



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA**

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL

TESIS

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

PRESENTA:

CRISTIAN ALFONSO SALAS VÁZQUEZ

TUTOR PRINCIPAL

DR. JESÚS RGACIA SÁNCHEZ, INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM

MÉXICO, DF., SEPTIEMBRE 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Fuentes Mariles Oscar
Secretario:	Dr. Domínguez Mora Ramón
Vocal:	Dr. Gracia Sánchez Jesús
1 ^{er} . Suplente:	M. I. Franco Víctor
2 ^{do} . Suplente:	Dr. Pozos Estrada Óscar

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Jesús Gracia Sánchez

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Al concluir una etapa más de mis estudios, al mirar hacia atrás y ver todo lo que la vida me ha dado, me lleno de gratitud y no me viene otra imagen a la cabeza que la de Dios y mi familia quienes han estado presentes en cada instante de mi vida.

Le agradezco en primer lugar a Dios, ya que de todo lo recibido lo mejor fue haberme dado mi familia, mis padres y hermanos que han sido mi fuente inagotable de sustento comprensión, cariño y apoyo incondicional. A mi novia ya que con su amor y compañía durante este camino, me brindó la fuerza motora para alcanzar esta meta.

Y al final, un agradecimiento especial a mi tutor el Dr. Jesús Gracia Sánchez por la gran ayuda brindada en todos los aspectos y que junto con el resto de mis profesores supieron impartirme con efusión y sin egoísmo los conocimientos científicos, técnicos y prácticos que caracterizan a un profesional íntegro y calificado.

A todas estas personas que contribuyeron a ser la persona que soy el día de hoy, les profeso toda la gratitud de mi corazón.

“DON'T LET YOUR DREAMS BE DREAMS”

Cristian Alfonso Salas Vázquez

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar un flujo turbulento que se produce en el tanque amortiguador de sección trapezoidal, que pertenece al proyecto "Túnel Emisor Oriente" (TEO), concerniente al sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México, que posee un caudal de diseño de $240 \text{ m}^3/\text{s}$. El modelo físico fue construido a una escala geométrica de 1:30, donde se encontró que su funcionalidad durante la condición de diseño, podría verse comprometida debido al desbordamiento.

A través de la modificación de las características geométricas, de la sección de entrada (rápida) del tanque, se trató de obtener una mayor disipación de la energía cinética turbulenta (TKE) y disminuir las variaciones de los niveles del tirante. Para evaluar varias geometrías y sus efectos, se realizaron en el modelo tres ensayos físicos, siendo estos: la prueba en la rápida lisa (rápida lisa), el segundo se llevó a cabo mediante el aumento de su rugosidad utilizando escalones en la rápida (rápida escalonada) y el último, mediante el intercambio de los escalones por dos filas de deflectores en forma de dientes (rápida dentada).

El modelo físico se instrumentó con un velocímetro acústico Doppler (ADV) y un limnómetro digital. Con los cuales se midió las velocidades instantáneas y las fluctuaciones de nivel de agua, con las cuales se pudo calcular la energía cinética turbulenta (TKE) y su disipación en distintos puntos a lo largo del tanque.

Además, se planteó un modelo matemático basado en los principios teóricos de la mecánica de fluidos computacional, conocido por sus siglas en inglés como CFD, (Computational Fluid Dynamics), con el software computacional Flow3D, manteniendo las mismas dimensiones del modelo físico, para así lograr comparar la modificación de la turbulencia.

De la comparación de los modelos físicos y matemáticos se observó cierta similitud en los índices calculados; sin embargo, se evidencia que el modelo matemático sobreestima los valores, por lo que es necesaria la modificación de algunos de sus parámetros para obtener mejores resultados; es decir, que sean más cercanos a la realidad.

ABSTRACT

This present study aims to characterize a turbulent flow that occurs in a trapezoidal section stilling basin, which belongs to the “Tunel Emisor Oriente” (TEO) project, concerning to the deep drainage system from the Mexico City, with a design caudal of $240 \text{ m}^3/\text{s}$. A physical model for this project was constructed with a 1:30 scale, where it was found that its functionality during the design condition could be committed due to overflow.

Through modification of the geometrical characteristics of the chute, at the entrance section of the tank, we sought to obtain a higher dissipation of turbulent kinetic energy (TKE) and decrease the levels variations of water depth. To evaluate these new geometries and their effects, three different physical assays were performed on the model, these being: the test on the smooth chute (smooth chute), the second one was carried out by increasing its roughness using steps in the chute (stepped chute) and the third and last one exchanging the steps with two rows of chute blocks with the form of teeth (toothed chute).

The physical model was instrumented with acoustic Doppler speedometer (ADV) and a digital water level gage, with which the instantaneous speed and level fluctuations was measured, also with this a grid was drawn to calculate the velocity, turbulent kinetic energy (TKE) and its dissipation at different points along the tank, making a proper meshing of the study area.

In addition, a CFD modeling was performed using the computational software FLOW 3D with same dimensions as the physical model to compare the modification of turbulence.

From the comparison of the physical and numerical models some similarity in the calculated indexes is observed, however it is noted that the numerical model overestimates values, so it is necessary the modification of its parameters in order to obtain better results, closer to reality.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	5
3	ESTADO DEL ARTE	7
3.1	MÉTODOS PARA CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE FLUJOS TURBUENTOS	7
3.1.1	VELOCIMETRÍA ACÚSTICA DOPPLER	7
3.1.2	LIMNIMETRÍA DIGITAL POR CONDUCTIVIDAD	7
3.2	MÉTODOS DE MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA CARACTERIZAR FLUJOS TURBULENTOS.....	8
3.2.1	MODELACIÓN MATEMÁTICA CFD	8
4	ANTECEDENTES/METODOLOGÍA.....	11
4.1	DISEÑO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	11
4.2	DISEÑO DE LA RÁPIDA CON BLOQUES DENTADOS	19
5	CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y ENSAYOS EN MODELO FÍSICO	23
5.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO.....	23
5.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS EN EL MODELO FÍSICO	24
5.3	IMPLEMENTACIÓN DE LA VELOCIMETRÍA DOPPLER	26
5.4	IMPLEMENTACIÓN DE LA LIMNIMETRÍA DIGITAL.....	28
6	MODELACIÓN MATEMÁTICA	31
6.1	CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO MATEMÁTICO.....	31
6.2	RUGOSIDAD DEL MODELO MATEMÁTICO	32
6.3	MALLADO DEL MODELO MATEMÁTICO.....	33
6.4	CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO MATEMÁTICO	36
6.5	MODELO DE TURBULENCIA DEL MODELO MATEMÁTICO	38
6.6	CONDICIONES INICIALES DE LOS MODELOS DE ENTRADA DE AIRE, EVALUACIÓN DE DENSIDAD Y FLUJO DE DERIVA.....	39
6.7	CONDICIONES INICIALES DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	41
6.8	SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	44
7	ANÁLISIS DE DATOS.....	47
7.1	PARÁMETROS Y FUNCIONES ESTADÍSTICAS.....	47
7.1.1	MEDIA.....	47
7.1.2	VARIANZA	47
7.1.3	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	48
7.1.4	COVARIANZA	48

7.1.5	ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA (TKE)	49
7.1.6	INTENSIDAD TURBULENTA.....	49
7.1.7	TASA DE DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA TURBULENTA (ϵ).....	51
8	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	53
8.1	RESULTADOS DE MODELO FÍSICO	53
8.2	RESULTADOS MODELO MATEMÁTICO	62
8.3	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS MODELOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS.....	70
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	79
	REFERENCIAS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localización del proyecto TEO (SEMARNAT, Alberto U. Esteban Marina).....	2
Figura 2 - Velocímetro Acústico Doppler	7
Figura 3 - Limnómetro digital	7
Figura 4 - Ubicación en planta del vertedero liso existente del prototipo del TEO - planos CONAGUA proyecto funcional del portal de salida oriente y rectificación del río El Salto.....	11
Figura 5 - Perfil del vertedero liso existente del prototipo del TEO - planos CONAGUA del proyecto funcional general del portal de salida oriente y rectificación del río El Salto (acotamiento en m).....	12
Figura 6 - Configuración geométrica y medidas de los escalones (acotaciones en metros)	19
Figura 7 - Bloques a la entrada del colchón hidráulico (Diseño de presas pequeñas)	19
Figura 8 - Uso de bloques dentados sobre una rápida (Peterka, 1978).....	20
Figura 9 - Configuración y geometría de los bloques dentados (acotaciones, en metros)	21
Figura 10 - Perfil y planta del modelo físico (acotaciones, en metros).....	23
Figura 11 - Ensayo "Rápida lisa"	25
Figura 12 - Ensayo "Rápida escalonada"	25
Figura 13 - Ensayo "Rápida dentada"	26
Figura 14 - Ubicación de los 45 puntos del mallado de la zona de ensayo (acotaciones, en metros).....	27
Figura 15 - Esquema de montaje del micro ADV	28
Figura 16 - Ubicación de los 15 puntos del mallado de la zona de ensayo.....	29
Figura 17 - Esquema de montaje de limnómetro digital	29
Figura 18 - Bosquejo CAD del modelo físico	31
Figura 19 - Modelado CAD de las geometrías ensayadas	31
Figura 20 - Geometría Modelo matemático "Rápida Lisa FLOW3D" y su mallado.....	34
Figura 21 - Mallado "Rápida Lisa FLOW3D" con bloque de dominio removible	34
Figura 22 - Geometría Modelo matemático "Rápida Escalonada FLOW3D" y su mallado.....	35
Figura 23 - Geometría Modelo matemático "Rápida Dentada FLOW3D" y su mallado	35
Figura 24 - Condiciones de frontera modelos matemáticos (A) "Rápida Lisa FLOW3D", (B) "Rápida Escalonada FLOW3D" y (C) "Rápida Dentada FLOW3D".	37
Figura 25 - Datos del modelo de entrada de aire FLOW-3D	40
Figura 26 - Datos del modelo de evaluación de densidad FLOW-3D.....	40
Figura 27 - Datos entrada del modelo de flujo de deriva FLOW-3D	41
Figura 28 - Datos de entrada del modelo matemático	43
Figura 29 - Gasto de entrada y salida del modelo matemático	44
Figura 30 - Variación de la TKE durante la simulación	45
Figura 31 - Visualización de los resultados de TKE del modelo matemático "Rápida Lisa FLOW3D"	69
Figura 32 - Visualización de los resultados de TKE del modelo matemático "Rápida Escalonada FLOW3D"	70
Figura 33 - Visualización de los resultados de TKE del modelo matemático "Rápida Dentada FLOW3D"	70

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 - Velocidades medias modelo físico	58
Gráfica 2 -Energía cinética turbulenta TKE obtenida en los modelos físicos.....	59
Gráfica 3 - Disipación de energía cinética turbulenta DTKE ϵ - ecuación 7.7	60
Gráfica 4 -Tirantes máximos en los diferentes ensayos en el modelo físico	61
Gráfica 5 - Velocidades medias obtenidas en los modelos matemáticos.....	66
Gráfica 6 - Energía cinética turbulenta TKE obtenida en los modelos matemáticos.....	67
Gráfica 7 - Disipación de energía cinética turbulenta DTKE ϵ , obtenida en los modelos matemáticos.....	68
Gráfica 8 - Tirantes máximos en los diferentes ensayos en el modelo matemático	69
Gráfica 9 - Comparación de tirantes máximos, entre el modelo físico "Rápida Lisa" y el matemático "Rápida Lisa FLOW3D"	74
Gráfica 10 - Comparación de tirantes máximos, entre el modelo físico "Rápida Escalonada" y el matemático "Rápida Escalonada FLOW3D"	74
Gráfica 11 - Comparación de tirantes máximos, entre el modelo físico "Rápida Dentada" y el matemático "Rápida Dentada FLOW3D"	75
Gráfica 12 - Comparación de resultados de velocidades medias entre los modelos físicos y matemáticos.....	76
Gráfica 13 -Comparación de resultados de TKE entre los modelos físicos y matemáticos	76
Gráfica 14 - Comparación de resultados de disipación de TKE entre los modelos físicos y matemáticos.....	77
Gráfica 15 - Comparación de resultados de tirantes máximos entre los modelos físicos y matemáticos.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Resumen datos iniciales del proyecto del TEO	12
Tabla 2 - Resumen de datos obtenidos mediante el cálculo	16
Tabla 3 - Composición del mallado y sus dominios	36
Tabla 4 - Condiciones de frontera de los modelos matemáticos	38
Tabla 5 - Determinación del perfil de flujo Tipo M2, mediante el método directo por pasos (Ven Te Chow - Hidráulica de los canales abiertos)	43
Tabla 6 - Resultados de velocidad y TKE obtenidos a través de los ensayos en el modelo físico	54
Tabla 7 - Resultados DTKE obtenidos a través de los ensayos en el modelo físico	55
Tabla 8 - Resultado de los tirantes máximos obtenidos en el modelo físico.....	57
Tabla 9 - Resultados de velocidad media y TKE obtenidos a través de los ensayos en el modelo matemático	63
Tabla 10 - Resultados DTKE obtenidos a través de los ensayos en el modelo matemático	64
Tabla 11 - Resultado de los tirantes máximos obtenidos en el modelo matemático.....	65
Tabla 12 - Comparación de velocidades medias U , entre el modelo físico y matemático	71
Tabla 13 - Comparación de energía cinética turbulenta TKE, entre el modelo físico y matemático	71
Tabla 14 - Comparación de la disipación de la energía cinética turbulenta, entre el modelo físico y el matemático	72
Tabla 15 - Comparación de los resultados de tirantes máximos, entre el modelo físico y matemático	73

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

A	Área de la sección trapezoidal (m^2)
ADV	Velocímetro Acústico Doppler (siglas en ingles)
b	Ancho de la sección del canal (m)
CAD	Diseño asistido por computadora (siglas en ingles)
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional (siglas en ingles)
ε	Tasa de disipación de la TKE
F	Número de Froude
FLOW3D	Software para modelación matemática
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
h	Altura del escalón (m)
Hp	Altura de la presa o vertedor (m)
IT	Índice de turbulencia
k_s	Rugosidad absoluta
l	Huella del escalón (m)
L_e	Longitud de escalas
LES	Modelo de turbulencia: Simulación de Grandes Vórtices (siglas en ingles)
n_e	Escala de rugosidades
n_m	Rugosidad del modelo ($m^{1/6}$)
n_p	Rugosidad del prototipo ($m^{1/6}$)
θ	Ángulo de inclinación de la rápida del vertedor ($^\circ$)
Q	Gasto (m^3/s)
Q_M	Gasto de modelo (m^3/s)
Q_P	Gasto de prototipo (m^3/s)
q_w	Gasto unitario (m^2/s)
RNG	Modelo de turbulencia: Grupo Re Normalizado (siglas en ingles)
T	Ancho de la superficie libre (m)
TKE	Energía Cinética Turbulenta
TEC	Túnel Emisor Central
TEO	Túnel Emisor Oriente
$\overline{u \cdot v}$	Covarianza para las fluctuaciones de velocidad en la dirección de x y y
$\overline{u \cdot w}$	Covarianza para las fluctuaciones de velocidad en la dirección de x y z
$\overline{u}^2$	Varianza para las fluctuaciones de velocidad en la dirección de x
$\overline{U}$	Velocidad media del flujo en dirección x
$\overline{V}$	Velocidad media del flujo (m/s)
$\overline{V}$	Velocidad media del flujo en dirección y
$\overline{v}^2$	Varianza para las fluctuaciones de velocidad en la dirección de y
$\overline{v \cdot w}$	Covarianza para las fluctuaciones de velocidad en la dirección de y y z
$\overline{w}^2$	Varianza para las fluctuaciones de velocidad en la dirección de z
$\overline{W}$	Velocidad media del flujo en dirección z
y	Tirante (m)
y_c	Tirante crítico (m)
Y_n	Tirante normal (m)
z	Inclinación de los taludes de la sección trapezoidal

1 INTRODUCCIÓN

El Túnel Emisor Oriente o como es conocido por sus siglas “**TEO**” y como será llamado de ahora en adelante en este estudio, es un proyecto hidráulico concerniente al drenaje profundo de la ciudad de México que permitirá una salida complementaria y alterna al actual drenaje profundo el Túnel Emisor Central “**TEC**”.

Este proyecto servirá a más de 20 millones de habitantes y funcionará en temporadas de lluvia de manera simultánea con el TEC, incrementando su capacidad de conducción mientras que en épocas de estiaje lo hará alternadamente por razones de mantenimiento, todo esto con la finalidad de reducir el riesgo de inundaciones por un posible colapso en los canales actuales de la ciudad de México que tienen décadas en operación.

La construcción del TEO inició en el año 2008 y se planea sea terminado para el año 2016, contando con una longitud total de 62 kilómetros, desde el valle de México hasta la planta de aguas residuales del municipio de Atotonilco de Tula, Hidalgo **Figura 1**. Además poseerá 25 lumbreras con profundidades variables van desde los 55 a los 150 metros y un diámetro de 7.5 metros.



Figura 1 - Localización del proyecto TEO (SEMARNAT, Alberto U. Esteban Marina)

La obra inicia en la segunda lumbrera del túnel interceptor del Río de los Remedios y termina en Atotonilco de Tula, en Hidalgo, cerca del actual portal de salida del TEC, en su confluencia con el Río El Salto donde se utilizará un tanque de disipación de energía de sección trapezoidal.

Ahora los tanques de disipación de energía de sección trapezoidal a pesar de poseer una sección hidráulica mayor; además de mostrar una disminución en los costos de la obra al tener excavaciones de terrenos de menor profundidad y un menor requerimiento de refuerzo (debido a una mejor estabilidad) en comparación con uno de sección transversal rectangular; presentan flujos asimétricos que tienden a producir, en algunos casos, derrames por los costados de estos tanques de disipación producto del salto hidráulico oblicuo que ya se ha estudiado con anterioridad por investigadores como Diskin y Massey (1961), Sandover y Holmes (1962), Mohed y Sharp (1971), Ohtsu y Yasuda (1989), Wanoschek y Hager (1989) y Gracia Sánchez, Franco & Fuentes Mariles (2011), que han expuesto la importancia de su consideración además de dejar aproximaciones teóricas para la identificación de estos problemas que deben seguir siendo estudiados. “Un canal de sección trapezoidal con el mismo ancho de plantilla "B" de uno rectangular es superior tanto en términos de la estabilidad natural de los taludes como en eficiencia del salto. Sin embargo, las corrientes de retorno y la presencia de un salto oblicuo hacen poco estable el resultado hidráulico, por lo que muchas veces, en el caso de prototipos, se prefiere regresar al diseño y uso de los tanques de sección rectangular” (Gracia Sánchez. J, Franco. V & Fuentes Mariles. O, 2011). Esto solo destaca la necesidad de la realización de modelos físicos para una valoración más precisa de los posibles problemas que pueda poseer el prototipo.

Ante esto, a sabiendas que en el mundo de la Hidráulica una de las partes más importantes para la validación de un diseño es la modelación física, la cual permitió el estudio y visualización del comportamiento hidráulico de las estructuras diseñadas, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (**IIUNAM**), por petición de la Comisión Nacional del Agua (**CONAGUA**), llevó a cabo el estudio del funcionamiento hidráulico del proyecto del TEO, basado en la simulación del flujo en las condiciones de diseño establecidas por la **CONAGUA** en un modelo físico a escala.

En dicho estudio se mostró que con el gasto de $240\text{m}^3/\text{s}$ para el cual fue diseñado el tanque trapezoidal de amortiguación, podría presentar problemas de desbordamiento dado el aumento de los tirantes. Estos problemas pueden estar asociados a los efectos

de escala que conlleva esta clase de modelos físicos, no obstante no se consideraran estos, con una finalidad meramente didáctica.

Una vez expuesto esto, teniendo en cuenta que pese a las ventajas que presenta la modelación física en función de validación de cualquier diseño, la mayor problemática de los modelos físicos, sin considerar los efectos de escala, son el tiempo requerido para la construcción del modelo, la realización de los estudios o ensayos físicos y sobre todo el costo adicional de todo esto, que suele oscilar entre el 0.5 y el 1% del monto total del proyecto. No obstante estos tiempos y costos pueden ser reducidos considerablemente mediante la utilización de los modelos matemáticos o computacionales que se basan en los principios teóricos de la Mecánica de Fluidos Computacional, mejor conocida por sus siglas en inglés como CFD, (Computational Fluid Dynamics).

Dada la discrepancia entre los defensores de los modelos físicos como matemáticos en el presente estudio se pretende obtener una mejor eficiencia en la disipación de la energía cinética, a través de la modificación de las características geométricas del vertedero de ingreso al tanque de amortiguación que se encuentra en el río El Salto conocido como **“Tanque el Salto II”** y la posterior comparación de los resultados obtenidos por la experimentación en el modelo físico y los resultados arrojados por la modelación matemática del fenómeno, mediante el software FLOW 3D, siempre guardando las similitudes requeridas y condiciones hidráulicas del modelo físico antes mencionado.

2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

Mediante la modificación de las características geométricas de la rápida, en la sección de entrada del tanque del modelo conocido como **“Tanque el Salto II”**, se busca obtener una mayor disipación de la energía cinética turbulenta o TKE (Turbulent Kinetic Energy) y disminuir las variaciones de los niveles del tirante.

Para evaluar estas nuevas geometrías y sus efectos, tres ensayos físicos diferentes se realizaron en el modelo, siendo estos: la prueba en la rápida sin variaciones (rápida lisa), el segundo se llevó a cabo mediante el aumento de su rugosidad utilizando escalones en la rápida (rápida escalonada) y el tercero y último, mediante el intercambio de los escalones por dos filas de deflectores en forma de dientes (rápida dentada).

Para las diferentes geometrías propuestas para la rápida en cuestión, se realizaron mediciones de velocidad y tirantes a lo largo del tanque de amortiguación, obteniendo velocidades instantáneas a diferentes profundidades por medio de la utilización de un velocímetro acústico doppler, mientras que los tirantes fueron determinados empleando un limnómetro digital.

Es así que de la determinación de las velocidades instantáneas, se calcularán algunos parámetros estadísticos que caracterizan el flujo turbulento, los cuales son: el módulo del vector de velocidad, energía cinética turbulenta TKE y su disipación.

Estos resultados fueron comparados con los obtenidos por la modelación matemática, mediante el software FLOW 3D, y sus resultados serán mostrados en los capítulos siguientes.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 MÉTODOS PARA CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE FLUJOS TURBUENTOS

3.1.1 VELOCIMETRÍA ACÚSTICA DOPPLER

El Velocímetro Acústico Doppler o ADV como es conocido por sus siglas en inglés (Acoustic Doppler Velocimeter), es un instrumento de alta precisión, utilizado para medir las tres componentes del vector de velocidad instantánea en una variedad de condiciones de flujo. Estos dispositivos funcionan enviando un corto pulso acústico desde un transductor activo hacia las partículas suspendidas en el



Figura 2 - Velocímetro Acústico Doppler

fluido. Cuando el pulso atraviesa el punto a donde se orientan los transductores pasivos, el eco es registrado por cada uno de ellos. Estas señales son procesadas para determinar sus desviaciones Doppler. Sus aplicaciones más habituales son caracterización de turbulencia, estudios en capa límite, en zona de rompientes o flujos poco energéticos.

