



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
(CAMPO CONOCIMIENTO) – (CAMPO DISCIPLINARIO)

ESTUDIO DEL CAMBIO DE LOS PATRONES DE TURBULENCIA EN  
TANQUES AMORTIGUADORES COMBINADOS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JUAN CÉSAR LUNA BAHENA

TUTOR PRINCIPAL  
DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

COMITÉ TUTOR  
DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM  
DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM  
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM  
DRA. FLOR LIZETH TORRES ORTIZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., FEBRERO, 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

Secretario: DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES

1 er. Vocal: DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

2 do. Vocal: DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

3 er. Vocal: DRA. FLOR LIZETH TORRES ORTIZ

Ciudad de México, Instituto de Ingeniería UNAM

**TUTOR DE TESIS: JESÚS GRACIA SÁNCHEZ**

-----  
**FIRMA**

Dedicada a mi hija y a mi esposa  
quien con su apoyo hizo que esto fuera posible

## *Agradecimientos*

*Después del tiempo transcurrido desde que comencé con este trabajo es difícil recordar a todos lo que de alguna manera me ayudaron a culminarlo. A todos los que influyeron y dedicaron parte de su tiempo a apoyarme. A todos ellos les agradezco de corazón.*

*Agradezco a Dios por todo. A los que ya no están, y sé que hubieran disfrutado mucho el leer esto y saber que por fin terminé. Por todo lo que hicieron por mí, muchas gracias Suegros.*

*A mi esposa Rocío, quien siempre me apoyó y me impulsó aun cuando parecía que me iba a rendir; ya que gracias a su amor y apoyo esta tesis fue posible. Gracias por comprender que cada momento en familia sacrificado valió la pena y se invirtió en este trabajo que llegó a fin. A mi pequeña hija Natalia que es el motor de mi vida.*

*A mis padres por todo lo que han hecho por mí a lo largo de mi vida. Porque los principios que sembraron en mí cuando era pequeño ahora tienen recompensa; gracias por los consejos a lo largo de toda mi vida, por todo su amor y cariño.*

*Hermano, gracias porque me has demostrado que siempre estas allí cuando te necesito, sabes que también cuentas conmigo. Si me cuentas mi vida, lo niego todo.*

*Susana, gracias por ser parte de esto, por siempre estar al pendiente de nosotros. Por esa actitud positiva y ese sentido del humor que te caracteriza, gracias por tu apoyo.*

*A mis sinodales, por haber tenido paciencia y apoyarme con su experiencia además de brindarme los consejos necesarios para mejorar este trabajo. Gracias Dr. Ramón, Dr. Óscar Fuentes, Dr. Adrián Pedrozo y Dra. Lizeth Torres, gracias por ayudarme con el tema de las señales.*

*Un Agradecimiento especial a mi tutor el Dr. Jesús Gracia. No hay palabras para agradecerle, la oportunidad de realizar este trabajo, todo el apoyo, consejos, tiempo y paciencia que siempre me brindó. Gracias porque siempre encontraba en usted alguien en quien confiar y una solución a cada problema. Gracias porque siempre fue más allá que un tutor gracias por ser mi amigo.*

*A mis amigos que invirtieron gran parte de su tiempo en ayudarme a Víctor Ortiz, que sin su habilidad para hacer puntas para la sonda y su apoyo incondicional esto no sería posible, por apoyarme en todo momento y apoyar todas las ideas que se nos ocurrieran por locas que parecieran. A Luis Herrera por su apoyo incondicional y todo el tiempo que invirtió en realizar mediciones, gracias Güicho. A Martín por todo el trabajo realizado en los modelos, perdón por ese golpe en el cárcamo. A Cristian Salas por enseñarme a como no hacer una tesis, sabes que es broma, gracias por todo Salas. A Daniel Salmerón y Yhair Carmona por todo el apoyo brindado.*

*A mis amigos de toda la vida Lalo e Isa, gracias por todo, Enrique Contreras, gracias por tomarme de ejemplo, sabes que cuentas conmigo.*

*A todos los que me faltaron que siempre creyeron en mí y a lo largo de mi vida ayudaron a conseguir esto, muchas gracias.*

# Índice

<b>1</b>	<b>Motivación y planteamiento del problema</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objetivo</b> .....	<b>5</b>
2.1	Objetivos particulares.....	5
<b>3</b>	<b>Antecedentes</b> .....	<b>6</b>
3.1	Diseño de deflectores en la rápida de vertedores .....	8
3.2	Turbulencia.....	10
3.2.1	Intensidad Turbulenta .....	10
3.2.2	Energía Cinética Turbulenta .....	11
3.2.3	Tasa de disipación de la energía turbulenta ( $\epsilon$ ).....	12
3.3	<i>Medición de contenido de aire</i> .....	14
3.3.1	Análisis de la velocidad de las burbujas .....	14
3.3.2	Contenido de aire .....	15
3.3.3	Velocidad interfacial.....	15
3.4	<i>Análisis de señales</i> .....	18
3.4.1	Análisis de Fourier .....	18
3.4.2	El análisis espectral.....	19
3.4.3	Turbulencia de flujos bifásicos con sondas de inductancia .....	22
<b>4</b>	<b>Instrumentación</b> .....	<b>27</b>
4.1	<i>Calibración</i> .....	28
4.2	<i>Postprocesamiento</i> .....	31
4.3	<i>Análisis de contenido de aire</i> .....	37
<b>5</b>	<b>Modelo físico</b> .....	<b>41</b>
5.1	<i>Efectos de Escala</i> .....	41
5.2	<i>Descripción del modelo físico</i> .....	42
5.3	<i>Diseño de tanque amortiguador</i> .....	42
5.4	<i>Diseño de deflectores</i> .....	44
5.5	<i>Pruebas realizadas</i> .....	46
<b>6</b>	<b>Modelación matemática</b> .....	<b>49</b>
6.1	<i>Modelo VOF</i> .....	49
6.2	<i>Modelos de turbulencia</i> .....	50
6.2.1	Modelo Large Eddy Simulation (LES).....	50

6.2.2	Modelos de transporte de turbulencia (modelo $k-\epsilon$ ).....	51
6.3	<i>Construcción de la geometría</i> .....	54
6.4	<i>Condiciones iniciales</i> .....	54
6.5	<i>Mallas</i> .....	55
6.6	<i>Condiciones de Frontera</i> .....	57
6.7	<i>Procesamiento</i> .....	58
<b>7</b>	<b>Análisis de resultados</b> .....	<b>62</b>
7.1	Condición con deflectores .....	62
7.2	Condición sin deflectores .....	62
7.3	<i>Contenido de aire</i> .....	64
7.4	<i>Índice de Turbulencia</i> .....	68
7.5	<i>Pendientes del espectro de potencias</i> .....	72
<b>8</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Bibliografía</b> .....	<b>80</b>
<b>10</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>87</b>
10.1	<i>Índice de Turbulencia</i> .....	87
10.2	<i>Espectros de potencia</i> .....	89





# 1 Motivación y planteamiento del problema

Algunos estudios relacionados con el tema de modificar la turbulencia en la descarga de vertedores de presas se enfocan en la modificación del patrón de flujo al final de la rápida de un vertedor, para cambiar la cantidad de oxígeno disuelto y con ello mejorar el hábitat de los peces, los cuales requieren hacer su recorrido a través de estructuras hidráulicas colocadas a lo largo de ríos, principalmente de gran caudal. Estos estudios no están limitados solamente a grandes caudales y altas concentraciones de aire, es un fenómeno estudiado ampliamente por su importancia con la mejora del medio ambiente (Leng et al 2019, Wang H. and Chanson 2018); sin embargo, las principales dificultades al paso de peces se presentan en las estructuras de gran altura y gran caudal donde se dificulta enormemente su paso. Desde la década de 60's se comenzó a estudiar el efecto que generan los vertedores en la Concentración Total de Gas Disuelto (TDG) en el agua, dado que se sabía que grandes niveles de gas disuelto, principalmente nitrógeno, son perjudiciales para los peces (Weitkamp and Katz, 1980). La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA) estableció en 1986 el estándar de TDG en 110%.

Joseph y Gullivert (2000) colocaron deflectores a diferentes alturas de la rápida con el objetivo de modificar la TDG dado que el aire que entra y es arrastrado en la zona del vertedor ingresa en forma de burbujas con una gran tamaño que facilita transferencia de masa aire-agua, cuando esas burbujas son arrastradas a la profundidad, el equilibrio burbuja-agua aumenta proporcionalmente debido a la presión; por lo tanto, es posible que exista una sobresaturación de gas disuelto lo cual no es benéfico para los peces.

Larry Weber et al. (2004) desarrollaron un modelo numérico el cual se calibró con mediciones de un modelo físico y determinaron que al colocar deflectores en la rápida a cierta altura modifica considerablemente la concentración de TDG al final de la rápida, determinando que la variación de este parámetro también depende de la sumergencia con que se presente la descarga. En su estudio realizaron pruebas en una sección transversal aproximadamente 300m aguas abajo del final de la rápida, en una primera prueba se simuló un gasto de 3778 m<sup>3</sup>/s obteniendo un valor máximo de 140% de TDG principalmente cargado hacia el margen derecha del cauce; posteriormente se colocaron deflectores sobre la rápida con varios grados de sumergencia obteniendo un valor máximo de TDG de 130 %, con un comportamiento más homogéneo en la sección transversal: finalmente modificaron la altura de la descarga para variar la sumergencia y se consiguió en el mismo punto de referencia un valor de 125% TDG, prácticamente 15% menor que al no contar con deflectores en la rápida. Estos estudios demostraron que con la colocación de estructuras en la rápida de un vertedor cambia la forma en que se comporta el flujo aguas abajo.

Adicionalmente en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se desarrolló un estudio en un tanque amortiguador trapecial perteneciente a un modelo físico de escala 1:30 (Ortiz et al. 2014). El estudio se realizó en un tanque que originalmente fue diseñado para un gasto de 80 (m<sup>3</sup>/s) y el gasto a transitar en él aumentó a 250 (m<sup>3</sup>/s); por lo que fue necesario un rediseño que consistió en un tanque trapecial más profundo y más largo. Dependiendo del criterio que se escogiera, se tenían longitudes en prototipo entre 48 (m) y 94 (m) por lo que se decidió construirlo de 54 (m) de longitud y un escalón de 2.9 (m). En las pruebas con la nueva geometría se observaron desbordamientos por ambas márgenes, los cuales no se presentaba con la versión original. Por lo que se decidieron hacer pruebas disminuyendo la longitud y la

profundidad del tanque amortiguador; sin embargo, no se consiguió tener un comportamiento adecuado ya que continuaban presentándose desbordamientos. Posteriormente se colocaron estructuras en la rápida para modificar la forma en que se disipa la turbulencia en el tanque amortiguador y con ello disminuir las fluctuaciones de la superficie libre del agua. Al colocar dos hileras de deflectores en la rápida (Figura. 1.1) se consiguió modificar la disipación de energía cinética turbulenta la cual aumentó en un 106% más que en la simulación sin deflectores.



*Figura. 1.1 Deflectores en la rápida del tanque amortiguador*

En estudios realizados por Luna et al (2015) se relacionó la modificación de la disipación de la energía cinética turbulenta o Turbulent Kinetic Energy TKE, entre las diferentes condiciones de entrada estudiadas anteriormente con la longitud del tanque amortiguador, lo que determinó con mediciones en el modelo físico que la longitud del tanque puede reducirse hasta en un 40% dependiendo de la condición de entrada, resultando que la energía se disipa de una manera más efectiva en una rápida dentada, para ello se realizaron modelaciones numéricas en el tanque amortiguador para determinar cómo cambia la energía cinética turbulenta.

Modificando la condición de entrada al tanque; se comparó una rápida convencional, una escalonada y una con dos hileras de dientes sobre la rápida. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura. 1.2; donde se grafican los valores de la TKE en ( $m^2/s^2$ ) para la rápida convencional y con escalones se aprecian los valores cercanos a cero en azul los que presentan mayor valor en color rojo, e la figura con la rápida escalonada, estos valores se invierten. Se aprecia para la rápida convencional que la TKE se concentra mayormente en el segundo tercio del tanque amortiguador y transversalmente, se observan 2 zonas con valores elevados de TKE en los tercios extremos, concentrada principalmente cerca de la plantilla. Para la rápida escalonada se observa un cambio en el patrón de turbulencia ya que la mayor parte de la energía ahora se concentra en el primer tercio del tanque y del corte transversal se observa que la TKE se encuentra localizada en 2 zonas ubicadas en los tercios extremos y con un valor mayor cercano a la plantilla.

Finalmente, para la rápida escalonada se observa nuevamente una modificación en la turbulencia del tanque ya que presenta una distribución de TKE más homogénea concentrada en los primeros 2 tercios del tanque amortiguador, a diferencia de las pruebas anteriores se observa que las dos zonas en los tercios extremos ya no concentran la energía cinética, dado que para esta configuración se presenta una distribución con valores más homogéneos ubicados en la franja central.

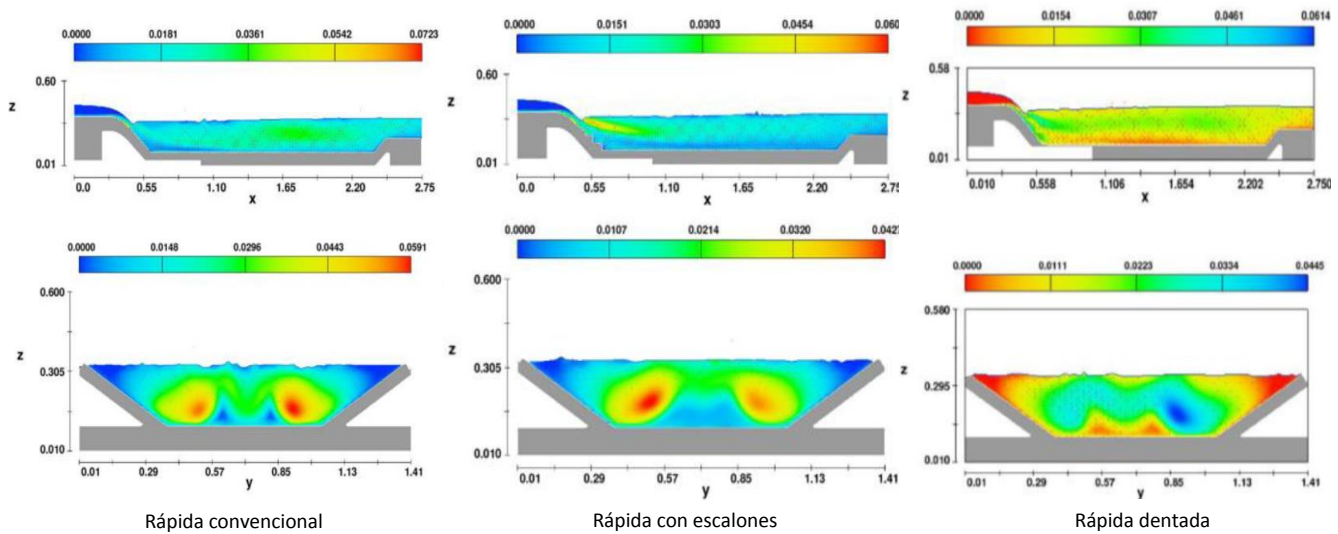
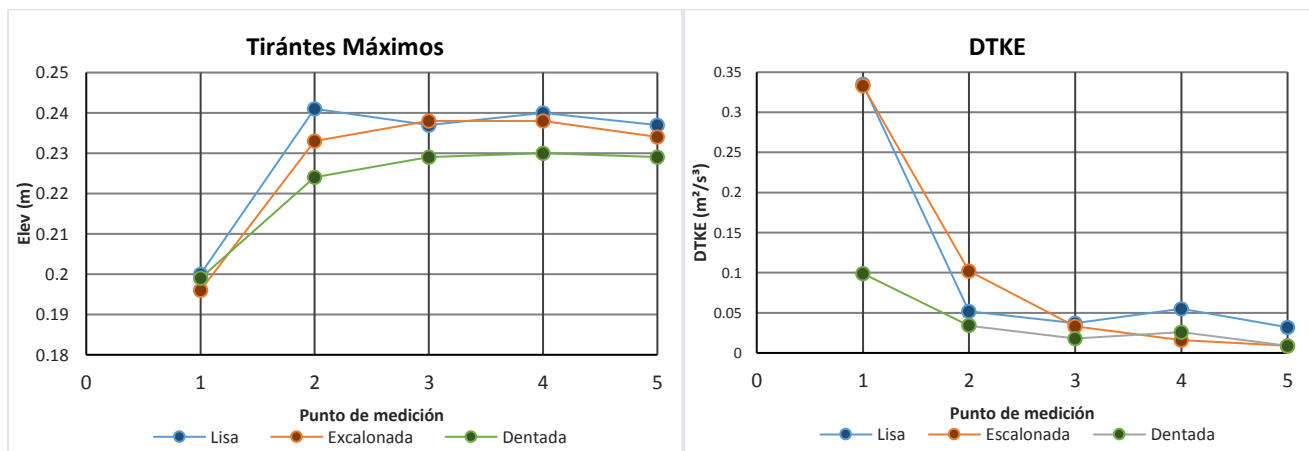


Figura. 1.2 Modificación de TKE

El cambio en la turbulencia debido a la modificación del flujo a la entrada del tanque amortiguador también se ve reflejado en la fluctuación de la superficie libre del agua y la disipación de la energía cinética turbulenta (DTKE), en la Gráfica 1 se observa DTKE y la superficie libre del agua en la sección central para los tres casos estudiados.



Gráfica 1 comparación de tirantes y DTKAE

En las gráficas se observa cómo se modificó el valor de los tirantes máximos dependiendo de la condición de entrada, demostrando que la rápida escalonada es en la que menores niveles del cuerpo de agua presenta a lo largo del tanque amortiguador, contrastando con la rápida lisa que tuvo mayores niveles en todas las secciones.

Salas (2015) realizó diferentes mediciones para determinar que la DTKE tiene un comportamiento mejor para la rápida dentada contrastando contra la rápida lisa y determinó que parte de la disipación de la energía y el cambio de la turbulencia se realiza sobre la rápida justo donde se encuentran las hileras de dientes ya que el valor de inicio de los tres escenarios se midió al inicio del tanque amortiguador y dado que el tanque trabaja ahogado parte de la disipación se presenta sobre la rápida, donde no fue posible realizar mediciones pero se observó que el valor inicial de la rápida dentada es considerablemente menor que el de los otros dos casos.

Las experiencias anteriores motivaron el desarrollo del presente trabajo ya que se demostró que **la turbulencia en un tanque amortiguador se modifica dependiendo de la condición de entrada**, pero se requiere un modelo de mayor escala donde intervengan variables como contenido de aire para determinar cómo se desarrolla esa modificación y cuantificar el cambio del patrón de turbulencia, para obtener como resultado tanques más eficientes y económicos.

## 2 Objetivo

Mejorar la forma en que se disipa la energía en un tanque amortiguador rectangular. Esto mediante la colocación de deflectores en la rápida antes del ingreso al tanque, además de cuantificar con mediciones en modelo físico su comportamiento y variación de acuerdo con la condición de salida.

### 2.1 Objetivos particulares

- Probar la metodología en un modelo físico en el que se representó la propuesta establecida.
- Reproducir los resultados del modelo físico en un modelo matemático.
- Relacionar la medición de contenido de aire en un tanque amortiguador rectangular con la turbulencia que se genera en él.
- Determinar cuál es la forma más eficiente de disipar la energía en un tanque amortiguador rectangular combinado.
- Caracterizar la turbulencia empleando las mediciones hechas con sonda de conductividad en el modelo físico y relacionarlas con variables de turbulencia.

### 3 Antecedentes

Existen pocos estudios sobre la disipación de la turbulencia en tanques amortiguadores cuando se modifica la entrada al tanque. Se planteó que el agua no ingresara por el fondo del tanque, sino que lo hiciera mediante deflectores que parten desde la rápida, pero no se cuentan con un análisis de turbulencia donde sea posible comparar los valores medidos con los de un modelo matemático.

Deng Jun et al. (2008) realizaron una propuesta de instalar deflectores en la rápida a diferentes elevaciones y hacerlos funcionar como chorros sumergidos Figura. 3.1. Al tener el vertedor dividido en varios canales a diferentes alturas, observaron que se producía una gran disipación de energía debido a los remolinos que se generan en todas las direcciones del flujo. En ese proceso se enfrentaron con problemas para medir en algunos puntos de interés, pero representaron de manera satisfactoria los resultados. Ellos realizaron un modelo matemático y al compararlo con las mediciones del modelo físico se obtuvieron resultados muy similares y notaron que, al ampliar el área del cortante, mediante los chorros sumergidos e incorporarlos al agua tenían chorros estrechos en la dirección horizontal y grandes en la dirección vertical, lo que hizo que el flujo fuese estable y la salida era controlada satisfactoriamente.

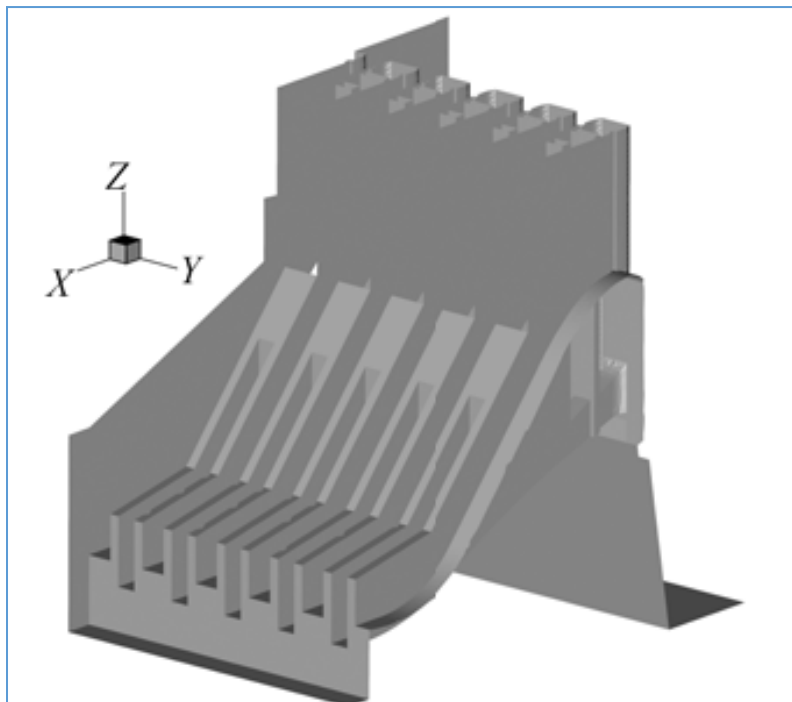


Figura. 3.1 Modelo de Deng Jun et al (2008)

Se han desarrollado varios estudios, en modelo físico, aunque orientados a otro tipo de fenómenos como la saturación de oxígeno en las salidas de las obras excedencia, para analizar aspectos ambientales como es el realizado a la presa Lower Monumental por la USACE, Steven et. al. (2003). Lo interesante de este trabajo es que colocación de deflectores en la rápida, modificó completamente el patrón de turbulencia. En el vertedor de la presa se contó con 8 compuertas, en 2 de ellas tuvieron descarga libre hasta el tanque amortiguador, pero las restantes contaron con un deflector que generaba un salto en esquí; la peculiaridad de este vertedor, fue que el tirante a la salida del tanque tenía valores que hace que el salto en esquí se ahogue y trabaje como un chorro sumergido, lo que origina una disipación de la turbulencia diferente.

También describen que al elevarse el nivel aguas abajo y dependiendo del gasto de descarga, el salto de esquí era diferente, desde un chorro en picada hasta un salto superficial sumergido. Para ello existe una clasificación de 7 tipos diferentes de chorro (USAEWES 1996a; USAEWES 1996b; USAEWES 1999; Wilhelms 2002). Es importante señalar que cada una de estas condiciones presenta una turbulencia diferente dentro del tanque amortiguador y a la salida de este, lo que podría originar una socavación tal que pusiera en peligro la estructura. En este estudio no realizaron medidas de turbulencia, solamente analizaron la socavación de acuerdo con el tipo de flujo que se presentaba para cada condición.

Además es importante mencionar que el tipo de salto y la socavación presentada dependían del ángulo de salida del deflector; como lo comprobaron con mediciones de velocidades con un Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) a la salida del tanque y observaron diferentes afectaciones a la salida. Lo cual demuestra que el estudio de la disipación de energía en función de las condiciones de estrada, está lejos de ser entendida completamente.

Se han realizado propuestas de modificación a las entradas convencionales a un tanque amortiguador, Chen et al. 2014 propusieron una configuración con descargas en diferentes planos y diferentes alturas (Figura. 3.2). Derivado de mediciones de velocidad demostró que esta configuración es más eficiente conforme aumenta el número de Froude. De sus configuraciones resultó 5% más eficiente que un tanque SBJ y 13 % más eficiente que un tanque amortiguador convencional



*Figura. 3.2 Configuración Chen.*

Otra forma escasamente estudiada para modificar la turbulencia dentro de un tanque amortiguador, consiste en fabricar una plantilla con una configuración que genere una macrorugosidad, ya que se logra desplazar el salto hidráulico hacia aguas arriba y generar un aumento en el número de burbujas al inicio del salto, por lo que se desarrolla una mayor aireación, lo cual es útil en los procesos de transferencia aire-agua (Felder S. and Chanson H. 2018).

### **3.1 Diseño de deflectores en la rápida de vertedores**

Cuando se requiere disipar energía mediante tanques amortiguadores su diseño depende del número de Froude presente al final de la rápida donde inicia el tanque amortiguador: Para ello existen diseños previamente probados en lo que se hace una disipación correcta de la energía en la longitud del tanque amortiguador.

Cuando se presentan números de Froude pequeños entre 2.5 y 4.5 se tiene el diseño propuesto USBR II, el cual lo considera como un régimen en transición; ya que no se forma un verdadero resalto por lo que un tanque convencional no se producirá una disipación efectiva dado que habría ondas generadas por las corrientes que persisten más allá de la longitud del tanque amortiguador.

El diseño mencionado, no presenta bloques de impacto dentro del tanque ya que por las velocidades que se despliegan, es posible que generen cavitación en los bloques. El diseño de este tipo de estructuras se muestra en la Figura. 3.3 donde  $d$  es el tirante al inicio del tanque amortiguador.



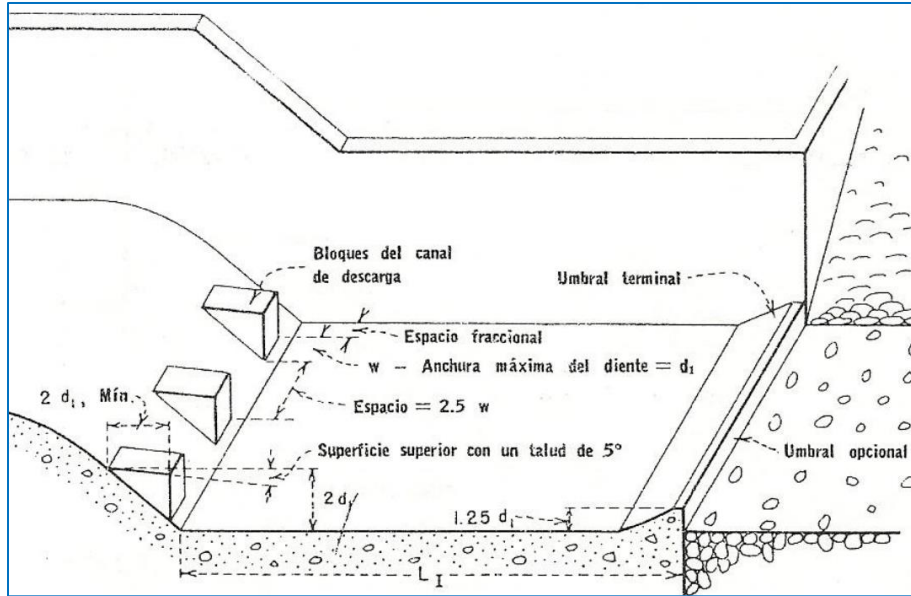


Figura. 3.3 Dimensiones del Tanque USBR I

Para números de Froude mayores a 4.5 se cuenta con el diseño del USBR III, en el cual se forma un salto estable. Este diseño considera bloques en la plantilla del tanque amortiguador para producir un efecto estabilizador, mediante la disipación de la velocidad de recirculación dentro del tanque. Estos tanques presentan la ventaja de ser más cortos que un tanque convencional y proporcionan un factor de seguridad mayor ya que es independiente del tirante aguas abajo del tanque: Una limitación de este diseño es que no están recomendados para velocidades mayores a 15 (m/s) (Figura. 3.4), para velocidades mayores se utiliza el diseño del USBR III que considera dientes de impacto al final del tanque.

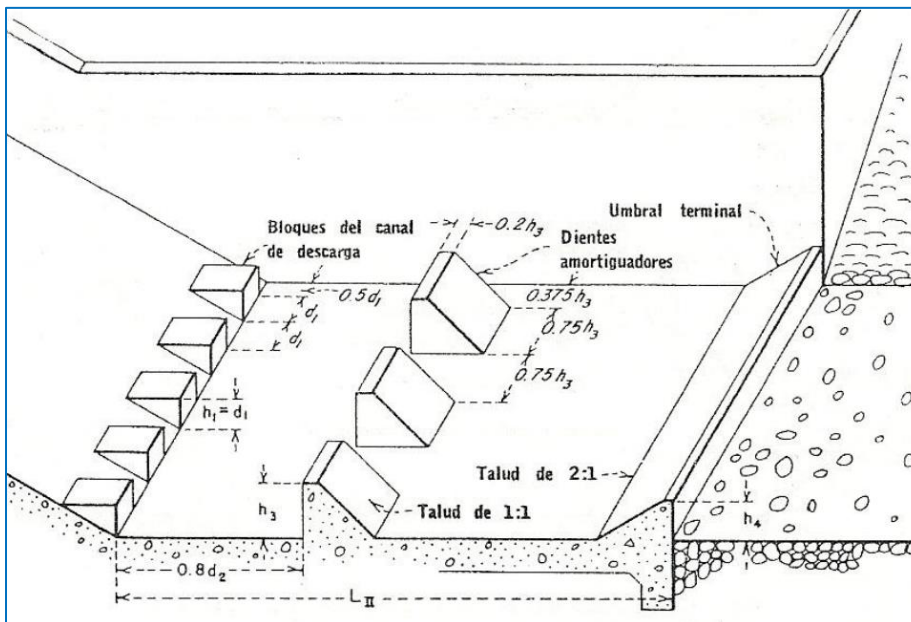


Figura. 3.4 Dimensiones Tanque USBR II

## 3.2 Turbulencia

En un flujo turbulento se presentan remolinos de diferentes escalas. Los remolinos de gran escala extraen su energía del flujo medio, son generalmente inestables y tienden a dividirse en remolinos más pequeños los cuales también tienden a dividirse. El proceso de división, se produce en cascada cada vez más pequeñas hasta que el número de Reynolds no es suficientemente grande para que la inestabilidad persista. La disminución de tamaños aumenta los gradientes de velocidad lo cual hace que la energía cinética turbulenta se transforme en energía térmica debido a una disipación viscosa.

### 3.2.1 Intensidad Turbulenta

Existe una expresión universal para calcular la intensidad de turbulencia en cada una de las direcciones del flujo. Los componentes de intensidad turbulenta en un flujo son  $u'$ , en la dirección del flujo,  $v'$  en la dirección transversal y  $w'$  en la dirección vertical del flujo.

Nakagawa et al (1975) fueron de los primeros especialistas que midieron estos parámetros en flujos a superficie libre utilizando anemómetros de hilo caliente. Ellos realizaron estudios para observar el comportamiento de la turbulencia, modificando la rugosidad del canal. Con lo cual, se observó que el tamaño dominante de los remolinos y la intensidad turbulenta en la dirección del flujo decrece cuando aumenta la rugosidad; y por consecuencia la redistribución de la energía turbulenta sobre un canal con fondo rugoso se desarrolla más rápidamente que sobre uno con fondo liso.

Nezu y Nakagawa (1993) desarrollaron las ecuaciones para la energía turbulenta y las intensidades de la turbulencia en las tres direcciones del flujo; derivado de sus experimentos se observó un mejor ajuste en la zona  $0.1 < y/h < 0.6$  (la altura relativa del agua), que era donde presentaba una mayor diferencia los primeros resultados de Nakagawa. Para obtener el valor de los coeficientes de las ecuaciones realizaron experimentos en canales a superficie libre con lo que desarrollaron las siguientes ecuaciones normalizadas y derivadas del estudio del flujo bidimensional:

$$\begin{aligned}u' / U_* &= 2.3 \exp(-y/h) \\v' / U_* &= 1.27 \exp(-y/h) \\w' / U_* &= 1.63 \exp(-y/h) \\k / U_*^2 &= 4.78 \exp(-2y/h),\end{aligned}$$

donde  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ , son la media cuadrática (Intensidad turbulenta);  $y$  es la distancia al fondo del canal;  $k$  es la energía turbulenta y  $U_*$  es la velocidad de corte  $U_* = \sqrt{ghS}$  siendo  $g$  la aceleración de la gravedad,  $h$  el tirante medio y  $S$  la pendiente del canal.

