lo que las revisiones serán con respecto a las estructuras propuestas para disminuir las velocidades y los efectos negativos que se presentan aguas abajo de la estructura, en las paredes del talud de las márgenes del río.

La primera parte de la prueba se realizó con un gasto de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ y el canal de descarga sin obstáculos en su desfogue, para la segunda prueba en ésta estructura de margen izquierda se mantiene el gasto de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ y se colocan 3 escalones en la parte transversal de la descarga, uno tras otro, con la finalidad de mejorar el comportamiento de la descarga (Imagen 7.1.1).



Imagen 7.1.1 Detalle de escalones disipadores de energía y reducción de velocidad en obra de margen Izquierda

La estructura de margen derecha tiene un diseño preliminar, por lo que la representación en el modelo es una de las propuestas. Para obtener resultados del comportamiento hidráulico sobre la estructura y en la descarga, el gasto para el estudio individual fue de $550 \text{ m}^3/\text{s}$, cerrando la obra de margen izquierda y sólo operando margen derecha (Imagen 7.1.2).



Imagen 7.1.2 Estructura de margen derecha vista desde aguas arriba de la estructura

Con los datos individuales de velocidad de cada estructura se procede a realizar la prueba del funcionamiento conjunto para el gasto de diseño, que es de $850 \text{ m}^3/\text{s}$, considérese que ésta es la situación más crítica, pues serán los límites de diseño, y sólo se operará para grandes volúmenes de escurrimientos, regulando el gasto aguas abajo, donde se localiza la ciudad de Villahermosa, limitando el gasto en el río, y derivar el gasto excedente en la confluencia (bifurcación) hacia el río Samaria (Imagen 7.1.3).



Imagen 7.1.3 Funcionamiento conjunto del gasto de diseño en ambas estructuras

7.2 PUNTOS DE AFORO EN EL MODELO

Los puntos de aforo en el modelo se seleccionaron a lo largo de la sección transversal de la descarga, en donde termina la obra e inicia el lecho del río, por lo que se tomaron 3 puntos, uno en la parte izquierda, en la parte central y por último en la parte derecha, estos puntos corresponden tanto en la obra de margen izquierda como la de margen derecha, manteniendo constantes las separaciones de las mediciones.

En la Imagen 7.2.1 se observan los puntos de aforo de la estructura de margen izquierda, mientras que la Imagen 7.2.2 muestra la estructura de margen derecha. Éstos son los puntos donde se midieron las velocidades que en el apartado de resultados se presentarán.

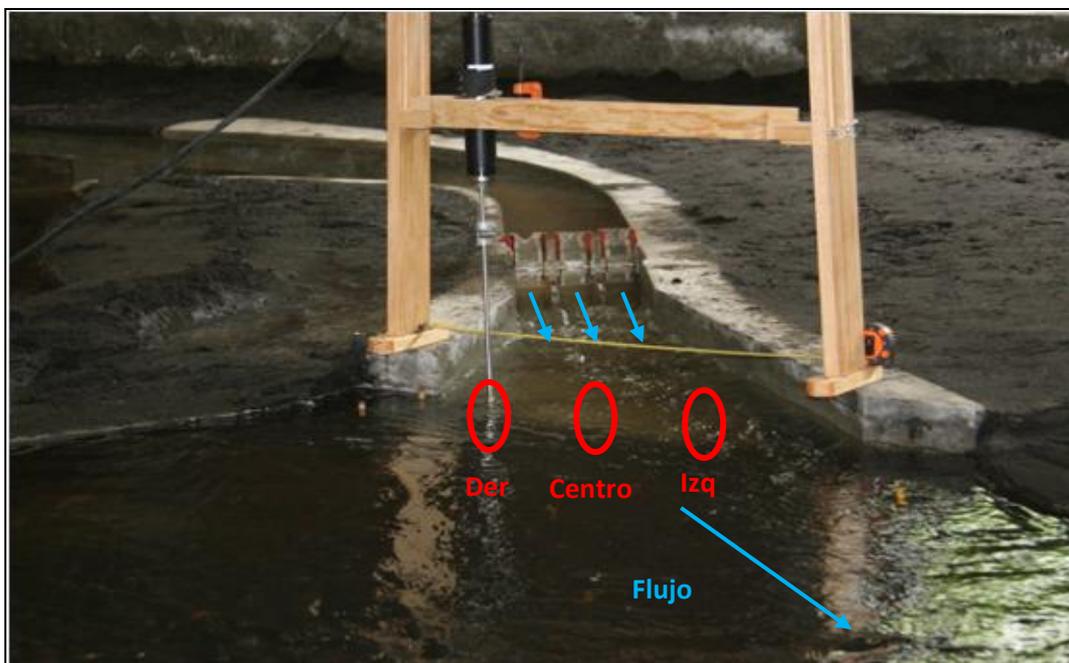


Imagen 7.2.1 Posición de los lugares de medición en margen izquierda

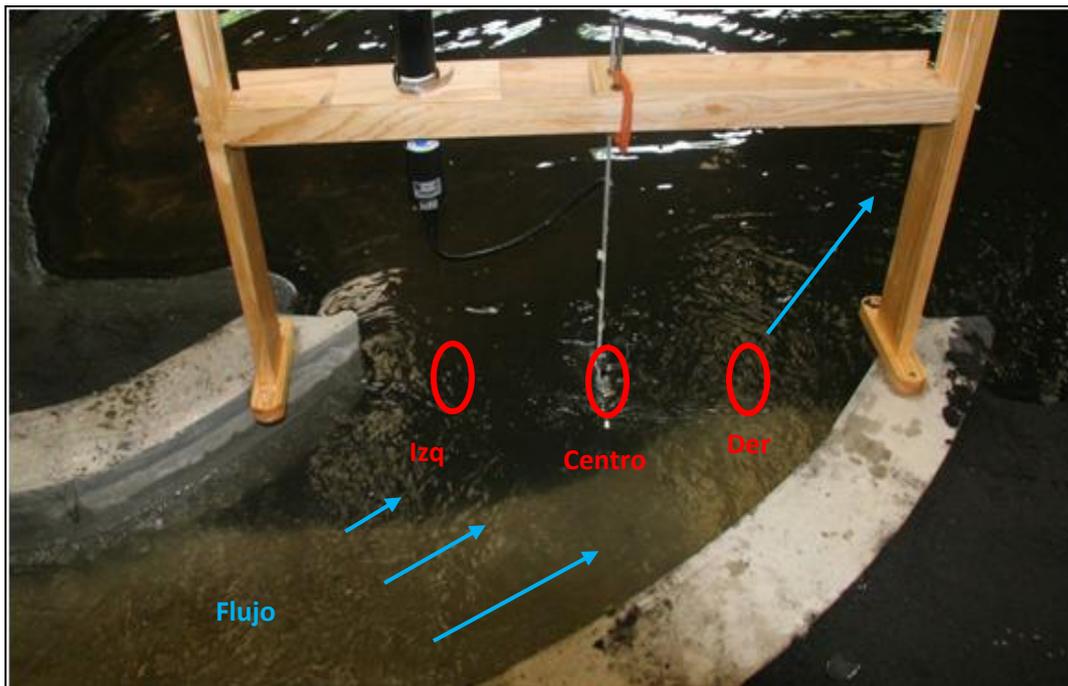


Imagen 7.2.2 Posición de los lugares de medición en margen derecha

7.3 RESULTADOS

7.3.1 Resultados de Margen Izquierda $Q= 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Los resultados mostrados en la Tabla 7.3.1.1 pertenecen a la prueba correspondiente a operar únicamente margen izquierda con un gasto de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ donde se hace la comparación en margen izquierda de la descarga con disipadores de energía llamadas costillas y en ausencia de estas estructuras disipadoras.

Tabla 7.3.1.1

| RESULTADOS PARA MARGEN IZQUIERDA 300 m3/s | | | | | | | | | | | |
|---|-------|------|------|-------|----------|----------|----------|---------|-------|-------|-------|
| File | Vx | Vy | Vz | V-Avg | RMS[Vx'] | RMS[Vy'] | RMS[Vz'] | RMS[V'] | IT | COR | SNR |
| Con costillas MI | 21.61 | 0.60 | 0.58 | 21.63 | 6.250 | 5.084 | 4.586 | 9.270 | 0.247 | 95.61 | 27.29 |
| Con costillas CE | 22.38 | 0.96 | 0.77 | 22.42 | 10.300 | 7.747 | 5.205 | 13.900 | 0.358 | 89.94 | 26.09 |
| Con costillas MD | -0.05 | 4.33 | 1.91 | 4.73 | 4.778 | 5.576 | 3.367 | 8.078 | 0.985 | 73.96 | 24.58 |
| Sin costillas MI | 25.82 | 3.50 | 0.18 | 26.06 | 11.011 | 7.102 | 4.686 | 13.915 | 0.308 | 95.39 | 25.70 |
| Sin costillas CE | 25.01 | 2.34 | 0.25 | 25.12 | 11.749 | 9.329 | 5.118 | 15.851 | 0.364 | 91.45 | 27.99 |
| Sin costillas MD | -2.06 | 4.95 | 0.11 | 5.36 | 4.841 | 5.911 | 4.074 | 8.659 | 0.932 | 72.82 | 24.25 |

Las velocidades medidas en la estructura en ausencia de los disipadores son mayores, mientras que con disipadores es menor la velocidad, lo que indica que la estructura disipadora cumple con el objetivo de disminuir las velocidades a la descarga, esto aplica en la zona izquierda de la descarga y zona central, que es donde el flujo tiene mayor velocidad y movimiento, se observa que en éstos dos casos las velocidades disminuyeron en las 3 direcciones del flujo; sin embargo, no sucede así con la descarga por la zona derecha, que es donde, a pesar de las costillas, se sigue presentando un flujo de baja velocidad con recirculación.

Los valores de RMS tuvieron un ligero descenso en su magnitud, lo que provoca que se presenten menos fluctuaciones en las mediciones, mientras que el índice de turbulencia no presenta una gran variación, lo que es debido a que ésta relación depende de las fluctuaciones del flujo y la velocidad resultante, por lo que al disminuir los dos parámetros, es aceptable que se mantenga en los mismos valores, más adelante se mostrará el cambio en los espectros de potencia (Imagen 7.3.1.1).

El índice de turbulencia es de mayor magnitud en la zona derecha, donde el flujo es de tránsito lento, pero no indica que realmente sea el más caótico, pues en ésta sección la velocidad es mucho menor con respecto a los otros dos puntos de la sección, por lo que pequeñas variaciones en la zona derecha en relación con el valor de velocidad tan bajo, generan un valor alto de índice de turbulencia (IT), por lo que los valores del índice para ser comparables es necesariamente con valores de velocidad resultante similares, ya que si se comparan los valores del IT, obtenidos para flujos con

diferencias considerables de velocidad, se obtienen relaciones carentes de credibilidad. Es posible obtener valores más altos de la turbulencia en los flujos lentos que en los rápidos, inclusive cuando el nivel de energía sea mucho mayor en el flujo de gran velocidad, es por eso que se recomienda obtener el espectro de potencia, para observar la concentración de energía.

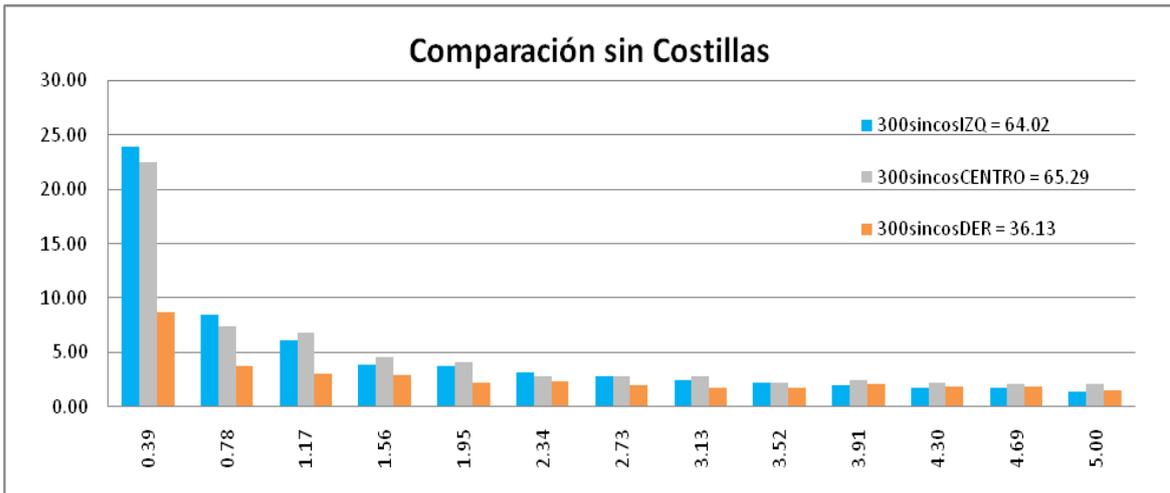


Imagen 7.3.1.1 espectro de potencia, donde se muestra los valores para cada una de los puntos en la sección transversal para la condición SIN costillas.

En la imagen 7.3.1.1 se observa el comportamiento del espectro de potencia, cada una de las barras es la suma de 20 pulsos, ésta forma de visualizarla permite mostrar menor cantidad de barras, pero no afecta la interpretación general de dicho espectro, ya que mantiene las propiedad geométrica del comportamiento. En la imagen se observa que en cada uno de los registros, se colocó el valor de la suma de las pulsaciones de energía, donde los valores mayores se encuentran en la zona izquierda y central, mientras que los valores mínimos se presentaron en la zona derecha. Sí se recuerda, en ésta zona derecha es donde se obtenían los valores mayores de turbulencia, pero aquí se demuestra que a pesar de un alto índice de turbulencia presente, se obtiene una menor energía y es debido directamente a que la velocidad predominante es de menor magnitud.

El espectro de la imagen 7.3.1.2, corresponde al comportamiento cuando se colocan las costillas disipadoras de energía. Para éste caso se observa que los valores totales de energía contenidos para la zona izquierda se disminuyeron, al igual que en la zona central, aunque de menor magnitud, y en la zona izquierda se logró un incremento relativamente bajo, interpretando los datos y mediante lo observado se obtuvo una mejor distribución del flujo en la sección transversal de la descarga, y como se planteó, las velocidades disminuyeron, por lo que se concluye que las estructuras disipadoras cumplen con la función prevista. Cabe mencionar que se demuestra que a pesar de que en la margen derecha se presenta un índice de turbulencia alto, en el espectro de potencia la cantidad de energía del flujo en éste punto es menor, así como la velocidad es baja.