3.1.2 LIMNIMETRÍA DIGITAL POR CONDUCTIVIDAD

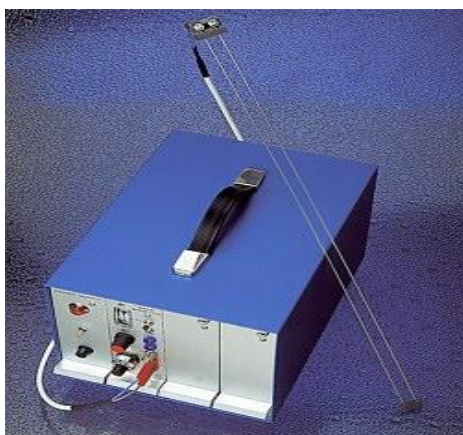


Figura 3 - Limnómetro digital

La limnimetría digital por conductividad utiliza sondas que constan de un par de alambres de acero inoxidable que se sumergen en las olas de agua. La conductividad eléctrica entre los dos es medida, y es relacionada linealmente a su profundidad de inmersión y por tanto a la altura de la ola. El método está libre de efectos de menisco y de humectación. El resultado es un sistema que

ofrece una alta precisión dinámica en un amplio intervalo de alturas de ola y frecuencias.

Para que las sondas de nivel conductivo puedan medir el nivel de manera continua, debe montarse en posición vertical y en paralelo con la pared.

3.2 MÉTODOS DE MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA CARACTERIZAR FLUJOS TURBULENTOS

3.2.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA CFD

Si bien se sabe que la modelación física de obras hidráulicas es una herramienta completamente ensayada a lo largo de la historia de los modelos a escala. Sin embargo, la modelación matemática en tres dimensiones de dichas obras no cuenta con muchos antecedentes debido al reciente desarrollo de software y computadoras con gran capacidad para el cálculo intensivo. La validación de la modelación matemática permite estudiar numerosas modificaciones a la obra y su optimización, sin necesidad de repetir cada modificación en modelo físico; por lo tanto, se optimizan recursos humanos, materiales y tiempo (Mastache .V, 2013).

La modelación matemática se basó en los principios teóricos de la mecánica de fluidos computacional, mejor conocida por sus siglas en inglés como CFD, (Computational Fluid Dynamics) y se realizó mediante el uso del software **FLOW-3D®** de Flow Science Inc.

Este software resuelve numéricamente por el método de diferencias finitas las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad, utilizando un mallado de paralelepípedos donde puede calcular las propiedades de los fluidos en sus tres dimensiones. Las ecuaciones antes mencionadas son diferenciales de segundo orden, no lineales y dependientes del tiempo, donde la solución numérica de las mismas implica aproximar los términos que la componen con expresiones algebraicas.

Además, el programa consta con varios módulos complementarios para la resolución de distintos problemas tales como el transporte de sedimentos, cuerpos sólidos en movimiento, escurrimiento en medios porosos etc. (De Dios, Angulo, Del Blanco, & Liscia, 2010).

Existen cinco modelos disponibles para la representación de la turbulencia: el modelo de longitud de mezcla de Prandtl, los modelos $k-\epsilon$ de una y dos ecuaciones, un modelo basado en los métodos **RNG** (Renormalization Group) y un modelo de simulación de grandes vórtices **LES** (Large Eddy Simulation) (Flow Science, 2008).

Conjuntamente con las condiciones de borde, hay que indicar si se desea calcular el flujo como laminar o turbulento; en este último caso, hay que escoger unas ecuaciones de cierre para calcular la influencia de la turbulencia.

4 ANTECEDENTES/METODOLOGÍA

4.1 DISEÑO DE LA RÁPIDA ESCALONADA

En el diseño de las estructuras hidráulicas con alta velocidad aparecen problemas relacionados a la presencia de elevadas presiones negativas que pueden producir graves deterioros de la estructura debido al fenómeno de la cavitación. Uno de los métodos más eficaces para evitar los daños por cavitación es introducir aire en el flujo de agua, sabiendo que existen dos maneras de conseguir que el aire penetre en la masa de agua, siendo estas de forma forzada o de manera natural. En los vertederos escalonados, la alta turbulencia del flujo en la proximidad de los escalones provoca el acortamiento de la zona de flujo irrotacional comparado con un aliviadero convencional y una vez que alcanza el punto de inyección se inicia la aireación natural, manteniéndose de forma permanente un alto contenido de aire en la masa de flujo. Además, para algunos casos los escalones dependiendo del tipo de flujo y la configuración geométrica del escalón presenta mayores disipaciones de energía en comparación a un vertedor con una rápida lisa.

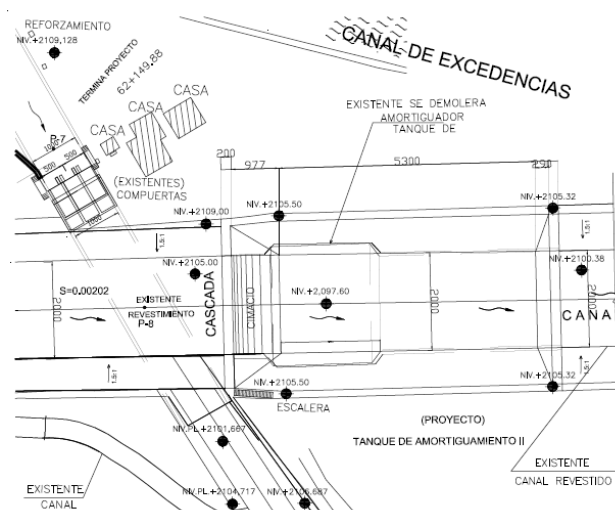


Figura 4 - Ubicación en planta del vertedero liso existente del prototipo del TEO - planos CONAGUA proyecto funcional del portal de salida oriente y rectificación del río El Salto

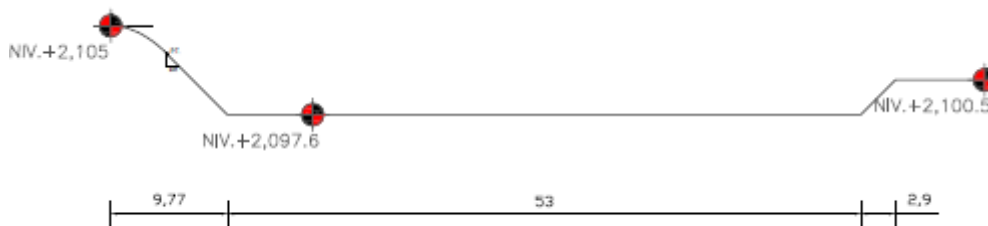


Figura 5 - Perfil del vertedero liso existente del prototipo del TEO - planos CONAGUA del proyecto funcional general del portal de salida oriente y rectificación del río El Salto (acotamiento en m)

Ante esto, en búsqueda de una mayor disipación de energía cinética turbulenta y un mayor control en los desniveles del flujo dentro del tanque amortiguador “El Salto II”, se propone cambiar la configuración de la rápida del vertedor de entrada al tanque, por una rápida escalonada. Para el diseño de los escalones en la rápida se comenzó por la recopilación de la información pertinente de prototipo como es la del gasto de diseño correspondiente a $Q=240 \text{ m}^3/\text{s}$, las medidas del vertedero trapecial de relación de taludes de **1.5:1**, con una altura de 7.40m, con una longitud de 9.77m, un ancho igual a 20m y un ángulo de inclinación de 45° con respecto a la horizontal, como se muestra en la **Tabla 1**:

Tabla 1 - Resumen datos iniciales del proyecto del TEO

Medidas Prototipo		Medidas Modelo	
Escala	1:1	Escala	1:30
Q (m ³ /s)	240	Q (m ³ /s)	0.04869
H (m)	7.4	H (m)	0.25
b (m)	20	b (m)	0.66
L (m)	9.77	L (m)	0.33
z	1.5	z	1.5

Conocida esta información se pasó a la determinación del tirante crítico en el cimacio o al inicio del vertido, ya que este tirante crítico y_c tiene una relación directa con la altura

del escalón y la disipación de la energía al final de la rápida (Mateos, 1997), no sin antes comprobar el riesgo de cavitación en la zona no aireada del vertedor escalonado, verificando que el caudal unitario $q_w=Q/b$, no sea mayor a $11-14\text{m}^2/\text{s}$ según (Amador,2005).

$$q_w = \frac{Q}{b} = \frac{240}{20} = 12 \text{ m}^2/\text{s}$$

Una vez verificado que no existe riesgo de cavitación se procede al cálculo del tirante crítico a través de la fórmula de Froude mediante la **ecuación 4.1** mostrada abajo:

$$F^2 = \frac{V^2 T}{gA} \quad 4.1$$

Donde:

- F = número de Froude
- V = velocidad media del flujo (m/s)
- T = ancho de la superficie libre (m)
- g = aceleración de la gravedad (m/s^2)
- A = área de la sección trapezoidal (m^2)

$$V = Q/A \quad 4.2$$

Sustituyendo la velocidad en función del gasto y área, mediante la fórmula de continuidad **ecuación 4.2**, tenemos:

$$F^2 = \frac{Q^2 T}{gA^3}$$

Conocido que las condiciones críticas de un flujo se alcanzan cuando se tiene el número de Froude igual a 1, por lo tanto:

$$1 = \frac{Q^2 T}{g A^3}$$

$$\frac{Q^2 T}{g} - A^3 = 0$$

Sustituyendo las fórmulas de área y ancho de superficie libre para un canal trapecial en función del tirante crítico y_c , **ecuación 4.3** y **4.4** obteniendo así la **ecuación 4.5**:

$$A = y_c(b + zy_c) \quad 4.3$$

$$T = b + 2zy_c \quad 4.4$$

$$\frac{Q^2(b + 2zy_c)}{g} - d_c^3(b + zy_c)^3 = 0 \quad 4.5$$

Para este caso en concreto con los datos antes mostrados en la **Tabla 1**, para el prototipo, se tiene:

$$\frac{(240)^2[20 + 2(1.5y_c)]}{9.78} - y_c^3(20 + 1.5y_c)^3 = 0$$

$$y_c = 2.305m$$

Ahora, si bien se conocen tres tipos de flujos en un vertedero escalonado, que son el flujo de escalón a escalón, también conocido como saltante o en ingles llamado "Nappe Flow" existente para gastos pequeños, el de transición que dado su comportamiento caótico no se tiene una comprensión clara del mismo y finalmente el flujo rasante o en ingles el "Skimming Flow" que se presenta en la mayoría de presas debido a los altos gastos con los que se trabaja. En lo que concuerdan todos los investigadores de la hidráulica de vertederos escalonados, es que se debe evitar el flujo de transición y algunos (González, C.A. y Chanson, H., 2007) que la mayor disipación de energía se alcanza mediante el flujo saltante, mientras que las mayores capacidades se dan para flujos rasantes. Dado el gasto que se tiene en el TEO se pensaría en un diseño para flujo rasante pero guiándonos de la premisa de suprimir o reducir las dimensiones del tanque de amortiguamiento presente aguas abajo en el TEO, que se consigue mediante la máxima disipación de energía, se consideró el flujo saltante que Chanson en 2002

estableció de manera experimental, para relaciones de altura y longitud de escalón entre $0.05 \leq \frac{h}{l} \leq 1.7$ y un θ (ángulo de inclinación de la cara aguas debajo de la cortina) de $3.4^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, la siguiente ecuación para flujo saltante de donde se puede determinar la altura del escalón para el tirante crítico dado con la **ecuación 4.6**, antes comprobando la consideración para el ángulo de inclinación de Chanson (1994):

Al estar dentro del rango establecido como condición necesaria se tiene que:

$$\frac{y_c}{h} = 0.89 - 0.4 \frac{h \tan \theta}{h} \quad 4.6$$

$$\frac{2.305}{h} = 0.89 - 0.4 \cdot \tan 45^\circ$$

Despejando la altura del escalón h:

$$h = y_c / (0.89 - 0.4 \tan \theta)$$

$$h = 2.305 / (0.89 - 0.4 \tan 45^\circ) = 4.70m$$

En vertedores escalonados de cortinas con concreto compactado, el tamaño de los escalones (longitudes de huella y contrahuella) viene condicionado por el proceso constructivo. Lo que significa que dependen del espesor y número de tongadas que se planteen durante la construcción del cuerpo de la presa. Los valores más habituales vienen dados por múltiplos de 0.3 metros que es el espesor promedio de una capa de concreto (lechada), por lo que los valores definitivos de la altura de la contrahuella se encuentra entre 0.30 m y 1.20 m, por lo tanto la altura debe ser:

$$h = 4.80 \text{ m (Altura del escalón)}$$

$$l = \frac{h}{\tan \theta} = \frac{4.80}{\tan 45^\circ} = 4.80 \text{ m (Huella del escalón)}$$

Como se puede observar las medidas de los escalones son demasiado exageradas para las del vertedor que se maneja como ejemplo, esto dado a que se posee un gasto de 240 m³/s que es muy grande para el ancho de 20m que posee el canal, lo que se traduce en

un tirante crítico de 2.305m. Dado a que en el proceso de dimensionamiento del escalón, concretamente en la determinación de la altura del mismo, interviene de manera directa la altura del tirante crítico y_c , el resultado para los datos dados es la de un escalón de altura y huella o longitud igual a 4.80m. Sabiendo de ante mano que el diseño para flujo rasante presenta alturas de escalón más pequeñas que las conseguidas por flujo saltante, se puede comparar las medidas obtenidas mediante la **ecuación 4.7** que (Chanson, 2002) estableció para flujo rasante.

$$\frac{y_c}{h} = 1.2 - 0.325 \frac{h}{l} \quad 4.7$$

$$h = y_c / (1.2 - 0.325 \tan \theta)$$

Despejando la altura del escalón h:

$$h = 2.305 / (1.2 - 0.325 \tan 45^\circ) = 2.64 \approx 2.70m \text{ (Altura del escalón)}$$

$$l = \frac{h}{\tan \theta} = \frac{2.70}{\tan 45^\circ} = 2.70m \text{ (Huella del escalón)}$$

Lo antes obtenido se muestra en la Tabla 1 **Tabla 2**, mostrada abajo:

Tabla 2- Resumen de datos obtenidos mediante el cálculo

Flujo Escalón a Escalón		Flujo Rasante	
h (m)	4.80	h (m)	2.70
l (m)	4.80	l (m)	2.70
Número aproximado de escalones	<2	Número aproximado de escalones	<3

Es claro que la disipación de energía depende de la altura de la presa pudiéndose decir que a mayor altura mayor disipación. También el caudal unitario circulante en relación con el tamaño del escalón es un factor que influye en la disipación de energía en forma

interrelacionada con el anterior, así en presas de pequeña altura con grandes caudales y pequeños escalones, las pérdidas de energía son similares a las obtenidas en un vertedor convencional. Una vez establecidas estas premisas, se puede añadir que para relaciones $H_p / y_c < 10$, (altura de la presa o vertedor, dividido para el calado crítico) la disipación de energía es similar a la obtenida en un aliviadero liso y es por lo tanto necesario pensar en otro tipo de disipador de energía.

También se ha podido comprobar que para un vertedor concreto, a medida que aumenta el caudal disminuye la disipación de energía, pero con esto no puede afirmarse que para un caudal fijo, si se comparan dos diseños, el escalonado que produce la máxima disipación de energía sea siempre el de mayor tamaño (Elviro y Mateos, 1996).

$$\frac{H_p}{y_c} \leq 10 \quad 4.8$$

Donde H_p es la altura de la presa o vertedor y y_c el tirante crítico:

$$\frac{H_p}{y_c} = \frac{7.40}{2.305} = 3.21 \leq 10$$

Además, a pesar que la influencia de la altura del peldaño en la disipación de energía a lo largo de la rápida es hasta el momento un aspecto controvertido dentro de la comunidad científica, sin llegar a un consenso, Tozzi (1992) fijándose en el flujo rasante determinó que el aumento de la disipación de la energía gracias a los escalones es despreciable para:

$$k_s \geq 0.0764 \cdot q_w^{2/3} \rightarrow \frac{h}{y_c} \geq 0.3$$

donde $K_s = h \cdot \cos(\Theta)$ es la rugosidad, h la contrahuella o altura del escalón, Θ el ángulo de inclinación de la rápida, q_w el gasto unitario y y_c el tirante crítico.

Así:

$$\frac{h}{y_c} = \frac{2.70}{2.305} = 1.17 \geq 0.3$$

$$k_s = h \cdot \cos \theta = 2.70 * \cos 45 = 1.9m$$

$$0.0764 * \left(12 \text{ m}^2/\text{s}\right)^{2/3} = 0.40\text{m}$$

$$1.9 \geq 0.40$$

Por lo tanto la literatura sugiere que por la baja relación entre tirante crítico y altura del vertedor que se tiene, el pensar en la colocación de escalones de una altura tan grande se traduciría en una rugosidad artificial que no significaría una disipación significativa de energía. Por lo tanto estos resultados sugieren que para el gasto que se maneja en el río El Salto, al momento de trabajar en conjunto con el TEO, y con las medidas de vertedor antes mencionadas, no sería recomendable la utilización de un vertedor escalonado siendo la mejor opción un tanque amortiguador como en un principio se planteó por parte de los proyectistas del mismo.

Ahora a pesar de lo que indica la literatura y a manera de comprobar las teorías de algunos autores y como un ejercicio meramente académico, se planteó la realización de una rápida escalonada para el vertedor de entrada al tanque “**El Salto II**”, basada en una configuración geométrica inusual, obtenida por la variación de las alturas y longitudes de los escalones de manera ascendente desde el punto de tangencia P.T hasta el pie del vertedor. Esto resulto en 5 escalones que aumentan sus alturas desde 0.3m a 1.5m en múltiplos de 0.3m y con longitudes de 0.3m a 2.4m con una tasa de incremento en su longitud 0.6m. Además a esto, se le dio una pendiente a favor del flujo de -8° con respecto a la horizontal, con la finalidad de dirigir el flujo y obligar a que el mismo golpee con cada escalón a su paso por el vertedor, buscando una mayor disipación de energía cinética turbulenta. Esta configuración y sus medidas finales para el modelo físico son mostradas en la **Figura 6** mostrada abajo.

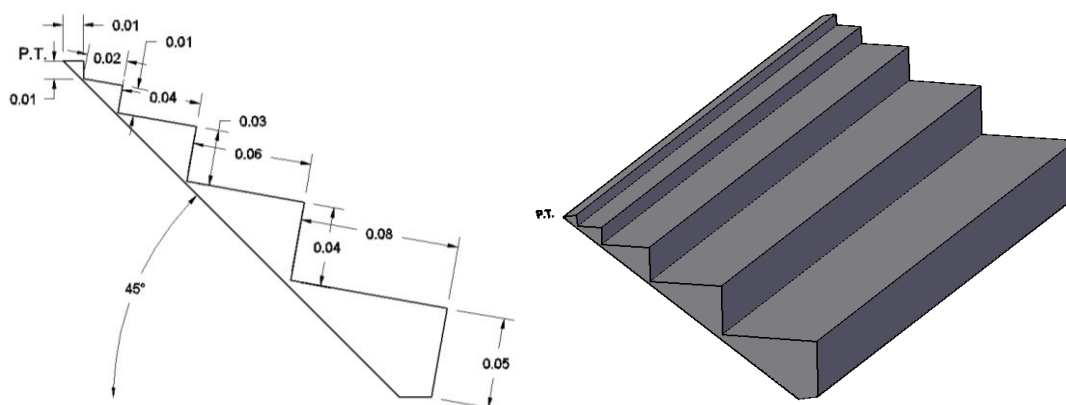


Figura 6 - Configuración geométrica y medidas de los escalones (acotaciones en metros)

4.2 DISEÑO DE LA RÁPIDA CON BLOQUES DENTADOS

En canales o vertedores de descarga, se usa el tipo de bloques dentados o como son conocidos en inglés como “chute blocks”, para disminuir la aceleración del flujo a medida que avanza por el vertedor. Los bloques en la rápida se utilizan para conformar una estructura dentada a la entrada del canal de entrega o al tanque de amortiguación y su función es dividir el chorro de entrada y elevar una parte de él desde el piso o fondo, produciendo una longitud de salto más corta que la que sería posible sin ellos. Estos bloques también tienden a estabilizar el resalto y por consiguiente a mejorar su comportamiento logrando longitudes de tanques amortiguadores más cortas, **Figura 7.**

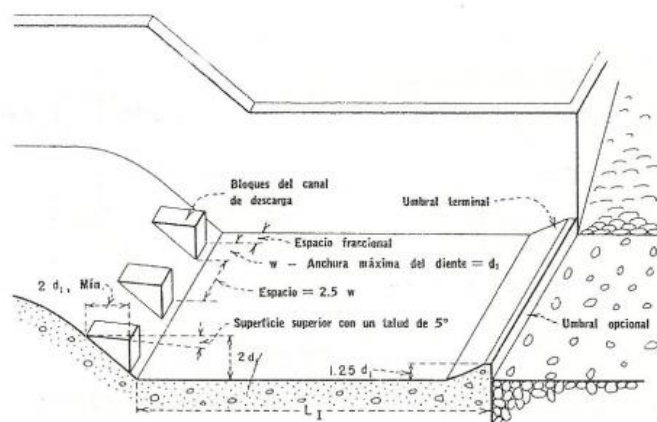


Figura 7 - Bloques a la entrada del colchón hidráulico (Diseño de presas pequeñas)

Peterka (1978) ha descrito el proceso de diseño para una Configuración de bloques dentados que hace uso de elementos de rugosidad sobre rápida del vertedor como se muestra en la **Figura 8**.

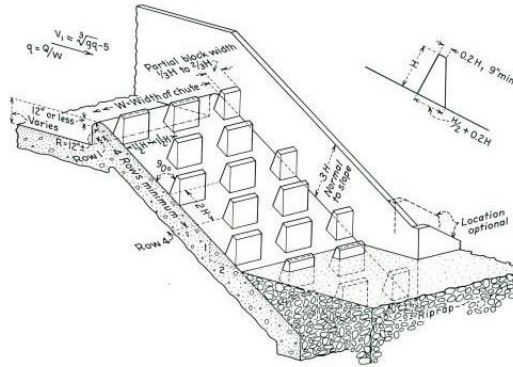


Figura 8 - Uso de bloques dentados sobre una rápida (Peterka, 1978)

Los elementos de rugosidad, referido como deflectores o bloques, perturban el patrón de flujo tal que el mismo se desacelera cuando se aproxima a cada bloque y luego se acelera a medida que pasa cada bloque y se aproxima a la siguiente fila. Mediante la colocación de los deflectores desde la parte superior a la parte inferior de la rápida, los deflectores evitan la aceleración excesiva de las corrientes, independientemente de la altura de caída total.

Buscando la estabilización del flujo y dado a que estos tipos de disipadores se recomiendan para gastos unitarios q_w , no mayores a $5.5\text{m}^2/\text{s}$, y en el proyecto como se mostró antes posee un gasto unitario igual a $12\text{m}^2/\text{s}$, se optó por tener una mezcla de los dos opciones de bloques disipadores mostrados y se obtuvo una configuración que consta de 15 bloques dentados distribuidos en dos filas de 8 y 7 cada una, colocados de manera intercalada, como se muestra a continuación en la **Figura 9**:

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.