Con las ecuaciones anteriores se obtiene la intensidad turbulenta en cada dirección observando que  $u' > w' > v'$ , pero la intensidad turbulenta se modificaba debido a la presencia de las paredes, para dicho caso se deben aplicar otros parámetros. Al realizar más experimentos se demostró que dichas ecuaciones

presentan problemas con la presencia de obstáculos en el fondo y que genera buenos resultados en fondos lisos o poco rugosos Papanicolaou et al. (2012).

### 3.2.2 Energía Cinética Turbulenta

Jiménez S. J. (2011) determinó que la disipación de energía cinética es independiente de la viscosidad del fluido, a pesar de que era el único término de las ecuaciones de movimiento capaz de disipar la energía es precisamente el viscoso; posteriormente, se dio la solución suponiendo que los remolinos grandes tienen números Reynolds altos donde la viscosidad no influye en la disipación, dichos remolinos generan remolinos cada vez más pequeños hasta que la viscosidad, es capaz de disipar la energía. Mientras lo anterior no ocurra la energía se transmite sin pérdida y el flujo entre las distintas escalas es constante lo que sirve para determinar las fluctuaciones de velocidad. Esta cascada de energía actúa desde las escalas mayores que no son homogénea ni isotrópicas, hasta la escala viscosa.

Físicamente la TKE es función de los valores medios de la velocidad en las tres direcciones, pero a diferencia de la varianza la TKE se cuantifica en las tres direcciones, de modo que si se conocen las fluctuaciones de la velocidad en las tres direcciones se conocerá la energía que posee el fluido en un punto específico en un momento específico.

La TKE es considerada un modelo de transporte de turbulencia de una ecuación donde se asocia la energía específica con la velocidad de las fluctuaciones de la velocidad turbulenta del flujo y para caracterizar la magnitud de la fluctuación se utiliza la media cuadrática de cada variable (White F. M. 1991).

Siendo la serie continua de velocidades en la dirección del flujo:  $(u_1, u_2, u_3 \dots u_n)$ .

$$u'_{rms} = \sqrt{1/n (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 \dots + u_n^2)},$$

entonces la energía cinética turbulenta se calcula como:

$$TKE = 1/2 (u'^2_{rms} + v'^2_{rms} + w'^2_{rms}),$$

donde  $u'$ ,  $v'$  y  $w'$  son las fluctuaciones de la velocidad en las respectivas direcciones del flujo y  $n$  es el número de fluctuaciones obtenidas.

Para un flujo plenamente desarrollado en un canal abierto (Urban et al 2005) que se basa en la integración de los perfiles de velocidad realizados por Nezu y Nakagawa (1993), se desarrolló una ecuación para relacionar la energía cinética turbulenta con la velocidad de corte mediante:

$$k = \frac{1}{2} [(1.45u_*)^2 + (0.8u_*)^2 + (1.03u_*)^2] = 1.87u_*^2$$

La velocidad de corte se determina mediante el factor de fricción de Darcy-Weisbach con la ecuación

$$u_* = \sqrt{\frac{f}{8} \bar{u}},$$

donde  $f$  es el factor de fricción el cual será el promedio de la rugosidad del canal y  $\bar{u}$  es la velocidad promedio en el canal.

### 3.2.3 Tasa de disipación de la energía turbulenta ( $\epsilon$ )

La turbulencia se presenta cuando se tiene uno o más fluidos en movimiento y su estudio e importancia se refleja en varios campos del conocimiento que van desde la circulación de la sangre (Kanski et al 2015) hasta el comportamiento de los gases interestelares (Chepurnov and Lazarian 2010).

Para realizar una correcta modelación de este tipo de fenómenos se debe considerar como interactúan las escalas turbulentas, y sus energías, y la distribución de la energía cinética turbulenta en términos del número de onda  $k$  planteado en la teoría de Kolmororov está dado como  $k^{-5/3}$  (Kolmogorov 1941 a y b).

La visión clásica implica que la energía se disipa mediante cascadas, es decir de manera gradual de gran escala hasta escalas isotrópicas pequeñas donde la energía es disipada por medio de calor; sin embargo, se han realizado estudios donde se observa la anisotropía en las pequeñas escalas (Shen and Warhaft 2000), además de interacciones entre escalas a través de todo el rango de escalas con significativa transferencia de energía (Biferale et al 2012).

En un flujo turbulento se describen dos tipos de componentes uno formado por un flujo medio y otro componente aleatorio, un ejemplo del flujo medio se observa en el experimento de Reynolds desarrollado en tuberías donde se presenta como un flujo axial. Por lo que en cada uno se puede definir la velocidad como:

$$u(x, t) = \bar{u}(x) + u''(x, t),$$

donde  $u''$  es la componente aleatoria del movimiento.

Existen flujos donde el movimiento turbulento se acentúa en pequeñas zonas, donde se cuenta con un número de Reynolds lo suficientemente grande; esas zonas comienzan a crecer y se combinan hasta lograr una turbulencia completamente desarrollada.

El punto clave es que justo en la transición la turbulencia es intermitente siendo intercalada por regiones laminares quietas. En este tipo de flujos cuando cierto umbral de turbulencia es excedido, se crea el caos uniformemente a través del fluido, lo cual puede ocurrir con una simple inestabilidad del flujo, lo que conduce a un movimiento cercano al laminar, que a su vez se vuelve inestable y se descompone en estructuras más complejas, como consecuencia de la inestabilidad que eventualmente produce movimiento aleatorio y caótico lo cual corresponde a la turbulencia.

Algo relevante es que el movimiento de los fluidos es casi siempre inestable y que solo es suprimido si la disipación viscosa es lo suficientemente grande, sin embargo, la mayoría de los fluidos tienen una viscosidad muy baja y el agua no es la excepción lo que implica que la turbulencia es el estado natural de las cosas.

La turbulencia presenta estas características:

- 1.- El campo de las velocidades fluctúa aleatoriamente en el tiempo y es desordenado en el espacio, exhibiendo un gran rango de escalas de longitud.
- 2.- El campo de velocidades es impredecible en el sentido que un cambio de minutos en la condición inicial producirá un gran cambio en los movimientos siguientes. (Davidson 2004).

Existen varios criterios para el cálculo de la tasa de disipación de la energía turbulenta. (Nezu y Nakagawa 1993) desarrollaron una ecuación partiendo del análisis en una dirección de la función espectral normalizada de las fluctuaciones de la velocidad esto solo en la dirección predominante del flujo, donde también intervienen parámetros como la macro escala de la turbulencia. Ellos obtuvieron una ecuación practica que solo depende de una constante y del valor del tirante y la profundidad a la que se quiera conocer la disipación de la energía cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ).

$$\varepsilon h / U_*^3 = E_1 (y/h)^{-1/2} \exp(-3y/h),$$

donde  $h$  es el tirante,  $y$  es la profundidad  $E_1$  es aproximadamente 9.8 para números de Reynolds entre  $10^4 - 10^5$

La tasa de disipación para modelos de una ecuación está directamente relacionada con la energía cinética turbulenta y se calcula como:

$$\varepsilon = C_\mu \sqrt{\frac{3}{2} \frac{TKE^3}{l}},$$

donde  $TKE$  es la energía cinética turbulenta,  $C_\mu$  es un parámetro empírico típicamente 0.09 (adimensional) y  $l$  es la macro escala de turbulencia, este valor se recomienda del 7% del diámetro hidráulico el cual en el caso de tuberías queda restringida por el diámetro del ducto y la relación aproximada es del 7% del diámetro (Shojaee and Boyaghcchi 2007), dicho parámetro también se emplea en canales, en este caso sería el 7% del tirante (Flow Science, Inc. 2012).

La disipación de la energía cinética es posible obtenerla en términos del promedio de la TKE por unidad de masa. La fórmula propuesta por Flow Science en su manual de ejercicios (FLOW-3D® Version 12.0 Users Manual 2018) es:

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} l^{-1},$$

donde  $C_\mu$  es 0.09,  $k = 1.5(uI)^2$  siendo  $u$  la velocidad media e  $l = 0.16Re^{-1/8}$ , el número de Reynolds para canales abiertos es  $Re = Rh u/\nu$ , siendo  $Rh$  el radio hidráulico y  $\nu$  la viscosidad cinemática, la cual para agua a 20°C es 1.003e-6.

Si se toma en cuenta que la macro escala de turbulencia del 7% del tirante; de la ecuación de (Nezu y Nakagawa 1993) la tasa de disipación de la energía cinética se representa como:

$$\varepsilon = K \frac{U'^3}{l},$$

donde  $K = 0.691 + 3.89/\sqrt{Re}$  y es válida si el número de Reynolds es mayor de 200.

Pope (2000) determinó una relación para obtener la tasa de disipación por unidad de masa mediante la ecuación

$$\varepsilon = 0.16 \frac{k^{3/2}}{L},$$

donde  $k$  es la Energía cinética turbulenta y  $L$  representa la viscosidad turbulenta, la cual se asume igual que la macroescala de turbulencia. Nezu y Nakagawa (1993) determinaron como cambia la macroescala turbulenta cercano al fondo, en la región intermedia y en la superficie libre, si se integra a través del tirante se define:

$$L = 0.62h$$

donde  $h$  es la profundidad del canal

Para el cálculo de la disipación de la energía turbulenta una vez que se alcanzó un estado de equilibrio, por ejemplo, aguas abajo de tanques amortiguadores se utiliza la ecuación (Urban et al 2005).

$$\varepsilon = 0.27 \frac{k^{3/2}}{h}.$$

### 3.3 Medición de contenido de aire

Entre los métodos para medir la velocidad de las burbujas de aire están los que la infieren a partir de la conductividad en los líquidos, que pueden ser inductivos o resistivos. Para este estudio se optó por la medición resistiva, ya que la conductancia es el recíproco de la resistencia y su unidad es el Siemens.

Para hacer estas mediciones se construyó un sensor que se coloca dentro del flujo; cuando estaba en contacto con el agua genera una señal continua y en el momento de detectar una burbuja de aire se apreciaba una perturbación en la señal. , con subidas y caídas de tensión, lo que reflejaba el paso de la burbuja (Méndez 2008).

#### 3.3.1 Análisis de la velocidad de las burbujas

En presencia de un líquido el valor de la corriente eléctrica que fluye es distinto que ante la presencia de aire. Esto se debe a que el agua posee una capacidad mayor que el aire para permitir el paso de la corriente eléctrica, la conductividad del agua es cercana a 5 ms/s mientras que la del aire es casi cero.

Este tipo de sondas para detectar el cambio de fase en fluidos se han ido mejorando. Las primeras se usaron hace 40 años (Chanson 2013), aunque se tienen registros de su utilización para la caracterización de flujos bifásicos desde 1963 (Neal 1963).

Se han realizado numerosos experimentos con los que se ha perfeccionado la fabricación, dimensiones de los sensores y distancia entre ellos. Esto cobró importancia ya que el diseño de la sonda depende de las características del flujo; siendo la principal consideración la velocidad del fluido, ya que a partir de ella se propone el diámetro de los sensores, se calcula la distancia entre ellos y la frecuencia de muestreo. Chanson en 2013 obtuvo que la frecuencia de muestro mínima para evitar el aliasing (cuando la señal original no puede ser reconstruida a partir de la señal digital) está relacionada con el tamaño de la burbuja más pequeña, la cual corresponde al diámetro de la sonda. También obtuvo una ecuación para la distancia entre las sondas.

$$F > 2 \frac{V}{\phi_s} \quad ; \quad \frac{\Delta x_{\text{optimo}}}{\phi_s} \approx 33.5V^{0.27} ,$$

donde  $F$  es la frecuencia de muestreo,  $V$  es la velocidad del flujo,  $\phi_s$  es el diámetro de la sonda y  $\Delta X_{\text{optimo}}$  es la distancia entre las puntas.

Existen otro tipo de sondas para medir el contenido de aire, velocidad, tamaño y distribución de las burbujas. Estas sondas, a diferencia de las de conductancia son de fibra óptica y existen fabricantes con los que se puede adquirir como es la empresa francesa RBI-instrumentación.

El principio de operación de estas últimas sondas consiste en generar una luz infrarroja en un extremo de la fibra óptica y el otro extremo se sumerge en el fluido; el extremo dentro del agua está afilado de una forma especial en la cual una fracción de luz escapa y el resto es reflejada de vuelta, un espejo semitransparente combinado con un prisma desvía la luz a un diodo fotosensible, posteriormente un cambio en el índice de refracción del medio ya sea gas o líquido modifica la intensidad de la luz reflejada al diodo, con una amplificación directa y con la detección a través de un umbral se conoce si alrededor de la sonda hay agua o aire.

Estas sondas se han probado con éxito en simulación de jets en la salida de vertedores con flujos multifásicos, velocidades cercanas a los 30 m/s, fracciones de vacío mayores al 23% (Duarte 2013), modelos físicos para obtener contenido de aire y velocidad en saltos hidráulicos (Murzyn et al. 2004), en columnas de agua con inyección de aire donde se estudia el comportamiento del contenido de aire en un flujo altamente aireado (Simonnet et al. 2007) , estudios de cavitación en flujos bifásicos ( Stutz B. and Reboud J. 1997).

### 3.3.2 Contenido de aire

Conociendo el tiempo de registro se sabe cuánto tiempo se registró la señal continua y cuánto tiempo se tuvo una discontinuidad, con este registro se estima el contenido de aire en el flujo

$$t_t = t_c + t_d$$

$$C = \frac{t_d}{t_t} \times 100 ,$$

donde  $t_t$  es el tiempo total de registro,  $t_c$  es el tiempo de registro continuo,  $t_d$  es el tiempo del registro discontinuo y  $C$  es la concentración de aire.

### 3.3.3 Velocidad interfacial

Si en el dispositivo se colocan dos sensores es posible estimar la velocidad de la burbuja, se requiere el registro continuo de los sensores y se mide el desfase en la señal dependiendo de en qué sensor impactó primero la burbuja de aire, por lo que se tendría una señal desfasada en el tiempo y como la distancia entre los sensores es conocida, se infiere la velocidad de la burbuja, al hacerlo así **solo se obtiene una proyección de la velocidad real de la burbuja.**

Al obtener la velocidad de la manera descrita se considera lo siguiente: la burbuja que impacta en un sensor es la misma que impacta en el siguiente; no cambia significativamente de forma después del primer impacto, el sensor debe estar orientado en la dirección del flujo y la velocidad que se mide es solo en una

dirección. Si se coloca un número determinado de sensores es posible hacer una estimación tridimensional de la velocidad.

Para calcular la velocidad real de la burbuja es necesario construir una punta con 4 sensores una de las cuales debe ser de una longitud mayor a las otras tres, y se deben de conocer las distancias entre ellas y los cosenos de los ángulos respecto a la aguja de mayor tamaño.

Como la burbuja no posee un movimiento lineal y no son completamente esféricas se hace un desarrollo matemático para obtener la velocidad interfacial para ello. Méndez (2008) y Shen (2005) propusieron todo un desarrollo basado en la geometría y el registro de la señal para obtener la velocidad interfacial.

Se obtiene la relación de la velocidad media desde la punta donde se origina el primer impacto a las demás puntas y se relaciona con la velocidad real por medio de un vector unitario

$$\hat{n}_i \cdot \overline{V_{m_{0k}}} = \hat{n}_i \cdot \overline{V} = V_n ,$$

donde  $V_n$  es la proyección del vector velocidad real sobre el vector normal a la superficie de la burbuja medida en el punto de toque de la burbuja que coincide con la proyección de vector velocidad medio;  $\overline{V_{m_{0k}}}$  es la velocidad media en la dirección de la punta más larga a una de las otras puntas,  $\overline{V}$  es la velocidad real de la interfase y  $\hat{n}_i$  es el vector unitario normal a la superficie de la interfase en el primer punto de intersección. 0 es el punto del sensor más grande el primer punto de intersección y  $k$  es alguno de los otros tres sensores.

Para obtener una velocidad media se requiere conocer la distancia entre los sensores y el tiempo de retraso de la señal del sensor  $k$  respecto a la señal del sensor 0 como se muestra en la Figura. 3.5 Por lo que la ecuación anterior indica la proyección de la velocidad media sobre el vector normal a la interfase en el punto de contacto del sensor 0 que es igual a la proyección del vector de la velocidad real de la interfase sobre el mismo vector unitario. Lo anterior se cumple aun cuando la velocidad es lateral y cuando el primer sensor en tocar sea distinto al sensor 0.

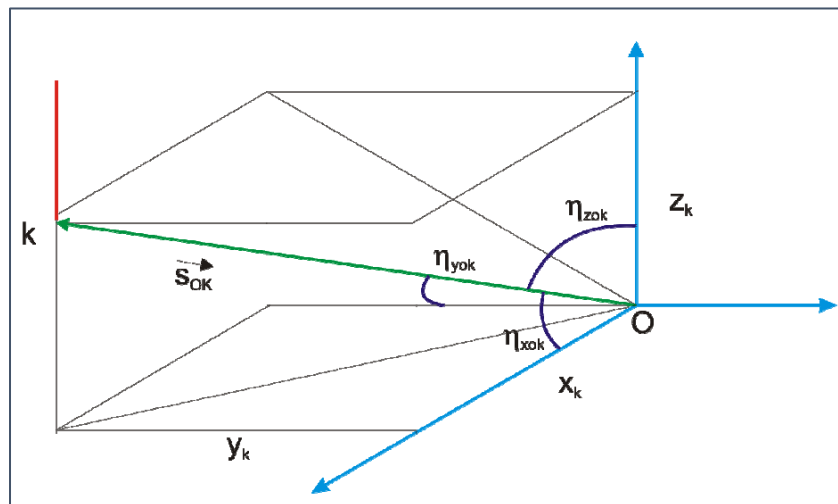


Figura. 3.5 Posición de sensores respecto al sensor 0



A raíz de la suposición anterior, la geometría del sensor y la adquisición de datos, es posible plantear el siguiente sistema de ecuaciones referente a las velocidades medias de cada sensor:

$$\vec{V}_{m_{01}} = \frac{|\vec{S}_{01}|}{\Delta t_{01}} \cdot (\cos n_{x01} \cdot \hat{i} + \cos n_{y01} \cdot \hat{j} + \cos n_{z01} \cdot \hat{k}),$$

$$\vec{V}_{m_{02}} = \frac{|\vec{S}_{02}|}{\Delta t_{02}} \cdot (\cos n_{x02} \cdot \hat{i} + \cos n_{y02} \cdot \hat{j} + \cos n_{z02} \cdot \hat{k}),$$

$$\vec{V}_{m_{03}} = \frac{|\vec{S}_{03}|}{\Delta t_{03}} \cdot (\cos n_{x03} \cdot \hat{i} + \cos n_{y03} \cdot \hat{j} + \cos n_{z03} \cdot \hat{k}),$$

Además, se sabe por la definición de cosenos directores que:

$$\cos^2 n_x + \cos^2 n_y + \cos^2 n_z = 1,$$

donde  $\vec{S}_{0k}$  es la distancia del sensor 0 a uno de los otros sensores  $K=1,2$  o  $3$ ,  $\Delta t_{0k}$  es el tiempo de retraso del sensor 0 al sensor  $k$ ,  $\vec{V}_{m_{0k}}$  es la velocidad media de cada sensor y  $\cos n_{\alpha 0k}$  son los cosenos directores de cada una de las sondas respecto a la sonda 0.

Resolviendo el sistema de ecuaciones y aplicando la regla de Cramer el sistema queda como

$$V_n = \frac{A_0}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}},$$

donde:  $A_0, A_1, A_2$  y  $A_3$  son determinantes

$$A_0 = \begin{vmatrix} \cos n_{x01} & \cos n_{y01} & \cos n_{z01} \\ \cos n_{x02} & \cos n_{y02} & \cos n_{z02} \\ \cos n_{x03} & \cos n_{y03} & \cos n_{z03} \end{vmatrix}$$

$$A_1 = \begin{vmatrix} \frac{t_{01} - t_0}{S_{01}} V_n & \cos n_{y01} & \cos n_{z01} \\ \frac{t_{02} - t_0}{S_{02}} V_n & \cos n_{y02} & \cos n_{z02} \\ \frac{t_{03} - t_0}{S_{03}} V_n & \cos n_{y03} & \cos n_{z03} \end{vmatrix}$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} \cos n_{x01} & \frac{t_{01} - t_0}{S_{01}} V_n & \cos n_{z01} \\ \cos n_{x02} & \frac{t_{02} - t_0}{S_{02}} V_n & \cos n_{z02} \\ \cos n_{x03} & \frac{t_{03} - t_0}{S_{03}} V_n & \cos n_{z03} \end{vmatrix}$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} \cos n_{x01} & \cos n_{y01} & \frac{t_{01} - t_0}{S_{01}} V_n \\ \cos n_{x02} & \cos n_{y02} & \frac{t_{02} - t_0}{S_{02}} V_n \\ \cos n_{x03} & \cos n_{y03} & \frac{t_{03} - t_0}{S_{03}} V_n \end{vmatrix}$$

Se obtienen los valores de la velocidad normal a la superficie de la burbuja en el punto 0 y con él se obtiene la velocidad real de la burbuja con sus tres componentes

$$\vec{V} = \frac{V_n}{\cos n_x} \hat{i} + \frac{V_n}{\cos n_y} \hat{j} + \frac{V_n}{\cos n_z} \hat{k}$$

### 3.4 Análisis de señales

Algunos fenómenos físicos se miden relacionándolos con la electrónica mediante variables que toman la forma de tensión o corriente eléctrica, generalmente se estudian mediante el análisis de las señales que se generan de las entradas y salidas del sistema electrónico.

Las señales generalmente son analógicas y presentan una variación con el tiempo. Esto es que a una variación significativa del tiempo le corresponde una variación igual de significativa en el valor de la señal. También existen las señales digitales las cuales representan una variación discontinua en el tiempo y las cuales solo toman ciertos valores discretos; la señal básica en una onda cuadrada y las representaciones se realizan en el dominio del tiempo. Toda señal variable en el tiempo por complicada que sea se representa en el ámbito de sus valores del espectro de frecuencia, para ello se emplea el análisis de Fourier (Vallenilla 2009).

#### 3.4.1 Análisis de Fourier

Para el análisis de las señales es importante tener conocimiento sobre conceptos como Series de Fourier, Transformada de Fourier y la Transformada Rápida de Fourier, esto con el fin de entender cómo se desarrolla un espectro de señales.

Uno de los grandes avances para el análisis de las señales fueron las **series de Fourier** ya que estableció una ecuación para representar cualquier función periódica como una suma de senos y cosenos

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \right],$$

donde  $a_0$ ,  $a_n$  y  $b_n$  son los coeficientes de Fourier y  $T$  es el periodo.

La **transformada de Fourier** es una herramienta fundamental en el análisis de señales y sistemas continuos, la transformada descompone una función en una combinación lineal de senos y cosenos con diferentes frecuencias y amplitudes (Almeida et al. 2009).

La transformada se realiza cuando el periodo de la función a transformar tiende a infinito, la finalidad es transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de frecuencias. Una ventaja que tiene es que es

reversible. Una vez que la señal está en el dominio de la frecuencia es posible tratarla mediante su espectro de potencia que es particular para cada señal.

En las aplicaciones de ingeniería y tratamiento de señales es más útil considerar el proceso de maneras discreta, ya que en general los sistemas de adquisición no obtienen ni analizan toda la información (Cortés et al 2007).

$$Y(k) = \sum_{j=1}^n X(j)W_n^{(j-1)(k-1)}$$

donde:

$$W_n = e^{(-2\pi i)/n}$$

Para calcular la Transformada Directa de Fourier se requiere resolver la suma de cierta cantidad N de multiplicaciones de números complejos para cada una de las salidas. En total, N<sup>2</sup> multiplicaciones complejas y N(N-1) sumas complejas para una serie de N puntos, es por eso que es recomendable utilizar la Transformada Rápida de Fourier o FFT, por sus siglas en inglés, al utilizar la FFT se obtiene el mismo resultado con la ventaja que el número de operaciones se reduce considerablemente ya que es igual a N\*log(N) (Cortés et al 2007).

### 3.4.2 El análisis espectral

En algunos estudios con registros de medición con ADV donde se analizan las estructuras turbulentas en saltos hidráulicos con bajo número de Froude, menores a 3.3 se aprecia que el subrango inercial de la energía; se marca claramente por la existencia de una pendiente de -5/3 en el espectro de potencia Figura 3.6, sin embargo la turbulencia no es isotrópica ya que las intensidades de turbulencia de las tres componentes de la velocidad no son iguales entre ellas. (Minnan Liu et al. 2004)

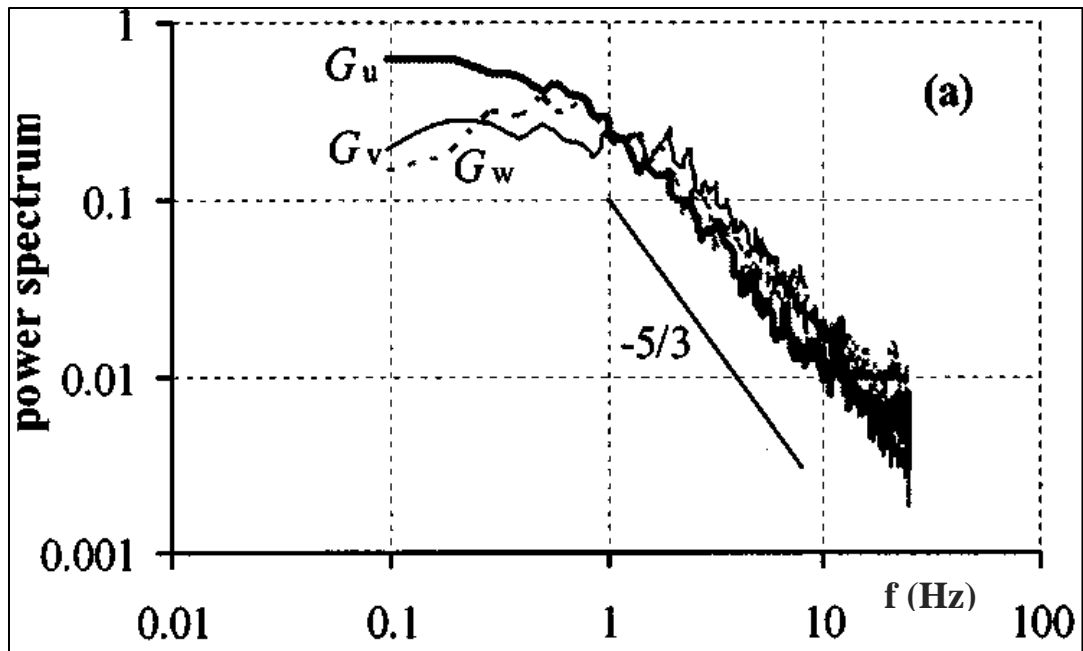
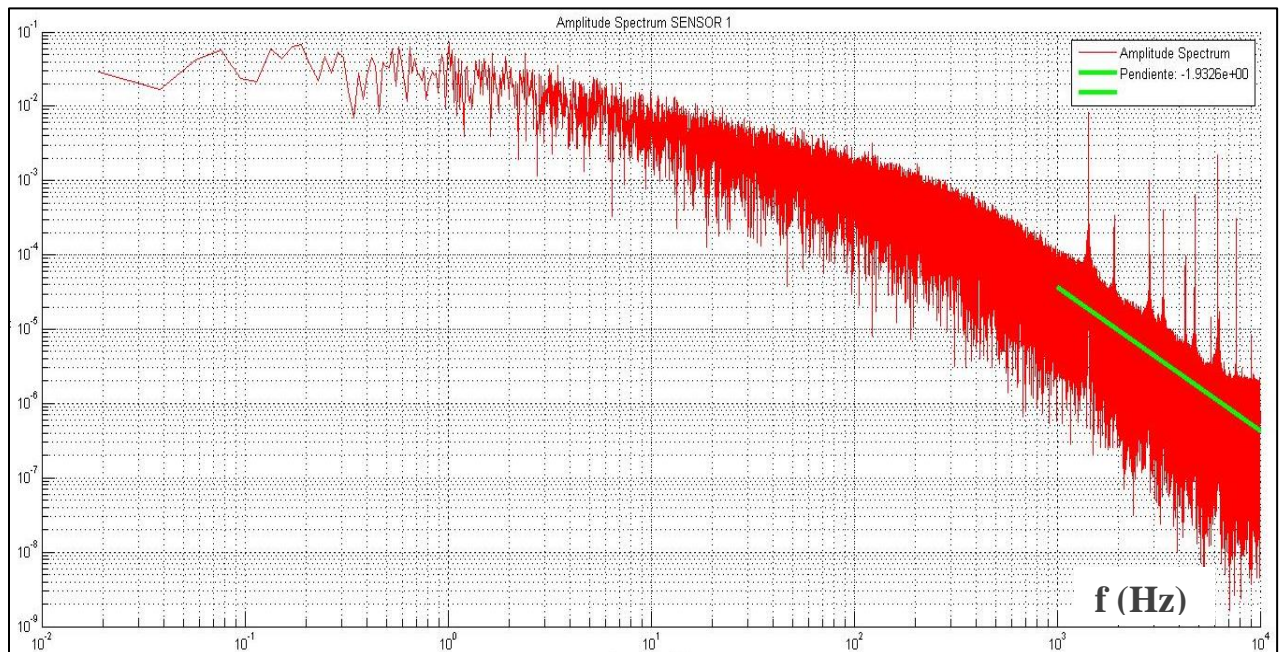


Figura 3.6 Espectro de potencia de la energía en el subrango inercial (Minnan Liu et al. 2004).

El análisis de las pendientes del espectro de potencias se realizó mediante el análisis de las señales registradas con la sonda de conductividad y mediante un programa llamado “Espectros de potencia” (anexo 1) realizado en Matlab. Con las mediciones registradas por cada uno de los sensores se obtuvo la pendiente del espectro en cada punto de medición como se muestra en la Figura 3.7. Determinando así las zonas donde con mayor turbulencia dentro del salto hidráulico.



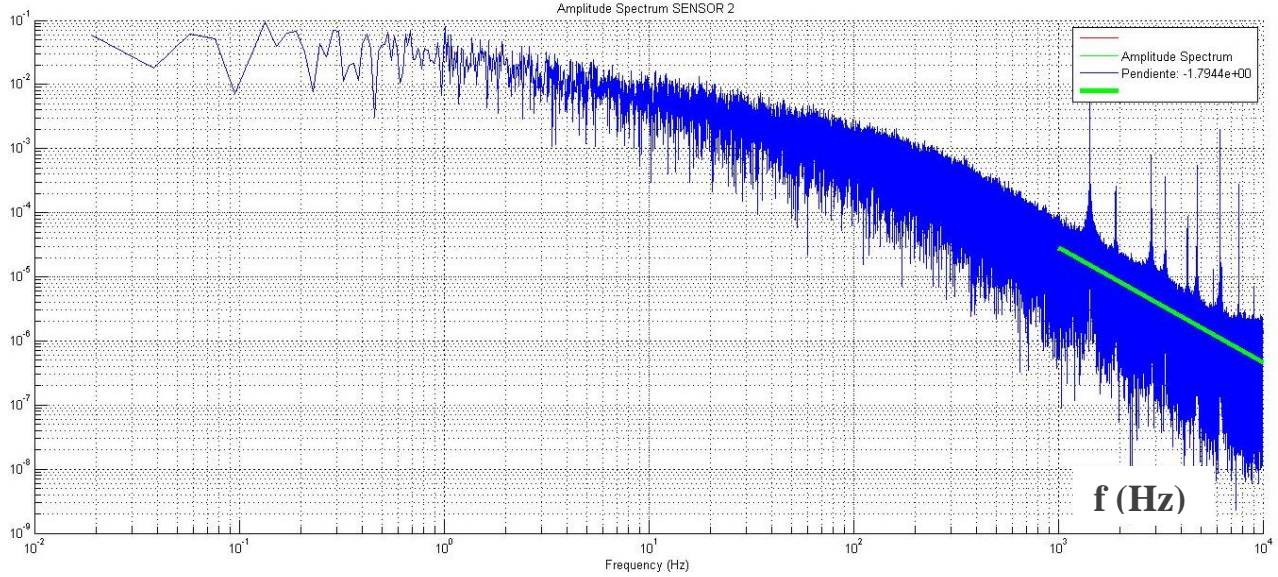


Figura 3.7 pendientes del espectro de potencia

Para un flujo turbulento con un número de Reynolds suficientemente grande el estado isotrópico local se establece en una pequeña región del espectro (Monin and Yaglom 1971). La relación  $G_{uv}(f) = 0$  es consecuencia de la isotropía local donde  $G_{uv}$  es el coespectro de las velocidades  $u'$  y  $v'$ . El coespectro normalizado queda como:

$$R_{uv}(f) = \frac{|G_{uv}(f)|}{|G_u(f)G_v(f)|^{0.5}}$$

Para el cálculo de la turbulencia isotrópica local se utiliza la teoría de Kolmogorov, de acuerdo con ella el espectro unidimensional de la velocidad longitudinal en el subrango inercial se describe como:

$$G_u(k) = A\varepsilon^{2/3}k^{-5/3},$$

donde  $k$  es el número de onda,  $\varepsilon$  es la tasa de disipación y  $A$  es una constante con valor de 0.56 para turbulencia isotrópica inercial. Para transformar el espectro del dominio de la frecuencia al dominio del número de onda se utilizan las siguientes igualdades:

$$k = \frac{2\pi f}{u},$$

$$G_u(k) = \frac{u}{2\pi} G_u(f).$$

Por lo tanto, se relaciona la tasa de disipación de energía con el espectro de potencia en el dominio de la frecuencia mediante la ecuación:

$$G_u(f) = A (2\pi)^{-2/3} u^{2/3} \varepsilon^{2/3} f^{-5/3},$$

donde  $u$  es la velocidad media. Para normalizar es frecuente utilizar la relación

$$\varepsilon b / u_m^3 = f(y/b),$$

donde  $b$  es el tirante donde se encuentra  $0.5u_m$  siendo  $u_m$  la velocidad máxima.