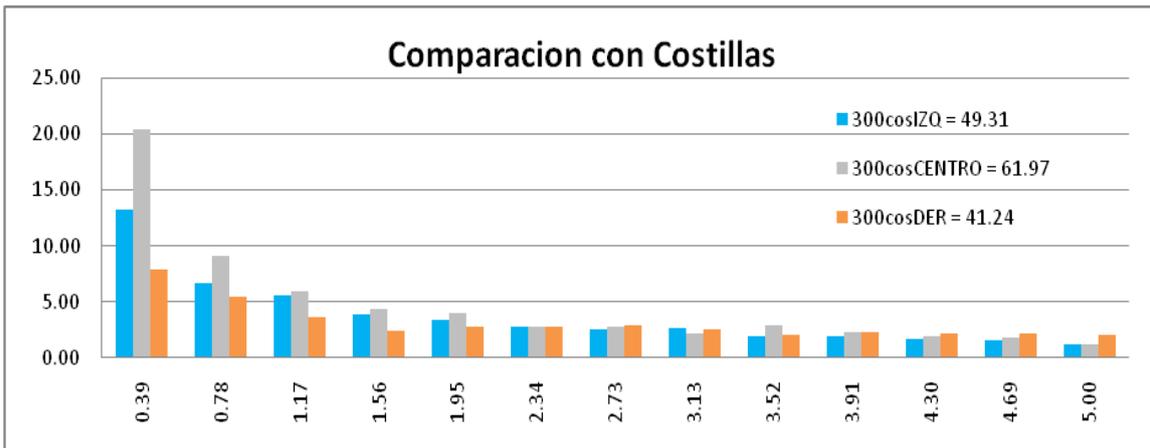


Imagen 7.3.1.2 Espectro de potencia generado para la condición de uso de costillas como elemento disipador

Como análisis adicional, se observó que el espectro de potencia para las velocidades en la dirección Z, entre las mediciones con y sin costillas en la estructura de margen izquierda, presentan un desfase en los valores máximos de cada amplitud en la señal, propiciando que se presenten con mayor frecuencia pero de menor magnitud. Por lo que el comportamiento cambia debido a la colocación de costillas disipadoras.

El efecto resultante de éste proceso se muestra en la imagen 7.3.1.3.

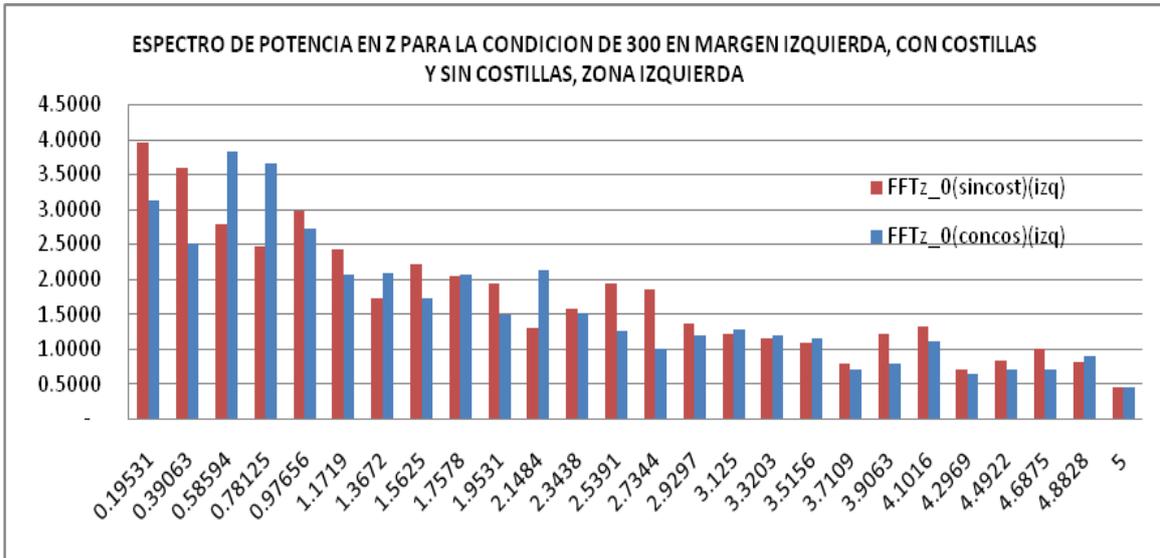


Imagen 7.3.1.3 espectro de potencia generado para la condición de uso CON Y SIN costillas para la zona izquierda en relación únicamente a la velocidad presente en el eje Z

El índice de correlación para las dos pruebas es aceptable y está dentro de los parámetros establecidos anteriormente, cabe mencionar que los valores más bajos se obtuvieron en la zona derecha de la descarga, lo que corrobora los datos de velocidad tan baja con respecto a toda la sección y que se genere una zona de lento avance. Los valores de SNR están dentro de lo establecido para definir que no existe problemas al momento de las mediciones.

7.3.2 Resultados de margen derecha $Q= 550 \text{ m}^3/\text{s}$

La Tabla 7.3.2.1 contiene los resultados de la prueba donde funciona únicamente la margen derecha con un gasto de $550 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 7.3.2.1

| RESULTADOS DE MARGEN DERECHA CON GASTO DE 550 m3/s | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|-------------------|----------|----------|----------|---------|-------|-------|-------|
| File | Vx cm/s | Vy cm/s | Vz cm/s | V- Avg cm/s | RMS[Vx'] | RMS[Vy'] | RMS[Vz'] | RMS[V'] | IT | COR | SNR |
| MD (izquierda) | 3.44 | - | 0.68 | 4.10 | 5.573 | 3.975 | 3.959 | 7.907 | 1.113 | 97.57 | 23.51 |
| MD (centro) | 25.61 | - | - | 25.68 | 6.365 | 5.492 | 4.022 | 9.320 | 0.210 | 96.33 | 24.84 |
| MD (derecha) | 38.19 | 4.99 | 1.97 | 38.57 | 4.195 | 4.182 | 3.078 | 6.676 | 0.100 | 96.47 | 24.4 |

Las velocidades en margen derecha son no uniformes, presentándose la mayor magnitud en la zona derecha de la descarga, lo que implica que el flujo se recarga más hacia ésta margen, y las velocidades en la zona izquierda son muy bajas con respecto a la zona derecha, por lo que el ancho efectivo de la estructura es muy grande, y la descarga no es uniforme, lo que provoca que el flujo en ésta zona sea muy lento (Imagen 7.3.2.1), así mismo se observa que en todos los valores de RMS están en un rango similar, pero debido a que la diferencia de valores es demasiado grande, los valores de índice de turbulencia (IT) varían en gran medida, presentando los valores máximos en la zona izquierda.

Tomando en cuenta que las variaciones de RMS en cada una de las direcciones es mayor que el promedio de cada una, lo que presenta un gran desorden del flujo, pero debido a su velocidad tan baja parece ser visualmente que el fenómeno es diferente. La imagen 7.3.1.2 muestra el registro de velocidades de margen derecha, donde las velocidades son mayores y el índice de turbulencia es menor, mientras que la imagen 7.3.1.3 muestra la zona izquierda de la descarga, es donde se observa las fluctuaciones con respecto al promedio de las velocidades.

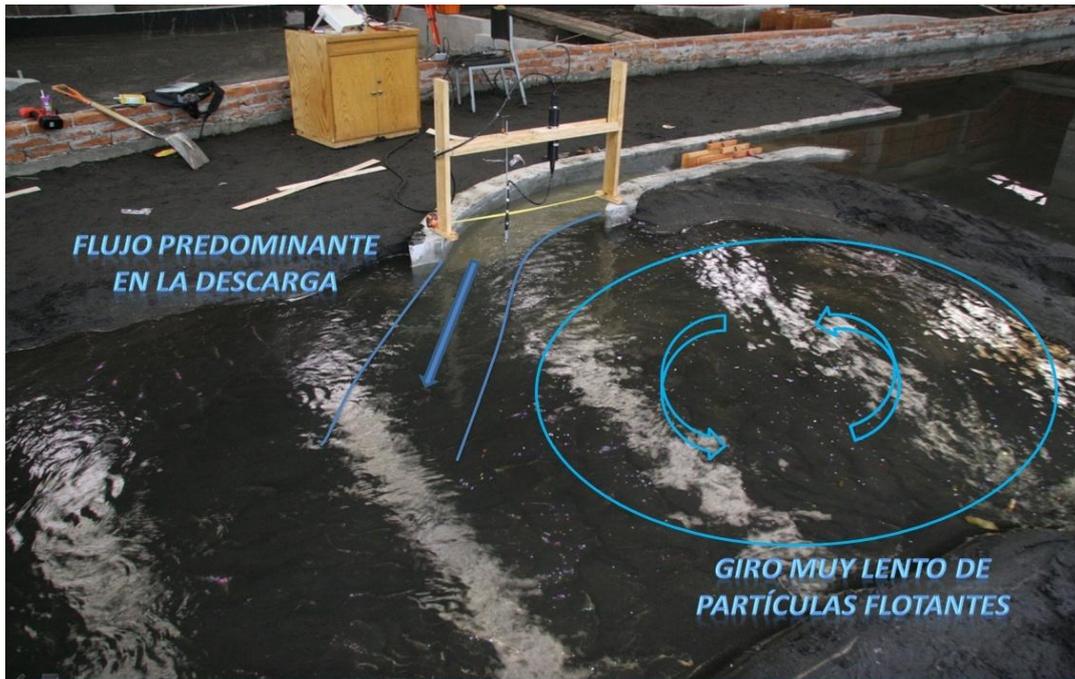


Imagen 7.3.2.1 Flujo lento en zona izquierda de margen derecha.

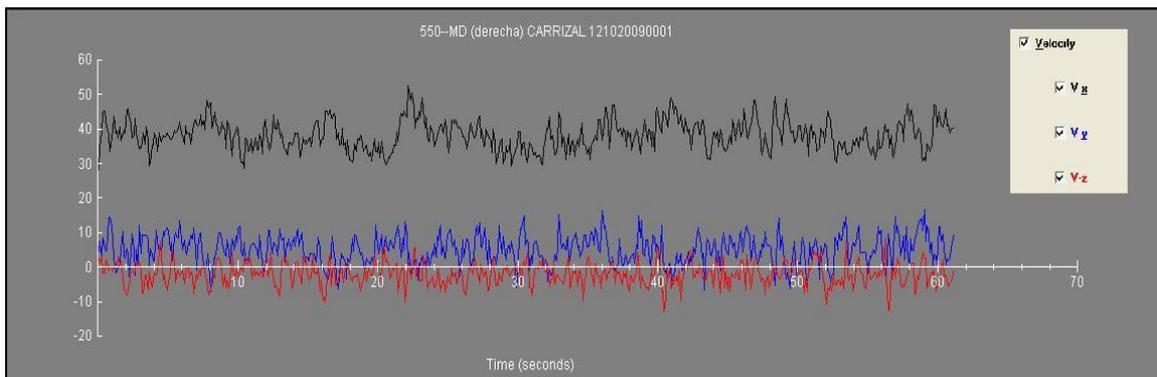


Imagen 7.3.2.2 Registro de velocidad en zona derecha, estructura de margen derecha

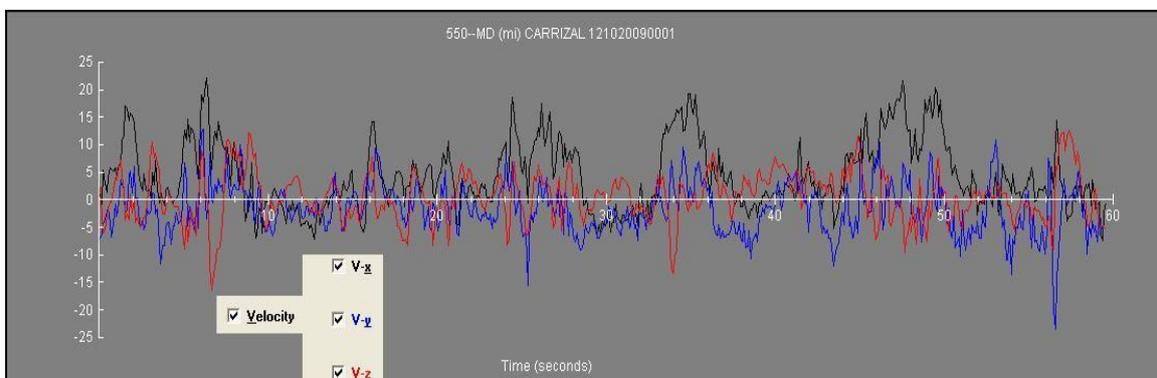


Imagen 7.3.2.3 Registro de velocidad en zona izquierda, estructura de margen derecha

Los valores de correlación y de SNR se mantienen como aceptables, teniendo en valores de correlación bastante cercanos a 100.

Para estas mediciones se hizo el levantamiento de la socavación producida por el desfogue del flujo, el cual se presenta en la imagen 7.3.2.4, se presenta la distribución de la socavación. Por lo que se observa la distribución diferencial en la zona derecha de la descarga, que inmediatamente concluye en un funcionamiento deficiente, corroborando ésta conclusión visual con los valores obtenidos de velocidad, los cuales muestran la diferencia en toda la sección transversal e indicando las mayores velocidades que se presentaron corresponden al lugar de la socavación, cabe mencionar que también se provocó daños al talud de margen derecha, inmediatamente en la descarga, por lo que aunado a la mala distribución de velocidades, se agrega el factor de la deficiente geometría de descarga, generando vórtices sobre el talud en la salida.

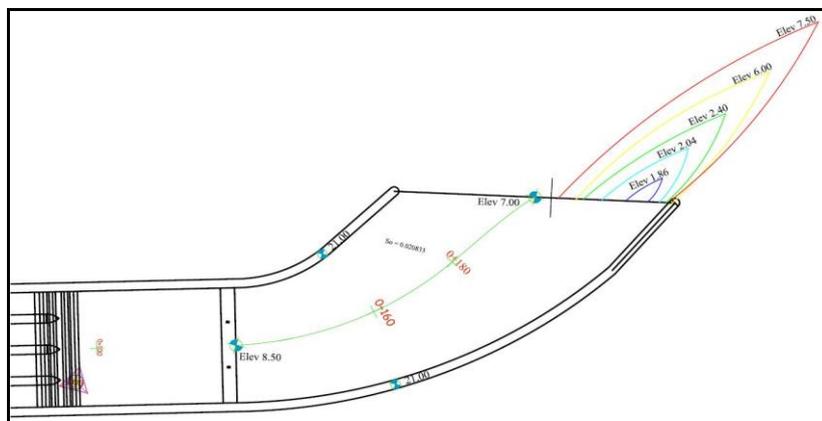


Imagen 7.3.2.4 Diagrama de localización de socavación (se indican las profundidades)

Los espectros de potencia obtenidos para ésta prueba de funcionamiento de margen derecha y con gasto de $550 \text{ m}^3/\text{s}$ se presentan en la imagen 7.3.2.5, donde se muestra que a pesar de que en la zona izquierda se presentó el mayor índice de turbulencia, se encontró depósito de sedimento, por lo que a pesar de que las fluctuaciones son mayores respecto a su velocidad resultante, la diferencia reside en que como la

velocidad predominante no es suficiente para producir el transporte del sedimento y se acumula en el sitio, además de mostrar una zona de baja circulación en esa zona de la descarga. Cabe mencionar que la mayor socavación se presenta en la zona derecha de la descarga, donde la velocidad predominante es mucho mayor y también presenta la mayor velocidad en el eje Z, la cual es la principal causa de erosión en el lecho del río y en el talud.

Para éste caso el espectro de potencia obtenido muestra valores superiores en la zona central, siguiendo por la zona derecha y al final presentarse la menor en la zona de descarga izquierda donde se presenta la velocidad más baja, por consiguiente y debido a las fluctuaciones elevadas comparadas con su velocidad, el índice de turbulencia es mayor, aunque como se comento en el párrafo anterior, las variaciones de velocidad son lo bastante diferentes para encontrar que el flujo se descarga en su mayoría por la zona derecha, donde se recarga el flujo y en donde la componente Z es mayor y provoca la socavación en el lecho del río en su descarga no uniforme. La imagen 7.3.2.5 muestra la comparación de los espectros obtenidos en diferentes puntos de la sección del río, con los valores resultantes de velocidad.