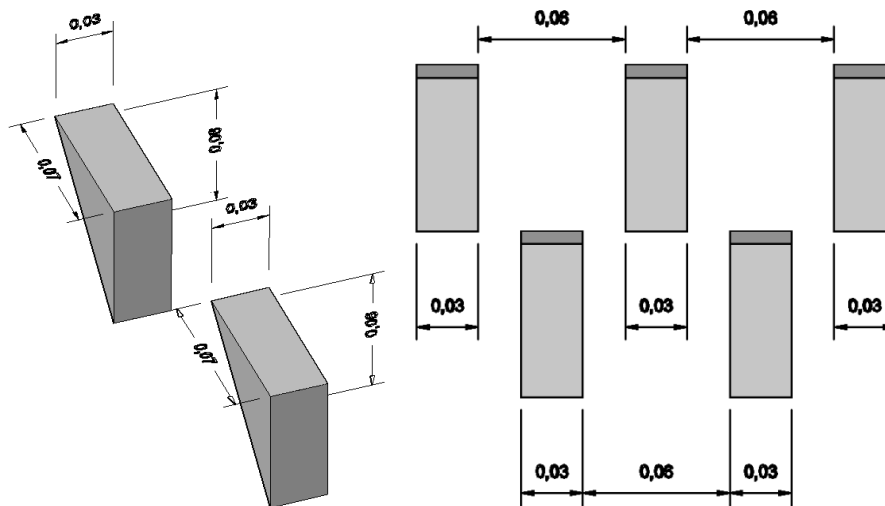


Figura 9 - Configuración y geometría de los bloques dentados (acotaciones, en metros)

5 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y ENSAYOS EN MODELO FÍSICO

La Comisión Nacional del Agua (**CONAGUA**), a través del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (**II UNAM**), construyó en sus instalaciones el modelo físico del proyecto del **TEO**, con una escala de longitudes de 1:30, guardando una similitud geométrica con el prototipo.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO

El modelo se montó en una de las naves principales para ensayos del Laboratorio de Hidráulica del **II UNAM**, siendo la geometría modelada la correspondiente al **TEC**, que sirve actualmente a la ciudad de México, en conjunto con el **TEO** y el río el Salto, sin embargo la zona de estudio está conformada por el vertedero de ingreso al tanque de amortiguación con su rápida lisa y el tanque trapezoidal de amortiguación que se encuentra en río el Salto conocido como “**Tanque El Salto II**” que posee una relación de taludes igual a 1.5:1 y dimensiones en planta correspondientes a un ancho de 0.66 m y largo de 1.77m con una altura de bordo libre 0.233m (**Figura 10**), siendo el elemento principal del que está compuesto el modelo, el concreto hidráulico.

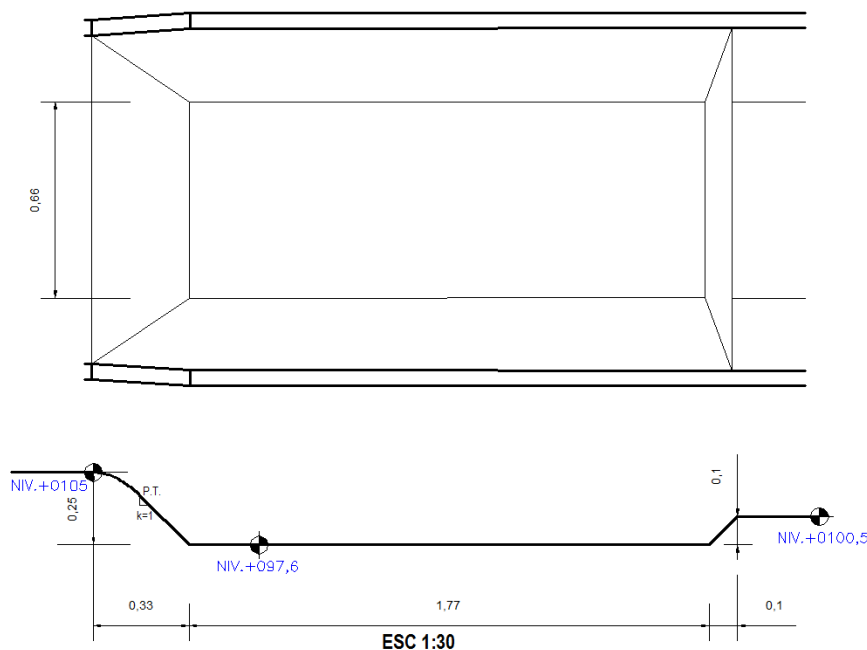


Figura 10 - Perfil y planta del modelo físico (acotaciones, en metros)

Las condiciones de diseño empleadas en el modelo físico fueron proporcionadas por la **CONAGUA**, siendo la principal además de la configuración geométrica el gasto de diseño, mismo que fue determinado al considerar la misma capacidad que posee actualmente el TEC, que es de 160m³/s, y sumarle el gasto máximo extraordinario que se consideró en el río El Salto de 80m³/s, para así llegar a un total de 240 m³/s en prototipo, equivalente a un gasto máximo en modelo de 0.04869 m³/s o 48.69 l/s y se muestra como se obtuvo a continuación por medio de la **ecuación 5.1**.

$$\frac{Q_P}{Q_M} = (L_e)^{5/2} \quad 5.1$$

Siendo:

- Q_P = Gasto de prototipo en m³/s.
- Q_M = Gasto de modelo en m³/s.
- L_e = Escala de longitudes de modelo.

$$Q_M = \frac{Q_P}{(L_e)^{5/2}} = \frac{240}{(30)^{5/2}} = 0.04869 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este gasto de modelo de 0.04869m³/s se consiguió mediante la instalación, en un mismo cárcamo, de dos bombas de distintas capacidades de carga, siendo una de 50 Hp y otra de 25 Hp, las cuales trabajan a 626 y 1450 RPM respectivamente.

Con la finalidad de controlar que el gasto entregado por el sistema de bombeo sea el solicitado, se instalaron un vertedor triangular con un limnómetro de gancho en los tanques de estabilización ubicados en la sección de ingreso al modelo.

5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS EN EL MODELO FÍSICO

Como se mencionó antes se buscó obtener a través de la modificación de las características geométricas de la rápida del vertedor de entrada al “**Tanque El Salto II**”, una modificación de la disipación de la energía cinética turbulenta (TKE) dentro del tanque y disminuir las variaciones de los niveles del tirante. Es por esto que se propusieron tres geometrías con la finalidad de caracterizar la turbulencia y determinar

si existe una estructura que modifique la disipación de la turbulencia dentro del tanque de manera tal que se vea reflejada en la disminución de la fluctuación de niveles de la superficie libre, siendo estos:

El primer ensayo denominado en este trabajo como “**Rápida Lisa**”, que básicamente consiste en operar el modelo con sus características originales de diseño.



Figura 11 - Ensayo “Rápida lisa”

El segundo se llevó a cabo mediante el aumento de la rugosidad inicial que posee la rápida lisa, utilizando escalones inclinados de dimensiones no convencionales que varían gradualmente tanto en su peralte como en su longitud de huella mostrados en la **Figura 6** del capítulo anterior, y que dada su complejidad fueron modelados en polietileno por medio de la técnica de impresión 3D. Este se denominó como ensayo en la “**Rápida Escalonada**”.



Figura 12 - Ensayo “Rápida escalonada”

El tercero basándose en el mismo principio del segundo ensayo, se intercambié los escalones por dos filas de deflectores en forma de dientes, contruidos en madera por

su facilidad y rapidez como se aprecia en la **Figura 9** mostrada en el capítulos anterior. Este ensayo será conocido de este punto en adelante como “**Rápida Dentada**”.



Figura 13 - Ensayo “Rápida dentada”

El modelo físico se instrumentó con un velocímetro acústico Doppler (ADV) y un limnómetro digital. Con los cuales se midió las velocidades instantáneas y las fluctuaciones de nivel de agua, con las cuales se pudo calcular la energía cinética turbulenta (TKE) y su disipación en distintos puntos a lo largo del tanque, logrando un correcto mallado de la zona de estudio.

Además, se realizó un modelado basado en los principios teóricos de la mecánica de fluidos computacional, (mejor conocida por sus siglas en inglés como CFD, Computacional Fluid Dynamics), usando el software computacional Flow 3D, manteniendo las mismas dimensiones del modelo físico, así logrando comparar la modificación de la turbulencia, esto será mostrado en capítulos posteriores.

5.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA VELOCIMETRÍA DOPPLER

En el Laboratorio de Hidráulica de la U.N.A.M se cuenta con un MicroADV fabricado por Sontek Inc. Este velocímetro MicroADV utiliza la tecnología Doppler para medir las tres componentes del vector velocidad de flujo en un pequeño volumen de control localizado a 5 cm del instrumento. El rango de velocidad del instrumento disponible en el laboratorio es programable por el usuario y va desde ± 3 a ± 250 cm/s y los datos pueden ser registrados por el MicroADV con frecuencias de registro de hasta 30 Hz.

La mediciones con el micro velocímetro acústico doppler, se realizaron montando el aparato indicado sobre un soporte deslizante en un marco perimetral al tanque de

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.

amortiguación del modelo, donde fueron realizadas 45 muestreos de velocidad, en diferentes puntos del taque amortiguador, distribuidos en 5 secciones transversales y en cada sección se tomó 3 verticales ubicadas en la margen derecha, en el centro y en la margen izquierda, donde se realizó el muestreo a tres profundidades diferentes 0.05, 0.10 y 0.16m de profundidad con respecto al plano hidráulico de referencia. Todas estas medidas dan un total de 9 puntos por sección con lo que se forma un mallado con la cantidad total de 45 puntos nodos (**Figura 14**), además de mostrarse el montado en laboratorio del micro ADV explicado antes en la **Figura 15**.

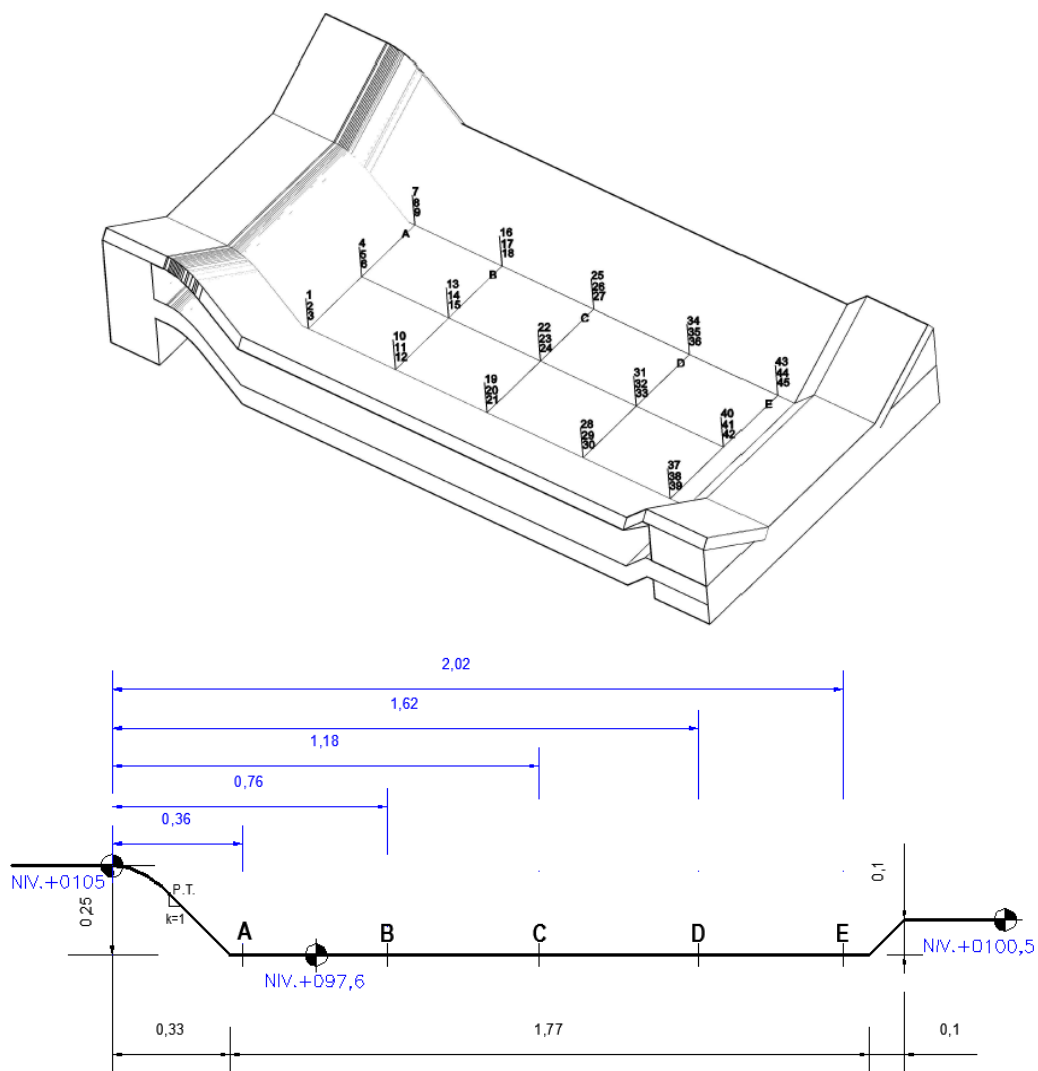


Figura 14 - Ubicación de los 45 puntos del mallado de la zona de ensayo (acotaciones, en metros)



Figura 15 - Esquema de montaje del micro ADV

5.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA LIMNIMETRÍA DIGITAL

Con la finalidad de obtener la variación de los niveles en cada ensayo, se adecuó un limnómetro digital en el mismo soporte deslizante de la periferia del **“Tanque El Salto II”**. Las mediciones con este limnómetro se realizaron en ambas márgenes y al medio del tanque en cuestión, en las mismas 5 secciones de estudio, donde con anterioridad las mediciones de velocidad se llevaron a cabo, esto se tradujo en 15 puntos de muestreo que se observan en la **Figura 16**. Durante el registro de niveles se procuró ubicarse lo más cercano al bordo libre de cada sección, sin comprometer el ensayo por alguna alteración. El montaje del limnómetro digital sobre el modelo físico se presenta en la **Figura 17**.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.

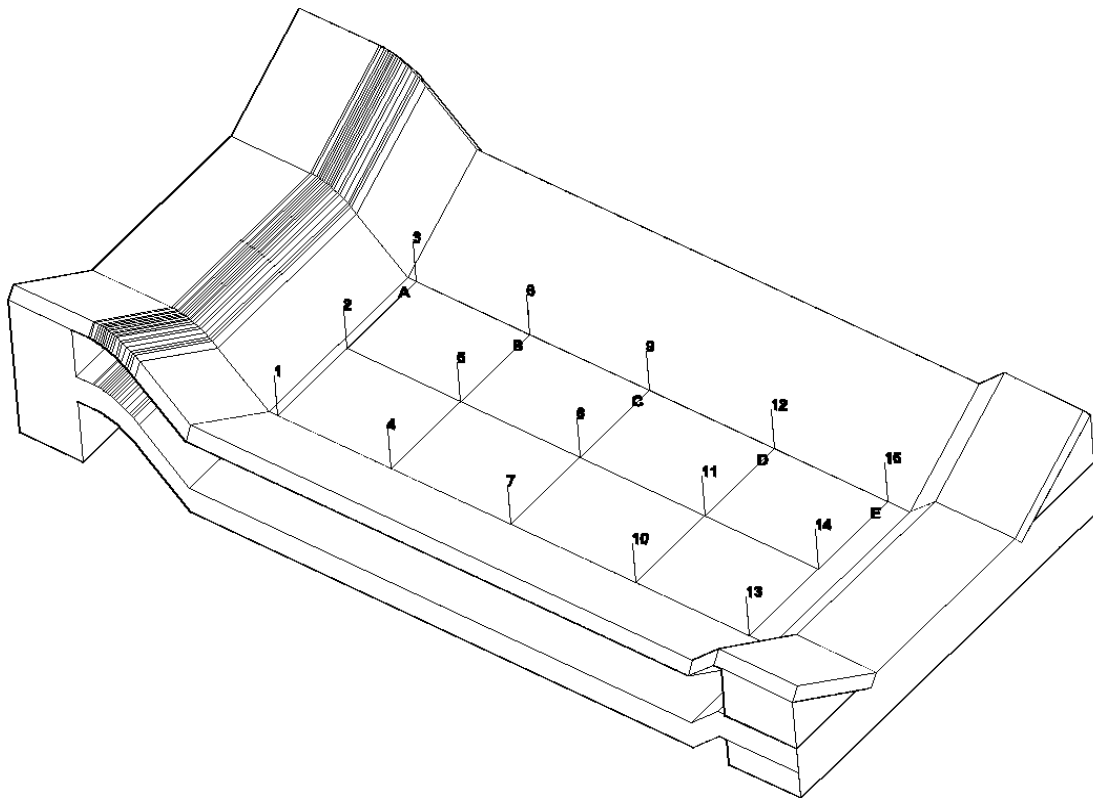


Figura 16 - Ubicación de los 15 puntos del mallado de la zona de ensayo



Figura 17 - Esquema de montaje de limnómetro digital

6 MODELACIÓN MATEMÁTICA

6.1 CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO MATEMÁTICO

El software **Flow 3D** requiere un modelo geométrico en tres dimensiones, cuidadosamente elaborado, de la zona de estudio. Ante esto, por medio de la utilización de herramientas tipo **CAD** (*Computer Aided Design*) y manteniendo las dimensiones del modelo físico, se creó la geometría 3D de las estructuras hidráulicas correspondientes al canal de llegada, vertedor de entrada y el tanque el

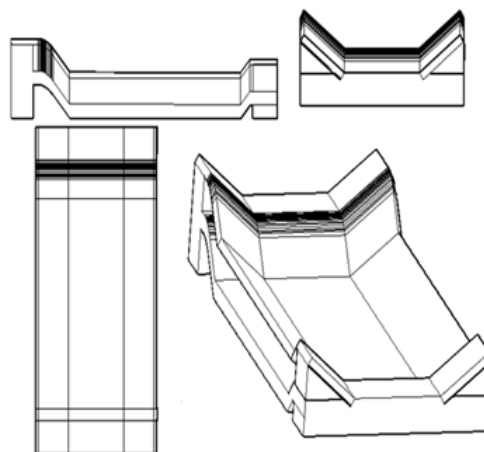


Figura 18 - Bosquejo CAD del modelo físico

Salto II. Dicho sólido que se muestra en la **Figura 18**; fue exportado a una extensión reconocida por el sistema, siendo esta un documento tipo litografía “.stl”.

Así es como se ilustró cada una de las geometrías probadas en el modelo físico, siendo el resultado final de las mismas en formato **CAD**, mostrado en la **Figura 19**.

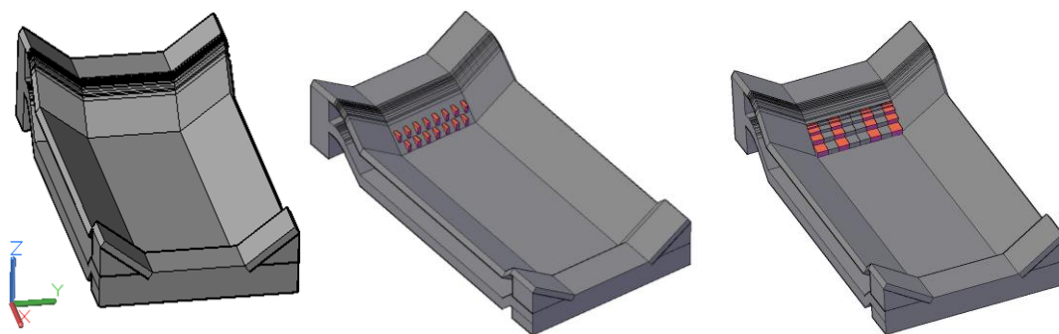


Figura 19 - Modelado CAD de las geometrías ensayadas

6.2 RUGOSIDAD DEL MODELO MATEMÁTICO

Una vez que la geometría creada con anterioridad se ha exportado como un archivo de extensión “.stl”, se importó el modelo al software Flow-3D como un subcomponente sólido, no poroso de características estándar, repitiendo este proceso para cada una de las 3 distintas geometrías modeladas matemáticamente y que serán conocidas de ahora en adelante como **“Rápida Lisa FLOW3D”, “Rápida Escalonada FLOW3D” y “Rápida Dentada FLOW3D”**.

También se debe tener en cuenta con que rugosidad absoluta “ k_s ” se está trabajando, misma que se encuentra en función del número de Manning “ n ”, siendo para el caso del prototipo la de un canal revestido con losas de concreto de superficie lisa con $n=0.014 \text{ m}^{1/6}$ (Ven te Chow, Hidráulica de los canales abiertos). Sabiendo que la escala de rugosidad del prototipo con respecto al modelo es de 1:1,76, de acuerdo a la **ecuación 6.1**, obtenemos el número de Manning del modelo de la siguiente manera:

$$n_e = (L_e)^{1/6} \quad 6.1$$

$$\frac{n_p}{n_m} = n_e$$

Siendo:

- n_e = escala de rugosidad
- n_p = número de Manning prototipo $\text{m}^{1/6}$
- n_m = número de Manning modelo $\text{m}^{1/6}$
- L_e = Escala de longitudes de modelo

$$n_e = (30)^{1/6} = 1.76$$

$$n_m = \frac{0.014}{1.76} = 0.0079 \text{ m}^{1/6}$$

En casos donde la rugosidad del modelo es muy pequeña, ya que el prototipo es poco rugoso, y se tiene una rugosidad menor a la que se puede obtener con materiales

relativamente lisos como es el caso de una rugosidad menor a 0.008, es conveniente construir el modelo de la manera más lisa posible y no tomar en cuenta la n_e . (Echávez. G. A, “Introducción a los modelos Hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental”, 1996). Por esto se decidió considerar el número de Mannig del modelo menor, siendo este $n = 0.012m^{1/6}$.

Con esto se calcula la rugosidad absoluta “ k_s ” la cual se obtiene por medio de la utilización de la **ecuación 6.2**, y se aplica a cada uno de los componentes de las tres geometrías, en sus propiedades de superficie, donde se trabajó con una rugosidad absoluta igual a 0.00086m (S.I), cuyo cálculo se muestra a continuación:

$$k_s = \left(\frac{n}{0.0389} \right)^6 \quad 6.2$$

$$k_s = \left(\frac{0.012}{0.0389} \right)^6 = 0.0008617m \approx 0.86mm.$$

6.3 MALLADO DEL MODELO MATEMÁTICO

Con la premisa de disminuir el tiempo de computo al realizar cálculos innecesarios, el mallado se lo realizó utilizando dos mallas de distintas longitudes y alturas en cada uno de los ensayos, teniendo para la modelación matemática de la “**Rápida Lisa FLOW3D**” una primera malla o “**Malla 1**”, que abarca los 0.28m del canal de llegada y el vertedor de entrada al tanque disipador, con un dominio igual a $0.01 \leq X \leq 1$; $0 \leq Y \leq 1.42$ y $0.05 \leq Z \leq 0.6$; y la malla posterior nombrada “**Malla 2**”, que incluye el resto de la estructura completando la longitud total de 2.75m, traducándose en un dominio igual a $1 < X \leq 2.75$; $0 \leq Y \leq 1.42$ y $0.01 \leq Z \leq 0.45$.

Teniendo en cuenta que la densidad de la malla de cálculo es muy importante, y el modelo “**Rápida Lisa FLOW3D**” al no poseer alguna geometría que necesité una mayor afinación, sus mallas fueron constituidas por celdas cubicas de **0.01m** de arista en sus tres direcciones resultando en un total de **1223023** celdas calculables de **2042960** disponibles, a pesar de la utilización de un sólido de dominio removible con un dominio

de $0.7 \leq X \leq 2.35$; $0 \leq Y \leq 1.42$ y $0.4 \leq Z \leq 0.60$. Todo esto se presenta a continuación con la ayuda de la herramienta disponible en el software *FAVOR* (*Fractional Area/Volume Obstacle Representation*) y se muestra en la **Figura 20** y **Figura 21**.