Para un salto hidráulico convencional se compara con la ecuación de la tasa disipación de energía media dada por la ecuación:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\rho g Q \Delta h}{\rho L_j W 0.5(y_1 + y_2)},$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $L_j$  es la longitud del salto hidráulico,  $W$  el ancho del canal,  $\Delta h$  la pérdida de energía en el salto,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $Q$  es el gasto. De experimentos realizados se conoce que la tasa de disipación de energía aumenta si aumenta el número de Froude (Minnan 2004).

### 3.4.3 Turbulencia de flujos bifásicos con sondas de inductancia

Cuando se tienen flujos agua –aire con contenidos de aire mayores al 15%, es factible caracterizar la turbulencia mediante sensores de flujos bifásicos como las sondas de inductancia de dos puntas (Chanson 2013).

La velocidad es medida mediante la sonda de detección de fase, se requiere que las burbujas impacten de manera sucesiva contra ambas puntas. La técnica supone que la sonda está alineada en la dirección del flujo, además considera que las características de la burbuja son ligeramente afectadas por la primera punta, pero de tal manera que no afecten el impacto sobre la segunda (Kucukali and Chanson 2007).

La medición e interpretación de datos en flujos aireados es complicada debido a la presencia de burbujas que se forman en un movimiento tridimensional como un salto hidráulico y los estudios realizados en este sentido son pocos; se ha logrado caracterizar con sondas de conductividad el contenido de aire, la distribución de velocidad interfacial y con ellas la tasa de atrapamiento de aire (Wang y Chanson 2013).

Adicionalmente se han realizado estudios bidimensionales para conocer características del flujo bifásico en saltos hidráulicos como el agrupamiento de las burbujas de aire (Wang y Chanson 2015) y actualmente, se comienza a intentar la caracterización del campo de velocidades tridimensional, mediante la implementación de 4 sensores colocados de una manera específica que permitan cuantificar la velocidad transversal y las fluctuaciones de velocidad en flujos con números de Froude de 7.5 y Re de  $6 \times 10^4$  (Wang y Chanson 2019).

En un flujo en estado estacionario, altamente turbulento y con gran contenido de aire el contenido de aire  $C$  es la media aritmética del contenido de aire instantáneo, la detección sucesiva del paso de una burbuja por ambas sondas es altamente improbable por lo que es común utilizar la correlación cruzada para estimar la velocidad, la cual se deduce de la función de correlación cruzada entre las señales de las dos puntas mediante la siguiente ecuación.

$$V = \frac{\Delta x}{T}.$$

donde  $\Delta x$  es la distancia entre las puntas,  $T$  es el tiempo en el cual la correlación cruzada entre las señales es máxima o el *average air-water interfacial travel time*  $(R_{xy})_{max}$  como se muestra en la Figura 3.8. Con las funciones de autocorrelación y correlación cruzada se obtienen características importantes del campo de turbulencia como las escalas de tiempo integrales  $T_{xx}$  y  $T_{xy}$ , además de la intensidad turbulenta mediante la ecuación (Felder y Chanson 2012):

$$T_u = \frac{v'}{V} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}T} \sqrt{\left(\frac{T_{xy}}{(R_{xy})_{max}}\right)^2 - T_{xx}^2}$$

Si la función de correlación cruzada es una distribución Gaussiana se define  $\tau_{0.5}$  como la escala de tiempo en donde  $R_{xy}(t + \tau_{0.5}) = R_{xy}(t)/2$  y  $T_{0.5}$  es el tiempo característico donde la función normalizada de la autocorrelación es igual a 0.5 (figura 2), entonces la ecuación anterior se simplifica (Chanson y Toombes 2002), de la siguiente manera:

$$\frac{v'}{V} = 0.851 \frac{\sqrt{\tau_{0.5}^2 - T_{0.5}^2}}{T}$$

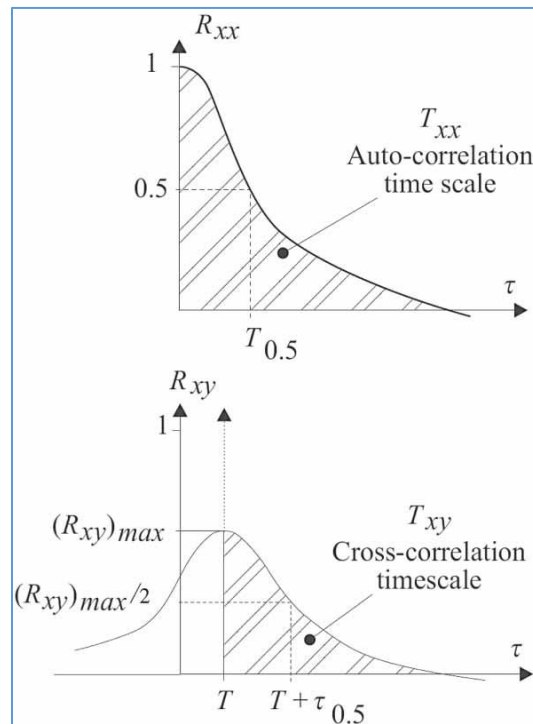


Figura 3.8 Funciones de autocorrelación y correlación cruzada

$T_u$  es un número adimensional que representa la escala de velocidad turbulenta que es una característica de las fluctuaciones de velocidad interfacial sobre la distancia  $\Delta x$  la cual es la separación entre las puntas

del sensor. Aunque  $T_u$  no es exactamente igual a las fluctuaciones de velocidad turbulenta si brinda información del nivel de turbulencia en flujos aire agua (Kucukali and Chanson 2007).

Cuando no es posible encontrar la relación entre dos series variables en el tiempo con métodos paramétricos del coeficiente de correlación lineal como el de Pearson, no paramétricos de Spearman o el de Mann-Kendall, se aplica la correlación cruzada ya que es posible que se presenten asociaciones entre las series.

La correlación cruzada es la correlación entre una serie de tiempo  $X_t$  en un tiempo dado,  $t$ , con otra serie en un tiempo posterior,  $Y_{t+k}$ . Lo que se expresa como la media de los productos de las series  $X_t$  y  $Y_t$  normalizadas, desfasadas en 1, 2, (N-1) lags (retrasos) (Guevara 2014).

$$r_{XY(k)} = \frac{\sum[(X_t - \mu_x)(Y_{t+k} - \mu_y)]}{NS_x S_y} = \frac{1}{N} \sum \left[ \left( \frac{X_t - \mu_x}{S_x} \right) \left( \frac{Y_{t+k} - \mu_y}{S_y} \right) \right] \text{ en lag } +$$

$$r_{YX(-k)} = \frac{\sum[(Y_t - \mu_y)(X_{t+k} - \mu_x)]}{NS_x S_y} = \frac{1}{N} \sum \left[ \left( \frac{Y_t - \mu_y}{S_y} \right) \left( \frac{X_{t+k} - \mu_x}{S_x} \right) \right] \text{ en lag } - ,$$

donde:

- $X_t, X_{t+k}$ , es el valor de un dato en el tiempo  $t$ , y el dato en la serie  $k$  en la serie independiente y estacionaria.
- $Y_t, Y_{t+k}$ , es el valor de un dato en el tiempo  $t$ , y el dato en la serie  $k$  en la serie dependiente y estacionaria.
- $S_x$  y  $S_y$  es la desviación estándar poblacional de las series  $X_t$  y  $Y_t$ , respectivamente.
- $N$  es el número de datos de las series  $X_t$  y  $Y_t$ .
- $\mu_x$  y  $\mu_y$  son las medias de las series  $X_t$  y  $Y_t$ .
- $k$  es el *retardo* (lag) entre una observación en tiempo y otra en un tiempo posterior o anterior.
- $N, S_x, S_y, \mu_x$  y  $\mu_y$  Corresponden a la serie de lag cero y se mantienen constantes en los demás lags.

La forma de la función de correlación brinda información de las fluctuaciones de la velocidad turbulenta. Si la función es plana se asocia con grandes fluctuaciones de velocidad, así como con una fuerte intensidad turbulenta; una curva de correlación esbelta caracteriza pequeñas fluctuaciones de la velocidad turbulenta (Gonzales et al. 2005).

Para el análisis de las señales obtenidas para este estudio se obtuvo la autocorrelación y la correlación cruzada de cada punto de medición, los cuales se procesaron con el programa “Índice de *Índice de Turbulencia*” realizado en Matlab (anexo 1), donde se obtuvieron los parámetros de la autocorrelación y correlación cruzada necesarios para calcular la intensidad turbulenta como se muestra en la Figura 3.9



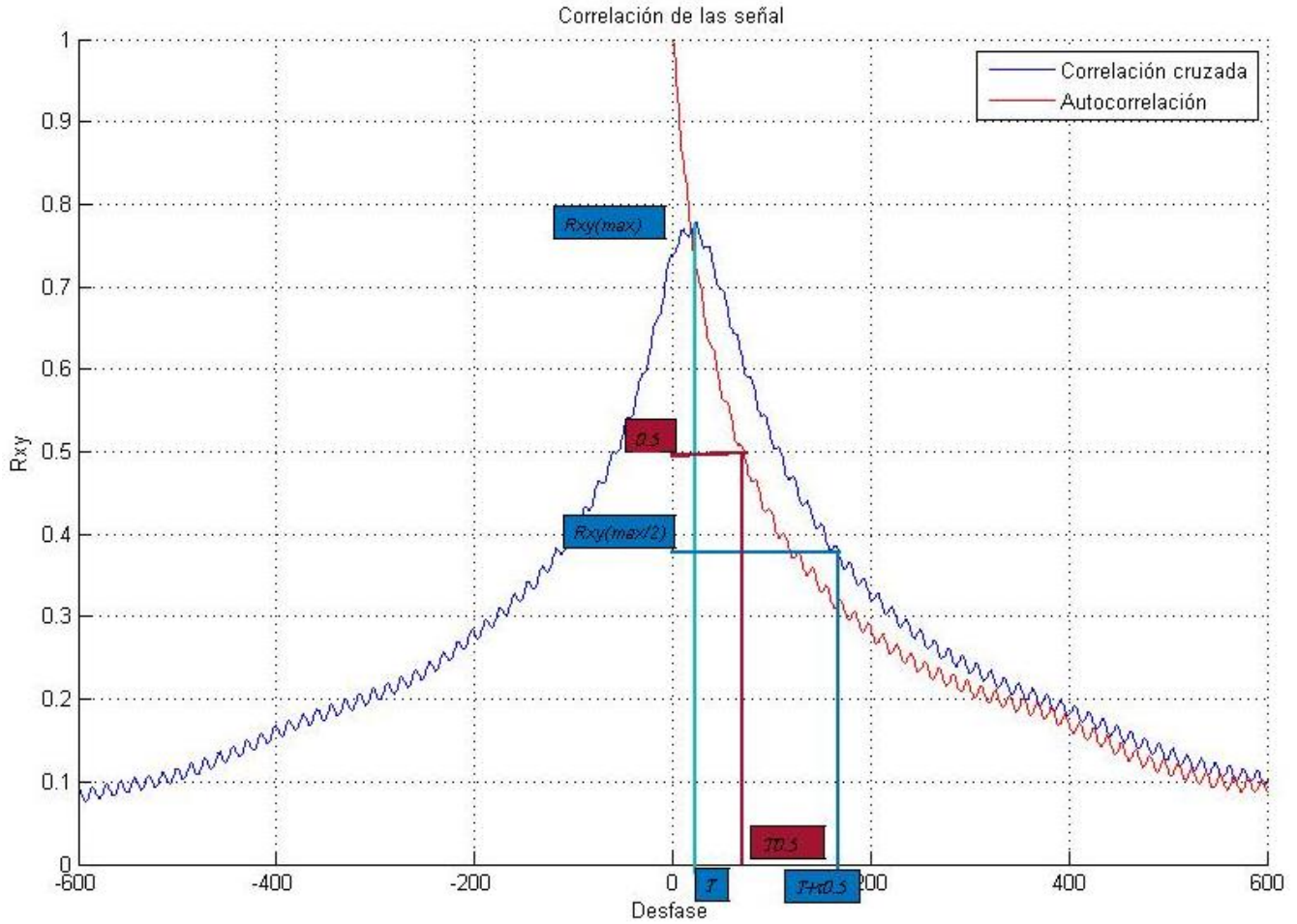


Figura 3.9 Análisis de Intensidad Turbulenta

Si se elabora una sonda con una punta colocada al lado de la otra (Figura 3.10) de la misma longitud con una separación de  $\Delta Z$  en la dirección transversal al flujo y se tienen lecturas simultáneas, entonces mediante el análisis de las señales de correlación cruzada normalizada  $R_{xz}$  y autocorrelación  $R_{xx}$  se obtienen las escalas integrales de tiempo  $T_{xx}$  y  $T_{xy}$  las cuales se presentan en las siguientes ecuaciones

$$T_{xx} = \int_{\tau}^{\tau=\tau(R_{xx}=0)} R_{xx}(\tau) d\tau,$$

$$T_{xz} = \int_{\tau=\tau(R_{xz}=(R_{xz})_{\max})}^{\tau=\tau(R_{xx}=0)} R_{xx}(\tau) d\tau,$$

donde  $R_{xx}$  es la función de autocorrelación normalizada,  $\tau$  es el retardo del tiempo y  $R_{xz}$  es la función de correlación cruzada entre ambas puntas.

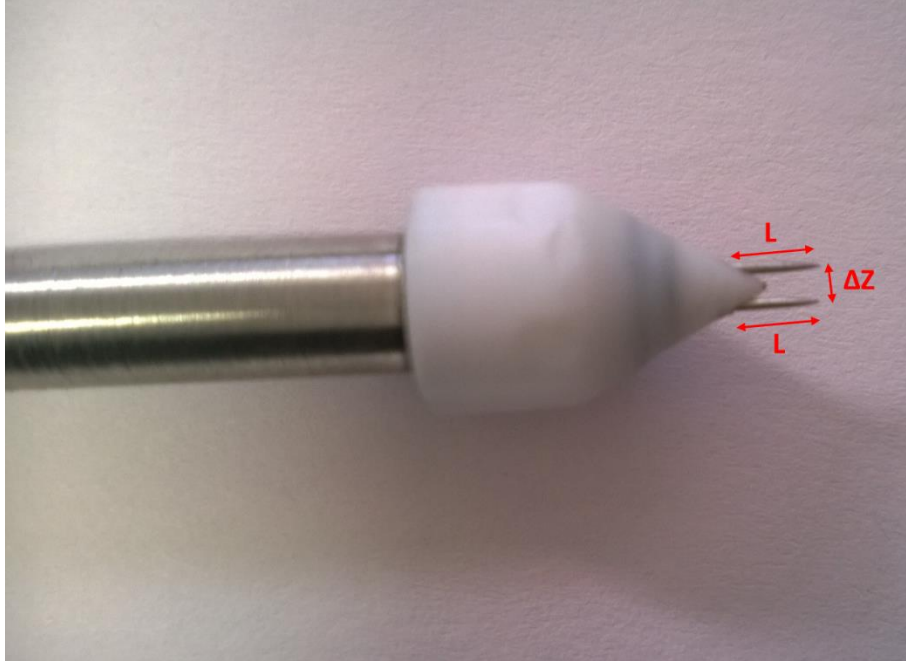


Figura 3.10 Sonda con puntas de la misma longitud

Cuando los experimentos se repiten bajo las mismas condiciones y se realiza con distintos valores de  $\Delta Z$  la escala de longitud característica se calcula como:

$$Z = \int_{Z=0}^{Z=Z((R_{xy})_{max}=0)} (R_{xz})_{max} dz .$$

La escala de longitud transversal  $Z$  es función de las condiciones iniciales del flujo y de la posición en que se encuentre. La escala de longitud  $Z$  representa la escala de longitud transversal de las estructuras de vórtice en el salto hidráulico. (Chanson 2007)

## 4 Instrumentación

Para determinar el contenido de aire se decidió construir una sonda de conductividad por ser un instrumento accesible de fabricar, cuyo principio ha sido utilizado desde hace tiempo por diferentes autores Cain (1981), Chanson (1988), Frizell (1994), además de ser utilizada para medir velocidades en flujos bifásicos Matos et al (2002).

Las sondas de conductividad se han empleado desde los años sesenta con diferentes propósitos de medición, como ha sido la detección de la concentración de aire, la frecuencia de las burbujas y su tamaño. Se ha obtenido resultados confiables para un sistema mercurio-nitrógeno (Neal et al 1963) y se han perfeccionado y utilizado en gran número de investigaciones.

Con la implementación de una sonda de conductividad, de esta manera es factible medir contenido de aire, velocidad de la burbuja, distribución del número de burbujas, concentración del área interfacial, tamaño de la burbuja (Chanson 2013) y en algunos casos se estima la velocidad de la burbuja en dos (Yang et al 2009) y tres direcciones (Shen et al 2005).

Recientemente se determinó que existe una relación directa de la forma de la densidad del espectro de potencias con el número y tamaño de las burbujas reflejando que en los rangos de alta frecuencia del espectro interfieren las burbujas de tamaño pequeño y en los rangos de baja frecuencia se representan tanto las burbujas grandes y pequeñas y las interacciones con burbujas de mayor tamaño se representa como  $1/f^2$  (Zhang et al 2019).

La sonda que se fabricó en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se conforma de dos sensores construidos de agujas de 0.8 mm de diámetro instalados dentro de un cuerpo cilíndrico de acero inoxidable que facilita la realización de las mediciones ya que proporciona rigidez al instrumento.

Por los sensores circula una corriente eléctrica la cual muestra variaciones dependiendo de la conductividad eléctrica del medio en que se encuentren inmersos, en este caso se cuenta con una diferencia entre la conductividad de dos medios que son el agua con una conductividad de 5 ms/s y la del aire la cual es casi nula, por lo que en las mediciones se generan caídas e incrementos de tensión lo cual se asocia al paso de una burbuja de aire a través del sensor.

Una ventaja de utilizar este tipo de instrumentación se debe a la facilidad de reparación en caso de alguna falla, ya que los insumos tanto para la fabricación del sensor como las componentes electrónicas que lo conforman son económicas y de fácil adquisición. Además permiten contar con datos fiables para el cálculo del contenido de aire. La sonda utilizada se muestra en la Figura 4.1.



*Figura 4.1 Sonda de medición*

El dispositivo implementado mide el contenido de aire mediante la generación de una señal de corriente alterna tipo sinusoidal con baja distorsión y amplitud constante mediante un circuito electrónico basado en el oscilador de Wien.

El generador de onda sinusoidal se acopla a un amplificador operacional para elevar el valor de la tensión, donde a su vez se cuenta con transformadores para obtener aislamiento galvánico siendo en ellos donde se conectaron los sensores de medición y con la implementación de una resistencia se determinan las variaciones de tensión para cada sensor.

La señal que se obtiene de la sonda pasa por un rectificador, para posteriormente ser capturada por un conversor AD7 que manda la señal digital a una computadora para un postprocesamiento. La tarjeta de adquisición de datos empleada permite capturar hasta 40000 muestras por segundo, pero dicha frecuencia se divide entre el número de sensores instalados.

#### **4.1 Calibración**

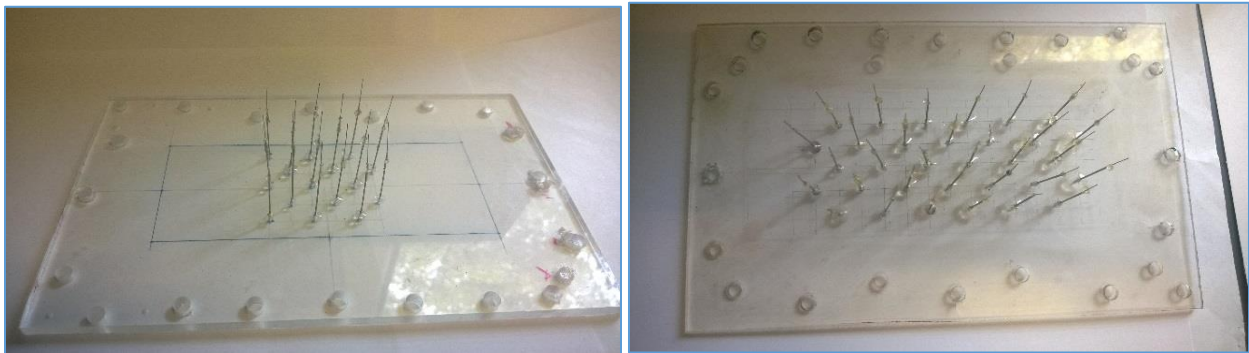
Como una prueba inicial para validar su funcionamiento y comprobar que la sonda estuviera midiendo la cantidad de aire correcta, se decidió fabricar una sonda con cuatro sensores y construir un dispositivo de calibración (Figura 4.2). Este último consiste en una cámara de burbujas, donde se conocía con certeza el volumen de agua inicial, la cual estaba conectada a un tanque de aire comprimido para ingresar una cantidad de aire controlada específica, con la finalidad es obtener la diferencia de volumen antes del ingreso de aire y después del ingreso del mismo. Dicha diferencia de volumen tendría que corresponder con el volumen registrado por la sonda.



*Figura 4.2 Configuración de la cámara de burbujas y sonda de cuatro sensores*

La cámara de burbujas se construyó en acrílico de 6 mm de espesor, con una sección rectangular de 0.06 por 0.15 (m) y una altura de 1.2 (m). Para generar burbujas se ensamblaron tubos capilares de 13G y 30G que corresponden a 0.72 (mm) y 0.226 (mm) respectivamente (Figura 4.3).

Fue necesario realizar el cambio de diámetro con la finalidad de generar una caída de presión y lograr que con el paso de aire se generen burbujas.



*Figura 4.3 Configuración del dispositivo de generación de burbujas 32 y 15 capilares*

Para realizar una distribución uniforme de las burbujas dentro de la cámara se realizaron varias configuraciones de tubos capilares observando que debido a que la cámara es lo suficientemente alta la distribución de aire en la sección final es homogénea, por lo que es posible determinar el volumen de aire ingresado a la cámara (Figura 4.4).



*Figura 4.4 Cámara de burbujas con diferente contenido de aire*

Una vez que se introduce el aire y se establece un nivel final se coloca la sonda para hacer la comparativa del contenido de aire. En esta primera calibración se observó que la sonda estaba sobreestimando el gasto de aire en un 8-15%, por lo que fue necesario realizar ajustes en la electrónica para disminuir la diferencia.

Posteriormente y con los ajustes realizados a la electrónica se comprobó la respuesta de la sonda con una cámara de alta velocidad con la finalidad de conocer el tiempo de respuesta de la sonda.

Las fotografías para este tipo de análisis fueron tomadas mediante una cámara de alta velocidad modelo IL4 de la marca FASTEC (Figura 4.5). la cual cuenta con una resolución de 1280 x1024 CMOS y es capaz de tomar 510 fotografías por segundo. Además, cuenta con una memoria regrabable que, permite seleccionar las fotografías del fenómeno solo de la sección de interés.



*Figura 4.5 Cámara de alta velocidad FASTEC*

Se realizó una prueba para determinar el retraso que tiene la sonda ante el paso de una burbuja y el tiempo que tarda en registrarlo, la prueba consistió en una serie de fotografías a una frecuencia de 500 (Hz); grabando en una misma toma la cámara de burbujas con la sonda midiendo y la pantalla del software del programa de detección de burbujas.

Al analizar las fotografías consecutivas se observa el momento en que se genera el contacto de la burbuja con la sonda y posteriormente se observa el origen de la señal en el display de la computadora. Al contar las fotografías entre que la burbuja choca con la sonda y aparece en el software y conociendo la frecuencia de muestreo se conoce el tiempo de retraso de la sonda.

El tiempo de retraso fue en promedio 0.082 (s) posterior al impacto lo cual es bastante aceptable para este tipo de dispositivos. En la Figura 4.6, se observa una burbuja impactando contra la sonda, 41 fotografías después aparecen la señal registrada por tres de los 4 sensores.

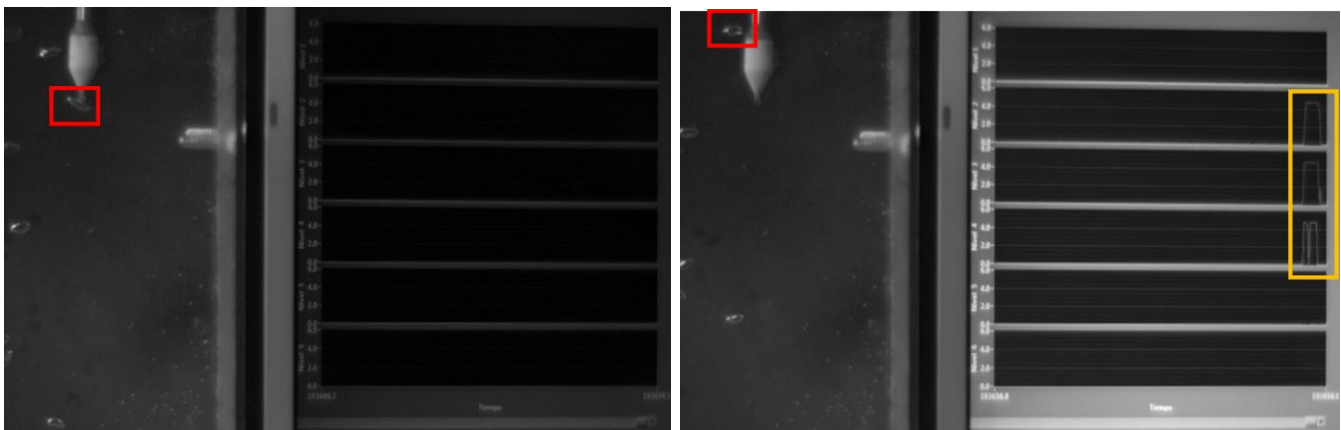


Figura 4.6 Retraso en la señal al detectar una burbuja

## 4.2 Postprocesamiento

Para el postprocesamiento de las señales se utilizó la técnica de umbrales adaptables, donde mediante una señal se encienden alarmas al cruzar un umbral superior o inferior. El objetivo de esta técnica es hacer que los umbrales se adapten a las dinámicas del proceso que se refleja en la señal, esto para evitar falsas alarmas. Ya que ciertas variaciones del proceso se confunden con eventos anormales que hagan que la señal cruce umbrales que de tener un nivel estático serían considerados como una lectura errónea lo cual puede ser una equivocación.

Esta técnica, normalmente utilizada para detectar fallas en procesos, resultó útil para cuantificar, de manera precisa, el contenido de aire a partir de las señales proporcionadas por las sondas de conductividad, ya que la técnica consiste en elaborar un umbral adaptable, que al ser superado por la señal de la dinámica del fenómeno estudiado se cuantifique como una discontinuidad en el flujo lo que se considera como aire. La ventaja de tener este umbral adaptable con respecto a uno estático es elaborar un umbral que se comporte como las variaciones propias de las señales de las sondas.

Para el análisis de las señales se trabajó con un método modificado al propuesto por Sherman (2006). La Figura 4.7 muestra el diagrama de bloques del generador del umbral que se utilizó. La entrada del

generador es la señal de voltaje proporcionada por la sonda, la cual es representada por el vector  $u$ . Para la calibración del generador del umbral, primero se acota la señal en un rango inferior a 0.5 volts y uno superior a 5 volts con el propósito de eliminar las señales que se encuentren fuera de rango, posteriormente la señal pasa por un filtro paso bajas que solo deja pasar valores por debajo de la frecuencia de 30 (rad/s); consecutivo al filtro se obtiene el valor absoluto y se le suma la constante  $c_1$  con un valor de 0.085. Un mayor detalle de la construcción del umbral adaptable se encuentra en Höfling (1996) e Iserman (2006).

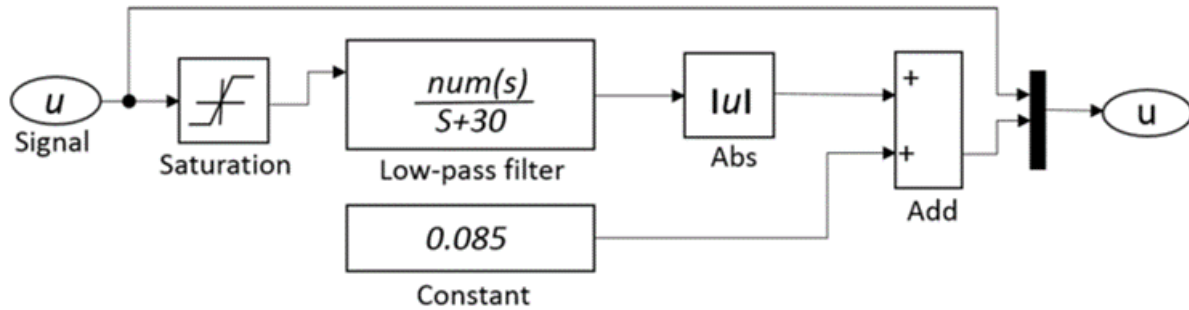


Figura 4.7 Diagrama de bloques para el procesamiento de señales

La Figura 4.8 muestra el comportamiento del umbral adaptable debido al cambio de fase dado que los sensores tienen la misma longitud se registran señales similares. La figura muestra un intervalo entre los 23.2 y 25.2 (s) donde se observa la respuesta del sensor ante el cambio de fase y derivado de que las dos puntas están muy cerca entre ellas una señal es casi el reflejo de la otra.

Se apreció un voltaje base cuando el sensor está en contacto con el agua el cual era cercano a 3.5 volts para el sensor 1 y 3.3 volts para el sensor 2. Además se observó que el ruido de la señal fue del orden de 0.1 volt por lo que se determinó de una manera confiable el cambio de fase.



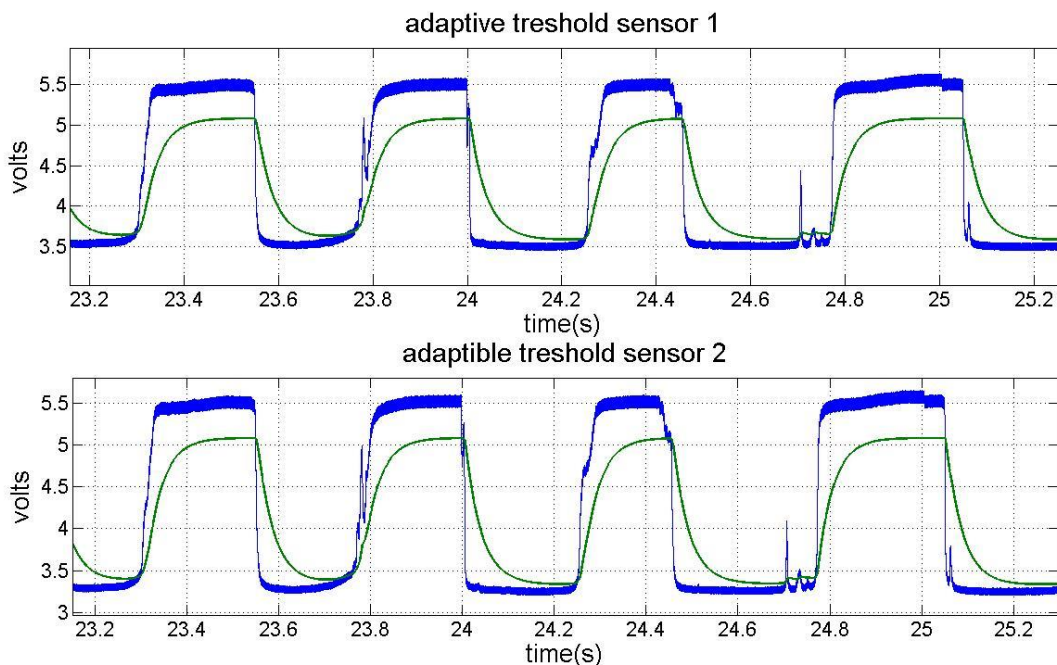


Figura 4.8 Umbral adaptable

Se realizó una prueba de sensibilidad con la finalidad de determinar el valor del chut-off el cual se introduce en el filtro paso-bajas del ensamble presentado, con la idea de definir el umbral que se emplea en el cálculo del contenido de aire. Para ello se obtuvo el contenido de aire de una misma prueba proponiendo diferentes valores del chut-off, posteriormente se analizaron las señales y se determinó el valor a utilizar.