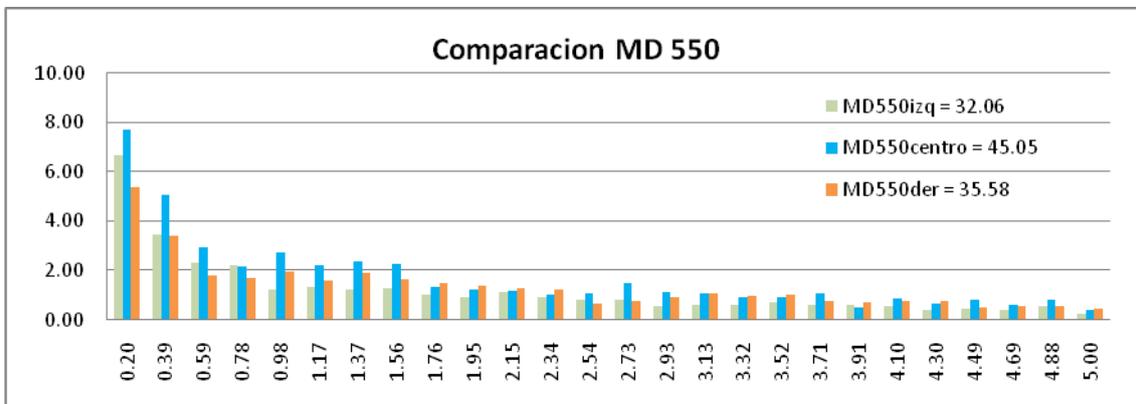


Imagen 7.3.2.5 Espectro de comparación en la sección transversal de la descarga de margen derecha con gasto de 550 m³/s

7.3.3 Resultados del funcionamiento conjunto de las estructuras para un gasto de diseño de 850 m³/s

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.3.3.1 cuando funcionan conjuntamente las dos estructuras, con un gasto para margen izquierda de 300 m³/s y de 550 m³/s para margen derecha, mostrando los resultados en la Tabla 7.3.3.2. Tómese en cuenta que ésta situación sería la más crítica, regulando el gasto máximo de diseño para que llegue hacia aguas abajo, a la ciudad de Villahermosa.

Tabla 7.3.3.1 Margen Izquierda, Funcionamiento Conjunto (Q= 850 m³/s)

| MARGEN IZQUIERDA FUNCIONAMIENTO CONJUNTO CON GASTO TOTAL DE 850 m3/s | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|---------------|----------|----------|----------|---------|-------|-------|-------|
| File | Vx cm/s | Vy cm/s | Vz cm/s | V-Avg cm/s | RMS[Vx'] | RMS[Vy'] | RMS[Vz'] | RMS[V'] | IT | COR | SNR |
| 850-IZQ (izquierda) | 20.71 | 2.68 | -1.60 | 20.95 | 8.461 | 6.805 | 5.023 | 11.963 | 0.330 | 95.71 | 44.73 |
| 850-IZQ (centro) | 36.00 | 4.16 | -3.31 | 36.39 | 13.096 | 9.305 | 5.860 | 17.100 | 0.271 | 94.67 | 45.86 |
| 850-IZQ (derecha) | 16.96 | 3.33 | -1.18 | 17.33 | 12.599 | 8.333 | 5.937 | 16.230 | 0.541 | 95.43 | 44.70 |

Por la estructura de margen izquierda pasan solamente 300 m³/s, analizando las velocidades obtenidas para ésta condición tienen una mejor distribución en la sección transversal, comparadas con las presentadas en su funcionamiento individual.

Los índices de turbulencia presentan una disminución al mejorar la distribución de velocidad en la sección, resultando un mejor funcionamiento hidráulico al operar conjuntamente las estructuras.

Tabla 7.3.3.2 Margen Derecha, Funcionamiento Conjunto (Q= 850 m³/s)

| MARGEN DERECHA FUNCIONAMIENTO CONJUNTO CON GASTO TOTAL DE 850 m3/s | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|---------------|----------|----------|----------|---------|-------|-------|-------|
| | Vx cm/s | Vy cm/s | Vz cm/s | V-Avg cm/s | RMS[Vx'] | RMS[Vy'] | RMS[Vz'] | RMS[V'] | IT | COR | SNR |
| 850-MD (izquierda) | 14.21 | -2.51 | -0.35 | 14.43 | 7.814 | 5.340 | 4.853 | 10.636 | 0.426 | 96.02 | 24.90 |
| 850-MD (centro) | 20.16 | -0.70 | -0.39 | 20.18 | 6.085 | 5.612 | 4.053 | 9.217 | 0.264 | 97.25 | 23.75 |
| 850-MD (derecha) | 28.62 | 1.60 | -1.76 | 28.72 | 5.891 | 4.706 | 3.474 | 8.301 | 0.167 | 96.96 | 23.54 |

En el caso de la estructura de margen derecha, pasa un fenómeno similar, pues al operar las dos estructuras en conjunto, los valores de velocidad tienden a ser un poco más uniformes, aunque presentan todavía variaciones, lo que provoca que el índice de turbulencia en la zona izquierda baje su magnitud al pasar con mayor velocidad por éste punto, aunque siga teniendo valores de RMS similares a la prueba individual, mientras que la zona derecha presenta un aumento de índice de turbulencia, y es debido a que la velocidad promedio baja y se mantienen las variaciones de RMS.

La imagen 7.3.3.1 muestra el funcionamiento conjunto para el gasto de diseño, es de mencionar que aunque los valores de zona derecha de margen izquierda y la zona izquierda de margen derecha incrementaron su valor, aún se presenta una zona de baja circulación.



Imagen 7.3.3.1 Flujo de movimiento lento en la descarga conjunta.

El espectro de potencia más representativo entre el comportamiento hidráulico individual y en conjunto de las obras de control es el presentado por la estructura de margen derecha, en el componente Z; que es la principal causa de la socavación en la zona de la descarga. Para ésta condición el gasto de la estructura fue de 550 m³/s para ambas pruebas, una individual y otra conjunta con gasto total de 850 m³/s.

En el componente Z, además de incrementar la magnitud al incrementar el gasto, los ciclos de energía se alteran, de manera en que el fenómeno se atrasa, es decir, la mayor energía ocurre con una frecuencia menor, pero con mayor magnitud, Imagen 7.3.3.2.

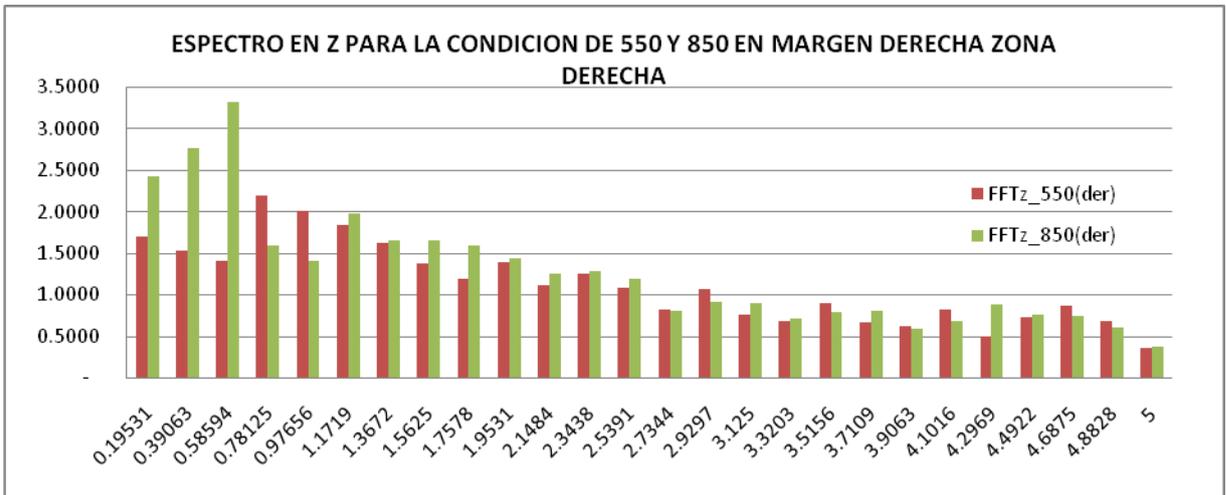


Imagen 7.3.3.2 Espectro de potencia para la comparación del comportamiento con el mismo gasto de desfogue individual, pero con gasto total diferente.

En el caso del espectro presentado para la condición de comparación de descarga de 300 m³/s de la estructura de margen izquierda, una es operada solamente la de margen izquierda, con un gasto individual total de 300 m³/s, mientras que el otro es el paso de 300 m³/s de manera individual, pero la condición total de gasto es de 850 m³/s al operar en conjunto las dos estructuras para el desfogue del gasto máximo de diseño.

Los resultados obtenidos de velocidad, muestran que la mayor magnitud se presenta en la zona central de la descarga, por lo que es predominante el flujo en esa zona, además de ser el sitio donde se presenta la línea central de la socavación.

Una observación importante es que durante el funcionamiento de la descarga conjunta de las estructuras, la distribución de velocidades se mejoró en la zona derecha de la margen izquierda, y de la zona izquierda de la margen derecha, por lo que la distribución de descarga del flujo fue más uniforme, aunque aunado a esto se siguió presentado la zona de baja circulación y en cierto modo de recirculación, debido al choque de las líneas de flujo. Al ir a mayor velocidad las centrales, las de las zonas internas presentaban retroceso y amortiguamiento, como se muestra en la Imagen 7.3.3.3, donde se ilustra lo observado con líneas de flujo individuales.

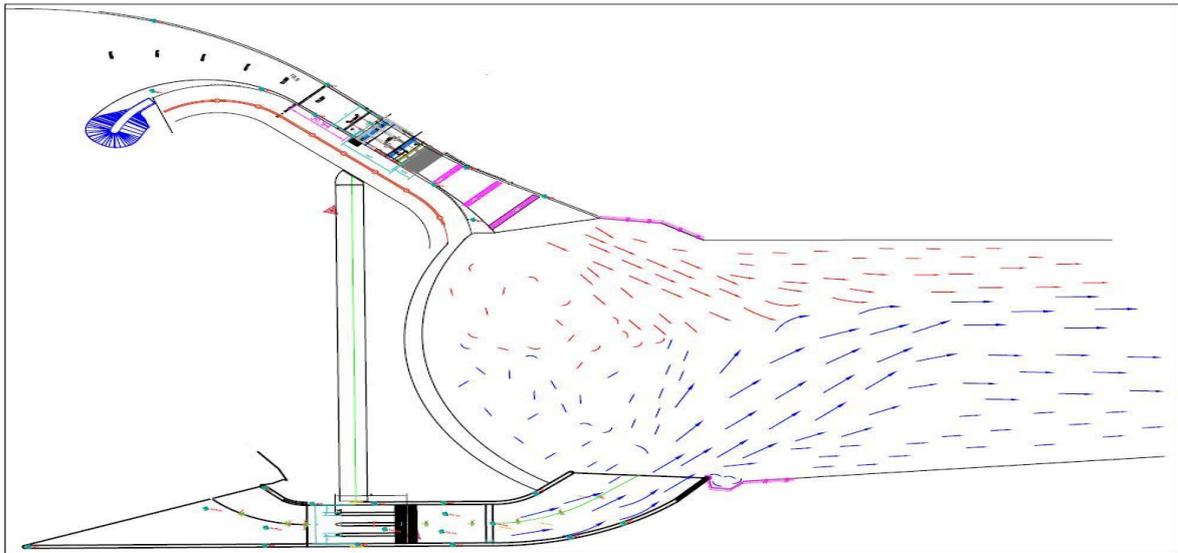


Imagen 7.3.3.3 Representación de la líneas de flujo durante la prueba

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La principal conclusión de ésta investigación es que para estudios de que antes sólo se estudiaban de manera visual y cualitativamente, como los presentados en plantas de tratamiento, descargas de vertedores, comportamiento del flujo a través de compuertas, en canales, etc., ahora se pueden relacionar con un comportamiento cuantitativo con valores numéricos para su categorización y clasificación. También ahora se puede hacer un estudio de la evolución del comportamiento del flujo cuando se incluyen estructuras que lo modifican, ya sea en prototipo o en modelos hidráulicos. Con las mediciones detalladas de velocidad se comprende de mejor manera el comportamiento hidráulico.

Al contar con el índice de turbulencia y los espectros de potencia de la base de datos de velocidad y estadísticos de ellas, es posible realizar un estudio de mayor calidad y obtener interpretaciones más completas y con mayor credibilidad tanto en el diseño de estructuras como en las modificaciones planteadas para lograr un mejor comportamiento del flujo.

8.1 CONCLUSIÓN DEL ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS ESTRUCTURAS DE CONTROL DEL RÍO CARRIZAL

Del análisis del comportamiento del flujo a través de las estructuras de control del río Carrizal de manera individual y en conjunto de las 2 estructuras al operar, se desprenden varias conclusiones y recomendaciones.

8.1.1 Margen derecha

El funcionamiento de la obra de margen derecha es deficiente, pues descarga la mayor cantidad de flujo sobre la parte derecha del canal y otra parte importante por el centro, pero el déficit se presenta en la zona izquierda de la sección, pues las velocidades son muy bajas y se presenta depósito de sedimento en ese sitio.

Otra observación importante es que la socavación ocurrida es importante, por lo que se sugiere rediseñar la salida del flujo para obtener una distribución de velocidades más uniforme, con un mejor comportamiento y reducir las velocidades y fluctuaciones para la componente Z, que provocan dicha socavación.

En la zona izquierda de la margen derecha se encontraron valores altos de turbulencia, pero la velocidad en este punto era muy pequeña comparada con la zona derecha donde se recargó el flujo, por lo que al ser muy bajas las velocidades en la zona izquierda cualquier variación por pequeña que sea eleva el índice de turbulencia, las velocidades son pequeñas y similares en las 3 direcciones, por lo que no existe un movimiento de transporte de partículas, lo que origina un depósito de sedimento en dicha zona. El movimiento general fue tan bajo que no permitió el traslado del material antes depositado, agregando a esto de manera visual se presentó un flujo de recirculación, descrito en los resultados obtenidos de esta prueba en el capítulo 7.

8.1.2 Margen Izquierda

La obra de margen izquierda ya se encuentra terminada, por lo que el estudio se centró en el funcionamiento hidráulico de la descarga, y la manera en que la propuesta de escalones (como disipadores) pudiese ser efectiva. El objetivo principal era demostrar que con la ayuda de disipadores se podría mejorar la descarga de las condiciones actuales que carecen de estructuras disipadoras.

Los resultados fueron favorables, ya que se consiguió disminuir la velocidad resultante en toda la sección, los valores de las fluctuaciones (RMS) también tuvieron un ligero decremento, además de ordenar el flujo en la componente Y, por lo que el flujo tuvo una mejora en el comportamiento de descarga. Los valores del índice de turbulencia para las dos condiciones son similares, y la razón es que al momento de bajar la velocidad resultante y las fluctuaciones en una proporción similar, éste parámetro se mantuvo con valores semejantes, por lo que además se obtuvo la conclusión de que los valores de turbulencia sólo se podrán comparar directamente entre dos fenómenos con condiciones diferentes, al mantener una velocidad resultante similar, cosa que no sucedió para esta parte del estudio.