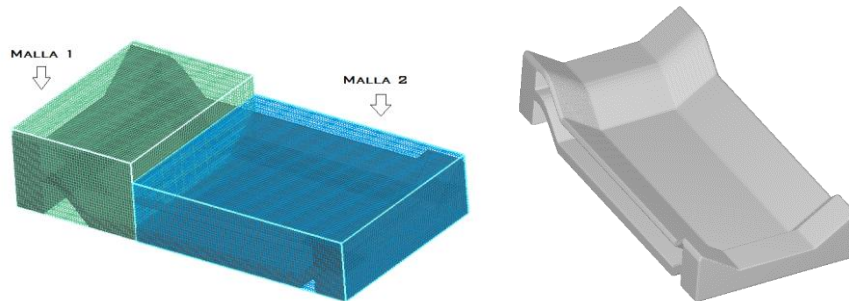


Figura 20 - Geometría Modelo matemático “Rápida Lisa FLOW3D” y su mallado

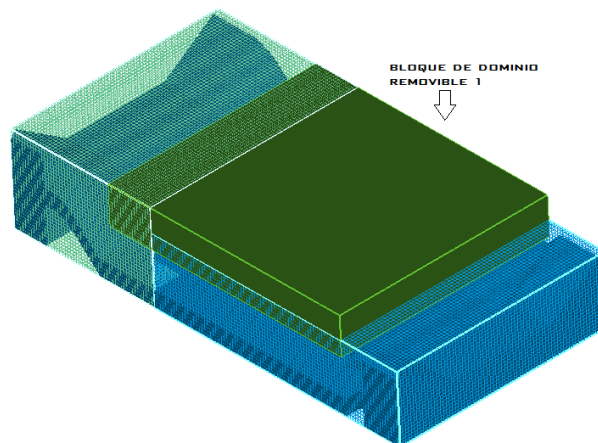


Figura 21 - Mallado “Rápida Lisa FLOW3D” con bloque de dominio removable

El mallado del modelo **“Rápida Escalonada FLOW3D”** fue similar que el anterior buscando el estudio de la parte donde el flujo interactuaba con los escalones, todo esto sin aumentar en demasía el tiempo de cálculo. Es por esto que utilizando las mismas mallas y medidas de celdas se logró un correcto mallado, teniendo la primera o como se la conocerá **“Malla 3”**, que abarca la longitud total del canal de llegada y el vertedor de entrada al tanque disipador más 0.3m del tanque disipador en sí; esta malla tiene el siguiente dominio: $0 \leq X \leq 1$; $0 \leq Y \leq 1.42$ y $0.095 \leq Z \leq 0.58$; y finalmente con el dominio $1 < X \leq 2.75$; $0 \leq Y \leq 1.42$ y $0.095 \leq Z \leq 0.45$ completando mediante la **“Malla 4”** la longitud restante de 2.75m de la estructura.

La densidad de la malla de cálculo de este modelo **“Rápida Escalonada FLOW3D”** fue constituida por celdas cubicas de una misma medida de arista en sus tres direcciones

igual a **0.01m**. Además que por medio de la utilización de otro sólido de dominio removible, con un dominio de $0.7 \leq X \leq 2.35$; $0 \leq Y \leq 1.42$ y $0.4 \leq Z \leq 0.6$ se obtuvo una total de **1969154** celdas calculables de **2714123** disponibles. Así mismo esto se presenta en la **Figura 22**.

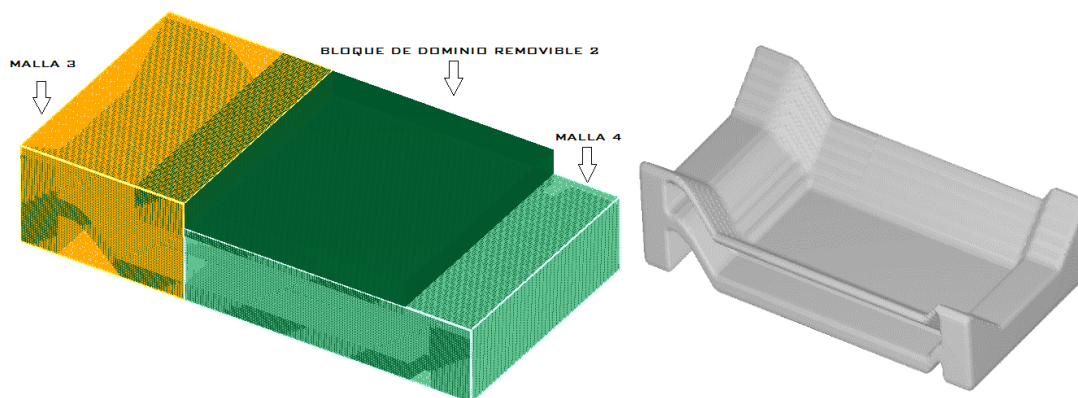


Figura 22 - Geometría Modelo matemático "Rápida Escalonada FLOW3D" y su mallado

El modelo "**Rápida Dentada FLOW3D**" por el mismo motivo que el del modelo anterior, la necesidad de caracterizar de una mejor manera la interacción del flujo con los deflectores dentados, este fue conformado por dos mallas con pequeñas variaciones a las dos originales, siendo la primera la "**Malla 5**", la que al igual que las otras mallas iniciales abarcan los primeros 0.28m del canal de llegada, además de contener el vertedor de entrada al tanque con los deflectores dentados y parte del tanque disipador en sí, y esta posee un dominio de $0 \leq X \leq 1$; $0 \leq Y \leq 1.42$ y $0.095 \leq Z \leq 0.58$. Para terminar el mallado con la "**Malla 6**" que incluye el resto de la estructura con un dominio $1 \leq X \leq 2.75$; $0 \leq Y \leq 1.42$ y $0.01 \leq Z \leq 0.45$.

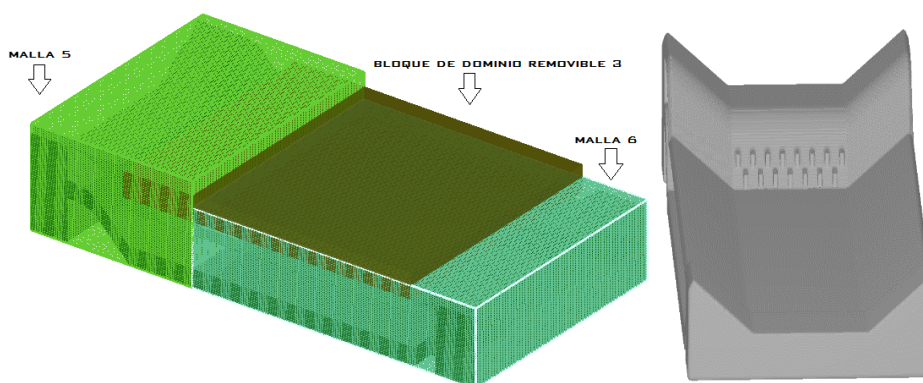


Figura 23 - Geometría Modelo matemático "Rápida Dentada FLOW3D" y su mallado

En la **Figura 23** mostrada arriba se aprecia la disposición de las mallas y el empleando del mismo sólido de dominio removible del ensayo "**Rápida Dentada FLOW3D**" con el

cual se obtuvo una total de **1133558** celdas calculables de **1947820** disponibles. En cuanto a la densidad de la malla, esta fue constituida por celdas cubicas de medidas de arista en sus tres direcciones de **0.01m**, y que son explicadas de una mejor manera, al igual que la de las otras geometrías en la **Tabla 3** mostrada a continuación.

Tabla 3 - Composición del mallado y sus dominios

	COMPOSICIÓN MALLADO		DOMINIO			DENSIDAD DE MALLADO
	Número de Elementos	Nombre de Elementos	$x (m)$	$y (m)$	$z (m)$	Dimensión arista de (m)
Rápida Lisa FLOW3D	2	Malla 1	0 - 1	0 - 1.42	0.05 - 0.6	0.01
		Malla 2	1 - 2.75	0 - 1.42	0.01 - 0.45	0.01
	1	Bloque 1	0.7 - 2.35	0 - 1.42	0.4 - 0.6	-
Rápida Escalonada FLOW3D	2	Malla 3	0 - 1	0 - 1.42	0.095 - 0.58	0.01
		Malla 4	1 - 2.75	0 - 1.42	0.095 - 0.45	0.01
	1	Bloque 2	0.7 - 2.35	0 - 1.42	0.4 - 0.6	-
Rápida Dentada FLOW3D	2	Malla 5	0 - 1	0 - 1.42	0.095 - 0.58	0.01
		Malla 6	1 - 2.75	0 - 1.42	0.01 - 0.45	0.01
	1	Bloque 3	0.57 - 2.35	0 - 1.42	0.37 - 0.52	-

6.4 CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO MATEMÁTICO

Al haber creado varias mallas en forma de paralelepípedos es necesario dar condiciones de borde o de frontera a cada una de las 6 caras de estas. En lo que concierne a las primeras mallas de los tres ensayos, la “**Malla 1**”, “**Malla 3**” y “**Malla 5**”; sus caras aguas arriba que corresponden a $X_{\text{mínimo}}$, se las manejó como condición de frontera de entrada de gasto volumétrico (*Volumen flow rate*) en lugar de velocidad (*Specified Velocity*) para garantizar el gasto y evitar que se produzca inestabilidades que provoquen la entrada de un mayor volumen de agua, esto con una fracción de fluido igual a uno; mientras que en la de aguas debajo de estas mallas ó $X_{\text{máximo}}$ se trabajó con la condición de simetría (*Simetry*) para cotejar estas mallas con las que le siguen.

Esta consideración de simetría se repitió en ambas caras, aguas arriba $X_{\text{mínimo}}$ de la “Malla 2”, “Malla 4” y “Malla 6”, en cambio en las de aguas abajo $X_{\text{máximo}}$, se optó por la condición de presión (*Specified Pressure*) con fracción de fluido igual a uno, con la finalidad de tener el incremento de tirante producto del encuentro del río “El Salto” con el proyecto del TEO, ya que estos al unirse trabajan como un tapón hidráulico.

La condición de salida de fluido (*Outfluid*) fue considerada a lo largo de los muros del canal de entrada, salida y el mismo tanque dissipador, en todos los modelos matemáticos propuestos, tomando esta determinación para evaluar posibles derrames; es por eso que las caras $Y_{\text{mínimo}}$ y $Y_{\text{máximo}}$, de todas las mallas llevan esta condición de borde.

En lo que concierne a las condiciones de frontera $Z_{\text{mínimo}}$ y $Z_{\text{máximo}}$ de todas las mallas, se consideró una condición de pared (*Wall*) y otra de presión (*Specified Pressure*) con fracción de fluido igual a cero respectivamente. Esto se puede observar en la siguiente **Figura 24**, y se pueden entender de una manera más clara en la **Tabla 4**.

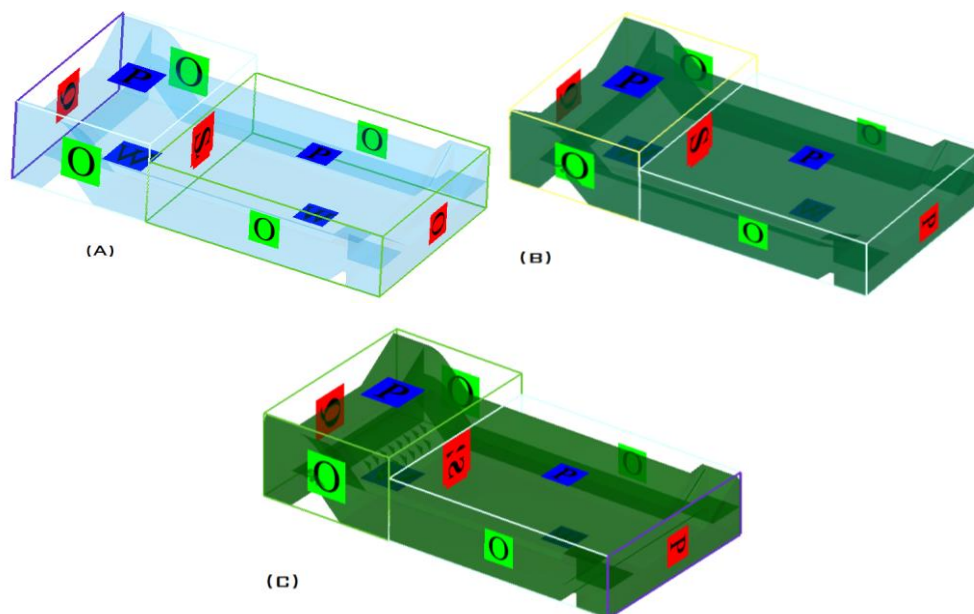


Figura 24 - Condiciones de frontera modelos matemáticos (A) “Rápida Lisa FLOW3D”, (B) “Rápida Escalonada FLOW3D” y (C) “Rápida Dentada FLOW3D”.

Tabla 4 - Condiciones de frontera de los modelos matemáticos

CONDICIONES DE FRONTERA							
	MALLAS	$X_{\text{mínimo}}$	$X_{\text{máximo}}$	$Y_{\text{mínimo}}$	$Y_{\text{máximo}}$	$Z_{\text{mínimo}}$	$Z_{\text{máximo}}$
Rápida Lisa FLOW3D	Malla 1	Volume flow rate	Simetry	Outfluid	Outfluid	Wall	Specified Pressure fluid fraction 0
	Malla 2	Simetry	Specified Pressure fluid fraction 1	Outfluid	Outfluid	Wall	Specified Pressure fluid fraction 0
Rápida Escalonada FLOW3D	Malla 3	Volume flow rate	Simetry	Outfluid	Outfluid	Wall	Specified Pressure fluid fraction 0
	Malla 4	Simetry	Specified Pressure fluid fraction 1	Outfluid	Outfluid	Wall	Specified Pressure fluid fraction 0
Rápida Dentada FLOW3D	Malla 5	Volume flow rate	Simetry	Outfluid	Outfluid	Wall	Specified Pressure fluid fraction 0
	Malla 6	Simetry	Specified Pressure fluid fraction 1	Outfluid	Outfluid	Wall	Specified Pressure fluid fraction 0

6.5 MODELO DE TURBULENCIA DEL MODELO MATEMÁTICO

Teniendo las condiciones de frontera ya establecidas, se debe seleccionar el tipo y las características del fluido, por lo que se seleccionó como fluido agua a 20°C de temperatura. Y con características físicas tales como viscosidad newtoniana y flujo de régimen turbulento, escogiendo las ecuaciones de cierre; para calcular la influencia de

la turbulencia. Se procedió con las ecuaciones de cierre del modelo renormalizado *RNG*, con una longitud de mezcla computada dinámicamente (*Dynamically Computed*), recomendado en la bibliografía (FLOW 3D-v9.4 User Manual, 2009), aunque el flujo se comporta de una manera no tan turbulenta, comportamiento contrario al que se presenta en el modelo físico con el cual se pretende comparar este modelo matemático.

Este fenómeno puede estar relacionado con el uso de un modelo de turbulencia **RANS**, y se debe a que los modelos de turbulencia **RANS** predicen las cantidades promediadas en conjuntos, por lo que tienden a mostrar las superficies libres lisas, cuasi-estacionarias en lugar de un flujo turbulento con un comportamiento de su superficie libre de una manera más agitada, comportamiento típico de un ensayo físico de esta magnitud.

6.6 CONDICIONES INICIALES DE LOS MODELOS DE ENTRADA DE AIRE, EVALUACIÓN DE DENSIDAD Y FLUJO DE DERIVA

Tratando de obtener en el modelo matemático una representación correcta del fenómeno físico, se procuró no dejar al lado el efecto que la entrada de aire produce y que se presenta en una obra de este tipo y más aun considerando que las configuraciones adicionales propuestas producen una aireación natural mayor en el flujo. Es por eso que se utilizó el modelo de entrada de aire “Air entrainment”, y para agregar los efectos de aumento de volumen y flotabilidad de las burbujas de aire se activó los modelos de evaluación de densidad “Density evaluation” y de deriva de flujo “Drift-Flux”. Los datos iniciales de entrada de aire para todos los modelos matemáticos expuestos en este trabajo se muestran en la **Figura 25**, además de los datos iniciales antes mencionados llamados “Density evaluation” y “Drift-Flux”, los cuales se presentan en las **Figura 26** y **Figura 27** respectivamente.

☒ Activate air entrainment model

Parameters

Entrainment rate coefficient	0.5
Surface tension coefficient	0.073

☒ Activate bulking Bulking options >>

☒ Activate bouyancy Bouyancy options >>

Density of phase #2 1.2

OK Cancel Help

Figura 25 - Datos del modelo de entrada de aire FLOW-3D

Options

☐ Constant uniform density

☐ Density evaluated as a function of other quantities (e.g., temperature or scalars)

☐ Include volumetric thermal expansion

☒ First order approximation to density transport equation
(density varies due to initial conditions or compressibility)

☐ Second order monotonicity preserving approximation to density transport equation
(density varies due to initial conditions or compressibility)

OK Cancel Help

Figura 26 - Datos del modelo de evaluación de densidad FLOW-3D

☒ Activate drift-flux model

Drift-flux model options

Drag coefficient	0.5
Average particle radius	0.003
Richardson-Zaki coefficient multiplier	1
Viscosity of two-phase mixture	0.001
Viscosity of phase #1	0.001
Viscosity of phase #2	1.7e-05
Density of phase #1	1000
Density of phase #2	1.2
Minimum volume fraction of phase 1	0.00000
Maximum volume fraction of phase 1	1.00000
Volume fraction of phase #2 at inversion point (Phase #2 turns from dispersed to continuous above inversion point)	0.5

☒ Allow gas to escape at free surface

OK Cancel Help

Figura 27 - Datos entrada del modelo de flujo de deriva FLOW-3D

6.7 CONDICIONES INICIALES DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Las condiciones iniciales seleccionadas, a más de indicar el eje z como la dirección de la presión hidrostática y sabiendo que la aceleración de la gravedad varía según la latitud y altura, configuramos los datos generales como densidad, flujo de deriva y entrada de aire, para el Distrito Federal con una aceleración de la gravedad en dirección "z" igual a -9.78m/s^2 y una presión atmosférica de 0.79 kg/cm^2 o 77000 N/m^2 (Pa).

Al igual que las condiciones iniciales generales mostradas anteriormente, se debe tener en cuenta que al momento de establecer las condiciones de frontera del modelo

matemático, es necesario ingresar datos iniciales (en algunas condiciones que difieran de *Outfluid, Wall o Symetry*) como gasto y la elevación del flujo, siendo este caso los datos solicitados por el software al establecer la condición de entrada en el límite $X_{\text{mínimo}}$ de la “**Malla 1**”, “**Malla 3**” y “**Malla 5**”, como una de gasto volumétrico (*Volume flow rate*) igual a $0.04869\text{m}^3/\text{s}$. Por esto con la finalidad de obtener el dato restante de elevación del fluido a 0.28m aguas arriba de la cresta del vertedor, donde se encuentra situada la condición $X_{\text{mínimo}}$ de estas mallas, sabiendo gracias a cálculos previos que el perfil del flujo del canal de llegada al tanque “El Salto II” en el prototipo es del **tipo S2**, se procedió a la determinación y comprobación del tipo del perfil que poseía el modelo en el canal de entrada al tanque en cuestión, donde se observó que debido a la consideración explicada en capítulos anteriores, de un número de Manning igual $0.012\text{m}^{1/6}$, el modelo físico presentaba un perfil de flujo del **tipo M2** con el cual se obtuvieron las distintas alturas de flujo a partir del método directo por pasos.

Cálculo del tirante crítico y_c a través de la **ecuación 4.5** mostrada anteriormente:

$$\frac{Q^2(b + 2zy_c)}{g} - y_c^3(b + zy_c)^3 = 0$$

Para este caso en concreto con un gasto $Q=0.04869\text{m}^3/\text{s}$, ancho $b=0.66\text{m}$, la relación horizontal de taludes $z=1.5$, una pendiente de fondo $S_o=0.00202$, un número de Manning $n=0.012\text{m}^{1/6}$ y la aceleración de la gravedad considerada como $9.78\text{m}/\text{s}^2$, tenemos:

$$\frac{(0.04869)^2[0.66 + 2(1.5y_c)]}{9.78} - y_c^3(0.66 + 1.5y_c)^3 = 0$$

$$y_c = 0.07734\text{m}$$

Con el tirante crítico “ y_c ” calculado como dato inicial y manejando un aumento del 1% en el tirante “ y ”, se puede obtener los datos de tirante a 0.28m de la cresta del vertedor, por medio de la utilización del método directo por pasos como se muestra a continuación en la **Tabla 5**:

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.

Tabla 5 - Determinación del perfil de flujo Tipo M2, mediante el método directo por pasos (Ven Te Chow - Hidráulica de los canales abiertos)

	$A = y(b + zy)$	$P_m = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$R_H = A/P_m$	$v = Q/A$	$v^2/2g$	$E = y + v^2/2g$	$S_f = \left(\frac{v \cdot n}{R_H^{2/3}}\right)^2$	$\bar{S}_{fm} = \frac{1}{2}(S_{f1} + S_{f2})$	$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - \bar{S}_f}$	$x + \Delta x$	
y (m)	A (m ²)	Pm (m)	RH (m)	V (m/s)	v ² /2g (m)	E (m)	Sf	Sfm	Δx (m)	x	0-x
0.077	0.060	0.939	0.064	0.811	0.034	0.111	0.004			0.000	0.000
0.0781	0.061	0.942	0.064	0.802	0.033	0.111	0.004	0.004	0.007	-0.007	0.007
0.0789	0.061	0.944	0.065	0.793	0.032	0.111	0.003	0.004	0.024	-0.032	0.032
0.0797	0.062	0.947	0.066	0.784	0.031	0.111	0.003	0.003	0.044	-0.075	0.075
0.0805	0.063	0.950	0.066	0.775	0.031	0.111	0.003	0.003	0.066	-0.141	0.141
0.0813	0.064	0.953	0.067	0.766	0.030	0.111	0.003	0.003	0.093	-0.234	0.234
0.0816	0.064	0.954	0.067	0.762	0.030	0.111	0.003	0.003	0.046	-0.280	0.280

Por lo tanto, los datos iniciales ingresados en la condición de frontera de gasto volumétrico (*Volume flow rate*), correspondiente a $X_{\text{mínimo}}$ de la “Malla 1”, “Malla 3” y “Malla 5”, fueron de gasto igual a **0.04869 m³/s** y una elevación de flujo de 0.0816m, dando un total **0.4321m** considerando la elevación de la plantilla con respecto al plano de referencia igual a 0.35m y el desnivel producido por la pendiente $S=0.00202$, todo esto con una fracción de fluido igual a uno. Por otro lado, en lo que concierne a la condición de presión (*Specified Pressure*), que se encuentra en el límite $X_{\text{máximo}}$ de la “Malla 2”, “Malla 4” y “Malla 6”, se utilizó una altura de flujo igual a **0.14m**, siendo en total **0.34m** con respecto al P.H.R, valor obtenido por mediciones en laboratorio. Lo antes mencionado viene ilustrado en la **Figura 28**, mostrada a continuación:

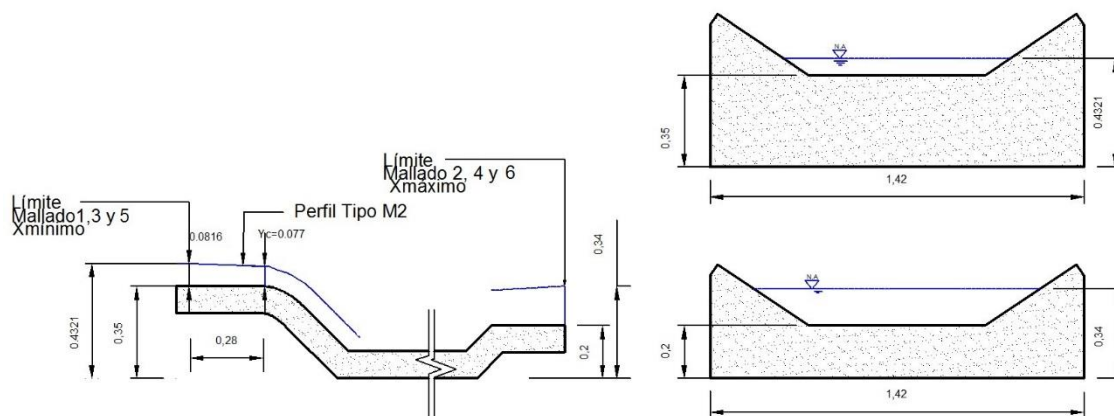


Figura 28 - Datos de entrada del modelo matemático

Estas condiciones iniciales se mantuvieron para cada una de las 3 distintas geometrías modeladas matemáticamente, “Rápida Lisa FLOW3D”, “Rápida Escalonada FLOW3D” y “Rápida Dentada FLOW3D”.