Los resultados encontrados muestran en Figura 4.9, donde se aprecia que el contenido de aire máximo se presenta para el valor de  $30 \text{ rad/s}$ , el cual es de 0.692 y se cuenta con un valor mínimo de 0.679 para un valor del chut-off de  $10 \text{ rad/s}$ , por lo que se obtiene una diferencia de 1.9% entre el contenido de aire máximo y mínimo para una muestra con contenido de aire bajo.

Analizando las señales se observó que las diferencias entre el contenido de aire máximo y mínimo son más grandes para muestras donde el contenido de aire es mayor de 0.4. En la Figura 4.10 se observa que si se utilizan valores bajos del chut-off como  $10 \text{ rad/s}$  se tiene una señal del umbral plana a la cual no le es posible registrar las variaciones rápidas del cambio de fase por lo que se presenta una subestimación del contenido de aire, por el contrario para valores del chut-off de 50 y de  $100 \text{ rad/s}$  se observa que el umbral se apega al comportamiento de la señal mucho más de cerca, pero se tienen contenidos de aire nuevamente menores, lo que se debe a que cuando la sonda se encuentra registrando solo agua.

Cuando la sonda detecta la presencia de una burbuja de aire, el voltaje se incrementa detectando el cambio de fase pero en un punto comienza a disminuir el voltaje lo que se interpretaría que la burbuja está saliendo de la zona de detección, pero antes de llegar al voltaje del que partió, donde claramente se interpreta como agua, vuelve a aumentar el valor lo que representa que ingresó una burbuja antes de que se registrara la salida de la anterior, esta situación no se debe de contabilizar como un cambio de fase, por lo que valores de chut-off de  $50 \text{ rad/s}$  o mayores están subestimando el contenido de aire.

Derivado de este análisis se determinó tomar el valor del chut-off de  $30 \text{ rad/sya}$  que con él se presenta un umbral que se apega adecuadamente a la señal original y no cuantifica un cambio de fase ante la presencia de burbujas consecutivas.

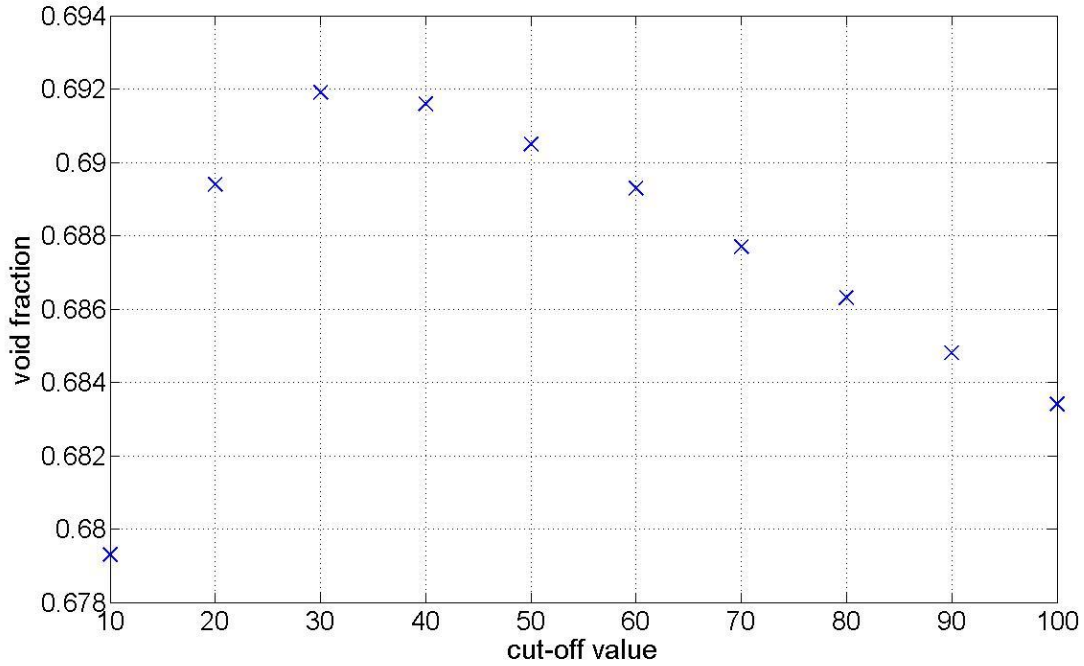


Figura 4.9 Variación del contenido de aire con diferentes valores de chut-off

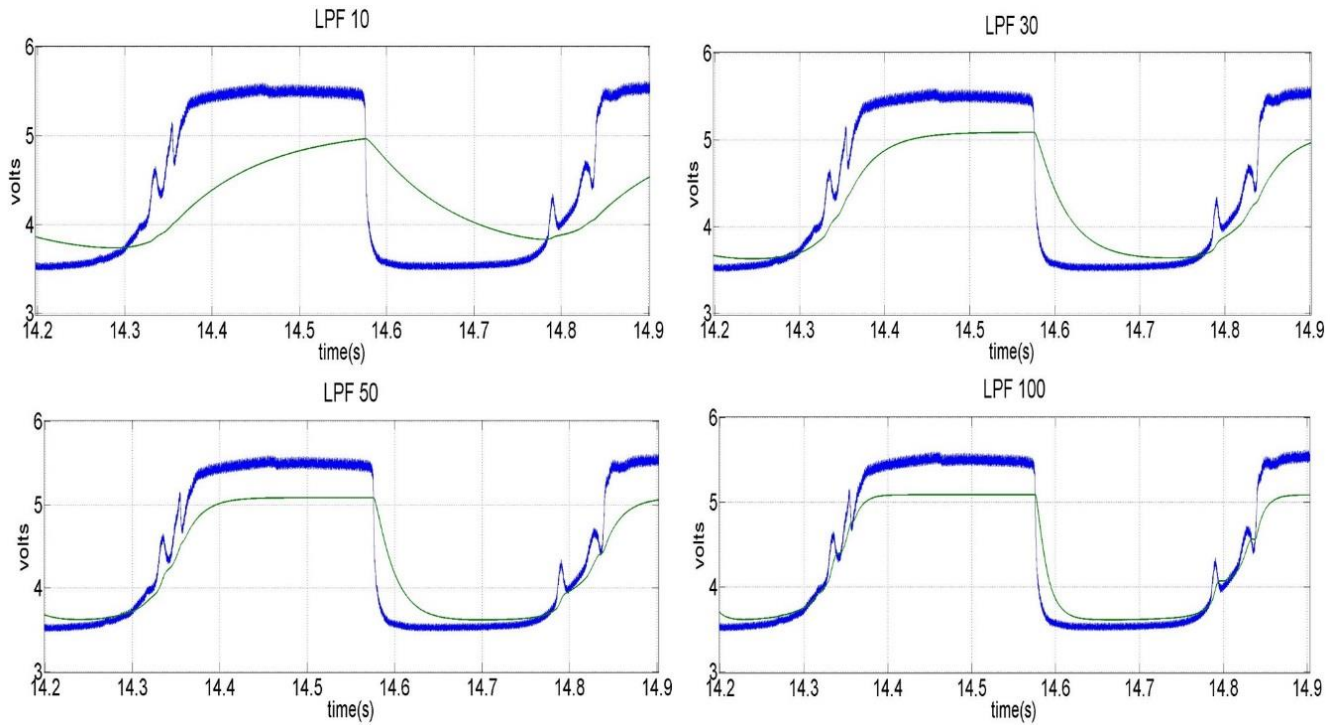


Figura 4.10 Comportamiento del umbral adaptable con diferentes valores de chut-Off

Otro valor que interviene para definir el umbral es la constante  $c_1$ , para calibrar esta constante se analizó la misma señal con diferentes valores de ella.

Se utilizó una señal con contenido de aire de 0.019, dado que para los contenidos de aire bajos, menores del 0.2, la señal de cambio de fase es muy similar Figura 4.11.

Si se utiliza una constante de 0.04 se observa que se presenta una sobreestimación del contenido de aire ya que el umbral no sobrepasa el ruido de la señal, el cual presenta un valor de 0.1 volt; con un valor de 0.14 se presenta un umbral alejado de la señal original, donde se observa que hay incrementos en la señal los cuales debido a la fluctuación si representan un cambio de fase, pero dado que el umbral está muy alejado no lo considera en la cuantificación por lo que se subestima el contenido de aire.

Derivado de esto se utilizó un valor de la constante de 0.085, con este valor se presenta un umbral por arriba del ruido de la señal y cuando aumenta la señal lo detecta como un cambio de fase por lo que se consideró un valor adecuado para cuantificar el cambio de fase.

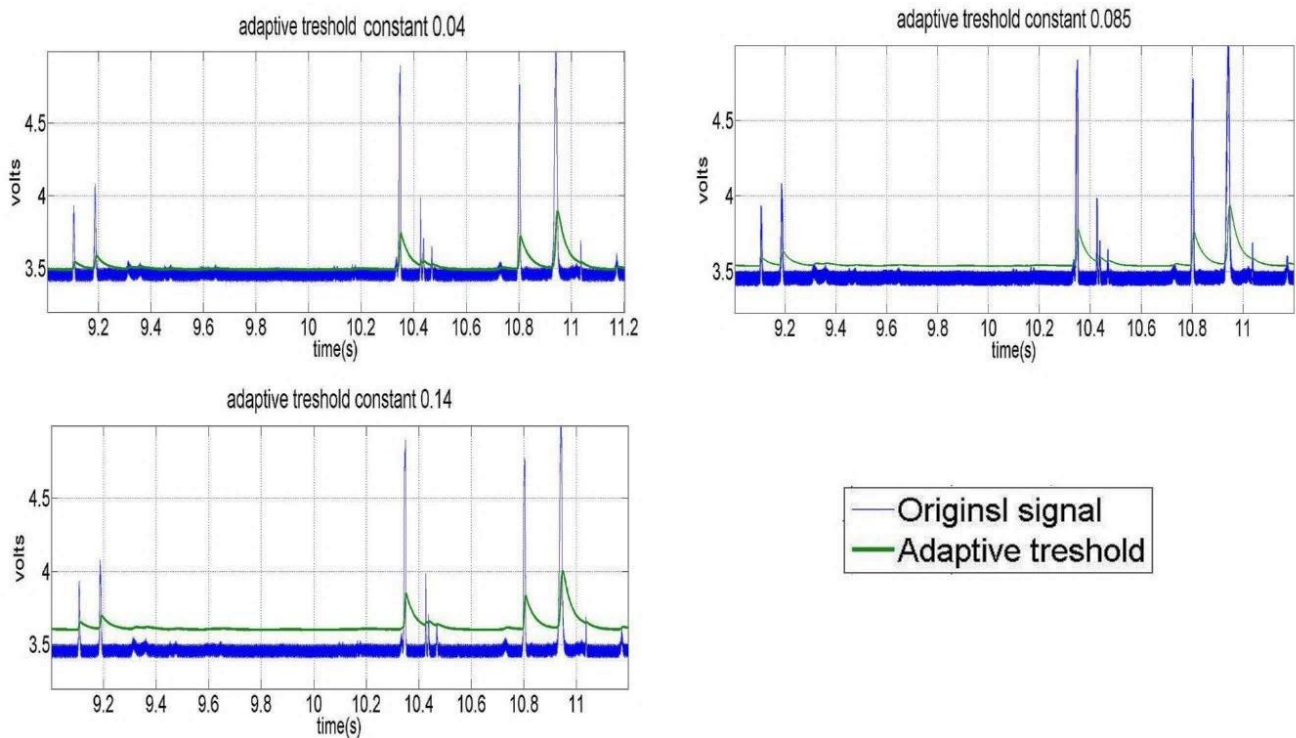


Figura 4.11 Comparación con diferentes valores de constante  $c_1$

Como una prueba adicional para calibrar las sondas y el procesamiento de la señal se sometió a condiciones de flujo en movimiento para tratar de reproducir el fenómeno que se busca estudiar y para comprobar la fiabilidad de los datos obtenidos, se decidió tomar un registro en un modelo de un tanque

amortiguador, mediante el registro del contenido de aire en un salto hidráulico escala 1:30 construido siguiendo las leyes de similitud de Froude.

Al inicio del salto se contaba con un tirante en régimen supercrítico de  $h = 0.036$  (m) y un número de Froude de 3.7. Se midió el contenido de aire a una distancia de  $x/h = 8.7$ , siendo  $x$  la distancia al inicio del salto hidráulico.

Las mediciones se realizaron al centro de un canal de 0.43 (m), donde se obtuvo el perfil del contenido de aire desde la plantilla hasta la superficie libre del agua tomando registro cada centímetro.

Los resultados registrados con la sonda de conductividad se compararon con la gráfica presentada por Murzyn (et al 2004), donde se presenta el comportamiento típico de las mediciones de contenido de aire en saltos hidráulicos con números de Froude de 2, 2.4, 3.7 y 4.8 y muestran el comportamiento en la región inferior y en la superior del salto. En la Figura 4.12 se presentan los datos de Murzyn para un número de Froude de 2.4 y una distancia del origen del salto de  $x/h = 8.7$ , la cual se comparó con los datos obtenidos en el modelo escala 1:30.

Como se observa en la Figura 4.12 se cuenta con un comportamiento muy similar al reportado por Murzyn donde la diferencia principal de presenta en la zona baja del salto hidráulico presentando la misma tendencia pero con valores más altos para los datos medidos lo cual se supone lógico, derivado de que se trabajó con un número de Froude mayor.

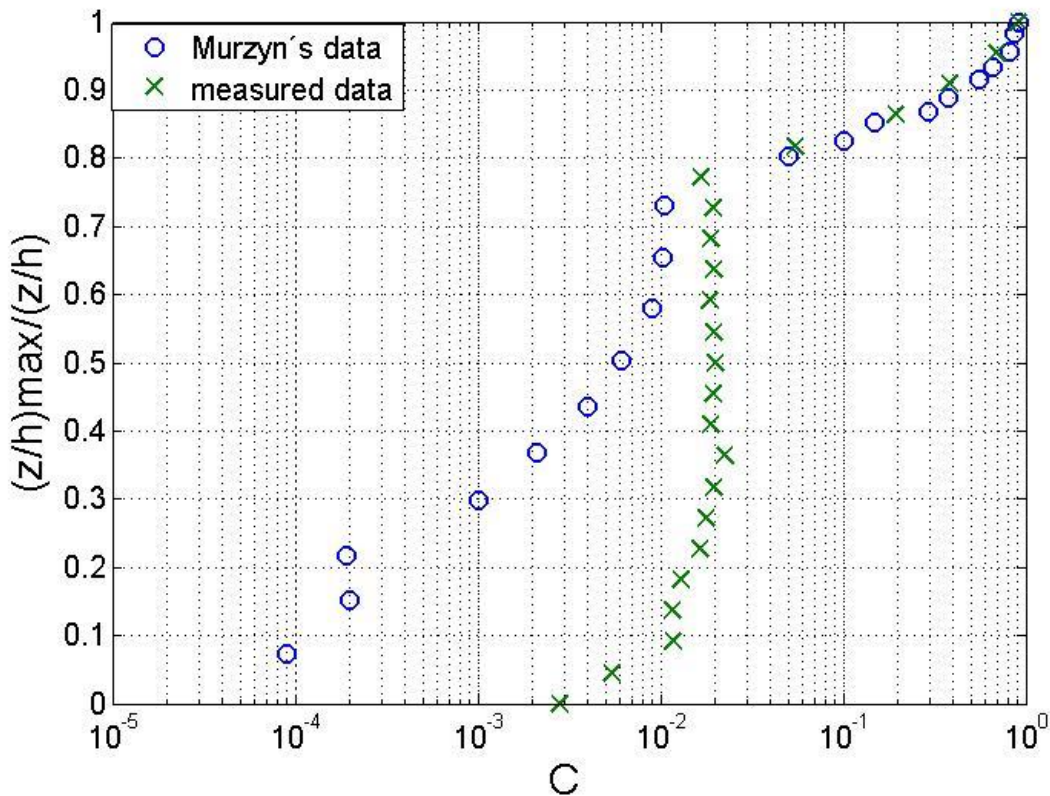


Figura 4.12 Comparación de mediciones de contenido de aire en un salto hidráulico

### *4.3 Análisis de contenido de aire*

Como prueba final antes de realizar las mediciones con esta técnica para cumplir con uno de los objetivos principal de la presente tesis, se registró el perfil del contenido de aire en un flujo en el modelo físico del vertedor de una presa con escala 1:21 con velocidades cercanas a 7 (m/s).

La finalidad de las pruebas realizadas fue determinar cómo afecta la presencia de una pila central y la formación de la estela de agua blanca posterior a ella en la modificación del contenido de aire a lo largo y ancho del vertedor.

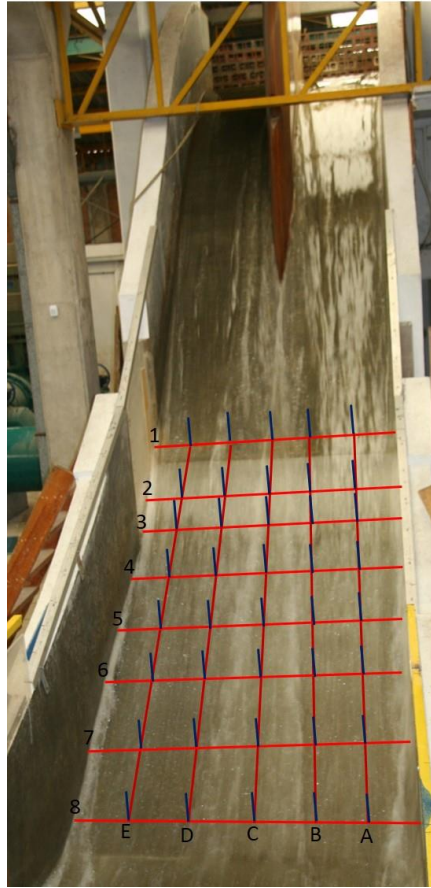
Para ello se analizaron los gastos, en el modelo físico, de 500 (l/s), 1000 (l/s) y 1500 (l/s) correspondientes en prototipo a 1010.4 (m<sup>3</sup>/s), 2020.9 (m<sup>3</sup>/s) y 3031.4 (m<sup>3</sup>/s) respectivamente.

Las mediciones se realizaron en los mismos puntos para los tres gastos, para ello se dividió el vertedor en 8 secciones transversales, la primera sección se ubica 0.13 (m) aguas arriba del aireador y la última sección 2.4 (m) después del aireador; adicionalmente se tienen 5 secciones longitudinales, donde la sección A es la más cercana a la margen izquierda y la sección E la más cercana a la margen derecha. Las secciones son equidistantes entre ellas por lo que su separación es de 0.285 (m).

Con las divisiones propuestas se tomó la primera lectura lo más cercana a la plantilla, que debido a la propia instrumentación está entre 0.002-0.003 (m). Posteriormente se tomó lectura cada 0.01 (m) hasta registrar un contenido de aire menor a 0.9 (m). Siendo 0 un registro con la presencia solo de líquido y 1 un registro solo con la presencia de aire.

Dada la configuración de la sonda utilizada, que consistía de dos puntas de la misma longitud, se tienen dos registros en cada punto de medición, obteniéndose el promedio para determinar el valor de concentración de aire. Se obtuvieron un total de 1036 puntos; medidos a una frecuencia de 20000 (Hz), para cada punta; el tiempo de registro fue aproximadamente de 40 (s) por lo que para los tres gastos ensayados se tienen un total de  $1,657.6 \times 10^6$  datos.

Un esquema de las secciones de medición se observa en la Figura 4.13: posterior a la medición y con los datos obtenidos de contenido de aire se realizó se un esquema de líneas con mismo contenido de aire, el cual en la Figura 4.14, en ella se muestra en una escala de azul intenso a blanco el contenido de aire, donde la sección más oscura representa zonas con contenido de aire cercanas a cero y las zonas en blanco son las que presentan el 80% de contenido de aire, en estos planos se aprecia la evolución del contenido de aire en las secciones longitudinales, así como detalles de zonas donde entra el aire debido a la presencia del aireador y el comportamiento de la interfaz con la superficie libre.



*Figura 4.13 Modelo físico y puntos de medición*

Se comprobó que los fenómenos que genera la pila tienen afectación no solo superficial, sino que influye en todo el tirante aún en las secciones más alejadas de aireador, ya que en general en las zonas donde se desarrolla la onda cruzada, se registraron mayores concentraciones de aire que en las secciones donde no se presenta este fenómeno; además, se observó que la distribución de aire en el aireador no es uniforme debido principalmente al aumento de tirante y concentraciones de aire posteriores a la pila, lo cual es importante porque altera el contenido de aire en el fondo del canal, donde el peligro de cavitación es relevante.

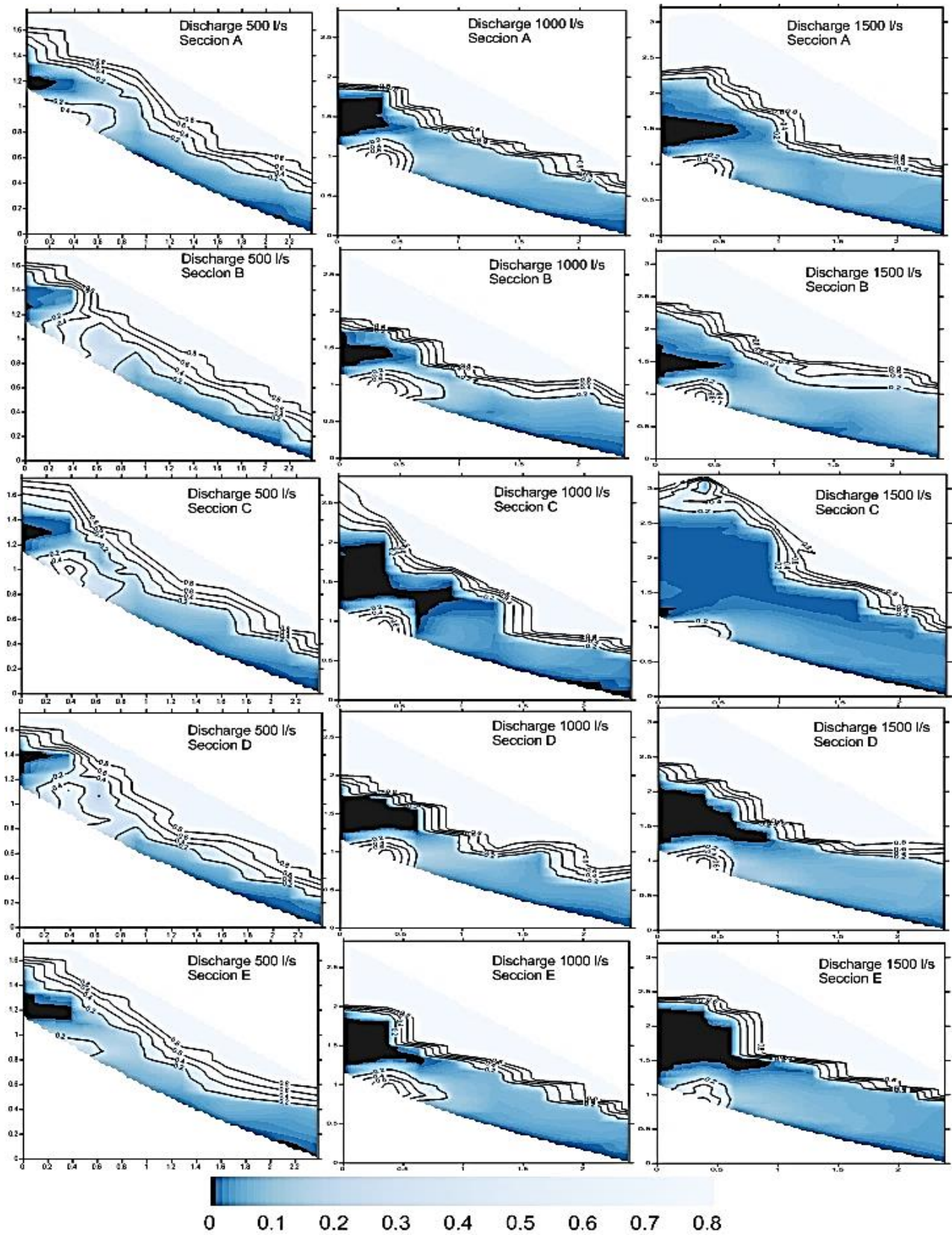


Figura 4.14 Distribución de contenido de aire en las 5 secciones para diversos gastos

Finalmente Para conocer el efecto que causa la pila en la concentración de aire a lo largo y ancho del vertedor específicamente en el fondo del vertedor, sección donde es indispensable conocer y estudiar el contenido de aire para evitar cavitación, se retiró la pila central y se repitieron las pruebas para comparar los resultados con la presencia de la pila y sin ella (Luna et al 2018) los resultados se presentan en la Figura 4.15

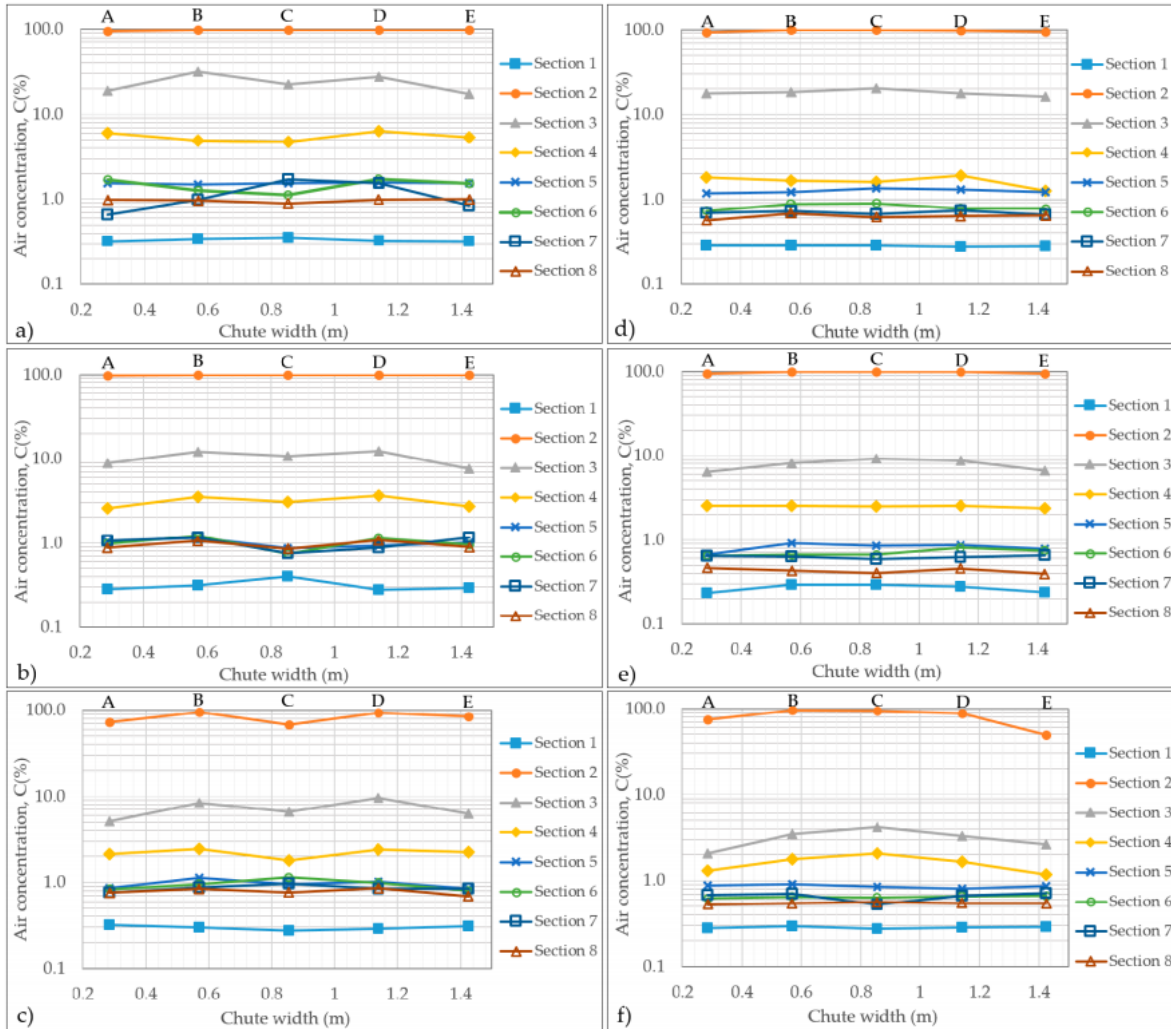


Figura 4.15 Concentraciones de aire fondo del vertedor en las 8 secciones transversales a) 500 l/s con pila b) 1000 l/s con pila c) 1500 l/s con pila d) 500 l/s sin pila e) 1000 l/s sin pila y f) 1500 l/s sin pila

Existe una disminución considerable del contenido de aire cuando no existe pila en el vertedor, lo cual es cada vez más representativa a medida que el gasto se incrementa; por lo que se determina que la presencia de una pila central al inicio de un vertedor provoca efectos en el flujo aguas abajo de la misma haciendo que ingrese mayor contenido de aire al flujo lo que es benéfico para evitar cavitación o colocar aireadores más espaciados en la rápida.



## 5 Modelo físico

### 5.1 Efectos de Escala

Una dificultad frecuente en el diseño de estructuras donde intervienen flujos agua-aire es la determinación del tirante medio derivado de la concentración de aire; debido a que influye en el bordo libre o en diámetro de un túnel en las estructuras, existen dos maneras de intentar dar solución a esta situación ya sea con un modelo físico pero siempre se contará con efectos de escala o la modelación matemática la cual siempre contará con incertidumbre además de ser sensible al código, calibración y validación de resultados (Pfister 2014).

Una correcta reproducción en modelos de las propiedades de los flujos aire-agua es complicada e imposible si se utiliza agua tanto en el prototipo como en el modelo. En cuanto al comportamiento de las burbujas, este se ve afectado directamente por las fuerzas expresadas por los números de Froude  $Fr$ , Reynolds  $Re$  y Weber  $W$ , lo cual fue demostrado por Schmidt (1934) cuyo trabajo fue validado por Haberman and Morton (1953), donde señalaron que el fluido es afectado por las características de las burbujas mientras que  $W$  y  $Re$  estén por debajo de cierto valor, de aquí que los efectos de escala permanecen pero son pequeños mientras se respeten dichos límites es así donde surge el número de Morton que relaciona los tres anteriores y es la clave en la modelación de flujos aire-agua.

Haberman and Morton realizaron gran cantidad de experimentos enfocados en el coeficiente de arrastre del ascenso de las burbujas; esto se realizó para diferentes fluidos y diferentes temperaturas, con lo que concluyeron que la velocidad de ascenso depende de la viscosidad del líquido para burbujas esféricas y de la tensión superficial para burbujas elipsoidales.

Estos autores, también observaron que se producía una reducción en el arrastre cuando aumentaba el tamaño de la burbuja y con ello el  $Re$ , lo cual se explicó con la formación de circulación de aire dentro de la burbuja. Derivado de sus observaciones encontraron que existe un límite en los valores de  $Re$  y  $W$  donde el coeficiente de arrastre se vuelve independiente del tamaño de las burbujas. Estos estudios derivaron en lo que hoy conocemos como el número de Morton.

$$M = \frac{g\mu^4}{\rho\sigma^3} = \frac{W^3}{Re^4 Fr^2},$$

donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica,  $\rho$  es la densidad,  $\sigma$  es la tensión superficial y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Dado que para hacer un modelo representativo es necesario cumplir con las leyes de similitud dinámica esto llevaría a hacer modelos escala 1:1, sin embargo, es recomendable trabajar con ciertas características del flujo para disminuir considerablemente los efectos de escala. Pfister y Hager (2010) calcularon ciertos valores mínimos para trabajar con flujos aire-agua a gran velocidad ellos determinaron que  $W^{0.5} > 140$  o  $Re > 2.2 \times 10^5$  si se trabaja con estas cifras como mínimas entonces las características del modelo de turbulencia y la superficie libre del agua permiten características de concentración de aire similares a las del prototipo (Pfister 2014).