Por lo anterior, y al no ser posible ocupar éste parámetro como valor determinístico de la mejora por los disipadores, se procedió a apoyarse en espectros de potencia, que permitieron determinar los valores de amplitud presentes en los periodos de muestreo en cada una de las pruebas con escalones de disipación y sin ellos. Llegando a la conclusión del buen funcionamiento de los escalones, mejorando el funcionamiento hidráulico, al disminuir las velocidades, distribuirlas de mejor manera en la sección hidráulica, disminuir los valores de amplitud de onda de las velocidades y favorecer el movimiento del flujo en toda la sección.

8.2 Conclusión al trabajo de turbulencia

El índice de turbulencia es de gran utilidad y de gran importancia en estudios y análisis de fluidos, cuando las velocidades en el eje predominante o resultante sean de manera similar, pues indica el incremento o decremento de las fluctuaciones para el rango de velocidad con la que el fluido se mueve, es decir, que a valores similares de velocidad indica la manera en que varía con respecto al valor promedio de su velocidad, que permite identificar y clasificar la importancia de la turbulencia presente en dicho flujo.

Una limitación en la aplicación de índices de turbulencia se presenta al comparar el índice de turbulencia entre 2 flujos con velocidades distintas aunque se presenten en un mismo sitio, ya que el comportamiento es totalmente diferente con velocidades bajas o altas, y el índice es inversamente proporcional a la velocidad, por lo que a velocidades muy bajas y pequeñas variaciones puede presentarse un índice alto, mientras que para flujos de gran velocidad e importantes variaciones puede que presente un índice inclusive más bajo que el de baja velocidad.

Es por eso que es conveniente hacer un estudio a detalle de cada una de los componentes tridimensionales, para comprender el fenómeno de forma individual y relacionarlo con lo observado con el comportamiento que presenta, buscando la manera correcta de diseñar obras para el mejoramiento hidráulico, modificando los valores de turbulencia y espectros de potencia, haciéndolos de menor magnitud para mitigar los efectos adversos de éste fenómeno de turbulencia

Los parámetros empleados en ésta tesis son los siguientes:

- Velocidades instantáneas en cada una de las direcciones del flujo (x, y, z)
- La desviación estándar de la velocidad de cada una de las direcciones del flujo (RMS)
- Índice de turbulencia, que permite comparar el desorden interno y de sus fluctuaciones, pero para poder ser esto válido es necesario que la velocidad resultante sea similar.
- Espectros de potencia, al variar las velocidades en un mismo fenómeno a causa de estructuras disipadoras o potencializándolas, el índice de turbulencia ya no aplica de manera directa, por lo que es necesario conocer y comparar las variaciones que presentan las amplitudes de onda producidas por la velocidad, identificando los ciclos y la frecuencia que presente mayor importancia
- Valores de correlación que permite mantener un nivel de calidad y control en los muestreos, permitiendo identificar si existen perturbaciones durante las mediciones
- Valores de SNR (sound noise to ratio) es un parámetro de calidad de muestreo dedicado a la potencia de la señal de la sonda o equipo, valores inferiores al mínimo establecido por el aparato indicará fallas en la señal, ya sea por falla de no identificar el volumen de control, burbujas de aire excesivas o simplemente un mal funcionamiento interno de la sonda

8.3 Conclusión al uso de ADV

Importancia cobrará el uso de éstas herramientas en el estudio y descripción del fenómeno de socavación, como son estructuras de descarga, pilas de puentes, obras de desvío (espigones, ataguías) etcétera, donde las velocidades en el eje Z se incrementen por acciones de las mismas obras o por el movimiento natural del flujo, generando el transporte de las partículas del lecho del río y no permitir el depósito de nuevas partículas transportadas, que a largo plazo podrá provocar inestabilidad tanto para el lecho del río como para las márgenes.

El estudio de velocidades instantáneas es extenso y tiene diversas aplicaciones, pues considerando que existen flujos que llegan a ser cíclicos o que en su comportamiento presentan ciclos de velocidades (tal es el caso de zonas de mezcla).

Al no conocer el tiempo de cada ciclo se puede llegar a caer en que en el tiempo de muestreo de velocidades se presente dicho ciclo, que provocaría un amortiguamiento de valores tanto positivos como negativos y una velocidad resultante compensada, que sin duda se puede verificar con índices de turbulencia y espectros de potencia, que al momento de separar los ciclos, se puede llegar a definir los tiempos de cambio de ciclo y así tener un mejor entendimiento del comportamiento del fenómeno.

APÉNDICE A

ESTUDIOS PREVIOS

A.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE ESTUDIOS PREVIOS

Las pruebas de este capítulo se realizaron a lo largo de un canal rectangular de pendiente variable, colocando en él estructuras que permitieron modificar el régimen de flujo y poder observar diferentes condiciones de comportamiento del fluido.

Con las diferentes condiciones generadas al flujo, se logró registrar mediciones a lo largo del recorrido, y observar el comportamiento en las diferentes estructuras colocadas, cómo afectan a las mediciones de la velocidad, así como obtener datos estadísticos que permitan clasificar y detallar el tipo de flujo, es decir analizar un perfil de velocidades a lo largo del canal.

Las estructuras colocadas en el canal son:

- Cortina de vertedor, modelada con una lámina transversal al canal, que genera una retención aguas arriba de la estructura, lo que origina un flujo lento y con un gran tirante, que al sobrepasarla, inicia la descarga lo que provoca un incremento considerable de la velocidad y por ende una disminución en el tirante. Por el efecto de descarga se genera un salto hidráulico y una zona de fácil reconocimiento visual de flujo turbulento.
- Un modelo de canal Parshall, que es un sistema de aforo, caracterizado por tener una geometría definida, y dispone de un estrechamiento sobre el canal, una elevación de la plantilla, generando la reducción en el área efectiva, generando mayores velocidades en el flujo y en la descarga un salto hidráulico. El canal Parshall, está colocado aguas abajo de la cortina, a una distancia considerable, lo que permite al flujo ordenarse antes de ingresar a ésta estructura.

El equipo usado en para la recolección de datos es el de la marca SONTEK, llamado ADV LAB, que usa sensores de efecto Doppler como base para la recolección de datos en tres dimensiones, que son las llamadas X, Y, Z. La coordenada X siempre deberá ser orientada a la dirección del flujo, por consiguiente la coordenada Y es la transversal al movimiento del flujo en el plano horizontal, y la coordenada Z es aquella que se presenta perpendicular al flujo en el plano vertical.

A.2 RESULTADOS DE PRUEBAS PRELIMINARES EN CANAL RECTANGULAR

La Tabla A.2.1 muestra el concentrado de resultados obtenidos a lo largo de las secciones del canal, más adelante se detallará cada uno de los resultados obtenidos, con sus gráficas e imágenes respectivas.

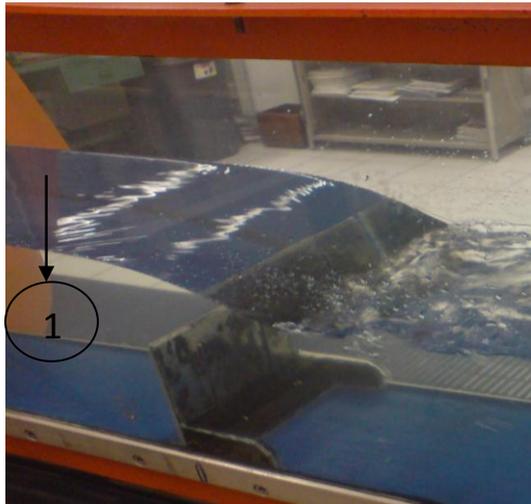
El proceso de toma de muestras fue el siguiente:

La sección inicial para la recolección de datos se localizó a 20 cm antes del paso del flujo sobre el vertedor, y a partir de éste punto se realizaron las demás secciones para el muestreo total del perfil de velocidades.

A.2.1 Medición #1

- El punto 1 está localizado a 20cm antes de la cortina, donde el flujo es ordenado y tiene una velocidad relativamente baja, ya que la cortina funciona como almacenaje, y sólo una parte logra derramar por la cresta (Imagen A.2.1.1).

En la Imagen A.2.1.1 se muestra el efecto de la estructura, el agua que sobrepasa la cortina y acelera el flujo generando un salto hidráulico con una zona de gran turbulencia.



ImagenA.2.1.1 Cortina de 15 cm altura (Punto de medición 1, a 20 cm, antes de la cortina)

TABLA A.2.1.1 velocidades en el punto 1

| distancia | tirante | Avg | Avg | Avg | Mag | Avg | Avg | Avg | Avg | Avg | Avg | Avg | Avg | | |
|-----------|---------|-----|--------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|--------|------|------|--------|
| s | e | Vx | Vy | Vz | V-Avg | Vmag | RMS[Vx] | RMS[Vy] | RMS[Vz] | RMS[V'] | RMS[Vmag] | CO | SN | | |
| cm | Cm | 8 | 2 | 3 | 9 | 6 | '] | '] | '] | | '] | R | R | AMP | |
| -20 | 30 | 1 | 24.625 | 4.041 | 0.368 | 24.957 | 25.097 | 1.5731 | 1.9163 | 1.824 | 3.0779 | 1.5709 | 98.3 | 37.4 | 115.97 |

La distancia de medición al punto 1 es de 20 cm antes de la cortina, con un tirante de 30 cm, la velocidad en el eje X es la predominante, pues es en el sentido del flujo, cabe destacar que los valores importantes a observar durante la prueba son aquellos RMS (desviación estándar), de Correlación, SNR (señal de ruido). Los parámetros son los especificados en el capítulo 4 del cuerpo principal de la tesis.

Los valores de RMS bajos y cercanos a cero indican que la distribución de las velocidades se mantuvieron sin grandes variaciones, esto se demuestra con el histograma de distribución (Imagen A.2.1.2). La correlación es alta, y se encuentra en el rango de $70 < Corr < 100$, por lo que indica una muestra fiable y con buen muestreo.

El SNR es mayor a 15db, lo que permite mostrar que el ruido inherente al aparato durante la muestra no perturba la toma de datos.

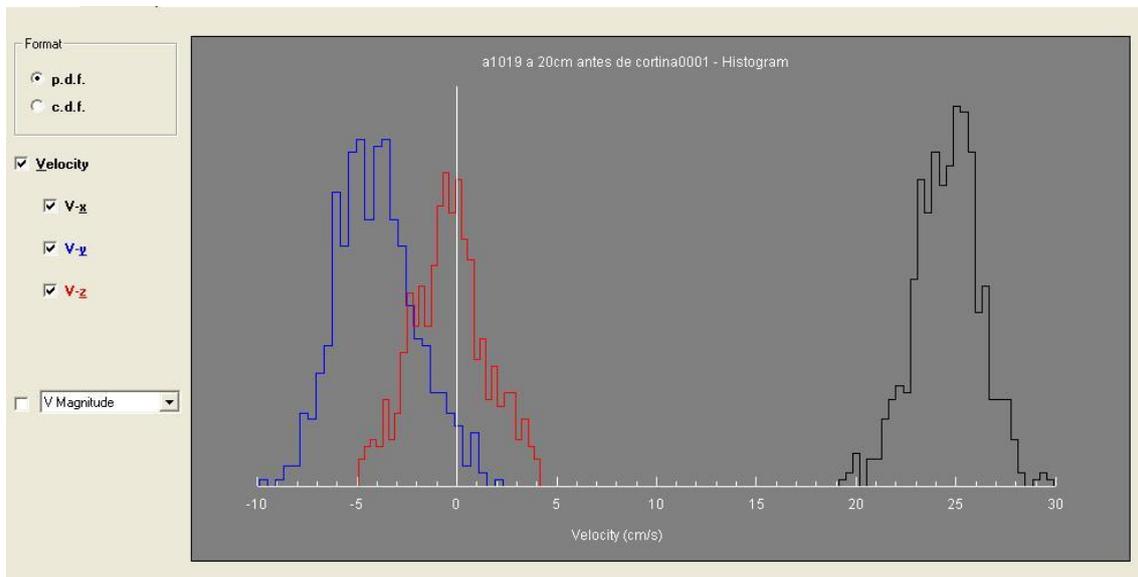


Imagen A.2.1.2 Histograma de distribución de velocidades para el punto 1

A.2.2 Medición #2

- El punto 2 se ubica en el vertedor, usado como cortina de almacenaje, la medición se realizó sobre ésta estructura para observar el comportamiento del flujo y la transición que ocurre entre el “embalse y el derrame” (Imagen A.2.2.1).



Punto donde se colocó el aparato y se realizó la toma de muestras.

Imagen A.2.2.1 Lugar de las pruebas del punto 2

Para la medición 2 se conservará el registro de la prueba 1 para observar el cambio generado en los valores derivados de la estructura (Tabla A.2.2.1).

TABLA A.2.2.1 medición del punto 2 con registro acumulado

| distancias cm | tirante cm | | Avg | Avg | Avg | Mag | Avg | | | | | | Avg | Avg | Avg |
|------------------|---------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|------------|-------|------|--------|
| | | | Vx cm/s | Vy cm/s | Vz cm/s | V-Avg | Vmag | RMS[Vx'] | RMS[Vy'] | RMS[Vz'] | RMS[V'] | RMS[Vmag'] | COR | SNR | AMP |
| -20 | 30 | 1 | 24.6258 | -4.0412 | -0.3683 | 24.9579 | 25.0976 | 1.5731 | 1.9163 | 1.824 | 3.0779 | 1.5709 | 98.3 | 37.4 | 115.97 |
| 0 | 24.8 | 2 | 43.4922 | -6.1372 | 28.044 | 52.1124 | 52.2059 | 1.2589 | 2.3272 | 2.1685 | 3.4209 | 1.3923 | 94.33 | 37.5 | 116.2 |

En la Tabla A.2.2.1 se puede observar el incremento de velocidades debido al derrame por encima de la cortina, en el sentido de la dirección eje X se incremento de 24.62 cm/s a 43.49 cm/s, en el eje transversal horizontal Y se mantiene con valores similares, en cambio en el eje transversal vertical eje Z se dispara desde un valor cercano a cero a uno de 28.04 cm/s, que es donde el flujo choca con la cortina y el mismo empuje y velocidad con que viene en el eje X empuja el flujo hacia arriba y genera una línea de corriente ascendente sobre la cortina (Imagen A.2.2.2)

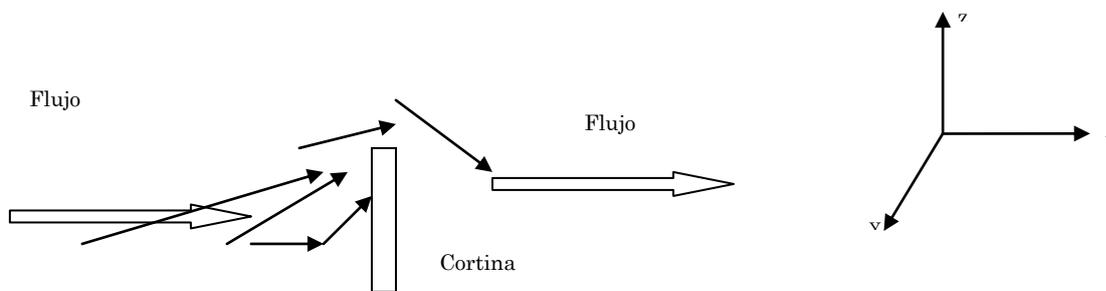


Imagen A.2.2.2 Diagrama de paso de flujo sobre estructura

En este punto la correlación se mantiene por encima del 70% y el SNR por encima de los 15 dB, lo que indica una muy buena calidad en la toma de muestra. Los valores de RMS son bajos, lo que indica una distribución concentrada de los valores a la media de la muestra, y esto se nota en el histograma de velocidades (Imagen A.2.2.3).