6.8 SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Por medio de la utilización del equipo de computación, propiedad del instituto de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, que consta de un servidor Dell PowerEdge de 64GB de RAM y dos procesadores de 12 núcleos cada uno, contando con un total de 24 núcleos trabajando simultáneamente a una velocidad máxima de 2.4 GHz; se realizaron los distintos ensayos con los tres modelos matemáticos, con un tiempo de computo aproximado de 4 días para el primer modelo **“Rápida Lisa FLOW3D”**, 5 días para el modelo **“Rápida Escalonada FLOW3D”** y 4 días para el modelo **“Rápida Dentada FLOW3D”**, generando archivos de tamaño de **13GB, 13GB y 10 GB** cada uno de ellos respectivamente.

Una vez que cada corrida ha iniciado, se debe asegurar que el gasto indicado como condición inicial sea estable a lo largo del tanque, corroborando esto mediante el control de la diferencia del gasto volumétrico que entra *“left boundary volume flow rate”* y aquel que sale del tanque disipador de energía *“right boundary volume flow rate”*, teniendo en cuenta que para estos caso al tener varias mallas el límite izquierdo será el de la **“Malla 1”** y el derecho para los de la **“Malla 2”**, esto se puede observar en **Figura 29** mostrada a continuación.

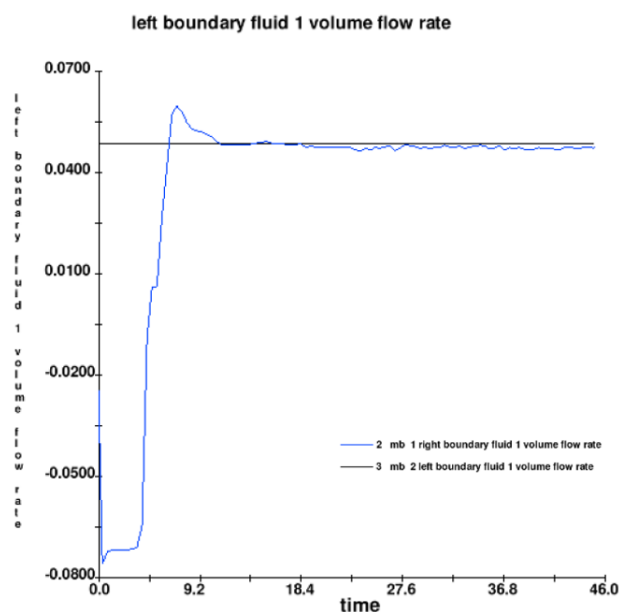


Figura 29 - Gasto de entrada y salida del modelo matemático

En cada uno de los modelos matemáticos se puede observar que a partir de los 10 segundos de simulación el gasto se estabiliza en un valor muy parecido al de $0.04869\text{m}^3/\text{s}$, que es el mismo que posee el modelo físico, con lo cual podemos comenzar al cotejo del resto de parámetros entre ambos modelos. El modelo se puede considerar que se ha estabilizado por completo a los 45 segundos momento en el que la variación de la energía cinética es mínima y cuasi constante, y se puede dar por concluida la simulación, como se puede observar en la **Figura 30**.

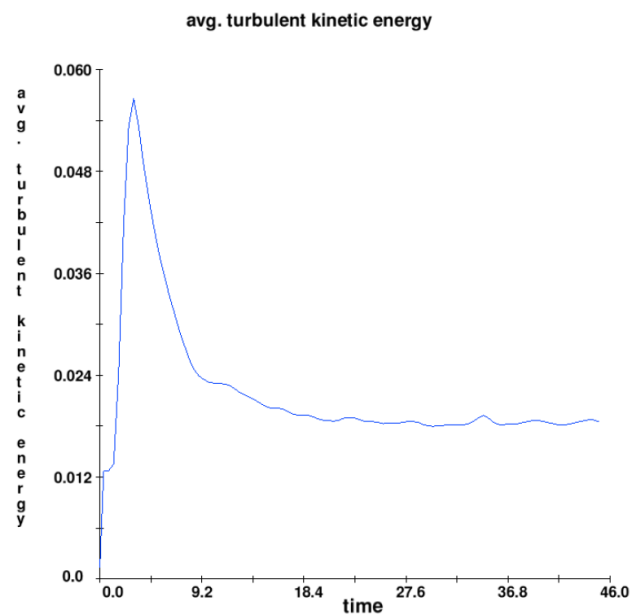


Figura 30 - Variación de la TKE durante la simulación

7 ANÁLISIS DE DATOS

7.1 PARÁMETROS Y FUNCIONES ESTADÍSTICAS

Referente a la estadística descriptiva de las series temporales de velocidad, los parámetros utilizados para describir el flujo son: media varianza y desviación estándar de los valores de velocidad, energía cinética turbulenta y esfuerzos de Reynolds. La estimación de parámetros de mayor orden (asimetría y curtosis) en las señales de velocidad registradas no es recomendable debido a la elevada incertidumbre que presentan éstos.

7.1.1 MEDIA

La velocidad u de un flujo turbulento varía en forma aleatoria en dos instantes de tiempo consecutivos; por lo tanto, si se tiene una serie de n datos de velocidad, resulta útil calcular un valor promedio, el cual se determina según la siguiente expresión:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \quad 7.1$$

La **ecuación 7.1** corresponde a la velocidad media para la dirección principal del flujo. Siguiendo el mismo principio, se puede calcular los valores de velocidad media del flujo para las otras dos direcciones.

7.1.2 VARIANZA

Se conoce con el nombre de varianza al cuadrado de la desviación estándar y se representa por $\bar{u}^2$. En flujos turbulentos, la varianza es uno de los parámetros más importantes, pues representa la cantidad de energía que posee el flujo a raíz de la turbulencia. La varianza se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\bar{u}'^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{U})^2}{n} \quad 7.2$$

La **ecuación 7.2** corresponde a la varianza para la dirección principal del flujo. Siguiendo el mismo principio, se puede calcular los valores de varianza del flujo para las otras dos direcciones.

En turbulencia, el valor de la varianza cuantifica el nivel de energía de la señal registrada. Valores de varianza obtenidos con un instrumento debe incluir la contribución únicamente de los procesos turbulentos. En la realidad, se deben realizar correcciones en la varianza por la presencia de ruido y filtrado digital del instrumento.

7.1.3 DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Conocido el valor de la velocidad media, se puede calcular la fluctuación de la velocidad con respecto a ésta. La desviación estándar es un promedio cuadrático de esas fluctuaciones. Para evitar una compensación entre los signos, esta diferencia es elevada al cuadrado y después se obtiene la raíz cuadrada de ese promedio. La desviación estándar se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\bar{u}' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{U})^2}{n}} \quad 7.3$$

La **ecuación 7.3** corresponde a la desviación estándar para la componente de velocidad en la dirección del flujo dominante. De la misma manera, se puede determinar dicho estadístico para las otras dos direcciones del flujo.

7.1.4 COVARIANZA

La covarianza $\overline{u'v'}$ de las fluctuaciones de las componentes longitudinal [$u' + (t) = u(t) - \bar{U}$] y transversal [$v' (t) = v(t) - \bar{V}$] de velocidad del flujo se define, por la **ecuación 7.4**, como:

$$\overline{u'v'} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{U})(v_i - \bar{V})}{n} \quad 7.4$$

Si $\overline{u'v'} > 0$ hay dependencia lineal directa (positiva), es decir, a grandes valores de u' corresponden grandes valores de v' .

Si $\overline{u'v'} = 0$ se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas, y Si $\overline{u'v'} < 0$ hay dependencia lineal inversa (negativa), es decir, a grandes valores de u' corresponden pequeños valores de v' , o viceversa.

En turbulencia, la covarianza de las señales de velocidad en las tres direcciones ($\overline{u'v'}$, $\overline{u'w'}$ y $\overline{v'w'}$) permite calcular las componentes que se encuentran fuera de la diagonal del tensor de Reynolds (Herrero, 2011).

7.1.5 ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA (TKE)

Físicamente la energía cinética turbulenta o **TKE** por sus siglas en inglés, 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 está calculada por la **ecuación 7.5**:

$$TKE = 1/2 (u'^2_{rms} + v'^2_{rms} + w'^2_{rms}) \quad 7.5$$

donde u' , v' y w' son las fluctuaciones de la velocidad en las respectivas direcciones del flujo.

7.1.6 INTENSIDAD TURBULENTA

Existe una expresión universal para calcular la intensidad de turbulencia, la cual se calcula para cada una de las direcciones del flujo. Las 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. Algunos de los primeros en medir este tipo de parámetros en flujos a superficie libre, gracias a la aparición del anemómetro de hilo caliente, fue Nakagawa et al (1975). Ellos realizaron estudios para observar el comportamiento de la turbulencia, modificando la rugosidad en un canal. Con lo cual, se observó que el tamaño dominante del eddy 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.

Posteriormente, 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 $0.1 < y/h < 0.6$ que es 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:

$$u' / U_* = 2.3 \exp(-y/h)$$

$$v' / U_* = 1.27 \exp(-y/h)$$

$$w' / U_* = 1.63 \exp(-y/h)$$

$$k / U_*^2 = 4.78 \exp(-2y/h)$$

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 modifica 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 pero genera buenos resultados en fondos lisos o poco rugosos, Papanicolaou et al (2012).

7.1.7 TASA DE DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA TURBULENTA (ε)

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 ε .

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

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 puede calcular por la **ecuación 7.6**:

$$\varepsilon = C_\mu \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{TKE^{3/2}}{l} \quad 7.6$$

donde **TKE** es la energía cinética turbulenta, C_μ es un parámetro empírico típicamente 0.09 (adimensional) y l es la macro escala de turbulencia este valor se recomienda de 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 Boyaghchi 2007) dicho parámetro también es posible emplearlo en canales por lo que en este caso sería el 7% del tirante (Flow Science, Inc. 2012).

También es posible obtener la disipación de la energía cinética si se parte del promedio de la **TKE** por unidad de masa. La fórmula propuesta en la **ecuación 7.7** por Flow Science en su manual de ejercicios es:

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

7.7

donde C_{μ} es 0.09, $k = 1.5(uI)^2$ siendo u la velocidad media e $I = 0.16Re^{-1/8}$, el número de Reynolds para canales abiertos es $Re = Rh u/\nu$, siendo Rh el radio hidráulico y ν 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.

8 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

8.1 RESULTADOS DE MODELO FÍSICO

Los resultados de velocidades medias y energías fueron obtenidos mediante el análisis y proceso de las mediciones realizadas con el micro ADV, utilizando el software propio del sistema denominado *WinADV*, que además posee un filtro con el cual se puede eliminar los datos procedentes de anomalías en la recepción de la señal que pudieran alterar los resultados, motivo por el cual se decidió no ocupar ningún otro filtro. Como se dijo en capítulos anteriores al utilizarse una frecuencia de muestreo de 30Hz con un tiempo de experimentación aproximado de 1 minuto, se llegó a tener alrededor de 1800 mediciones en cada uno de los 45 puntos de ensayo, los cuales tuvieron una validez de los datos filtrados mayor al **90%** en todos los casos. De ahí que a través del cálculo de la raíz cuadrada, de la suma de los cuadrados de las velocidades medias, en sus tres componentes u , v y w se pudo obtener la velocidad media U , en todos los puntos de ensayo, mientras que empleando la **ecuación 7.5**, se obtuvo la energía cinética turbulenta **TKE**. La disposición de estos 45 puntos ensayados puede ser observada, para un mejor entendimiento de los resultados expresados en la **Tabla 6**, la **Figura 14**, siendo MD, C y MI la margen derecha, centro y margen izquierda respectivamente. En lo que concierne a la tasa de disipación de la energía cinética **DTKE**, esta fue calculada de dos formas diferentes, utilizando la **ecuación 7.6** y **7.7**, con sus distintas consideraciones presentadas en el **capítulo 7.1** y demás cálculos necesarios como son el número de Reynolds y la longitud de mezcla turbulenta del flujo. Los resultados obtenidos a partir de las mediciones en el modelo físico se muestran a continuación en la **Tabla 7**.

Tabla 6 - Resultados de velocidad y TKE obtenidos a través de los ensayos en el modelo físico

		Velocidad Media U (m/s)			TKE (m2/s2)			
		Sección	Lisa	Escalonada	Dentada	Lisa	Escalonada	Dentada
A	MD	1	0.001	0.062	0.201	0.003	0.057	0.047
		2	0.774	1.161	0.681	0.162	0.100	0.070
		3	0.178	0.121	0.438	0.069	0.022	0.018
	C	4	0.005	0.065	0.153	0.004	0.056	0.068
		5	0.742	1.058	0.740	0.213	0.112	0.075
		6	0.123	0.099	0.971	0.105	0.019	0.051
	MI	7	0.013	0.060	0.273	0.008	0.064	0.043
		8	0.955	1.134	0.585	0.159	0.106	0.085
		9	0.116	0.037	0.466	0.085	0.004	0.013
		PROMEDIO	0.323	0.422	0.501	0.090	0.060	0.052
B	MD	10	0.016	0.087	0.053	0.036	0.085	0.060
		11	0.494	0.682	0.407	0.128	0.083	0.085
		12	0.054	0.250	0.385	0.083	0.004	0.008
	C	13	0.013	0.060	0.307	0.003	0.090	0.061
		14	0.824	0.642	0.742	0.093	0.096	0.035
		15	0.390	0.972	0.678	0.109	0.026	0.008
	MI	16	0.105	0.242	0.242	0.023	0.062	0.036
		17	0.322	0.489	0.137	0.146	0.102	0.086
		18	0.265	0.697	0.231	0.068	0.016	0.006
		PROMEDIO	0.276	0.458	0.354	0.076	0.063	0.043
C	MD	19	0.142	0.313	0.165	0.031	0.065	0.037
		20	0.461	0.607	0.343	0.058	0.056	0.040
		21	0.244	0.027	0.088	0.069	0.000	0.002
	C	22	0.077	0.272	0.501	0.032	0.072	0.039
		23	0.740	0.585	0.677	0.053	0.064	0.023
		24	0.546	0.303	0.204	0.074	0.011	0.006
	MI	25	0.366	0.016	0.044	0.030	0.055	0.019
		26	0.097	0.291	0.053	0.029	0.071	0.024
		27	0.149	0.299	0.015	0.029	0.031	0.004
		PROMEDIO	0.313	0.301	0.232	0.045	0.047	0.022
D	MD	28	0.052	0.394	0.202	0.011	0.033	0.018
		29	0.320	0.464	0.267	0.030	0.027	0.017
		30	0.284	0.286	0.160	0.031	0.012	0.005
	C	31	0.014	0.319	0.498	0.006	0.036	0.024
		32	0.584	0.387	0.512	0.037	0.037	0.025
		33	0.572	0.329	0.319	0.042	0.022	0.011
	MI	34	0.019	0.148	0.028	0.001	0.025	0.013
		35	0.036	0.102	0.042	0.024	0.019	0.013
		36	0.029	0.040	0.038	0.031	0.009	0.004
		PROMEDIO	0.212	0.274	0.230	0.024	0.025	0.015
E	MD	37	0.005	0.352	0.249	0.000	0.015	0.010
		38	0.230	0.331	0.199	0.017	0.015	0.009
		39	0.270	0.182	0.087	0.020	0.010	0.004
	C	40	0.013	0.295	0.438	0.000	0.015	0.015
		41	0.426	0.282	0.395	0.027	0.015	0.014
		42	0.496	0.186	0.230	0.028	0.008	0.010
	MI	43	0.003	0.201	0.206	0.000	0.011	0.013
		44	0.259	0.166	0.176	0.018	0.010	0.013
		45	0.271	0.123	0.130	0.022	0.007	0.008
		PROMEDIO	0.219	0.235	0.234	0.015	0.012	0.011

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.

Tabla 7 - Resultados DTKE obtenidos a través de los ensayos en el modelo físico

		Sección	DTKE ϵ (m2/s3) ecuación 7.6			DTKE ϵ (m2/s3) ecuación 7.7		
			Lisa	Escalonada	Dentada	Lisa	Escalonada	Dentada
A	MD	1	1.52E-03	1.20E-01	8.67E-02	2.62E-09	2.38E-04	4.86E-03
		2	5.68E-01	2.79E-01	1.56E-01	2.30E+00	1.56E+00	1.89E-01
		3	1.59E-01	2.95E-02	2.08E-02	2.79E-02	1.75E-03	5.04E-02
	C	4	2.55E-03	1.13E-01	1.51E-01	5.39E-08	8.51E-05	1.39E-03
		5	8.57E-01	3.20E-01	1.77E-01	1.55E-01	3.71E-01	1.57E-01
		6	2.98E-01	2.19E-02	9.72E-02	7.08E-04	3.06E-04	3.53E-01
	MI	7	6.28E-03	1.38E-01	7.38E-02	1.39E-06	1.55E-04	8.80E-03
		8	5.20E-01	2.94E-01	2.03E-01	5.26E-01	1.06E+00	8.69E-02
		9	2.03E-01	2.02E-03	1.23E-02	9.47E-04	3.56E-05	4.39E-02
PROMEDIO		0.291	0.146	0.109	0.335	0.333	0.099	
B	MD	10	5.00E-02	1.87E-01	1.07E-01	7.70E-06	5.32E-04	8.55E-05
		11	3.39E-01	1.82E-01	1.81E-01	2.40E-01	2.53E-01	3.76E-02
		12	1.77E-01	2.27E-03	5.76E-03	3.13E-04	1.24E-02	3.18E-02
	C	13	1.07E-03	2.04E-01	1.10E-01	6.36E-07	6.14E-05	8.94E-03
		14	2.10E-01	2.26E-01	4.85E-02	1.75E-01	7.44E-02	1.26E-01
		15	2.66E-01	3.18E-02	5.35E-03	1.85E-02	2.58E-01	9.64E-02
	MI	16	2.66E-02	1.19E-01	5.03E-02	7.07E-04	9.70E-03	4.06E-03
		17	4.18E-01	2.49E-01	1.89E-01	2.06E-02	8.04E-02	7.38E-04
		18	1.31E-01	1.56E-02	3.07E-03	1.15E-02	2.33E-01	3.53E-03
PROMEDIO		0.180	0.135	0.078	0.052	0.102	0.034	
C	MD	19	3.98E-02	1.16E-01	5.35E-02	3.84E-03	2.29E-02	2.04E-03
		20	1.00E-01	9.41E-02	5.85E-02	1.31E-01	1.68E-01	1.83E-02
		21	1.29E-01	3.39E-05	5.90E-04	1.94E-02	1.44E-05	3.09E-04
	C	22	4.05E-02	1.39E-01	5.52E-02	1.20E-04	5.11E-03	4.04E-02
		23	8.51E-02	1.17E-01	2.50E-02	1.07E-01	5.06E-02	9.97E-02
		24	1.43E-01	7.92E-03	3.47E-03	4.32E-02	7.04E-03	2.74E-03
	MI	25	3.62E-02	9.28E-02	1.82E-02	2.88E-02	3.99E-06	2.90E-05
		26	3.49E-02	1.37E-01	2.67E-02	5.34E-04	2.27E-02	5.15E-05
		27	3.41E-02	3.91E-02	1.69E-03	1.93E-03	2.48E-02	1.27E-06
PROMEDIO		0.071	0.083	0.027	0.037	0.033	0.018	
D	MD	28	7.57E-03	4.10E-02	1.74E-02	5.47E-05	2.16E-02	2.87E-03
		29	3.64E-02	3.05E-02	1.65E-02	1.26E-02	3.54E-02	6.57E-03
		30	3.84E-02	9.13E-03	2.41E-03	8.89E-03	8.26E-03	1.43E-03
	C	31	2.94E-03	4.84E-02	2.59E-02	3.05E-06	2.10E-02	9.62E-02
		32	5.01E-02	5.10E-02	2.83E-02	2.42E-01	3.73E-02	1.05E-01
		33	5.97E-02	2.31E-02	8.60E-03	2.28E-01	2.31E-02	2.54E-02
	MI	34	1.05E-04	2.77E-02	1.03E-02	2.29E-06	9.82E-04	8.13E-06
		35	2.62E-02	1.92E-02	1.08E-02	1.52E-05	3.22E-04	2.67E-05
		36	3.84E-02	6.11E-03	2.05E-03	8.65E-06	1.92E-05	2.04E-05
PROMEDIO		0.029	0.028	0.014	0.055	0.016	0.026	
E	MD	37	2.13E-05	1.33E-02	6.90E-03	6.57E-08	1.69E-02	6.56E-03
		38	1.58E-02	1.26E-02	6.41E-03	5.81E-03	1.40E-02	3.38E-03
		39	2.01E-02	6.61E-03	1.65E-03	9.40E-03	2.32E-03	2.77E-04
	C	40	2.88E-05	1.35E-02	1.28E-02	2.82E-06	1.92E-02	3.44E-02
		41	3.02E-02	1.27E-02	1.23E-02	1.00E-01	1.68E-02	2.52E-02
		42	3.21E-02	5.38E-03	6.59E-03	1.59E-01	4.76E-03	4.99E-03
	MI	43	2.68E-05	8.38E-03	1.08E-02	5.65E-09	2.52E-03	2.53E-03
		44	1.66E-02	6.98E-03	1.01E-02	4.73E-03	1.42E-03	1.59E-03
		45	2.28E-02	4.24E-03	4.66E-03	5.44E-03	5.69E-04	6.32E-04
PROMEDIO		0.015	0.009	0.008	0.032	0.009	0.009	

Como se ha dicho, con la finalidad de cuantificar y localizar los posibles derrames producidos en el tanque “El Salto II”, se obtuvieron los tirantes máximos del flujo, utilizando un limnómetro digital que fue calibrado a una frecuencia de 30Hz con un tiempo de muestreo aproximado a 1 minuto. Esto se realizó en cada uno de los 15 puntos cuya disposición puede ser observada en la **Figura 16**, para un mejor entendimiento de la **Tabla 8**, en la cual vienen mostrados los resultados obtenidos del análisis y procesamiento de los datos, donde vale acotar que se utilizó el criterio de *Chauvinet*, para el rechazo de lecturas anómalas (Después de comprobar la normalidad de la muestra aleatoria y demás parámetros que junto con la explicación y aplicación de este criterio serán presentadas más adelante a manera de anexo), todo esto debido a que se presentó una irregularidad en la medición de tirantes en el centro de la sección **C**; el punto 8 del ensayo en la rápida dentada; donde a pesar que la observación no indicó derrame alguno, sin embargo existían entre los 1800 datos correspondientes a ese punto, mediciones de tirantes máximos superiores a los 0.233m a los que se encuentra el máximo nivel del bordo de las paredes del tanque de amortiguación. Como se dijo con anterioridad los tirantes máximos fueron los que se utilizó para la evaluación del desborde en el tanque, comparándolos con la altura del bordo libre antes dicha, mostrando aquellos valores que sobrepasan este nivel y por ende indican algún derrame, resaltados con “**Negrita**”.