## 5.2 Descripción del modelo físico

Para realizar las pruebas correspondientes a este trabajo se construyó un tanque amortiguador sobre un modelo existente localizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Originalmente se contaba con el modelo físico del vertedor de la presa Huites, el cual representa a la presa ubicada sobre el Río Fuerte en el estado de Sinaloa.

El modelo original se construyó con el objetivo de conocer el comportamiento del aire a lo largo del vertedor y determinar la posición donde deberían de ubicarse los aireadores. Para tal efecto se hizo a escala 1:21 con el propósito de disminuir los efectos de escala, se decidieron probar gastos bajos en la descarga del vertedor ya que es más probable que se presenten en el prototipo. Los gastos con que es posible operar el modelo corresponden de 0.4 a 2.2 (m<sup>3</sup>/s) lo que para el prototipo representan gastos de 808 a 4446 (m<sup>3</sup>/s).

El modelo cuenta con dos bombas de 200 (hp) con las cuales es posible suministrar un caudal máximo de 1.1 (m<sup>3</sup>/s) por cada una. El modelo físico original contaba con una altura de la cresta a la sección más baja del vertedor de 4.13 (m) y una rápida con una longitud total de 11.8 (m). Este modelo se utilizó como base para realización de las pruebas del presente trabajo. Para ello se modificó la cubeta deflectora con la contaba el modelo original y se cambió por un tanque amortiguador de 8 (m) de longitud y 1.7 (m) de ancho. Se cuenta con una ventana de acrílico de 3.5 (m) de longitud sobre la margen izquierda con la finalidad de observar el fenómeno. El esquema del modelo original se muestra en la Figura 5.1.

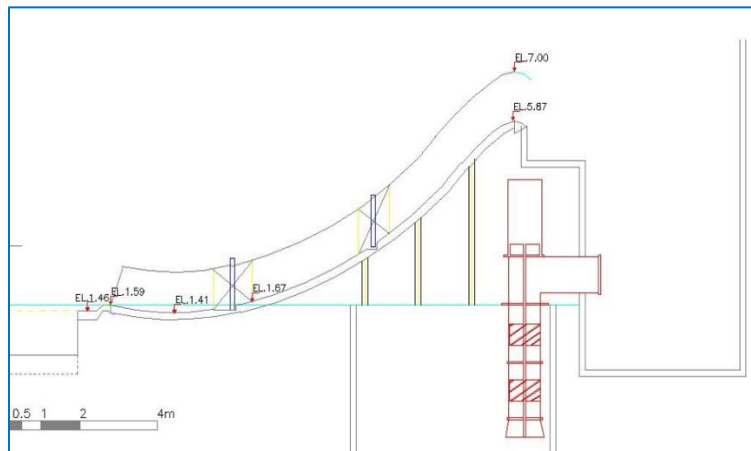


Figura 5.1 Modelo físico original

## 5.3 Diseño de tanque amortiguador

Para realizar el estudio fue necesario realizar los cambios ya descritos en el modelo físico, ya que se requería la construcción de un tanque amortiguador donde se disipara la energía, para ello se midió el tirante de agua al final de la rápida justo antes del cambio de pendiente que determina el inicio del tanque amortiguador y se definió como el conjugado menor del salto hidráulico para considerar ese punto como la condición inicial y realizar las correspondientes comparaciones al momento de colocar los deflectores y modificar la condición de salida. Las propiedades hidráulicas consideradas en la condición inicial se muestran en el siguiente cuadro

Variable	Símbolo	Valor
<b>Gasto</b>	$Q (m^3/s)$	0.678
<b>Tirante al inicio del tanque</b>	$y_{cm} (m)$	0.06
<b>Numero de Froude inicial</b>	$F$	8.63
<b>Velocidad</b>	$v (m/s)$	6.6

Con los valores mostrados y la ecuación del salto hidráulico se determinó el conjugado mayor  $Y_{CM}$  del con la siguiente ecuación:

$$\frac{y_{CM}}{y_{cm}} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right),$$

Obteniendo un conjugado mayor de

$$Y_{CM} = 0.7 (m),$$

Con este valor se determinó la longitud del salto hidráulico con las siguientes ecuaciones:

Silvester

$$L / Y_1 = 9.75(F_1 - 1)^{1.01}$$

Smetana

$$L / Y_1 = 6[(Y_2/Y_1) - 1]$$

Pavlovsky

$$L / Y_1 = 2.5[1.9 (Y_2/Y_1) - 1]$$

Chertousov

$$L/Y_1 = 10.3(\sqrt{F_1} - 1)^{0.81}$$

Rajaratnam

$$L/Y_2 = 6$$

Chow (Chow 2004)

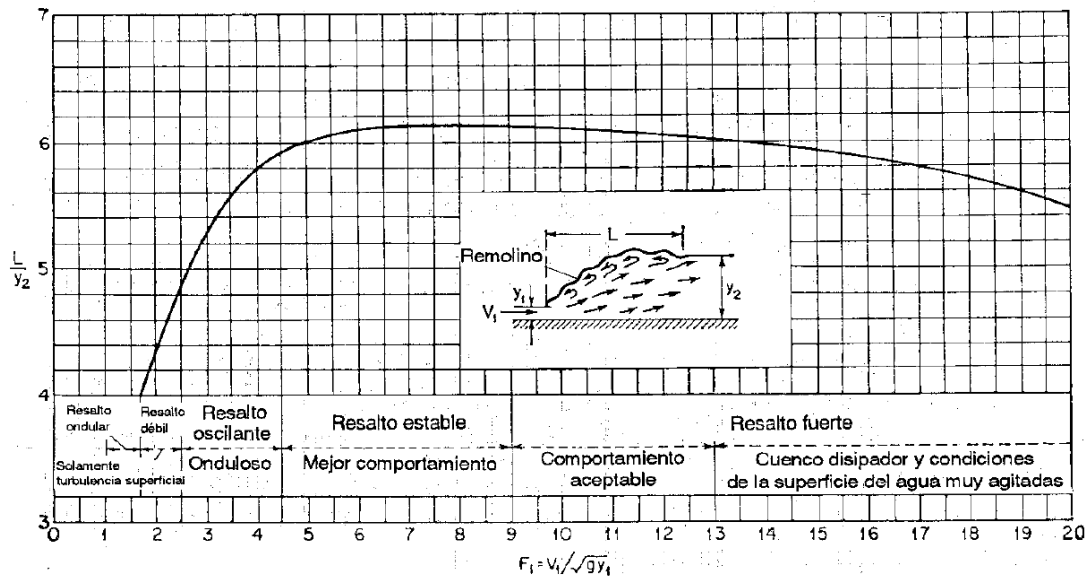


Figura 5.2 Longitud del salto hidráulico (Chow Ven Te, 2004)

Obteniendo los siguientes resultados

Criterio	Longitud (m)
<b>Silvester</b>	4.5
<b>Smetana</b>	3.8
<b>Pavlovsky</b>	4.2
<b>Chertousov</b>	1.1
<b>Rajaratnam</b>	4.2
<b>Chow</b>	4.1

Como se observa en la tabla los valores para determinar la longitud del salto hidráulico varían entre sí, dependiendo de la ecuación que se utilice con un media cercana a 4 sin considerar la ecuación de Chertousov que es la que se considera fuera de rango. Del análisis y observación en el modelo físico y además limitados por el espacio físico que se dispone en el laboratorio de Hidráulica, se decidió construir un tanque amortiguador de 8 (m) de longitud, donde se observa que el fenómeno se logra reproducir y se considera que en una longitud de 5 (m) el salto se desarrolla completamente y se cuenta con una longitud de dos metros adicionales donde se realizan mediciones con gastos mayores a los presentados en el presente trabajo.

#### 5.4 Diseño de deflectores

Como se mencionó en el Capítulo 1 la motivación del presente trabajo surgió de observar y cuantificar como se modifica la turbulencia en tanque amortiguador cambiando su condición de entrada colocando deflectores en la rápida antes del inicio del tanque. La propuesta de la dimensión de los deflectores partió de la combinación del diseño de un tanque amortiguador TIPO USBR I y USBR II. En el tanque amortiguador estudiado partía de un modelo escala 1:30 con un canal trapecial de 20 (m) de base y taludes

con relación 1.5:1 y una pendiente de llegada a la rápida de 0.00202 por lo que para el gasto de diseño se contaba con las siguientes características hidráulicas:

Variable	Símbolo	Valor
<b>Gasto</b>	$Q (m^3/s)$	230
<b>Tirante Crítico</b>	$y_c (m)$	2.32
<b>Carga de diseño</b>	$H (m)$	3.22
<b>Tirante al inicio del tanque</b>	$y_1 (m)$	0.77
<b>Numero de Froude</b>	$Fr$	5.1
<b>Velocidad</b>	$v (m/s)$	14

Derivado de que el tanque estudiado se encuentra entre el límite del número de Froude para ser USBR tipo I o II y que la velocidad máxima está muy cercana al límite donde no es posible colocar tanques USBR tipo II, se decidió realizar pruebas con diferentes dimensiones de deflectores y diferentes separación entre ellas, al realizarlas se notaba mejoría en el comportamiento del flujo sin embargo, continuaban presentándose los desbordamientos por lo que se decidió colocar una segunda hilera de dientes, con lo que se consiguió un mejoramiento del comportamiento del flujo que evitó los desbordamientos, es por ello que se decidió modelar la siguiente configuración (Figura 5.3)

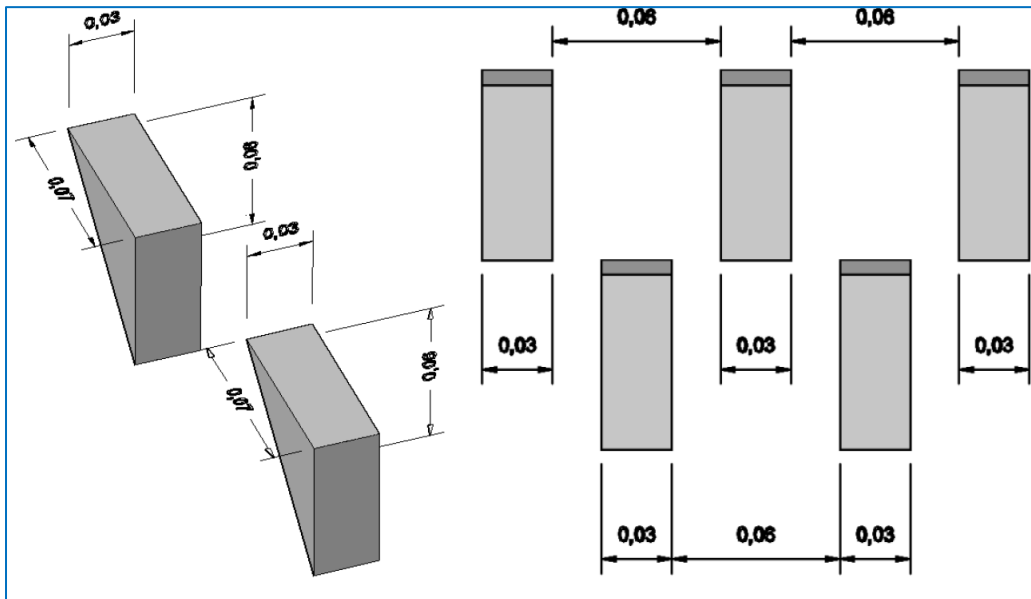


Figura 5.3 Dimensiones de deflectores en la rápida

Un procedimiento similar se realizó para definir las dimensiones de las dos hileras de deflectores diseñados para las pruebas del presente trabajo, para ello se colocaron dos hileras de deflectores colocados en la de 0.12 (m) de ancho, 0.095 (m) de altura y 0.25 (m) de longitud, separados entre ellos 0.2 (cm) y con una separación entre la primera y segunda fila de 0.27 (cm). También se determinó la altura a la que

deben de colocar los deflectores para obtener la configuración apropiada para las pruebas a realizar, en la Figura 5.4 se muestra su diseño.

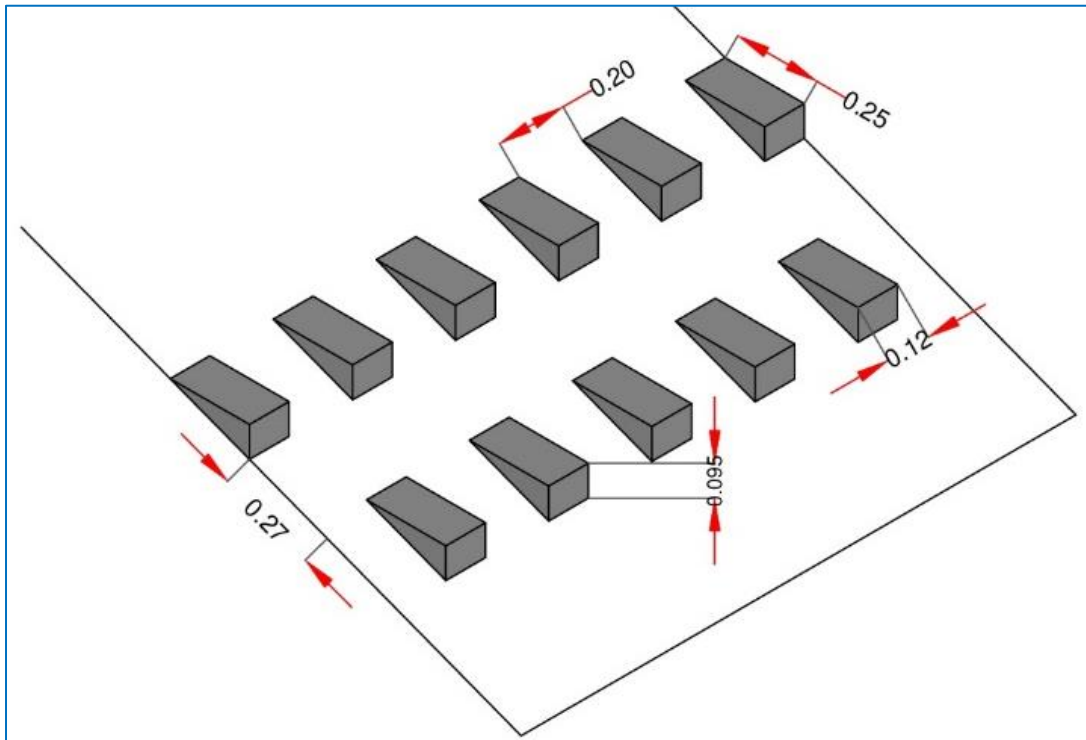


Figura 5.4 Diseño de deflectores en la rápida

### 5.5 Pruebas realizadas

Como ya se ha mencionado el objetivo de las pruebas es determinar cómo se modifica la turbulencia en un tanque amortiguador al variar la condición de entrada a él, para ello se realizaron mediciones de contenido de aire dentro del tanque amortiguador. En la Figura 5.5 se muestran los puntos de medición. Se colocaron 15 secciones de medición en la dirección transversal separadas entre ellas 0.5 (m) siendo 0 la sección al inicio del tanque amortiguador y 15 la sección más alejada; en la dirección longitudinal se generaron tres planos, uno central, y 2 más en los tercios del tanque, siendo el plano de la margen izquierda el ubicado a 0.425 (m) de la pared y el plano de la margen derecha el colocado a 0.425 (m) de la pared de esa margen.

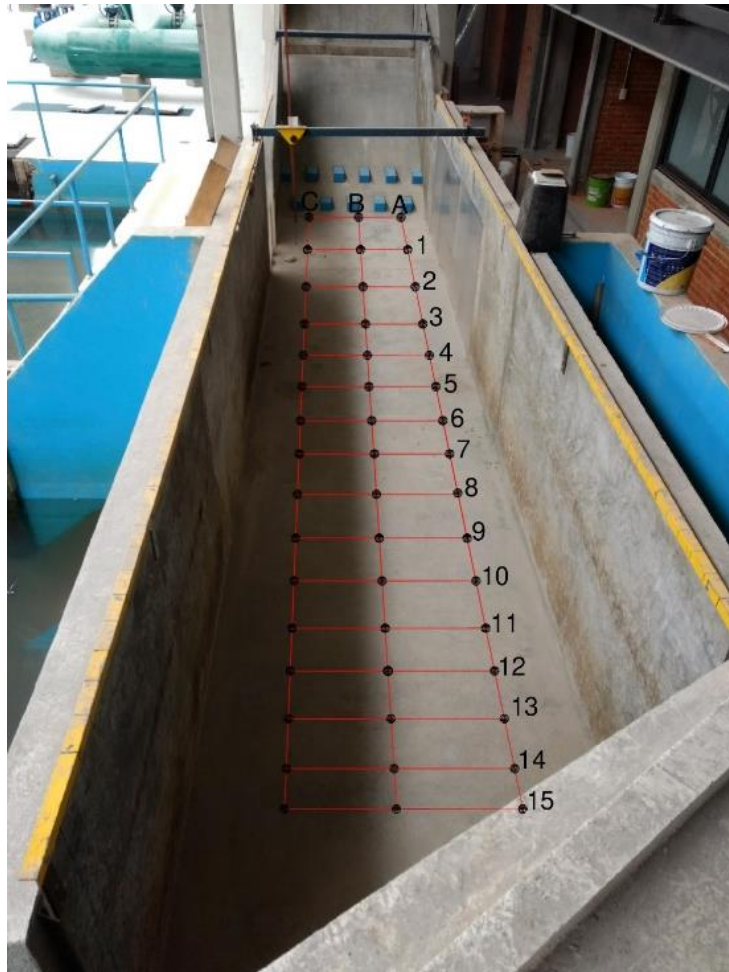


Figura 5.5 Zonas de medición

La finalidad de las pruebas consistió en determinar cómo se disipa la mayor cantidad de energía al contar con las dos hileras de deflectores para ello se tomó una configuración base, que consistió en caracterizar la turbulencia sin deflectores en la rápida para posteriormente comparar las configuraciones propuestas. Para ello se elaboró el siguiente esquema de trabajo

Con un gasto de  $0.678 \text{ (m}^3/\text{s)}$  se realizaron las 2 condiciones una condición sin deflectores y una condición con deflectores teniendo 3 escenarios para cada una:

Escenario 1: Con un gasto de  $0.678 \text{ (m}^3/\text{s)}$  se consideró una condición de salida libre al final del tanque con un escalón de 41.5 (cm).

Escenario 2: Con un gasto de  $0.678 \text{ (m}^3/\text{s)}$  y una condición de salida libre al final del tanque con un escalón de 44.0 (cm).

Escenario 3.- Gasto de  $0.678 \text{ (m}^3/\text{s)}$  y una condición de salida libre al final del tanque con un escalón de 46.5 (cm).

Para cada condición de flujo se registró un diferente comportamiento hidráulico y por lo que para la condición con deflectores se registraron 1343 puntos de medición y para la condición sin deflectores se registraron 919 puntos de medición, dado que cada punto de medición duró 40 (s) y con una frecuencia de muestreo de 20,000 (hz), se generaron  $1.8 \times 10^9$  datos



*Figura 5.6 Modelo físico con deflectores*



## 6 Modelación matemática

El modelo numérico que se emplea en este análisis se realizó mediante el software Flow-3D, ya que ha sido ampliamente utilizado para el estudio y comprensión de estructuras hidráulicas y ha generado buenos resultados en estructuras como canales, intersecciones, vertedores y tanques amortiguadores. Es por ello que se considera como una herramienta útil para el diseño de estructuras hidráulicas.

Flow-3D es un software principalmente aplicado a fluidos a superficie libre, con arrastre y depósito de sedimentos, así como la interacción fluido-estructura. Permite conocer la evolución de un fluido de manera tridimensional sometido a diferentes condiciones físicas, mediante el uso de técnicas numéricas para resolver ecuaciones de fluidos para obtener soluciones a lo largo del tiempo.

Este software resuelve numéricamente por diferencias finitas las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad, éstas son ecuaciones diferenciales de segundo orden, no lineales y dependientes del tiempo, en donde la solución numérica de las mismas implica aproximar los términos que la componen con expresiones algebraicas.

El espacio que se pretende simular es discretizado mediante una malla estructurada de celdas donde se aplican las ecuaciones ya mencionadas.

Las principales ventajas de implementar Flow-3D al cálculo de flujo a superficie libre son:

- Contar con una interfaz gráfica que permite visualizar a mayor detalle el comportamiento de cada una de las simulaciones.
- Las geometrías complejas son introducidas mediante la creación de sólidos 3D en archivos CAD (Computer Aided Design).
- Permite el pre-procesamiento de la simulación para detectar los errores que deban ser corregidos.
- No limita el número de celdas a utilizar.
- Se generan gráficos de resultados debido a que cuenta con su herramienta de pos-procesamiento.
- Maneja gran cantidad de módulos para estudios especializados de todo tipo de fluidos.
- Confiable en modelaciones de flujos a superficie libre ya que cuenta con diferentes modelos de turbulencia, modelo VOF para la interfaz aire-agua, ecuaciones de atrapamiento de aire.

### 6.1 Modelo VOF

El modelo VOF se utiliza para representar la interfaz de un fluido con la superficie libre, se basa en el principio donde un volumen ocupado por un material no puede ser ocupado por otro lo que da lugar al concepto de fracciones de volumen.

Este método fue propuesto por Hirt y Nichols (1981) como una solución a fenómenos complicados como la modelación de la superficie libre, choque de ondas, interfaz entre el fluido y estructuras deformables; la ventaja de esta propuesta es que al analizarlo bajo este modelo la interfaz aire agua se hace independiente del fenómeno. Para un flujo incompresible se cumple

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla p = 0 ,$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido y se cumple en el dominio del flujo incluyendo la superficie libre, la densidad del aire se considera despreciable y se define  $F = \rho/\rho_0$  como el parámetro de la fracción de fluido (función VOF) en cada celda computacional, entonces la ecuación anterior queda:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla F = 0 .$$

Como  $F = 1$  en las celdas ocupadas completamente por agua y  $F = 0$  para las celdas con aire. En las celdas de la superficie libre donde las celdas están parcialmente llenas, el valor de  $F$  se encuentra entre cero y uno. La ecuación anterior se resuelve obteniendo el campo de velocidades y actualizando los valores de  $F$  en el espacio, de esta manera siguiendo la función  $F$  se localizan las celdas de la superficie libre en cualquier instante (Shigematsu et al. 2004)

## 6.2 Modelos de turbulencia

### 6.2.1 Modelo Large Eddy Simulation (LES)

Los flujos turbulentos se caracterizan por contar con comportamiento altamente anisotrópico (sus propiedades varían según la dirección de análisis) y por un comportamiento extremadamente complejo (T.T. Devi y B. Kumar 2015). Si a lo anterior se le adiciona la no linealidad de las Ecuaciones de Navier-Stokes y las que surgen del propio modelo de turbulencia LES, se tiene como resultado la dificultad para el desarrollo de un método eficiente de solución (Ceretani 2012).

Sin embargo, actualmente el método LES es fundamental para dar solución a un sin número de problemas como la estimación del calentamiento global, eficiencia energética de motores, dispersión de contaminantes, diseño de dispositivos biomédicos, procesos geofísicos predicción de flujos turbulentos entre muchos otros (Luigi C. et al 2005)

En modelo LES analiza el comportamiento turbulento es dos partes, resuelve el comportamiento de las grandes escalas y modela las pequeñas (Berselli et al 2005). El comportamiento de gran escala cuenta con estructuras fuertemente dependientes del flujo, las cuales absorben energía de los caudales medios, los cuales son anisotrópicos y generalmente presentan vórtices. Por el contrario, el comportamiento de pequeña escala se encarga de disipar la energía producida por las zonas de recirculación y los vórtices de gran escala, aquí se considera un flujo isotrópico.

Los primeros estudios que se realizaron con la implementación del modelo LES fueron con fines meteorológicos mediante el estudio de las propiedades medias del flujo; con la finalidad de desarrollar un modelo dinámico de la atmosfera, obtener las características de la circulación general y tratar los movimientos de gran escala como la turbulencia, (Smagorinsky 1963).

Posteriormente se realizaron estudios para examinar los patrones de turbulencia en canales con flujos turbulentos con comportamiento tridimensional donde se presentaban altos números de Reynolds y se deseaba conocer características que no podían ser medidas experimentalmente (Deardorff 1969), aunque las principales limitantes eran el número de celdas en el que se dividía el área de interés ya que no se era posible realizar tantos cálculos si se proponía un dominio grande.

En 1978 Moin et al realizaron un estudio donde se enfocaban en la turbulencia en un canal turbulento donde dividieron el dominio en 266 240 celdas lo cual es un dominio considerable para la época.

En términos de requerimientos computacionales El modelo LES se encuentra entre el modelo de esfuerzo cortante de Reynolds (RMS) y la Simulación Numérica Directa (DNS), esto debido a que representa explícitamente el movimiento inestable de gran escala y genera resultados más precisos y confiables que el RMS cuando la inestabilidad a gran escala es significativa, como alrededor de obstáculos donde se observen separación inestable y desprendimiento de vórtices (Pope 2000). Este modelo ha funcionado adecuadamente en flujos en canales con obstáculos, reproduciendo adecuadamente la interfaz con las fronteras, la turbulencia y los vórtices asociados al fenómeno, para ello se han utilizado modelos de submalla Smagorinsky y VOF en la simulación de la superficie libre (Lu Lin et al 2008). Además de representar satisfactoriamente fenómenos donde el dominio es muy grande haciendo que el modelo DNS no sea suficiente y donde se presentan un comportamiento del flujo turbulento como en el estudio de ondas ocasionadas por caídos entrando a embalses (Liu P. L.-F. et al 2005).

El comportamiento de gran escala es resuelto directamente mediante las ecuaciones de Naviere-Stocks y el comportamiento eddy de pequeña escala es modelado mediante el uso de subescalas (SGS) el cual considera de forma aproximada su influencia en la variación general de los parámetros de flujo (Capote et al 2008). El submodelo más utilizado es el modelo Smagorinsky debido a su sencillez de cálculo, pero este tiene ciertas desventajas inherentes como la incertidumbre del coeficiente empírico para el cálculo del coeficiente viscosidad, la operación de filtrado se hace mediante un mallado rectangular con un tamaño fijo de celdas lo que hace que la solución sea sensible a la elección de las dimensiones de la celda, además de presenta baja exactitud en flujos laminares y cercano a las paredes (Capote et al. 2008). Los modelos LES a grandes rasgos se dividen en modelo Para turbulencia Isotrópica, para turbulencia anisotrópica, LES deltas y filtros LES. Cada uno de ellos cuenta con submodelo para hacer el cálculo del comportamiento a pequeña escala, lo que hace que existan gran cantidad de submodelos que se aplican al modelo LES los cuales se enfocan desde problemas generales hasta problemas específicos.

### 6.2.2 Modelos de transporte de turbulencia (modelo $k-\epsilon$ )

El modelo de transporte de turbulencia de una ecuación donde intervenga la energía cinética consiste en una ecuación de transporte para la energía cinética específica asociada con las fluctuaciones de las velocidades turbulentas en el flujo, la energía cinética turbulenta está dada por:

$$k_T = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}),$$

donde  $u', v', w'$  son los componentes de la velocidad del flujo en las direcciones  $x, y, z$  asociadas con las fluctuaciones turbulentas. Esto corresponde a una intensidad turbulenta dada por:

$$I = \sqrt{\frac{k_T}{\bar{K}}},$$

donde  $\bar{K}$  es la energía cinética turbulenta promediada en la masa del dominio, como se define a continuación:

$$\bar{K} = \frac{\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)d\forall}{\int_{\forall} \rho d\forall},$$

donde:  $\forall$  representa el volumen total del dominio

La ecuación de transporte  $k_T$  incluye la convección y la difusión de la energía cinética turbulenta, la producción de energía cinética turbulenta debido a los efectos de cortante, flotabilidad, difusión y disipación debido a pérdidas viscosas dentro de los remolinos turbulentos. La producción de flotabilidad solo se presenta cuando no hay densidad uniforme en el flujo e incluye los efectos de gravedad y las aceleraciones no inerciales. La ecuación es la siguiente:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_{k_T} - \varepsilon_T,$$

donde  $P_T$  es la producción de energía turbulenta la cual responde a la siguiente ecuación:

$$P_T = C_{SPRO} \left( \frac{\mu}{\rho V_F} \right) \left\{ 2A_x \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left( R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} \right)^2 + 2A_z \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right. \\ \left. + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \left[ A_x \frac{\partial v}{\partial x} + A_y \left( R \frac{\partial u}{\partial y} + \xi \frac{v}{x} \right) \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right. \\ \left. + \left( A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \left( A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\},$$

donde:

$C_{SPRO}$ , Es un parámetro de turbulencia, cuyo valor por default es 1.0.

$R$  y  $\xi$ , Se describe anteriormente en la ecuación de continuidad de masa y están relacionadas con el sistema de coordenadas cilíndricas (si este fuera el caso).

El término  $G_T$  producción de flotabilidad se describe como:

$$G_T = -CRHO \left( \frac{\mu}{\rho^3} \right) \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + R^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} \right),$$

donde:

$\mu$ , Es la viscosidad dinámica molecular.

$\rho$ , Es la densidad del fluido.

$P$ , Es la presión del flujo.

$CRHO$ , Es otro parámetro de la turbulencia, cuyo valor por default es 0, pero para problemas térmicos de flotación sería aproximado a 2.5. El término de difusión es:

$$Diff_{k_T} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_k A_y R \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_k k_T A_x}{x} \right\},$$

donde  $v_k$  es el coeficiente de difusión de  $k_T$  y es calculado basado en el valor local de la viscosidad turbulenta. El parámetro definido por el usuario RMTKE es el múltiplo de viscosidad utilizado para calcular el coeficiente de difusión turbulento (su valor predeterminado es 1.0).

La tasa de disipación de energía turbulenta  $\varepsilon_T$ , en el modelo de una ecuación está relacionada con la energía cinética turbulenta  $k_T$ :

$$\varepsilon_T = CNU^{3/4} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN},$$

donde:

$CNU$ , Es un parámetro (0.09 por defecto).

$k_T$ , Es la energía cinética turbulenta.

$TLEN$ , Es la escala de longitud turbulenta.

En este caso, de forma predeterminada Flow 3D elige un valor para  $TLEN$  del 7% de la dimensión de dominio más pequeña, dicese una celda, sin embargo, se recomienda que este valor sea el 7% del diámetro hidráulico, (Shojaee and Fard 2007), que es una escala de longitud característica del flujo. En tuberías, el diámetro hidráulico es igual al diámetro interior de la tubería y para flujos a superficie libre, es la profundidad de dicha corriente.

Un modelo más elaborado y ampliamente utilizado, consiste en dos ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta  $k_T$  y su disipación  $\varepsilon_T$ , llamado modelo  $k - \varepsilon$  (Francis and Paul, 1967), eliminando así la necesidad de la ecuación anterior (excepto en las condiciones de frontera y en las regiones donde la disipación  $\varepsilon_T$  es cercana a cero). El modelo  $k - \varepsilon$  ha demostrado proporcionar aproximaciones razonables para muchos tipos de flujos (Rodi, 1980). Una ecuación de transporte adicional se resuelve para la disipación,  $\varepsilon_T$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} \\ = \frac{CDIS1 \cdot \varepsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3 \cdot G_T) + Diff_{\varepsilon_T} - CDIS2 \cdot \frac{\varepsilon_T^2}{k_T}, \end{aligned}$$

donde  $CDIS1$ ,  $CDIS2$  y  $CDIS3$  son todos parámetros adimensionales ajustables por el usuario y tienen valores predeterminados de 1.44, 1.92 y 0.2, respectivamente para el modelo  $k - \varepsilon$ . En la mayoría del dominio del flujo. Al sustituir las ecuaciones anteriores se reduce la necesidad de un valor específico para  $TLEN$  en todo el dominio.