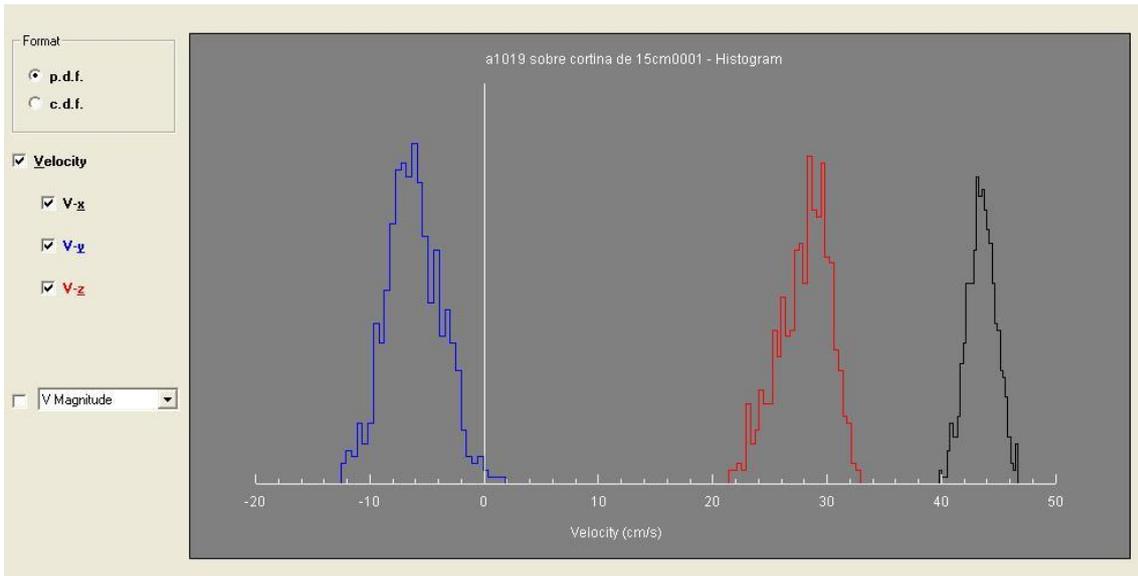


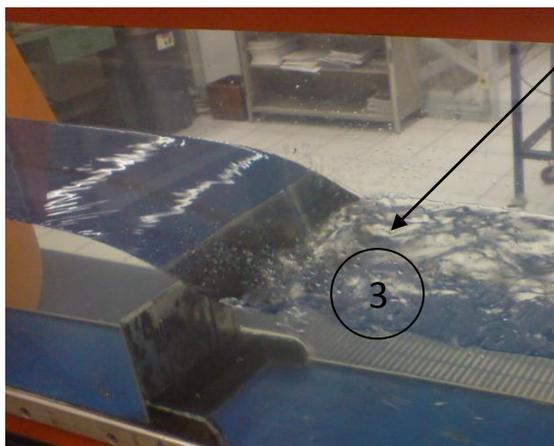
Imagen A.2.2.3 Distribución de velocidades por ejes en el punto 2

A.2.3 Medición #3

- La medición 3 está localizada a 20 cm después de la cortina, donde se presenta el salto hidráulico y visualmente se presenta la mayor turbulencia (*Imagen A.2.3.1 y A.2.3.2.*)



Imagen A.2.3.1 Vista lateral del punto de medición 3, salto hidráulico



Punto de medición, es donde se genera la zona de turbulencia, y donde las muestras presentan variaciones en la *Tabla A.2.3.1*, donde se mantiene el registro de las 2 mediciones anteriores al punto para observar el avance y comportamiento del flujo.

Imagen A.2.3.2 Vista superficial del punto de medición 3 en el salto hidráulico

Tabla A.2.3.1 medición del punto 3 con registro acumulado

| distancias | Tirante | | Avg | Avg | Avg | Mag | Avg | | | | | | Avg | Avg | Avg |
|------------|---------|----------|---------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|------------|-------|-------|--------|
| cm | Cm | | Vy | | | | | | | | | | | | |
| | | | Vx cm/s | cm/s | Vz cm/s | V-Avg | Vmag | RMS[Vx'] | RMS[Vy'] | RMS[Vz'] | RMS[V'] | RMS[Vmag'] | COR | SNR | AMP |
| -20 | 30 | 1 | 24.6258 | 4.0412 | -0.3683 | 24.9579 | 25.0976 | 1.5731 | 1.9163 | 1.824 | 3.0779 | 1.5709 | 98.3 | 37.4 | 115.97 |
| 0 | 24.8 | 2 | 43.4922 | 6.1372 | 28.044 | 52.1124 | 52.2059 | 1.2589 | 2.3272 | 2.1685 | 3.4209 | 1.3923 | 94.33 | 37.5 | 116.2 |
| 20 | 19.83 | 3 | 42.2227 | 4.381 | 23.3654 | 48.455 | 51.0776 | 13.9863 | 12.339 | 14.1175 | 23.3917 | 16.9015 | 54.32 | 36.91 | 114.84 |

La velocidad en el eje X (dirección del flujo) se mantiene similar a la condición anterior al igual que la dirección Y. Una de las observaciones principales en las velocidades es el cambio de signo en la componente Z, este se debe a que al contrario de la prueba anterior donde antes de la cortina se generó un flujo ascendente, en este punto desciende desde la descarga, es decir, son flujos en la dirección negativa de la componente Z.

Los valores de SNR disminuyeron muy poco, lo que indica que los ruidos del medio no influyen en gran medida en la toma de datos, es decir, indica que la muestra no tuvo perturbaciones de importancia. No así, el valor de la correlación que disminuyó drásticamente, y como se mencionó en el inicio, es un indicio de turbulencia, que junto

con otros factores como serán presentados en el cuerpo principal de tesis afirmará esta suposición. Para los valores de RMS hubo un incremento en los valores e indica una distribución menos concentrada a la media, con variaciones considerables y por tanto más visibles en el histograma de velocidades (*Imagen A.2.3.3*), el valor bajo de correlación, y el valor de RMS, indican una zona de variabilidad de velocidad, es decir, se tiene una zona de turbulencia.

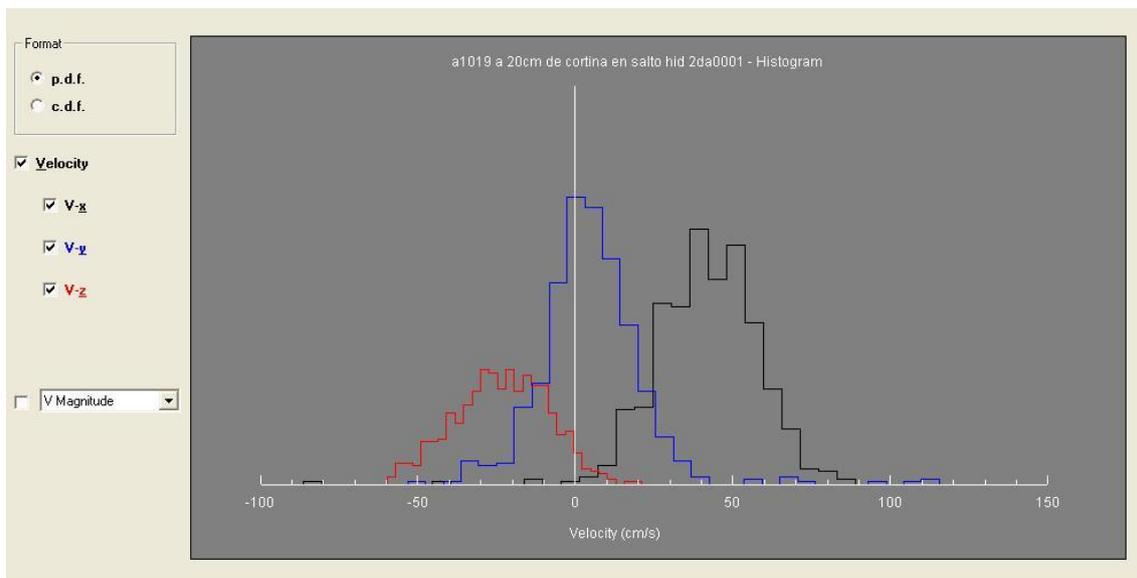


Imagen A.2.3.3 Histograma de velocidades para el punto de medición 3, en salto hidráulico

Tomar en cuenta que la escala en el eje X (velocidades) es mayor, y se observa como la distribución de velocidades en las 3 direcciones es mayor a la de los otros casos, es por eso que el RMS incrementó y los valores de correlación disminuyeron. Así mismo se muestra el registro de velocidades obtenido con la toma de muestra de la sonda ADV, donde se muestra que las variaciones son visiblemente mayores en magnitud (*Imagen A.2.3.4*).

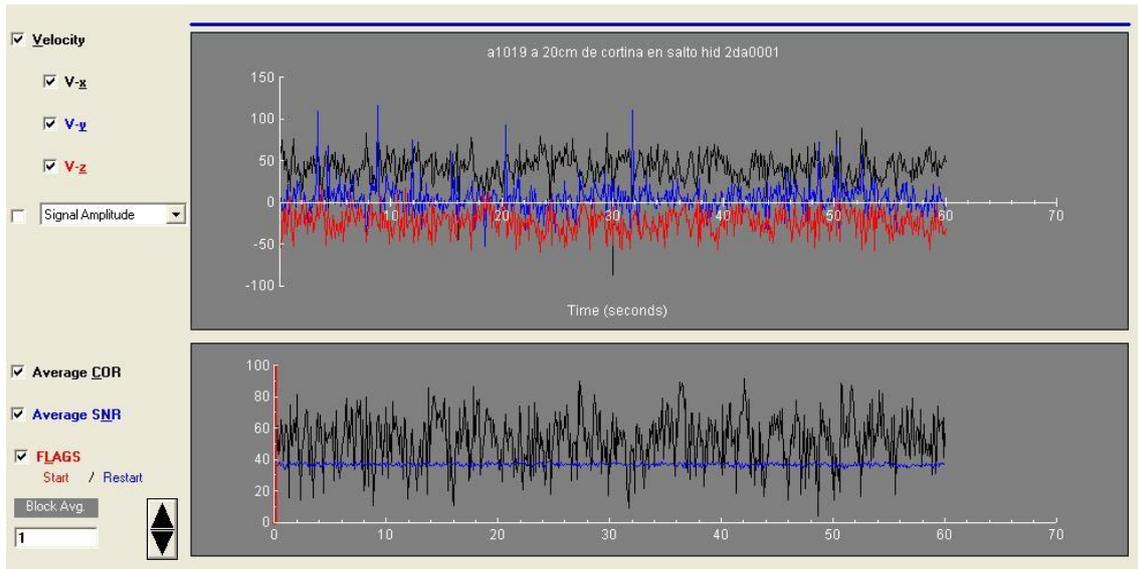


Imagen A.2.3.4 Registro de velocidad para el punto 3, localizado en el salto hidráulico

A.2.4 Medición #4

La medición 4 está ubicada a 40 cm de la cortina (Imagen A.2.4.1), en esta zona aún se presenta turbulencia y se observa el efecto de la misma, que son inclusiones de aire debido al movimiento desordenado del flujo, generando burbujas de aire y un gran movimiento de flujo en la sección.



Imagen A.2.4.1 Localización del punto de medición 4, después de salto hidráulico

En la Tabla A.2.4.1 se conservan los valores de las pruebas anteriores con el fin de comparar el comportamiento en la distancia recorrida del flujo.

Tabla A.2.4.1 Medición en el punto 4 con registro acumulado

| distancias | tirante | | Avg | Avg | Avg | Mag | Avg | | | | | | Avg | Avg | Avg |
|------------|---------|----------|---------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|------------|-------|-------|--------|
| cm | cm | | Vy | | | | | | | | | | | | |
| | | | Vx cm/s | cm/s | Vz cm/s | V-Avg | Vmag | RMS[Vx'] | RMS[Vy'] | RMS[Vz'] | RMS[V'] | RMS[Vmag'] | COR | SNR | AMP |
| -20 | 30 | 1 | 24.6258 | 4.0412 | -0.3683 | 24.9579 | 25.0976 | 1.5731 | 1.9163 | 1.824 | 3.0779 | 1.5709 | 98.3 | 37.4 | 115.97 |
| 0 | 24.8 | 2 | 43.4922 | 6.1372 | 28.044 | 52.1124 | 52.2059 | 1.2589 | 2.3272 | 2.1685 | 3.4209 | 1.3923 | 94.33 | 37.5 | 116.2 |
| 20 | 19.83 | 3 | 42.2227 | 4.381 | 23.3654 | 48.455 | 51.0776 | 13.9863 | 12.339 | 14.1175 | 23.3917 | 16.9015 | 54.32 | 36.91 | 114.84 |
| 40 | 20.6 | 4 | 28.1672 | 2.3077 | 14.3621 | 31.7016 | 40.943 | 25.6238 | 16.3108 | 9.976 | 31.9709 | 18.6987 | 65.72 | 37.17 | 115.43 |

En la Tabla A.2.4.1 muestra que el tirante aguas abajo, al ser considerablemente alto ayuda a disminuir la velocidad en las 3 direcciones, en especial en el eje X y Z, por lo que se tienen valores inferiores al punto anterior.

Los valores de RMS se incrementan en los ejes X y Y, ya que en este punto hay mayores fluctuaciones con respecto a la media de la velocidad, y es debido a que en esta zona presenta mayores movimientos en el plano horizontal por el choque de las líneas de corriente y el flujo de retorno generado en el salto hidráulico, por otra parte disminuye el RMS en le eje Z, principalmente por el efecto del tirante que amortigua el movimiento vertical, el histograma de velocidades mostrará con un detalle mejor la forma en que estas fluctuaciones se presentan. (*Imagen A.2.4.3*)

El valor de correlación se mantiene por abajo del 70%, sumado a que el RMS es de valor alto se observa que se continúa en una zona turbulenta con flujo desordenado. Los valores de SNR se mantienen por encima de los 15db lo que indica una recolección de datos fiable.