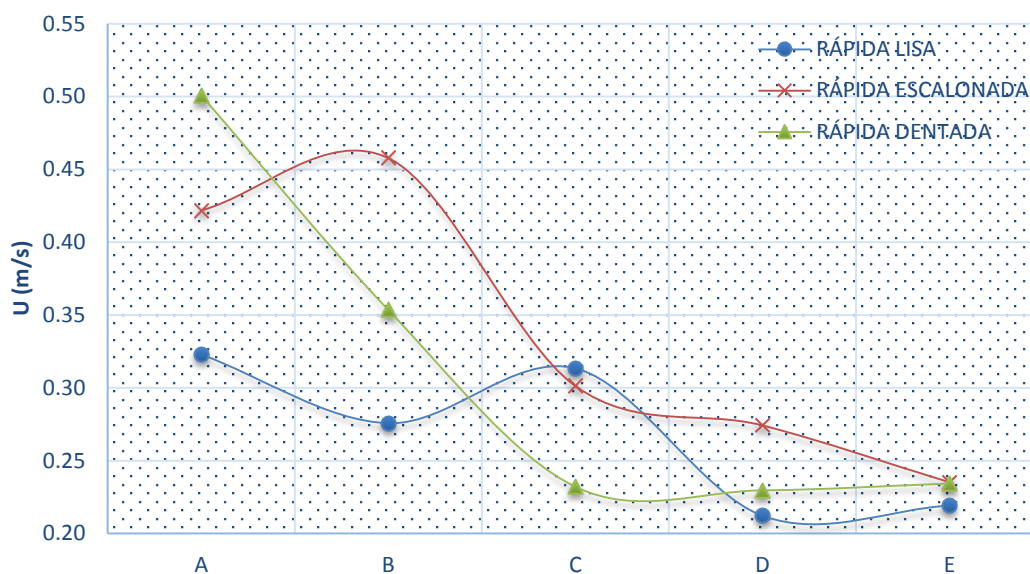
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.

Tabla 8 - Resultado de los tirantes máximos obtenidos en el modelo físico

TIRANTES MÁXIMOS (m)				
	SECCIÓN	Lisa	Escalonada	Dentada
A	1	0.194	0.188	0.195
	2	0.198	0.199	0.194
	3	0.209	0.201	0.208
	PROMEDIO	0.200	0.196	0.199
B	4	0.238	0.224	0.222
	5	0.242	0.238	0.225
	6	0.242	0.235	0.223
	PROMEDIO	0.241	0.233	0.224
C	7	0.237	0.239	0.224
	8	0.238	0.243	0.232
	9	0.236	0.232	0.231
	PROMEDIO	0.237	0.238	0.229
D	10	0.245	0.238	0.228
	11	0.238	0.240	0.231
	12	0.237	0.235	0.230
	PROMEDIO	0.240	0.238	0.230
E	13	0.238	0.233	0.229
	14	0.239	0.234	0.230
	15	0.234	0.234	0.229
	PROMEDIO	0.237	0.234	0.229

La **Gráfica 1** representa las velocidades medias obtenidas en cada punto de estudio y se puede ver que en el ensayo con la configuración inicial, llamado “**Rápida Lisa**”, se obtiene una menor velocidad media del flujo en las secciones **A** y **B**, esto se debe a que dichos puntos se encuentran en donde se produce el resalto hidráulico sumergido y la velocidad del flujo aún no se caracteriza por tener una componente dominante que rija la dirección del flujo, entiéndase esto como que el flujo posee tanto velocidades positivas como negativas que afectan los valores promedios de las velocidades en sus tres direcciones. La mayor velocidad media del flujo se presenta en el punto **A**, ubicado a 0.76m del cimacio, la cual pertenece al ensayo con la rápida dentada, en esta configuración el flujo se acelera debido a la disminución de las secciones que generan

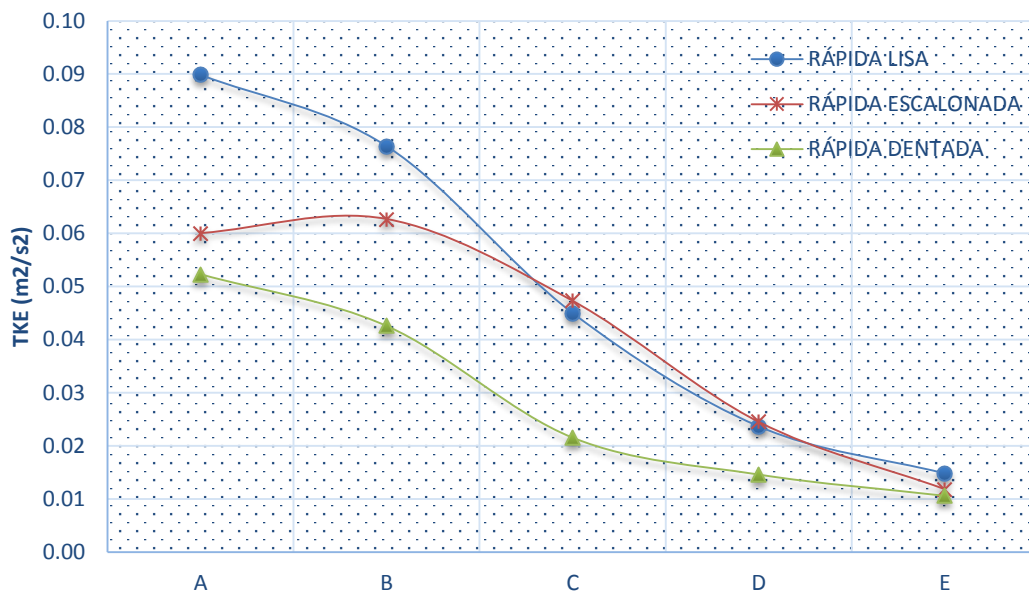
la estrangulación de su configuración geométrica, dando lugar a jets que generan una velocidad dominante en el sentido del flujo.



Gráfica 1 - Velocidades medias modelo físico

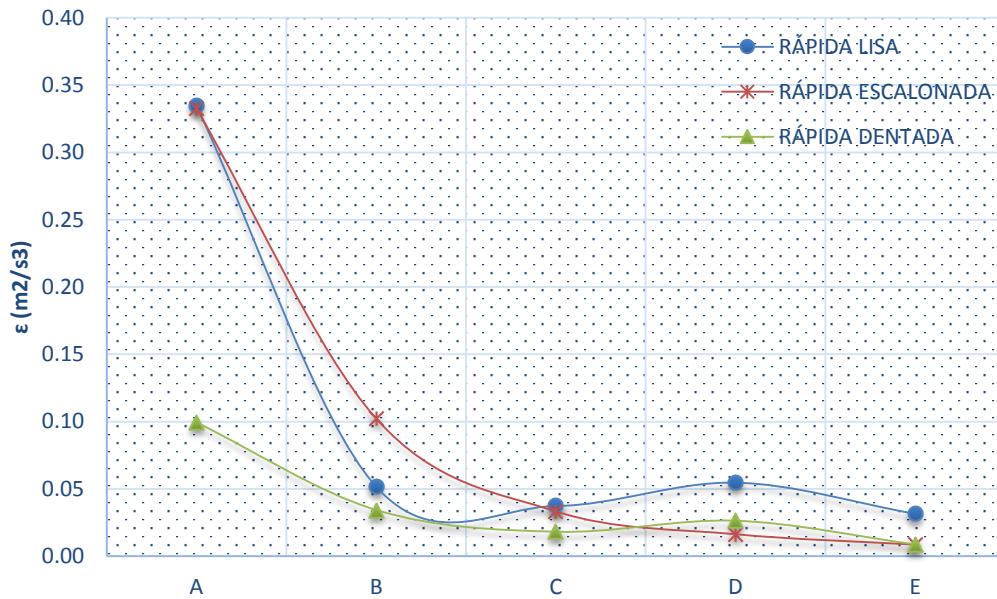
En la **Gráfica 2**, la curva que representa a la configuración inicial, constituida por un vertedor de entrada liso, posee su punto máximo de inflexión en la sección **A**, localizada a 0.36m del cimacio y a 0.03m del final de la rápida, a partir de este punto la **TKE** presenta una disminución del **83.52%** con respecto al punto **E** que tiene una **TKE** cercana a los $0.015\text{m}^2/\text{s}$. La curva correspondiente a la “**Rápida escalonada**” presenta el punto máximo de **TKE** en la sección **B**, ubicada a 0.76m del cimacio del vertedor escalonado, y si bien se produce una disminución de la energía cinética turbulenta con respecto a la configuración original del **33.18%**, esta no ha logrado disminuir en su totalidad el exceso en las oscilaciones del nivel del agua. Por lo anterior se puede evidenciar que la mayor disipación de energía cinética turbulenta viene dada por parte de la rápida dentada, la curva correspondiente a esta propuesta presenta un comportamiento similar a la curva de la rápida lisa, sin embargo tiene una disminución de **TKE** que va del rango del **41.77%** en la sección **A** al **28.48%** en la sección **E**, siendo estos porcentajes con respecto a la “**Rápida Lisa**”. el comportamiento de la **TKE** es debido a la Configuración geométrica de este ensayo ya que se producen más zonas de recirculación que propician una mayor disipación de energía, la cual es mayor que en las otras dos configuraciones; traduciéndose esto en una menor **TKE** en todos los puntos de estudio.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.



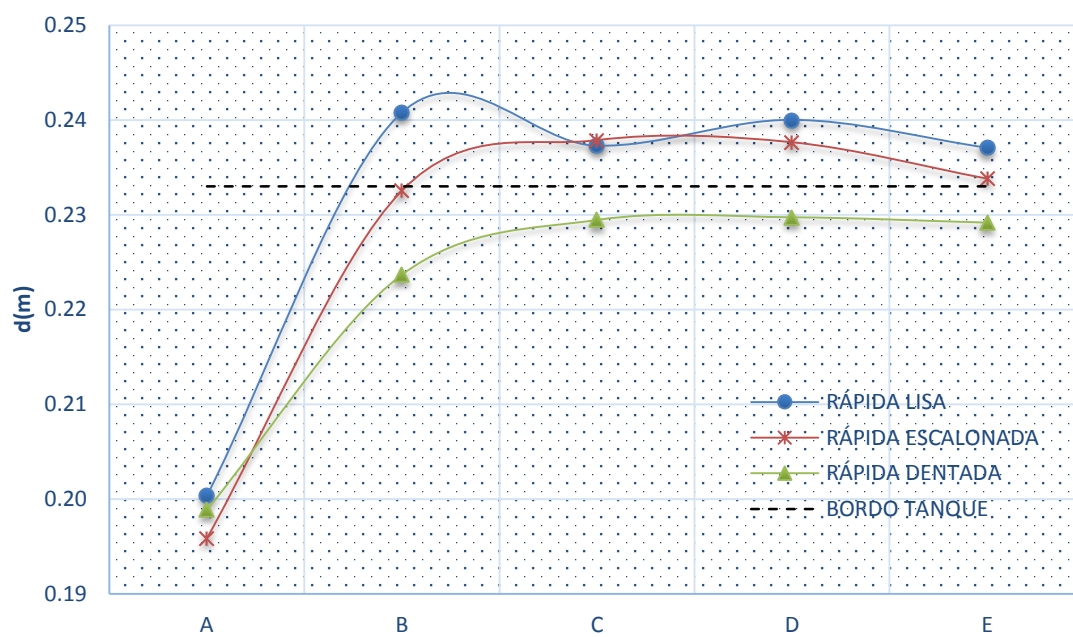
Gráfica 2 -Energía cinética turbulenta TKE obtenida en los modelos físicos

Como se explicó anteriormente, la mayor disipación de energía cinética turbulenta ϵ se produce en las zonas de recirculación del ensayo “**Rápida Dentada**”, dichas zonas se ven favorecidas al contar con mayor recirculación y turbulencia, cabe señalar que esto se realiza sobre la estructura de disipación haciendo que a la llegada al tanque se cuente con una menor TKE. En comparación con el resto de los ensayos se evidencia una mayor ϵ por parte del ensayo “**Rápida Escalonada**” que por el ensayo “**Rápida Lisa**” y esto es por la recirculación que se produce en los escalones al formarse una pseudo plantilla con los vértices de los escalones al paso del flujo de alta velocidad **Gráfica 3**.

Gráfica 3 - Disipación de energía cinética turbulenta DTKE ϵ - ecuación 7.7

Los niveles máximos en cada punto de estudio son mostrados en la **Gráfica 4**, donde están representados para cada sección de estudio con respecto al nivel al que se encuentra el bordo libre del tanque. Como se mencionó con anterioridad la curva que representa el ensayo con el vertedor escalonado en la sección de entrada “**Rápida Escalonada**”, disminuye de un 0.98% al 2.24% el nivel de los tirantes máximos respecto a la configuración original, no obstante no es suficiente para resolver el problema del desbordamiento, no siendo el caso del tercer ensayo “**Rápida Dentada**”, ya que se observa, de una manera clara, que este logra mantener los niveles de tirante máximo por debajo del bordo del tanque, esto es el resultado de que se tenga una mayor disipación de energía en la configuración de la rápida dentada, y por lo tanto, las fluctuaciones del nivel a lo largo de todo el tanque son menores en comparación con las otras dos configuraciones.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.



Gráfica 4 -Tirantes máximos en los diferentes ensayos en el modelo físico

8.2 RESULTADOS MODELO MATEMÁTICO

En la **Tabla 9** se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis de los datos arrojados por el software FLOW-3D, cuyo producto al utilizar el módulo de turbulencia RNG, incluye directamente la energía cinética turbulenta **TKE** junto con su disipación **DTKE** y la demás información hidráulica (tirante hidráulico, velocidad del fluido en sus tres componentes etc.). Dichos resultados son la consecuencia del promedio de los 9 valores (3 en la margen derecha, 3 en la margen izquierda y 3 en el centro) de velocidad media y **TKE** obtenidos en cada una de las 5 secciones (ver en la **Figura 14**), estudiados a cada instante a partir de los 20 segundos de simulación, tiempo en el cual el modelo se ha estabilizado por completo, hasta los 45 segundos momento en el que la variación de la energía cinética es casi inexistente y se puede dar por concluida la simulación como se observa en la **Figura 30**. Estos datos son conseguidos mediante el análisis de los archivos de resultados en formato “.txt” entregado por el software (los cuales fueron divididos en diferentes archivos de número menor o igual a 1048576 filas toleradas por Excel) y posteriormente filtrados y tabulados en Excel.

De la misma manera se obtuvo los valores de la disipación de la energía cinética turbulenta **DTKE**, y son presentados en la **Tabla 10**, recordando que estos son entregados directamente por el software.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.

Tabla 9 - Resultados de velocidad media y TKE obtenidos a través de los ensayos en el modelo matemático

			Velocidad Media U (m/s)			TKE (m2/s2)		
			Sección	Lisa FLOW3D	Escalonada FLOW3D	Dentada FLOW3D	Lisa FLOW3D	Escalonada FLOW3D
A	MD	1	0.349	0.313	0.354	0.005	0.005	0.006
		2	0.265	0.491	0.267	0.008	0.030	0.008
		3	0.470	0.641	0.416	0.014	0.019	0.013
	C	4	0.062	0.593	0.080	0.019	0.049	0.028
		5	0.581	1.076	0.749	0.022	0.014	0.024
		6	1.013	0.598	0.918	0.008	0.013	0.021
	MI	7	0.370	0.308	0.259	0.004	0.005	0.008
		8	0.292	0.402	0.228	0.006	0.033	0.010
		9	0.320	0.579	0.507	0.010	0.021	0.013
		PROMEDIO	0.414	0.556	0.420	0.011	0.021	0.015
B	MD	10	0.308	0.209	0.177	0.019	0.015	0.028
		11	0.110	0.157	0.059	0.046	0.023	0.041
		12	0.517	0.192	0.514	0.049	0.034	0.036
	C	13	0.323	0.549	0.289	0.018	0.028	0.023
		14	0.500	0.808	0.511	0.024	0.023	0.025
		15	0.925	0.972	0.826	0.022	0.007	0.017
	MI	16	0.215	0.161	0.220	0.017	0.017	0.030
		17	0.112	0.122	0.058	0.039	0.025	0.048
		18	0.539	0.264	0.493	0.045	0.033	0.043
		PROMEDIO	0.394	0.381	0.350	0.031	0.023	0.032
C	MD	19	0.121	0.100	0.146	0.023	0.022	0.024
		20	0.055	0.064	0.167	0.032	0.026	0.026
		21	0.207	0.063	0.272	0.033	0.028	0.024
	C	22	0.268	0.590	0.317	0.025	0.020	0.028
		23	0.504	0.757	0.511	0.028	0.016	0.025
		24	0.773	0.849	0.688	0.027	0.007	0.016
	MI	25	0.068	0.060	0.049	0.024	0.024	0.020
		26	0.057	0.048	0.095	0.031	0.028	0.024
		27	0.222	0.151	0.244	0.031	0.028	0.023
		PROMEDIO	0.253	0.298	0.277	0.028	0.022	0.023
D	MD	28	0.038	0.068	0.209	0.018	0.020	0.020
		29	0.016	0.037	0.253	0.021	0.022	0.021
		30	0.008	0.027	0.281	0.022	0.023	0.019
	C	31	0.373	0.552	0.343	0.027	0.016	0.024
		32	0.569	0.670	0.490	0.030	0.012	0.024
		33	0.743	0.709	0.623	0.023	0.007	0.016
	MI	34	0.097	0.077	0.036	0.022	0.020	0.012
		35	0.072	0.077	0.048	0.026	0.023	0.014
		36	0.062	0.082	0.069	0.026	0.023	0.014
		PROMEDIO	0.220	0.255	0.261	0.024	0.018	0.018
E	MD	37	0.123	0.146	0.210	0.017	0.015	0.015
		38	0.118	0.146	0.246	0.021	0.017	0.016
		39	0.111	0.139	0.255	0.020	0.016	0.015
	C	40	0.392	0.480	0.321	0.023	0.012	0.017
		41	0.519	0.539	0.399	0.023	0.009	0.016
		42	0.584	0.509	0.445	0.017	0.007	0.013
	MI	43	0.147	0.135	0.106	0.020	0.015	0.011
		44	0.144	0.145	0.107	0.023	0.016	0.012
		45	0.132	0.141	0.102	0.023	0.015	0.011
		PROMEDIO	0.252	0.264	0.243	0.021	0.014	0.014

Tabla 10 - Resultados DTKE obtenidos a través de los ensayos en el modelo matemático

		Sección	DTKE ϵ (m2/s3)		
			Lisa FLOW3D	Escalonada FLOW3D	Dentada FLOW3D
A	MD	1	4.74E-03	9.76E-03	5.64E-03
		2	1.26E-02	1.86E-01	1.58E-02
		3	6.66E-02	9.59E-02	6.23E-02
	C	4	3.61E-02	2.48E-01	7.73E-02
		5	8.32E-02	8.94E-02	1.09E-01
		6	4.32E-02	7.26E-02	1.85E-01
	MI	7	3.70E-03	9.70E-03	7.46E-03
		8	7.32E-03	1.96E-01	2.06E-02
		9	3.95E-02	9.99E-02	6.24E-02
PROMEDIO		0.033	0.112	0.061	
B	MD	10	2.35E-02	1.40E-02	3.51E-02
		11	9.37E-02	2.86E-02	8.10E-02
		12	1.65E-01	9.20E-02	1.11E-01
	C	13	2.25E-02	3.88E-02	3.15E-02
		14	3.74E-02	4.03E-02	3.95E-02
		15	5.65E-02	1.41E-02	3.58E-02
	MI	16	2.20E-02	1.65E-02	3.80E-02
		17	7.97E-02	3.33E-02	9.23E-02
		18	1.66E-01	9.36E-02	1.18E-01
PROMEDIO		0.074	0.041	0.065	
C	MD	19	2.04E-02	1.78E-02	2.22E-02
		20	3.19E-02	2.26E-02	2.44E-02
		21	4.12E-02	2.85E-02	2.67E-02
	C	22	3.07E-02	2.01E-02	3.09E-02
		23	3.68E-02	1.57E-02	2.87E-02
		24	4.57E-02	7.98E-03	1.81E-02
	MI	25	2.26E-02	2.03E-02	1.43E-02
		26	3.15E-02	2.58E-02	2.05E-02
		27	4.21E-02	3.18E-02	2.45E-02
PROMEDIO		0.034	0.021	0.023	
D	MD	28	1.30E-02	1.35E-02	1.46E-02
		29	1.29E-02	1.36E-02	1.49E-02
		30	1.23E-02	1.32E-02	1.41E-02
	C	31	2.90E-02	1.28E-02	2.18E-02
		32	3.13E-02	8.74E-03	2.05E-02
		33	2.68E-02	5.72E-03	1.46E-02
	MI	34	1.80E-02	1.37E-02	6.86E-03
		35	1.82E-02	1.42E-02	6.69E-03
		36	1.71E-02	1.41E-02	6.54E-03
PROMEDIO		0.020	0.012	0.013	
E	MD	37	1.11E-02	8.41E-03	9.28E-03
		38	1.13E-02	8.39E-03	8.98E-03
		39	1.09E-02	7.95E-03	8.96E-03
	C	40	1.88E-02	7.52E-03	1.14E-02
		41	1.81E-02	5.55E-03	1.03E-02
		42	1.64E-02	5.77E-03	9.50E-03
	MI	43	1.65E-02	7.73E-03	5.76E-03
		44	1.41E-02	7.65E-03	5.23E-03
		45	1.34E-02	7.28E-03	4.83E-03
PROMEDIO		0.015	0.007	0.008	

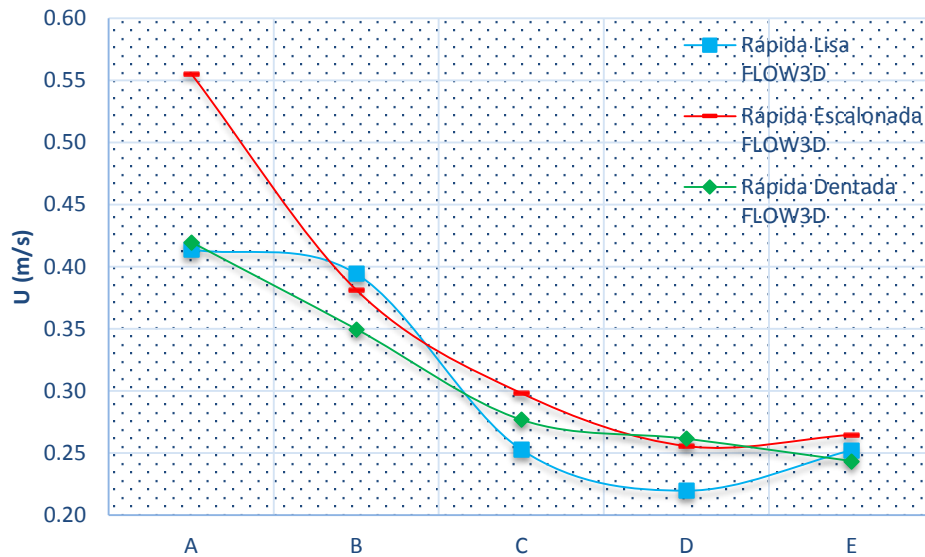
Además, al igual que en el modelo físico se buscó cuantificar y localizar los posibles derrames producidos en el modelo matemático del tanque “El Salto II”, y se obtuvieron los tirantes máximos del flujo entregados directamente por el software. Esto se realizó analizando y filtrando el archivo en busca de sus máximos en cada instante desde los 20 a los 45 segundos en cada uno de los 15 puntos pertenecientes a las 5 secciones de estudio y para un mejor entendimiento de la **Tabla 11**, se presenta la disposición de estos 15 puntos en la **Figura 16**. Las mediciones de tirantes máximos superiores a los 0.233m a los que se encuentra el bordo libre de las paredes del tanque de amortiguación y que por ende indican algún derrame se presentan resaltados con “**Negrita**”.