La difusión de la disipación es:

$$Diff_{\varepsilon} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{\varepsilon} A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{\varepsilon} A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{\varepsilon} A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_{\varepsilon} \varepsilon_T A_x}{x} \right\}.$$

### 6.3 Construcción de la geometría

Se modeló una estructura de llegada antes del vertedor, la rápida del vertedor y el tanque amortiguador, para ello se generó un sólido en 3D con la ayuda del AutoCAD (Figura 6.1)

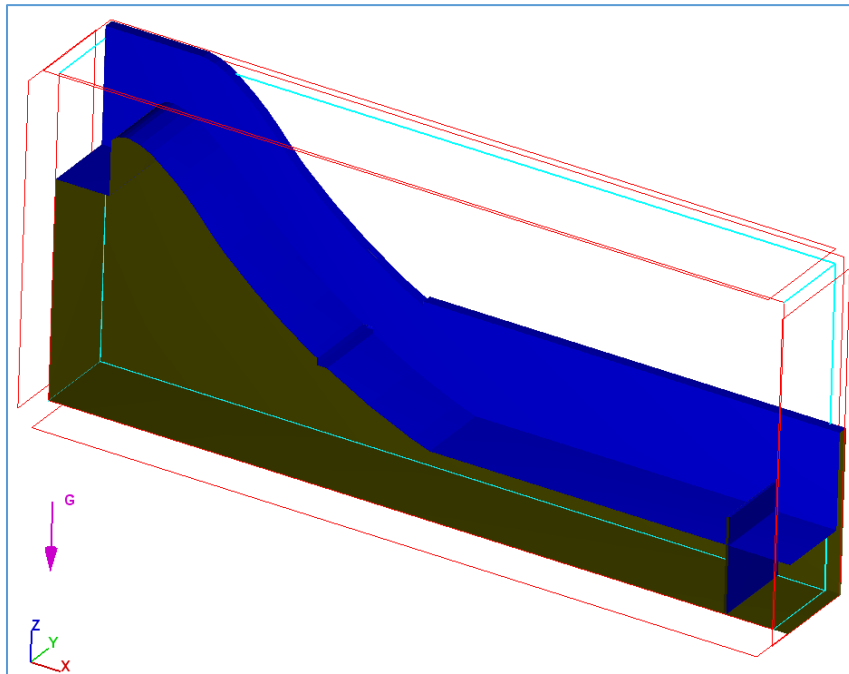


Figura 6.1 Modelación de sólido

### 6.4 Condiciones iniciales

Se requiere definir los siguientes parámetros iniciales Para que software Flow 3D funcione de forma adecuada:

- Establecer el tiempo de simulación que realizará el programa, se recomienda primeramente tener el flujo establecido y posteriormente realizar una simulación con un tiempo más corto y un mallado más fino para obtener resultados.
- Establecer las unidades en el sistema internacional de unidades.

- Definir una primera malla para obtener la estabilidad y a partir de esta afinarla para obtener resultados.
- Una interfaz de superficie libre manejando un solo fluido, es decir, sin intrusión de aire por vorticidad en la superficie libre del agua, tomando en cuenta que el fluido es incompresible.
- Definir la interfaz aire-agua, mediante una primera propuesta y posteriormente calibrar contra observaciones del modelo físico.
- Activar el módulo Gravity and non-inertial reference frame con un valor de  $-9.78 \text{ (m/s}^2\text{)}$  en el sentido negativo del eje Z.
- Para la modelación de donde se obtendrán resultados se requiere seleccionar el modelo de Viscosity and turbulence, definiendo un modelo de turbulencia para el cierre de las ecuaciones de Navier Stokes mediante el modelo RNG k- $\epsilon$  renormalizado.
- El fluido a modelar se definió como “Water at 20 c” que es agua a 20 grados Celsius.

### 6.5 Mallas

Al tratarse de una geometría complicada, se recurrió a simular tres escenarios los cuales se diferencian por el tamaño de malla, esto con la finalidad de reducir el proceso computacional de resolución y tener una aproximación del problema a tratar.

Debido a la complejidad de la estructura se tuvieron que plantear tres mallas para abarcar todo el modelo. La primera malla se colocó a la entrada del modelo (malla 1), la segunda abarca la zona del aireador (malla 2) y una tercera se colocó a lo largo del tanque amortiguador (malla3) como se muestra en Figura 6.2

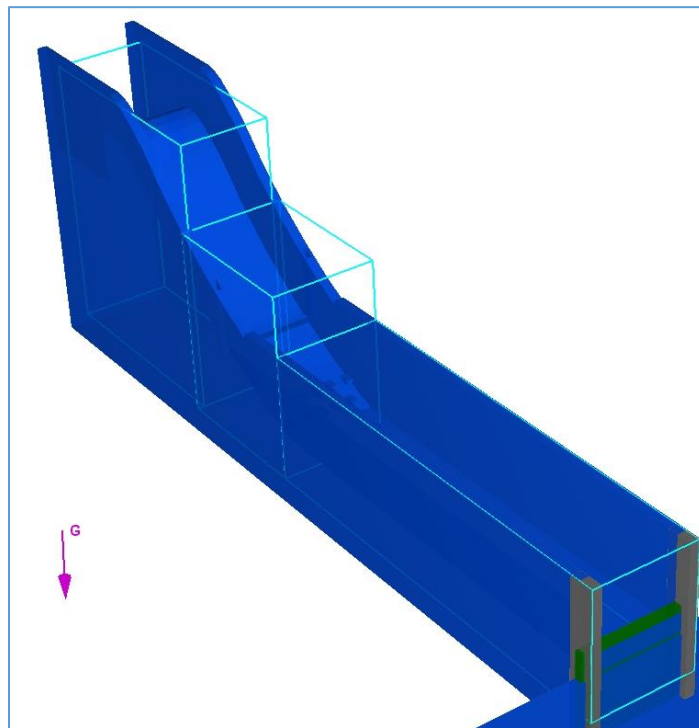


Figura 6.2 Interacción de mallas

Para realizar la simulación se trabajó con dos diferentes tamaños y números de celdas, con el propósito de calibrar el modelo y optimizar los tiempos de cálculo, para su análisis se dividió en malla gruesa y malla fina. Sus dimensiones se muestran en las siguientes tablas

Malla	longitud X (m)	longitud Y (m)	longitud Z (m)	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)	celdas en X	celdas en Y	celdas en Z	N. de celdas
1	4.5	1.8	5.4	0.075	0.036	0.060	60	50	90	270000
2	3	2.08	3.7	0.050	0.042	0.049	60	50	75	225000
3	8.5	2.08	2.5	0.142	0.042	0.050	60	50	50	150000
									<b>Total</b>	<b>645000</b>

Tabla 6-1 Malla gruesa

Malla	longitud X (m)	longitud Y (m)	longitud Z (m)	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)	$\Delta Z$ (m)	celdas en X	celdas en Y	celdas en Z	N de celdas
1	4.5	1.8	5.4	0.056	0.038	0.060	80	47	90	338400
2	3	2.08	3.7	0.025	0.023	0.025	120	90	150	1620000
3	8.5	2.08	2.5	0.077	0.038	0.038	110	55	65	393250
									<b>Total</b>	<b>2351650</b>

Tabla 6-2 Malla fina

La malla fina se utilizó como una primera calibración del modelo matemático, sirvió para determinar la hidrodinámica e identificar parámetros como el tiempo de estabilización y observar el comportamiento general para determinar si es congruente con el modelo físico, esto es colocar las medidas necesarias en el escalón de salida para simular los diferentes escenarios que se producen en el modelo físico.



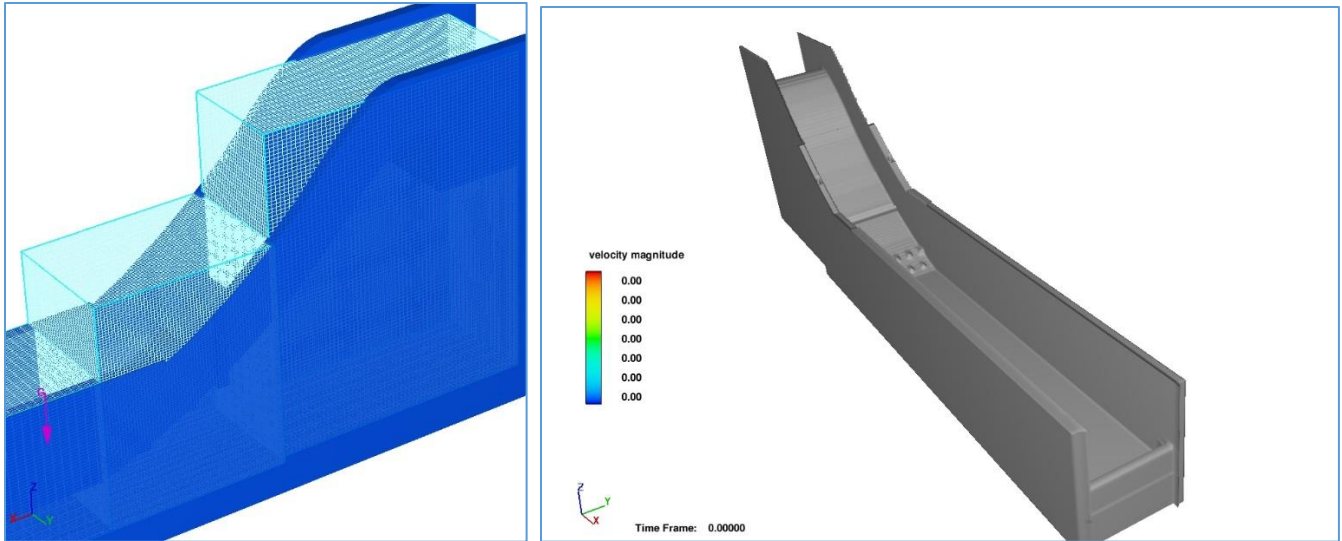


Figura 6.3 Tamaño de mallas e interpretación de geometría (Malla Gruesa)

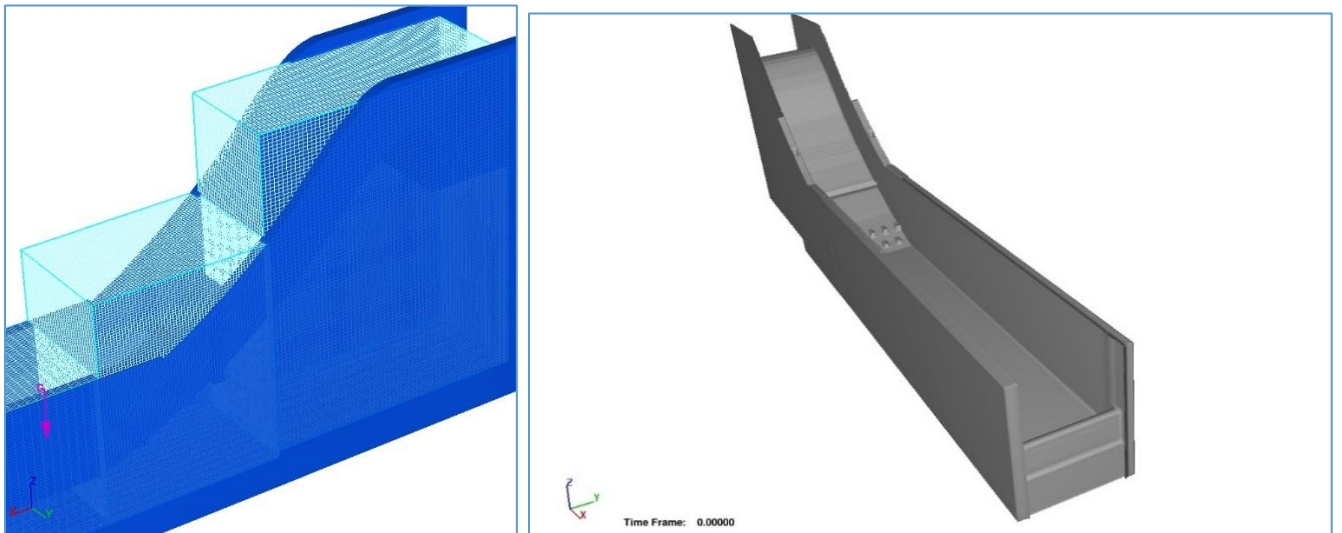


Figura 6.4 Tamaño de mallas e interpretación de geometría (Malla Fina)

## 6.6 Condiciones de Frontera

El programa Flow 3D cuenta con 10 condiciones de frontera que se colocan en cada una de las 6 caras de cada una de las mallas modeladas para las modelaciones realizadas en este estudio se utilizaron las siguientes:

- $Q$ , Volume Flow rate: Esta condición de frontera permite introducir un gasto en alguna de las caras en ( $m^3/s$ ).
- $S$ , Symmetry: Se utiliza si las mallas son adyacentes o se traslapan con lo que se permite la libre entrada y salida de flujo.
- $W$ , Wall: Está definida para indicar en el modelo que existe un muro, o elemento rígido que impide el paso de flujo.

- *P*, Specified pressure: es la condición de frontera de presión específica para denotar el contacto con la atmosfera, generalmente cuando se simula flujos a superficie libre. Puede utilizarse cualquier valor de presión en (*Pa*).
- *O*, Outflow: es la condición que permite la salida del flujo que ingresó por cualquier cara de la malla.

En cada una de las caras del paralelepípedo que forma cada malla se debe de colocar una condición de frontera para realizar la simulación. Las condiciones de frontera seleccionadas para la modelación se muestran en Figura 6.5.

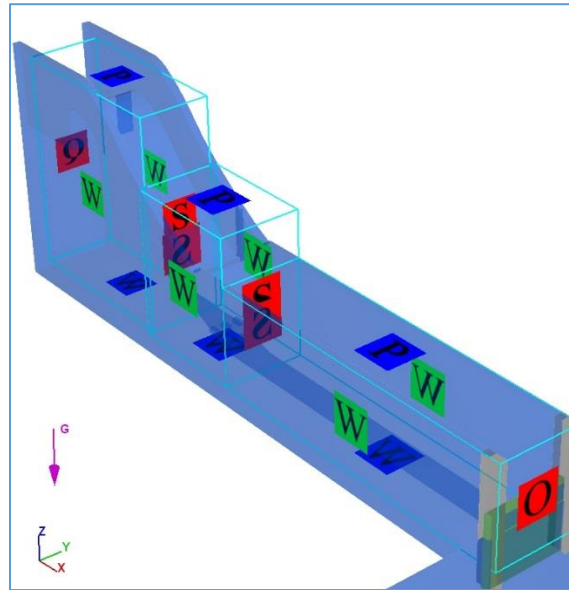


Figura 6.5 Condiciones de frontera

### 6.7 Procesamiento

Una vez que se determinaron los parámetros básicos se activaron el modelo de turbulencia RNG, y se colocaron parámetros para incorporar aire al flujo, se colocó un coeficiente de atrapamiento de 0.05, un coeficiente de arrastre de 1, se propuso un tamaño de las burbujas generadas de 4 (mm), además de un coeficiente de Richardson-Zaki de 1 y se ingresó el valor de la densidad de aire.

Una vez establecido el flujo en el modelo de obtuvieron los esquemas de velocidad Figura 6.6, intensidad turbulenta Figura 6.7 y contenido de aire Figura 6.8, las cuales se presentan para el escenario 3

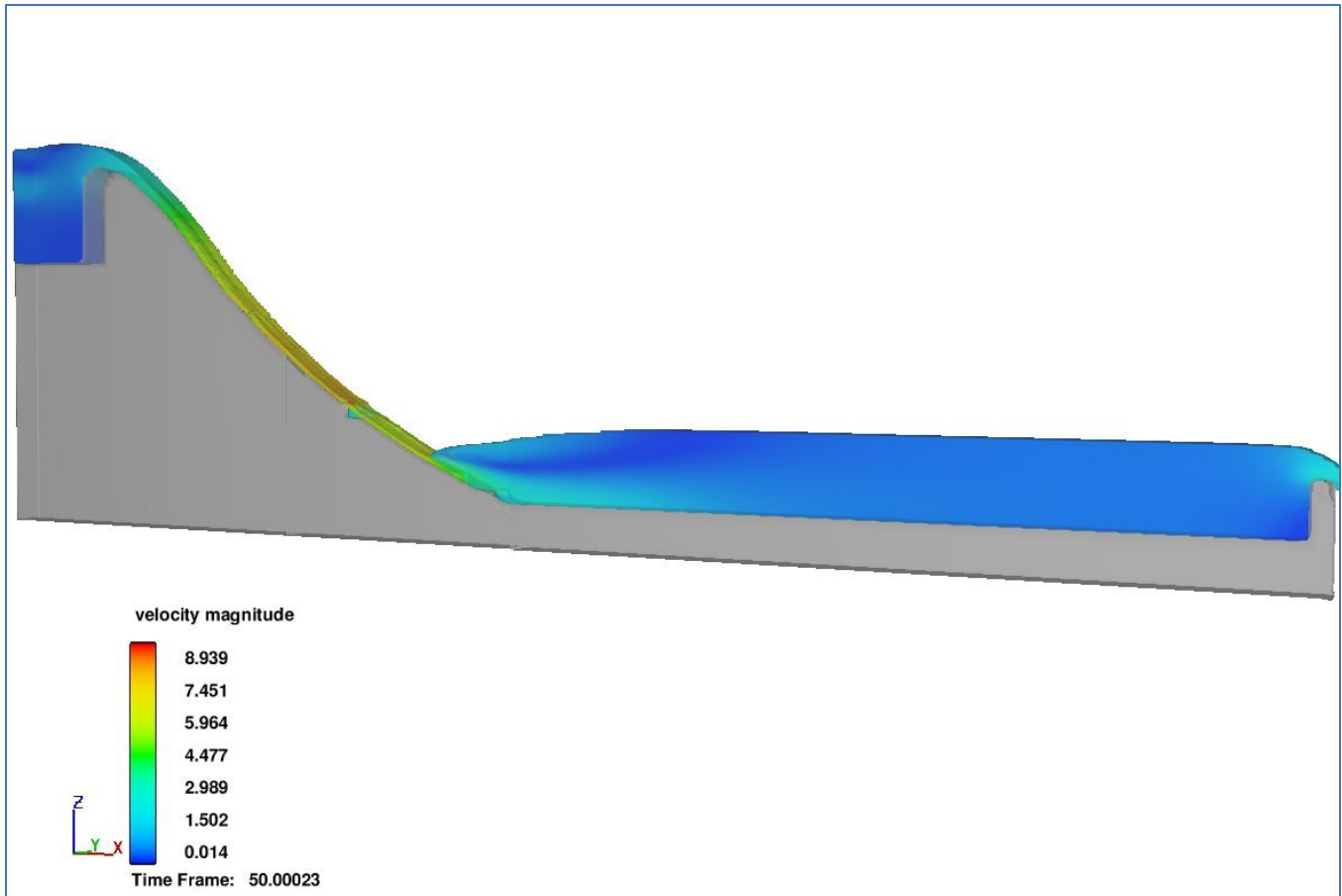


Figura 6.6 Velocidades en el escenario 3 (modelo numérico)

Para el escenario 3, con los dos chorros sumergidos, se muestran velocidades en la rápida cercanas a los 7 (m/s) en la entrada del tanque las cuales disminuyen rápidamente, conservando valores cercanos a 2 (m/s) al inicio del tanque acentuándose cercanas a la plantilla ubicadas en el primer tercio de la longitud, posterior a esta sección se muestra una velocidad constante cercana a 1 (m/s).

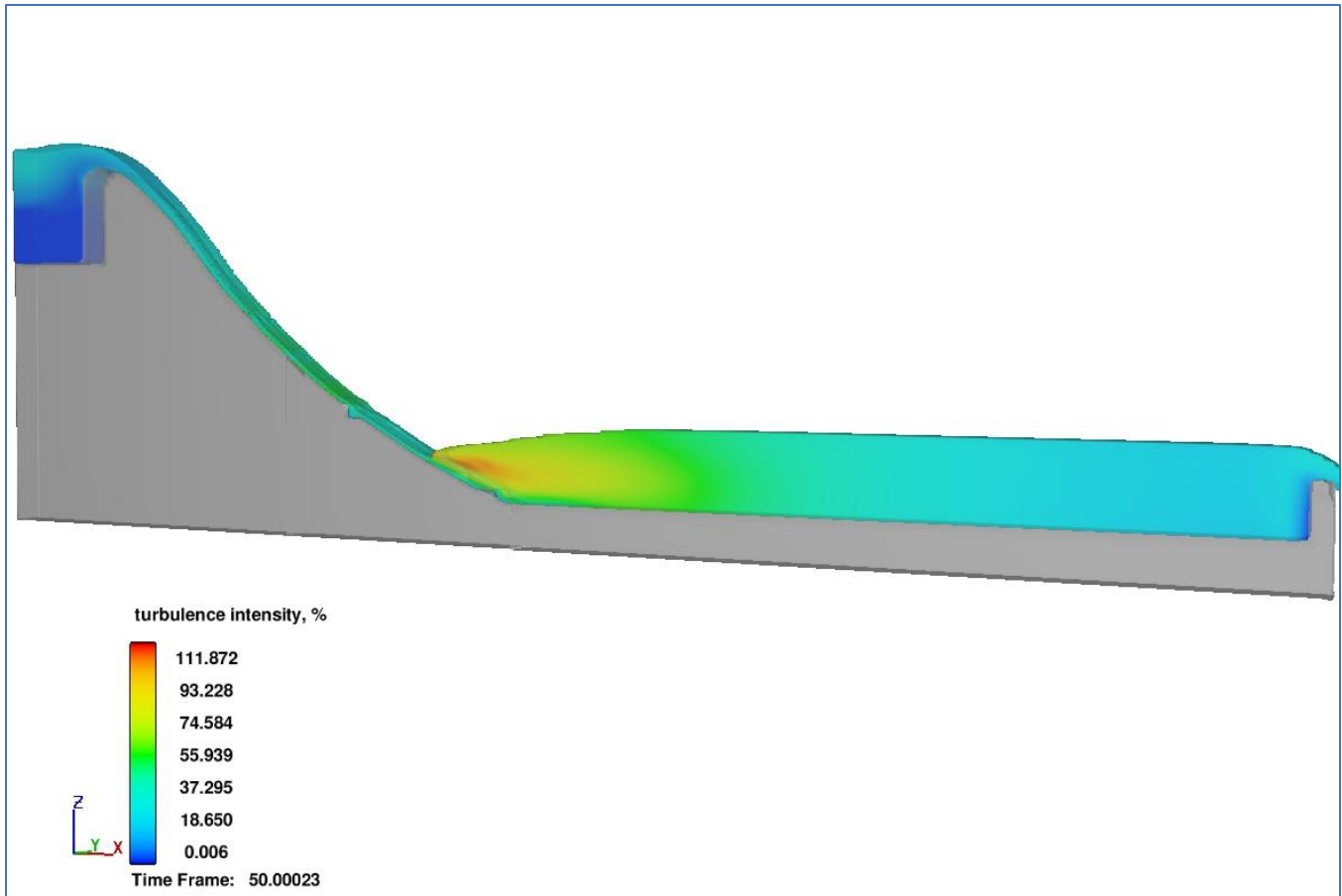


Figura 6.7 Intensidad turbulenta escenario 3 (modelo numérico)

Para el caso de la intensidad turbulenta se observa que los valores con mayor valor de intensidad turbulenta se encuentran sobre los deflectores esto es antes del ingreso al tanque amortiguador donde se presentan valores mayores al 100%. Al inicio del tanque amortiguador se presentan valores cercanos a 90% los cuales decrecen posteriores al primer tercio donde los valores se conservan menores a 35% hasta la salida del tanque amortiguador.

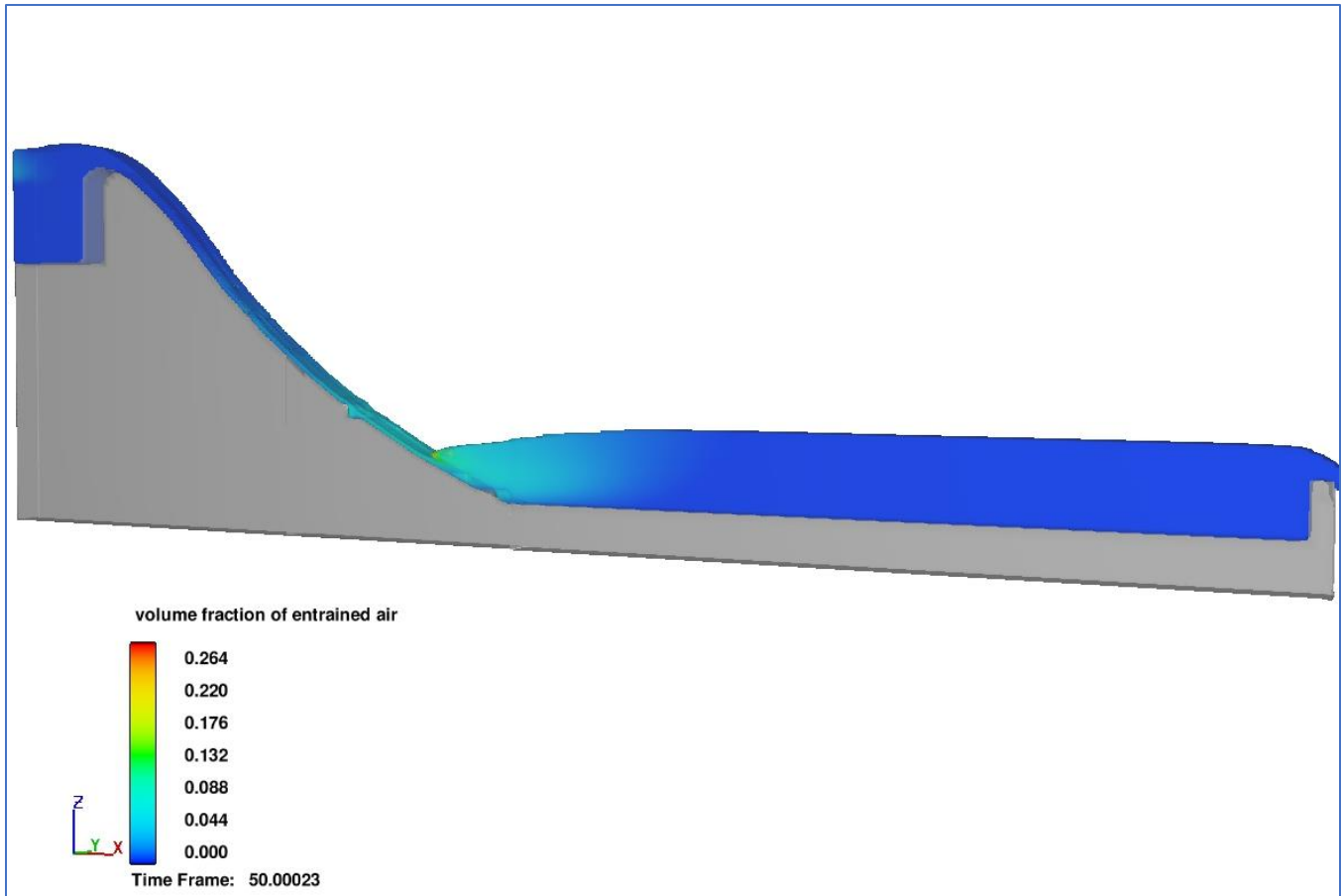


Figura 6.8 Contenido de aire escenario 3 (modelo numérico)

En cuanto al contenido de aire se muestran valores bajos respecto al modelo físico ya que los valores con contenido de aire mayores se encuentran igual que en el análisis de la intensidad turbulenta sobre la rápida con valores solo superiores a 10% los cuales contrastan con la modelación física donde se presentan valores mucho más grandes. En la modelación numérica los valores de contenido de aire rápidamente decaen siendo menores a 1% posteriores al primer cuarto de la longitud del tanque.

## 7 Análisis de resultados

Los datos obtenidos se procesaron para obtener contenido de aire, Índice de turbulencia y se analizaron las pendientes del espectro de frecuencias en los puntos de medición, esto con la finalidad de realizar la comparación de la turbulencia entre un salto convencional y uno modificado con la presencia de deflectores sobre la rápida antes del inicio del salto.

Los datos se registraron de la siguiente manera: comenzando en el sentido vertical con la lectura más cercana al fondo y posteriormente realizando mediciones cada 5 (cm) hasta la superficie libre del agua; en el sentido longitudinal se comenzó en la sección 0 ubicada en el punto más cercano al inicio del tanque amortiguador la cual se ubicó a 10 (cm) del cambio de pendiente y se continuó con registros cada medio metro hasta una distancia de 6 metros posteriores al inicio, ya que de este punto hacia adelante se observó un contenido de aire muy pequeño por lo que no fue posible continuar con el registro mediante la sonda; y en el sentido transversal se tomaron registros en el tercio izquierdo (a 0.425 m de la pared izquierda) , al centro y en el tercio derecho (a 0.425 m de la pared izquierda), esto con la finalidad de comprobar si el fenómeno era simétrico.

Para simplificar la comprensión de los resultados se presentan, para las tres variables cuantificadas, los valores de cada variable en los tres planos longitudinales de medición: margen Izquierda, Centro y margen Derecha.

Lo primero que llama la atención al analizar los tres escenarios en cada una de las condiciones es lo siguiente

### 7.1 Condición con deflectores

Para el escenario 1 (escalón 41.5 cm) se presenta un salto Hidráulico libre iniciando justo al inicio del tanque con una condición de entrada con dos hileras de chorros a diferentes alturas que coinciden con la altura de las hileras de deflectores, por lo que se tenía una entrada dividida, una hilera de chorros que ingresaban desde el fondo; una segunda hilera de chorros ingresando desde los deflectores de altura de 15 (cm) respecto a la plantilla del tanque amortiguador y una tercera hilera de chorros correspondientes a la segunda hilera de chorros a una altura de 35 (cm) respecto de la plantilla.

Para el escenario 2 (escalón 44.0 cm) se genera un Salto hidráulico parcialmente ahogado ya que el inicio del salto se presenta justo entre la primera y la segunda hilera de deflectores. En esta condición se presenta un ingreso por el fondo, un chorro ahogado correspondiente a la primera hilera de deflectores ingresando al tanque a una altura de 15 (cm) y una hilera de chorros libres ingresando al tanque a una altura de 35 (cm).

Para el escenario 3 (escalón a 46.5 cm) el salto hidráulico se presenta ahogado ya que tanto la primera como la segunda hilera de deflectores ingresan al tanque como chorros sumergidos, lo que en apariencia genera un salto más estable y con mejor comportamiento.

### 7.2 Condición sin deflectores

Para el escenario 1 (escalón 41.5 cm) se presenta un salto Hidráulico barrido, ya que el salto hidráulico se comienza a generar posterior a la sección 1.5 (m), lo cual refleja que al momento de ingresar al tanque

presenta mayor velocidad que el mismo escenario sin deflectores. Posterior a la sección 1.5 se genera un salto hidráulico convencional.

Para el escenario 2 (escalón 44.0 cm) se genera un Salto hidráulico barrido, aunque en menor medida que el anterior ya que comienza su desarrollo posterior a la sección 0.5, lo cual igualmente contrasta con la condición con deflectores ya que, aunque el escalón de salida es mayor no alcanza a iniciar al comienzo del tanque

Para el escenario 3 (escalón a 46.5 cm) el salto hidráulico comienza en el cambio de pendiente con oscilaciones menores haciendo que en ocasiones trabaje ligeramente ahogado.

Al analizar las dos condiciones, para las mismas variables de gasto y altura del escalón de salida, se observa que para la condición sin deflectores se requiere un tanque amortiguador de mayores dimensiones, ya que al momento de colocar los deflectores el inicio del salto se recorre hacia aguas arriba, siendo esto más evidente en el escenario 1 donde se recorre poco más de 1.5 (m). Lo que hace pensar que además de bajar la velocidad del flujo los escalones sirven como disipadores de energía.



*Figura 7.1 comportamiento salto para el escenario 1 con deflectores*

### *7.3 Contenido de aire*

De manera general como se aprecia en la Figura 7.2 se observa un cambio en el patrón del contenido de aire en el salto hidráulico al momento de colocar los deflectores en la rápida. Se genera un menor contenido de aire a lo largo de las secciones con la presencia de los deflectores y se observa cómo se rompe el patrón de un salto hidráulico tradicional como lo es en el caso donde no se cuenta con deflectores ya que los tres escenarios guardan un comportamiento similar con concentraciones de aire grandes cercanas a la superficie en la primera parte del salto hidráulico.