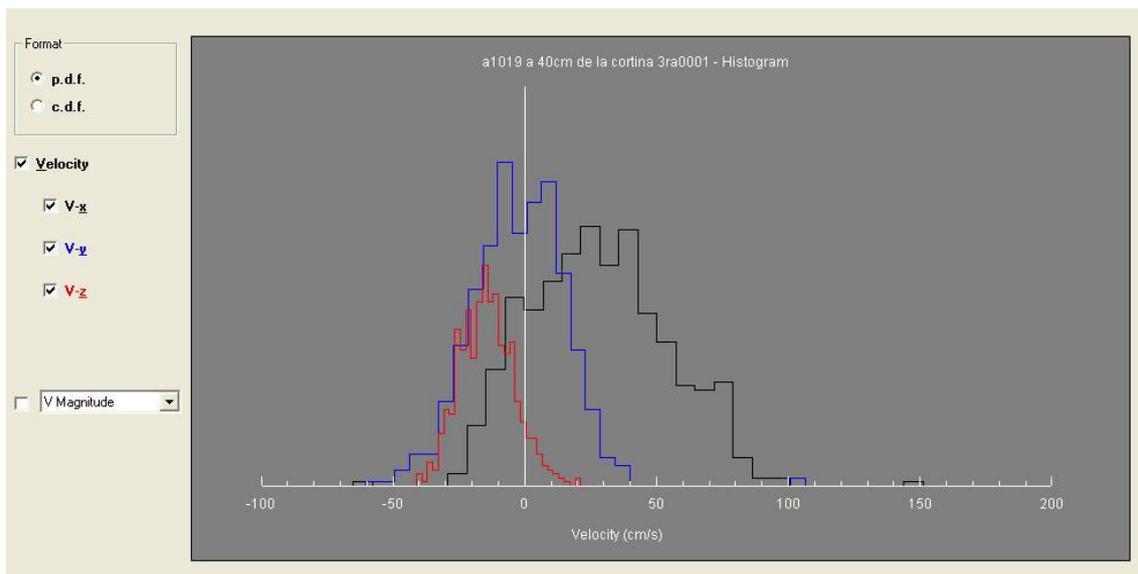


Imagen A.2.4.3 Histograma de velocidades obtenido en el punto 4 de medición

Los valores de RMS mayores se presentan en el componente X, debido a que presenta el mayor espaciamiento del histograma de velocidades, una conclusión indica que todavía existen grandes fluctuaciones de velocidad en el eje X, y se estudiará la manera en que debido a la distancia de recorrido estas fluctuaciones deberán ir disminuyendo hasta alcanzar valores estables en el recorrido.

Las series de tiempo de velocidad para la muestra 1, que corresponde a antes de la cortina se presentan en la Imagen A.2.4.4, mientras que para la muestra 4, que se realizó a 40 cm después de la cortina y es zona de turbulencia en la Imagen A.2.4.5.

Al observar cada uno de los registros de velocidad para la serie de tiempo usada, se observa la fluctuación en los valores de velocidad para cada dato individual del registro, mostrando que para el punto 1 los valores mantienen una desviación estándar baja (RMS), mientras que para el punto 4 se presenta un RMS alto, lo que explica la gran variación del registro y los picos presentes.

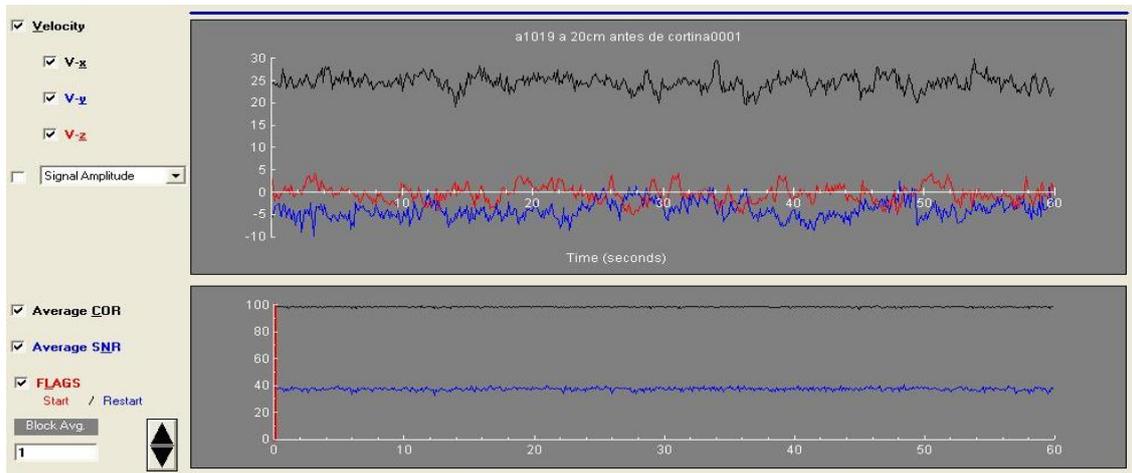


Imagen A.2.4.4 Registro de velocidad en el punto de medición 1 con pocas variaciones

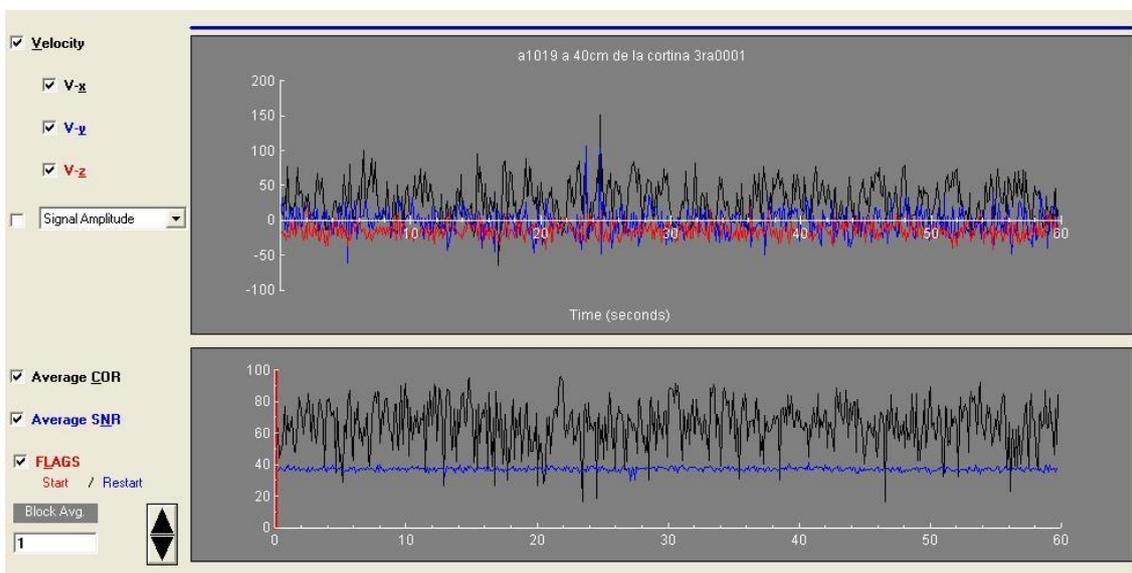


Imagen A.2.4.5 Registro de velocidad en el punto de medición 4 con grandes fluctuaciones

En la parte superior de cada imagen se muestra la recopilación de los datos de velocidad en la serie de tiempo, de 60 segundos para cada muestra. En la Imagen A.2.4.4 se observa que las fluctuaciones son mínimas, es decir un RMS bajo, y la velocidad predominante es en el eje X, mientras que Y y Z se mantienen alrededor de cero, es decir un flujo estable. En la Imagen A.2.4.5 se observa una gran variación en el registro de velocidades de las 3 componentes, lo que da como resultado un valor de RMS alto y se concluye que se trata de una zona de alta turbulencia.

En la parte inferior de cada Imagen se observan los valores sobre los que fluctúa la correlación, es por eso que el registro de la prueba de la Imagen A.2.4.4 indica un porcentaje bastante cercano al 100% por lo que no hay gran fluctuación y se trata de un flujo ordenado, mientras que en la Imagen A.2.4.5, la correlación toma un valor medio de 67% inferior al deseado de 70%, que determina que existen variaciones importantes en el flujo.

En ambos casos los valores de SNR se mantienen estables, lo que es bueno, al confirmar que los registros de velocidad no estuvieron influenciados por algún ruido externo y por tanto son confiables.

A.3 TABLA DE REGISTRO CUMPLETO

Hasta este momento se han analizado 4 puntos consecutivos del estudio realizado en el canal rectangular, con el objeto de mostrar los cambios en el comportamiento del flujo y asociarlos a los valores obtenidos con el ADV, comprender los cambios y tipos de datos generados en diferentes circunstancias al paso del fluido. En los siguientes puntos se hace el análisis completo del comportamiento del flujo, a través de la distancia elegida en el canal rectangular con 2 estructuras que permiten modificar el comportamiento del flujo. En la Imagen A.3.1 se muestra la localización de los puntos de medición en el trayecto del canal rectangular.

El registro completo de las muestras de velocidad se muestra en la Tabla A.3.1, la cual contiene los registros completos de las velocidades promedio en cada una de las 3 componentes, los valores de RMS para cada velocidad, los valores de correlación y los valores de SNR.

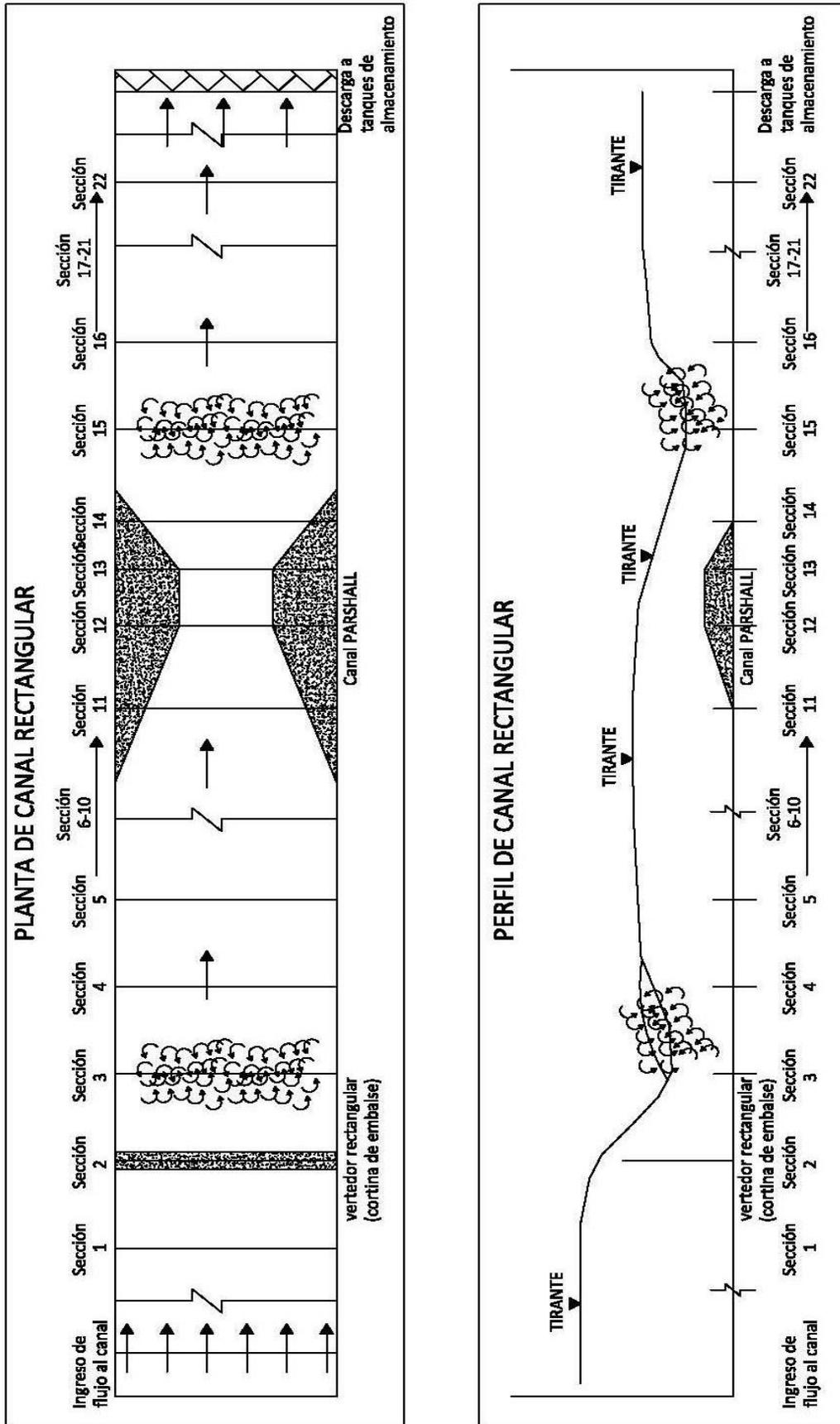


Imagen A.3.1 Diagramas de las secciones del canal rectangular

Tabla A.3.1 Registro total de mediciones y puntos de muestreo

| distancia | | Avg | Avg | Avg | RMS | RMS | RMS | Avg | Avg |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| cm | # | Vx cm/s | Vy cm/s | Vz cm/s | [Vx'] | [Vy'] | [Vz'] | COR | SNR |
| -20 | 1 | 24.63 | -4.04 | -0.37 | 1.57 | 1.92 | 1.82 | 98.3 | 37.4 |
| 0 | 2 | 43.49 | -6.14 | 28.04 | 1.26 | 2.33 | 2.17 | 94.33 | 37.5 |
| 20 | 3 | 42.22 | 4.38 | -23.37 | 13.99 | 12.34 | 14.12 | 54.32 | 36.91 |
| 40 | 4 | 28.17 | -2.31 | -14.36 | 25.62 | 16.31 | 9.98 | 65.72 | 37.17 |
| 60 | 5 | 18.91 | -2.16 | 4.32 | 17.38 | 14.15 | 11.08 | 81.67 | 37.1 |
| 100 | 6 | 20.86 | -3.17 | 0.53 | 13.85 | 11.79 | 10.84 | 87.66 | 36.73 |
| 125 | 7 | 23.54 | -2.60 | -1.03 | 12.41 | 9.50 | 8.30 | 90.98 | 36.57 |
| 150 | 8 | 25.21 | -1.96 | -1.78 | 9.82 | 7.72 | 6.94 | 93.32 | 36.42 |
| 200 | 9 | 28.94 | -1.93 | -0.37 | 5.91 | 5.56 | 5.61 | 95.57 | 36.05 |
| 300 | 10 | 30.34 | -1.17 | -0.10 | 3.51 | 2.86 | 2.48 | 97.68 | 35.48 |
| 357 | 11 | 30.73 | -0.90 | 0.45 | 2.39 | 2.32 | 1.91 | 97.67 | 34.96 |
| 376 | 12 | 60.41 | -1.27 | -4.12 | 1.55 | 2.67 | 2.34 | 96.66 | 34.85 |
| 389 | 13 | 82.15 | -1.59 | -10.83 | 1.42 | 2.70 | 2.31 | 94.86 | 34.8 |
| 400 | 14 | 89.42 | 17.04 | -14.52 | 11.55 | 22.79 | 4.10 | 73.68 | 25.09 |
| 430 | 15 | 89.54 | 7.27 | -15.34 | 32.76 | 31.38 | 13.54 | 34.66 | 30.46 |
| 450 | 16 | 110.02 | -2.81 | -1.52 | 12.70 | 11.03 | 6.16 | 60.62 | 31.64 |
| 470 | 17 | 86.34 | -10.42 | 0.70 | 15.20 | 11.34 | 7.35 | 61.93 | 33.95 |
| 490 | 18 | 41.58 | -1.43 | -1.20 | 10.19 | 6.82 | 6.26 | 87.83 | 35.3 |
| 550 | 19 | 42.66 | -2.00 | -1.88 | 4.43 | 3.64 | 3.30 | 95.64 | 34.93 |
| 600 | 20 | 45.05 | -1.72 | -1.59 | 3.03 | 2.91 | 2.40 | 96.63 | 34.51 |
| 650 | 21 | 47.84 | -2.04 | -3.09 | 2.42 | 2.43 | 1.93 | 96.95 | 34.1 |
| 750 | 22 | 51.56 | -2.01 | -1.27 | 1.84 | 1.84 | 1.36 | 97.26 | 33.3 |

En las Imágenes A.3.2 y A.3.3 se muestran imágenes de las estructuras que permitieron generar cambios en el flujo, así como un diagrama de la estructura del canal Parshall (Imagen A.3.4).