Tabla 11 - Resultado de los tirantes máximos obtenidos en el modelo matemático

TIRANTES MÁXIMOS (m)				
	SECCIÓN	Lisa FLOW3D	Escalonada FLOW 3D	Dentada FLOW 3D
A	1	0.217	0.223	0.223
	2	0.217	0.225	0.228
	3	0.214	0.221	0.222
	PROMEDIO	0.216	0.223	0.224
B	4	0.213	0.222	0.220
	5	0.221	0.225	0.228
	6	0.214	0.225	0.224
	PROMEDIO	0.216	0.224	0.224
C	7	0.229	0.228	0.238
	8	0.230	0.234	0.239
	9	0.233	0.231	0.237
	PROMEDIO	0.231	0.231	0.238
D	10	0.239	0.241	0.266
	11	0.238	0.237	0.254
	12	0.234	0.240	0.265
	PROMEDIO	0.237	0.239	0.261
E	13	0.243	0.243	0.264
	14	0.241	0.242	0.266
	15	0.245	0.239	0.257
	PROMEDIO	0.243	0.241	0.262

En la **Gráfica 5** se muestra la comparación de los valores de la velocidad media entre los 3 modelos matemáticos, donde se puede observar que las velocidades medias más altas,

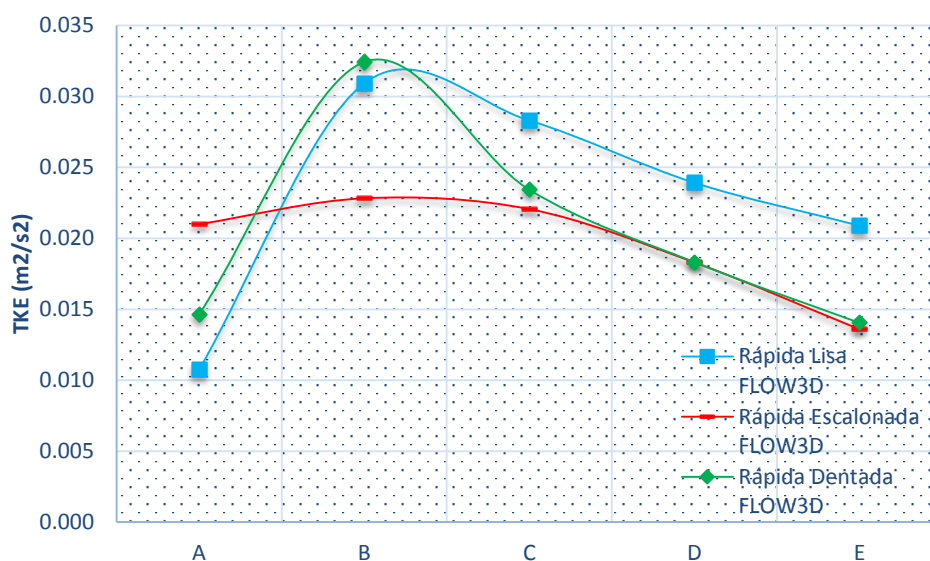
al contrario de lo que uno se podría imaginar, se dan en el modelo “**Rápida Escalonada FLOW3D**”, siendo en la sección **A** mayor con un **34.33%** al modelo matemático con la configuración inalterada “**Rápida Lisa FLOW3D**”, mientras que el modelo matemático “**Rápida Dentada FLOW3D**” en la misma sección es apenas mayor a la configuración inicial en un **1.46%** y menor a la configuración con escalones con **24.47%**.



Gráfica 5 - Velocidades medias obtenidas en los modelos matemáticos

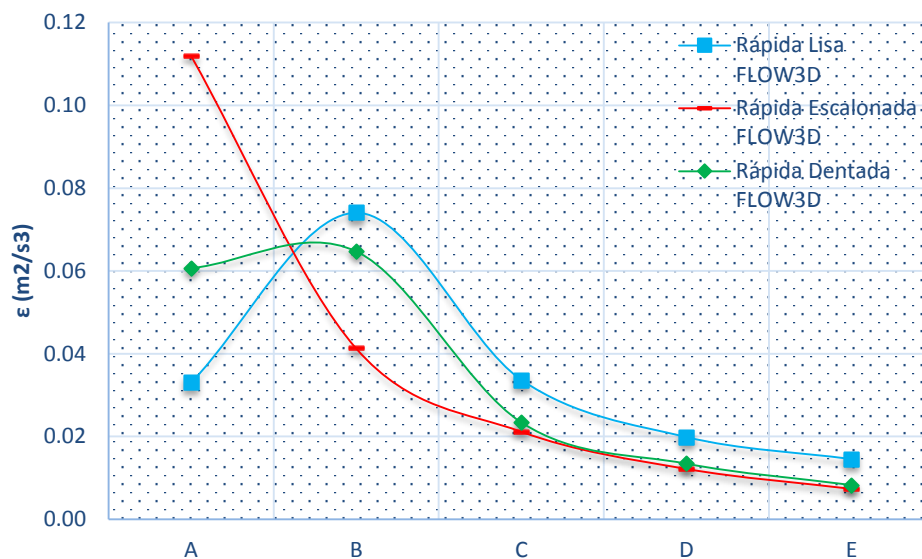
Debido al fenómeno mostrado en la gráfica anterior se observa en la **Gráfica 6** que la energía cinética turbulenta **TKE** en la sección **A**, es mayor para el ensayo “**Rápida Escalonada FLOW3D**” casi duplicando en su valor promedio al modelo matemático “**Rápida Lisa FLOW3D**” llegando a superarlo con un **95.16%**, más sin embargo la mayor **TKE** se encuentra situada a 0.76m del cimacio del vertedor de entrada al taque, en la sección **B**, donde el modelo numérico “**Rápida Dentada FLOW3D**” posee una ligera superioridad del **4.92%** al modelo “**Rápida Lisa FLOW3D**” que de ahí en adelante es mayor a los modelos “**Rápida Escalonada FLOW3D**” y “**Rápida Dentada FLOW3D**” hasta la sección **E** donde los sobrepasa en un **34.94%** y un **32.8%**, respectivamente.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.



Gráfica 6 - Energía cinética turbulenta TKE obtenida en los modelos matemáticos

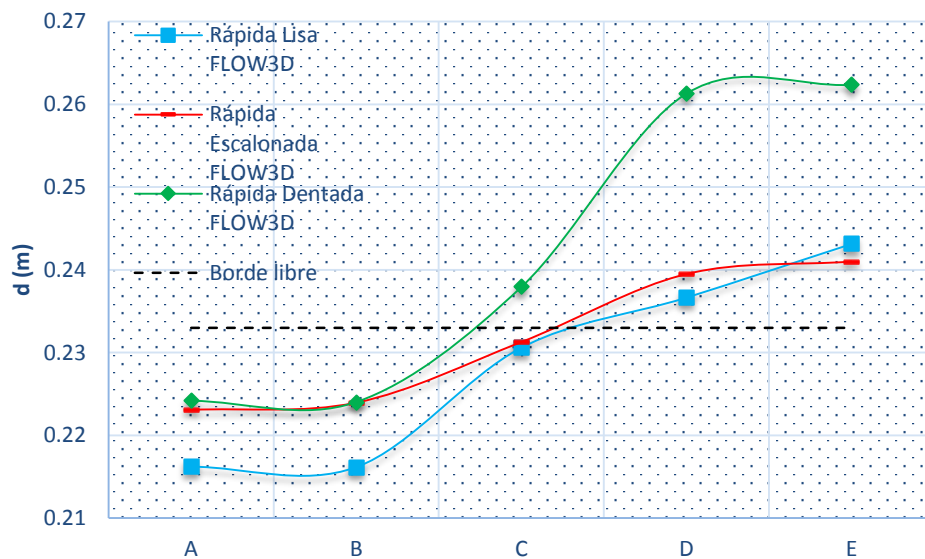
En la **Gráfica 7** se aprecia que el modelo matemático conocido como “**Rápida Escalonada FLOW3D**” posee la mayor disipación de energía cinética turbulenta **DTKE** en la entrada al taque amortiguador, en la sección **A**, donde posee un **239.23%** más disipación que la configuración original. Esto muestra que el modelo matemático con la rápida escalonada posee un mejor comportamiento para la disipación de energía, sin necesitar todo el largo del taque ya que la mayor disipación se produce a la entrada al mismo, de ahí en adelante la disipación es la menor llegando a estar un **49.28%** por debajo del modelo “**Rápida Lisa FLOW3D**”, que posee un comportamiento similar al modelo matemático “**Rápida Dentada FLOW3D**”.



Gráfica 7 - Disipación de energía cinética turbulenta DTKE ϵ , obtenida en los modelos matemáticos

En el modelo matemático se observó que la configuración con deflectores dentados produce mayores variaciones de tirante que las otras dos configuraciones geométricas a lo largo del tanque amortiguador, y como se mostró en la gráfica anterior, donde el modelo “**Rápida Dentada FLOW3D**” disipa menos energía cinética turbulenta, en la **Gráfica 8** se observa que los tirantes máximos sobrepasan en gran medida a la configuración original “**Rápida Lisa FLOW3D**” que mantiene una semejanza en su comportamiento en cuanto a los derrames que el modelo matemático “**Rápida Escalonada FLOW3D**”, es decir ninguno logró evitar que se produzca el desborde del flujo, llegando incluso a maximizar los mismos en el caso de la “**Rápida Dentada FLOW3D**” en un rango que va del **3.18%** al **10.42%** en la zona crítica de derrame (secciones **C, D y E**).

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE UNA RÁPIDA EN LA MODIFICACIÓN DE LA TURBULENCIA Y SUS EFECTOS EN UN TANQUE AMORTIGUADOR TRAPEZIAL.



Gráfica 8 - Tirantes máximos en los diferentes ensayos en el modelo matemático

Abajo en las **Figura 31**, **Figura 32** y **Figura 33** se visualizan los resultados de energía cinética turbulenta **TKE** para las distintas simulaciones y que son presentadas por el software computacional **FLOW-3D**, utilizando la opción de visualización “Analyzed/3D/2D”.

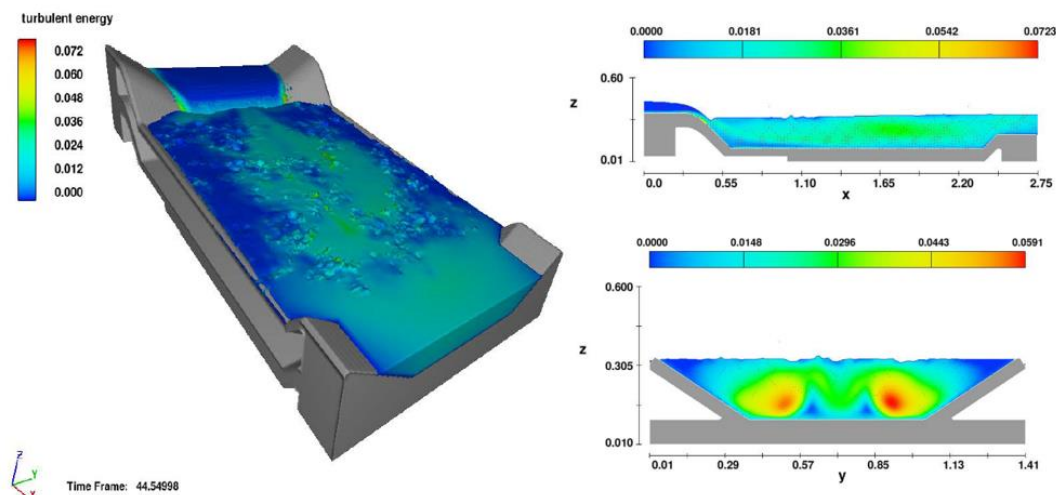


Figura 31 - Visualización de los resultados de TKE del modelo matemático "Rápida Lisa FLOW3D"

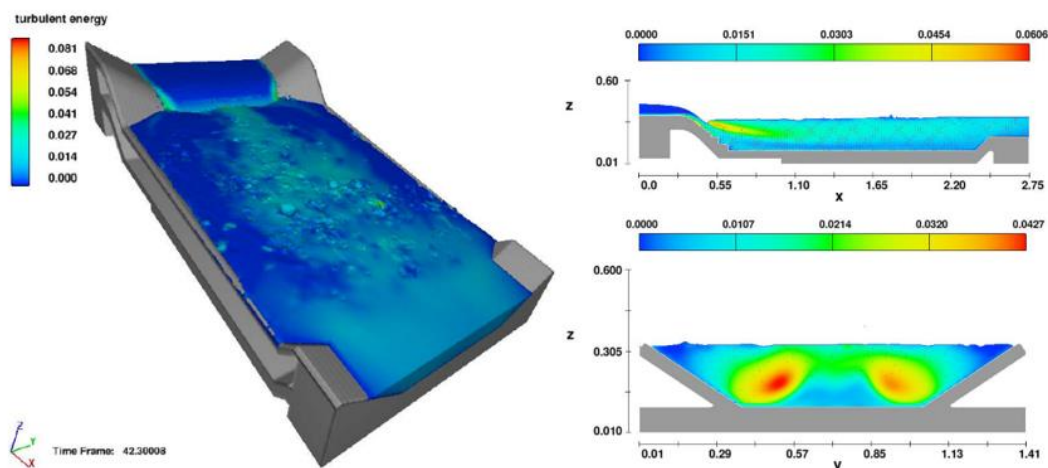


Figura 32 - Visualización de los resultados de TKE del modelo matemático "Rápida Escalonada FLOW3D"

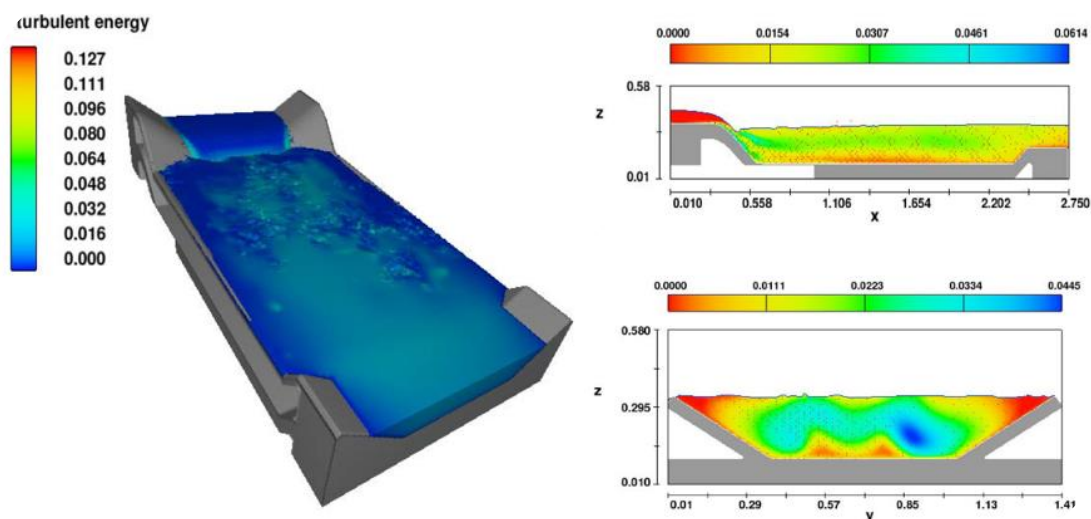


Figura 33 - Visualización de los resultados de TKE del modelo matemático "Rápida Dentada FLOW3D"

8.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS MODELOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS

La **Tabla 12**, presentada abajo muestra los resultados de la velocidad media y su promedio en cada una de las 5 secciones del tanque amortiguador, y pretende la comparación entre el modelo físico y el modelo matemático buscando la validación del mismo. Aquí se puede ver que la modelación matemática, por lo menos los modelos "Rápida Lisa FLOW3D" y "Rápida Escalonada FLOW3D", sobre estiman los valores de velocidad media en comparación con los resultados de sus modelos físicos, a los cuales sobrepasan en un 14% y 3.7% respectivamente, cosa que no sucede en los modelos que poseen deflectores dentados, en su rápida de entrada al tanque, ya que el valor

promedio de su velocidad media, es el mismo para el modelo físico “Rápida Dentada” que para el matemático “Rápida Dentada FLOW3D”.

Tabla 12 - Comparación de velocidades medias U, entre el modelo físico y matemático

VELOCIDADES MEDIAS U (m/s)

SECCIÓN	MODELO FÍSICO			MODELO MATEMÁTICO		
	Rápida Lisa	Rápida Escalonada	Rápida Dentada	Rápida Lisa Flow3D	Rápida Escalonada Flow3D	Rápida Dentada Flow3D
A	0.323	0.422	0.501	0.414	0.556	0.420
B	0.276	0.458	0.354	0.394	0.381	0.350
C	0.313	0.301	0.232	0.253	0.298	0.277
D	0.212	0.274	0.230	0.220	0.254	0.261
E	0.219	0.235	0.234	0.252	0.264	0.243
PROMEDIO	0.269	0.338	0.310	0.306	0.351	0.310

La **Tabla 13** muestra los valores de la energía cinética turbulenta en cada sección a lo largo del tanque “El Salto II”, además del promedio de dicha TKE para cada modelo, pudiendo comparar estos resultados entre los del modelo físico y el matemático. Es así que se evidencia que la TKE de los modelos físicos es mayor a las de los modelos matemáticos en un rango que va desde el 54% entre el modelo “Rápida Lisa” con respecto al “Rápida Lisa FLOW3D” y hasta el 27.4% entre los modelos “Rápida Dentada” y “Rápida Dentada FLOW3D”.

Tabla 13 - Comparación de energía cinética turbulenta TKE, entre el modelo físico y matemático

ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO TKE(m²/s²)

SECCIÓN	MODELO FÍSICO			MODELO MATEMÁTICO		
	Rápida Lisa	Rápida Escalonada	Rápida Dentada	Rápida Lisa Flow3D	Rápida Escalonada Flow3D	Rápida Dentada Flow3D
A	0.090	0.060	0.052	0.011	0.021	0.015
B	0.076	0.063	0.043	0.031	0.023	0.032
C	0.045	0.047	0.022	0.028	0.022	0.023
D	0.024	0.025	0.015	0.024	0.018	0.018
E	0.015	0.012	0.011	0.021	0.014	0.014
PROMEDIO	0.050	0.041	0.028	0.023	0.020	0.021

La disipación de la energía cinética turbulenta DTKE es comparada entre los modelos físico y matemático en la **Tabla 14**, se ve que el modelo matemático no se comporta como indica el físico, ya que la mayor parte de la disipación se da en la sección **A** en todos los ensayos del modelo físico, mientras que por parte de los modelos matemáticos con excepción del modelo “Rápida Escalonada FLOW3D”, la mayor disipación se da en la sección **B**. Asimismo la sub estimación de la DTKE en los modelos matemáticos es evidente.

Tabla 14 - Comparación de la disipación de la energía cinética turbulenta, entre el modelo físico y el matemático

DISIPACIÓN ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA DTKE(m²/s³) EC 7.7

SECCIÓN	MODELO FÍSICO			MODELO MATEMÁTICO		
	Rápida Lisa	Rápida Escalonada	Rápida Dentada	Rápida Lisa Flow3D	Rápida Escalonada Flow3D	Rápida Dentada Flow3D
A	0.335	0.333	0.099	0.033	0.112	0.061
B	0.052	0.102	0.034	0.074	0.041	0.065
C	0.037	0.033	0.018	0.034	0.021	0.023
D	0.055	0.016	0.026	0.020	0.012	0.013
E	0.032	0.009	0.009	0.015	0.007	0.008
PROMEDIO	0.102	0.099	0.037	0.035	0.039	0.034

En las **Tabla 15** se indica los resultados de tirantes máximos obtenidos mediante simulaciones de los modelos matemáticos “Rápida Lisa FLOW3D”, “Rápida Escalonada FLOW3D” y “Rápida Dentada FLOW3D”. Estos resultados a su vez son comparados con los datos experimentales obtenidos a través de las mediciones en el modelo físico con la finalidad de la validación de los modelos matemáticos antes mencionados. Teniendo en cuenta que la altura del bordo libre se encuentra a 0.233 m del fondo del modelo físico, cada valor ha sido comparado con esta medida para identificar los puntos de posible derrame, por lo cual en las **Tabla 15** se marcaron de “**negrita, azul y cursiva**” aquellos valores mayores a dicho límite.

Así se observa que los modelos matemáticos no han logrado controlar y solventar el problema del derrame presentado en el modelo físico de la lisa, y en concreto en el caso del modelo “Rápida Dentada FLOW3D”, no logró disminuir los niveles de tirante máximo

que posee el modelo con la configuración inicial “Rápida Lisa FLOW3D”, cosa que si se hizo en el modelo físico.