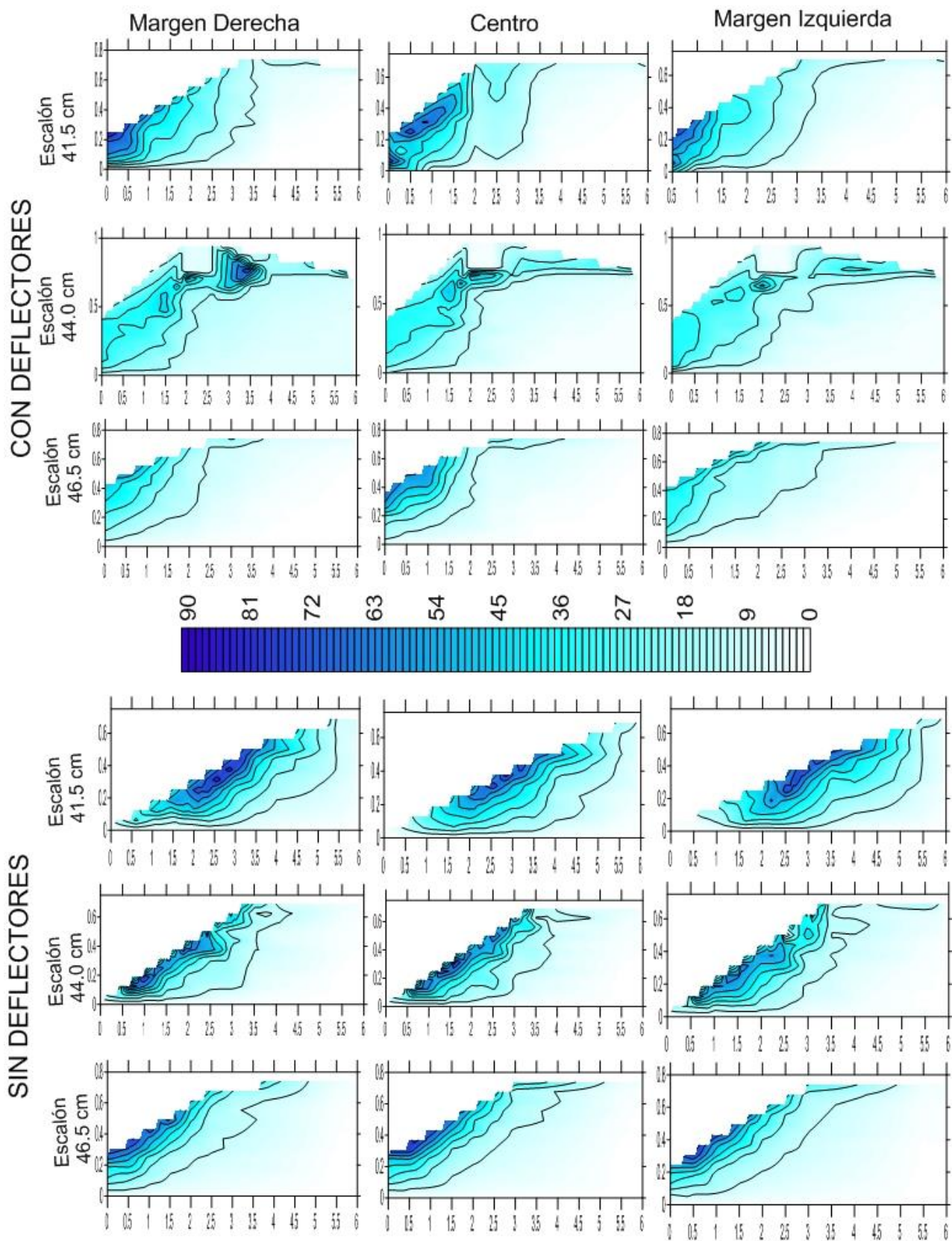
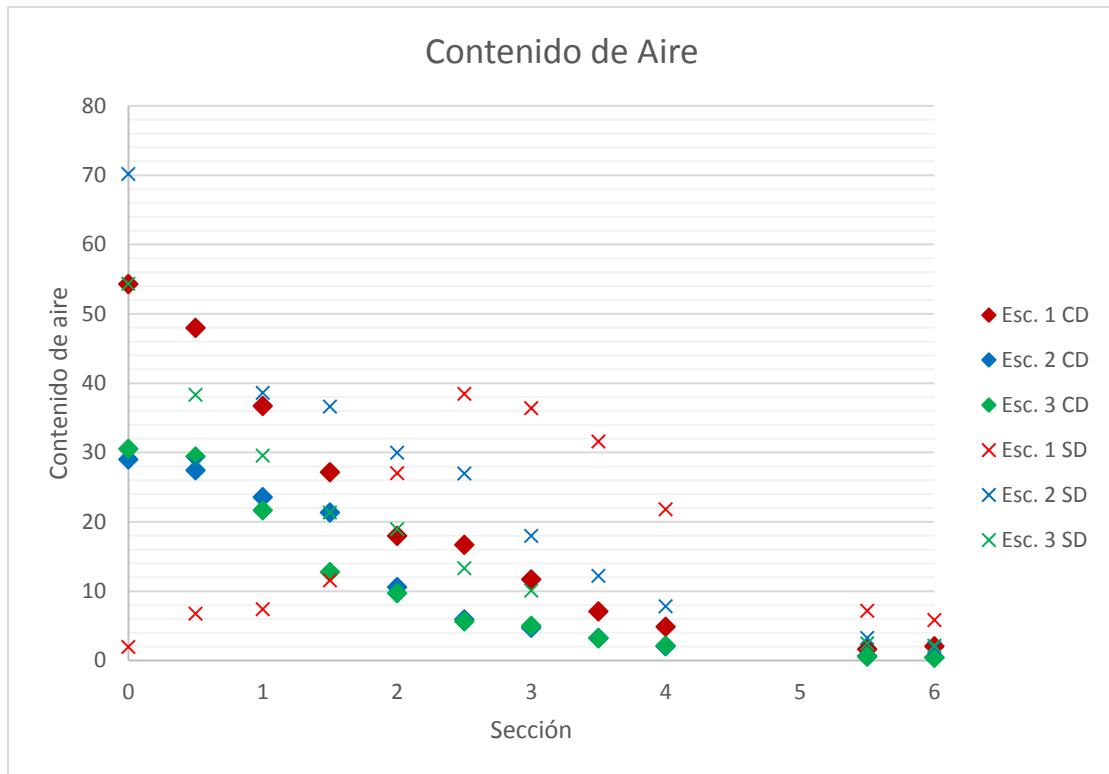


Figura 7.2 Comparación de contenido de aire con deflectores y sin deflectores para los 3 escenarios de medición

En la Gráfica 2 se muestra el promedios de las concentraciones de aire de la margen derecha, izquierda y el centro; para cada sección de medición se representan los diferentes escenarios, el escenario uno con escalón de salida de 41.5 (cm), escenario 2 con escalón de 44.0 (cm) y el escenario 3 con el escalón de 46.5 (cm) para las dos condiciones de flujo CD con deflectores y SD sin deflectores, por lo que los tachos representan la condición sin deflectores y los rombos la condición con deflectores.



Gráfica 2 Promedio de contenido de aire para los tres escenarios y las dos condiciones de descarga con deflectores (CD) y sin deflectores (SD)

Para la condición de deflectores en la rápida en el escenario uno se aprecia que la margen derecha e izquierda son similares a lo largo del salto presentando un contenido de aire del 70% cercano a la superficie libre.

En el plano central se observa un contenido de aire elevado en la zona baja de la sección cero y posterior en la sección 0.5-1 se observa nuevamente otra concentración elevada de aire lo que hace suponer que la presencia de los dos chorros y la entrada desde el fondo están repercutiendo en la cantidad y ubicación de las zonas con concentraciones de aire elevadas.

Posterior a la sección 3.5 se observa claramente una disminución del contenido de aire con un promedio de 5% y siendo todavía menor en la 2 últimas secciones. Para el mismo escenario, pero sin deflectores contrasta la manera en que se distribuye el aire ya que presenta una mayor concentración entre la sección 2 y 4 cercanas a la superficie con picos de contenido de aire cercanos al 80% en este caso tanto las

márgenes como el centro se comportan de manera muy similar a lo largo del salto, donde se tienen las concentraciones en la zona de recirculación del salto hidráulico que se esperaba que fueran las zonas con mayor turbulencia.

De igual manera en la Gráfica 2 se aprecia que para la condición con deflectores se presenta un contenido de aire elevado en las primeras secciones, siendo cerca de 55% en la sección 0 y va disminuyendo de manera gradual hasta la sección 6 con un valor de 2%. Lo que contrasta contra la condición sin escalón que presenta un contenido de aire pequeño en las primeras secciones que es donde el flujo se encuentra en régimen supercrítico dado que no ha comenzado el salto.

En la sección donde inicia el salto se presenta un valor máximo cercano a 40% que posteriormente disminuye hasta un valor cercano a 6 % en la sección 6.

En general, los valores de contenido de aire son menores con la presencia de deflectores teniendo los mayores contenidos de aire en las primeras tres secciones: Ello contrasta contra la condición sin deflectores que presenta mayores contenidos de aire en toda en todas las secciones con contenido de aires mayores tanto en el fondo como cercanos a la superficie lo que podría provocar mayores fluctuaciones de presiones en la plantilla

En el escenario 2 de la Figura 7.2 para la condición con deflector se observa un comportamiento discontinuo lo cual es debido a que se presenta un chorro entrando por el fondo, un chorro ahogado correspondiente a la primera hilera de deflectores y un chorro libre entrando por la superficie libre, esto provoca que se partan las líneas de igual contenido de aire presentando una zona con mayor contenido de aire cercana a la superficie junto a la zona donde se parten las líneas.

En contraste con la condición sin deflectores que presenta un salto hidráulico que comienza posterior a la sección 0.5 a partir de ese punto comienza el salto hidráulico con los mayores contenidos de aire cercanos a la superficie el cual se extiende hasta la sección 3.5-4. De la Gráfica 2 se observa para para la condición sin deflectores comienza con un promedio bajo de 29 % en la sección 0 y disminuye de manera gradual hasta un valor cercano a 0.4% en la sección 6; por otra parte, la condición sin deflectores comienza con un valor muy elevado de contenido de aire cercano al 70% esto debido a la oscilación que presenta el salto en esta zona, en las secciones posteriores comienza a disminuir hasta 1.8%.

En este caso también se presentan mayores valores de contenido de aire cercanos a la plantilla en las primeras secciones donde inicia el salto; además, se observa que los menores contenidos de aire a lo largo de todo el tanque son menores con la presencia de deflectores.

Para el escenario 3 se aprecia que contrasta con los anteriores por tener menor contenido de aire tanto en la condición con y sin deflectores, esto debido a que el salto es ahogado, lo que facilita la disipación de energía por lo que no se genera gran contenido de aire en la zona de recirculación.

Para la condición sin deflectores el contenido de aire es muy bajo presentando los mayores contenidos en la parte superior en la sección 0.5-1.5. Esta condición tiene de manera general el mismo comportamiento, pero con contenidos de aire menores.

En la Gráfica 2 se observa para la condición con deflectores el contenido de aire comienza en el valor de 30 % y termina en un valor de 0.4 % mientras que para la condición sin deflectores empieza en un valor

de 54 % y termina en 2 %. En esta condición también presenta menores valores de contenido de aire con deflectores a lo largo de todas las secciones de análisis.

Para los tres escenarios analizados los contenidos de aire son menores para la condición con deflectores a lo largo de todo el dominio de análisis contrastando el promedio de la seccion final. Para la sección 6 en el escenario uno se presenta un contenido de aire 187% veces menor, en el escenario2 309% veces menor y en el escenario 3 es 391% veces menor. También contrasta la forma en que se distribuye el contenido de aire ya que en la condición sin deflectores es prácticamente la misma configuración siendo el escenario uno el que presenta mayores valores de contenido de aire en todas las secciones los escenarios 2 y 3 presentan prácticamente el mismo comportamiento. Dependiendo de la condición de entrada ya sea con 2 chorros libres, un chorro libre y uno sumergido o los dos chorros sumergidos la distribución del aire en el salto es diferente rompiendo la estructura tradicional y resultando en menores valores de contenido de aire con una configuración que favorece la disipación de energía.

#### 7.4 Índice de Turbulencia

Para el caso del índice de turbulencia se midió el contenido de aire para las mismas condiciones y escenarios. Se registró el contenido de aire y mediante el procesamiento de las señales como en explicó en el capítulo 3.4.3 se obtuvo la intensidad turbulenta y al procesar los resultados se observó un comportamiento diferente para la condición con deflectores y sin deflectores.

Al analizar los datos registrados de las mediciones *con deflectores* se observó que para ciertos valores la gráfica de la correlación cruzada se presentaba recorrida a la izquierda del eje Y lo que hace que los resultados se vuelvan negativos o en algunos casos cero. Este comportamiento se observó de manera general entre la sección 0 a 2.5 donde para las mediciones del centro del tirante hacia la superficie libre se comporta así, entre la sección 3 y 4 este fenómeno no presenta un patrón de comportamiento hay valores negativos tato en la parte inferior como en la parte superior y en las secciones finales 5.5 y 6 este comportamiento se invierte referente a las secciones iniciales ya que los datos negativos se encuentran principalmente en la parte inferior. Cabe destacar que la medición con más valores negativos y cero es el escenario 2 cuando entra agua desde el fondo, un chorro ahogado y un chorro entrando desde la superficie libre esto en las primeras secciones de medición.

Para la condición *sin deflectores* la situación cambia considerablemente ya que son muchos menores los valores que son negativos de la sección 0 a 3 solo se presentan valores negativos en la medición más cercana al fondo en la sección 3.5 y 4 se además de presentarse en la medición del fondo hay algunos valores del centro del tirante hacia la superficie libre. En las últimas 2 secciones de medición se observan valores negativos principalmente en las primeras mediciones hasta el tirante de 0.3 (m).

Se aprecia que el comportamiento diferente se debe a la forma en que se disipa la energía dentro del tanque amortiguador debido a la presencia de los deflectores. Dado que la sonda está orientada en la dirección longitudinal del tanque amortiguador y que para este caso, el índice de turbulencia es la variación de las fluctuaciones solo en la dirección de orientación de la sonda por lo que se presenta unidireccionalmente, es por ello que para la condición sin deflectores donde el flujo predominantemente es en la dirección longitudinal del tanque se tienen valores positivos del índice de turbulencia ya que la autocorrelación y la relación cruzada presentan valores consistentes dado que es fácil identificar la misma burbuja cuando toca una punta y después la otra; lo cual no pasa en la condición con deflectores ya que como se observa en la

zona donde las líneas de flujo no están orientadas en una sola dirección es complicado determinar que sea la misma burbuja la que impacta en una punta y después en la otra. Es por ello que para la condición con deflectores se tiene un mayor número de zonas con valores negativos. Lo cual se aprecia en la Figura 7.3.

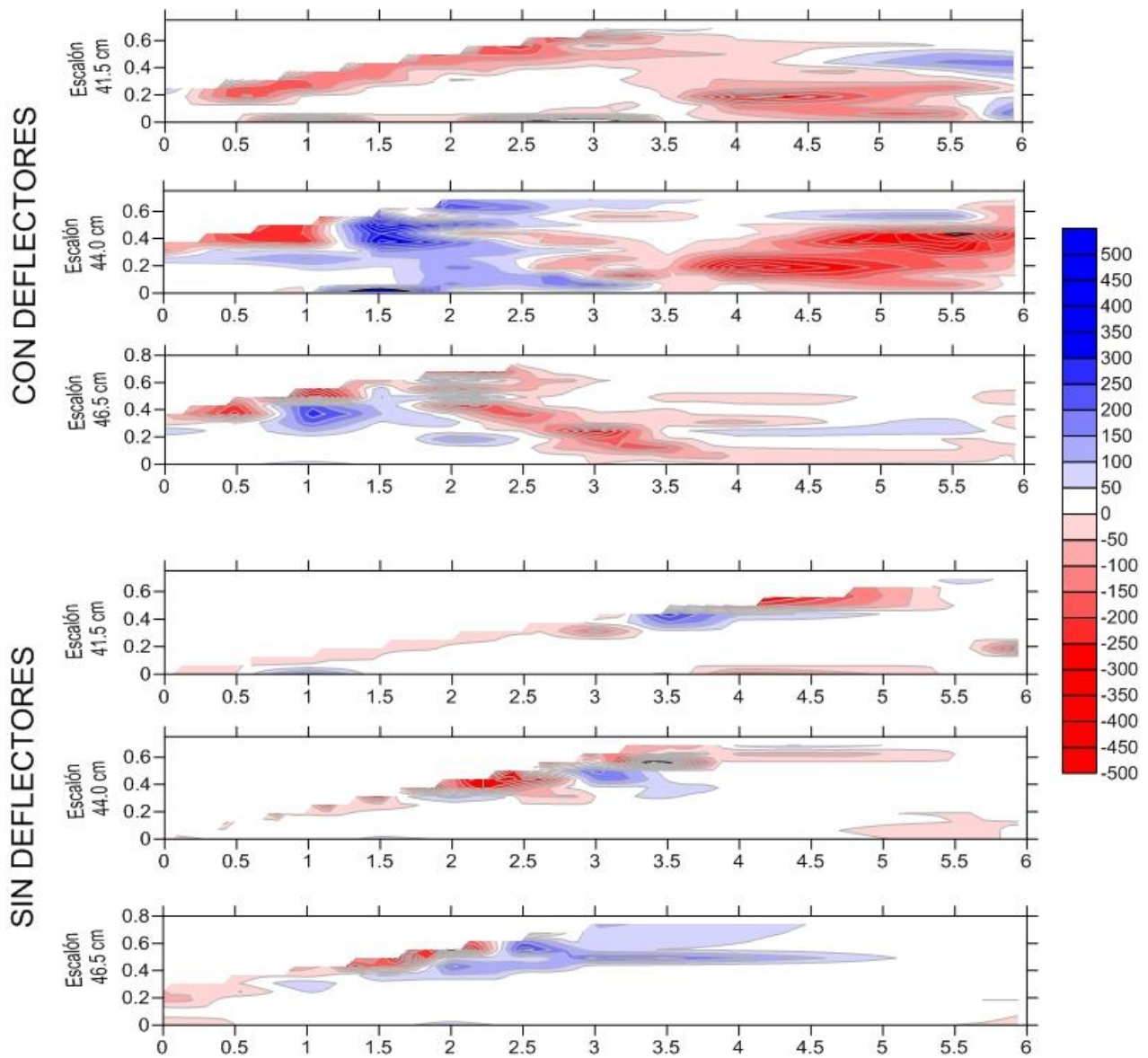


Figura 7.3 Índice de turbulencia con valores positivos y negativos para región central

De la imagen anterior se observa la diferencia entre el comportamiento con deflectores y sin deflectores los valores en rojo muestran las zonas donde las líneas de flujo no presentan una dirección predominante en el sentido de la orientación del sensor, lo que demuestra que al colocar deflectores en la rápida se genera un cambio en las líneas de flujo aún en para las secciones finales del análisis ya que como se muestra en la gráfica con deflectores para el escenario 2 principalmente se tienen resultados negativos en las 2 últimas secciones lo que demuestra que la condición de un chorro entrando sumergido y uno libre modifica las líneas de flujo aun en las últimas secciones del tanque.

Adicionalmente se graficaron solo los valores positivos los cuales representan el índice de turbulencia en la dirección predominante del flujo que en este caso es la longitudinal del tanque amortiguador los resultados se muestran en la Figura 7.4

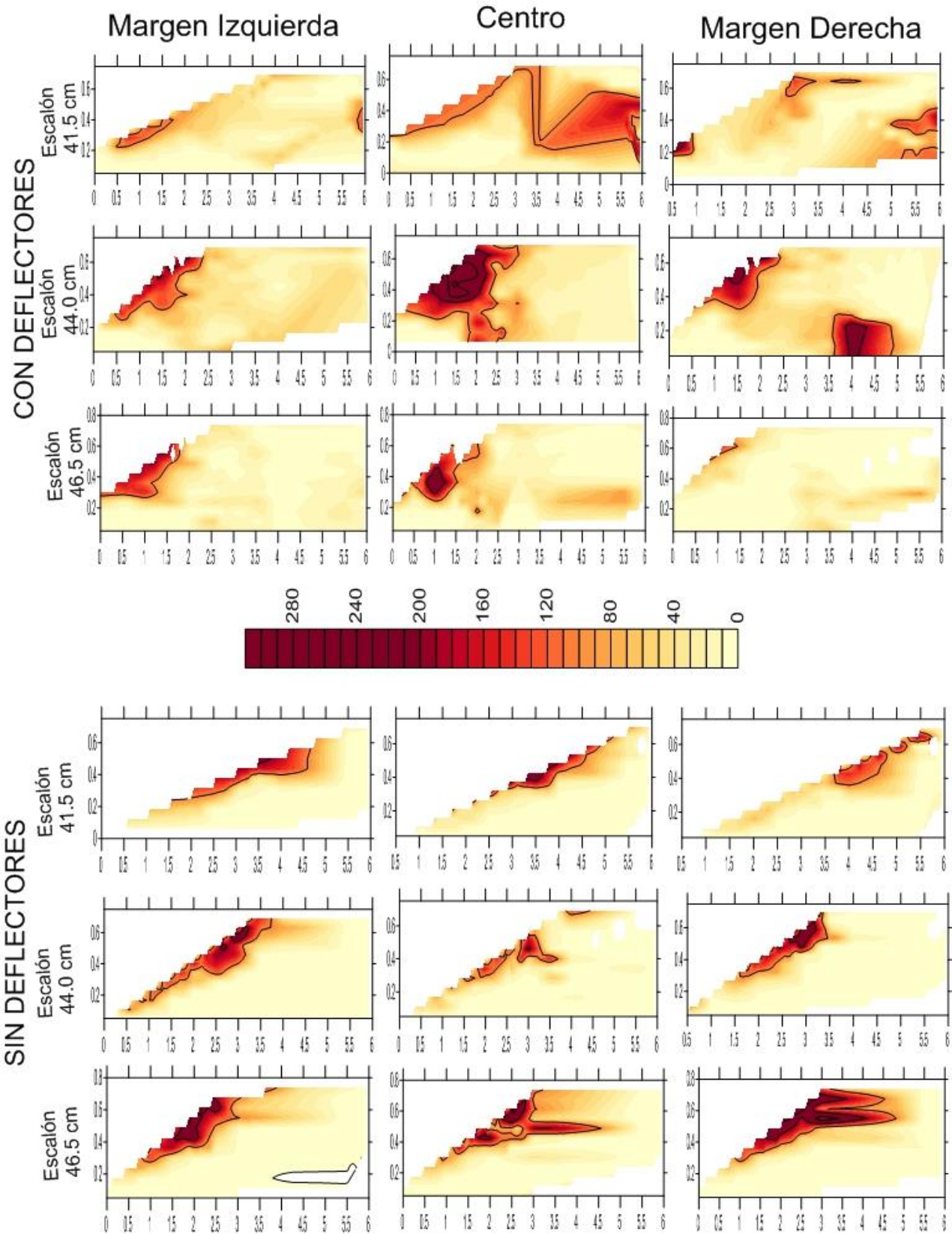


Figura 7.4 Índice de Turbulencia, valores positivos

En la Figura 7.4 se muestran los índices de turbulencia en la dirección longitudinal del tanque, para el escenario 1 *con deflectores* se observan valores más elevados para los 3 planos de medición lo que demuestra que al entrar los 2 chorros libres a diferente elevación la turbulencia y su disipación se recorre dentro del tanque un poco hacia aguas abajo pero se desarrolla casi de manera homogénea en el plano presentando unas zonas con mayor índice en las secciones finales de medición al centro del tirante de medición.

Para el mismo escenario, pero sin deflectores, donde se presenta el salto hidráulico barrido, se presentan valores bajos cercanos a 40% en prácticamente todos los planos de medición solo que la superficie libre presenta valores más elevados lo que se interpreta dado que es un salto barrido, la zona de mayor disipación de energía se podía presentar hacia aguas abajo de la zona de medición.

Para el escenario 2 con deflectores se tiene zonas concentradas con índice de turbulencia mayor que el resto cercanas a 200%. Estas zonas se presentan cercanas a la superficie libre para los 3 planos de medición, para el plano central se observa que el índice de turbulencia presenta valores elevados en la sección 1.5-2.5 la cual es la zona donde cae el chorro libre, lo que hace que al momento de entrar al salto hidráulico crea una zona de turbulencia, en la margen derecha también se muestra una zona entre la sección 3.5-4.5 hasta la elevación de 0.2 (m) con valores cercanos a 200% lo que hace pensar que los chorros libres que entran al tanque al mezclarse con los chorros sumergidos presentan un comportamiento tridimensional creando zonas con turbulencia alta no solo cercanas a la superficie libre sino a lo largo del tanque.

Para el escenario sin deflectores se presenta un comportamiento muy similar al escenario 1 con valores del índice de turbulencia elevados solo cercanos a la superficie libre con valores mayores al 200% el resto de las zonas presenta un comportamiento muy similar con valores menores al 40%.

Para el escenario 3 con deflectores donde los dos chorros están sumergidos y el salto y presenta ahogado, se tiene un índice de turbulencia homogéneo menor a 40% prácticamente en todas las secciones de medición. No se tienen valores elevados del índice de turbulencia cercanos a la superficie libre los valores mayores son cercanos a 120 en la sección 1 y disminuyen rápidamente siendo cercanos a 40% para todo el tirante de la sección 2.5 en adelante. Sin embargo para este mismo escenario, en la condición sin deflectores es donde se presentan los mayores valores del índice de turbulencia, igual que los escenarios anteriores se presentan cercanos a la superficie con valores mayores a 200% entendiéndose de la sección 1 hasta la sección 4.5 sobre la margen derecha; en este caso que es donde el salto hidráulico está comenzando en la sección 0 se observa que es la que mayor índice de turbulencia presenta a lo largo de todos los planos de medición.

### ***7.5 Pendientes del espectro de potencias***

Como se detalló en el capítulo 3.4.3 otro indicador importante para el análisis de turbulencia es la pendiente del espectro de potencia de la energía el cual se obtuvo mediante el análisis de la señal de la sonda de conductividad, para ello se calculó la pendiente del espectro en cada punto de medición las cuales se muestran en la Figura 7.5. De manera general se observa un comportamiento diferente para cada una de las condiciones de entrada. Para la condición con deflectores en la rápida se observa un mayor valor de las pendientes entre la sección 0 y 2 las cuales se encuentran con un mayor valor cercanas al fondo de la plantilla.



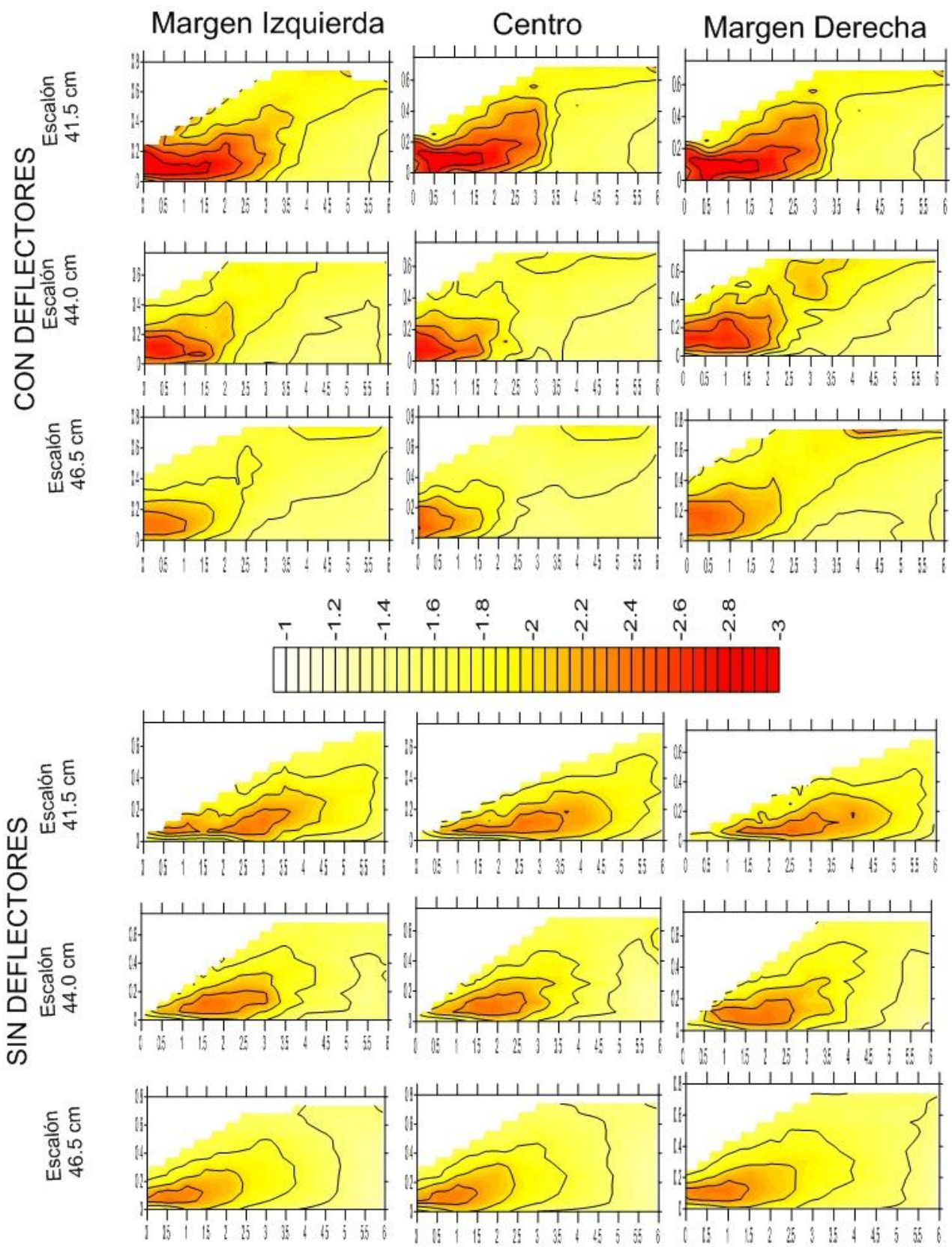


Figura 7.5 Pendiente del espectro de potencia

Para la condición con deflectores en la rápida se observa un mayor valor de las pendientes entre la sección 0 y 2 las cuales presentan valores superiores a 2; este comportamiento contrasta con la condición sin deflectores donde los valores de las pendientes son menores y los valores máximos no se encuentran localizados el inicio del salto.

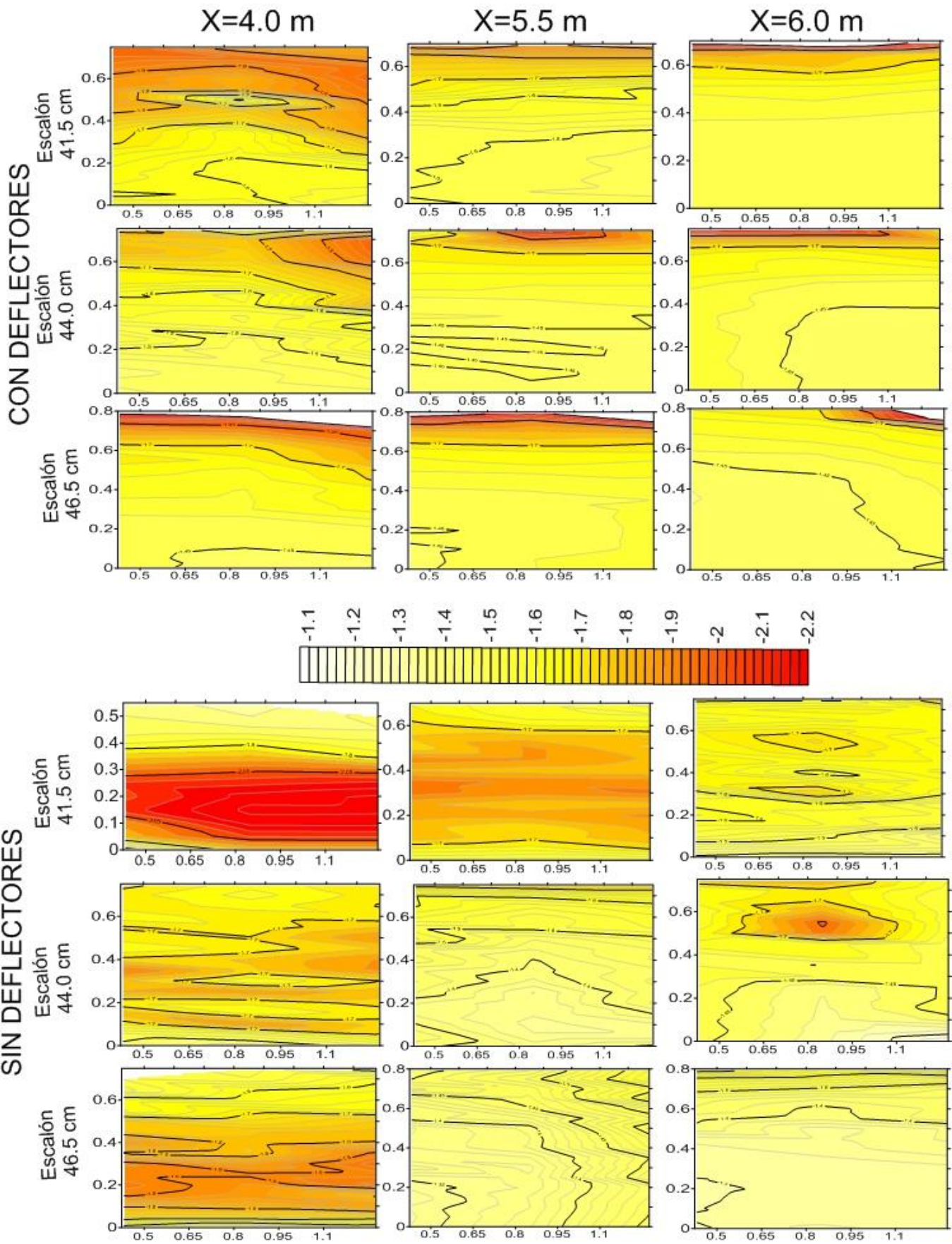
El escenario uno con deflectores es el que presenta los valores más grandes de la pendiente del espectro con valores cercano a 3 entre las secciones 0 y 2 y principalmente en la zonas cercana a la plantilla y media que son las zonas donde entran los chorros con mayor turbulencia. posterior a esta sección se presenta prácticamente el mismo valor de pendiente cercano al 1.8 hasta las secciones finales; esto contrasta con la condición sin deflectores donde se observa que las zonas con mayor turbulencia se localizan cercanas a la plantilla con valores cercanos a -2.4 entre la sección 1.5 y 3.5, siendo la sección 1.5 donde comienza el tanque amortiguador y comenzado allí con los valores más grandes y disipándose rápidamente hasta alcanzar valores cercanos a -1.6,-1.8 en las secciones finales.