Imagen A.3.2 Vertedor usado como cortina de almacenaje para producir un flujo lento y ordenado aguas arriba de la estructura, y una aceleración aguas abajo propiciado un salto hidráulico



Imagen A.3.3 Canal Parshall usado para acelerar el flujo en la sección intermedia del canal rectangular y provocar un segundo salto hidráulico en el recorrido del fluido

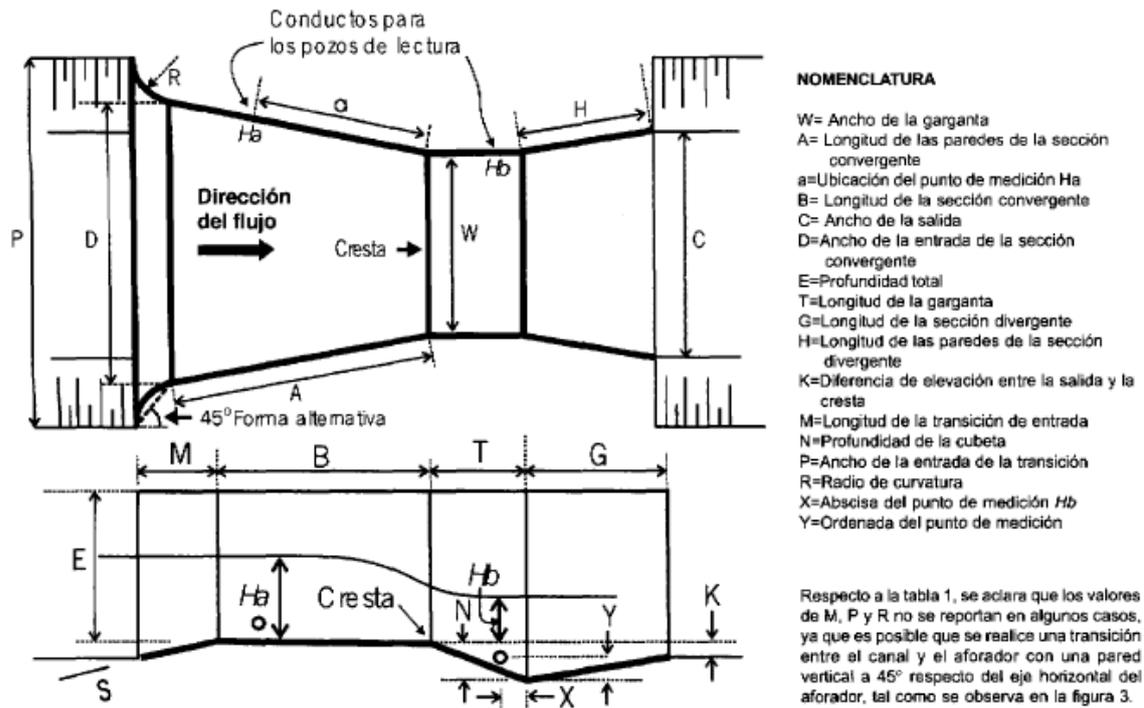


Figura 3. Nomenclatura de las partes del aforador Parshall.

Imagen A.3.4 Diagrama de un canal Parshall

Los valores obtenidos como registro 1 de la Tabla A.3.1 de concentrados, son aquellos realizados antes de la cortina, lo cual muestra un flujo uniforme sin turbulencia y con un orden en las velocidades.

Las mediciones entre el punto 1 hasta el punto 4 de las mediciones mostrados en el diagrama de la Imagen A.3.1 son las descritas en los subcapítulos anteriores de éste apéndice. Se analizó y se asociaron los valores obtenidos en el ADV caracterizando el flujo en cada uno de los puntos, usando las velocidades, la desviación estándar (RMS), la correlación y el SNR, mostrando el paso y evolución desde un flujo ordenado presente en el almacenaje hasta uno de gran turbulencia dado por el salto hidráulico.

Del punto de medición 4 al punto 11 no hay presencia de estructuras, es un recorrido de 317cm, en los cuales se observa que el comportamiento turbulento se disipa gradualmente conforme se incrementa la distancia desde el punto 4 hasta llegar al punto 11. En éste trayecto se observa una disminución importante en la desviación

estándar (RMS) y en las velocidades en el eje Z, indicando que se estabiliza gradualmente el flujo, mientras que los valores de correlación entre el punto 4 hasta el 11 van en aumento, mejorando la calidad de la muestra y con menos variaciones. En conclusión, en este tramo (punto 4 - 11), la distancia es muy importante para estabilizar, en el canal, las variaciones generadas en el salto hidráulico antes de ingresar al canal Parshall.

En la Imagen A.3.5 se muestra el recorrido desde el punto 4 hasta el punto 11, donde el punto 4 es el localizado en el punto de origen de la foto, en donde se encuentra el medidor ADV, mientras que el punto 11 se encuentra en la estructura Parshall de canal naranja, justo al inicio de ella.



Imagen A.3.5 Vista longitudinal del canal rectangular, desde el punto 4 hasta el punto 11 de medición

Los puntos de medición 11 al 14 mostrados en la Imagen A.5.6 se encuentran en toda la sección del canal Parshall, desde su inicio hasta su descarga. Los resultados muestran los efectos generados por el canal Parshall, que al estrechar la sección transversal el flujo se acelera, incrementando las velocidades en el eje X, y en los

puntos 13 y 14, que es donde la plantilla del canal Parshall regresa a la pendiente de cauce, al ser pendiente negativa se presenta un incremento en la velocidad del eje Z con signo negativo, mientras que en el paso del flujo a través de la estructura también el componente en Y sufre variaciones debido a las líneas de flujo encontradas provocadas por las paredes del canal Parshall que generan el estrechamiento.

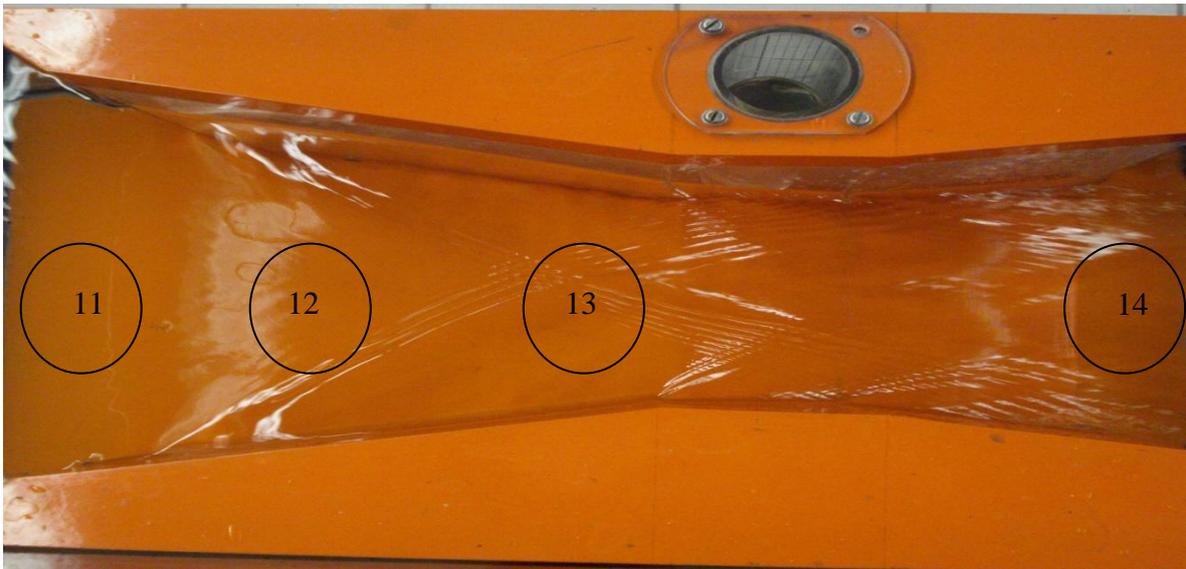


Imagen A.3.6 Localización de puntos de medición dentro del canal Parshall



Imagen A.3.7 Vista desde aguas abajo hacia canal Parshall, donde se observa el comportamiento del flujo

El punto 14 es la salida de la estructura Parshall, después de éste punto y hasta el punto 15 se presenta el salto hidráulico, con mayor fuerza que el primero, y esto se debe a que las velocidades son mayores y el tirante aguas abajo es menor que en el primer caso, estos valores de velocidad se incrementan de forma rápida en cada punto de medición así mismo los valores de RMS, que al analizarlos y observar que la correlación baja de manera considerable y el registro es cada vez más desordenado se puede concluir que hay una segunda zona turbulenta, esto es fácil de observar de manera visual, pero si se llega a analizar únicamente datos estadísticos se obtendría la misma conclusión.

En la Imagen A.3.8 se observa de manera clara el salto hidráulico, desde el punto 14 al punto 15 y de manera visual se observa la razón de la variación en el registro obtenido. La Imagen A.3.9 muestra la medición del punto 15, que corresponde al punto más crítico del registro, y es donde ocurre la mayor turbulencia, visualmente se comporta como un flujo totalmente turbulento, con una gran inclusión de aire y movimiento de velocidades en todas direcciones.

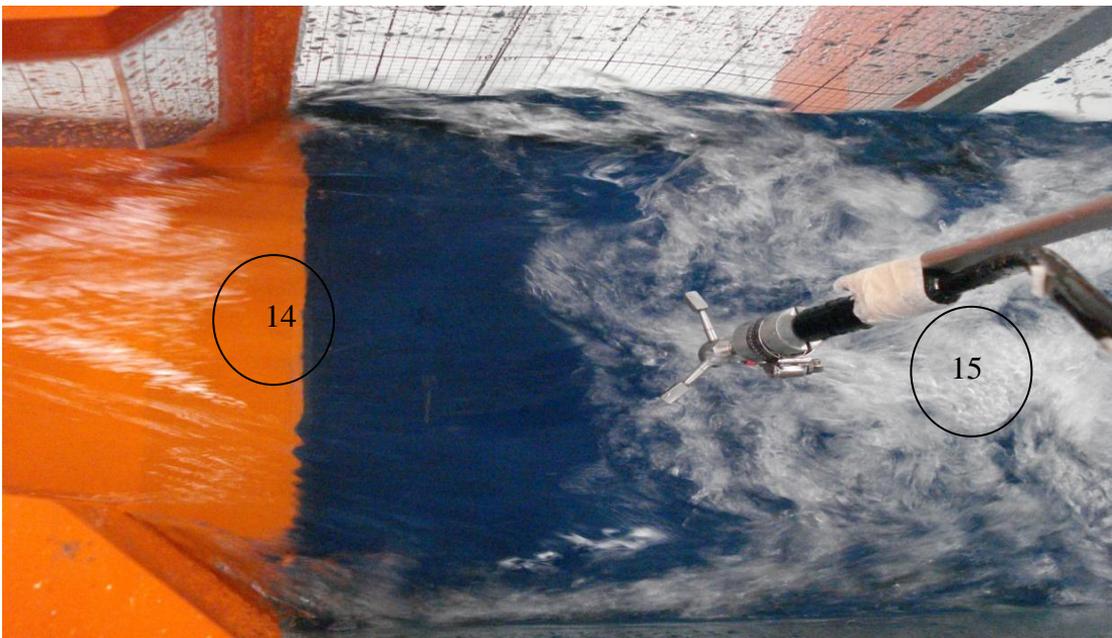


Imagen A.3.8 Segundo salto hidráulico provocado por un canal Parshall, donde se muestran los puntos de medición



Imagen A.3.9 Punto 15, siendo el más crítico por ser el más turbulento y donde el registro tiene más variaciones y correlación baja.

El punto 15 es la zona de mayor turbulencia del registro total. Los valores de RMS alcanzan su máximo valor en $X=32.76$, $Y=31.38$ y $Z=13.54$, y la correlación en este punto es la más baja, con tan solo el 34.7%, el valor de SNR se mantiene por encima de los 15db, que muestra la calidad de la señal, lo que permite establecer que la medición en éste punto es válida, y que no existe problemas de interferencia en la señal, todas las variaciones se deben únicamente al comportamiento del flujo en la sección.

Las Imágenes A.3.10 y A.3.11 muestran con más detalle el punto 15 siendo el punto más crítico del registro total.

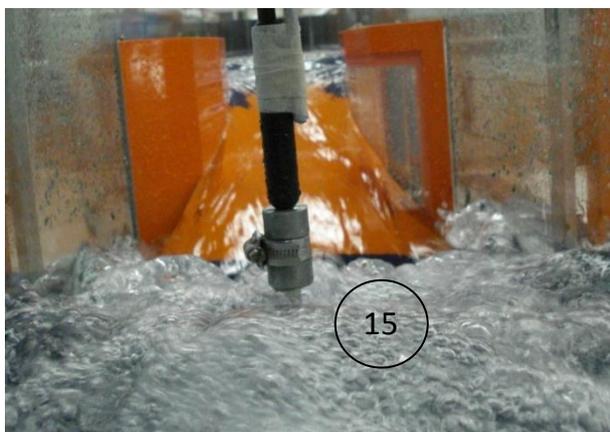


Imagen A.3.10 Vista desde aguas abajo



Imagen A.3.11 Detalle del flujo turbulento

Del punto 16 al punto 22, se tiene un comportamiento de disipación de energía de la turbulencia, que es caracterizada por la disminución en los valores de RMS y una correlación que va en incremento hasta alcanzar un valor estable, los valores de velocidad en los 3 componentes tienden a estabilizarse de igual manera, por lo que se concluye que se logró estabilidad y uniformidad en el flujo (Imagen A.3.12).

A partir de la salida del Parshall y del punto más crítico, existe la distancia de 320 cm, que es la distancia al punto de la muestra final 22, donde las fluctuaciones presentes son bajas.