Tabla 15 - Comparación de los resultados de tirantes máximos, entre el modelo físico y matemático

TIRANTES MÁXIMOS (m)

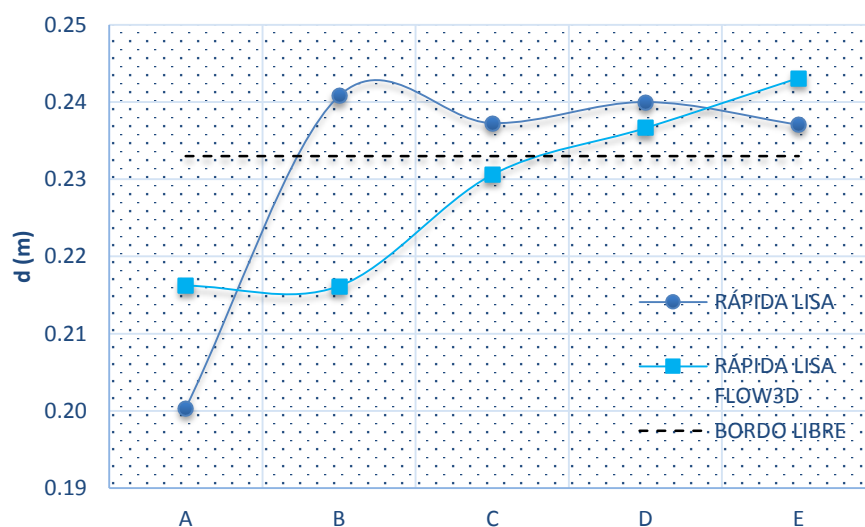
SECCIÓN	MODELO FÍSICO			MODELO MATEMÁTICO		
	Rápida Lisa	Rápida Escalonada	Rápida Dentada	Rápida Lisa Flow3D	Rápida Escalonada Flow3D	Rápida Dentada Flow3D
A	0.200	0.196	0.199	0.216	0.223	0.224
B	<i>0.241</i>	<i>0.233</i>	0.224	0.216	0.224	0.224
C	<i>0.237</i>	<i>0.238</i>	0.229	0.231	0.231	<i>0.238</i>
D	<i>0.240</i>	<i>0.238</i>	0.230	<i>0.237</i>	<i>0.239</i>	<i>0.261</i>
E	<i>0.237</i>	<i>0.234</i>	0.229	<i>0.243</i>	<i>0.241</i>	<i>0.262</i>
PROMEDIO	0.231	0.228	0.222	0.229	0.232	0.242

En la **Gráfica 9**, **Gráfica 10** y **Gráfica 11**, correspondiente a los niveles máximos de tirante obtenidos por el análisis de los datos de los modelos matemáticos que son comparados con sus similares de los modelos físicos.

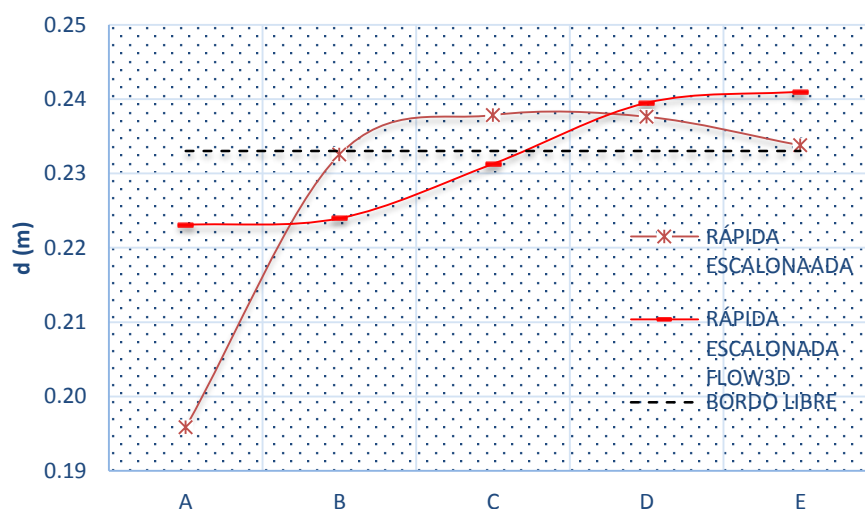
En la **Gráfica 9**, se observa que el modelo matemático aún presenta derrames al igual que en el modelo físico con la diferencia que en el modelo “**Rápida Lisa FLOW3D**”, estos se exhiben a partir y antes de la sección **D**, mientras que en el modelo físico son evidentes desde la sección **B** hasta el final del tanque amortiguador, llegando a tener un desnivel mayor en el modelo físico de un 2.6% en la sección **E**. En la sección **A** ubicada antes del resalto hidráulico, donde no se presenta derrames, el modelo matemático tiene tirantes mayores al modelo físico en un 7.9%, punto a partir del cual los modelos matemáticos presentan subvaloración de los tirantes con respecto a los obtenidos en el modelo físico.

La **Gráfica 10**, presenta un comportamiento muy similar a la gráfica anterior, por parte de las curvas tanto del modelo físico como del matemático, así se observa que el modelo matemático continua presentando derrames al igual que en el modelo físico y de la

misma manera que el modelo anterior solo que las diferencias entre el modelo “**Rápida Escalonada FLOW3D**” y su similar en el modelo físico han aumentado, llegando a ser más grande el modelo matemático en un 13.9% en la sección **A**, punto a partir del cual los modelos matemáticos presentan una vez más subvaloración de los tirantes con respecto a los obtenidos en el modelo físicos hasta la sección **E**, donde el modelo computacional obtuvo un valor mayor al del físico en un 3.1%.

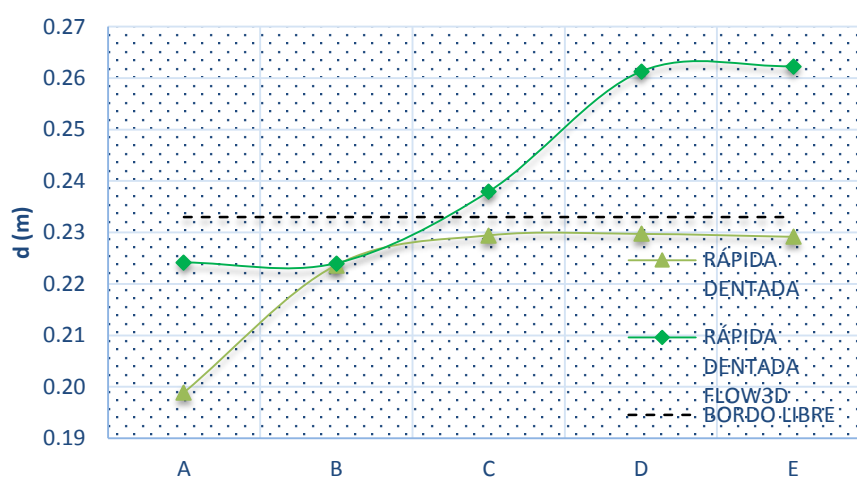


Gráfica 9 - Comparación de tirantes máximos, entre el modelo físico "Rápida Lisa" y el matemático "Rápida Lisa FLOW3D"



Gráfica 10 - Comparación de tirantes máximos, entre el modelo físico "Rápida Escalonada" y el matemático "Rápida Escalonada FLOW3D"

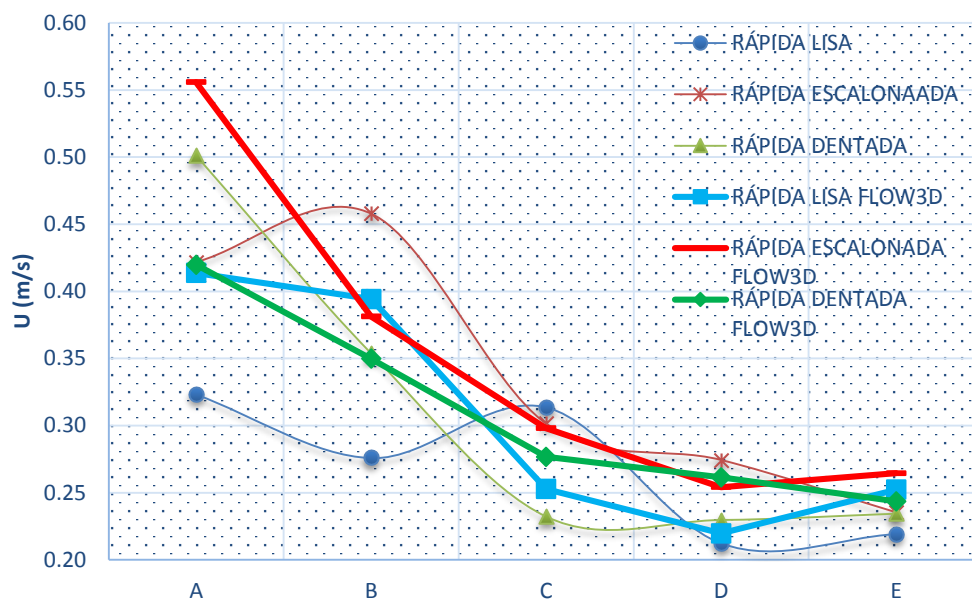
Ahora la **Gráfica 11**, presenta un comportamiento totalmente diferente a los presentados con anterioridad, así se observa que el modelo matemático no solo continua presentando derrames sino que estos se incrementan acentuando el problema, y es que las diferencias de tirante máximo del modelo “**Rápida Dentada FLOW3D**” con respecto a su similar en el modelo físico han aumentado en cada uno de las secciones de estudio, llegando a ser más grande el modelo matemático en un 12.7% en la sección **A** hasta la sección **E**, donde el modelo computacional obtuvo un valor mayor al del físico en un 14.5%.



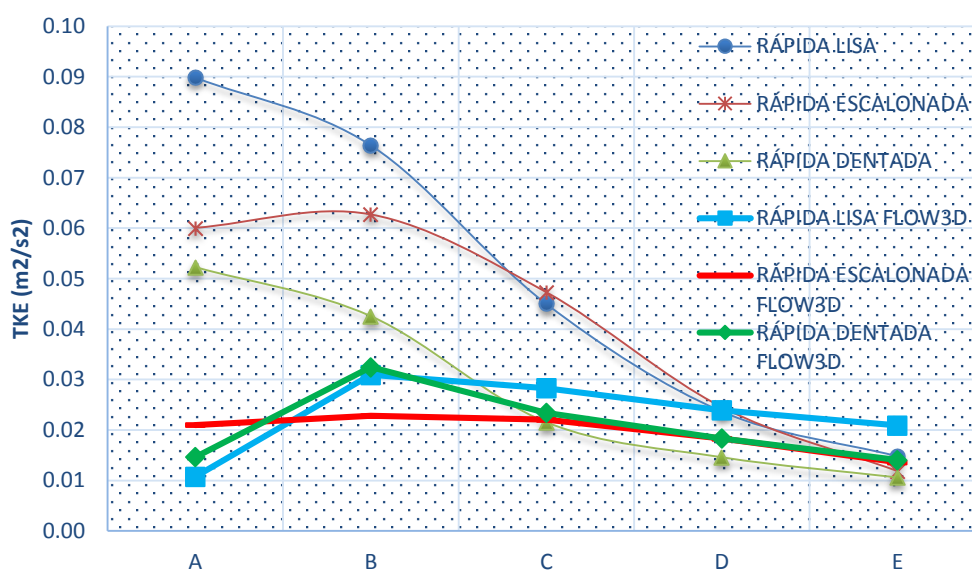
Gráfica 11 - Comparación de tirantes máximos, entre el modelo físico "Rápida Dentada" y el matemático "Rápida Dentada FLOW3D"

En la **Gráfica 12** que es la comparativa de las velocidades medias de todos los modelos físicos y matemáticos, se puede observar las diferencias antes expuestas en la **Gráfica 1** y **Gráfica 5**, ahora presentada en una sola gráfica que además sirve para visualizar de una mejor manera los resultados mostrados en la **Tabla 12**. Ahora bien en la **Gráfica 13** trata las diferencias entre los resultados de TKE en los distintos modelos físicos y matemáticos explicados con anterioridad en la **Gráfica 2** y la **Gráfica 6**, también esta gráfica sirve para ilustrar de una manera más clara los resultados presentados en la **Tabla 13** y donde se aprecia la superioridad en cuanto a energía cinética turbulenta que poseen los modelos físicos, en especial en las dos primeras secciones **A** y **B**, ubicadas a 0.36m y 0.76m del cimacio de la cresta del vertedor de entrada respectivamente, estas poseen una diferencia que va del 65% al 88% en la sección **A** y del 23% al 63.6% en la **B**,

sección a partir de la cual los modelos físicos y matemáticos no presentan mayores discrepancias.



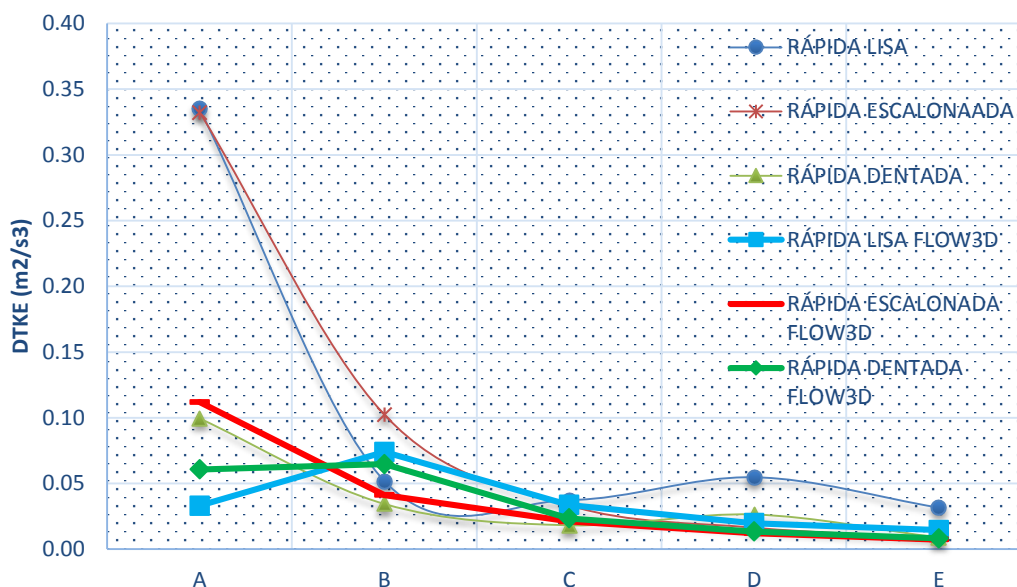
Gráfica 12 - Comparación de resultados de velocidades medias entre los modelos físicos y matemáticos



Gráfica 13 - Comparación de resultados de TKE entre los modelos físicos y matemáticos

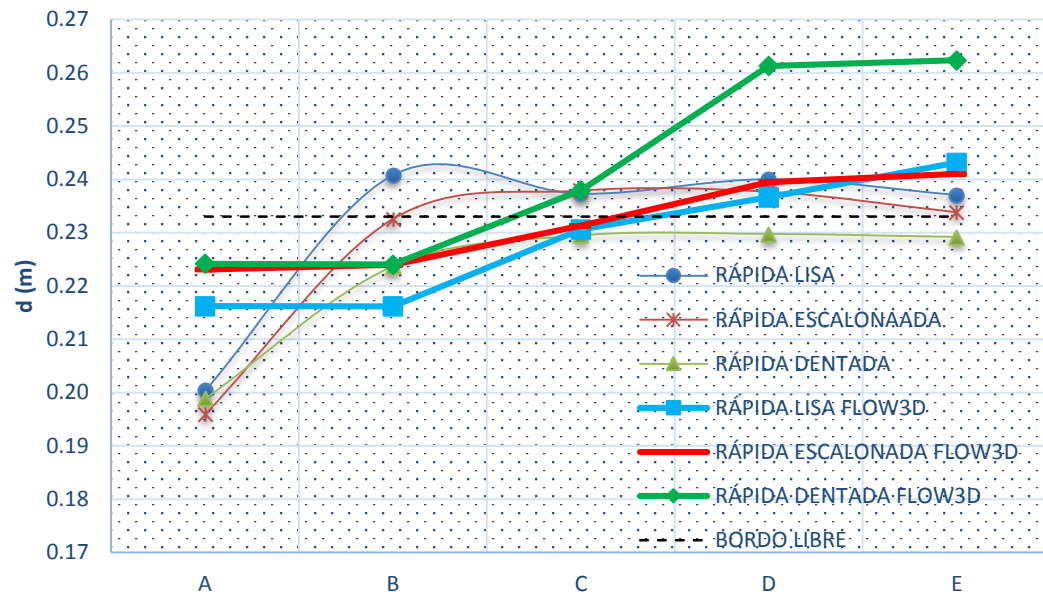
Debido a la gran TKE que se muestra en la sección inicial **A** de la gráfica anterior, es evidente en la **Gráfica 14** que estos ensayos físicos, posean la mayor disipación de energía cinética turbulenta DTKE con valores superiores a los obtenidos por los modelos matemáticos en un **8.96%** hasta un **60.72%** en esta misma sección, sección a partir de la cual ϵ disminuye gradualmente hasta llegar a la sección **B**, donde los modelos

matemáticos continúan mostrando una subvaloración hasta el final de la región en estudio. El comportamiento de los distintos modelos físicos y matemáticos ya fue explicado en la Gráfica 3 y la Gráfica 7 creando esta gráfica para un mejor entendimiento de la **Tabla 14**.



Gráfica 14 - Comparación de resultados de disipación de TKE entre los modelos físicos y matemáticos

El tener una menor disipación de la TKE produce menor control en los desniveles de la superficie libre del flujo dentro del tanque en estudio, lo que se traduce en tirantes máximos más grandes por parte de los modelos matemáticos. Ante esto para una mejor visualización de los resultados se presenta una sola gráfica producto de la unión de las ya expuestas Gráfica 9, Gráfica 10, y **Gráfica 11** para dar esta **Gráfica 15** con la comparación de los tirantes máximos entre los distintos modelos físicos y matemáticos expuestos en la **Tabla 11**. Aquí se evidencia que el ensayo sobre el modelo físico denominado “**Rápida Dentada**” cumple con el cometido de esta tesis al solucionar los posibles problemas de derrame, pero en cuanto a su par en la modelación matemática el modelo computacional “**Rápida Dentada FLOW3D**”, no se ha conseguido que este represente de una manera correcta el fenómeno, por lo que se debería intentar con otro modelo de turbulencia como es el modelo de grades vórtices o mejor conocido como LES.



Gráfica 15 - Comparación de resultados de tirantes máximos entre los modelos físicos y matemáticos

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Los ensayos en el modelo físico con el vertedor escalonado en la sección de entrada “**Rápida Escalonada**”, disminuyen de un **0.98%** al **2.24%** el nivel de los tirantes máximos respecto a la configuración original; sin embargo, esta reducción es insuficiente para evitar el desbordamiento, ya que este disminuye pero continua presente.

En el tercer ensayo se encontró que el modelo “**Rápida Dentada**” logra mantener los niveles de tirante máximo por debajo del bordo del tanque de disipación trapezoidal, que en si es inestable, esto es el resultado de que se tenga una mayor disipación de energía en la configuración de la rápida con deflectores en forma de dientes, y por lo tanto las fluctuaciones del nivel a lo largo de todo el tanque son menores obteniendo un rango de reducción de tirante que van desde un **3.29%** a un **4.28%** en la zonas críticas de derrame (secciones **C, D y E**).

Se mostró que por medio de la utilización de 15 deflectores dentados intercalados en dos filas ubicadas en la rápida de entrada al tanque de disipación trapezoidal, se logró evitar el desbordamiento de este tanque de disipación poco convencional (por ser de sección transversal trapezoidal).

De manera adicional como ya se indicó, se realizaron varias modelaciones matemáticas con algunos comentarios; donde se expuso que la “**Rápida Lisa FLOW3D**” y “**Rápida Escalonada FLOW3D**”, sobre estiman los valores de velocidad media en comparación con los resultados de sus modelos físicos, a los cuales sobrepasan en un **14.04%** y **3.74%**, respectivamente, no siendo el caso del modelo “**Rápida Dentada FLOW3D**” que posee un comportamiento y valores de velocidad media similares al físico “**Rápida Dentada**”.

En lo que concierne a la TKE, en términos generales, fue mayor en los modelos físicos que en los modelos matemáticos, en un rango que va desde el **54.03%** entre el modelo “**Rápida Lisa**” con respecto al “**Rápida Lisa FLOW3D**”, un **52.63%** mayor entre el modelo “**Rápida Escalonada FLOW3D**” y el físico “**Rápida Escalonada**”, para terminar con un **27.35%** entre los modelos “**Rápida Dentada**” y “**Rápida Dentada FLOW3D**”. Así mismo, esta sub estimación por parte de los modelos matemáticos se mantiene en la DTKE,

siendo el modelo físico mayor en un rango que va desde el **65.69%** para la “Rápida Lisa” con respecto al “**Rápida Lisa FLOW3D**” llegando a tener la diferencia más pequeña entre los modelos “**Rápida Dentada**” y “**Rápida Dentada FLOW3D**”, donde este último es menor en un **8.96%**. Y finalmente esta subestimación por parte de los modelos matemáticos antes mencionada, se traduce en una sobreestimación de los tirantes máximos por parte de los mismos, ya que se evidencia que estos no lograron controlar los derrames, inclusive incrementándolos con respecto a sus pares de los modelos físicos, siendo un **1.85%** mayor en relación al modelo “**Rápida Escalonada**” y con un **8.89%** al modelo físico “**Rápida Dentada**”.

En estos trabajos, los modelos matemáticos hasta la fecha no han logrado caracterizar de una manera correcta la turbulencia y su disipación, no logrando controlar y solventar el inconveniente del derrame presentado en el modelo físico con la configuración geométrica original.

En la Hidráulica una de las partes más importantes para la validación de un diseño, es la modelación física, la cual permite el estudio y visualización del comportamiento hidráulico de las estructuras diseñadas. Además, se notó que con el uso de los deflectores en forma de dientes, propuestos en esta tesis, el flujo presenta un mejor comportamiento ante el desbordamiento. Por otra parte, a pesar de que se obtuvieron valores similares entre el modelo físico y computacional, este último aún no es validado en su totalidad, por lo que es necesaria la afinación del modelo matemático, la modificación de sus parámetros y probar modelo de turbulencia como es el modelo de grades vórtices o mejor conocido como LES, con la finalidad de obtener mejores resultados al describir el fenómeno en cuestión.

REFERENCIAS

1. Amador, A. (2005). "Comportamiento hidráulico de los aliviaderos en presas de hormigón compactado," PhD, UPC, Barcelona
2. Chanson, H. (1992). Uniform Aerated Chute Flow - Discussion.
3. Chanson, H (1994). Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. Journal of Hydraulic Research. Vol 30. 1994. nº 2.
4. Chanson, H (1995). Hydraulic design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways.
5. Chanson, H. (2002). The hydraulics of stepped chutes and spillways.
6. Choudhury, D. (1993). Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling.
7. De Dios, Angulo, Del Blanco, & Liscia (2010) Modelación matemática y física de un vertedero modificado.
8. Elviro García, V. y Mateos Iguácel, C. (1995). Spanish research into stepped spillways. Hydropower & Dams September.
9. Flow Science, Inc. (2009). FLOW-3D User manual version 9.4.
10. González, C. (2007). Diseño hidráulico de vertedores escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental.
11. Gracia Sánchez. J, Franco. V & Fuentes Mariles. O. (2011). Salto hidráulico oblicuo en tanques amortiguadores de sección transversal trapezoidal.
12. Hager, W. (1991). Experiments on Standard spillway flow.
13. Mastache. V (2013). Caracterización de un flujo Turbulento en un Tanque amortiguador a partir de una técnica experimental con ADV y modelación matemática en Flow3D.

14. Ohtsu, I. y Yasuda (2004). Flow characteristic of skimming flows in stepped channels. Journal of Hydraulic Engineering.
15. Peterka, A. J. (1978). "Hydraulic Design of Stilling Basin and Energy Dissipators", U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington, D.C.
16. Rendón, R. (1984). Diseño hidráulico de vertedores escalonados.
17. Sandeep y Ramesh (2000). Design of Stepped spillway for skimming flow regime.
18. SRH. (1967) "Diseño de presas pequeñas" México. D.F.
19. Tozzi, M. J. (1992). "Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros comparamento em degraus [Characterization of flow behavior in stepped spillways]".