Para el escenario 2 con deflectores se observa un comportamiento similar al escenario uno solo que la zona con valores menores a -2 llega solo a la sección 1.5. La zona con mayor valor de la pendiente se encuentra cercano a la plantilla y en la parte media de estas primeras zonas, destaca que existe una pequeña zona para la margen derecha donde se presentan valores superiores a dos aproximadamente en la región donde entra el chorro libre, esto contrasta con la margen izquierda la cual se comporta muy similar a la región central, lo que también contribuye a demostrar que el flujo es completamente tridimensional. La condición sin deflectores en la cual el salto hidráulico comienza entre la sección 0.5-1, posterior a esta sección se presentan pendientes con valores menores a -2, solo en una zona pequeña cercana a la plantilla y se extiende hasta la sección 2.5, posterior a esta sección se presentan valores incluso mayores a -5/3 hasta la sección final.

El escenario 3, (donde se presenta una condición ahogada para ambos condiciones de entrada) para la condición con deflectores se presentan valores cercanos a -2,2 solo en las primeras tres secciones de medición, en la zona cercana a la plantilla y centro, posterior a esta sección se observa un comportamiento homogéneo con valores cercanos a -5/3 hasta la última sección de medición, aunque de igual manera que el escenario anterior se observa un comportamiento diferente para la margen derecha con una zona con valores menores a 2 sobre la superficie libre de la sección 4 a la 5.5.

Para la condición sin deflectores el salto se encuentra ligeramente ahogado presentando un comportamiento similar a los escenarios anteriores solo que ahora los valores menores inician en la sección cero y se extienden solo a la 2, presenta un comportamiento muy similar las tres secciones longitudinales medidas con valores cercanos a -1.8 entre las secciones 2 y 3.5 y posterior a la sección 4 presenta valores incluso menores a 1.6.

Para ver el valor de la pendiente con mayor detalle se presenta la Figura 7.6 de las secciones 4, 4.5 y 6 tanto de la condición con deflectores como sin deflectores para la sección transversal central con los siguientes resultados:



*Figura 7.6 Pendiente del espectro de potencia para las secciones 4, 5.5 y 6 para la región central*

Como se observa para la condición con deflectores se presenta para los tres escenarios valores cercanos a -2 solo cercanos a la superficie, se observa que para estas secciones transversales se presentan valores desde la plantilla hasta un tirante del 0.6 m con prácticamente un valor constante muy cercano a -1.7. Para la condición sin deflectores no se presenta un patrón claro respecto al valor de la pendiente, para el escenario uno donde se presenta un salto barrido para el escenario uno se presentan una zona con valores superiores a -2 en la mitad inferior del tirante, en la sección 5.5 se observa cómo aumentó el valor pero no se presenta un valor homogéneo de la pendiente, finalmente solo en la sección 6 presenta un valor homogéneo cercano a -1.7; para el escenario 2 en la sección 4 se presentan zonas con valores cercanos a -2 y zonas cercanas a -1.7 pero es una zona de transición entre esos valores, en la sección 5.5 se presentan valores mayores a -1.6 prácticamente en toda la sección, sin embargo para la sección 6 se presenta nuevamente una pequeña zona con valores cercanos a 2 en el tercio superior, lo que hace suponer que la energía se disipa en zonas dentro del flujo pero no se realizará de manera homogénea en toda la sección; en el escenario 3 para la sección 4 presenta un comportamiento similar al escenario 2 con valores cercanos a -2 en la mitad inferior y valores cercanos a -1.7 en la parte superior, en las secciones 5.5 y 6 se presentan valores mayores de 1.5 prácticamente en toda la sección transversal, lo que hace suponer que para la condición sin deflectores la condición de salida no modifica de manera considerable la disipación de la turbulencia dentro del salo hidráulico, dado que en las últimas secciones no se presentan valores cercanos a -5/3.

## 8 Conclusiones y recomendaciones

Se demostró que la turbulencia y con ello la disipación de energía, se modifica dependiendo de la condición de entrada al tanque amortiguador mediante la colocación de deflectores en la rápida. Con ellos se logra una disipación de energía más eficiente, ya que se desarrolla en una sección más corta, consiguiendo con ello hacer tanques amortiguadores más cortos; cumpliendo así, con uno de los objetivos de este tema de investigación doctoral.

El dispositivo de medición mediante sondas de conductividad para una frecuencia de muestreo de 20 Hz por sensor, fue adecuado para el registro del cambio de fase, aún en la zona de la rápida donde se presentan velocidades cercanas a los 7 m/s. Además, estas sondas pueden ser reparadas en corto tiempo y son económicas.

La técnica de postprocesamiento de umbrales adaptables se adaptó bien al fenómeno que se quería registrar ya que dadas las variaciones del voltaje de una manera tan rápida como la que se presenta en el caso de estudio; requería implantar al dispositivo de medición, de una programación capaz de obtener valores con exactitud así como el momento en que se está registrando aire o agua, lo cual se logró con la propuesta de umbrales adaptables.

Se demostró que contar con una pila central en un vertedor aumenta el contenido de aire a lo largo de toda la rápida, aun después de la presencia de un aireador. Esta condición está relacionada proporcionalmente con el gasto; pues a mayor gasto, resulta más grande la variación del contenido de aire.

Con la colocación de la pila se incrementa el beneficio de los aireadores en el vertedor, ya que al contar con mayor contenido de aire cercano en las plantillas, se amplía la distancia de ubicación entre aireadores, lo que impacta en el aspecto económico.

El modelo matemático representó bien los parámetros básicos del flujo como son velocidades y tirantes; sin embargo, subestima el contenido de aire y la intensidad turbulenta. Por lo que, no se recomienda realizar solamente modelación matemática del flujo tridimensional y turbulento que se presenta en tanque amortiguadores similares al de este estudio, ya podría repercutir en un mal diseño del mismo.

Al colocar deflectores en la rápida tiene como consecuencia que los tanques amortiguadores sean más cortos; ya que para un mismo gasto y para la misma condición de salida, la ausencia de deflectores hace que el salto hidráulico se barra.

Para el caso que tiene un escalón de salida de 41.5 cm, con la presencia de deflectores, el salto hidráulico inicia justo en el cambio de pendiente de la rápida, que es donde comienza del tanque. Para las mismas condiciones de gasto y salida, con un tanque sin deflectores, el salto hidráulico se barre entre 1.5 y 2 m , lo que implica que el tanque tenga una longitud más corta, lo que en prototipo representaría un menor costo, ya que se reduce la longitud de excavación.

Para la condición sin deflectores, se consideró una longitud del salto hidráulico de 6m; sin embargo, se observó que al colocar los deflectores en la rápida las zonas con mayor contenido de aire terminan a una longitud de 4m y sin deflectores se extienden hasta los 6 m.

La turbulencia para la condición con deflectores se encuentra que es mayor al principio del salto hasta la zona 4.5-5 m. Por lo que se considera que para las mismas condiciones de flujo, es posible recortar el tanque en una longitud de por lo menos 1 m; ello representa el 16% de la longitud, pero se debe de verificar dado la disparidad que presentan las ecuaciones usadas para calcular esta longitud.

Se observó que tanto el contenido de aire como el índice de turbulencia en el sentido longitudinal del tanque y de la pendiente del espectro de potencia, están ligados. De manera general, las zonas con mayor contenido de aire también son las zonas con mayor porcentaje de índice de turbulencia, coincidiendo en estas zonas con valores de pendiente del espectro de potencia son cercanos a  $-5/3$ .

La presencia de deflectores en la rápida hace que en las parte final del tanque amortiguador, se tenga un menor contenido de aire respecto al caso que no tiene deflectores en la rápida, contrastando el promedio en el extremo aguas abajo. Debido a que para los escenarios uno, dos y tres, es menor la cantidad de aire en la condición con deflectores registrándose menor contenido en 187%, 309% y 391% respectivamente.

Las zonas de mayor disipación de energía se localizan cerca de la superficie libre del agua desde la primera sección hasta la sección 3, donde los valores de contenido de aire son próximos a 50%; lo que genera índices de turbulencia mayores a 120% por lo que se presentan valores de pendiente del espectro de potencias del orden de  $-5/3$ . Lo que indicaría que agregar aire al flujo ayuda a la disipación de energía. Sin embargo, las zonas con mayor contenido de aire no son necesariamente las que mejor estén disipando la energía, lo cual se comprobó mediante el análisis de los contenidos de aire en las secciones finales porque tuvieron un mayor contenido de aire los tres escenarios para la condición sin deflectores.

El índice de turbulencia fue mayor para la condición con deflectores y del análisis de las pendientes de los espectros de potencia, se afirma que la energía se disipa más eficientemente para la condición con deflectores como se apreció en los tres escenarios de análisis realizados.

Al colocar deflectores en la rápida independientemente de la condición de salida del flujo, se presentan valores cercanos a una pendiente de  $-5/3$  en las secciones posteriores a 2.5, lo que indica que se disipa la energía de una manera adecuada por medio de remolinos que cada vez fueron más pequeños hasta un tamaño donde las fuerzas viscosas cobrar relevancia para disipar la energía en forma de calor. Esto no se logró en la zona de análisis para la condición sin deflectores, ya que las partes donde el espectro tiene una pendiente cercana a  $-5/3$  no están claramente identificadas y ocurren de manera aislada.

El mejor comportamiento del salto hidráulico se tuvo con la combinación de deflectores en la rápida y el escenario tres; es decir con un salto ahogado. Esto llamó la atención dado que no es la condición que presentó mayores contenidos de aire ni los porcentajes más grandes de índice de turbulencia; sin embargo, fue la más homogénea en cuanto al valor del espectro de potencias, lo que hizo suponer que la mayor cantidad de energía se disipó en la sección previa a los puntos de medición que es donde se localizan los escalones; además, en las zonas posteriores se disipó homogéneamente la energía pues presentó valores constantes de  $-5/3$  hasta la sección más alejada.

Se observa que para las dos condiciones de medición, el salto hidráulico es tridimensional ya que presenta valores diferentes tanto para la margen derecha, centro e izquierda, pero esta diferencia se hace mayor para la condición sin deflectores donde el comportamiento de la margen derecha en comparación con la margen izquierda presenta mayores variaciones, siendo el escenario dos en el que se observó un flujo más irregular dada la interacción que generaba el flujo que ingresaba por el fondo con la hilera de chorros sumergidos y por los chorros libres que entraban por la superficie libre.

Se recomienda continuar con la fase de experimentación, ya que se deben realizar comprobaciones cambiando algunas de las variables no analizadas como probar otros gastos y modificar las dimensiones de los deflectores.

Será conveniente incluir mediciones de presión en la plantilla del tanque, ya si bien con este estudio se verificó que es posible modificar la disipación de la energía dentro del tanque amortiguador dada la presencia de deflectores en la rápida, no se está tomando en cuenta como ese cambio de los patrones de turbulencia afectan la plantilla del tanque, si es que se presentaran fluctuaciones de presión importantes.

## 9 Bibliografía

- Almeida Nathalee, Barros Jannayna, Soares Heliana, Adriano Bresolin, Guerreiro Ana, Brandao Glaucio (2009) “A new computational tool for voice analysis based on FFT, Wavelet transform and spectrogram” Proceedings of the ASME 2009 Summer Bioengineering Conference, CA, USA.
- Berselli, Luigi C., Iliescu Train and Layton William J. (2005) “Mathematics of Large Eddy Simulation of turbulent flows” first edition Springer.
- Biferale L., Musacchio S. and Toschi F. (2012) “Inverse energy cascade in three-dimensional isotropic turbulence,” Phys. Rev. Lett. 108, 164501.
- Cain P., Wood I. R. (1981) Instrumentation for Aerated Flow on Spillways, Journal of the Hydraulics Division, ASCE. 107(11), 1407-1424.
- Capote J.A., Alvear D., Abreu O.V., Lázaro M. and Espina P. (2008) “Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios” Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 24 No. 3 227-245.
- Castilla, R. (2001). *Simulación cinemática de flujo turbulento. Aplicación al estudio de la estructura de la turbulencia y la dispersión turbulenta* (Doctoral dissertation, PhD Thesis UPC, Barcelona).
- Ceretani, Andrea N., Sanziel Ma. Cristina and Portapila Margarita (2012) “Resolución numérica del problema de flujo en un canal con escalón utilizando OpenFOAM” Encuentro de Investigadores en formación en recursos hídricos.
- Chanson, H. (2013) “Hydraulics of aerated flows: Qui pro quo?” Journal of Hydraulic Research Vol. 51 No.3 pp 223-243.
- Chanson, H. (2007). Bubbly flow structure in hydraulic jump. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 26(3), 367-384.
- Chanson H. and Toombes L. (2002) “Air Water flows down stepped chutes: Turbulence and flow structure observations”. Journal of Multiphase Flow 28(11) 1737-1761.
- Chanson H. (1988) “A Study of Air Entrainment and Aeration Devices on a Spillway Model”, ph D. thesis, Dept. of Civil Engrg., University of Canterbury, New Zealand.
- Chen J.G., Zhang J.M., Xu W. L. and Peng Y. (2014) “Characteristics of the Velocity Distribution in a Hydraulic Jump Stilling Basin with Five Parallel Offset Jets in a Twin-Layer Configuration” Journal of Hydraulic Engineering ASCE 140:208-217.



- Chepurnov A. and Lazarian A. (2010) “*Extending the big power law in the sky with turbulence spectra from Wisconsin H $\alpha$  Mapper data,*” *Astrophys. J.* 710, 853–858.
- Chow Ven Te (2004) “*Hidráulica de Canales Abiertos*” McGraw-Hill.
- Cortés, J. A., Medina, F. A., & Chaves, J. A. (2007). Del análisis de fourier a las wavelets análisis de fourier. *Scientia et technica*, 1(34).
- Davidson P.A. (2004) “*Turbulence An Introduction for Scientist and Engineers*” published in the United States by Oxford University Press Inc., New York.
- Deardorff, J. W. (1970). A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 41(2), 453-480.
- Deng, J., Xu, W., Zhang, J., Qu, J., & Yang, Y. (2008). A new type of plunge pool—Multi-horizontal submerged jets. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 51(12), 2128-2141.
- Devi T. T. and Kumar B. (2015) “Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow in Stirred Tank with a Curved Blade Impeller” *Journal of Engineering Thermophysics* Vol. 24 No.2 pp. 152-168.
- Duarte, Rafael (2013) “Air Concentration in Plunge Pools Due to Aerated Plugging High-Velocity Jets and Dynamic Pressures in Underlying Fissures” proceeding of 2013 IAHR World Congress.
- Felder, S., & Chanson, H. (2017). Air–Water Flow Patterns of Hydraulic Jumps on Uniform Beds Macroroughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(3), 04017068.
- Felder, S. Chanson H. (2012) “*Air-water flow measurements in instationary free-surface flows: A triple decomposition technique*” Hydraulic Model Report No. CH85/12, School of Civil Engineering, University of Queensland, Brisbane Australia.
- Flow Science, Inc (2010) “FLOW-3D Hydraulics Exercise Sessions” version 9.4 the favor advantage.
- Flow Science, Inc (2012) “FLOW-3D Documentation” Release 10.1.0. noviembre 2012.
- Francis H. Harlow and Paul I. Nakayama (1967) “*Turbulence transport equations*” *Physics of Fluids*, 10(11), 2323–2332.
- Ruff, J. F., & Frizell, K. H. (1994). Air concentration measurements in highly-turbulent flow on a steeply-sloping chute. In *Hydraulic Engineering* (pp. 999-1003). ASCE.
- Díaz, G., & Manuel, J. (2014). Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra*, 30(47), 79-102.

- Gonzales C. A., Takahashi M. and Chanson H. (2005) “effects of step roughness in skimming flows: an experimental study” Research Report CE 160. Department of civil engineering The University of Queensland.
- Haberman, W. L., & Morton, R. K. (1953). An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids (No. DTMB-802). David Taylor Model Basin Washington DC.
- Hirt C. W. and Nichols B.D. (1981) “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries” Journal of Computational Physics. Nuevo Mexico pp. 201-225.
- Höfling T., Isermann R (1996) “Fault detection based on adaptive parity equations and single-parameter tracking” Control Eng. Practice, Vol. 4, No. 10 pp 1361-1369.
- Isermann R. (2006) “Fault-Diagnosis System an introduction from fault detection to fault tolerance”, Springer.
- Jiménez, S. J. (2011) “Las teorías de la turbulencia y la imaginación en la física” Discurso leído en el acto de su recepción como académico de número. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Joseph J. Orlins and John S. Gulliver (2000) Dissolved gas supersaturation downstream of spillway II: Computational model, Journal of Hydraulic Research, 38:2, 151-159.
- Kanski M., Arvidsson P., Töer J. Borgquist E., Heiberg E., Carlsson M. and Arheden H. (2015) “Left ventricular fluid kinetic energy time curves in heart failure from cardiovascular magnetic resonance 4D flow data” Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance.
- Kolmogorov A. N. (1941 a), “The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number,” Dokl. Akad. Nauk SSSR 30, 301–305
- Kolmogorov A. N. (1941 b), “Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence,” Dokl. Akad. Nauk SSSR 32, 16–18.
- Kucukali Serhat and Chanson Hubert (2007) “Turbulence in Hydraulic Jumps: Experimental Measurements. Hydraulic Model Report series CH CH62/07, Civil Engineering, The University of Queensland.
- Larry Weber, Heqing Huang, Yong Lai & Andrew McCoy (2004) “Modeling total dissolved gas production and transport downstream of spillways: Three-dimensional development and applications”, International Journal of River Basin Management, 2:3, 157-167.
- Leng X., Chanson H., Gordos M. and Riches M. (2019) “Developing Cost-Effective Design Guidelines for Fish-Friendly Box Culverts, with Focus on Small Fish”. Environmental Management. Springer, pp:747-758.

- Liu P. L.-F., Wu T.-R., Raichlen F., Synolakis C.E. and Borrero J.C. (2005) “Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses” *Journal of Fluid Mechanics* vol. 536, pp. 107-144.
- Lu Lin, Li Yu-cheng and Teng Bin (2008) “Numerical simulation of turbulent free surface flow over obstruction” *Journal of Hydrodynamics* 2008,20(4):414-423.
- Luna-Bahena, J.C.; Pozos-Estrada, O.; Ortiz-Martínez, V.M.; Gracia-Sánchez, J. (2108) “Experimental Investigation of Artificial Aeration on a Smooth Spillway with a Crest Pier”. *Water* 2018, 10, 1383.
- Luna B. J. César, Salas V. Cristian, Gracia S. Jesús & Ortiz M. Víctor M. (2015) “Comparative analysis of the modification of turbulence and its effects on a trapezoidal section stilling basin” 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands.
- Matos J., Frizell K. H., André S. and Frizell W (2002). *On the Performance of Velocity Measurement Techniques in Air-Water Flows. Hydraulic Measurements and Experimental Methods.*
- Méndez Díaz Santos (2008) “Medida experimental de la concentración de área interfacial en flujos bifásicos finamente dispersos y en transición” Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Instituto de Ingeniería Energética, Departamento de Ingeniería Química y Nuclear.
- Minnan Liu, Nallamuthu Rajaratnam and David Z. Zhu (2004) “Turbulence Structure of Hydraulic Jumps of Low Froude Numbers” *Journal of Hydraulic Engineering ASCE/June 2004/511.*
- Moint P., Reynolds W. C., and Ferziger J. H. (1978) “Large eddy simulation of incompressible turbulent channel flow” *Thermosciences Division Department of Mechanical Engineering. Stanford University. Stanford, California.*
- Monin A. S. and Yaglom A. M. (1971) “Statistical fluid mechanics: Mechanics of turbulence” MIT Press, Cambridge, Mass. Vol. 2.
- Murzyn, F., Mouaze, D and Chaplin J.R. (2005) “Optical fiber probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps” *International journal of Multiphase Flows* No. 31 pp. 141-154.
- Nakagawa Hiroji, Nezu Iehisa and Ueda Hiroshi (1975) “Turbulence of open channel flow over smooth and rough bed” *PROC. OF Japan Soc. Civil Engrs.* No. 24.
- Neal, L. G., Bamkoff, S. G. (1963) “A high resolution resistivity probe for determination of local void properties in gas-liquid flow” *AIChE Journal.* Vol. 9, Issue 4, pp. 490-494.
- Nezu Iehisa and Nakagawa Hiroji (1993) “Turbulence in open-channel flows” A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

- Ortiz M. victor M., Gracia S. Jesús y Luna B. J. César (2014) “Estudio de la modificación de la turbulencia en tanques amortiguadores trapeciales” XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago de Chile.
- Papanicolaou, A.N., Kramer, C. M., Tsakiris, A.G., Stoesser, T., Bomminayun, S., and Chen, Z. (2012) “Effects of a fully submerged boulder within a boulder array on the mean and turbulent flow fields: Implications to bedload transport” *Acta Geophysica*. Vol. 60 No. 6 pp: 1502-1546.
- Pfister Michael (2014) “History and significance of the Morton number in hydraulic Engineering” *Journal of Hydraulic Engineering* 140(5):02514001.
- Pfister M. and Hager W. H. (2010) “Chute aerators I: Air transport characteristics” *Journal of Hydraulic Engineering*. 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000189.
- Pope, S. B. (2000) “Turbulent Flows”, New Delhi: Cambridge University Press.
- Rodi W. (1980) “Turbulence models and their application in hydraulics: a state-of-the-art review” International Association for Hydraulic Research (IAHR), Delft, The Netherlands.
- Salas Vásquez Cristian A. (2015) “Análisis comparativo del efecto de una rápida en la modificación de la turbulencia y sus efectos en un tanque amortiguador trapecial” Tesis para obtener el Grado de Maestría. UNAM.
- Schimidt E. (1934) “Ähnlichkeitstheorie der bewegung von flüssigkeits-gasgemischen (Similarity theory of motion in fluid-gas mixtures)” *Forschungsheft*, 365. VDI Berlin
- Shen Xiuzhong, Saito Yasushi, Mishima Kaichiro, Nakamura Hide (2005) “Methodological improvement of an intrusive four-sensor probe for the multi-dimensional two-phase flow measumement” *International Journal of Multiphase Flow* pp. 593-617
- Shen X. and Warhaft Z. (2002), “The anisotropy of the small scale structure in high Reynolds number ( $R\lambda \sim 1000$ ) turbulent shear flow,” *Journal of Physical Fluids* 12, 2976–2989.
- Shigematsu Takaaki. Liu Philip L.F. and Oda Kazuki (2004) “Modelación numérica de estados iniciales de ondas de rotura de presas” *Journal of Hydraulic Reserch* Vol. 42 No. 2. Traducido por Juan Francisco Navarro, Universidad de Granada.
- Shojaee Fard M.H. and Boyaghchi F.A. (2007) “Studies on the Influence of Various Blade Outlet Angles in a Centrifugal Pump when Handling Viscous Fluids” *American Journal of Applied Sciences* ISSN 1546 -9239.
- Simonnet, H. Gentric, C. Olmos, E. and Midoux, N. (2007) “Experimental determination of the drag coefficient in a swarm of bubbles” *Chemical Engineering Science* 62 pp. 858-866.
- Smagorinsky J. (1963) “General circulation experiments with the primitive equations. I the basic experiment” *Monthly Weather Review* vol. 91 No. 3 Washington D.C.

- Steven, C. Wilhelms, Thomas, E. Murphy Jr y Laurin I. Yates (2003) “Lower Monumental spillway hydraulic model study” US Army Corps of Engineers, Engineer research and development center, Coastal and hydraulics laboratory.
- Stutz, B. and Reboud J.-L. (1997) “Two- phase flow structure of sheet cavitation” *Physics of Fluids*
- U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. (1996a). “Data report, Ice Harbor section study” CEWES-HS-S Memorandum, 18 March 1996, Vicksburg, MS.
- Idem. (1996b). “Data report, John Day Spillway section model, Columbia River, OR,” CEWES-HS-S Memorandum, 3 June 1996, Vicksburg, MS.
- Idem. (1999) “Data report, Modified Bonneville deflector, Bonneville Spillway section model,” CEWES-CR-F Memorandum, 7 April 1999, Vicksburg, MS.
- Vallenilla Rafael, Uzcátegui Guillermo, Mijarez Gilberto y Mireles David. (2009) “Teoría de Señales” Colegio Universitario de Caracas, República Bolivariana de Venezuela.
- Wang H. and Chanson H. (2019) “Characterisation of transverse turbulent motion in quasi-two-dimensional aerated flow: Application of four-point air-water flow measurements in hydraulic jump” *Experimental Thermal and Fluid Science*. Elsevier pp: 222-232.
- Wang H. and Chanson H. (2018) “Modeling upstream fish passage in standard culverts: Interplay between turbulence, fish kinematic, and energetics. *River Res Applic.* pp: 244-252.
- Wang H. and Chanson H. (2015) “Two-dimensional bubble clustering in hydraulic jumps” *Experimental Thermal and Fluid Science* pp: 711-721.
- Wang H. and Chanson H. (2013) “Air entrainment and turbulent fluctuations in hydraulic jumps” *Urban Water Journal* Vol. 12 No 6 pp:502-518.
- Weitkamp, D.E. and Katz, M. (1980). “A Review of Dissolved Gas Supersaturation Literature,” *Trans. of the American Fisheries Society*, 109(6), 659–702.
- Yang R, Zheng R., Zhou F. and Liu R (2009) “Measurement of two-dimensional bubble velocity by using tri-fiber-optical probe”, the 6th International Symposium on Measurement techniques for multiphase flows. Naha, Okinawa, Japan.
- White, F. M, (1991) “Viscous Fluid Flow” University of Rhode Island. Second edition McGraw-Hill.
- Zhang G. and Chanson H. “On void fraction and flow fragmentation in two-phase gas-liquid free-surface flows” *Mechanics Research Communications* 96 pp: 24-28.

- Zhi W. L., Wen X. H. and Zhong D. Q. (2012) “Large Eddy Simulation of Flow Structure in the Near Region of a Circular Wall Jet” International Conference on Advances in Computational Modeling and Simulation. 31 (2012)713-722.

# 10 Anexos

## 10.1 *Índice de Turbulencia*

```
clc;clear; close all;
Path=uigetdir;
if Path==0
    return
end

prop=dir (fullfile (Path,'*.txt'));
nombres={prop.name};

if isempty(nombres)
    disp ('No hay archivos en la carpeta');
    return
end

n1=size(nombres);
n1=n1(2);

Path=strcat (Path,'\');
ex=exist('res.txt','file');
if ex==2
    delete res.txt
end

for j=1: n1
Name=fullfile (Path, nombres (:));
datos=dlmread(nombres{j}, '\t', 3);

x=datos(:,1);% Datos primer sensor
y=datos(:,2); % Datos segundo sensor
k=round(sqrt(length(x))+4000); %desfase de la señal
dx=0.005;
rxy=crosscorr(x,y,k);
rxx=autocorr(x,k);

rxymax=max(rxy);
lag=find(rxy==rxymax);
h=lag-(k+1);
Tmax=(h)*(1/20000);
rxy_2=(rxymax/2);
[minimo, position] =min(abs(rxy_2-rxy));
rxymed=rxy(position);
lag2=find(rxy==rxymed);
lag3=lag2-lag;
tau=lag3*(1/20000);

rxxmax=max(rxx);
rxx_2=(rxxmax)/2;
```

```

[minimum1, position1] =min(abs(rxx_2-rxx));
rxxmed=rxx(position1);
lag4=find(rxx==rxxmed);
T_2=lag4*(1/20000);

%Integral bajo la curva
x1=linspace(-1*max((length(rxy))/2), max((length(rxy))/2), length(rxy));
x2=linspace (0, max(length(rxx)), length(rxx));
%x1_a=x1(:);
%x2_b=x2(:);
%pos=(x1_a>=rxymax) &(x1_a<=max(length(rxy)));
%pos1=(x2_b>=rxxmax) &(x2_b<=max(length(rxx)));
%a=x1(pos);
%b=x2(pos1);
%Txy=trapz (a, rxy(pos));
%Txx=trapz (b, rxx(pos1));
%Tur= ((2^0.5) / (pi^0.5) *Tmax) *(sqrt((Txy/rxymax) ^2-(Txx^2)));

%Turbulencia y velocidad media
I_turb=0.851*((sqrt((tau^2) -(T_2^2))) / (Tmax));
Vel=dx/(Tmax);

%%Datos de salida
disp (sprintf ('%f', I_turb));
disp (sprintf ('%f', Vel));
%disp (sprintf ('%f', Tur));

%imprimir en archivo
res1=sprintf ('%f\t%f', I_turb, Vel);
idf2 = fopen('res.txt','a');
count = fprintf (idf2, '%c', res1);
count = fprintf (idf2, '\n');
fclose(idf2);

%grafica
figure1 = figure;

% Create axes
axes1 = axes ('Parent', figure1);
hold(axes1,'on')
plot (x1, rxy, 'b')
plot (x2, rxx, 'r')
legend ('Correlación cruzada','Autocorrelación')
title ('Correlación de las señales')
xlabel('Desfase')
ylabel('|R|')
grid(axes1,'on');

hold off

end

disp ('Revisar archivo res.txt')

```



```
beep
```

## 10.2 Espectros de potencia

```
clc; clear; close all;
Path=uigetdir;
if Path==0
    return
end

prop=dir (fullfile (Path, '*.txt'));
nombres={prop.name};

if isempty(nombres)
    disp ('No hay archivos en la carpeta');
    return
end

n1=size(nombres);
n1=n1(2);

pendientes = zeros (n1, 2); %% matriz de pendientes

for j=1: n1
    Name=fullfile (Path, nombres (:));
    datos=dlmread(nombres{j}, '\t', 3);
    y=datos (:1); % según el código anterior las 'y' son la primera columna

    Fs=20000; %Frecuencia
    T = 1/Fs; %vector de tiempo
    L = length(y); % Longitud de señal
    t = (0: L-1) *T;

    %Quitar el offset a las señales
    yd=detrend(y); %remover la tendencia lineal

    %Obtain the FFT
    NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
    f = Fs/2*linspace (0,1, NFFT/2+1);
    FR_y= fft(yd,NFFT)/L;

    %Espectro 1
    x1 = f; %Frecuencia
    y1 = 2*abs (FR_y (1: NFFT/2+1));

    %Convertir a vector columna
    x1 = x1(:);
    y1 = y1(:);

    % AJUSTE POR REGRESION LINEAL en punta 1
    pos = (x1>=1e3) & (x1<=1e4); %Buscas el rango de valores
```

```

eq =polyfit(log10(x1(pos)), log10(y1(pos)), 1); %se ajusta la línea de regresión
x2 = x1(pos); %solo los valores del ajuste
y2 = 10.^polyval (eq, log10(x2)); %solo los valores del ajuste

%Datos x
x=datos(:2);
Fs=20000;
T = 1/Fs; % Sample time
L = length(x); % Length of signal
t = (0:L-1)*T;

%Quitar el offset a las señales
xd=detrend(x);

%Obtain the FFT
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
FR_x= fft(xd,NFFT)/L;

%Espectro 2
x3 = f; %Frecuencia
y3 = 2*abs(FR_x(1:NFFT/2+1));

%Convertir a vector columna
x3 = x3(:);
y3 = y3(:);

% AJUSTE POR REGRESION LINEAL en punta 2
pos = (x3>=1e3) & (x3<=1e4); %Buscas el rango de valores
eq1 =polyfit(log10(x3(pos)), log10(y3(pos)), 1); %se ajusta la línea de regresión
x4 = x3(pos);%solo los valores del ajuste
y4 = 10.^polyval(eq1,log10(x4)); %solo los valores del ajuste

%grafica
figure1 = figure;

% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1);
hold(axes1, 'on')
loglog(x1,y1, 'r')
loglog(x2,y2, 'g')
loglog(x3,y3, 'b')
loglog(x4,y4, 'm')
legend('Amplitude Spectrum', sprintf('Pendiente: %.4e', eq(1)), 'Amplitude
Spectrum', sprintf('Pendiente: %.4e', eq1(1)))
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of the probe measurement')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')
grid(axes1, 'on');

% guardar pendientes
pendientes(j,:) = [eq(1), eq1(1)];

% Set the remaining axes properties

```

```
set(axes1, 'XMinorTick', 'on', 'XScale', 'log', 'YMinorTick', 'on', 'YScale', 'log')
hold off

end
xlswrite('pendientesresultados.xlsx', { 'punta 1' , 'punta 2' }, 'Hojal', 'A1:B1' );
xlswrite('pendientesresultados.xlsx', pendientes, 'Hojal', 'A2');
%disp(pendientes)
```