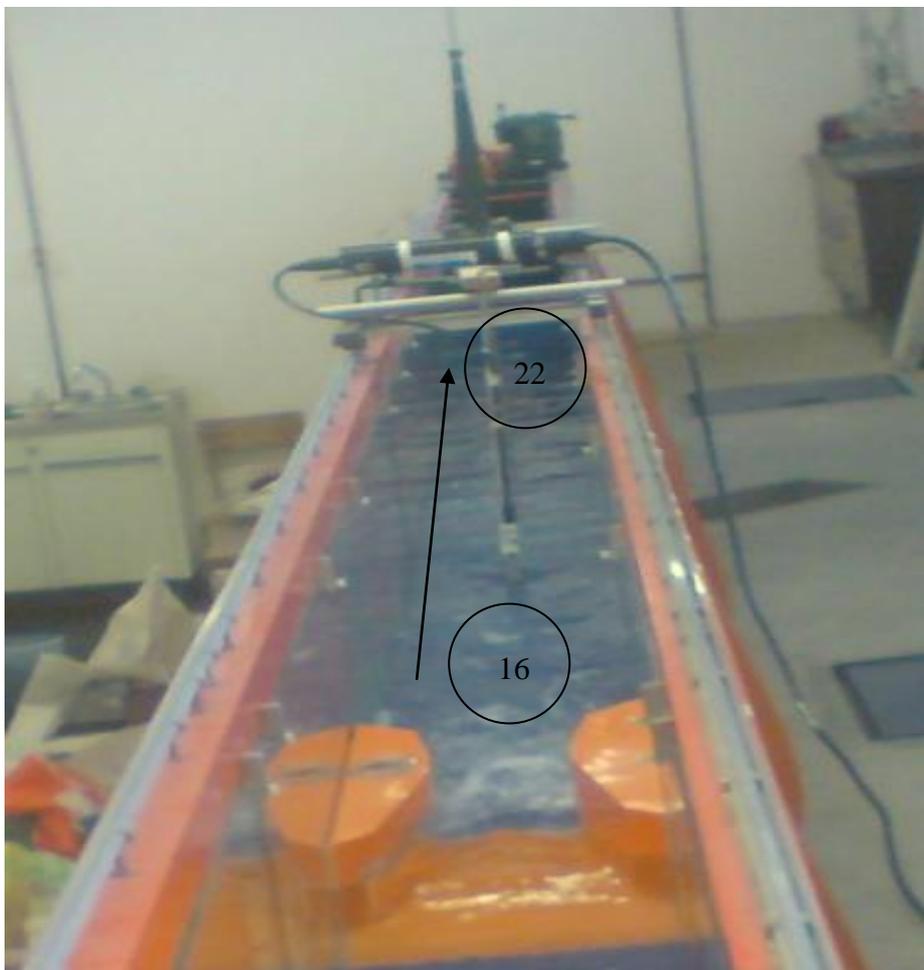


Imagen 5.3.11 Recorrido del flujo entre los puntos de medición 16 al 22, donde se presenta una estabilización en el comportamiento del flujo turbulento presentado en el salto hidráulico provocado en la salida del canal Parshall

A.4. GRÁFICAS DE LOS REGISTROS DE VELOCIDAD

El presente subcapítulo muestra la variación de las velocidades a través del recorrido del flujo por el canal rectangular, su paso por las estructuras que modificaron el comportamiento del flujo y la asociación con los valores de calidad de la muestra como son correlación y SNR, así como la comparación con los valores de desviación estándar, es decir las fluctuaciones de velocidad en los tramos principales.

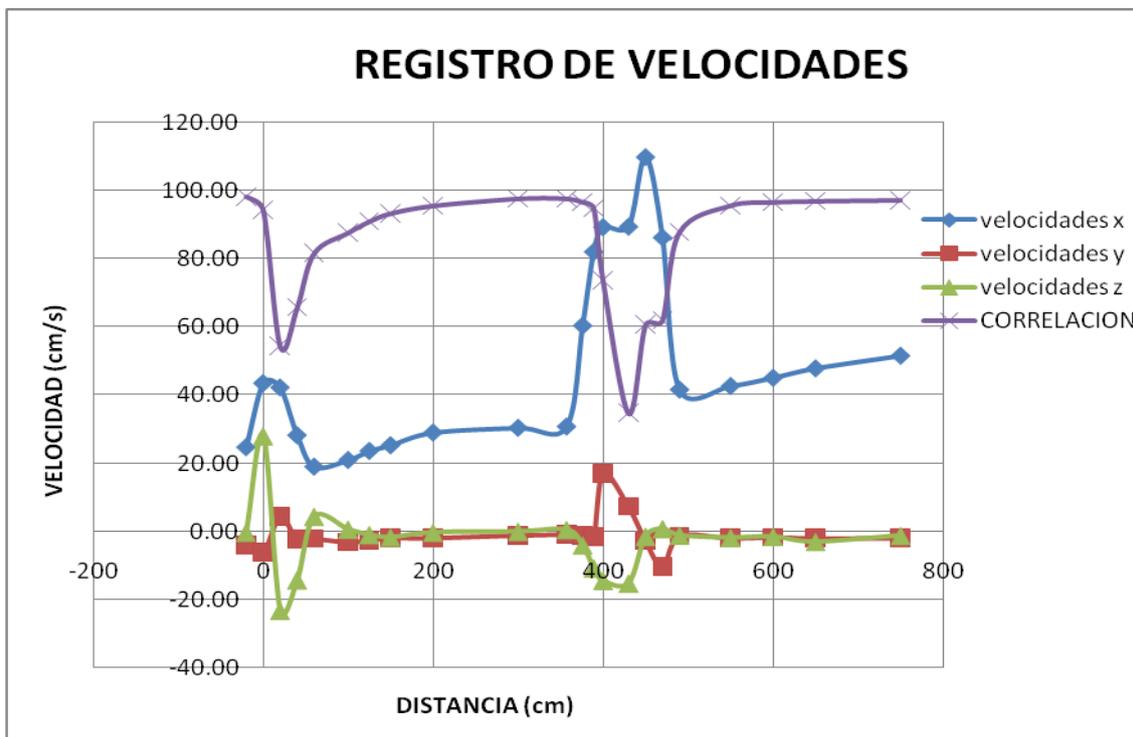


Imagen A.4.1 Registro de velocidades para el trayecto completo

La Imagen A.4.1 condensa los valores de las velocidades en las 3 direcciones con el valor de correlación, dando una herramienta más gráfica de la explicación dada en párrafos anteriores, se observa en las mediciones 1-4, que la variación de velocidades en las direcciones X, Y, Z, que el valor de correlación baja al existir mayores fluctuaciones presentadas por el incremento de RMS, aún más visible se observa en los puntos 11 a 16, donde se encuentra la zona más crítica y de mayor turbulencia, mientras que en los demás espacios de muestra 4-11 y 16-22 se observa el establecimiento, y poco a poco, la uniformidad conforme la distancia se incrementa.

En las Imagenes A.4.2, A.4.3 Y A.4.4 se presentan los valores de las velocidades relacionándolas con los valores de RMS, en las direcciones X, Y, Z, respectivamente.

En cada una se muestra el incremento de los valores de velocidad y RMS en las zonas ya identificadas como turbulentas, así mismo los valores se reducen en la correlación de los datos.

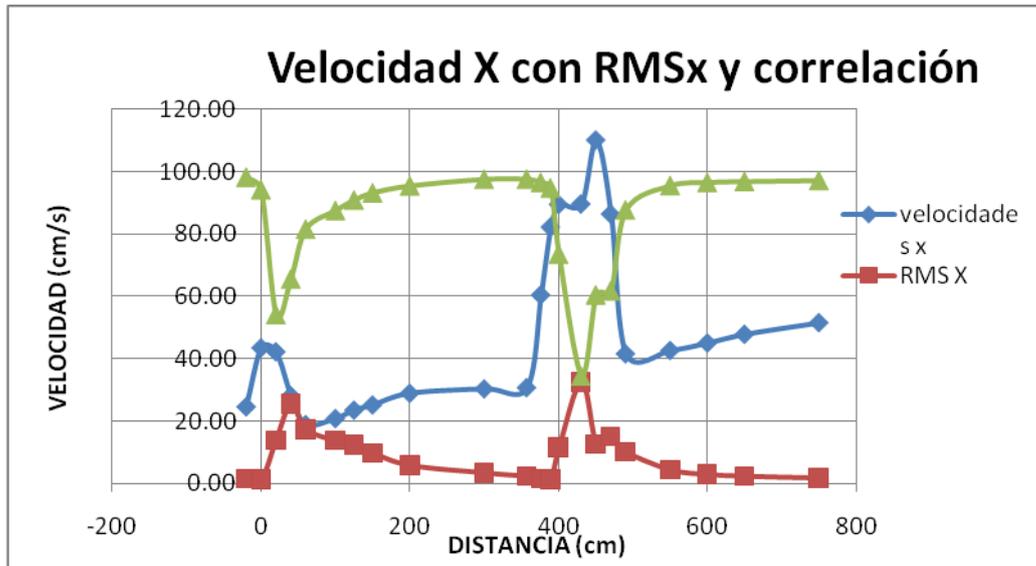


Imagen A.4.2 Relación entre la velocidad X y las fluctuaciones en RMS X

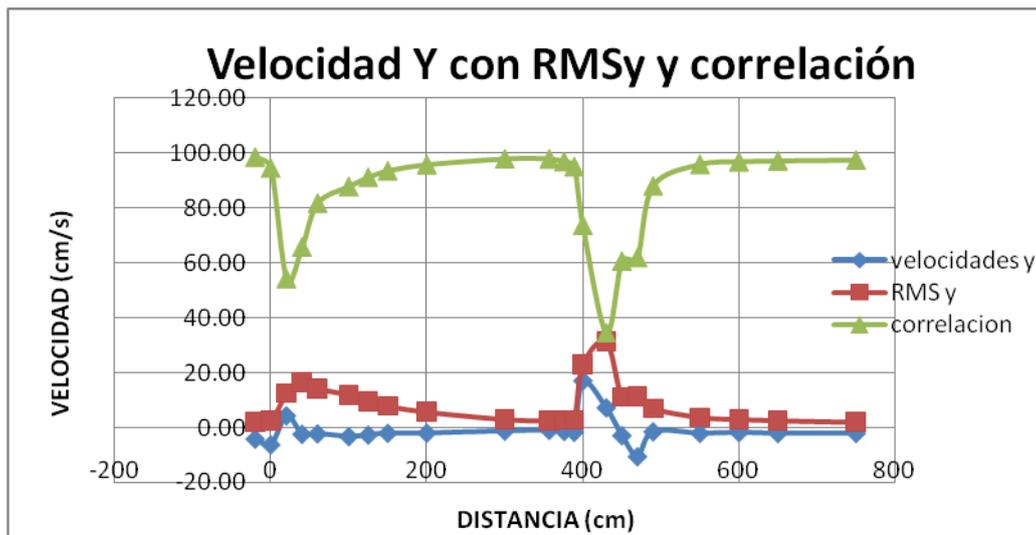


Imagen A.4.3 Relación entre la velocidad Y y las fluctuaciones de RMS Y

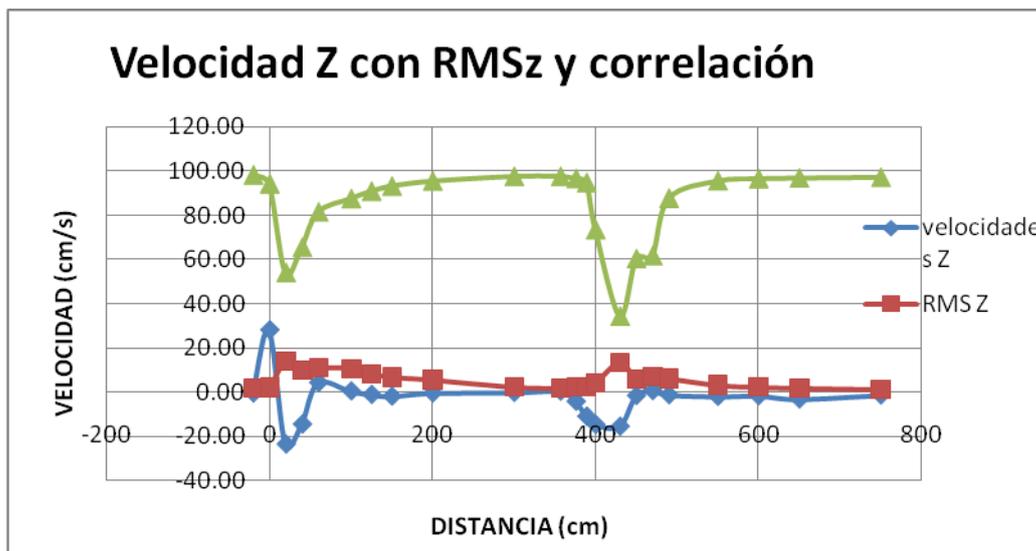


Imagen A.4.4 Relación entre la velocidad Z y las fluctuaciones de RMS Z

A.5 CONCLUSIÓN

En el presente apéndice se presenta el registro de velocidades y datos de probabilidad obtenido de las pruebas en un canal rectangular. Se analizaron principalmente los valores de velocidad, RMS (desviación estándar), correlación y SNR (sound noise to ratio), que son los más importantes en la identificación de flujos turbulentos, ya que son los que son más sencillos de detectar. El valor de SNR es de gran importancia para mantener una calidad óptima en el muestreo, es un valor del aparato que indica si las muestras son confiables o saber si existe algún problema ya sea con el medio donde se realiza el muestreo o detalles del aparato ADV.

El aporte principal de estos estudios previos (apéndice), es el conocer de manera general y específica los resultados obtenidos por medio de un medidor de velocidades ADV y asociarlos a fenómenos provocados y visualmente reconocibles, a fin de comprender e interpretar datos numéricos (estadísticos) y dar una explicación a fenómenos más complejos cuando no sea posible entrar en contacto físico con los fenómenos a estudiar.

En el cuerpo principal de la tesis se presentará como un elemento más de soporte y ayuda en la interpretación de fenómenos turbulentos el llamado índice de turbulencia, que complementando los resultados obtenidos en éste apéndice y aplicados al estudio del comportamiento del flujo a través de las estructuras propuestas sobre el río Carrizal (Tabasco), se obtendrán mejores interpretaciones del fenómeno de manera cuantitativa.

Una herramienta complementaria y muy importante son los espectros de potencia, los cuales permiten conocer el contenido de energía de un flujo debido a sus fluctuaciones internas, pues suele suceder que a mismas velocidades de 2 flujos diferentes existan diferentes comportamientos en el medio, también presentado en el cuerpo principal de la tesis.

9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

BIBLIOGRAFÍA

- Técnicas de Modelación en Hidráulica / Miguel A. Vergara S. / Alfaomega
- Modelos Hidráulicos / Dr. Gabriel Echávez Aldape
- Mecánica de Fluidos / Victor L. Streeter
- Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas / Claudio Mataix
- Hidráulica General Volúmen 1 / Dr. Gilberto Sotelo Ávila / Limusa
- Hidráulica de Canales / Dr. Gilberto Sotelo Ávila / Facultad Ingeniería
- SONTEC / YSI ADV LAB documentación técnica
- SONTEK / YSI, manual de usuario Flowtrak y video de aplicaciones

REFERENCIAS

New acoustic meter for measuring 3D laboratory flows /by Nicholas C. Kraus member ASCE, Atle Lohrman and Ramon Cabrera

Effect of turbulence in wáter cannel measurements / By Claudia Pollac-Reibenwein and Anne Joeppen

ADV measurements of turbulence / By Vladimir I. Nikora AND Derek G. Goring

Journal of atmospheric oceanic technology / Evaluation of the acoustic doppler velocimeter for turbulence measurements / By G. Voulgaris and J. H. Trowbrindge

Water resources research, vol 34 no.5 may 1998 / turbuence structure in a river reach with sand bed.

“Estudio sobre la presencia y eliminación de vórtices durante la descarga en las compuertas de un vertedor” / Tesis de Maestria / Fidel Sánchez Cruz

SONTEK / YSI, manual de usuario Flowtrak y video de aplicaciones

SONTEC / YSI ADV LAB documentación técnica

MEDIIOGRAFÍA

www.sontek.com

http://www.flowtransmitter.info/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=38

<http://www.stormingmedia.us/29/2959/A295982.html>